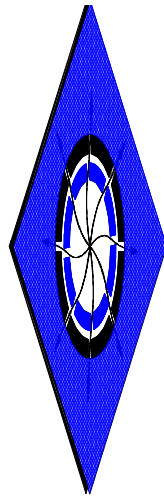


М. А. Промтов

**ПУЛЬСАЦИОННЫЕ
АППАРАТЫ
РОТОРНОГО ТИПА
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА**



**МОСКВА • ИЗДАТЕЛЬСТВО "МАШИНОСТРОЕНИЕ" • 2001
"ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1"**

**ПУЛЬСАЦИОННЫЕ
АППАРАТЫ
РОТОРНОГО ТИПА:
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА**

ПРЕДИСЛОВИЕ

Пульсационные аппараты роторного типа известны в технике и технологии уже более сорока лет. Наибольшее применение эти аппараты нашли в химической и смежных с ней технологиях. Конструктивная схема пульсационных аппаратов роторного типа чрезвычайно проста и представляет собой симбиоз гидродинамической сирены и дезинтегратора. Казалось бы, за такой большой срок и в силу простоты конструкции эти аппараты должны быть хорошо исследованы, закономерности их работы изучены и формализованы в математическом виде. Но кажущаяся простота принципа работы пульсационных аппаратов роторного типа несет в себе простоту в механическом смысле и сложность в гидродинамическом и акустическом описании. Вероятнее всего в силу многообразия и сложности физических и химических процессов, протекающих в жидкой среде при обработке в пульсационном аппарате роторного типа, тормозится их широкое внедрение в промышленность.

Предлагаемая работа является обобщением результатов исследований пульсационных аппаратов роторного типа, которым автор посвятил пятнадцать лет научной деятельности. Автор базировался на фундаментальных и прикладных исследованиях, проведенных в данном направлении М. А. Балабудкиным, В. Ф. Юдаевым, А. М. Балабышко, А. И. Зиминим, В. П. Ружицким и многими другими исследователями.

Основное назначение данной работы - это ознакомление специалистов, работающих в области процессов и аппаратов химической технологии, с возможностями использования пульсационных аппаратов роторного типа в гидромеханических и теплообменных процессах и основами инженерных методов расчета этих аппаратов. Необходимо отметить, что перспективным направлением интенсификации химико-технологических процессов является применение аппаратов с высокоэнергетическим, многофакторным воздействием, к которым относятся пульсационные аппараты роторного типа.

Автор приносит благодарность А. И. Зимину, М. В. Монастырскому и В. М. Червякову за совместные исследования в данном направлении, обсуждение их результатов, советы и замечания, а также В. В. Титову за помощь в подготовке материала к печати.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация химико-технологических процессов и повышение эффективности технологического оборудования является одной из приоритетных задач развития науки и

техники. Основой повышения качества продукции, увеличения производительности и снижения энергозатрат на проведение химико-технологических процессов служит разработка высокоэффективных технологических аппаратов с оптимальной удельной энергоемкостью и материалоемкостью, высокой степенью воздействия на обрабатываемые вещества.

В настоящее время перспективным научно-техническим направлением является разработка высокоэффективных аппаратов с многофакторным воздействием на обрабатываемую среду за счет дискретного ввода в рабочую зону массы и энергии большой плотности.

К аппаратам, реализующим метод дискретного, многофакторного энергетического воздействия на химико-технологические процессы относят пульсационные аппараты роторного типа (ПАРТ), принцип работы которых основан на нестационарности потоков вещества, энергии и импульса. Интенсификация химико-технологических процессов в ПАРТ обусловлена многофакторным воздействием на обрабатываемую жидкую гетерогенную среду, заключающемся в пульсациях давления и скорости потока жидкости, развитой турбулентности, интенсивной кавитации, пульсациях давления в локальных объемах жидкости при пульсациях и схлопывании кавитационных пузырьков, жестком кумулятивном воздействии, высоких сдвиговых и срезающих усилиях, активации жидкости. ПАРТ позволяют достичь больших значений плотности гидродинамической и гидроакустической энергии. В рабочих объемах аппарата за счет малых интервалов времени воздействия локализуется значительная мощность в потоке обрабатываемой жидкости.

ПАРТ зарекомендовали себя как достаточно эффективные устройства для проведения и интенсификации гидромеханических и массообменных процессов в различных отраслях промышленности: в химической промышленности они используются для приготовления различных дисперсий и эмульсий, интенсификации массообменных процессов; в фармацевтической и косметической - для экстрагирования лекарственных веществ из растительного сырья, приготовления витаминных препаратов, кремов, мазей и т.п.; в металлургической и горнодобывающей промышленности - для проведения процессов выщелачивания и получения рабочих жидкостей механизированных шахтных крепей; в топливно-энергетической промышленности - для приготовления водо-топливных эмульсий; в машиностроении - для приготовления смазочно-охлаждающих жидкостей, а также во многих других отраслях промышленности, список которых можно продолжить с указанием примеров конкретного практического их использования.

Вместе с тем ПАРТ достаточно просты в конструкции, их изготовление не требует сложных технологий, они надежны и эффективны в эксплуатации. Низкая энергоемкость ПАРТ обусловлена тем, что обрабатываемая жидкость является одновременно и источником и объектом гидромеханических колебаний. В ПАРТ отсутствуют промежуточные трансформаторы энергии, механическая энергия непосредственно преобразуется в акустическую и кавитационную энергию, благодаря чему КПД действия аппарата достаточно высок. Высокоэнергетическое дискретное воздействие на обрабатываемые вещества в ПАРТ инициирует их качественные преобразования, активацию жидкости.

В то же время, в связи со сложностью и многообразием всего комплекса многофакторного воздействия на обрабатываемую жидкость в ПАРТ, актуальными являются такие проблемы: всестороннее исследование физических, физико-химических и химических явлений, имеющих место в ПАРТ при обработке жидких гетерогенных сред под воздействием мощных пульсационных течений, импульсной акустической кавитации, автоколебательных и резонансных эффектов, существенно влияющих на интенсивность технологических процессов; научное обоснование и разработка высокоэффективных технологических аппаратов с импульсным воздействием на обрабатываемую жидкую гетерогенную среду; широкое внедрение в промышленность гидромеханических аппаратов с многофакторным импульсным высокоэнергетическим воздействием; исследование комплексного воздействия на обрабатываемую гетерогенную жидкость различных физических факторов, интенсифицирующих химико-технологические процессы.

Таким образом, необходимо дальнейшее теоретическое и экспериментальное исследование всего комплекса эффектов и процессов протекающих в ПАРТ. Решение этих задач описывается в предлагаемой монографии.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

A - работа, Дж;

a - ширина канала, м;

B - коэффициент гидравлических потерь;

b - расстояние между двумя ближайшими стенками соседних каналов, м;

C - концентрация, кг/м³;

c - скорость звука, м/с;

D - диаметр кумулятивной струйки, м; коэффициент диффузии, м²/с;

d - размер частиц, м;

E - энергия, Дж;

F - движущая сила процесса;

f - частота, Гц;

G - критерий Кохрена;

J - поток массы вещества, кг/м · с;

h - высота канала, м;

I - сила тока, А;

i - количество перенесенного вещества, кг; число циклов;

K - индекс кавитации;

k - коэффициент;

L - величина перемещения частицы, м;

l - длина, м;

M - момент, Н · м;

m - масса;

N - мощность, Вт;

n - частота вращения ротора, об/с; количество пузырьков; количество граней;

P - давление, Па;

Q - расход, м³/с;

R - радиус, м;
 r - расстояние, м;
 S - площадь, м²;
 t, T - время, с; сила трения, Н;
 t - температура, К;
 U - напряжение, В;
 V - скорость, м/с;
 W - безразмерная скорость;
 x - координата, м;
 y - координата, м;
 z - число каналов;
 α - объемное газосодержание, угол;
 β - коэффициент количества движения, коэффициент массоотдачи, м/с; угол;
 χ - коэффициент;
 δ - зазор между ротором и статором, м;
 ε - коэффициент, удельная энергия, Дж/кг;
 γ - коэффициент, показатель политропы;
 η - коэффициент турбулентной вязкости, Па · с;
 φ - коэффициент;
 λ - коэффициент сопротивления трению;
 μ - коэффициент динамической вязкости, Па · с;
 ρ - плотность вещества, кг/м³;
 σ - поверхностное натяжение, Н/м; предел прочности, Па; квадратичное отклонение;
 τ - безразмерное время, напряжение, Н/м²;
 υ - объем;
 ω - угловая скорость, с⁻¹;
 ξ - коэффициент местного гидравлического сопротивления;
 ψ - функция амплитудная.

ИНДЕКСЫ

p - ротор;
 c - статор;
 k - камера;
 ε - эквивалентный;
 o - начальный;
 n - насыщенный пар;
 $кав$ - кавитационный;
 min - минимальный;
 max - максимальный;
 mpr - номер моды колебаний;
 t - твердое;
 m - амплитуда;
 $кв$ - квадратичный;
 L - жидкость;

Г - газ;
Н - насос;
l - единичный.

КРИТЕРИИ

$Ho = Vt/2l$ - гомотронности;
 $Re = Vd\rho/\mu$ - Рейнольдса;
 $Sh = 2l/Vt$ - Струхаля;
 $Ro = (a_c/2l_s)^2$ - ротационный;
 $Pr = \mu/(\rho D)$ - Прандтля;
 $Cn = 1/(Ho + 1)$ - нестационарности;
 $Ko = (a_p/R_p)^2$ - Кориолиса;
 $Ma = V/c$ - Маха;
 $We = 2\sigma/R$ - Вебера;
 $Ta = R_p^{0,5} \delta^{0,5} \omega\rho/\mu$ - Тейлора;
 $Re_{oc} = 2V_{oc}\delta\rho/\mu$ - Рейнольдса осевой;
 $Re_m = \omega R_p \delta\rho/\mu$ - Рейнольдса модернизованный.

СОКРАЩЕНИЯ

ПАРТ - пульсационные аппараты роторного типа;
РИКА - роторный импульсно-кавитационный аппарат;
РПА - роторно-пульсационный аппарат;
РАМП - роторный аппарат с модуляцией потока;
ХТА - химико-технологическая аппаратура;
ХТП - химико-технологический процесс;
ХТС - химико-технологическая система;
ФХЭ - физико-химический эффект.

1. ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТОВ РОТОРНОГО ТИПА ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

1.1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В настоящее время одним из перспективных методов интенсификации химико-технологических процессов (ХТП) и повышения эффективности химико-технологической аппаратуры (ХТА) признаются методы, основанные на применении различных физико-химических эффектов, использующих внутренние и внешние источники энергии [1 - 10].

Под интенсификацией химико-технологических процессов в широком смысле понимают получение прямого или косвенного экономического эффекта за счет увеличения производительности, КПД, уменьшения энерго- и материалоемкости, длительности лимитирующих стадий, повышения качества продукта, эргономических и социальных показателей.

Все перечисленные параметры являются целевыми функциями интенсификации. При интенсификации ХТП предпринимают целенаправленное изменение какой-либо группы факторов, которые оказывают влияние на целевые функции. Различают два вида задач интенсификации:

- 1) совершенствование существующих химико-технологических систем (ХТС);
- 2) разработка принципиально новых ХТС [3 - 11].

Под ХТС понимают ХТП, реализуемый в ХТА.

Для количественной характеристики интенсивности ХТП используют выражение $i = M/(St)$, которое показывает количество перенесенного вещества (энергии) - M , кг (Дж) через единицу площади (объема) - S , м² (м³) за единицу времени - t , с [9 - 11].

Выявляя зависимость i от основных геометрических и режимных параметров ХТС, физических параметров обрабатываемой среды, определяют необходимость увеличения или уменьшения указанных параметров для увеличения i [9]. Критерий i получен на основе линейных кинетических уравнений, которые в ряде случаев не охватывают всего многообразия и сложности явлений тепло- и массопереноса [12 - 14].

Линейные законы переноса типа $dM/dt = kSF$, где F - движущая сила процесса; k - коэффициент скорости технологического процесса, могут быть обоснованы только в предположении о незначительности отклонения рассматриваемого процесса от состояния термодинамического равновесия и малости градиентов потенциалов переноса. Для анализа нелинейных соотношений между потоком переноса и градиентом потенциала используют принципы термодинамики необратимых процессов [15, 16]. Критерий i аналогичен потоку $dJ = dM/(dSdt)$ в термодинамике необратимых процессов.

Для большинства тепломассообменных, ряда гидромеханических процессов при инженерных решениях по выбору факторов, на которые необходимо воздействовать для увеличения i , можно использовать пропорциональность M параметрам S , F и k . Обычно для интенсификации тепломассообменных процессов применяют перемешивание, дискретно-импульсный ввод энергии, специальные физические эффекты и организацию потоков. Для

интенсификации механических и гидромеханических процессов необходимо активное влияние на движение отдельных элементов жидкости, газа и твердых тел [3 - 9, 17, 18].

Методы интенсификации ХТП (рис. 1.1.1) разделяют на комплексные, при которых ХТС рассматривают как единое целое, и декомпозиционные методы, выявляющие и классифицирующие отдельные стадии ХТП или элементы ХТА [9]. Декомпозиционные методы можно разделить на две, тесно связанные между собой группы: режимно-технологические и аппаратурно-конструктивные [9]. Выделяют также методы пассивные, которые не требуют прямых затрат внешней энергии и активные, которые требуют затрат внешней энергии [17]. Между режимными и конструктивными, активными и пассивными методами нельзя провести четкую границу. Пассивные методы также требуют затрат энергии, но энергия расходуется не в явном виде. Использование нового для ХТП режимного метода, как правило сопряжено с определенными изменениями ХТА с использованием конструктивных методов. В этом случае можно провести аналогию между режимными и конструктивными методами, конструктивными и пассивными методами. Многие режимные и конструктивные методы связаны между собой, и здесь целесообразно применять комплексный подход в решении задач интенсификации ХТП [3 - 11, 17, 20].

Классификация методов ХТП дана в табл. 1.1 и показана на рис. 1.1.1. Каждый из методов интенсификации основывается на определенных физико-химических эффектах (ФХЭ). В табл. 1.1. указаны номера наиболее используемых ФХЭ, список которых приведен ниже.

1.1. Методы интенсификации

Режимные	Конструктивные
Совмещение технологических процессов: ФХЭ №№ 5, 8, 9, 12, 14, 20	Совмещение аппаратов: ФХЭ №№ 1, 2, 3, 10, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24
Использование внутренних источников энергии: ФХЭ №№ 1, 2, 3, 4, 6, 12	Использование внешних источников энергии. ФХЭ №№ 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22
Оптимизация режимных параметров: ФХЭ №№ 1, 2, 5, 13, 14	Оптимизация конструктивных параметров: ФХЭ №№ 1, 11, 24
Введение дополнительного вещества в рабочую зону: ФХЭ №№ 5, 7, 9	Введение специальных элементов в аппарат: ФХЭ №№ 6, 10, 11, 19, 20, 21, 22
Дискретно-импульсный ввод энергии: ФХЭ №№ 2, 3, 4, 19	
Создание нестационарностей (температуры, давления, концентрации, плотности и т.п.): ФХЭ №№ 1, 2, 5, 6, 10	
Наложение полей (магнитного, электрического, акустического, электромагнитного): ФХЭ №№ 2, 6, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24	

Физико-химические эффекты:

1. Турбулентность - интенсивное перемешивание жидкости, пульсации скорости и давления в жидкости при ее течении.
 2. Кавитация - разрыв сплошности жидкости под действием растягивающих напряжений, приводящих к образованию пузырьков, наполненных газом и паром.
 3. Кумулятивный эффект - усиленное в определенном направлении действие резкого изменения давления (взрыв, схлопывание пузырьков и т.п.).
 4. Гидроудар - результат резкого изменения давления в жидкости, вызванный мгновенным изменением скорости ее течения в трубопроводе.
 5. Инверсия фаз - переход вещества из одного агрегатного состояния в другое.
 6. Эффект Кармана (вихреобразование) - периодический срыв вихрей при обтекании тела потоком газа или жидкости.
 7. Эффект Ребиндера - снижение поверхностного натяжения жидкости под действием поверхностно активных веществ.
 8. Эффект Соре (термическая диффузия) - перенос вещества за счет теплопроводности.
 9. Эффект Дюфура (диффузионная теплопроводность) - перенос тепла за счет диффузии вещества.
 10. Эффект Джоуля - Томсона - изменение температуры газа при протекании его под действием постоянного перепада давления сквозь дроссель - местное препятствие потоку газа (капилляр, вентиль, пористая перегородка и т.п.)
 11. Капиллярный эффект - проникновение жидкости в узкие каналы (капилляры), обусловленное явлениями смачивания или несмачивания поверхности капилляра.
 12. Трибоэффект - преобразование механической энергии в тепловую при относительном движении тел и фаз.
 13. Эффект Краусольда - зависимость коэффициента теплоотдачи (массоотдачи) от толщины пленки жидкости.
 14. Эффект Рейнольдса - увеличение теплоотдачи (массоотдачи) за счет увеличения скорости потока.
 15. Эффект Риги-Ледюка - увеличение теплопроводности материалов в магнитном поле.
 16. Электро- и магнитосепарация - разделение гетерогенной среды за счет разности электро- и магнитопроводности фаз.
 17. Электрофорез - перенос частиц в электрическом поле вследствие наличия разноименных зарядов у твердой и жидкой фаз.
 18. Электроосмос - перемещение жидкости вдоль стенок капилляра под действием приложенной ЭДС.
 19. Эффект Юткина (электрогидравлический удар) - генерация ударных волн в жидкости при ее электрическом пробое.
 20. Фото-, лазеро-, радиационно-, звуко-, электро-, плазмохимические эффекты - химические превращения вещества под действием соответствующего облучения, а также плазмы под действием электрического тока (электролиз).
 21. Пьезоэлектрический и пьезомагнитный эффекты - возникновение поляризации диэлектрика или намагниченности вещества под действием внешнего давления и наоборот.
 22. Магнито- и электрострикция - изменение размеров тела, вызванные изменением его намагниченности или деформация диэлектриков в электрическом поле.
 23. Автоколебания - возникновение колебаний в системе за счет преобразования энергии постоянного движения в колебательную.
 24. Резонанс - возрастание амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты вынужденных колебаний с собственной частотой колебательной системы.
- Более подробно с физической сущностью и практическими применениями ФХЭ можно ознакомиться в литературе [3 - 9, 17].

Анализируя табл. 1.1. необходимо отметить, что последние три метода интенсификации предполагают какие-либо периодические процессы, протекающие в ХТС. Наложение колебаний возможно как на элементы ХТА, так и на обрабатываемую среду. Колебания элементов ХТА часто называют вибрациями [21], колебания в обрабатываемой среде - акустическими колебаниями или волнами. Методы интенсификации, основные на генерации колебаний в обрабатываемой среде являются наиболее перспективными [3 - 11, 22 - 57]. Из класса акустической технологической аппаратуры для жидких сред наиболее эффективными для промышленного применения считают гидродинамические излучатели и, в частности, пульсационные аппараты роторного типа.

Акустические колебания различают на инфразвуковые (частота $f < 20$ Гц), звуковые ($f = 20 - 20 \cdot 10^3$ Гц), ультразвуковые ($f = 20 \cdot 10^3 - 10^8$ Гц), гиперзвуковые ($f > 10^8$ Гц). Для применения в промышленности наиболее часто используются колебания с частотами звукового и ультразвукового диапазонов. При воздействии на ХТП акустические колебания могут быть использованы в следующих случаях [31]:

- стимуляция (процесс осуществляется с применением колебаний);
- интенсификация (акустические колебания увеличивают скорость процесса);
- оптимизация (акустические колебания вызывают упорядочение процесса).

Наиболее часто акустические колебания используют для интенсификации ХТП. В гидромеханических процессах акустические колебания интенсифицируют такие процессы как: отстаивание, флотация, осаждение, диспергирование, эмульгирование, перемешивание, пеногашение, дегазация. В тепловых процессах - нагревание, охлаждение, выпаривание, испарение, горение. В массообменных процессах - кристаллизацию, сушку, растворение, набухание, абсорбцию, адсорбцию, экстракцию, выщелачивание. В механических процессах - экструдирование, литье, формование, диспергирование [3].

Интенсифицирующее действие акустических колебаний обусловлено, в первую очередь, эффектами второго порядка (нелинейными эффектами) [3, 31]: кавитация; пульсации газовых пузырьков; акустические течения; поверхностные эффекты; радиационное давление; пондеромоторные силы (Бьеркнесса, Стокса, Оссеена, акустического давления). По степени интенсификации механических процессов акустические способы в несколько раз превосходят электромагнитные [3].

В акустике различают плоские, цилиндрические и сферические волны в зависимости от вида излучающей поверхности. По величине амплитуды колебаний условно делят на волны бесконечно малой амплитуды и волны конечной амплитуды. Крайним случаем волн конечной амплитуды являются ударные волны.

Гармоническая волна является теоретической абстракцией. На практике реализовать излучение одной частоты невозможно и поэтому спектр колебаний является немонахроматическим и лежит в узком или широком диапазоне частот.

В зависимости от заложенного в принцип работы физического эффекта, различают следующие виды акустических излучателей: пьезоэлектрические, магнитострикционные, электродинамические, гидродинамические. Описанию таких промышленных излучателей, теории, расчету и их эксплуатации посвящено большое количество литературы [3, 22, 24 - 31]. Каждый вид излучателей имеет свои преимущества и недостатки.

Рассмотрим более подробно гидродинамические излучатели. Они сравнительно дешевые и производительные по отношению к другим видам излучателей [35]. В гидродинамических излучателях образование акустических колебаний происходит за счет энергии потока жидкости, что не требует специальных, сложных и энергоемких передаточных систем.

Существует множество гидродинамических преобразователей: от простейших золотниковых, до специальных, принцип работы которых основан на определенном физическом эффекте. Наиболее простыми и универсальными являются золотниковые, клапанные и мембранные прерыватели потока. Спектр колебаний таких излучателей

является низкочастотным. Они эффективны в крупногабаритной колонной аппаратуре и трубопроводах [27, 32 - 35, 41, 58, 59].

В гидродинамическом пластинчатом излучателе струя жидкости, вытекая из сопла с большой скоростью, ударяется в острую кромку металлической пластины, которая возбуждается и колеблется на одной из собственных частот [36, 41]. Завихрения на обеих сторонах пластины вызывают периодические импульсы давления, распространяющиеся со скоростью звука. При соблюдении оптимальных соотношений в жидкости создается мощное акустическое поле. Эти излучатели эффективно работают при скорости истечения более 25 м/с.

К числу перспективных гидродинамических излучателей следует отнести излучатели типа "сопло - лунка" и с тороидальным потоком, разрабатываемые Назаренко А. Ф. Они хорошо зарекомендовали себя при обработке систем типа "жидкость - жидкость" [49 - 51].

Вихревые преобразователи работают по принципу образования вихрей при вращательном движении жидкости в цилиндре, куда она вводится тангенциально. Генерирование колебаний происходит за счет импульсов давления, возникающих при образовании вихрей.

В генераторе кавитации [41] конусообразный ротор вращается в статоре такой же формы. Рабочие поверхности ротора и статора выполнены шероховатыми. При вращении ротора в зазоре между ротором и статором возникают микровихри и кавитация.

Высокоэффективными устройствами для обработки жидких сред показали себя суперкавитирующие аппараты. Интенсивная кавитация возникает при прохождении через каналы специальной формы и обтекании специальных кавитаторов [22, 60].

Одним из перспективных типов гидродинамических излучателей являются пульсационные аппараты роторного типа, которые содержат ротор и статор с каналами. При вращении ротора, его каналы периодически совпадают с каналами статора. В результате этого в обрабатываемой жидкости генерируются импульсы давления и разрежения, возникает кавитация, мелкомасштабные пульсации, гидравлические удары, развитая турбулентность. В литературе таким аппаратам даются несколько названий. Наиболее часто встречаются такие, как роторно-пульсационный аппарат (РПА) и роторный аппарат с модуляцией потока (РАМП). В главе 7 будет сделана детальная классификация подобных аппаратов. Более общим названием может быть ПАРТ - пульсационные аппараты роторного типа. При ссылке на конкретные примеры применения ПАРТ в промышленности мы будем называть их так, как они названы в литературных источниках.

1.2. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТАХ РОТОРНОГО ТИПА

Пульсационные аппараты роторного типа используются для обработки таких систем, как "жидкость - жидкость", "жидкость - твердое тело" и "газ - жидкость". Для каждого конкретного технологического процесса существуют определенные предпочтения в типе конструктивного и технологического оформления ПАРТ.

Пульсационные аппараты роторного типа различных видов и модификаций нашли применение в гидромеханических и теплообменных процессах за счет широкого спектра факторов воздействия:

- механическое воздействие на частицы гетерогенной среды, заключающееся в ударных, срезающих и истирающих нагрузках и контактах с рабочими частями ПАРТ;
- гидродинамическое воздействие, выражающееся в больших сдвиговых напряжениях в жидкости, развитой турбулентности пульсациях давления и скорости потока жидкости;

- гидроакустическое воздействие на жидкость осуществляется за счет мелкомасштабных пульсаций давления, интенсивной кавитации, ударных волн и вторичных нелинейных акустических эффектов.

Краткий обзор, который будет сделан ниже, покажет основные области применения ПАРТ и их потенциальные возможности.

1.2.1. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ И ГОМОГЕНИЗАЦИИ СУСПЕНЗИЙ

ПАРТ типа РПА хорошо зарекомендовал себя в процессе получения дисперсий антиоксидантов, применяемых для стабилизации синтетических каучуков различного назначения и дисперсий наполнителей каучуков [61]. По разработанной технологии получают дисперсии антиоксидантов неозона "Д", "ДФФД", ионола с различными биоразлагаемыми эмульгаторами. При этом производительность процесса возрастает почти в 3 раза, в 4-5 раз увеличивается время расслаивания дисперсии по сравнению с ранее применяемой технологией. Прочность получаемых каучуков возрастет на 30 - 50 %. РПА применяется для завершения роспуска волокнистых материалов и для расщепления пучков волокон при переработке грубых волокнистых материалов [62]. Применяемая технология позволяет увеличить процент использования макулатуры в получении картона, повысить его качество и снизить расход электроэнергии на размол с 95 кВт/ч на тонну для конической мельницы до 25 кВт/ч на тонну для РПА.

Диспергирование и гомогенизация исходной суспензии питательной среды РПА в производстве окситетрациклина позволяет увеличить выход целевого продукта и получить дисперсность частиц 15 - 20 мкм [63].

Применение РПА позволило сопоставить длительность производственного цикла и повысить качество выпускаемых мягких лекарственных форм суспензионного типа. Общие затраты времени снизились в 6 - 10 раз, общие затраты энергии - в 3 - 5 раз [64].

Цементно-водная суспензия, подвергнутая кавитационной обработке в РАМП и добавленная в бетонную смесь, повышает прочность на сжатие и растяжение изделий из бетона [65, 66].

На крупных кондитерских фабриках сбивание массы для пастилы производится на агрегате ШЗД, состоящем из двухкорпусного смесителя роторной сбивательной машины типа РПА [67]. Насыщенная воздухом масса после обработки в РПА, оказавшись при атмосферном давлении, значительно увеличивается в объеме за счет расширившихся пузырьков воздуха внутри массы. Установка производит 600 кг/ч, потребляемая мощность - 11 кВт.

Производство детергентов, используемых для составления композиций синтетических моющих средств, требует тонкого помола и высокой степени гомогенизации. Использование ПАРТ типа РАМП обеспечивает существенное увеличение срока службы фильтра тонкой очистки и уменьшает вязкость детергентов [68, 69].

Перспективным направлением в энергетике является использование дисперсно-топливых систем. Использование качественных углемазутных суспензий позволяет уменьшить расход мазута на 20 - 25 %. РАМП служат эффективным устройством для получения угольно-масляных паст [70].

Диспергирование серы в РАМП применяется для получения осерненного масла, характеризующегося большой маслянистостью, прозрачностью и отсутствием запаха серы [70].

Использование РАМП в получении железоксидного пигмента позволяет обойтись без обжига шлама, а размол заменить диспергированием в РАМП [66, 71]. Известен положительный опыт применения РПА в лакокрасочной промышленности [72].

1.2.2. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭМУЛЬГИРОВАНИЯ

РПА интенсифицирует процесс выделения синтетических полимеров из растворов за счет эмульгирования раствора полимера [61].

Применение РПА для приготовления дисперсий масла в производстве маслonaполненных каучуков позволяет получить высокоустойчивую эмульсию с частицами размером менее 70 мкм. Та же эмульсия, получаемая по известной технологии имеет частицы размером 400 мкм [64].

Применение РПА в производстве лекарственных мазей (ихтиоловой, скипидарной, линимента аммиачного и т.п.) позволило существенно сократить затраты ручного труда, повысить качество готового продукта (средний размер дисперсной фазы - 2,5 мкм) и сократить время приготовления мазей в 4 раза [73 - 75].

Химические добавки полифункционального действия позволяют получить бетоны с высокими технологическими и эксплуатационными свойствами. Использование РПА для получения устойчивых и высокодисперсных эмульсий и паст, вводимых в бетон, позволило увеличить прочность бетона на 15 - 30 % [65].

В высоковязких мазутах имеет место повышенное содержание воды в виде отдельных местных скоплений, обусловленное процессами перевозки, перекачки, хранения и подогрева топлива. Использование в качестве топлива специально приготовленных водомазутных эмульсий является одним из эффективных методов, позволяющих решить эту проблему [76, 77].

Одной из применяемых технологий для использования в котлах малой и средней мощности является технология с использованием РПА [78, 79]. Для отопительных котлов малой мощности при сжигании водомазутной эмульсии получают существенный экономический эффект, повышение КПД на 3 - 5 % и снижения эмиссии загрязняющих веществ (СО, сажи, окислов азота) в атмосферу [76]. Обработка водо-мазутной эмульсии с добавлением кальция и ее последующее сжигание в промышленных котельных позволило уменьшить в дымовых газах концентрацию окислов азота в 2 - 5 раз, а концентрацию сернистого ангидрида в 2-3 раза [80 - 85].

Для интенсификации процесса получения раствора полиакриламида, используемого для повышения прочности бумаги и удержания наполнителей, нашел применение РПА, изготовленный на базе серийного центробежного насоса [86]. Время приготовления раствора по предлагаемой технологии сокращается почти в 1,5 раза. Увеличивается на 2 % показатель удержания коалина. Приготовление эмульсий изоаминового спирта, конденсаторного масла и толуола в воде с помощью насоса-диспергатора также дало хорошие результаты [87].

Одними из важных звеньев технологии подземной добычи угля являются гидрофицированные механизированные комплексы, для эксплуатации которых применяются водомасляные эмульсии с жесткими характеристиками: высокой дисперсностью, стабильностью, отсутствием седиментации и коагуляции. При использовании РАМП для приготовления рабочих жидкостей на шахтах России и Белоруссии сократился выход из строя многих узлов гидрооборудования. Значительно сократились аварийные простои [88 - 98, 66, 70].

РПА используется для гомогенизации и пастеризации молока. Кавитационное воздействие не только способствует повышению дисперсности эмульсии, но и уничтожает вредные микроорганизмы. При гомогенизации молока 90 % жировых шариков имели размер до 2 мкм [99]. Дисперсность майонеза, получаемого при помощи РПА в два раза ниже, чем при помощи клапанного гомогенизатора [100, 101].

Одной из областей применения эмульсий является их использование в качестве смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Получение высококачественных СОЖ требует разработки и применения нового высокоэффективного оборудования. Применение РАМП для получения СОЖ способствует повышению их качества, а также снижает энергозатраты в процессе их производства. Дисперсность СОЖ достигает 0,8 - 1,2 мкм, что увеличивает

стойкость режущего инструмента в среднем на 30 % и повышает чистоту обработки поверхности [66, 70, 102, 103].

1.2.3. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Перспективным направлением использования РПА является экстрагирование продуктов микробиологического синтеза, например, каротина из биомассы. При циркуляционной обработке среды, проходящей по замкнутому контуру из РПА в емкость и обратно, удалось достичь 100 % выхода каротина после четырех циклов обработки [63].

Многие лекарственные вещества получают методами экстрагирования сырья растительного и животного происхождения. Применение РПА в процессе экстрагирования инсулина подкисленным спиртом из предварительно измельченной (до 3 - 5 мм) поджелудочной железы животных позволяет получить экстракты с высокой активностью в 3 раза быстрее [64].

Применение РПА интенсифицирует процесс экстрагирования танина (галлодубильной кислоты) из галловых орешков (патологические новообразования на листьях малоазиатского дуба). Степень извлечения возрастает с 49 до 77 %, а время экстрагирования уменьшается с 3 до 0,5 ч [64].

Экстрагирование целевых компонентов из коры крушины в РПА увеличивает их выход на 20 % и снижает трудоемкость операций за счет совмещения процессов измельчения и экстракции [64].

Аналогичный эффект достигается при использовании РПА в экстрагировании масла из плодов шиповника, облепихового масла из плодов облепихи, каротиносодержащего комплекса из отходов производства препаратов "Холосас", спиртовом экстрагировании календулы, валерианы, водного экстрагирования танина из листьев сумки, экстрагирования мицелиальных антибиотиков [64].

Выщелачивание триоксида вольфрама из щелитового концентрата в РПА интенсифицирует процесс и позволяет уменьшить время достижения заданной концентрации в 2-3 раза [38].

Интенсификация процесса растворения эвкалимина в этиловом спирте показала высокую эффективность РАМП: время приготовления раствора уменьшается более чем на два порядка; уменьшаются потери спирта; снижаются энергетические затраты; снижается себестоимость производства ценного лекарственного препарата [104, 105].

Экспериментальные исследования [66, 106, 107] показали высокую эффективность применения РАМП для проведения процессов абсорбции диоксида углерода в воде и диспергирования азота в воде.

За счет развитой кавитации, генерируемой в РАМП, возможно проведение процесса разделения водно-спиртовой смеси на компоненты при нормальной температуре и давлении [108, 109]. В процессе разделения воды и спирта изменяется их концентрация в жидкой и газовой фазах за счет молекулярной и конвективной диффузии через межфазную поверхность между гомогенной водно-спиртовой смесью и паро-газовым пузырьком. Использование кавитации приводит к резкому увеличению межфазной поверхности за счет появления пульсирующих пузырьков, наполненных в основном парами спирта.

Гидроакустическое воздействие в РАМП на обрабатываемую жидкую среду значительно способствует увеличению скорости реакции дегидрохлорирования по сравнению с механическим перемешиванием и ультразвуковой обработкой, а также позволяет интенсифицировать реакцию синтеза S-пропил-N-пентаметиленкарбаната за счет более эффективного преобразования гидроакустической энергии в кавитационное воздействие [110, 111].

1.3. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЖИДКУЮ ГЕТЕРОГЕННУЮ СРЕДУ В ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТАХ РОТОРНОГО ТИПА, ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Как уже отмечалось в предыдущих параграфах, в пульсационных аппаратах роторного типа обрабатываемая жидкая гетерогенная среда подвергается многофакторному воздействию. Благодаря такому многообразию видов обработки, происходит интенсификация ХТП. Многие исследователи изучали в экспериментальном и теоретическом плане факторы воздействия, имеющие место в ПАРТ [112 - 130]. Исследование каждого из факторов воздействия в отдельности не представляет собой сложную задачу. Сложность проблемы заключается в том, что все факторы воздействия взаимосвязаны друг с другом и их взаимодействие создает новый качественный эффект. Выделить из общей совокупности механических, гидромеханических и акустических явлений и взаимодействий отдельный фактор принципиально возможно, но этот путь не является методически правильным и часто приводит к ошибочным результатам. При изучении каждого фактора воздействия в отдельности обязательно надо иметь в виду, что даже при использовании метода системного анализа необходимо учитывать взаимосвязь всех факторов, имеющих место в ПАРТ. Ниже мы попытаемся сделать анализ результатов по исследованию и описанию факторов воздействия в ПАРТ, полученных за несколько десятков лет их изучения и применения.

Прежде чем перейти к анализу исследования факторов воздействия, покажем принцип работы ПАРТ на наиболее распространенном конструктивном типе - радиальном роторном аппарате. Стандартная схема ПАРТ показана на рис. 1.3.1. Принцип работы аппарата заключается в следующем. Обрабатываемая жидкость подается под давлением или самотеком через входной патрубок 1 в полость ротора 2, проходит через каналы ротора 3, каналы статора 4, рабочую камеру 5 и выходит из аппарата через выходной патрубок 6. При вращении ротора его каналы периодически совпадают с каналами статора. Выходя из канала статора, жидкость собирается в рабочей камере и продвигается к выходному патрубку. В период времени, когда каналы ротора перекрыты стенкой статора, в полости ротора давление возрастает, а при совмещении канала ротора с каналом статора давление за короткий промежуток времени сбрасывается и в результате этого в канал статора распространяется импульс давления. Скорость жидкости в канале статора является переменной величиной. При распространении в канале статора импульса избыточного давления, вслед за ним возникает кратковременный импульс пониженного ("отрицательного") давления, так как совмещение каналов ротора и статора завершилось и подача жидкости в канал статора происходит только за счет транзитного течения из радиального зазора между ротором и статором. Объем жидкости, вошедший в канал статора, стремится к выходу из канала, и инерционные силы создают растягивающие напряжения в жидкости, что вызывает кавитацию. Кавитационные пузырьки растут при воздействии импульса пониженного давления и схлопываются или пульсируют при увеличении давления в канале статора. Часть кавитационных пузырьков выносятся в рабочую камеру.

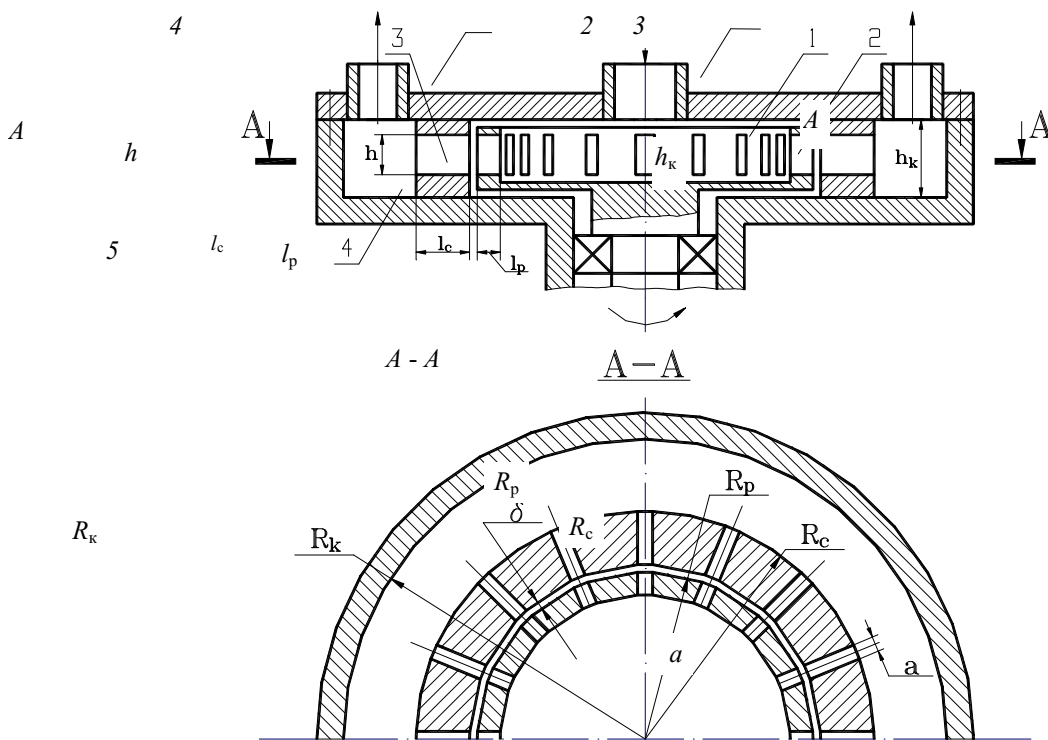


Рис. 1.3.1. Схема пульсационного аппарата роторного типа

В связи с тем, что скорость потока жидкости в канале статора велика и имеет флуктуации, поток является турбулентным. При вращении ротора в зазоре между ротором и статором возникают большие сдвиговые напряжения. Рабочие поверхности ротора и статора воздействуют на жидкую гетерогенную среду за счет механического контакта, создавая высокие срезающие и сдвиговые усилия.

Пульсации давления и скорости потока жидкости, интенсивная кавитация, развитая турбулентность, ударные волны и кумулятивные струйки от схлопывания кавитационных пузырьков, высокие сдвиговые и срезающие напряжения - это факторы воздействия на жидкую гетерогенную среду, подлежащие изучению, моделированию, оптимизации и использованию для повышения эффективности работы ПАРТ и интенсификации ХТП.

Одним из первых исследователей процессов и явлений, протекающих в ПАРТ, был П. Виллемс. По его мнению, основным фактором, обеспечивающим интенсификацию ХТП, является возникновение в обрабатываемой жидкости высокочастотных колебаний, генерируемых консольнозакрепленными, тонкостенными зубьями ротора и статора [131, 132]. Этой же гипотезы придерживаются авторы работ [62, 133, 134]. Эта модель учитывает только возникающие в аппаратах импульсы динамического давления. Градиенты давления, по Виллемсу, достигают 10^8 Па.

Анализируя величину проходного сечения перекрываемой прорези, Пэй [135] получил формулу для расчета частоты пульсаций в общем случае, когда число каналов статора не равно числу каналов ротора:

$$f = nz_c z_p / (z_c z_p), \quad (1.3.1)$$

где $(z_c z_p)$ - наибольший общий делитель чисел z_c и z_p ; z_p , z_c - число каналов в роторе и статоре соответственно; n - частота вращения ротора, об/с.

Эта формула согласуется с данными М. А. Балабудкина [136, 137].

Основную частоту пульсаций динамического давления, излучаемых в канал статора, следует рассчитывать по формуле [138 - 145]:

$$f_0 = nz_p. \quad (1.3.2)$$

В некоторых случаях отмечается максимум звукового давления на частоте вдвое меньшей, однако, в большинстве измерений на долю основной частоты приходится от 70 до 80 % звуковой энергии.

Одним из важных факторов воздействия, ответственным за основные физико-химические процессы в ПАРТ, являются пульсации давления в канале статора и рабочей камере. Этому аспекту посвящено огромное количество работ, что доказывает важность и неоднозначность задачи.

В работе [142] величину давления в канале статора определяют, исходя из тангенциальной V_1 и радиальной V_2 , составляющих скорости потока,

$$P = \frac{\rho}{2} (V_1^2 + V_2^2). \quad (1.3.3)$$

Тангенциальная составляющая скорости считается постоянной, так как угловая скорость ротора - постоянная величина. Радиальная составляющая скорости зависит от расхода и представлена в виде синусоиды. Синусоидальная зависимость расхода позволила получить представление зависимости площади проходного сечения в пилообразной форме.

Формула (1.3.3) лишь качественно отражает действительные процессы по флуктуациям давления в ПАРТ. Кроме того, авторы [142] пренебрегали влиянием вязкости и сжимаемости жидкости, а размеры прорезей и промежутков между ними на роторе были равны между собой.

Аналогичный подход был сделан в работе [146], где пренебрегая сжимаемостью жидкости и потерями на трение, для максимальной амплитуды переменного давления получена формула

$$P_m = k dQ_1(t)/dt, \quad (1.3.4)$$

где $Q_1(t)$ - переменный расход через одно отверстие, $\text{м}^3/\text{с}$; k - некоторая постоянная, зависящая от плотности жидкости и размеров отверстия.

Зависимость амплитуды пульсаций давления от расхода жидкости заложена в формуле

$$P_m = \frac{\rho R_p^2}{z_c a^2} \frac{\omega(Q - Q_T)}{h} \sqrt{\frac{1}{z_p} \lg \frac{R_p}{R_n}}, \quad (1.3.5)$$

где ρ - плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; R_p - радиус внешней поверхности ротора, м ; ω - угловая скорость ротора, с^{-1} ; Q и Q_T - полный расход и транзитный расход, $\text{м}^3/\text{с}$; a , h - ширина и высота каналов, м ; z_p , z_c - количество каналов в роторе и статоре; R_n - радиус цилиндрической полости, возникающей за счет вращения ротора, м , [147].

Не очень понятно, каким образом в полости ротора, в которую жидкость постоянно нагнетается под давлением, либо поступает за счет центробежного эффекта, возникает полость. Это утверждение нарушает положение о неразрывности сплошности потока. Подобное явление наблюдалось авторами работ [148, 149], однако, в отсутствии подвода и отвода жидкости из аппарата. Кроме того, при полностью заполненном жидкостью роторе ($R_n = 0$), амплитуда давления возрастает до бесконечности, что физически невозможно.

Расход жидкости через аппарат (или через одно отверстие статора) В. Ф. Юдаев представляет в виде [146]:

$$Q(t) = Q_{\min} + \frac{\omega R}{a} \begin{cases} (Q_{\max} - Q_{\min}) t, & 0 \leq t \leq \frac{a}{\omega R}; \\ (Q_{\max} - Q_{\min}) \left(\frac{2a}{\omega R} - t \right), & \frac{a}{\omega R} \leq t \leq \frac{2a}{\omega R}; \\ 0, & \frac{2a}{\omega R} \leq t \leq \frac{(a+b)}{\omega R}. \end{cases} \quad (1.3.6)$$

Здесь Q_{\max} и Q_{\min} - значения расхода соответственно при совпадающих и перекрытых каналах. Позднее формула (1.3.6) видоизменилась, но смысл ее не менялся [70].

У Балабудкина М. А. [142] зависимость расхода имеет вид

$$Q(t) = Q_m \left(k - \cos \frac{2\pi}{T} t \right), \quad (1.3.7)$$

где $k = \bar{Q}/Q_m$; \bar{Q} - среднее значение расхода, м³/с; Q_m - амплитуда изменений расхода, м³/с; T - период колебания в ПАРТ, с.

Впервые было отмечено [64, 142], что функция $Q(t)$ определяется также типом насоса и несет в себе дискретную составляющую при входе в аппарат.

Величину амплитуды пульсационного давления и расход жидкости через канал статора определяет скорость потока жидкости в канале и законы изменения площади проходного сечения канала статора и гидравлического сопротивления на входе в канал статора.

Скорость течения жидкости через прерыватель (канал ротора - зазор - канал статора) в работе [150] определяется на основе закона сохранения обобщенного интеграла Бернулли:

$$P_1 + \frac{\rho_1}{2} V_1^2 = P_2 + \left(1 + \sum \xi_i \right) \frac{\rho_2}{2} V_2^2 - \frac{\rho_2}{2} V_3^2, \quad (1.3.8)$$

где $P_{1,2}$ - давление на входе и выходе модулятора, Па; $V_{1,2}$ - скорость жидкости на входе и выходе модулятора, м/с; $\rho_{1,2}$ - плотность жидкости на входе и выходе модулятора, кг/м³; V_3 - линейная скорость потока жидкости на выходе канала ротора при равномерном вращении ротора, м/с; $\sum \xi_i$ - сумма коэффициентов местных сопротивлений модулятора.

В этом уравнении не учтена временная зависимость гидравлического сопротивления модулятора. Коэффициенты местных сопротивлений просто суммируются в предположении, что они постоянны в любой момент времени при характерных положениях канала ротора относительно канала статора.

Более точно, чем уравнение (1.3.8), течение реальной несжимаемой жидкости в модуляторе описывает нестационарное уравнение Бернулли [151, 152]:

$$\rho l \frac{dV}{dt} + \xi(t) \frac{\rho V^2}{2} = \Delta P, \quad (1.3.9)$$

где $l = l_p + \delta + l_c$ - длина модулятора, м.

Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от скорости представляется в виде [153]:

$$\xi(t) = \xi_{\text{KB}}(t) + B(t)/\text{Re}, \quad (1.3.10)$$

где $\xi_{\text{KB}}(t)$ - коэффициент гидравлического сопротивления в квадратичной области зависимости гидравлических потерь от скорости потока; $\text{Re} = V_0 d_{\text{э}} \rho / \mu$ - критерий Рейнольдса;

$B(t)$ - коэффициент гидравлических потерь; $V_0 = \sqrt{2\Delta P/\rho}$ - скорость установившегося течения при $\xi=1$; d_s - эквивалентный гидравлический диаметр, м.

Уравнение (1.3.9) для удобства теоретического исследования и решения представлено в безразмерном виде:

$$d(kW)/d\tau = \text{Ho} (1 - \xi(t)W^2), \quad (1.3.11)$$

где k - коэффициент усреднения импульса по сечению потока; $\text{Ho} = V_0 t_0 / 2l$ - критерий гомохронности; $t_0 = a_p / (\omega R)$; $W = V/V_0$; $\tau = t/t_0$.

Уравнение (1.3.11) относится к дифференциальным уравнениям типа Риккати и в общем виде в квадратурах не решается. Ряд работ посвящен методам решения этого уравнения [154 - 161]. Анализ этих работ показывает, что методы линеаризации, аналитических приближений, квазилинеаризации практически дают один и тот же результат и не позволяют точно определить гидродинамические параметры в точном абсолютном выражении.

Уравнение (1.3.9) весьма перспективно для описания течения вязкой жидкости в канале статора. Экспериментальные осциллограммы импульсов давления в канале статора подтверждают правильность выбранного пути по математическому моделированию истечения жидкости через прерыватель аппарата. Дальнейшее усовершенствование математической модели течения потока реальной жидкости в ПАРТ было выполнено Зиминым А. И. [162 - 184]. Уравнение (1.3.9) преобразовано к виду

$$l_s \frac{dV}{dt} + \frac{1}{2} \left(\xi(t) V^2 + \frac{B(t) V \mu}{d\rho} \right) = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{1}{2} \omega^2 R_p^2, \quad (1.3.12)$$

где $l_s = l + (1 + \Gamma) \sqrt{S_{\max}/\pi}$ - эффективная длина модулятора, учитывающая влияние генерируемого переменного давления на нестационарные гидромеханические процессы в модуляторе аппарата, м; $\Gamma = \sqrt{S_{\text{вых}}/S_{\text{вх}}}$; $S_{\max} = a h$; $S_{\text{вых}}$ - площадь выходного отверстия модулятора (выходного отверстия канала статора), м²; $S_{\text{вх}}$ - площадь входного отверстия модулятора (входного отверстия канала ротора), м².

Второй член правой части уравнения (1.3.12.) отражает влияние центробежных сил давления. Необходимо заметить, что величину центробежного давления по формуле Эйлера определяет не радиус внешней поверхности R_p , а средний радиус канала ротора $R_{\text{ср}} = R_p - l_p/2$. Радиус ротора R_p может быть задействован в уравнении (1.3.12) только, если в полости ротора имеются лопатки. Хотя перепад давления входит в уравнение как постоянная величина, в реальности он так же имеет переменную составляющую, характер которой в настоящее время пока не определен.

В безразмерном виде уравнение (1.3.12) записывается как

$$\frac{dW}{d\tau} + W^2 \text{Ho} \xi(\tau) + W B(t) \frac{\text{Ho}}{\text{Re}} = 1 + \frac{\text{Ro}}{\text{Ho}},$$

где $\text{Ho} = V_0 t_0 / (2l_s)$; $\text{Re} = V_0 d_s \rho / \mu$; $\text{Ro} = (a_c / (2l_s))^2$; $V_0 = \Delta P t_0 / (\rho l_s)$.

В этом уравнении V_0 составлена из параметров, дающих размерность скорости, но физическое обоснование этой дроби проблематично. Логичнее использовать в качестве V_0 значение средней скорости жидкости за период T (1.3.10). Столь же проблематичен физический смысл ротационного коэффициента Ro . По замыслу автора, ротационный коэффициент должен отражать влияние центробежных сил, но он составлен из линейных параметров, никак не связанных с центробежным давлением.

Дальнейшая модернизация уравнения (1.3.12) была произведена Карепановым к виду [185 - 188]:

С. К.

$$\Delta P = \rho l \frac{dV}{dt} + \left(\frac{dV}{dt} \right)^{-1} \omega^2 V^2 \rho l + \frac{\rho V^2}{2} \xi(t), \quad (1.3.13)$$

в котором учтены не только центробежные силы, но и сила Кориолиса, действующая на поток жидкости в канале ротора.

В безразмерном виде уравнение (1.3.13) записывается с учетом новых критериев [188]:

$$1 + \frac{C_n R_o}{1 - C_n} = \frac{dW}{d\tau} + \left(\frac{dW}{d\tau} \right)^{-1} W^2 K_o + \frac{1 - C_n}{C_n} \xi(\tau) W^2, \quad (1.3.14)$$

где $K_o = a_p^2 / R_p^2$ - критерий Кориолиса; $R_o = \frac{a_p^2}{2l^2} \left(1 + \frac{\delta^2}{2R_p^2} \right)$ - ротационный коэффициент;

$C_n = 1/(H_o + 1)$ - коэффициент нестационарности.

Несомненно, положительным вкладом в математическую модель (1.3.14) является учет новых членов, хотя и не имеющих существенного влияния на результаты решения. Не совсем понятно введение коэффициента нестационарности C_n , видоизменяющего уравнение (1.3.13), но не дающего качественного или количественного вклада.

Во всех уравнениях, описывающих течение реальной жидкости через модулятор, присутствует параметр $\xi(t)$ - переменное гидравлическое сопротивление, которое зависит от площади проходного сечения модулятора [162]:

$$\xi(t) = \left(\frac{S_{\max}}{\varepsilon S(t)} - 1 \right)^2, \quad (1.3.15)$$

где S_{\max} - наибольшая площадь проходного сечения прерывателя, m^2 ; ε - коэффициент, определяемый из таблиц Н. Е. Жуковского [153].

Линейный метод анализа нестационарных гидромеханических процессов позволил А. И. Зимину [162] учесть влияние кинематических характеристик течения жидкости в модуляторе на коэффициент гидравлического сопротивления:

$$\xi_m(\tau, H_o) = (1 - dW/d\tau) / (H_o W^2). \quad (1.3.16)$$

Необходимо отметить, что кроме скорости потока жидкости, скорости вращения ротора и геометрических параметров аппарата, на гидравлическое сопротивление оказывает вязкость жидкости, толщина пристеночного ламинарного слоя и другие физические характеристики жидкости.

Зависимость изменения площади проходного сечения отдельного канала статора и аппарата в целом является основополагающей, и поэтому многие исследователи начинали изучать гидромеханические закономерности работы ПАРТ с решения этой задачи. Для описания состояния этого вопроса можно уделить много места и времени, но в данный момент эта проблема разработана достаточно хорошо с немного громоздкой, но основательной теоретической базой. Основной вклад в решение этой задачи был сделан М. А. Балабудкиным, В. Ф. Юдаевым, А. И. Зиминим и др. [60, 66, 70, 136, 142, 154, 162, 189].

Одним из основных факторов воздействия на гетерогенную жидкую среду, влияющих на интенсивность ХТП, является кавитация. Исследованию кавитации в ПАРТ посвящено много работ, но, несмотря на это, можно говорить о том, что сделан только качественный анализ процесса возникновения и развития кавитации как в теоретическом, так и в экспериментальном плане.

Исследования импульсной акустической кавитации проводились в основном экспериментальными методами. Это связано с тем, что в настоящий момент достаточно удовлетворительно разработана теория поведения только одиночного кавитационного пузырька в стационарном акустическом поле. Аналитическое описание динамики

кавитационной области сформировано лишь в первом приближении. Сложность описания кавитации заключается в том, что кавитация возникает в движущемся потоке жидкости, и при этом жидкость подвергается термодинамическому сжатию и разрежению. В силу этого, в ПАРТ генерируется кавитация особого типа, названная В. Ф. Юдаевым как импульсная акустическая кавитация.

Попытки аналитического описания динамики одиночного кавитационного пузырька в ПАРТ в первые были предприняты В. Ф. Юдаевым [190, 191]. Уравнение динамики кавитационного пузырька было дано в аппроксимации Херринга. Это уравнение записывалось с учетом изменения местного давления $P(x, t)$ вдоль линии тока жидкости, по которой движется пузырек, в виде:

$$\begin{aligned} \rho_0 \left[(1-2\text{Ma}) R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{4}{3} \text{Ma} \right) \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \right] + P - P_{\text{п}} - \\ - P_{\text{max}} f(t) - P(x) + \frac{2\sigma}{R} - \left(P + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\alpha} + \\ + \text{Ma} (1 - \text{Ma}) R \frac{dP}{dR} = \quad (1.3.17) \end{aligned}$$

где $\text{Ma} = (dR/dt)/c$; $P(R) = Z\alpha \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \frac{t}{t_0} + P_{\text{п}} - \frac{2\sigma}{R} - 4\mu \frac{dR}{dt} \frac{1}{R}$; c - скорость звука в жидкости, м/с; $\alpha = P_{\text{п}0}/Z$ - начальное газосодержание; $Z = P - P_{\text{п}} + 2\sigma/R_0$; $P_{\text{max}} f(t)$ - возмущающее переменное давление в жидкости, Па; $P_{\text{п}}$ - однородное давление пара в пузырьке при температуре t , Па; ρ_0 - плотность невозмущенной жидкости, кг/м³; γ - показатель политропы; σ - поверхностное натяжение, Н/м; R_0 - начальный радиус пузырька, м; R - радиус пузырька; t_0 - температура невозмущенной жидкости, К.

В качестве масштаба времени принимали период собственных радиальных линейных колебаний, рассчитанный по формуле Миннерта:

$$t_{\text{м}} = 2\pi R_0 \sqrt{\rho/Z}.$$

В безразмерных переменных уравнение (1.3.17) принимает вид

$$\begin{aligned} R' (1-2\text{Ma}) \frac{d^2 R'}{dt'^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{4}{3} \text{Ma} \right) \left(\frac{dR'}{dt'} \right)^2 = \\ = [1 + \text{Ma} (1 - \text{Ma})] \alpha (R')^{3\gamma} (1 - \Delta t) + P_{\text{п}0} + J^{-1} \Delta t + \\ + \left[\text{We} - 4 \left(\frac{dR'}{dt'} \right) \frac{1}{\text{Re} R'} \right] [1 - \text{Ma} (1 - \text{Ma})] - \frac{4 \text{Ma}}{\text{Re}} (1 - \text{Ma}) \frac{d^2 R'}{dt'^2} \frac{dt'}{dR'} - \\ - x_{\text{r}}^{-1} v(t') - x_{\text{a}}^{-1} f(t') - 1, \quad (1.3.18) \end{aligned}$$

где $R = R' R_0$; $t = t' t_{\text{м}}$; $t_{\text{п}} - t_0 = \Delta t t_0$;

$$J = \frac{Z [\rho(t_0) - \rho_{\text{п}}(t_0)]}{\lambda(t_0) \rho_{\text{п}}(t_0) \rho(t_0)}; \quad \text{We} = \frac{2 \sigma}{R_0 Z};$$

$$\text{Re} = R_0 (\rho/\mu) \sqrt{Z/\rho}; \quad x_{\text{r}} = 2Z (\rho V_{\text{max}}^2)^{-1}; \quad x_{\text{a}} = Z/|P|_{\text{max}};$$

$$\rho_{\text{п}}(t_0) = Z P_{\text{п}}'; \quad (V')^2(t) = V_{\text{max}} V'(t); \quad \Delta t = t_{\text{п}} - t_0;$$

где V - скорость, м/с; α - начальное газосодержание газа в паровом пузырьке; λ - удельная теплота парообразования, Дж/кг; $\rho_{\text{п}}$ - плотность пара в пузырьке, кг/м³; $V'(t) \rightarrow 0$ относительная скорость движения пузырька вдоль линии тока жидкости.

Модель (1.3.18) также учитывает переменное, объемное газосодержание:

$$K = \Delta v/v, \quad (1.3.19)$$

где Δv - переменный суммарный объем всех кавитационных пузырей, м³; v - выделенный расчетный объем в кавитационной области, м³.

Переменное объемное газосодержание аналогично индексу кавитации, введенному Л. Д. Розенбергом [68]. С помощью индекса K автор модели (1.3.18) показывает, что импульс давления, генерируемый ПАРТ, распространяется в разреженной газожидкостной среде.

А. И. Зимин [162] рассматривал поведение кавитационного пузырька с учетом тепломассообмена на основе уравнения Херринга-Трайлинга под воздействием переменного давления $P(t)$:

$$\begin{aligned} (1-2Ma) R \frac{dV}{dt} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{4}{3} Ma\right) V^2 = \\ = \frac{1}{\rho} \left[P - P_{\Pi} - P(t) - \frac{2\sigma}{R} \left(1 - \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_0}\right) - 4\mu \frac{V}{R} \right]; \end{aligned} \quad (1.3.20)$$

$$V = \frac{dR}{dt} - \frac{J}{\rho}; \quad (P)_{r=R} = P_{\Pi} - \frac{2\sigma}{R},$$

где J - поток массы через межфазную поверхность, кг/(м²с); μ - коэффициент динамической вязкости, Па·с; ρ_{Γ} - плотность парогазовой смеси в пузырьке, кг/м³;

$$J = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{\Pi} \right) \frac{1}{4\pi R^2};$$

$$\lambda J_{\Pi} = \kappa \left(\frac{\partial t_0}{\partial r} \right)_{r=R} - \frac{R}{3} \left[\frac{c t_{\Gamma}}{\lambda} \left(1 - \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_0}\right) \right] \frac{dP_{\Gamma}}{dt} - \text{уравнение баланса тепла.}$$

Исходная система уравнений сведена к системе уравнений в безразмерных переменных, которая решалась численными методами. Был сделан вывод, что при воздействии на жидкость отрицательного импульса давления, при коллапсе кавитационного парового пузырька генерируются уменьшающиеся при последующих захлопываниях кавитационные импульсы давления, а средний радиус пузырька (величина, возле которой происходят колебания радиуса) растет во времени.

Изучение влияния давления и температуры на развитие кавитации показало, что существует определенный оптимум амплитуды кавитационных импульсов по величине давления в рабочей камере и температуре обрабатываемой жидкости [162, 193].

При визуальных наблюдениях [194] процесса развития кавитации в канале статора установлено, что кавитационные пузырьки достигают видимого размера через 100 мкс после момента полного совмещения каналов ротора и статора. Совокупность пузырьков образует своеобразную трубку, вытянутую параллельно каналу статора. Зарегистрирована двукратная пульсация кавитационных пузырьков за время периода колебаний в аппарате.

Экспериментальные исследования импульсной акустической кавитации в основном проводились при помощи регистрации импульсов давления на гидроакустических гидрофонах при схлопывании кавитационных пузырьков.

В работах [146, 195] установлено, что при невысокой скорости потока жидкости, кавитационные пузырьки образуются и схлопываются в канале статора, а при большом расходе жидкости - кавитационные пузырьки выносятся потоком в рабочую камеру и захлопываются там раньше, чем закончится первичный импульс давления.

Различными исследователями обнаружено, что в период своего существования кавитационные пузырьки синфазно совершают несколько пульсаций и затем схлопываются

[162, 193 - 196]. Однако в работах [193, 196] отмечено, что амплитуда кавитационных импульсов уменьшается при увеличении скорости перекрытия каналов статора. Данные результаты объяснить очень трудно, так как уменьшение амплитуды начинается уже при скорости 4 м/с. В дальнейшем [162], падение амплитуды кавитационных импульсов объясняется тем, что кавитация не успевает развиться при малой длительности импульса давления, возбуждающего кавитацию. Подобное объяснение справедливо для высоких скоростей вращения и указывает на предел для скорости вращения ротора, при достижении которого интенсивность кавитации не увеличивается, а даже снижается.

ПАРТ является генератором колебаний в жидкости, причем объектом озвучивания и носителем колебаний служит обрабатываемая жидкость. В силу этого в ПАРТ возникают акустические поля сложной структуры, нелинейные акустические эффекты.

В работе [197] исследовано явление синхронизации частот вихреобразования и пульсаций динамического давления. Образование вихрей обусловлено резким изменением скорости и давления при выходе жидкости из зазора между ротором и статором в канал. При этом происходит отрыв пограничного слоя с одновременным образованием вихрей, что порождает импульсы давления. При совпадении частот вихреобразования и динамического давления наблюдалось уменьшение потребляемой мощности на 40 - 60 %. Необходимо отметить, что данные явления протекают при относительно больших зазорах, $\delta = 1,35 - 4,10$ мм и нагнетании жидкости за счет центробежных сил при вращении ротора.

По нашему мнению, явление уменьшения потребляемой мощности связано также с центробежными силами, которым в данном случае "помогают" транспортировать жидкость синхронизированные срывы вихрей.

Один из вариантов автоколебательных эффектов экспериментально установлен авторами работы [193]. Исследуя зависимость амплитуды кавитационных импульсов от статического давления в рабочей камере при постоянном расходе жидкости и различных температурах, выявили максимум амплитуды импульсов давления, генерируемых коллапсирующим ансамблем кавитационных пузырьков, что объясняется размерами образующейся кавитационной области. Размер этой области велик при малых статических давлениях. Попадая в область повышенного давления она схлопывается не сразу, а начинает пульсировать. Пузырьки сбрасывают энергию и уменьшаются в размерах ступенчато.

К автоколебательному режиму работы ПАРТ можно отнести обработку газожидкостной среды при больших значениях газосодержания [106]. Газожидкостная смесь, попадая в полость ротора, частично сепарируется, и жидкость протекает через каналы аппарата порциями, пульсируя с периодом порядка нескольких секунд, подобно явлению захлебывания в распылительных колоннах.

В публикации [198] выдвинута гипотеза, что спектр пульсаций давления определяется явлением гидравлического удара. При определенных соотношениях R_k, R_p, a_c, ω и c возникает прямой гидравлический удар, и наблюдаются резонансные колебания в приближении плоских волн как в рабочей камере, так и в полости ротора. Аналогичный подход сделан в работе [199], где резонансные колебания потока жидкости возникают при определенном соотношении времени пробега вдоль канала статора импульса давления и времени перекрытия канала статора.

Решая совместно два уравнения, определяющих параметры собственных колебаний давления в полости ротора и рабочей камере, получили соотношение геометрических и кинематических параметров ПАРТ, при которых будут выполняться условия работы аппарата в резонансном режиме [200 - 202]. При выводе условий резонансного режима работы принимали, что высота полости ротора равна высоте рабочей камеры, а поля давлений в этих объемах являются цилиндрически симметричными. Это является частным случаем обобщенного подхода, при котором учитываются параметры трехмерного акустического поля в технологических объемах аппаратах.

Механическое и гидромеханическое взаимодействие рабочих органов ПАРТ с потоком жидкости и с частицами, включенными в этот поток, рассмотрено в работах [64, 143, 203, 204]. Детально изучен процесс дробления частиц сферической формы, определены условия, при которых происходит дробление и получена зависимость для расчета вероятности разрушения частиц.

Исследования взаимодействия жидкости с рабочими органами ПАРТ проведено для зоны зазора между ротором и статором. Получены полуэмпирические уравнения для расчета мощности, диссипируемой в зазоре [64, 139, 205 - 211]. Эти модели применимы, в основном, к РПА, для которых характерна относительно большая величина зазора и более частое расположение отверстий в роторе и статоре. Получен большой экспериментальный материал, подтверждающий основные теоретические положения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 1

1. *Новиков В. С.* Импульсные процессы переноса в гетерогенных системах: Обзор // Пром. теплотехника. 1990. Т. 12. № 2. С. 23 - 39.
2. *Коновалов В. И., Гапанова Н. Ц., Туголуков Е. Н.* О возможностях использования циклических тепловых и взаимосвязанных теплодиффузионных процессов в химических и других производствах // Вестник ТГТУ. 1995. Т. 1. № 3-4. С. 273 - 288.
3. *Кардашев Г. А.* Физические методы интенсификации процессов химической технологии. М.: Химия, 1990. 208 с.
4. *Физические эффекты* в машиностроении: Справочник / Под ред. В. А. Лукьянца. М.: Машиностроение, 1993. 224 с.
5. *Федоткин И. М., Жарик Б. Н., Погоржельский Б. И.* Интенсификация технологических процессов пищевых производств. К.: Техника, 1984. 176 с.
6. *Долинский А. А.* Использование принципа дискретно-импульсного ввода энергии для создания эффективных энергосберегающих технологий // Инженерно-физический журнал. 1996. Т. 69. № 6. С. 855 - 896.
7. *Долинский А. А., Накорчевский А. И.* Принципы оптимизации массообменных технологий на основе метода дискретно-импульсного ввода энергии // Пром. теплотехника. 1997. Т. 19. № 6. С. 5 - 9.
8. *Рогов И. А., Горбатов А. В.* Физические методы обработки пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1974. 584 с.
9. *Задорский В. М.* Интенсификация химико-технологических процессов на основе системного подхода. К.: Техника, 1989. 208 с.
10. *Дискретно-импульсный ввод энергии в теплотехнологиях* / А. А. Долинский, Б. И. Басок, С. И. Гулый и др. К.: ИТТФ НАНУ, 1996. 206 с.
11. *Белоглазов И. Н., Муравьев А. И.* Интенсификация и повышение интенсивности химико-технологических процессов. Л.: Химия, 1988. 206 с.
12. *Коновалов В. И.* Базовые кинетические характеристики массообменных процессов // Журнал прикладной химии. 1986. Т. 59. № 9. С. 2096 - 2107.
13. *Таганов И. Н.* Моделирование процессов массо- и энергопереноса. Нелинейные системы. Л.: Химия, 1979. 208 с.
14. *Адиутори Е. Ф.* Новые методы в теплопередаче: Пер. с англ. под ред. А. И. Леонтьева. М.: Мир, 1977. 230 с.
15. *Гленсдорф П., Пригожин И.* Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1977. 230 с.
16. *Вейник А. В.* Термодинамика реальных процессов. Минск.: Наука и техника, 1991. 576 с.

17. *Кирпиков В. А.* О классификации современных методов интенсификации конвективного теплообмена при вынужденном движении (без фазовых переходов) // Теорет. основы хим. технол. 1991. Т. 25. № 1. С. 139 - 143.
18. *Смирнов Н. Н., Белоглазов И. Н.* Интенсификация некаталитических процессов в системе твердое тело - жидкость // Хим. пром. 1991. № 8. С. 8 - 12.
19. *Федоткин И. М., Липсман В. С.* Интенсификация теплообмена в аппаратах пищевых производств. М.: Пищевая пром-сть, 1972. 240 с.
20. *Кафаров В. В., Дорохов И. Н.* Системный анализ процессов химической технологии: Основы стратегии. М.: Наука, 1976. 500 с.
21. *Вибрационные* массообменные аппараты / И. Я. Городецкий, А. А. Васин, В. М. Олевский, П. А. Лупанов // Под ред. В. М. Олевского. М.: Химия, 1980. 192 с.
22. *Федоткин И. М., Немчин А. Ф.* Использование кавитации в технологических процессах. К.: Вища шк., 1984. 68 с.
23. Тепло- и массообмен в звуковом поле / В. Е. Накоряков, А. П. Бурданов, Н. М. Болдырев, П. Н. Терлеев. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1970. 254 с.
24. *Гинстлинг А. М., Барам А. А.* Ультразвук в процессах химической технологии. Л.: Госхимиздат, 1960. 96 с.
25. *Фридман В. М.* Ультразвук. М.: Знание, 1960. 48 с.
26. *Бергман Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике: Пер. с англ. М.: Иностран. лит., 1957. 726 с.
27. *Карпачева С. М., Рябчиков Б. Е.* Пульсационная аппаратура в химической технологии. М.: Химия, 1983. 224 с.
28. *Гершгал Д. А., Фридман В. М.* Ультразвуковая аппаратура промышленного назначения. М.: Энергия, 1967. 264 с.
29. *Гершгал Д. А., Фридман В. М.* Ультразвуковая технологическая аппаратура. М.: Энергия, 1976. 320 с.
30. *Основы физики и техники ультразвука: Учебн. пособ. для вузов / Б. А. Агранат, М. М. Дубровин, Н. Н. Хавский и др.* М.: Высш. шк., 1987. 352 с.
31. *Новицкий Б. Г.* Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. М.: Химия, 1983. 192 с.
32. *Галицейский Б. М., Рыжов Ю. А., Якуш Е. А.* Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках. М.: Машиностроение, 1977. 256 с.
33. *Использование* волновых эффектов для интенсификации химических и фазовых превращений в многофазных системах / С. А. Любартович, О. Б. Третьяков, Р. Ф. Ганиев и др. // Теорет. основы хим. технологии. 1988. Т. 22. № 4. С. 560 - 564.
34. *Колебательные* явления в многофазных средах и их использование в химической технологии / Р. Ф. Ганиев, Н. И. Кобаско, В. В. Кулин и др. К.: Техника, 1980. 220 с.
35. *Новиков В. С.* Гомогенизация и диспергирование в современной технологии: Обзор // Пром. теплотехника. 1990. Т. 12. № 5. С. 40-59.
36. *Фридман В. М.* Ультразвуковая химическая аппаратура. М.: Машиностроение, 1967. 212 с.
37. *Воронов А. Г.* Использование звуковых колебаний для ускорения процесса растворения каменной соли // Ультразвуковые методы интенсификации технолог. процессов: Сб. науч. тр. М., 1970. С. 186 - 189.
38. *Исследование* процесса автоклавно-содового выщелачивания щеелита в поле упругих колебаний / А. А. Бершитский и др. // Ультразвуковые методы интенсификации технологических процессов: Сб. науч. тр. М.: Металлургия, 1970. С. 193 - 197.

39. *Берцицкий А. А.* Интенсификация процесса аммиачного выщелачивания молибденовой кислоты при воздействии акустических колебаний // Применение ультразвука в металлург. процессах: Сб. науч. тр. М., 1972. С. 80.
40. *Фридман В. М.* Исследование интенсификации физико-химических процессов систем Ж-Ж и Ж-Т при воздействии акустических колебаний и разработка акустической химико-технологической аппаратуры: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 1975. 31 с.
41. *Кардашев Г. А., Михайлов П. Е.* Тепломассообменные акустические процессы и аппараты. М.: Машиностроение, 1973. 223 с.
42. *Ермаков П. П.* Влияние воздействия акустических колебаний на процесс массопередачи / Теорет. основы хим. технологии. 1991. Т. 25. № 2. С. 198 - 203.
43. *Шишов Е. В., Вечканов С. Б., Захаров А. О.* Интенсификация теплообмена в рециркуляционной области течения за обратным уступом за счет организации когерентных вихревых структур под действием акустического поля / I Рос. нац. конф. по теплообмену. Т. 8. Интенсификация теплообмена. М.: Изд-во МЭИ, 1994. С. 227 - 232.
44. *Скрипник Ю. Н., Чехов О. С., Зеленцов В. Л.* Интенсификация тепломассообменных процессов на противоточных тарельчатых контактных устройствах // Теорет. основы хим. технол. 1991. Т. 25. № 1. С. 117 - 121.
45. *Явления* аномального протекания тепломассообменных процессов в многофазных средах // Р. Ф. Ганиев, А. А. Долинский, Н. И. Кобаско, К. В. Фролов / Доклады АН СССР. 1987. Т. 294. № 3. С. 560 - 563.
46. *Островский Г. М., Аксенова Е. Г.* Псевдооживление порошкообразных материалов при колебательном изменении давления газа // Теорет. основы хим. технол. 1997. Т. 31. № 1. С. 5 - 10.
47. *Евланов С. Ф., Зайцев С. И.* Влияние циклической пульсации давления газовой среды на массообмен слоя пористых гранул // Хим. пром-ть. 1996. № 1. С. 52 - 54.
48. *Наталуха И. А.* Математическое моделирование динамических режимов массовой кристаллизации // Теорет. основы хим. технол. 1996. Т. 30. № 4. С. 399 - 410.
49. *Назаренко А. Ф.* Об одном механизме гидродинамического звукообразования // Акуст. журнал. 1978. Т. 24. № 4. С. 573 - 576.
50. *Дудзинский Ю. М., Назаренко А. Ф.* Эффективность работы осесимметричных гидродинамических излучателей в условиях избыточного статического давления // Акуст. журнал. 1996. Т. 42. № 4. С. 569 - 572.
51. *Назаренко Э. Ф.* Эрозионная активность осесимметричных гидрадинамических излучателей с локализованной областью кавитационной природы // Акуст. журнал. 1998. Т. 44. № 2. С. 251 - 255.
52. *Ряполов Б. С., Анциферов А. А.* Применение кавитации в гидроструйной технологии // Изв. вузов. Машиностроение. 1993. № 6. С. 32 - 34.
53. *Запорожец Е. П., Александров И. А.* Интенсификация процессов химической технологии эжекционными струйными течениями жидкости и газов // Хим. пром-ть. 1991. № 8. С. 468 - 471.
54. *Белов О. А., Гамаюнов П. П.* Улучшение экономичности и экологичности автотракторных двигателей путем применения водотопливного эмульгатора в системе питания двигателя // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания в АПК СНГ: Мат-лы Всесоюзн. научн.-техн. сем. Изд-во Сарат. ун-та, 1992. Вып. 4. С. 37 - 41.
55. *Белов О. А., Гамаюнов П. П.* Принципиальная схема и конструкция ультразвукового эмульгатора // Проблемы экономичности двигателей внутреннего сгорания

в АПК СНГ: Мат-лы Всесоюзн. научн.-техн. сем. Изд-во Сарат. ун-та, 1992. Вып. 4. С. 41 - 45.

56. *Оборудование* для получения и обработки высоковязких дисперсных сред / Б. И. Басок, А. П. Гартвиг, А. Р. Коба и др. // Пром. теплотехника. 1996. Т. 18. № 1. С. 50 - 56.

57. *Долинский А. А., Шетаннов О. К.* Использование дискретно-импульсного ввода энергии для интенсификации процессов абсорбции // Пром. теплотехника. 1985. Т. 7. № 3. С. 41 - 46.

58. *Xiongwei Ni, Colin C. Stevenson.* On the effect of gap size between baffle outer diameter tube inner diameter on the mixing characteristics in an oscillatory baffled column // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 1999. № 74. P. 587 - 593.

59. *Шурчкова Ю. А.* Новый класс аппаратов для диспергирования жидкостей путем дискретно-импульсного ввода энергии // Пром. теплотехника. 1998. Т. 20. № 3. С. 14 - 18.

60. *Немчин А. Ф.* Новые технологические эффекты тепломассопереноса при использовании кавитации // Пром. теплотехника. 1997. Т. 19. № 6. С. 39 - 47.

61. *Богданов В. В., Христофоров Б. И., Клоцунг Б. А.* Эффективные малообъемные смесители. Л.: Химия, 1989. 224 с.

62. *Бугай А. С.* Ультразвук в целлюлозно-бумажной промышленности. Перм. изд-во, 1969. 66 с.

63. *Гидроизлучатели* роторно-пульсационного типа в процессах биотехнологии // Скиба В. В., Балабудкин М. А., Щебатин В. Г. Динамические эффекты мощного ультразвука: Сб. науч. тр. Ижевск. 1988. Вып. 3. С. 68 - 71.

64. *Балабудкин М. А.* Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности. М.: Медицина, 1983. 160 с.

65. *Эффект* предварительного активирования добавок в транспортном строительстве / Б. А. Усов, А. А. Допокеев, Е. А. Усов, А. А. Кальчин // Бетон и железобетон. 1989. № 4. С. 15 - 17.

66. *Балабышко А. М., Зимин А. И., Ружижский В. П.* Гидромеханическое диспергирование. М.: Наука, 1998. 331 с.

67. *Маршалкин Г. А.* Технологическое оборудование кондитерских фабрик. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. 448 с.

68. *Зимин А. И.* Обоснование параметров и разработка оборудования для технологической линии производства детергентов // Полимерные материалы: производство и экология: Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. Ярославль, 1995. С. 50 - 51.

69. *Зимин А. И.* Интенсификация и оптимизация технологического процесса производства детергентов // Полимерные материалы: производство и экология: Тез. докл. Всерос. научн.-техн. конф. Ярославль, 1995. С. 48 - 49.

70. *Балабышко А. М., Юдаев В. Ф.* Роторные аппараты с модуляцией потока и их применение в промышленности. М.: Недра, 1992. 176 с.

71. *Зимин А. И.* Технология переработки нейтрализованных серно-кислых шламов в железистый пигмент // Пути и средства повышения экологической безопасности гальванических производств: Тез. докл. 4-го Всерос. науч.-техн. семинара. Ярославль, 1995. С. 7 - 39.

72. *Бодня М. Д.* Непрерывный процесс диспергирования пигментов при производстве эмалей путем озвучивания излучателями сиренного типа // Лакокрасочн. материалы и их применение. 1969. № 1. С. 24 - 26.

73. *Зимин А. И.* Интенсификация приготовления дисперсных сред в роторно-импульсных аппаратах в химико-фармацевтической промышленности // Хим.-фарм. журн. 1997. № 8. С. 50 - 53.

74. Ледова Т. М., Балабудкин М. А., Плюшкин С. А. Закономерности приготовления эмульсионных систем в роторно-пульсационном аппарате // Хим.-фарм. журнал. 1980. Т. 14. № 5. С. 96 - 99.
75. Гидроакустическая обработка мази Випросал в роторно-пульсационном аппарате / Б. В. Андреев и др. // Динамические эффекты мощного ультразвука: Сб. научн. тр. Ижевск, 1988. Вып. 3. С. 68 - 71.
76. Волков А. Н. Сжигание газов и жидкого топлива в котлах малой мощности. Л.: Недра, 1989. 160 с.
77. Павлов Б. П., Батуев С. И., Щевелев К. В. Подготовка водомазутных эмульсий для сжигания в топочных устройствах. В кн.: Повышение эффективности использования газообразного и жидкого топлива в печах и отопительных котлах. Л.: Недра, 1983. 216 с.
78. Селиверстов В. М., Браславский М. И. Экономия топлива на речном флоте. М.: Транспорт, 1983. 231 с.
79. Зубрилов С. П., Селиверстов В. М., Браславский М. И. Ультразвуковая кавитационная обработка топлив на судах. Л.: Судостроение, 1988. 80 с.
80. Зимин А. И. Влияние состава топливных эмульсий на концентрацию оксидов азота и серы в выбросах промышленных котельных // Экологическая защита городов: Тез. докл. научно-техн. конф. М., 1996. С. 77 - 79.
81. Зимин А. И., Юдаев В. Ф. Применение аппаратов с прерывистым режимом течения в процессе производства топливных эмульсий // Экологическая защита городов: Тез. докл. научно-техн. конф. М., 1996. С. 80.
82. Зимин А. И., Старцев В. Н., Балабышко А. М. О влиянии стехеометрического соотношения Са/S в топливной дисперсии на степень очистки дымовых газов // Повышение эффективности теплофизических исследований технологических процессов промышленного производства и их метрологического обеспечения: Тез. докл. Второй Международн. теплофиз. школы. Тамбов, 1995. С. 110-111.
83. Зимин А. И., Старцев В. Н. Получение топливных дисперсий на основе жидкого топлива, ингибитора и поглотителя оксидов // Повышение эффективности теплофизических исследований технологических процессов промышленного производства и их метрологического обеспечения: Тез. докл. Второй Международн. теплофиз. школы. Тамбов, 1995. С. 112.
84. Зимин А. И., Старцев В. Н., Балабышко А. М. Влияние стехиометрического соотношения Са/S в топливной эмульсии на степень очистки дымовых газов от оксидов серы и азота // Проблемы безопасности труда на предприятиях со взрывопожароопасным производством: Тез. докл. Международн. науч.-техн. семинара. Минск, 1995. С. 78 - 80.
85. Экспериментальная и промышленная практика применения роторных аппаратов с прерыванием потока в процессах приготовления топливно-дисперсных смесей для промышленных котельных / В. И. Биглер, А. И. Зимин, А. И. Сопин, В. Ф. Юдаев / Актуальные проблемы теории, практики и создания роторных аппаратов // Мат-лы Межресп. научно-практ. совещания (Москва, 1999). СПб.: ИТИ -Центр, 1999. С. 21-22.
86. Использование насоса-диспергатора для получения раствора полиакриламида / А. О. Никифоров, А. В. Коршаков, Ю. И. Аверхбук, Е. Ю. Сергеев. // Хим. и нефтехим. машиностроение. 1990. № 11. С. 14-15.
87. Расчет дисперсности эмульсии, образующихся в роторно-статорном аппарате / Ю. И. Аверхбук, А. О. Никифоров, Н. М. Костин, А. В. Коршаков. // Журн. прикл. химии. 1988. № 2. С. 433-434.

88. Балабышко А. М. Эффективное применение роторных аппаратов для получения рабочих жидкостей гидросистем проходческой техники / Шахтное строительство. 1990. № 3. С. 41 - 43.
89. Балабышко А. М. Технология производства рабочих жидкостей для гидросистем горной техники // Горн. журн. 1989. № 8. С. 39 - 42.
90. Балабышко А. М. Установка для получения и регенерации рабочих жидкостей // Уголь. 1989. № 4. С. 45 - 47.
91. Балабышко А. М. Повышение надежности работы гидропривода механизированных крепей очистных компонентов. М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1990. 20 с.
92. Балабышко А. М. Установка для приготовления и регенерации рабочей жидкости на добычном участке // Уголь. 1990. № 4. С. 45 - 48.
93. Балабышко А. М. Рабочие жидкости гидросистем и опыт их производства в угольной промышленности: (Обзор). М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1992. 24 с.
94. Балабышко А. М. Совершенствование установки для приготовления и подачи рабочей жидкости в гидросистемы механизированных комплексов с применением роторных аппаратов с модуляцией потока // Уголь. 1991. № 5. С. 57 - 60.
95. Зимин А. И. Приготовление и регенерация рабочих жидкостей для гидрооборудования механизированных крепей: гидромеханический аспект проблемы // Горн. журн. 1996. № 5. С. 42 - 44.
96. Зимин А. И. Диспергирование рабочих жидкостей для гидрооборудования с учетом центробежного эффекта // Уголь. 1996. № 10. С. 23-24.
97. Зимин А. И., Балабышко А. М., Старцев В. Н. Приготовление рабочей жидкости для гидросистем механизированных крепей в гидромеханических диспергаторах // Применение роторных гидромеханических диспергаторов в горнодобывающей промышленности: Тез. докл. Международн. научно-практич. сем. Солигорск, 1998. С. 9 - 13.
98. Зимин А. И. Теоретическое описание гидромеханического диспергирования шахтных эмульсий: нестационарный гидравлический подход // Горная техника на пороге XX века: Тез. докл. Межд. сем. М.: МГГУ, 1996. С. 266-267.
99. Долинский А. А., Басок Б. И., Шурчкова Ю. А. Теплофизические исследования технологического процесса стерилизации и гомогенизации жидких дисперсных систем // Повышение эффективности теплофизических исследований технологических процессов промышленного производства: Тез. докл. II Международн. теплофизич. школы. Тамбов, 1995. С. 37.
100. Долинский А. А., Басок Б. И. Роторно-импульсный аппарат. 3. Дробление включений дисперсной фазы // Пром. теплотехника. 1999. Т. 21. № 2-3. С. 5-6.
101. Долинский А. А., Басок Б. И. Роторно-импульсный аппарат. 2. Локальный импульсный нагрев жидкости // Пром. теплотехника. 1999. Т. 21. № 1. С. 3 - 5.
102. Балабышко А. М. Прогрессивное оборудование для получения высококачественных смазочно-охлаждающих жидкостей. М.: ВНИИТЭМР, 1989. 40 с.
103. Балабышко А. М., Зимин А. И. Роторный аппарат с модуляцией потока для получения высоковязких СОЖ // Вестн. машиностроения. 1990. № 5. С. 59-60.
104. Зимин А. И. Приготовление раствора эвкалимина в этиловом спирте в роторном аппарате при импульсном возбуждении кавитации // Хим.-фарм. журн. 1996. № 10. С. 46-47.
105. Зимин А. И. Технология получения раствора эвкалимина в режиме импульсного возбуждения кавитации // Научно-технические химические технологии: Тез. докл. 3 Международн. конф. Тверь, 1995. С. 186.

106. *Зимин А. И., Юдаев В. Ф.* Абсорбция диоксида углерода водой в роторном аппарате с модуляцией потока // Теорет. основы хим. технологии. 1989. Т. 23. № 5. С. 673 - 676.
107. *Маргулис М. А., Гаврилов В. А., Шаяхметов Ф. Г.* Синтез окислов азота в кавитационном поле гидродинамического излучателя // Журнал физ. химии. 1989. Вып. 11. С. 3088-3089.
108. *Базадзе Л. Г., Зимин А. И., Юдаев В. Ф.* Воздействие кавитации на процесс разделения водно-спиртовой смеси // Журн. прикл. химии. 1989. № 5. С. 1166 - 1168.
109. *Зимин А. И.* Кавитационная ректификация двухкомпонентных смесей // Теорет. основы хим. технологии. 1996. Т. 30. № 4. С. 392 - 398.
110. *Химические и физико-химические процессы в полях, создаваемых гидроакустическими излучателями / Р. Б. Валитов и др. // Журнал физ. химии. 1986. № 4. С. 889 - 892.*
111. *Химические и физико-химические процессы в полях, создаваемых гидроакустическими излучателями / Р. Б. Валитов и др. // Журнал физ. химии. 1986. № 4. С. 893 - 897.*
112. *Балабышко А. М.* Разработка роторного аппарата для получения стабильных эмульсий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1985. 16 с.
113. *Балабышко А. М.* Обоснование, разработка и создание оборудования по приготовлению и регенерации рабочих жидкостей для механизированных крепей очистных комплексов: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 1992. 31 с.
114. *Балабудкин М. А.* Исследование диспергирования и гидромеханических явлений в роторно-пульсационных аппаратах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1972. 16 с.
115. *Барам А. А.* Исследование процесса извлечения веществ из пористых тел в многофазных системах в поле механических колебаний: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1963. 16 с.
116. *Биглер В. И.* Исследование течений в аппарате типа динамической сирены и его применение для процесса растворения: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1979. 169 с.
117. *Бутко Г. Ю.* Исследование процессов эмульгирования в роторно-пульсационном аппарате применительно и целлюлозно-бумажному производству: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1975. 16 с.
118. *Звездин А. К.* Использование аппаратов типа РАМП для получения высокодисперсных эмульсий в режиме акустической кавитации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1983. 16 с.
119. *Зимин А. И.* Интенсификация процессов диспергирования и растворения в роторных аппаратах при импульсном возбуждении кавитации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1984. 16 с.
120. *Зимин А. И.* Нестационарные гидромеханические процессы в импульсно-кавитационных аппаратах с прерыванием потока: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 1998. 32 с.
121. *Карепанов С. К.* Обоснование параметров модулятора гидромеханического диспергатора для приготовления рабочей жидкости механизированных крепей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1999. 20 с.
122. *Киладзе Г. Г.* Исследование гидромеханических характеристик и параметров процесса гомогенизации пищевых дисперсных систем в гидромеханических роторно-пульсационных аппаратах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1975. 16 с.
123. *Колесников Г. Е.* Расчет роторно-пульсационных аппаратов для процессов эмульгирования: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1983. 134 с.

124. *Лошакова О. А.* Исследование гидромеханических закономерностей работы аппаратов роторно-пульсационного типа: Дис. ... канд. техн. наук. Л., 1982. 169 с.
125. *Мандрыка Е. А.* Экспериментальное исследование кинетики процесса растворения в роторном аппарате с модуляцией потока: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1979. 166 с.
126. *Плотников В. А.* Исследование и расчет роторно-пульсационного аппарата: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1978. 228 с.
127. *Сопин А. И.* Исследование параметров гидродинамической сирены с целью получения высокодисперсных гетерогенных систем: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1975. 16 с.
128. *Червяков В. М.* Растворение твердого в жидкости и диспергирование жидкостей в длиноканальном роторном аппарате с модуляцией потока: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1982. 16 с.
129. *Юдаев В. Ф.* Исследование гидродинамического аппарата сиренного типа и его использование для интенсификации технологических процессов в гетерогенных системах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1970. 16 с.
130. *Юдаев В. Ф.* Роторные аппараты с модуляцией потока и импульсным возбуждением кавитации для интенсификации процессов химической технологии: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 1984. 32 с.
131. *Willems P.* Kinematik High – Frequency and Ultrasonic Treatment of Palp // *Palp and Paper Magazine of Canada.* 1952. V. 63. № 9. P. 19 - 25.
132. *Willems P.* Application of Ultrasonic Techniques to Pulping and Refiring. // *The Worlds Paper Trade Review.* 1961. № 19. P.155 - 159.
133. *Fuch O.* Uberhochfrequente Stoffbehandlung // *Chemiker Zeitung.* 1960. № 24. S. 809 - 814.
134. *Jayme J., Gronert H., Neuhaus W.* Von zellstoff Fasern durch hochfrequente Behandlung // *Das Papier.* 1959, H23/24. S. 578 - 583.
135. *Pay. J.* Konstruchion neuer gerote // *Zellstof und Papier.* 1962. № 5. S. 181 - 186.
136. *Балабудкин М. А.* О закономерностях гидромеханических явлений в роторно-пульсационных аппаратах // *Теорет. основы хим. технологии.* 1975. Т. 9. № 5. С. 783 - 788.
137. *Балабудкин М. А., Борисов Г. Н.* О путях повышения эффективности акустических и гидродинамических явлений в роторно-пульсационных аппаратах // *Новые физ. методы интенсификации технол. процессов: Сб. науч. тр. М., 1977. С. 98 - 102.*
138. *Барам А. А., Кокушкин О. А.* О характеристиках одного типа акустической сирены // *Акуст. журнал.* 1962. Т. 8. № 2. С. 238-239.
139. *О гидромеханических закономерностях работы роторно-пульсационного аппарата / П.П. Дерко, А. А. Барам, В. Б. Коган и др. // Теорет. основы хим. технологии.* 1973. Т. 7. № 1. С. 123-124.
140. *Волчинский В. А.* Исследование переменного поля давлений в зоне рабочих органов центробежно-пульсационных машин: Автореф. дис... канд. техн. наук. Л., 1972. 16 с.
141. *Ультразвук: Маленькая энциклопедия / Под ред. И. П. Голяминой. М.: Сов. энциклопедия, 1979. 400 с.*
142. *Балабудкин М. А., Барам А. А.* Исследование частотно-амплитудного спектра динамического давления в роторно-пульсационных аппаратах // *Теорет. основы хим. технологии.* 1968. Т. 11. № 4. С. 609 - 614.
143. *Балабудкин М. А., Барам А. А.* Исследование процесса мокрого диспергирования твердых материалов в роторно-пульсационном аппарате // *Теорет. основы хим. технологии.* 1968. Т. 11. № 4. С. 639 - 642.
144. *Карновский М. И.* Теория и расчет сирен // *Журн. техн. физики.* 1945. Т. 15. № 6. С. 348 - 364.

145. Балабудкин М. А., Лошакова О. А., Барам А. А. Зависимость частотных характеристик роторно-пульсационного аппарата от числа прорезей // Сб. научн. тр. Ленингр. технол. ин-т целлюлоз.-бум. пром-ти. 1973. Вып. 31. С. 127 - 130.
146. Биглер В. И., Лавренчик В. Н., Юдаев В. Ф. Возбуждение кавитаций в аппаратах типа гидродинамической сирены // Акуст. журнал. 1978. Т. 24. № 1. С. 34 - 39.
147. Юдаев В. Ф., Кокорев Д. Т. Исследование гидродинамической сирены // Изв. вузов. Машиностроение. 1969. № 10. С. 72 - 77.
148. Трошкин О. А., Плотников В. А. Исследование устойчивости вращающегося потока жидкости // Теорет. основы хим. технологии. 1980. Т. 14. № 5. С. 745 - 749.
149. Трошкин О. А. О проскальзывании жидкости в роторе распылителя // Теорет. основы хим. технологии. 1980. Т. 8. № 2. С. 303 - 305.
150. Долинский А. А., Басок Б. И. Роторно-импульсный аппарат. 1. Импульсные эффекты локального адиабатического вскипания и кавитации жидкости // Пром. теплотехника. 1998. Т. 20. № 6. С. 7 - 10.
151. Биглер В. И., Юдаев В. Ф. Нестационарное истечение реальной жидкости через отверстия гидродинамической сирены // Акуст. журнал. 1978. Т. 24. № 2. С. 289 - 291.
152. Юдаев В. Ф. Истечение газожидкостной смеси через отверстия ротора и статора сирены // Изв. вузов. Машиностроение. 1985. № 12. С. 60 - 66.
153. Альтшуль А. Д. Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 1982. 224 с.
154. Юдаев В. Ф., Зимин А. И., Базадзе Л. Г. Методы расчета гидравлических и динамических характеристик модулятора роторного аппарата // Изв. вузов. Машиностроение. 1985. № 1. С. 65 - 70.
155. Юдаев В. Ф., Зимин А. И., Базадзе Л. Г. К методам расчета гидравлических и динамических характеристик модулятора роторного аппарата // Изв. вузов. Машиностроение. 1987. № 11. С. 63 - 65.
156. Зимин А. И. Определение оптимального коэффициента заполнения роторного аппарата с модуляцией потока // Разработка, исследование и расчет машин и аппаратов химических производств: Межвуз. сб. науч. тр. М.: МИХМ, 1984. С. 135 - 138.
157. Ружицкий В. П. О влиянии степени нестационарности потока обрабатываемой среды на интенсивность гидромеханических процессов в гидромеханическом диспергаторе // Нестационарная гидромеханика: теория, эксперимент, практические приложения: Сб. науч. тр. М.: СВС-Технология, 1997. С. 5 - 9.
158. Ружицкий В. П. Об одном приближенном способе решения нестационарного уравнения Бернулли // Нестационарная гидромеханика: теория, эксперимент, практические приложения: Сб. науч. тр. М.: СВС-Технология, 1997. С. 10 - 15.
159. Карепанов С. К., Юдаев В. Ф. О нестационарных гидромеханических процессах в аппаратах химической технологии // Нестационарная гидромеханика: теория, эксперимент, практические приложения: Сб. науч. тр. М.: СВС-Технология, 1997. С. 44 - 49.
160. Юдаев В. Ф. Гидромеханический анализ структуры нестационарных переходных процессов течения обрабатываемой среды в аппаратах химической технологии // Нестационарная гидромеханика: теория, эксперимент, практические приложения: Сб. науч. тр. М.: СВС-Технология, 1997. С. 50 - 54.
161. Карепанов С. К., Юдаев В. Ф., Зимин А. И. Гидродинамический анализ структуры течения в аппаратах с прерыванием // Создание и внедрение современных аппаратов с активными гидродинамическими режимами для текстильной промышленности и производства химических волокон: Тез. докл. 2 Всесоюзн. научно-техн. совещ. М., 1981. С. 18.
162. Зимин А. И. Прикладная механика прерывистых течений. М.: Фолиант, 1997. 308 с.

163. *Зимин А. И.* Гидравлический гистерезис: теория и эксперимент. М.: СВС-Технология, 1997. 40 с.
164. *Зимин А. И.* Имитационное моделирование нестационарных гидромеханических процессов. М.: СВС-Технология, 1997. 24 с.
165. *Зимин А. И.* Компьютерное моделирование нестационарных гидромеханических процессов. М.: СВС-Технология, 1997. 43 с.
166. *Зимин А. И.* Нестационарные гидромеханические процессы в роторном аппарате с модуляцией потока рабочей среды - основные свойства, технологическое использование. М., 1995. 34 с. (Препр. / МВОКУ; 1 - 95).
167. *Зимин А. И.* О парадоксах теории нестационарных гидромеханических процессов. М., 1995. 15 с. (Препр. / МВОКУ; 2 - 95).
168. *Зимин А. И.* Линейный анализ пульсирующего течения через канал с колеблющейся задвижкой. М., 1995. 18 с. (Препр. / МВОКУ; 5 - 95).
169. *Зимин А. И.* О гидравлическом гистерезисе. М., 1995. 19 с. (Препр. / МВОКУ; 6 - 95).
170. *Зимин А. И.* Математическая модель нестационарного течения жидкости через вращающийся и неподвижный канал. М., 1995. 33 с. (Препр. / МВОКУ; 7 - 95).
171. *Зимин А. И.* О бифуркационных явлениях в нестационарных гидромеханических процессах // Теорет. основы хим. технологии. 1997. Т. 31. № 3. С. 238 - 242.
172. *Зимин А. И.* Бифуркации и аномалии в теории и практике гидромеханического диспергатора // Уголь. 1997. № 3. С. 29-30.
173. *Зимин А. И., Балабашко А. М., Старцев В. Н.* / Аналитический и компьютерный расчет режимов работы гидромеханического диспергатора // Уголь. 1996. № 6. С. 26.
174. *Зимин А. И., Балабышко А. М., Ружицкий В. П.* Анализ гидромеханических процессов и расчет кавитационного режима диспергирования в гидромеханическом диспергаторе // Уголь. 1995. № 3. С. 46-47.
175. *Зимин А. И.* Качественный анализ нестационарных гидромеханических процессов в роторно-импульсном аппарате // Нестационарная гидромеханика: теория, эксперимент, практические приложения. М.: СВС-Технология, 1997. С. 16 - 21.
176. *Зимин А. И.* Эвристические методы в решениях дифференциальных уравнений нестационарной гидромеханики // Нестационарная гидромеханика: теория, эксперимент, практические приложения / М.: СВС-Технология, 1997. С. 22 - 32.
177. *Зимин А. И.* Получение высокоэнергетических импульсов при помощи периодического прерывания потока рабочей среды // Военно-научн. сб. № 2. М.: МВОКУ, 1994. С. 106 - 109.
178. *Зимин А. И.* Создание направленных энергетических потоков при помощи источников взрывного типа // Военно-научн. сб. № 2. М.: МВОКУ, 1994. С. 110 - 113.
179. *Зимин А. И.* Нестационарные гидромеханические процессы: основные свойства, технологическое применение // Школа по моделированию автоматизированных технологических процессов / Математические методы в химии и хим. технологии: Тез. Докл. Международн. конф. Новомосковск, 1997. С. 8 - 10.
180. *Зимин А. И.* Компьютерный анализ нестационарных гидромеханических процессов в роторно-импульсном аппарате // Школа по моделированию автоматизированных технологических процессов / Математические методы в химии и хим. технологии: Тез. докл. международн. конф. Новомосковск, 1997. С. 41-42.
181. *Зимин А. И., Старцев В. Н.* К расчету характеристик нестационарного движения гетерогенных сред через переменное сопротивление: учет критерия Рейнольдса // Физико-

химические и механические процессы в композиционных материалах и конструкциях: Тез. докл. научно-техн. конф. М., 1996. С. 89-91.

182. *Зимин А. И., Старцев В. Н.* Аналитическое решение уравнения движения гетерогенной среды через переменное сопротивление // Физико-химические и механические процессы в композиционных материалах и конструкциях: Тез. докл. научно-техн. конф. М., 1996. С. 92 - 94.

183. *Зимин А. И.* Новая математическая модель нестационарного гидромеханического процесса в роторном аппарате с периодической модуляцией площади проходного сечения каналов // Проблемы химии и химической технологии: Тез. докл. Всерос. научн.-техн. конф. Курск, 1995. С. 70 - 73.

184. *Зимин А. И.* Две теоремы теории прерывистых (разгоно-тормозных) течений // Применение роторных гидромеханических диспергаторов в горнообывающей промышленности: теория, практика: Сб. докл. Межд. научно-практ. семинара. Минск, 1998. С. 14 - 19.

185. *Карепанов С. К.* Математическая модель течения рабочей жидкости в каналах ротора и статора гидромеханического диспергатора // Применение роторных гидромеханических диспергаторов в горнодобывающей промышленности: теория, практика: Минск, 1998. С. 57 - 67.

186. *Карепанов С. К.* Расчет давления в зазоре роторного гидромеханического диспергатора // Применение роторных гидромеханических диспергаторов в горнодобывающей промышленности: теория, практика: Минск, 1998. С. 68 - 73.

187. *Карепанов С. К.* Расчет площади проходного сечения трапецевидных каналов ротора и статора гидромеханического диспергатора как функции времени // Применение роторных гидромеханических диспергаторов в горнодобывающей промышленности: теория, практика: Сб. докл. Межд. научно-практ. семинара. Минск, 1998. С. 74 - 78.

188. *Карепанов С. К., Ружицкий В. П.* Реализация математической модели течения рабочей жидкости в каналах ротора и статора гидромеханического диспергатора // Математические методы в механике прерывистых течений: Межвуз. сб. науч. ст. СПб.: Технопанорама, 1999. С. 19 - 27.

189. *Ружицкий В. П.* Универсальная модель переменного гидравлического сопротивления роторного гидромеханического диспергатора // Применение роторных гидромеханических диспергаторов в горнодобывающей промышленности: теория, практика: Сб. докл. Межд. научно-практ. семинара. Минск, 1998. С. 52 - 56.

190. *Юдаев В. Ф.* Гидромеханические процессы в роторных аппаратах с модуляцией проходного сечения потока обрабатываемой среды // Теорет. основы хим. технол. 1994. Т. 28. № 6. С. 581 - 590.

191. *Юдаев В. Ф.* Методы расчета роторных аппаратов с модуляцией потока // Разработка, исследование и расчет машин и аппаратов химических производств: Межвуз. сб. науч. тр. М.: МИХМ, 1984. С. 139 - 143.

192. *Розенберг Л. Д.* Кавитационная область. В кн.: Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л. Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. Ч. 6. С. 221 - 266.

193. *Звездин А. К., Зимин А. И.* Возбуждение импульсной акустической кавитации // Гидродинамика и акустика одно- и двухфазных потоков: Сб. науч. тр. Новосибирск: СО АН СССР, Ин-т теплофизики, 1983. С. 92 - 97.

194. *Курочкин А. К., Смородов Е. А.* Экспериментальные исследования кавитации в роторных гидродинамических излучателях // Акуст. журнал. 1987. Т. 33. № 4. С. 707 - 711.

195. Биглер В. И., Звездин А. К., Юдаев В. Ф. Импульсное возбуждение кавитации в гидродинамических сиренах без питающего насоса // Акустика и ультразвуковая техника: Респ. межвед. научно-техн. сб. К.: Техника, 1984. С. 3-4.
196. Биглер В. И., Юдаев В. Ф. Импульсная акустическая кавитация в аппаратах типа гидродинамической сирены // Акуст. журнал. 1989. Т. 35. № 3. С. 409 - 412.
197. О гидромеханических автоколебательных явлениях / А. А. Барам, О. А. Лошакова, В. Б. Коган, Б. А. Клоцунг // Теорет. основы хим. технол. 1982. Т. 16. № 1. С. 132 - 135.
198. Юдаев В. Ф., Кокорев Д. Т., Сопин А. И. К вопросу о расчете геометрических параметров аппаратов типа гидромеханической сирены // Изв. вузов. Машиностроение. 1972. № 6. С. 80 - 85.
199. О механизме генерирования пульсаций давления в роторно-пульсационных аппаратах / Т. И. Евстигнеева, В. Н. Колесник, Ю. С. Кравченко, М. М. Ходыкер // Пром. теплотехника. 1997. Т.13. № 2. С. 63 - 67.
200. Зимин А. И., Ружицкий В. П., Старцев В. Н. Анализ резонансного режима работы роторного гидромеханического диспергатора // Горная техника на пороге XXI века / Тез. докл. Межд. сем. М.: МГТУ, 1996. С. 248-249.
201. Зимин А. И., Звездин А. К., Юдаев В. Ф. Оптимальные соотношения геометрических и кинематических параметров аппарата типа гидродинамической сирены // Совершенствование конструкций машин и аппаратов химических производств: Сб. науч. тр. М.: МИХМ, 1982. С. 47 - 50.
202. Зимин А. И., Звездин А. К. Оптимизация конструктивных параметров и режимов работы роторно-пульсационных устройств // Оптимальное проектирование в задачах химического машиностроения: Сб. науч. тр. М.: МИХМ, 1983. С. 31 - 34.
203. Rosenfeld K., Micrley Y. Schtippen in der Modernen Stoffaufbereitung // Wochenlat fur Papierfabrikation. 1963. В. 91. № 11-12. S. 288 - 292.
204. Балабудкин М. А. Масштабирование роторно-пульсационных аппаратов // Хим.-фарм. журн. 1981. № 1. С. 100 - 105.
205. Свинчар Л. И., Онацкий П. А., Гарбузова Г. Л. Роторно-пульсационные смесители для жидких сред: Экспресс-информ. ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ. М., 1972. № 4. 20 с. (Сер. ХМ-1).
206. Характеристика дисперсности двухфазной системы / Г. Е. Колесников, О. А. Трошкин, Ю. И. Макаров, А. В. Орлов // Теорет. основ хим. технол. 1989. Т. 23. № 4. С. 542 - 545.
207. Балабудкин М. А., Голобородкин С. И., Шулаев Н. С. Об эффективности РПА при обработке эмульсионных систем // Теорет. основы хим. технол. 1990. Т. 24. № 4. С. 502 - 508.
208. Барам А. А., Дерко П. П., Клоцунг Б. А. Расчет мощности аппаратов роторно-пульсационного типа // Хим. и нефтехим. машиностроение. 1978. № 4. С. 4 - 6.
209. Кокушкин О. А., Барам А. А., Павлушенко И. С. О расчете мощности ротационных аппаратов // Журн. прикл. химии. 1969. Т. 42. № 8. С. 1793 - 1798.
210. Исследование гидродинамических и акустических характеристик аппаратов с роторно-пульсационными устройствами // А. А. Барам, П. П. Дерко, В. Б. Коган и др. // Хим. и нефтехим. машиностроение. 1969. № 11. С. 11 - 13.
211. О расчете мощности на перемешивание жидкости в роторных аппаратах / И. Г. Павлов, В. П. Литкин, В. П. Глухов и др. // Журн. прикл. химии. 1972. Т. 45. № 8. С. 1782.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Пульсационные аппараты роторного типа известны в технике и технологии уже более сорока лет. Наибольшее применение эти аппараты нашли в химической и смежных с ней технологиях. Конструктивная схема пульсационных аппаратов роторного типа чрезвычайно проста и представляет собой симбиоз гидродинамической сирены и дезинтегратора. Казалось бы, за такой большой срок и в силу простоты конструкции эти аппараты должны быть хорошо исследованы, закономерности их работы изучены и формализованы в математическом виде. Но кажущаяся простота принципа работы пульсационных аппаратов роторного типа несет в себе простоту в механическом смысле и сложность в гидродинамическом и акустическом описании. Вероятнее всего в силу многообразия и сложности физических и химических процессов, протекающих в жидкой среде при обработке в пульсационном аппарате роторного типа, тормозится их широкое внедрение в промышленность.

Предлагаемая работа является обобщением результатов исследований пульсационных аппаратов роторного типа, которым автор посвятил пятнадцать лет научной деятельности. Автор базировался на фундаментальных и прикладных исследованиях, проведенных в данном направлении М. А. Балабудкиным, В. Ф. Юдаевым, А. М. Балабышко, А. И. Зиминым, В. П. Ружицким и многими другими исследователями.

Основное назначение данной работы - это ознакомление специалистов, работающих в области процессов и аппаратов химической технологии, с возможностями использования пульсационных аппаратов роторного типа в гидромеханических и теплообменных процессах и основами инженерных методов расчета этих аппаратов. Необходимо отметить, что перспективным направлением интенсификации химико-технологических процессов является применение аппаратов с высокоэнергетическим, многофакторным воздействием, к которым относятся пульсационные аппараты роторного типа.

Автор приносит благодарность А. И. Зимину, М. В. Монастырскому и В. М. Червякову за совместные исследования в данном направлении, обсуждение их результатов, советы и замечания, а также В. В. Титову за помощь в подготовке материала к печати.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация химико-технологических процессов и повышение эффективности технологического оборудования является одной из приоритетных задач развития науки и техники. Основой повышения качества продукции, увеличения производительности и снижения энергозатрат на проведение химико-технологических процессов служит разработка высокоэффективных технологических аппаратов с оптимальной удельной энергоемкостью и материалоемкостью, высокой степенью воздействия на обрабатываемые вещества.

В настоящее время перспективным научно-техническим направлением является разработка высокоэффективных аппаратов с многофакторным воздействием на обрабатываемую среду за счет дискретного ввода в рабочую зону массы и энергии большой плотности.

К аппаратам, реализующим метод дискретного, многофакторного энергетического воздействия на химико-технологические процессы относят пульсационные аппараты роторного типа (ПАРТ), принцип работы которых основан на нестационарности потоков вещества, энергии и импульса. Интенсификация химико-технологических процессов в ПАРТ обусловлена многофакторным воздействием на обрабатываемую жидкую гетерогенную среду, заключающемся в пульсациях давления и скорости потока жидкости, развитой турбулентности, интенсивной кавитации, пульсациях давления в локальных объемах жидкости при пульсациях и схлопывании кавитационных пузырьков, жестком кумулятивном воздействии, высоких сдвиговых и срезающих усилиях, активации жидкости. ПАРТ позволяют достичь больших значений плотности гидродинамической и гидроакустической энергии. В рабочих объемах аппарата за счет малых интервалов времени воздействия локализуется значительная мощность в потоке обрабатываемой жидкости.

ПАРТ зарекомендовали себя как достаточно эффективные устройства для проведения и интенсификации гидромеханических и массообменных процессов в различных отраслях промышленности: в химической промышленности они используются для приготовления различных дисперсий и эмульсий, интенсификации массообменных процессов; в фармацевтической и косметической - для экстрагирования лекарственных веществ из растительного сырья, приготовления витаминных препаратов, кремов, мазей и т.п.; в металлургической и горнодобывающей промышленности - для проведения процессов выщелачивания и получения рабочих жидкостей механизированных шахтных крепей; в топливно-энергетической промышленности - для приготовления водо-топливных эмульсий; в машиностроении - для приготовления смазочно-охлаждающих жидкостей, а также во многих других отраслях промышленности, список которых можно продолжить с указанием примеров конкретного практического их использования.

Вместе с тем ПАРТ достаточно просты в конструкции, их изготовление не требует сложных технологий, они надежны и эффективны в эксплуатации. Низкая энергоемкость ПАРТ обусловлена тем, что обрабатываемая жидкость является одновременно и источником и объектом гидромеханических колебаний. В ПАРТ отсутствуют промежуточные трансформаторы энергии, механическая энергия непосредственно преобразуется в акустическую и кавитационную энергию, благодаря чему КПД действия аппарата достаточно

высок. Высокоэнергетическое дискретное воздействие на обрабатываемые вещества в ПАРТ инициирует их качественные преобразования, активацию жидкости.

В то же время, в связи со сложностью и многообразием всего комплекса многофакторного воздействия на обрабатываемую жидкость в ПАРТ, актуальными являются такие проблемы: всестороннее исследование физических, физико-химических и химических явлений, имеющих место в ПАРТ при обработке жидких гетерогенных сред под воздействием мощных пульсационных течений, импульсной акустической кавитации, автоколебательных и резонансных эффектов, существенно влияющих на интенсивность технологических процессов; научное обоснование и разработка высокоэффективных технологических аппаратов с импульсным воздействием на обрабатываемую жидкую гетерогенную среду; широкое внедрение в промышленность гидромеханических аппаратов с многофакторным импульсным высокоэнергетическим воздействием; исследование комплексного воздействия на обрабатываемую гетерогенную жидкость различных физических факторов, интенсифицирующих химико-технологические процессы.

Таким образом, необходимо дальнейшее теоретическое и экспериментальное исследование всего комплекса эффектов и процессов протекающих в ПАРТ. Решение этих задач описывается в предлагаемой монографии.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

A - работа, Дж;

a - ширина канала, м;

B - коэффициент гидравлических потерь;

b - расстояние между двумя ближайшими стенками соседних каналов, м;

C - концентрация, кг/м³;

c - скорость звука, м/с;

D - диаметр кумулятивной струйки, м; коэффициент диффузии, м²/с;

d - размер частиц, м;

E - энергия, Дж;

F - движущая сила процесса;

f - частота, Гц;

G - критерий Кохрена;

J - поток массы вещества, кг/м · с;

h - высота канала, м;

I - сила тока, А;

i - количество перенесенного вещества, кг; число циклов;

K - индекс кавитации;

k - коэффициент;

L - величина перемещения частицы, м;

l - длина, м;

M - момент, Н · м;

m - масса;

N - мощность, Вт;

n - частота вращения ротора, об/с; количество пузырьков; количество граней;

P - давление, Па;
 Q - расход, м³/с;
 R - радиус, м;
 r - расстояние, м;
 S - площадь, м²;
 t, T - время, с; сила трения, Н;
 t - температура, К;
 U - напряжение, В;
 V - скорость, м/с;
 W - безразмерная скорость;
 x - координата, м;
 y - координата, м;
 z - число каналов;
 α - объемное газосодержание, угол;
 β - коэффициент количества движения, коэффициент массоотдачи, м/с; угол;
 χ - коэффициент;
 δ - зазор между ротором и статором, м;
 ε - коэффициент, удельная энергия, Дж/кг;
 γ - коэффициент, показатель политропы;
 η - коэффициент турбулентной вязкости, Па · с;
 φ - коэффициент;
 λ - коэффициент сопротивления трению;
 μ - коэффициент динамической вязкости, Па · с;
 ρ - плотность вещества, кг/м³;
 σ - поверхностное натяжение, Н/м; предел прочности, Па; квадратичное отклонение;
 τ - безразмерное время, напряжение, Н/м²;
 υ - объем;
 ω - угловая скорость, с⁻¹;
 ξ - коэффициент местного гидравлического сопротивления;
 ψ - функция амплитудная.

ИНДЕКСЫ

p - ротор;
 s - статор;
 k - камера;
 ε - эквивалентный;
 o - начальный;
 n - насыщенный пар;
кав - кавитационный;
 \min - минимальный;
 \max - максимальный;
 mpr - номер моды колебаний;
 t - твердое;
 m - амплитуда;

кв - квадратичный;
 L - жидкость;
г - газ;
н - насос;
 l - единичный.

КРИТЕРИИ

$Ho = Vt/2l$ - гомотронности;
 $Re = Vd\rho/\mu$ - Рейнольдса;
 $Sh = 2l/Vt$ - Струхаля;
 $Ro = (a_c/2l_s)^2$ - ротационный;
 $Pr = \mu/(\rho D)$ - Прандтля;
 $Cn = 1/(Ho + 1)$ - нестационарности;
 $Ko = (a_p/R_p)^2$ - Кориолиса;
 $Ma = V/c$ - Маха;
 $We = 2\sigma/R$ - Вебера;
 $Ta = R_p^{0,5} \delta^{0,5} \omega\rho/\mu$ - Тейлора;
 $Re_{oc} = 2V_{oc}\delta\rho/\mu$ - Рейнольдса осевой;
 $Re_m = \omega R_p \delta\rho/\mu$ - Рейнольдса модернизованный.

СОКРАЩЕНИЯ

ПАРТ - пульсационные аппараты роторного типа;
РИКА - роторный импульсно-кавитационный аппарат;
РПА - роторно-пульсационный аппарат;
РАМП - роторный аппарат с модуляцией потока;
ХТА - химико-технологическая аппаратура;
ХТП - химико-технологический процесс;
ХТС - химико-технологическая система;
ФХЭ - физико-химический эффект.

1. ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТОВ РОТОРНОГО ТИПА ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

1.1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В настоящее время одним из перспективных методов интенсификации химико-технологических процессов (ХТП) и повышения эффективности химико-технологической аппаратуры (ХТА) признаются методы, основанные на применении различных физико-химических эффектов, использующих внутренние и внешние источники энергии [1 - 10].

Под интенсификацией химико-технологических процессов в широком смысле понимают получение прямого или косвенного экономического эффекта за счет увеличения производительности, КПД, уменьшения энерго- и материалоемкости, длительности лимитирующих стадий, повышения качества продукта, эргономических и социальных показателей.

Все перечисленные параметры являются целевыми функциями интенсификации. При интенсификации ХТП предпринимают целенаправленное изменение какой-либо группы факторов, которые оказывают влияние на целевые функции. Различают два вида задач интенсификации:

- 1) совершенствование существующих химико-технологических систем (ХТС);
- 2) разработка принципиально новых ХТС [3 - 11].

Под ХТС понимают ХТП, реализуемый в ХТА.

Для количественной характеристики интенсивности ХТП используют выражение $i = M/(St)$, которое показывает количество перенесенного вещества (энергии) - M , кг (Дж) через единицу площади (объема) - S , м² (м³) за единицу времени - t , с [9 - 11].

Выявляя зависимость i от основных геометрических и режимных параметров ХТС, физических параметров обрабатываемой среды, определяют необходимость увеличения или уменьшения указанных параметров для увеличения i [9]. Критерий i получен на основе линейных кинетических уравнений, которые в ряде случаев не охватывают всего многообразия и сложности явлений тепло- и массопереноса [12 - 14].

Линейные законы переноса типа $dM/dt = kSF$, где F - движущая сила процесса; k - коэффициент скорости технологического процесса, могут быть обоснованы только в предположении о незначительности отклонения рассматриваемого процесса от состояния термодинамического равновесия и малости градиентов потенциалов переноса. Для анализа нелинейных соотношений между потоком переноса и градиентом потенциала используют принципы термодинамики необратимых процессов [15, 16]. Критерий i аналогичен потоку $dJ = dM/(dSdt)$ в термодинамике необратимых процессов.

Для большинства тепломассообменных, ряда гидромеханических процессов при инженерных решениях по выбору факторов, на которые необходимо воздействовать для увеличения i , можно использовать пропорциональность M параметрам S , F и k . Обычно для

интенсификации тепломассообменных процессов применяют перемешивание, дискретно-импульсный ввод энергии, специальные физические эффекты и организацию потоков. Для интенсификации механических и гидромеханических процессов необходимо активное влияние на движение отдельных элементов жидкости, газа и твердых тел [3 - 9, 17, 18].

Методы интенсификации ХТП (рис. 1.1.1) разделяют на комплексные, при которых ХТС рассматривают как единое целое, и декомпозиционные методы, выявляющие и классифицирующие отдельные стадии ХТП или элементы ХТА [9]. Декомпозиционные методы можно разделить на две, тесно связанные между собой группы: режимно-технологические и аппаратно-конструктивные [9]. Выделяют также методы пассивные, которые не требуют прямых затрат внешней энергии и активные, которые требуют затрат внешней энергии [17]. Между режимными и конструктивными, активными и пассивными методами нельзя провести четкую границу. Пассивные методы также требуют затрат энергии, но энергия расходуется не в явном виде. Использование нового для ХТП режимного метода, как правило сопряжено с определенными изменениями ХТА с использованием конструктивных методов. В этом случае можно провести аналогию между режимными и конструктивными методами, конструктивными и пассивными методами. Многие режимные и конструктивные методы связаны между собой, и здесь целесообразно применять комплексный подход в решении задач интенсификации ХТП [3 - 11, 17, 20].

Классификация методов ХТП дана в табл. 1.1 и показана на рис. 1.1.1. Каждый из методов интенсификации основывается на определенных физико-химических эффектах (ФХЭ). В табл. 1.1. указаны номера наиболее используемых ФХЭ, список которых приведен ниже.

1.1. Методы интенсификации

Режимные	Конструктивные
Совмещение технологических процессов: ФХЭ №№ 5, 8, 9, 12, 14, 20	Совмещение аппаратов: ФХЭ №№ 1, 2, 3, 10, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24
Использование внутренних источников энергии: ФХЭ №№ 1, 2, 3, 4, 6, 12	Использование внешних источников энергии. ФХЭ №№ 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22
Оптимизация режимных параметров: ФХЭ №№ 1, 2, 5, 13, 14	Оптимизация конструктивных параметров: ФХЭ №№ 1, 11, 24
Введение дополнительного вещества в рабочую зону: ФХЭ №№ 5, 7, 9	Введение специальных элементов в аппарат: ФХЭ №№ 6, 10, 11, 19, 20, 21, 22
Дискретно-импульсный ввод энергии: ФХЭ №№ 2, 3, 4, 19	
Создание нестационарностей (температуры, давления, концентрации, плотности и т.п.): ФХЭ №№ 1, 2, 5, 6, 10	
Наложение полей (магнитного, электрического, акустического, электромагнитного): ФХЭ №№ 2, 6, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24	

Физико-химические эффекты:

1. Турбулентность - интенсивное перемешивание жидкости, пульсации скорости и давления в жидкости при ее течении.

2. Кавитация - разрыв сплошности жидкости под действием растягивающих напряжений, приводящих к образованию пузырьков, наполненных газом и паром.

3. Кумулятивный эффект - усиленное в определенном направлении действие резкого изменения давления (взрыв, схлопывание пузырьков и т.п.).

4. Гидроудар - результат резкого изменения давления в жидкости, вызванный мгновенным изменением скорости ее течения в трубопроводе.

5. Инверсия фаз - переход вещества из одного агрегатного состояния в другое.

6. Эффект Кармана (вихреобразование) - периодический срыв вихрей при обтекании тела потоком газа или жидкости.

7. Эффект Ребиндера - снижение поверхностного натяжения жидкости под действием поверхностно активных веществ.

8. Эффект Соре (термическая диффузия) - перенос вещества за счет теплопроводности.

9. Эффект Дюфура (диффузионная теплопроводность) - перенос тепла за счет диффузии вещества.

10. Эффект Джоуля - Томсона - изменение температуры газа при протекании его под действием постоянного перепада давления сквозь дроссель - местное препятствие потоку газа (капилляр, вентиль, пористая перегородка и т.п.)

11. Капиллярный эффект - проникновение жидкости в узкие каналы (капилляры), обусловленное явлениями смачивания или несмачивания поверхности капилляра.

12. Трибоэффект - преобразование механической энергии в тепловую при относительном движении тел и фаз.

13. Эффект Краусольда - зависимость коэффициента теплоотдачи (массоотдачи) от толщины пленки жидкости.

14. Эффект Рейнольдса - увеличение теплоотдачи (массоотдачи) за счет увеличения скорости потока.

15. Эффект Риги-Ледюка - увеличение теплопроводности материалов в магнитном поле.

16. Электро- и магнитосепарация - разделение гетерогенной среды за счет разности электро- и магнитопроводности фаз.

17. Электрофорез - перенос частиц в электрическом поле вследствие наличия разноименных зарядов у твердой и жидкой фаз.

18. Электроосмос - перемещение жидкости вдоль стенок капилляра под действием приложенной ЭДС.

19. Эффект Юткина (электродинамический удар) - генерация ударных волн в жидкости при ее электрическом пробое.

20. Фото-, лазеро-, радиационно-, звуко-, электро-, плазмохимические эффекты - химические превращения вещества под действием соответствующего облучения, а также плазмы под действием электрического тока (электролиз).

21. Пьезоэлектрический и пьезомагнитный эффекты - возникновение поляризации диэлектрика или намагниченности вещества под действием внешнего давления и наоборот.

22. Магнито- и электрострикция - изменение размеров тела, вызванные изменением его намагниченности или деформация диэлектриков в электрическом поле.

23. Автоколебания - возникновение колебаний в системе за счет преобразования энергии постоянного движения в колебательную.

24. Резонанс - возрастание амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты вынужденных колебаний с собственной частотой колебательной системы.

Более подробно с физической сущностью и практическими применениями ФХЭ можно ознакомиться в литературе [3 - 9, 17].

Анализируя табл. 1.1. необходимо отметить, что последние три метода интенсификации предполагают какие-либо периодические процессы, протекающие в ХТС. Наложение

колебаний возможно как на элементы ХТА, так и на обрабатываемую среду. Колебания элементов ХТА часто называют вибрациями [21], колебания в обрабатываемой среде - акустическими колебаниями или волнами. Методы интенсификации, основные на генерации колебаний в обрабатываемой среде являются наиболее перспективными [3 - 11, 22 - 57]. Из класса акустической технологической аппаратуры для жидких сред наиболее эффективными для промышленного применения считают гидродинамические излучатели и, в частности, пульсационные аппараты роторного типа.

Акустические колебания различают на инфразвуковые (частота $f < 20$ Гц), звуковые ($f = 20 - 20 \cdot 10^3$ Гц), ультразвуковые ($f = 20 \cdot 10^3 - 10^8$ Гц), гиперзвуковые ($f > 10^8$ Гц). Для применения в промышленности наиболее часто используются колебания с частотами звукового и ультразвукового диапазонов. При воздействии на ХТП акустические колебания могут быть использованы в следующих случаях [31]:

- стимуляция (процесс осуществляется с применением колебаний);
- интенсификация (акустические колебания увеличивают скорость процесса);
- оптимизация (акустические колебания вызывают упорядочение процесса).

Наиболее часто акустические колебания используют для интенсификации ХТП. В гидромеханических процессах акустические колебания интенсифицируют такие процессы как: отстаивание, флотация, осаждение, диспергирование, эмульгирование, перемешивание, пеногашение, дегазация. В тепловых процессах - нагревание, охлаждение, выпаривание, испарение, горение. В массообменных процессах - кристаллизацию, сушку, растворение, набухание, абсорбцию, адсорбцию, экстракцию, выщелачивание. В механических процессах - экструдирование, литье, формование, диспергирование [3].

Интенсифицирующее действие акустических колебаний обусловлено, в первую очередь, эффектами второго порядка (нелинейными эффектами) [3, 31]: кавитация; пульсации газовых пузырьков; акустические течения; поверхностные эффекты; радиационное давление; пондеромоторные силы (Бьеркнесса, Стокса, Оссеена, акустического давления). По степени интенсификации механических процессов акустические способы в несколько раз превосходят электромагнитные [3].

В акустике различают плоские, цилиндрические и сферические волны в зависимости от вида излучающей поверхности. По величине амплитуды колебаний условно делят на волны бесконечно малой амплитуды и волны конечной амплитуды. Крайним случаем волн конечной амплитуды являются ударные волны.

Гармоническая волна является теоретической абстракцией. На практике реализовать излучение одной частоты невозможно и поэтому спектр колебаний является немонахроматическим и лежит в узком или широком диапазоне частот.

В зависимости от заложенного в принцип работы физического эффекта, различают следующие виды акустических излучателей: пьезоэлектрические, магнитострикционные, электродинамические, гидродинамические. Описанию таких промышленных излучателей, теории, расчету и их эксплуатации посвящено большое количество литературы [3, 22, 24 - 31]. Каждый вид излучателей имеет свои преимущества и недостатки.

Рассмотрим более подробно гидродинамические излучатели. Они сравнительно дешевые и производительные по отношению к другим видам излучателей [35]. В гидродинамических излучателях образование акустических колебаний происходит за счет энергии потока жидкости, что не требует специальных, сложных и энергоемких передаточных систем.

Существует множество гидродинамических преобразователей: от простейших золотниковых, до специальных, принцип работы которых основан на определенном физическом эффекте. Наиболее простыми и универсальными являются золотниковые, клапанные и мембранные прерыватели потока. Спектр колебаний таких излучателей является низкочастотным. Они эффективны в крупногабаритной колонной аппаратуре и трубопроводах [27, 32 - 35, 41, 58, 59].

В гидродинамическом пластинчатом излучателе струя жидкости, вытекая из сопла с большой скоростью, ударяется в острую кромку металлической пластины, которая возбуждается и колеблется на одной из собственных частот [36, 41]. Завихрения на обеих сторонах пластины вызывают периодические импульсы давления, распространяющиеся со скоростью звука. При соблюдении оптимальных соотношений в жидкости создается мощное акустическое поле. Эти излучатели эффективно работают при скорости истечения более 25 м/с.

К числу перспективных гидродинамических излучателей следует отнести излучатели типа "сопло - лунка" и с тороидальным потоком, разрабатываемые Назаренко А. Ф. Они хорошо зарекомендовали себя при обработке систем типа "жидкость - жидкость" [49 - 51].

Вихревые преобразователи работают по принципу образования вихрей при вращательном движении жидкости в цилиндре, куда она вводится тангенциально. Генерирование колебаний происходит за счет импульсов давления, возникающих при образовании вихрей.

В генераторе кавитации [41] конусообразный ротор вращается в статоре такой же формы. Рабочие поверхности ротора и статора выполнены шероховатыми. При вращении ротора в зазоре между ротором и статором возникают микровихри и кавитация.

Высокоэффективными устройствами для обработки жидких сред показали себя суперкавитирующие аппараты. Интенсивная кавитация возникает при прохождении через каналы специальной формы и обтекании специальных кавитаторов [22, 60].

Одним из перспективных типов гидродинамических излучателей являются пульсационные аппараты роторного типа, которые содержат ротор и статор с каналами. При вращении ротора, его каналы периодически совпадают с каналами статора. В результате этого в обрабатываемой жидкости генерируются импульсы давления и разрежения, возникает кавитация, мелкомасштабные пульсации, гидравлические удары, развитая турбулентность. В литературе таким аппаратам даются несколько названий. Наиболее часто встречаются такие, как роторно-пульсационный аппарат (РПА) и роторный аппарат с модуляцией потока (РАМП). В главе 7 будет сделана детальная классификация подобных аппаратов. Более общим названием может быть ПАРТ - пульсационные аппараты роторного типа. При ссылке на конкретные примеры применения ПАРТ в промышленности мы будем называть их так, как они названы в литературных источниках.

1.2. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТАХ РОТОРНОГО ТИПА

Пульсационные аппараты роторного типа используются для обработки таких систем, как "жидкость - жидкость", "жидкость - твердое тело" и "газ - жидкость". Для каждого конкретного технологического процесса существуют определенные предпочтения в типе конструктивного и технологического оформления ПАРТ.

Пульсационные аппараты роторного типа различных видов и модификаций нашли применение в гидромеханических и тепломассообменных процессах за счет широкого спектра факторов воздействия:

- механическое воздействие на частицы гетерогенной среды, заключающееся в ударных, срезающих и истирающих нагрузках и контактах с рабочими частями ПАРТ;
- гидродинамическое воздействие, выражающееся в больших сдвиговых напряжениях в жидкости, развитой турбулентности пульсациях давления и скорости потока жидкости;

- гидроакустическое воздействие на жидкость осуществляется за счет мелкомасштабных пульсаций давления, интенсивной кавитации, ударных волн и вторичных нелинейных акустических эффектов.

Краткий обзор, который будет сделан ниже, покажет основные области применения ПАРТ и их потенциальные возможности.

1.2.1. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ И ГОМОГЕНИЗАЦИИ СУСПЕНЗИЙ

ПАРТ типа РПА хорошо зарекомендовал себя в процессе получения дисперсий антиоксидантов, применяемых для стабилизации синтетических каучуков различного назначения и дисперсий наполнителей каучуков [61]. По разработанной технологии получают дисперсии антиоксидантов неозона "Д", "ДФФД", ионола с различными биоразлагаемыми эмульгаторами. При этом производительность процесса возрастает почти в 3 раза, в 4-5 раз увеличивается время расслаивания дисперсии по сравнению с ранее применяемой технологией. Прочность получаемых каучуков возрастает на 30 - 50 %. РПА применяется для завершения роспуска волокнистых материалов и для расщепления пучков волокон при переработке грубых волокнистых материалов [62]. Применяемая технология позволяет увеличить процент использования макулатуры в получении картона, повысить его качество и снизить расход электроэнергии на размол с 95 кВт/ч на тонну для конической мельницы до 25 кВт/ч на тонну для РПА.

Диспергирование и гомогенизация исходной суспензии питательной среды РПА в производстве окситетрациклина позволяет увеличить выход целевого продукта и получить дисперсность частиц 15 - 20 мкм [63].

Применение РПА позволило сопоставить длительность производственного цикла и повысить качество выпускаемых мягких лекарственных форм суспензионного типа. Общие затраты времени снизились в 6 - 10 раз, общие затраты энергии - в 3 - 5 раз [64].

Цементно-водная суспензия, подвергнутая кавитационной обработке в РАМП и добавленная в бетонную смесь, повышает прочность на сжатие и растяжение изделий из бетона [65, 66].

На крупных кондитерских фабриках сбивание массы для пастилы производится на агрегате ШЗД, состоящем из двухкорпусного смесителя роторной сбивательной машины типа РПА [67]. Насыщенная воздухом масса после обработки в РПА, оказавшись при атмосферном давлении, значительно увеличивается в объеме за счет расширившихся пузырьков воздуха внутри массы. Установка производит 600 кг/ч, потребляемая мощность - 11 кВт.

Производство детергентов, используемых для составления композиций синтетических моющих средств, требует тонкого помола и высокой степени гомогенизации. Использование ПАРТ типа РАМП обеспечивает существенное увеличение срока службы фильтра тонкой очистки и уменьшает вязкость детергентов [68, 69].

Перспективным направлением в энергетике является использование дисперсно-топливых систем. Использование качественных углемазутных суспензий позволяет уменьшить расход мазута на 20 - 25 %. РАМП служат эффективным устройством для получения угольно-масляных паст [70].

Диспергирование серы в РАМП применяется для получения осерненного масла, характеризующегося большой маслянистостью, прозрачностью и отсутствием запаха серы [70].

Использование РАМП в получении железоксидного пигмента позволяет обойтись без обжига шлама, а размол заменить диспергированием в РАМП [66, 71]. Известен положительный опыт применения РПА в лакокрасочной промышленности [72].

1.2.2. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭМУЛЬГИРОВАНИЯ

РПА интенсифицирует процесс выделения синтетических полимеров из растворов за счет эмульгирования раствора полимера [61].

Применение РПА для приготовления дисперсий масла в производстве маслonaполненных каучуков позволяет получить высокоустойчивую эмульсию с частицами размером менее 70 мкм. Та же эмульсия, получаемая по известной технологии имеет частицы размером 400 мкм [64].

Применение РПА в производстве лекарственных мазей (ихтиоловой, скипидарной, линимента аммиачного и т.п.) позволило существенно сократить затраты ручного труда, повысить качество готового продукта (средний размер дисперсной фазы - 2,5 мкм) и сократить время приготовления мазей в 4 раза [73 - 75].

Химические добавки полифункционального действия позволяют получить бетоны с высокими технологическими и эксплуатационными свойствами. Использование РПА для получения устойчивых и высокодисперсных эмульсий и паст, вводимых в бетон, позволило увеличить прочность бетона на 15 - 30 % [65].

В высоковязких мазутах имеет место повышенное содержание воды в виде отдельных местных скоплений, обусловленное процессами перевозки, перекачки, хранения и подогрева топлива. Использование в качестве топлива специально приготовленных водомазутных эмульсий является одним из эффективных методов, позволяющих решить эту проблему [76, 77].

Одной из применяемых технологий для использования в котлах малой и средней мощности является технология с использованием РПА [78, 79]. Для отопительных котлов малой мощности при сжигании водомазутной эмульсии получают существенный экономический эффект, повышение КПД на 3 - 5 % и снижения эмиссии загрязняющих веществ (СО, сажи, окислов азота) в атмосферу [76]. Обработка водо-мазутной эмульсии с добавлением кальция и ее последующее сжигание в промышленных котельных позволило уменьшить в дымовых газах концентрацию окислов азота в 2 - 5 раз, а концентрацию сернистого ангидрида в 2-3 раза [80 - 85].

Для интенсификации процесса получения раствора полиакриламида, используемого для повышения прочности бумаги и удержания наполнителей, нашел применение РПА, изготовленный на базе серийного центробежного насоса [86]. Время приготовления раствора по предлагаемой технологии сокращается почти в 1,5 раза. Увеличивается на 2 % показатель удержания коалина. Приготовление эмульсий изоаминового спирта, конденсаторного масла и толуола в воде с помощью насоса-диспергатора также дало хорошие результаты [87].

Одними из важных звеньев технологии подземной добычи угля являются гидрофицированные механизированные комплексы, для эксплуатации которых применяются водомасляные эмульсии с жесткими характеристиками: высокой дисперсностью, стабильностью, отсутствием седиментации и коагуляции. При использовании РАМП для приготовления рабочих жидкостей на шахтах России и Белоруссии сократился выход из строя многих узлов гидрооборудования. Значительно сократились аварийные простои [88 - 98, 66, 70].

РПА используется для гомогенизации и пастеризации молока. Кавитационное воздействие не только способствует повышению дисперсности эмульсии, но и уничтожает вредные микроорганизмы. При гомогенизации молока 90 % жировых шариков имели размер до 2 мкм [99]. Дисперсность майонеза, получаемого при помощи РПА в два раза ниже, чем при помощи клапанного гомогенизатора [100, 101].

Одной из областей применения эмульсий является их использование в качестве смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Получение высококачественных СОЖ требует разработки и применения нового высокоэффективного оборудования. Применение РАМП для получения СОЖ способствует повышению их качества, а также снижает энергозатраты в процессе их производства. Дисперсность СОЖ достигает 0,8 - 1,2 мкм, что увеличивает

стойкость режущего инструмента в среднем на 30 % и повышает чистоту обработки поверхности [66, 70, 102, 103].

1.2.3. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Перспективным направлением использования РПА является экстрагирование продуктов микробиологического синтеза, например, каротина из биомассы. При циркуляционной обработке среды, проходящей по замкнутому контуру из РПА в емкость и обратно, удалось достичь 100 % выхода каротина после четырех циклов обработки [63].

Многие лекарственные вещества получают методами экстрагирования сырья растительного и животного происхождения. Применение РПА в процессе экстрагирования инсулина подкисленным спиртом из предварительно измельченной (до 3 - 5 мм) поджелудочной железы животных позволяет получить экстракты с высокой активностью в 3 раза быстрее [64].

Применение РПА интенсифицирует процесс экстрагирования танина (галлодубильной кислоты) из галловых орешков (патологические новообразования на листьях малоазиатского дуба). Степень извлечения возрастает с 49 до 77 %, а время экстрагирования уменьшается с 3 до 0,5 ч [64].

Экстрагирование целевых компонентов из коры крушины в РПА увеличивает их выход на 20 % и снижает трудоемкость операций за счет совмещения процессов измельчения и экстракции [64].

Аналогичный эффект достигается при использовании РПА в экстрагировании масла из плодов шиповника, облепихового масла из плодов облепихи, каротиносодержащего комплекса из отходов производства препаратов "Холосас", спиртовом экстрагировании календулы, валерианы, водного экстрагирования танина из листьев сумки, экстрагирования мицелиальных антибиотиков [64].

Выщелачивание триоксида вольфрама из щелитового концентрата в РПА интенсифицирует процесс и позволяет уменьшить время достижения заданной концентрации в 2-3 раза [38].

Интенсификация процесса растворения эвкалимина в этиловом спирте показала высокую эффективность РАМП: время приготовления раствора уменьшается более чем на два порядка; уменьшаются потери спирта; снижаются энергетические затраты; снижается себестоимость производства ценного лекарственного препарата [104, 105].

Экспериментальные исследования [66, 106, 107] показали высокую эффективность применения РАМП для проведения процессов абсорбции диоксида углерода в воде и диспергирования азота в воде.

За счет развитой кавитации, генерируемой в РАМП, возможно проведение процесса разделения водно-спиртовой смеси на компоненты при нормальной температуре и давлении [108, 109]. В процессе разделения воды и спирта изменяется их концентрация в жидкой и газовой фазах за счет молекулярной и конвективной диффузии через межфазную поверхность между гомогенной водно-спиртовой смесью и паро-газовым пузырьком. Использование кавитации приводит к резкому увеличению межфазной поверхности за счет появления пульсирующих пузырьков, наполненных в основном парами спирта.

Гидроакустическое воздействие в РАМП на обрабатываемую жидкую среду значительно способствует увеличению скорости реакции дегидрохлорирования по сравнению с механическим перемешиванием и ультразвуковой обработкой, а также позволяет интенсифицировать реакцию синтеза S-пропил-N-пентаметиленкарбаната за счет более эффективного преобразования гидроакустической энергии в кавитационное воздействие [110, 111].

1.3. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЖИДКУЮ ГЕТЕРОГЕННУЮ СРЕДУ В ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТАХ РОТОРНОГО ТИПА, ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Как уже отмечалось в предыдущих параграфах, в пульсационных аппаратах роторного типа обрабатываемая жидкая гетерогенная среда подвергается многофакторному воздействию. Благодаря такому многообразию видов обработки, происходит интенсификация ХТП. Многие исследователи изучали в экспериментальном и теоретическом плане факторы воздействия, имеющие место в ПАРТ [112 - 130]. Исследование каждого из факторов воздействия в отдельности не представляет собой сложную задачу. Сложность проблемы заключается в том, что все факторы воздействия взаимосвязаны друг с другом и их взаимодействие создает новый качественный эффект. Выделить из общей совокупности механических, гидромеханических и акустических явлений и взаимодействий отдельный фактор принципиально возможно, но этот путь не является методически правильным и часто приводит к ошибочным результатам. При изучении каждого фактора воздействия в отдельности обязательно надо иметь в виду, что даже при использовании метода системного анализа необходимо учитывать взаимосвязь всех факторов, имеющих место в ПАРТ. Ниже мы попытаемся сделать анализ результатов по исследованию и описанию факторов воздействия в ПАРТ, полученных за несколько десятков лет их изучения и применения.

Прежде чем перейти к анализу исследования факторов воздействия, покажем принцип работы ПАРТ на наиболее распространенном конструктивном типе - радиальном роторном аппарате. Стандартная схема ПАРТ показана на рис. 1.3.1. Принцип работы аппарата заключается в следующем. Обрабатываемая жидкость подается под давлением или самотеком через входной патрубок 1 в полость ротора 2, проходит через каналы ротора 3, каналы статора 4, рабочую камеру 5 и выходит из аппарата через выходной патрубок 6. При вращении ротора его каналы периодически совпадают с каналами статора. Выходя из канала статора, жидкость собирается в рабочей камере и продвигается к выходному патрубку. В период времени, когда каналы ротора перекрыты стенкой статора, в полости ротора давление возрастает, а при совмещении канала ротора с каналом статора давление за короткий промежуток времени сбрасывается и в результате этого в канал статора распространяется импульс давления. Скорость жидкости в канале статора является переменной величиной. При распространении в канале статора импульса избыточного давления, вслед за ним возникает кратковременный импульс пониженного ("отрицательного") давления, так как совмещение каналов ротора и статора завершилось и подача жидкости в канал статора происходит только за счет транзитного течения из радиального зазора между ротором и статором. Объем жидкости, вошедший в канал статора, стремится к выходу из канала, и инерционные силы создают растягивающие напряжения в жидкости, что вызывает кавитацию. Кавитационные пузырьки растут при воздействии импульса пониженного давления и схлопываются или пульсируют при увеличении давления в канале статора. Часть кавитационных пузырьков выносятся в рабочую камеру.

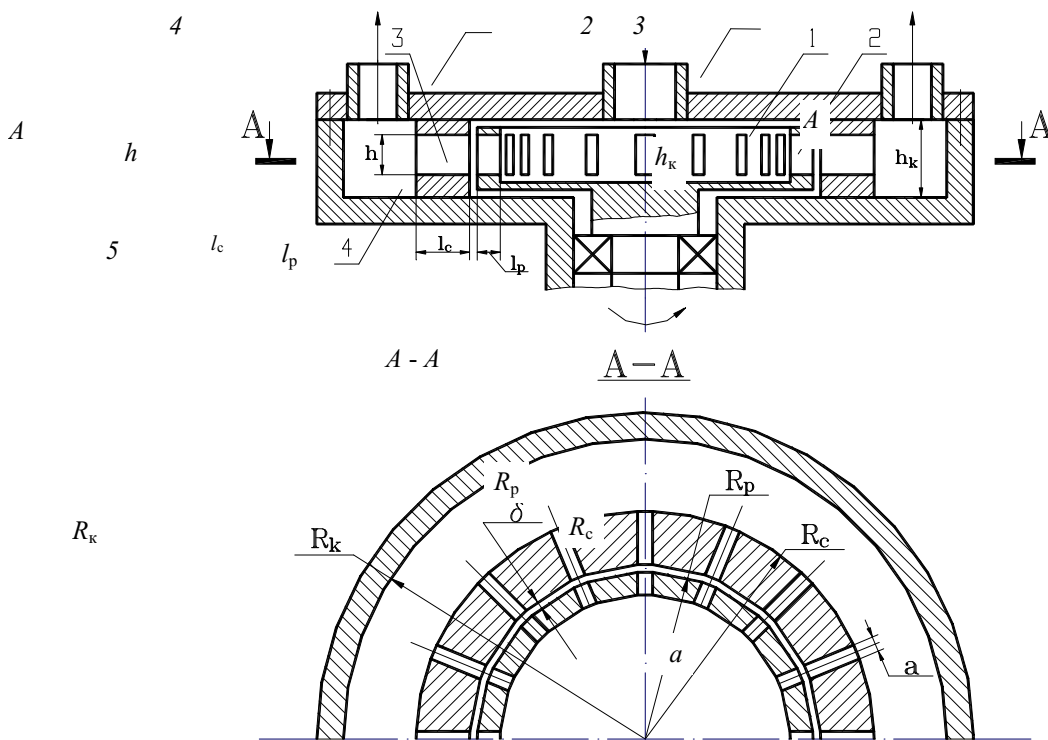


Рис. 1.3.1. Схема пульсационного аппарата роторного типа

В связи с тем, что скорость потока жидкости в канале статора велика и имеет флуктуации, поток является турбулентным. При вращении ротора в зазоре между ротором и статором возникают большие сдвиговые напряжения. Рабочие поверхности ротора и статора воздействуют на жидкую гетерогенную среду за счет механического контакта, создавая высокие срезающие и сдвиговые усилия.

Пульсации давления и скорости потока жидкости, интенсивная кавитация, развитая турбулентность, ударные волны и кумулятивные струйки от схлопывания кавитационных пузырьков, высокие сдвиговые и срезающие напряжения - это факторы воздействия на жидкую гетерогенную среду, подлежащие изучению, моделированию, оптимизации и использованию для повышения эффективности работы ПАРТ и интенсификации ХТП.

Одним из первых исследователей процессов и явлений, протекающих в ПАРТ, был П. Виллемс. По его мнению, основным фактором, обеспечивающим интенсификацию ХТП, является возникновение в обрабатываемой жидкости высокочастотных колебаний, генерируемых консольнозакрепленными, тонкостенными зубьями ротора и статора [131, 132]. Этой же гипотезы придерживаются авторы работ [62, 133, 134]. Эта модель учитывает только возникающие в аппаратах импульсы динамического давления. Градиенты давления, по Виллемсу, достигают 10^8 Па.

Анализируя величину проходного сечения перекрываемой прорези, Пэй [135] получил формулу для расчета частоты пульсаций в общем случае, когда число каналов статора не равно числу каналов ротора:

$$f = nz_c z_p / (z_c z_p), \quad (1.3.1)$$

где $(z_c z_p)$ - наибольший общий делитель чисел z_c и z_p ; z_p , z_c - число каналов в роторе и статоре соответственно; n - частота вращения ротора, об/с.

Эта формула согласуется с данными М. А. Балабудкина [136, 137].

Основную частоту пульсаций динамического давления, излучаемых в канал статора, следует рассчитывать по формуле [138 - 145]:

$$f_0 = nz_p. \quad (1.3.2)$$

В некоторых случаях отмечается максимум звукового давления на частоте вдвое меньшей, однако, в большинстве измерений на долю основной частоты приходится от 70 до 80 % звуковой энергии.

Одним из важных факторов воздействия, ответственным за основные физико-химические процессы в ПАРТ, являются пульсации давления в канале статора и рабочей камере. Этому аспекту посвящено огромное количество работ, что доказывает важность и неоднозначность задачи.

В работе [142] величину давления в канале статора определяют, исходя из тангенциальной V_1 и радиальной V_2 , составляющих скорости потока,

$$P = \frac{\rho}{2} (V_1^2 + V_2^2). \quad (1.3.3)$$

Тангенциальная составляющая скорости считается постоянной, так как угловая скорость ротора - постоянная величина. Радиальная составляющая скорости зависит от расхода и представлена в виде синусоиды. Синусоидальная зависимость расхода позволила получить представление зависимости площади проходного сечения в пилообразной форме.

Формула (1.3.3) лишь качественно отражает действительные процессы по флуктуациям давления в ПАРТ. Кроме того, авторы [142] пренебрегали влиянием вязкости и сжимаемости жидкости, а размеры прорезей и промежутков между ними на роторе были равны между собой.

Аналогичный подход был сделан в работе [146], где пренебрегая сжимаемостью жидкости и потерями на трение, для максимальной амплитуды переменного давления получена формула

$$P_m = k dQ_1(t)/dt, \quad (1.3.4)$$

где $Q_1(t)$ - переменный расход через одно отверстие, $\text{м}^3/\text{с}$; k - некоторая постоянная, зависящая от плотности жидкости и размеров отверстия.

Зависимость амплитуды пульсаций давления от расхода жидкости заложена в формуле

$$P_m = \frac{\rho R_p^2}{z_c a^2} \frac{\omega(Q - Q_T)}{h} \sqrt{\frac{1}{z_p} \lg \frac{R_p}{R_n}}, \quad (1.3.5)$$

где ρ - плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; R_p - радиус внешней поверхности ротора, м ; ω - угловая скорость ротора, с^{-1} ; Q и Q_T - полный расход и транзитный расход, $\text{м}^3/\text{с}$; a , h - ширина и высота каналов, м ; z_p , z_c - количество каналов в роторе и статоре; R_n - радиус цилиндрической полости, возникающей за счет вращения ротора, м , [147].

Не очень понятно, каким образом в полости ротора, в которую жидкость постоянно нагнетается под давлением, либо поступает за счет центробежного эффекта, возникает полость. Это утверждение нарушает положение о неразрывности сплошности потока. Подобное явление наблюдалось авторами работ [148, 149], однако, в отсутствии подвода и отвода жидкости из аппарата. Кроме того, при полностью заполненном жидкостью роторе ($R_n = 0$), амплитуда давления возрастает до бесконечности, что физически невозможно.

Расход жидкости через аппарат (или через одно отверстие статора) В. Ф. Юдаев представляет в виде [146]:

$$Q(t) = Q_{\min} + \frac{\omega R}{a} \begin{cases} (Q_{\max} - Q_{\min}) t, & 0 \leq t \leq \frac{a}{\omega R}; \\ (Q_{\max} - Q_{\min}) \left(\frac{2a}{\omega R} - t \right), & \frac{a}{\omega R} \leq t \leq \frac{2a}{\omega R}; \\ 0, & \frac{2a}{\omega R} \leq t \leq \frac{(a+b)}{\omega R}. \end{cases} \quad (1.3.6)$$

Здесь Q_{\max} и Q_{\min} - значения расхода соответственно при совпадающих и перекрытых каналах. Позднее формула (1.3.6) видоизменилась, но смысл ее не менялся [70].

У Балабудкина М. А. [142] зависимость расхода имеет вид

$$Q(t) = Q_m \left(k - \cos \frac{2\pi}{T} t \right), \quad (1.3.7)$$

где $k = \bar{Q}/Q_m$; \bar{Q} - среднее значение расхода, м³/с; Q_m - амплитуда изменений расхода, м³/с; T - период колебания в ПАРТ, с.

Впервые было отмечено [64, 142], что функция $Q(t)$ определяется также типом насоса и несет в себе дискретную составляющую при входе в аппарат.

Величину амплитуды пульсационного давления и расход жидкости через канал статора определяет скорость потока жидкости в канале и законы изменения площади проходного сечения канала статора и гидравлического сопротивления на входе в канал статора.

Скорость течения жидкости через прерыватель (канал ротора - зазор - канал статора) в работе [150] определяется на основе закона сохранения обобщенного интеграла Бернулли:

$$P_1 + \frac{\rho_1}{2} V_1^2 = P_2 + \left(1 + \sum \xi_i \right) \frac{\rho_2}{2} V_2^2 - \frac{\rho_2}{2} V_3^2, \quad (1.3.8)$$

где $P_{1,2}$ - давление на входе и выходе модулятора, Па; $V_{1,2}$ - скорость жидкости на входе и выходе модулятора, м/с; $\rho_{1,2}$ - плотность жидкости на входе и выходе модулятора, кг/м³; V_3 - линейная скорость потока жидкости на выходе канала ротора при равномерном вращении ротора, м/с; $\sum \xi_i$ - сумма коэффициентов местных сопротивлений модулятора.

В этом уравнении не учтена временная зависимость гидравлического сопротивления модулятора. Коэффициенты местных сопротивлений просто суммируются в предположении, что они постоянны в любой момент времени при характерных положениях канала ротора относительно канала статора.

Более точно, чем уравнение (1.3.8), течение реальной несжимаемой жидкости в модуляторе описывает нестационарное уравнение Бернулли [151, 152]:

$$\rho l \frac{dV}{dt} + \xi(t) \frac{\rho V^2}{2} = \Delta P, \quad (1.3.9)$$

где $l = l_p + \delta + l_c$ - длина модулятора, м.

Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от скорости представляется в виде [153]:

$$\xi(t) = \xi_{\text{KB}}(t) + B(t)/\text{Re}, \quad (1.3.10)$$

где $\xi_{\text{KB}}(t)$ - коэффициент гидравлического сопротивления в квадратичной области зависимости гидравлических потерь от скорости потока; $\text{Re} = V_0 d_{\text{э}} \rho / \mu$ - критерий Рейнольдса;

$B(t)$ - коэффициент гидравлических потерь; $V_0 = \sqrt{2\Delta P/\rho}$ - скорость установившегося течения при $\xi=1$; d_3 - эквивалентный гидравлический диаметр, м.

Уравнение (1.3.9) для удобства теоретического исследования и решения представлено в безразмерном виде:

$$d(kW)/d\tau = \text{Ho} (1 - \xi(t)W^2), \quad (1.3.11)$$

где k - коэффициент усреднения импульса по сечению потока; $\text{Ho} = V_0 t_0 / 2l$ - критерий гомохронности; $t_0 = a_p / (\omega R)$; $W = V/V_0$; $\tau = t/t_0$.

Уравнение (1.3.11) относится к дифференциальным уравнениям типа Риккати и в общем виде в квадратурах не решается. Ряд работ посвящен методам решения этого уравнения [154 - 161]. Анализ этих работ показывает, что методы линеаризации, аналитических приближений, квазилинеаризации практически дают один и тот же результат и не позволяют точно определить гидродинамические параметры в точном абсолютном выражении.

Уравнение (1.3.9) весьма перспективно для описания течения вязкой жидкости в канале статора. Экспериментальные осциллограммы импульсов давления в канале статора подтверждают правильность выбранного пути по математическому моделированию истечения жидкости через прерыватель аппарата. Дальнейшее усовершенствование математической модели течения потока реальной жидкости в ПАРТ было выполнено Зиминым А. И. [162 - 184]. Уравнение (1.3.9) преобразовано к виду

$$l_3 \frac{dV}{dt} + \frac{1}{2} \left(\xi(t) V^2 + \frac{B(t) V \mu}{d\rho} \right) = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{1}{2} \omega^2 R_p^2, \quad (1.3.12)$$

где $l_3 = l + (1 + \Gamma) \sqrt{S_{\max}/\pi}$ - эффективная длина модулятора, учитывающая влияние генерируемого переменного давления на нестационарные гидромеханические процессы в модуляторе аппарата, м; $\Gamma = \sqrt{S_{\text{вых}}/S_{\text{вх}}}$; $S_{\max} = a h$; $S_{\text{вых}}$ - площадь выходного отверстия модулятора (выходного отверстия канала статора), м²; $S_{\text{вх}}$ - площадь входного отверстия модулятора (входного отверстия канала ротора), м².

Второй член правой части уравнения (1.3.12.) отражает влияние центробежных сил давления. Необходимо заметить, что величину центробежного давления по формуле Эйлера определяет не радиус внешней поверхности R_p , а средний радиус канала ротора $R_{cp} = R_p - l_p/2$. Радиус ротора R_p может быть задействован в уравнении (1.3.12) только, если в полости ротора имеются лопатки. Хотя перепад давления входит в уравнение как постоянная величина, в реальности он так же имеет переменную составляющую, характер которой в настоящее время пока не определен.

В безразмерном виде уравнение (1.3.12) записывается как

$$\frac{dW}{d\tau} + W^2 \text{Ho} \xi(\tau) + W B(t) \frac{\text{Ho}}{\text{Re}} = 1 + \frac{\text{Ro}}{\text{Ho}},$$

где $\text{Ho} = V_0 t_0 / (2l_3)$; $\text{Re} = V_0 d_3 \rho / \mu$; $\text{Ro} = (a_c / (2l_3))^2$; $V_0 = \Delta P t_0 / (\rho l_3)$.

В этом уравнении V_0 составлена из параметров, дающих размерность скорости, но физическое обоснование этой дроби проблематично. Логичнее использовать в качестве V_0 значение средней скорости жидкости за период T (1.3.10). Столь же проблематичен физический смысл ротационного коэффициента Ro . По замыслу автора, ротационный коэффициент должен отражать влияние центробежных сил, но он составлен из линейных параметров, никак не связанных с центробежным давлением.

Дальнейшая модернизация уравнения (1.3.12) была произведена Карепановым к виду [185 - 188]:

С. К.

$$\Delta P = \rho l \frac{dV}{dt} + \left(\frac{dV}{dt} \right)^{-1} \omega^2 V^2 \rho l + \frac{\rho V^2}{2} \xi(t), \quad (1.3.13)$$

в котором учтены не только центробежные силы, но и сила Кориолиса, действующая на поток жидкости в канале ротора.

В безразмерном виде уравнение (1.3.13) записывается с учетом новых критериев [188]:

$$1 + \frac{C_n R_o}{1 - C_n} = \frac{dW}{d\tau} + \left(\frac{dW}{d\tau} \right)^{-1} W^2 K_o + \frac{1 - C_n}{C_n} \xi(\tau) W^2, \quad (1.3.14)$$

где $K_o = a_p^2 / R_p^2$ - критерий Кориолиса; $R_o = \frac{a_p^2}{2l^2} \left(1 + \frac{\delta^2}{2R_p^2} \right)$ - ротационный коэффициент;

$C_n = 1/(H_o + 1)$ - коэффициент нестационарности.

Несомненно, положительным вкладом в математическую модель (1.3.14) является учет новых членов, хотя и не имеющих существенного влияния на результаты решения. Не совсем понятно введение коэффициента нестационарности C_n , видоизменяющего уравнение (1.3.13), но не дающего качественного или количественного вклада.

Во всех уравнениях, описывающих течение реальной жидкости через модулятор, присутствует параметр $\xi(t)$ - переменное гидравлическое сопротивление, которое зависит от площади проходного сечения модулятора [162]:

$$\xi(t) = \left(\frac{S_{\max}}{\varepsilon S(t)} - 1 \right)^2, \quad (1.3.15)$$

где S_{\max} - наибольшая площадь проходного сечения прерывателя, м²; ε - коэффициент, определяемый из таблиц Н. Е. Жуковского [153].

Линейный метод анализа нестационарных гидромеханических процессов позволил А. И. Зимину [162] учесть влияние кинематических характеристик течения жидкости в модуляторе на коэффициент гидравлического сопротивления:

$$\xi_m(\tau, H_o) = (1 - dW/d\tau) / (H_o W^2). \quad (1.3.16)$$

Необходимо отметить, что кроме скорости потока жидкости, скорости вращения ротора и геометрических параметров аппарата, на гидравлическое сопротивление оказывает вязкость жидкости, толщина пристеночного ламинарного слоя и другие физические характеристики жидкости.

Зависимость изменения площади проходного сечения отдельного канала статора и аппарата в целом является основополагающей, и поэтому многие исследователи начинали изучать гидромеханические закономерности работы ПАРТ с решения этой задачи. Для описания состояния этого вопроса можно уделить много места и времени, но в данный момент эта проблема разработана достаточно хорошо с немного громоздкой, но основательной теоретической базой. Основной вклад в решение этой задачи был сделан М. А. Балабудкиным, В. Ф. Юдаевым, А. И. Зиминим и др. [60, 66, 70, 136, 142, 154, 162, 189].

Одним из основных факторов воздействия на гетерогенную жидкую среду, влияющих на интенсивность ХТП, является кавитация. Исследованию кавитации в ПАРТ посвящено много работ, но, несмотря на это, можно говорить о том, что сделан только качественный анализ процесса возникновения и развития кавитации как в теоретическом, так и в экспериментальном плане.

Исследования импульсной акустической кавитации проводились в основном экспериментальными методами. Это связано с тем, что в настоящий момент достаточно удовлетворительно разработана теория поведения только одиночного кавитационного пузырька в стационарном акустическом поле. Аналитическое описание динамики

кавитационной области сформировано лишь в первом приближении. Сложность описания кавитации заключается в том, что кавитация возникает в движущемся потоке жидкости, и при этом жидкость подвергается термодинамическому сжатию и разрежению. В силу этого, в ПАРТ генерируется кавитация особого типа, названная В. Ф. Юдаевым как импульсная акустическая кавитация.

Попытки аналитического описания динамики одиночного кавитационного пузырька в ПАРТ в первые были предприняты В. Ф. Юдаевым [190, 191]. Уравнение динамики кавитационного пузырька было дано в аппроксимации Херринга. Это уравнение записывалось с учетом изменения местного давления $P(x, t)$ вдоль линии тока жидкости, по которой движется пузырек, в виде:

$$\begin{aligned} & \rho_0 \left[(1-2\text{Ma}) R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{4}{3} \text{Ma} \right) \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \right] + P - P_{\text{п}} - \\ & - P_{\text{max}} f(t) - P(x) + \frac{2\sigma}{R} - \left(P + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\alpha} + \\ & + \text{Ma} (1 - \text{Ma}) R \frac{dP}{dR} = \quad (1.3.17) \end{aligned}$$

где $\text{Ma} = (dR/dt)/c$; $P(R) = Z\alpha \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \frac{t}{t_0} + P_{\text{п}} - \frac{2\sigma}{R} - 4\mu \frac{dR}{dt} \frac{1}{R}$; c - скорость звука в жидкости, м/с; $\alpha = P_{\text{п}0}/Z$ - начальное газосодержание; $Z = P - P_{\text{п}} + 2\sigma/R_0$; $P_{\text{max}} f(t)$ - возмущающее переменное давление в жидкости, Па; $P_{\text{п}}$ - однородное давление пара в пузырьке при температуре t , Па; ρ_0 - плотность невозмущенной жидкости, кг/м³; γ - показатель политропы; σ - поверхностное натяжение, Н/м; R_0 - начальный радиус пузырька, м; R - радиус пузырька; t_0 - температура невозмущенной жидкости, К.

В качестве масштаба времени принимали период собственных радиальных линейных колебаний, рассчитанный по формуле Миннерта:

$$t_{\text{м}} = 2\pi R_0 \sqrt{\rho/Z} .$$

В безразмерных переменных уравнение (1.3.17) принимает вид

$$\begin{aligned} & R' (1-2\text{Ma}) \frac{d^2 R'}{dt'^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{4}{3} \text{Ma} \right) \left(\frac{dR'}{dt'} \right)^2 = \\ & = [1 + \text{Ma} (1 - \text{Ma})] \alpha (R')^{3\gamma} (1 - \Delta t) + P_{\text{п}0} + J^{-1} \Delta t + \\ & + \left[\text{We} - 4 \left(\frac{dR'}{dt'} \right) \frac{1}{\text{Re} R'} \right] [1 - \text{Ma} (1 - \text{Ma})] - \frac{4 \text{Ma}}{\text{Re}} (1 - \text{Ma}) \frac{d^2 R'}{dt'^2} \frac{dt'}{dR'} - \\ & - x_{\text{r}}^{-1} v(t') - x_{\text{a}}^{-1} f(t') - 1, \quad (1.3.18) \end{aligned}$$

ГДЕ $R = R' R_0$; $t = t' t_{\text{м}}$; $t_{\text{п}} - t_0 = \Delta t t_0$;

$$J = \frac{Z [\rho(t_0) - \rho_{\text{п}}(t_0)]}{\lambda(t_0) \rho_{\text{п}}(t_0) \rho(t_0)}; \quad \text{We} = \frac{2 \sigma}{R_0 Z};$$

$$\begin{aligned} & \text{Re} = R_0 (\rho/\mu) \sqrt{Z/\rho}; \quad x_{\text{r}} = 2Z (\rho V_{\text{max}}^2)^{-1}; \quad x_{\text{a}} = Z/|P|_{\text{max}}; \\ & \rho_{\text{п}}(t_0) = Z P_{\text{п}}'; \quad (V')^2(t) = V_{\text{max}} V'(t); \quad \Delta t = t_{\text{п}} - t_0; \end{aligned}$$

где V - скорость, м/с; α - начальное газосодержание газа в паровом пузырьке; λ - удельная теплота парообразования, Дж/кг; $\rho_{\text{п}}$ - плотность пара в пузырьке, кг/м³; $V'(t) \rightarrow 0$ относительная скорость движения пузырька вдоль линии тока жидкости.

Модель (1.3.18) также учитывает переменное, объемное газосодержание:

$$K = \Delta v/v, \quad (1.3.19)$$

где Δv - переменный суммарный объем всех кавитационных пузырей, м³; v - выделенный расчетный объем в кавитационной области, м³.

Переменное объемное газосодержание аналогично индексу кавитации, введенному Л. Д. Розенбергом [68]. С помощью индекса K автор модели (1.3.18) показывает, что импульс давления, генерируемый ПАРТ, распространяется в разреженной газожидкостной среде.

А. И. Зимин [162] рассматривал поведение кавитационного пузырька с учетом тепломассообмена на основе уравнения Херринга-Трайлинга под воздействием переменного давления $P(t)$:

$$\begin{aligned} (1-2Ma) R \frac{dV}{dt} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{4}{3} Ma\right) V^2 = \\ = \frac{1}{\rho} \left[P - P_{\Pi} - P(t) - \frac{2\sigma}{R} \left(1 - \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_0}\right) - 4\mu \frac{V}{R} \right]; \end{aligned} \quad (1.3.20)$$

$$V = \frac{dR}{dt} - \frac{J}{\rho}; \quad (P)_{r=R} = P_{\Pi} - \frac{2\sigma}{R},$$

где J - поток массы через межфазную поверхность, кг/(м²с); μ - коэффициент динамической вязкости, Па·с; ρ_{Γ} - плотность парогазовой смеси в пузырьке, кг/м³;

$$J = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{\Pi} \right) \frac{1}{4\pi R^2};$$

$$\lambda J_{\Pi} = \kappa \left(\frac{\partial t_0}{\partial r} \right)_{r=R} - \frac{R}{3} \left[\frac{c t_{\Gamma}}{\lambda} \left(1 - \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_0}\right) \right] \frac{dP_{\Gamma}}{dt} - \text{уравнение баланса тепла.}$$

Исходная система уравнений сведена к системе уравнений в безразмерных переменных, которая решалась численными методами. Был сделан вывод, что при воздействии на жидкость отрицательного импульса давления, при коллапсе кавитационного парового пузырька генерируются уменьшающиеся при последующих захлопываниях кавитационные импульсы давления, а средний радиус пузырька (величина, возле которой происходят колебания радиуса) растет во времени.

Изучение влияния давления и температуры на развитие кавитации показало, что существует определенный оптимум амплитуды кавитационных импульсов по величине давления в рабочей камере и температуре обрабатываемой жидкости [162, 193].

При визуальных наблюдениях [194] процесса развития кавитации в канале статора установлено, что кавитационные пузырьки достигают видимого размера через 100 мкс после момента полного совмещения каналов ротора и статора. Совокупность пузырьков образует своеобразную трубку, вытянутую параллельно каналу статора. Зарегистрирована двукратная пульсация кавитационных пузырьков за время периода колебаний в аппарате.

Экспериментальные исследования импульсной акустической кавитации в основном проводились при помощи регистрации импульсов давления на гидроакустических гидрофонах при схлопывании кавитационных пузырьков.

В работах [146, 195] установлено, что при невысокой скорости потока жидкости, кавитационные пузырьки образуются и схлопываются в канале статора, а при большом расходе жидкости - кавитационные пузырьки выносятся потоком в рабочую камеру и захлопываются там раньше, чем закончится первичный импульс давления.

Различными исследователями обнаружено, что в период своего существования кавитационные пузырьки синфазно совершают несколько пульсаций и затем схлопываются

[162, 193 - 196]. Однако в работах [193, 196] отмечено, что амплитуда кавитационных импульсов уменьшается при увеличении скорости перекрытия каналов статора. Данные результаты объяснить очень трудно, так как уменьшение амплитуды начинается уже при скорости 4 м/с. В дальнейшем [162], падение амплитуды кавитационных импульсов объясняется тем, что кавитация не успевает развиться при малой длительности импульса давления, возбуждающего кавитацию. Подобное объяснение справедливо для высоких скоростей вращения и указывает на предел для скорости вращения ротора, при достижении которого интенсивность кавитации не увеличивается, а даже снижается.

ПАРТ является генератором колебаний в жидкости, причем объектом озвучивания и носителем колебаний служит обрабатываемая жидкость. В силу этого в ПАРТ возникают акустические поля сложной структуры, нелинейные акустические эффекты.

В работе [197] исследовано явление синхронизации частот вихреобразования и пульсаций динамического давления. Образование вихрей обусловлено резким изменением скорости и давления при выходе жидкости из зазора между ротором и статором в канал. При этом происходит отрыв пограничного слоя с одновременным образованием вихрей, что порождает импульсы давления. При совпадении частот вихреобразования и динамического давления наблюдалось уменьшение потребляемой мощности на 40 - 60 %. Необходимо отметить, что данные явления протекают при относительно больших зазорах, $\delta = 1,35 - 4,10$ мм и нагнетании жидкости за счет центробежных сил при вращении ротора.

По нашему мнению, явление уменьшения потребляемой мощности связано также с центробежными силами, которым в данном случае "помогают" транспортировать жидкость синхронизированные срывы вихрей.

Один из вариантов автоколебательных эффектов экспериментально установлен авторами работы [193]. Исследуя зависимость амплитуды кавитационных импульсов от статического давления в рабочей камере при постоянном расходе жидкости и различных температурах, выявили максимум амплитуды импульсов давления, генерируемых коллапсирующим ансамблем кавитационных пузырьков, что объясняется размерами образующейся кавитационной области. Размер этой области велик при малых статических давлениях. Попадая в область повышенного давления она схлопывается не сразу, а начинает пульсировать. Пузырьки сбрасывают энергию и уменьшаются в размерах ступенчато.

К автоколебательному режиму работы ПАРТ можно отнести обработку газожидкостной среды при больших значениях газосодержания [106]. Газожидкостная смесь, попадая в полость ротора, частично сепарируется, и жидкость протекает через каналы аппарата порциями, пульсируя с периодом порядка нескольких секунд, подобно явлению захлебывания в распылительных колоннах.

В публикации [198] выдвинута гипотеза, что спектр пульсаций давления определяется явлением гидравлического удара. При определенных соотношениях R_k, R_p, a_c, ω и c возникает прямой гидравлический удар, и наблюдаются резонансные колебания в приближении плоских волн как в рабочей камере, так и в полости ротора. Аналогичный подход сделан в работе [199], где резонансные колебания потока жидкости возникают при определенном соотношении времени пробега вдоль канала статора импульса давления и времени перекрытия канала статора.

Решая совместно два уравнения, определяющих параметры собственных колебаний давления в полости ротора и рабочей камере, получили соотношение геометрических и кинематических параметров ПАРТ, при которых будут выполняться условия работы аппарата в резонансном режиме [200 - 202]. При выводе условий резонансного режима работы принимали, что высота полости ротора равна высоте рабочей камеры, а поля давлений в этих объемах являются цилиндрически симметричными. Это является частным случаем обобщенного подхода, при котором учитываются параметры трехмерного акустического поля в технологических объемах аппаратах.

Механическое и гидромеханическое взаимодействие рабочих органов ПАРТ с потоком жидкости и с частицами, включенными в этот поток, рассмотрено в работах [64, 143, 203, 204]. Детально изучен процесс дробления частиц сферической формы, определены условия, при которых происходит дробление и получена зависимость для расчета вероятности разрушения частиц.

Исследования взаимодействия жидкости с рабочими органами ПАРТ проведено для зоны зазора между ротором и статором. Получены полуэмпирические уравнения для расчета мощности, диссипируемой в зазоре [64, 139, 205 - 211]. Эти модели применимы, в основном, к РПА, для которых характерна относительно большая величина зазора и более частое расположение отверстий в роторе и статоре. Получен большой экспериментальный материал, подтверждающий основные теоретические положения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 1

1. *Новиков В. С.* Импульсные процессы переноса в гетерогенных системах: Обзор // Пром. теплотехника. 1990. Т. 12. № 2. С. 23 - 39.
2. *Коновалов В. И., Гапанова Н. Ц., Туголуков Е. Н.* О возможностях использования циклических тепловых и взаимосвязанных теплодиффузионных процессов в химических и других производствах // Вестник ТГТУ. 1995. Т. 1. № 3-4. С. 273 - 288.
3. *Кардашев Г. А.* Физические методы интенсификации процессов химической технологии. М.: Химия, 1990. 208 с.
4. *Физические эффекты* в машиностроении: Справочник / Под ред. В. А. Лукьянца. М.: Машиностроение, 1993. 224 с.
5. *Федоткин И. М., Жарик Б. Н., Погоржельский Б. И.* Интенсификация технологических процессов пищевых производств. К.: Техника, 1984. 176 с.
6. *Долинский А. А.* Использование принципа дискретно-импульсного ввода энергии для создания эффективных энергосберегающих технологий // Инженерно-физический журнал. 1996. Т. 69. № 6. С. 855 - 896.
7. *Долинский А. А., Накорчевский А. И.* Принципы оптимизации массообменных технологий на основе метода дискретно-импульсного ввода энергии // Пром. теплотехника. 1997. Т. 19. № 6. С. 5 - 9.
8. *Рогов И. А., Горбатов А. В.* Физические методы обработки пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1974. 584 с.
9. *Задорский В. М.* Интенсификация химико-технологических процессов на основе системного подхода. К.: Техника, 1989. 208 с.
10. *Дискретно-импульсный ввод энергии в теплотехнологиях* / А. А. Долинский, Б. И. Басок, С. И. Гулый и др. К.: ИТТФ НАНУ, 1996. 206 с.
11. *Белоглазов И. Н., Муравьев А. И.* Интенсификация и повышение интенсивности химико-технологических процессов. Л.: Химия, 1988. 206 с.
12. *Коновалов В. И.* Базовые кинетические характеристики массообменных процессов // Журнал прикладной химии. 1986. Т. 59. № 9. С. 2096 - 2107.
13. *Таганов И. Н.* Моделирование процессов массо- и энергопереноса. Нелинейные системы. Л.: Химия, 1979. 208 с.
14. *Адиутори Е. Ф.* Новые методы в теплопередаче: Пер. с англ. под ред. А. И. Леонтьева. М.: Мир, 1977. 230 с.
15. *Гленсдорф П., Пригожин И.* Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1977. 230 с.
16. *Вейник А. В.* Термодинамика реальных процессов. Минск.: Наука и техника, 1991. 576 с.

17. *Кирпиков В. А.* О классификации современных методов интенсификации конвективного теплообмена при вынужденном движении (без фазовых переходов) // Теорет. основы хим. технол. 1991. Т. 25. № 1. С. 139 - 143.
18. *Смирнов Н. Н., Белоглазов И. Н.* Интенсификация некаталитических процессов в системе твердое тело - жидкость // Хим. пром. 1991. № 8. С. 8 - 12.
19. *Федоткин И. М., Липсман В. С.* Интенсификация теплообмена в аппаратах пищевых производств. М.: Пищевая пром-сть, 1972. 240 с.
20. *Кафаров В. В., Дорохов И. Н.* Системный анализ процессов химической технологии: Основы стратегии. М.: Наука, 1976. 500 с.
21. *Вибрационные* массообменные аппараты / И. Я. Городецкий, А. А. Васин, В. М. Олевский, П. А. Лупанов // Под ред. В. М. Олевского. М.: Химия, 1980. 192 с.
22. *Федоткин И. М., Немчин А. Ф.* Использование кавитации в технологических процессах. К.: Вища шк., 1984. 68 с.
23. Тепло- и массообмен в звуковом поле / В. Е. Накоряков, А. П. Бурданов, Н. М. Болдырев, П. Н. Терлеев. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1970. 254 с.
24. *Гинстлинг А. М., Барам А. А.* Ультразвук в процессах химической технологии. Л.: Госхимиздат, 1960. 96 с.
25. *Фридман В. М.* Ультразвук. М.: Знание, 1960. 48 с.
26. *Бергман Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике: Пер. с англ. М.: Иностран. лит., 1957. 726 с.
27. *Карпачева С. М., Рябчиков Б. Е.* Пульсационная аппаратура в химической технологии. М.: Химия, 1983. 224 с.
28. *Гершгал Д. А., Фридман В. М.* Ультразвуковая аппаратура промышленного назначения. М.: Энергия, 1967. 264 с.
29. *Гершгал Д. А., Фридман В. М.* Ультразвуковая технологическая аппаратура. М.: Энергия, 1976. 320 с.
30. *Основы физики и техники ультразвука: Учебн. пособ. для вузов / Б. А. Агранат, М. М. Дубровин, Н. Н. Хавский и др.* М.: Высш. шк., 1987. 352 с.
31. *Новицкий Б. Г.* Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. М.: Химия, 1983. 192 с.
32. *Галицейский Б. М., Рыжов Ю. А., Якуш Е. А.* Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках. М.: Машиностроение, 1977. 256 с.
33. *Использование* волновых эффектов для интенсификации химических и фазовых превращений в многофазных системах / С. А. Любартович, О. Б. Третьяков, Р. Ф. Ганиев и др. // Теорет. основы хим. технологии. 1988. Т. 22. № 4. С. 560 - 564.
34. *Колебательные явления* в многофазных средах и их использование в химической технологии / Р. Ф. Ганиев, Н. И. Кобаско, В. В. Кулин и др. К.: Техника, 1980. 220 с.
35. *Новиков В. С.* Гомогенизация и диспергирование в современной технологии: Обзор // Пром. теплотехника. 1990. Т. 12. № 5. С. 40-59.
36. *Фридман В. М.* Ультразвуковая химическая аппаратура. М.: Машиностроение, 1967. 212 с.
37. *Воронов А. Г.* Использование звуковых колебаний для ускорения процесса растворения каменной соли // Ультразвуковые методы интенсификации технолог. процессов: Сб. науч. тр. М., 1970. С. 186 - 189.
38. *Исследование* процесса автоклавно-содового выщелачивания щеелита в поле упругих колебаний / А. А. Бершитский и др. // Ультразвуковые методы интенсификации технологических процессов: Сб. науч. тр. М.: Metallургия, 1970. С. 193 - 197.

39. *Берцицкий А. А.* Интенсификация процесса аммиачного выщелачивания молибденовой кислоты при воздействии акустических колебаний // Применение ультразвука в металлург. процессах: Сб. науч. тр. М., 1972. С. 80.
40. *Фридман В. М.* Исследование интенсификации физико-химических процессов систем Ж-Ж и Ж-Т при воздействии акустических колебаний и разработка акустической химико-технологической аппаратуры: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 1975. 31 с.
41. *Кардашев Г. А., Михайлов П. Е.* Тепломассообменные акустические процессы и аппараты. М.: Машиностроение, 1973. 223 с.
42. *Ермаков П. П.* Влияние воздействия акустических колебаний на процесс массопередачи / Теорет. основы хим. технологии. 1991. Т. 25. № 2. С. 198 - 203.
43. *Шишов Е. В., Вечканов С. Б., Захаров А. О.* Интенсификация теплообмена в рециркуляционной области течения за обратным уступом за счет организации когерентных вихревых структур под действием акустического поля / I Рос. нац. конф. по теплообмену. Т. 8. Интенсификация теплообмена. М.: Изд-во МЭИ, 1994. С. 227 - 232.
44. *Скрипник Ю. Н., Чехов О. С., Зеленцов В. Л.* Интенсификация тепломассообменных процессов на противоточных тарельчатых контактных устройствах // Теорет. основы хим. технол. 1991. Т. 25. № 1. С. 117 - 121.
45. *Явления* аномального протекания тепломассообменных процессов в многофазных средах // Р. Ф. Ганиев, А. А. Долинский, Н. И. Кобаско, К. В. Фролов / Доклады АН СССР. 1987. Т. 294. № 3. С. 560 - 563.
46. *Островский Г. М., Аксенова Е. Г.* Псевдооживление порошкообразных материалов при колебательном изменении давления газа // Теорет. основы хим. технол. 1997. Т. 31. № 1. С. 5 - 10.
47. *Евланов С. Ф., Зайцев С. И.* Влияние циклической пульсации давления газовой среды на массообмен слоя пористых гранул // Хим. пром-ть. 1996. № 1. С. 52 - 54.
48. *Наталуха И. А.* Математическое моделирование динамических режимов массовой кристаллизации // Теорет. основы хим. технол. 1996. Т. 30. № 4. С. 399 - 410.
49. *Назаренко А. Ф.* Об одном механизме гидродинамического звукообразования // Акуст. журнал. 1978. Т. 24. № 4. С. 573 - 576.
50. *Дудзинский Ю. М., Назаренко А. Ф.* Эффективность работы осесимметричных гидродинамических излучателей в условиях избыточного статического давления // Акуст. журнал. 1996. Т. 42. № 4. С. 569 - 572.
51. *Назаренко Э. Ф.* Эрозионная активность осесимметричных гидрадинамических излучателей с локализованной областью кавитационной природы // Акуст. журнал. 1998. Т. 44. № 2. С. 251 - 255.
52. *Ряполов Б. С., Анциферов А. А.* Применение кавитации в гидроструйной технологии // Изв. вузов. Машиностроение. 1993. № 6. С. 32 - 34.
53. *Запорожец Е. П., Александров И. А.* Интенсификация процессов химической технологии эжекционными струйными течениями жидкости и газов // Хим. пром-ть. 1991. № 8. С. 468 - 471.
54. *Белов О. А., Гамаюнов П. П.* Улучшение экономичности и экологичности автотракторных двигателей путем применения водотопливного эмульгатора в системе питания двигателя // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания в АПК СНГ: Мат-лы Всесоюзн. научн.-техн. сем. Изд-во Сарат. ун-та, 1992. Вып. 4. С. 37 - 41.
55. *Белов О. А., Гамаюнов П. П.* Принципиальная схема и конструкция ультразвукового эмульгатора // Проблемы экономичности двигателей внутреннего сгорания

в АПК СНГ: Мат-лы Всесоюзн. научн.-техн. сем. Изд-во Сарат. ун-та, 1992. Вып. 4. С. 41 - 45.

56. *Оборудование* для получения и обработки высоковязких дисперсных сред / Б. И. Басок, А. П. Гартвиг, А. Р. Коба и др. // Пром. теплотехника. 1996. Т. 18. № 1. С. 50 - 56.

57. *Долинский А. А., Шетаннов О. К.* Использование дискретно-импульсного ввода энергии для интенсификации процессов абсорбции // Пром. теплотехника. 1985. Т. 7. № 3. С. 41 - 46.

58. *Xiongwei Ni, Colin C. Stevenson.* On the effect of gap size between baffle outer diameter tube inner diameter on the mixing characteristics in an oscillatory baffled column // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 1999. № 74. P. 587 - 593.

59. *Шурчкова Ю. А.* Новый класс аппаратов для диспергирования жидкостей путем дискретно-импульсного ввода энергии // Пром. теплотехника. 1998. Т. 20. № 3. С. 14 - 18.

60. *Немчин А. Ф.* Новые технологические эффекты тепломассопереноса при использовании кавитации // Пром. теплотехника. 1997. Т. 19. № 6. С. 39 - 47.

61. *Богданов В. В., Христофоров Б. И., Клоцунг Б. А.* Эффективные малообъемные смесители. Л.: Химия, 1989. 224 с.

62. *Бугай А. С.* Ультразвук в целлюлозно-бумажной промышленности. Перм. изд-во, 1969. 66 с.

63. *Гидроизлучатели* роторно-пульсационного типа в процессах биотехнологии // Скиба В. В., Балабудкин М. А., Щебатин В. Г. Динамические эффекты мощного ультразвука: Сб. науч. тр. Ижевск. 1988. Вып. 3. С. 68 - 71.

64. *Балабудкин М. А.* Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности. М.: Медицина, 1983. 160 с.

65. *Эффект* предварительного активирования добавок в транспортном строительстве / Б. А. Усов, А. А. Допокеев, Е. А. Усов, А. А. Кальчин // Бетон и железобетон. 1989. № 4. С. 15 - 17.

66. *Балабышко А. М., Зимин А. И., Ружижский В. П.* Гидромеханическое диспергирование. М.: Наука, 1998. 331 с.

67. *Маршалкин Г. А.* Технологическое оборудование кондитерских фабрик. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. 448 с.

68. *Зимин А. И.* Обоснование параметров и разработка оборудования для технологической линии производства детергентов // Полимерные материалы: производство и экология: Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. Ярославль, 1995. С. 50 - 51.

69. *Зимин А. И.* Интенсификация и оптимизация технологического процесса производства детергентов // Полимерные материалы: производство и экология: Тез. докл. Всерос. научн.-техн. конф. Ярославль, 1995. С. 48 - 49.

70. *Балабышко А. М., Юдаев В. Ф.* Роторные аппараты с модуляцией потока и их применение в промышленности. М.: Недра, 1992. 176 с.

71. *Зимин А. И.* Технология переработки нейтрализованных серно-кислых шламов в железистый пигмент // Пути и средства повышения экологической безопасности гальванических производств: Тез. докл. 4-го Всерос. науч.-техн. семинара. Ярославль, 1995. С. 7 - 39.

72. *Бодня М. Д.* Непрерывный процесс диспергирования пигментов при производстве эмалей путем озвучивания излучателями сиренного типа // Лакокрасочн. материалы и их применение. 1969. № 1. С. 24 - 26.

73. *Зимин А. И.* Интенсификация приготовления дисперсных сред в роторно-импульсных аппаратах в химико-фармацевтической промышленности // Хим.-фарм. журн. 1997. № 8. С. 50 - 53.

74. Ледова Т. М., Балабудкин М. А., Плюшкин С. А. Закономерности приготовления эмульсионных систем в роторно-пульсационном аппарате // Хим.-фарм. журнал. 1980. Т. 14. № 5. С. 96 - 99.
75. Гидроакустическая обработка мази Випросал в роторно-пульсационном аппарате / Б. В. Андреев и др. // Динамические эффекты мощного ультразвука: Сб. научн. тр. Ижевск, 1988. Вып. 3. С. 68 - 71.
76. Волков А. Н. Сжигание газов и жидкого топлива в котлах малой мощности. Л.: Недра, 1989. 160 с.
77. Павлов Б. П., Батуев С. И., Щевелев К. В. Подготовка водомазутных эмульсий для сжигания в топочных устройствах. В кн.: Повышение эффективности использования газообразного и жидкого топлива в печах и отопительных котлах. Л.: Недра, 1983. 216 с.
78. Селиверстов В. М., Браславский М. И. Экономия топлива на речном флоте. М.: Транспорт, 1983. 231 с.
79. Зубрилов С. П., Селиверстов В. М., Браславский М. И. Ультразвуковая кавитационная обработка топлив на судах. Л.: Судостроение, 1988. 80 с.
80. Зимин А. И. Влияние состава топливных эмульсий на концентрацию оксидов азота и серы в выбросах промышленных котельных // Экологическая защита городов: Тез. докл. научно-техн. конф. М., 1996. С. 77 - 79.
81. Зимин А. И., Юдаев В. Ф. Применение аппаратов с прерывистым режимом течения в процессе производства топливных эмульсий // Экологическая защита городов: Тез. докл. научно-техн. конф. М., 1996. С. 80.
82. Зимин А. И., Старцев В. Н., Балабышко А. М. О влиянии стехеометрического соотношения Са/S в топливной дисперсии на степень очистки дымовых газов // Повышение эффективности теплофизических исследований технологических процессов промышленного производства и их метрологического обеспечения: Тез. докл. Второй Международн. теплофиз. школы. Тамбов, 1995. С. 110-111.
83. Зимин А. И., Старцев В. Н. Получение топливных дисперсий на основе жидкого топлива, ингибитора и поглотителя оксидов // Повышение эффективности теплофизических исследований технологических процессов промышленного производства и их метрологического обеспечения: Тез. докл. Второй Международн. теплофиз. школы. Тамбов, 1995. С. 112.
84. Зимин А. И., Старцев В. Н., Балабышко А. М. Влияние стехиометрического соотношения Са/S в топливной эмульсии на степень очистки дымовых газов от оксидов серы и азота // Проблемы безопасности труда на предприятиях со взрывопожароопасным производством: Тез. докл. Международн. науч.-техн. семинара. Минск, 1995. С. 78 - 80.
85. Экспериментальная и промышленная практика применения роторных аппаратов с прерыванием потока в процессах приготовления топливно-дисперсных смесей для промышленных котельных / В. И. Биглер, А. И. Зимин, А. И. Сопин, В. Ф. Юдаев / Актуальные проблемы теории, практики и создания роторных аппаратов // Мат-лы Межресп. научно-практ. совещания (Москва, 1999). СПб.: ИТИ -Центр, 1999. С. 21-22.
86. Использование насоса-диспергатора для получения раствора полиакриламида / А. О. Никифоров, А. В. Коршаков, Ю. И. Аверхбук, Е. Ю. Сергеев. // Хим. и нефтехим. машиностроение. 1990. № 11. С. 14-15.
87. Расчет дисперсности эмульсии, образующихся в роторно-статорном аппарате / Ю. И. Аверхбук, А. О. Никифоров, Н. М. Костин, А. В. Коршаков. // Журн. прикл. химии. 1988. № 2. С. 433-434.

88. Балабышко А. М. Эффективное применение роторных аппаратов для получения рабочих жидкостей гидросистем проходческой техники / Шахтное строительство. 1990. № 3. С. 41 - 43.
89. Балабышко А. М. Технология производства рабочих жидкостей для гидросистем горной техники // Горн. журн. 1989. № 8. С. 39 - 42.
90. Балабышко А. М. Установка для получения и регенерации рабочих жидкостей // Уголь. 1989. № 4. С. 45 - 47.
91. Балабышко А. М. Повышение надежности работы гидропривода механизированных крепей очистных компонентов. М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1990. 20 с.
92. Балабышко А. М. Установка для приготовления и регенерации рабочей жидкости на добычном участке // Уголь. 1990. № 4. С. 45 - 48.
93. Балабышко А. М. Рабочие жидкости гидросистем и опыт их производства в угольной промышленности: (Обзор). М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1992. 24 с.
94. Балабышко А. М. Совершенствование установки для приготовления и подачи рабочей жидкости в гидросистемы механизированных комплексов с применением роторных аппаратов с модуляцией потока // Уголь. 1991. № 5. С. 57 - 60.
95. Зимин А. И. Приготовление и регенерация рабочих жидкостей для гидрооборудования механизированных крепей: гидромеханический аспект проблемы // Горн. журн. 1996. № 5. С. 42 - 44.
96. Зимин А. И. Диспергирование рабочих жидкостей для гидрооборудования с учетом центробежного эффекта // Уголь. 1996. № 10. С. 23-24.
97. Зимин А. И., Балабышко А. М., Старцев В. Н. Приготовление рабочей жидкости для гидросистем механизированных крепей в гидромеханических диспергаторах // Применение роторных гидромеханических диспергаторов в горнодобывающей промышленности: Тез. докл. Международн. научно-практич. сем. Солигорск, 1998. С. 9 - 13.
98. Зимин А. И. Теоретическое описание гидромеханического диспергирования шахтных эмульсий: нестационарный гидравлический подход // Горная техника на пороге XX века: Тез. докл. Межд. сем. М.: МГГУ, 1996. С. 266-267.
99. Долинский А. А., Басок Б. И., Шурчкова Ю. А. Теплофизические исследования технологического процесса стерилизации и гомогенизации жидких дисперсных систем // Повышение эффективности теплофизических исследований технологических процессов промышленного производства: Тез. докл. II Международн. теплофизич. школы. Тамбов, 1995. С. 37.
100. Долинский А. А., Басок Б. И. Роторно-импульсный аппарат. 3. Дробление включений дисперсной фазы // Пром. теплотехника. 1999. Т. 21. № 2-3. С. 5-6.
101. Долинский А. А., Басок Б. И. Роторно-импульсный аппарат. 2. Локальный импульсный нагрев жидкости // Пром. теплотехника. 1999. Т. 21. № 1. С. 3 - 5.
102. Балабышко А. М. Прогрессивное оборудование для получения высококачественных смазочно-охлаждающих жидкостей. М.: ВНИИТЭМР, 1989. 40 с.
103. Балабышко А. М., Зимин А. И. Роторный аппарат с модуляцией потока для получения высоковязких СОЖ // Вестн. машиностроения. 1990. № 5. С. 59-60.
104. Зимин А. И. Приготовление раствора эвкалимина в этиловом спирте в роторном аппарате при импульсном возбуждении кавитации // Хим.-фарм. журн. 1996. № 10. С. 46-47.
105. Зимин А. И. Технология получения раствора эвкалимина в режиме импульсного возбуждения кавитации // Научно-технические химические технологии: Тез. докл. 3 Международн. конф. Тверь, 1995. С. 186.

106. *Зимин А. И., Юдаев В. Ф.* Абсорбция диоксида углерода водой в роторном аппарате с модуляцией потока // Теорет. основы хим. технологии. 1989. Т. 23. № 5. С. 673 - 676.
107. *Маргулис М. А., Гаврилов В. А., Шаяхметов Ф. Г.* Синтез окислов азота в кавитационном поле гидродинамического излучателя // Журнал физ. химии. 1989. Вып. 11. С. 3088-3089.
108. *Базадзе Л. Г., Зимин А. И., Юдаев В. Ф.* Воздействие кавитации на процесс разделения водно-спиртовой смеси // Журн. прикл. химии. 1989. № 5. С. 1166 - 1168.
109. *Зимин А. И.* Кавитационная ректификация двухкомпонентных смесей // Теорет. основы хим. технологии. 1996. Т. 30. № 4. С. 392 - 398.
110. *Химические и физико-химические процессы в полях, создаваемых гидроакустическими излучателями / Р. Б. Валитов и др. // Журнал физ. химии. 1986. № 4. С. 889 - 892.*
111. *Химические и физико-химические процессы в полях, создаваемых гидроакустическими излучателями / Р. Б. Валитов и др. // Журнал физ. химии. 1986. № 4. С. 893 - 897.*
112. *Балабышко А. М.* Разработка роторного аппарата для получения стабильных эмульсий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1985. 16 с.
113. *Балабышко А. М.* Обоснование, разработка и создание оборудования по приготовлению и регенерации рабочих жидкостей для механизированных крепей очистных комплексов: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 1992. 31 с.
114. *Балабудкин М. А.* Исследование диспергирования и гидромеханических явлений в роторно-пульсационных аппаратах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1972. 16 с.
115. *Барам А. А.* Исследование процесса извлечения веществ из пористых тел в многофазных системах в поле механических колебаний: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1963. 16 с.
116. *Биглер В. И.* Исследование течений в аппарате типа динамической сирены и его применение для процесса растворения: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1979. 169 с.
117. *Бутко Г. Ю.* Исследование процессов эмульгирования в роторно-пульсационном аппарате применительно и целлюлозно-бумажному производству: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1975. 16 с.
118. *Звездин А. К.* Использование аппаратов типа РАМП для получения высокодисперсных эмульсий в режиме акустической кавитации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1983. 16 с.
119. *Зимин А. И.* Интенсификация процессов диспергирования и растворения в роторных аппаратах при импульсном возбуждении кавитации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1984. 16 с.
120. *Зимин А. И.* Нестационарные гидромеханические процессы в импульсно-кавитационных аппаратах с прерыванием потока: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 1998. 32 с.
121. *Карепанов С. К.* Обоснование параметров модулятора гидромеханического диспергатора для приготовления рабочей жидкости механизированных крепей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1999. 20 с.
122. *Киладзе Г. Г.* Исследование гидромеханических характеристик и параметров процесса гомогенизации пищевых дисперсных систем в гидромеханических роторно-пульсационных аппаратах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1975. 16 с.
123. *Колесников Г. Е.* Расчет роторно-пульсационных аппаратов для процессов эмульгирования: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1983. 134 с.

124. *Лошакова О. А.* Исследование гидромеханических закономерностей работы аппаратов роторно-пульсационного типа: Дис. ... канд. техн. наук. Л., 1982. 169 с.
125. *Мандрыка Е. А.* Экспериментальное исследование кинетики процесса растворения в роторном аппарате с модуляцией потока: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1979. 166 с.
126. *Плотников В. А.* Исследование и расчет роторно-пульсационного аппарата: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1978. 228 с.
127. *Сопин А. И.* Исследование параметров гидродинамической сирены с целью получения высокодисперсных гетерогенных систем: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1975. 16 с.
128. *Червяков В. М.* Растворение твердого в жидкости и диспергирование жидкостей в длиноканальном роторном аппарате с модуляцией потока: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1982. 16 с.
129. *Юдаев В. Ф.* Исследование гидродинамического аппарата сиренного типа и его использование для интенсификации технологических процессов в гетерогенных системах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1970. 16 с.
130. *Юдаев В. Ф.* Роторные аппараты с модуляцией потока и импульсным возбуждением кавитации для интенсификации процессов химической технологии: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 1984. 32 с.
131. *Willems P.* Kinematik High – Frequency and Ultrasonic Treatment of Palp // *Palp and Paper Magazine of Canada.* 1952. V. 63. № 9. P. 19 - 25.
132. *Willems P.* Application of Ultrasonic Techniques to Pulping and Refiring. // *The Worlds Paper Trade Review.* 1961. № 19. P.155 - 159.
133. *Fuch O.* Uberhochfrequente Stoffbehandlung // *Chemiker Zeitung.* 1960. № 24. S. 809 - 814.
134. *Jayme J., Gronert H., Neuhaus W.* Von zellstoff Fasern durch hochfrequente Behandlung // *Das Papier.* 1959, H23/24. S. 578 - 583.
135. *Pay. J.* Konstruchion neuer gerote // *Zellstof und Papier.* 1962. № 5. S. 181 - 186.
136. *Балабудкин М. А.* О закономерностях гидромеханических явлений в роторно-пульсационных аппаратах // *Теорет. основы хим. технологии.* 1975. Т. 9. № 5. С. 783 - 788.
137. *Балабудкин М. А., Борисов Г. Н.* О путях повышения эффективности акустических и гидродинамических явлений в роторно-пульсационных аппаратах // *Новые физ. методы интенсификации технол. процессов: Сб. науч. тр. М., 1977. С. 98 - 102.*
138. *Барам А. А., Кокушкин О. А.* О характеристиках одного типа акустической сирены // *Акуст. журнал.* 1962. Т. 8. № 2. С. 238-239.
139. *О гидромеханических закономерностях работы роторно-пульсационного аппарата / П.П. Дерко, А. А. Барам, В. Б. Коган и др. // Теорет. основы хим. технологии.* 1973. Т. 7. № 1. С. 123-124.
140. *Волчинский В. А.* Исследование переменного поля давлений в зоне рабочих органов центробежно-пульсационных машин: Автореф. дис... канд. техн. наук. Л., 1972. 16 с.
141. *Ультразвук: Маленькая энциклопедия / Под ред. И. П. Голяминой. М.: Сов. энциклопедия, 1979. 400 с.*
142. *Балабудкин М. А., Барам А. А.* Исследование частотно-амплитудного спектра динамического давления в роторно-пульсационных аппаратах // *Теорет. основы хим. технологии.* 1968. Т. 11. № 4. С. 609 - 614.
143. *Балабудкин М. А., Барам А. А.* Исследование процесса мокрого диспергирования твердых материалов в роторно-пульсационном аппарате // *Теорет. основы хим. технологии.* 1968. Т. 11. № 4. С. 639 - 642.
144. *Карновский М. И.* Теория и расчет сирен // *Журн. техн. физики.* 1945. Т. 15. № 6. С. 348 - 364.

145. Балабудкин М. А., Лошакова О. А., Барам А. А. Зависимость частотных характеристик роторно-пульсационного аппарата от числа прорезей // Сб. научн. тр. Ленингр. технол. ин-т целлюлоз.-бум. пром-ти. 1973. Вып. 31. С. 127 - 130.
146. Биглер В. И., Лавренчик В. Н., Юдаев В. Ф. Возбуждение кавитаций в аппаратах типа гидродинамической сирены // Акуст. журнал. 1978. Т. 24. № 1. С. 34 - 39.
147. Юдаев В. Ф., Кокорев Д. Т. Исследование гидродинамической сирены // Изв. вузов. Машиностроение. 1969. № 10. С. 72 - 77.
148. Трошкин О. А., Плотников В. А. Исследование устойчивости вращающегося потока жидкости // Теорет. основы хим. технологии. 1980. Т. 14. № 5. С. 745 - 749.
149. Трошкин О. А. О проскальзывании жидкости в роторе распылителя // Теорет. основы хим. технологии. 1980. Т. 8. № 2. С. 303 - 305.
150. Долинский А. А., Басок Б. И. Роторно-импульсный аппарат. 1. Импульсные эффекты локального адиабатического вскипания и кавитации жидкости // Пром. теплотехника. 1998. Т. 20. № 6. С. 7 - 10.
151. Биглер В. И., Юдаев В. Ф. Нестационарное истечение реальной жидкости через отверстия гидродинамической сирены // Акуст. журнал. 1978. Т. 24. № 2. С. 289 - 291.
152. Юдаев В. Ф. Истечение газожидкостной смеси через отверстия ротора и статора сирены // Изв. вузов. Машиностроение. 1985. № 12. С. 60 - 66.
153. Альтшуль А. Д. Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 1982. 224 с.
154. Юдаев В. Ф., Зимин А. И., Базадзе Л. Г. Методы расчета гидравлических и динамических характеристик модулятора роторного аппарата // Изв. вузов. Машиностроение. 1985. № 1. С. 65 - 70.
155. Юдаев В. Ф., Зимин А. И., Базадзе Л. Г. К методам расчета гидравлических и динамических характеристик модулятора роторного аппарата // Изв. вузов. Машиностроение. 1987. № 11. С. 63 - 65.
156. Зимин А. И. Определение оптимального коэффициента заполнения роторного аппарата с модуляцией потока // Разработка, исследование и расчет машин и аппаратов химических производств: Межвуз. сб. науч. тр. М.: МИХМ, 1984. С. 135 - 138.
157. Ружицкий В. П. О влиянии степени нестационарности потока обрабатываемой среды на интенсивность гидромеханических процессов в гидромеханическом диспергаторе // Нестационарная гидромеханика: теория, эксперимент, практические приложения: Сб. науч. тр. М.: СВС-Технология, 1997. С. 5 - 9.
158. Ружицкий В. П. Об одном приближенном способе решения нестационарного уравнения Бернулли // Нестационарная гидромеханика: теория, эксперимент, практические приложения: Сб. науч. тр. М.: СВС-Технология, 1997. С. 10 - 15.
159. Карепанов С. К., Юдаев В. Ф. О нестационарных гидромеханических процессах в аппаратах химической технологии // Нестационарная гидромеханика: теория, эксперимент, практические приложения: Сб. науч. тр. М.: СВС-Технология, 1997. С. 44 - 49.
160. Юдаев В. Ф. Гидромеханический анализ структуры нестационарных переходных процессов течения обрабатываемой среды в аппаратах химической технологии // Нестационарная гидромеханика: теория, эксперимент, практические приложения: Сб. науч. тр. М.: СВС-Технология, 1997. С. 50 - 54.
161. Карепанов С. К., Юдаев В. Ф., Зимин А. И. Гидродинамический анализ структуры течения в аппаратах с прерыванием // Создание и внедрение современных аппаратов с активными гидродинамическими режимами для текстильной промышленности и производства химических волокон: Тез. докл. 2 Всесоюзн. научно-техн. совещ. М., 1981. С. 18.
162. Зимин А. И. Прикладная механика прерывистых течений. М.: Фолиант, 1997. 308 с.

163. *Зимин А. И.* Гидравлический гистерезис: теория и эксперимент. М.: СВС-Технология, 1997. 40 с.
164. *Зимин А. И.* Имитационное моделирование нестационарных гидромеханических процессов. М.: СВС-Технология, 1997. 24 с.
165. *Зимин А. И.* Компьютерное моделирование нестационарных гидромеханических процессов. М.: СВС-Технология, 1997. 43 с.
166. *Зимин А. И.* Нестационарные гидромеханические процессы в роторном аппарате с модуляцией потока рабочей среды - основные свойства, технологическое использование. М., 1995. 34 с. (Препр. / МВОКУ; 1 - 95).
167. *Зимин А. И.* О парадоксах теории нестационарных гидромеханических процессов. М., 1995. 15 с. (Препр. / МВОКУ; 2 - 95).
168. *Зимин А. И.* Линейный анализ пульсирующего течения через канал с колеблющейся задвижкой. М., 1995. 18 с. (Препр. / МВОКУ; 5 - 95).
169. *Зимин А. И.* О гидравлическом гистерезисе. М., 1995. 19 с. (Препр. / МВОКУ; 6 - 95).
170. *Зимин А. И.* Математическая модель нестационарного течения жидкости через вращающийся и неподвижный канал. М., 1995. 33 с. (Препр. / МВОКУ; 7 - 95).
171. *Зимин А. И.* О бифуркационных явлениях в нестационарных гидромеханических процессах // Теорет. основы хим. технологии. 1997. Т. 31. № 3. С. 238 - 242.
172. *Зимин А. И.* Бифуркации и аномалии в теории и практике гидромеханического диспергатора // Уголь. 1997. № 3. С. 29-30.
173. *Зимин А. И., Балабашко А. М., Старцев В. Н.* / Аналитический и компьютерный расчет режимов работы гидромеханического диспергатора // Уголь. 1996. № 6. С. 26.
174. *Зимин А. И., Балабышко А. М., Ружицкий В. П.* Анализ гидромеханических процессов и расчет кавитационного режима диспергирования в гидромеханическом диспергаторе // Уголь. 1995. № 3. С. 46-47.
175. *Зимин А. И.* Качественный анализ нестационарных гидромеханических процессов в роторно-импульсном аппарате // Нестационарная гидромеханика: теория, эксперимент, практические приложения. М.: СВС-Технология, 1997. С. 16 - 21.
176. *Зимин А. И.* Эвристические методы в решениях дифференциальных уравнений нестационарной гидромеханики // Нестационарная гидромеханика: теория, эксперимент, практические приложения / М.: СВС-Технология, 1997. С. 22 - 32.
177. *Зимин А. И.* Получение высокоэнергетических импульсов при помощи периодического прерывания потока рабочей среды // Военно-научн. сб. № 2. М.: МВОКУ, 1994. С. 106 - 109.
178. *Зимин А. И.* Создание направленных энергетических потоков при помощи источников взрывного типа // Военно-научн. сб. № 2. М.: МВОКУ, 1994. С. 110 - 113.
179. *Зимин А. И.* Нестационарные гидромеханические процессы: основные свойства, технологическое применение // Школа по моделированию автоматизированных технологических процессов / Математические методы в химии и хим. технологии: Тез. Докл. Международн. конф. Новомосковск, 1997. С. 8 - 10.
180. *Зимин А. И.* Компьютерный анализ нестационарных гидромеханических процессов в роторно-импульсном аппарате // Школа по моделированию автоматизированных технологических процессов / Математические методы в химии и хим. технологии: Тез. докл. международн. конф. Новомосковск, 1997. С. 41-42.
181. *Зимин А. И., Старцев В. Н.* К расчету характеристик нестационарного движения гетерогенных сред через переменное сопротивление: учет критерия Рейнольдса // Физико-

химические и механические процессы в композиционных материалах и конструкциях: Тез. докл. научно-техн. конф. М., 1996. С. 89-91.

182. *Зимин А. И., Старцев В. Н.* Аналитическое решение уравнения движения гетерогенной среды через переменное сопротивление // Физико-химические и механические процессы в композиционных материалах и конструкциях: Тез. докл. научно-техн. конф. М., 1996. С. 92 - 94.

183. *Зимин А. И.* Новая математическая модель нестационарного гидромеханического процесса в роторном аппарате с периодической модуляцией площади проходного сечения каналов // Проблемы химии и химической технологии: Тез. докл. Всерос. научн.-техн. конф. Курск, 1995. С. 70 - 73.

184. *Зимин А. И.* Две теоремы теории прерывистых (разгоно-тормозных) течений // Применение роторных гидромеханических диспергаторов в горнообывающей промышленности: теория, практика: Сб. докл. Межд. научно-практ. семинара. Минск, 1998. С. 14 - 19.

185. *Карепанов С. К.* Математическая модель течения рабочей жидкости в каналах ротора и статора гидромеханического диспергатора // Применение роторных гидромеханических диспергаторов в горнодобывающей промышленности: теория, практика: Минск, 1998. С. 57 - 67.

186. *Карепанов С. К.* Расчет давления в зазоре роторного гидромеханического диспергатора // Применение роторных гидромеханических диспергаторов в горнодобывающей промышленности: теория, практика: Минск, 1998. С. 68 - 73.

187. *Карепанов С. К.* Расчет площади проходного сечения трапецевидных каналов ротора и статора гидромеханического диспергатора как функции времени // Применение роторных гидромеханических диспергаторов в горнодобывающей промышленности: теория, практика: Сб. докл. Межд. научно-практ. семинара. Минск, 1998. С. 74 - 78.

188. *Карепанов С. К., Ружицкий В. П.* Реализация математической модели течения рабочей жидкости в каналах ротора и статора гидромеханического диспергатора // Математические методы в механике прерывистых течений: Межвуз. сб. науч. ст. СПб.: Технопанорама, 1999. С. 19 - 27.

189. *Ружицкий В. П.* Универсальная модель переменного гидравлического сопротивления роторного гидромеханического диспергатора // Применение роторных гидромеханических диспергаторов в горнодобывающей промышленности: теория, практика: Сб. докл. Межд. научно-практ. семинара. Минск, 1998. С. 52 - 56.

190. *Юдаев В. Ф.* Гидромеханические процессы в роторных аппаратах с модуляцией проходного сечения потока обрабатываемой среды // Теорет. основы хим. технол. 1994. Т. 28. № 6. С. 581 - 590.

191. *Юдаев В. Ф.* Методы расчета роторных аппаратов с модуляцией потока // Разработка, исследование и расчет машин и аппаратов химических производств: Межвуз. сб. науч. тр. М.: МИХМ, 1984. С. 139 - 143.

192. *Розенберг Л. Д.* Кавитационная область. В кн.: Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л. Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. Ч. 6. С. 221 - 266.

193. *Звездин А. К., Зимин А. И.* Возбуждение импульсной акустической кавитации // Гидродинамика и акустика одно- и двухфазных потоков: Сб. науч. тр. Новосибирск: СО АН СССР, Ин-т теплофизики, 1983. С. 92 - 97.

194. *Курочкин А. К., Смородов Е. А.* Экспериментальные исследования кавитации в роторных гидродинамических излучателях // Акуст. журнал. 1987. Т. 33. № 4. С. 707 - 711.

195. Биглер В. И., Звездин А. К., Юдаев В. Ф. Импульсное возбуждение кавитации в гидродинамических сиренах без питающего насоса // Акустика и ультразвуковая техника: Респ. межвед. научно-техн. сб. К.: Техника, 1984. С. 3-4.
196. Биглер В. И., Юдаев В. Ф. Импульсная акустическая кавитация в аппаратах типа гидродинамической сирены // Акуст. журнал. 1989. Т. 35. № 3. С. 409 - 412.
197. О гидромеханических автоколебательных явлениях / А. А. Барам, О. А. Лошакова, В. Б. Коган, Б. А. Клоцунг // Теорет. основы хим. технол. 1982. Т. 16. № 1. С. 132 - 135.
198. Юдаев В. Ф., Кокорев Д. Т., Сопин А. И. К вопросу о расчете геометрических параметров аппаратов типа гидромеханической сирены // Изв. вузов. Машиностроение. 1972. № 6. С. 80 - 85.
199. О механизме генерирования пульсаций давления в роторно-пульсационных аппаратах / Т. И. Евстигнеева, В. Н. Колесник, Ю. С. Кравченко, М. М. Ходыкер // Пром. теплотехника. 1997. Т.13. № 2. С. 63 - 67.
200. Зимин А. И., Ружицкий В. П., Старцев В. Н. Анализ резонансного режима работы роторного гидромеханического диспергатора // Горная техника на пороге XXI века / Тез. докл. Межд. сем. М.: МГТУ, 1996. С. 248-249.
201. Зимин А. И., Звездин А. К., Юдаев В. Ф. Оптимальные соотношения геометрических и кинематических параметров аппарата типа гидродинамической сирены // Совершенствование конструкций машин и аппаратов химических производств: Сб. науч. тр. М.: МИХМ, 1982. С. 47 - 50.
202. Зимин А. И., Звездин А. К. Оптимизация конструктивных параметров и режимов работы роторно-пульсационных устройств // Оптимальное проектирование в задачах химического машиностроения: Сб. науч. тр. М.: МИХМ, 1983. С. 31 - 34.
203. Rosenfeld K., Micrley Y. Schtippen in der Modernen Stoffaufbereitung // Wochenlat fur Papierfabrikation. 1963. В. 91. № 11-12. S. 288 - 292.
204. Балабудкин М. А. Масштабирование роторно-пульсационных аппаратов // Хим.-фарм. журн. 1981. № 1. С. 100 - 105.
205. Свинчар Л. И., Онацкий П. А., Гарбузова Г. Л. Роторно-пульсационные смесители для жидких сред: Экспресс-информ. ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ. М., 1972. № 4. 20 с. (Сер. ХМ-1).
206. Характеристика дисперсности двухфазной системы / Г. Е. Колесников, О. А. Трошкин, Ю. И. Макаров, А. В. Орлов // Теорет. основ хим. технол. 1989. Т. 23. № 4. С. 542 - 545.
207. Балабудкин М. А., Голобородкин С. И., Шулаев Н. С. Об эффективности РПА при обработке эмульсионных систем // Теорет. основы хим. технол. 1990. Т. 24. № 4. С. 502 - 508.
208. Барам А. А., Дерко П. П., Клоцунг Б. А. Расчет мощности аппаратов роторно-пульсационного типа // Хим. и нефтехим. машиностроение. 1978. № 4. С. 4 - 6.
209. Кокушкин О. А., Барам А. А., Павлушенко И. С. О расчете мощности ротационных аппаратов // Журн. прикл. химии. 1969. Т. 42. № 8. С. 1793 - 1798.
210. Исследование гидродинамических и акустических характеристик аппаратов с роторно-пульсационными устройствами // А. А. Барам, П. П. Дерко, В. Б. Коган и др. // Хим. и нефтехим. машиностроение. 1969. № 11. С. 11 - 13.
211. О расчете мощности на перемешивание жидкости в роторных аппаратах / И. Г. Павлов, В. П. Литкин, В. П. Глухов и др. // Журн. прикл. химии. 1972. Т. 45. № 8. С. 1782.

3. АНАЛИЗ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТАХ РОТОРНОГО ТИПА

Пульсационные аппараты роторного типа являются гидродинамическими излучателями. В них наблюдаются все эффекты, присущие акустическим излучателям: кавитация, резонансные и автоколебательные явления, и сопутствующие им вторичные проявления этих эффектов. Изучение отдельного явления не представляет особых трудностей. Трудности заключаются в том, что акустические эффекты взаимосвязаны между собой. Анализ и исследованию этих эффектов посвящена данная глава.

3.1. ИМПУЛЬСНАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ КАВИТАЦИЯ В ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ РОТОРНОГО ТИПА

3.1.1. ФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЯВЛЕНИЯ КАВИТАЦИИ

Интенсификация химико-технологических процессов в ПАРТ во многом обусловлена кавитацией, возникающей в обрабатываемой жидкости [1, 2]. Кавитация в жидкости при работе аппарата вызывается несколькими факторами: развитая турбулентность потока жидкости, нестационарность потока жидкости, отрывные течения на входном участке в канал статора. Кавитацию в ПАРТ нельзя отнести к акустической, вызываемой периодическим сжатием и растяжением жидкости, и нельзя отнести к гидродинамической, вызываемой местным понижением давления при отрывных течениях. Факторы, вызывающие кавитацию в ПАРТ взаимосвязаны и взаимно дополняют друг друга. Наиболее подходящим термином для обозначения такого вида кавитации служит определение кавитации В. Ф. Юдаевым, как импульсной акустической.

Импульсная акустическая кавитация вызывается за счет инерции объема жидкости, врывающегося под давлением из канала ротора в канал статора в момент совмещения канала ротора с каналом статора. При закрытом канале статора жидкость, продвигающаяся вперед вдоль канала статора за счет инерционных сил, создает локальное разрежение на входном участке канала статора. Кратковременный импульс растягивающего ("отрицательного" относительно равновесного) давления вызывает рост парогазовых зародышей и инициирует кавитацию. Независимо от начального размера, кавитационные пузырьки достигают своего максимального размера практически одновременно. При росте кавитационный пузырек заполняется насыщенным паром данной жидкости и растворенным в жидкости газом. Как только давление в жидкости начинает возрастать, кавитационный пузырек под действием повышенного давления и сил поверхностного натяжения захлопывается, пар конденсируется на границе раздела фаз, а газ подвергается сильному адиабатическому сжатию. После схлопывания пузырька в окружающей жидкости распространяется сферическая ударная волна, быстро затухающая в пространстве.

Под кавитацией в жидкости понимают образование заполненных паром и газом полостей или пузырьков при локальном понижении давления в жидкости до давления насыщенных паров. Соотношение содержания газа и пара в полости может быть различным (теоретически от нуля до единицы). В зависимости от концентрации пара или газа в полости их называют паровыми или газовыми.

Необходимо отметить, что понижение давления в жидкости до давления насыщенных паров возможно также при кипении или вакуумировании жидкости. Но эти процессы распространяются по всему объему жидкости в отличие от кавитации, которая имеет ограниченную область. Различают гидродинамическую кавитацию, возникающую за счет местного понижения давления в потоке жидкости при обтекании твердого тела, и акустическую кавитацию, возникающую при прохождении через жидкость акустических колебаний. Нам будет интересовать акустическая кавитация как наиболее близкая по своей физической сущности к импульсной акустической кавитации, возникающей в ПАРТ. Ссылки будут делаться на основные обзоры и монографии, посвященные этой проблеме, чтобы

избежать ненужного нагромождения литературных источников. Гидродинамическая кавитация подробно описана в [3 - 12]. Кавитационная камера, заполненная паром и газом в различных источниках, называется полостью, пузырьком, пузырьком, сферой и т.п. Будем употреблять эти термины в зависимости от рассматриваемой ситуации, так как они вполне применимы и адекватны физической сущности кавитации. Акустическая кавитация представляет собой эффективное средство концентрации энергии звуковой волны низкой плотности в высокую плотность энергии, связанную с пульсациями и захлопыванием кавитационных пузырьков [13 - 21].

Чтобы в жидкости образовалась полость, необходимо раздвинуть ее соседние молекулы на расстояние не менее удвоенной длины промежутка между ними. Жидкость может выдерживать максимальное растягивающее напряжение, рассчитываемое по формуле

$$P = 2\sigma/R, \quad (3.1.1)$$

где R - радиус пузырька, м; P - давление, необходимое для разрыва сплошности жидкости, Па; σ - поверхностное натяжение, Н/м.

Для воды при $R = 2 \cdot 10^{-8}$ см, $P = 10\ 000$ атм [18]. Кавитационная прочность необработанной воды не превышает нескольких сот атмосфер. Существует нелинейная зависимость в виде предельных кривых Эше [13] между частотой акустической волны и пороговым давлением, при котором возникает кавитация. Пороговым давлением называется значение амплитуды акустического давления, вызывающего расширение зародыша до критического размера, после которого он начинает расти взрывообразно [13]. Чем ниже частота акустической волны, тем ниже пороговое давление. Например, для частоты 1 кГц пороговое давление не превышает 1 атм при нормальном статическом давлении и температуре ($P \approx 1$ атм, $T \approx 20$ °C) [13, 18].

Расхождение между экспериментальной и теоретической прочностью объясняется наличием в реальных жидкостях различных примесей и включений, которые являются зародышами кавитации и сильно понижают ее прочность. Согласно теоретическим представлениям маленькие пузырьки должны растворяться в жидкости, а большие - всплывать. Тем не менее, в жидкости постоянно присутствуют пузырьки различного радиуса. Очень маленькие пузырьки стабилизируются на поверхностях и в трещинах малых твердых частиц, взвешенных в жидкости. В любой жидкости зародыши кавитации могут образовываться также за счет заряженных частиц высоких энергий, присутствующих в космических лучах [18]. Более 2/3 частиц, порожденных космическими лучами, составляют μ -мезоны, а остальные, в основном, - электроны. Электроны хорошо поглощаются в жидкостях, а μ -мезоны поглощаются слабо, но обладают большой проникающей способностью. Проходя через вещества, электроны и μ -мезоны взаимодействуют с электронами атомов вещества и выбивают их, затрачивая на ионизацию определенную энергию. Вследствие локального выделения тепла, в которое переходит теряемая электронами энергия, в жидкости образуются паровые пузырьки.

В жидкости вследствие броуновского движения имеют место флуктуации внутренней структуры - области пространства с молекулами низкой энергии и молекулами высокой энергии. В областях с молекулами высокой энергии, которые называют микрообластями повышенной температуры, звуковые волны могут обеспечить значения напряжений, достаточных для разрыва жидкостей [24].

Стабильное существование парогазовых пузырьков объясняется тем, что на поверхности пузырька имеются равномерно распределенные одноименные заряды, обусловленные находящимися в жидкости ионами. Отталкивание этих зарядов предотвращает смыкание пузырька [13, 18].

Нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее простую модель сферически-симметричной пульсации газовой полости радиусом $r = R(t)$ в поле плоской звуковой волны, имеет вид

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho_0} [P_\infty - P(R)] = 0, \quad (3.1.2)$$

решение которого определяется законом изменения давления $P(R)$ на поверхности полости и P_∞ на бесконечности. Здесь ρ_0 - плотность невозмущенной жидкости, кг/м³.

Аналитическое решение этого уравнения получено Рэлеем при простейших условиях: $P = P_\infty$; $P(R) = 0$. В этом случае уравнение (3.1.2) переходит в уравнение захлопывания пустой полости под действием гидростатического давления:

$$V^2 = \frac{2}{3} \frac{P_\infty}{\rho} \left(\frac{R_{\max}^3}{R^3} - 1 \right), \quad (3.1.3)$$

где R_{\max} - максимальный размер полости, м.

Время захлопывания пустой полости определяется из формулы Рэля:

$$t_3 = 0,915 R_{\max} \sqrt{\rho/P}. \quad (3.1.4)$$

Уравнение, описывающее изменения радиуса кавитационной полости в поле ультразвуковой волны, известно как уравнение Нолтинга-Неппайреса:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} \left[P_\infty - P_{II} - P_m \sin \omega t + \frac{2\sigma}{R} - \left(P_\infty + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] = 0. \quad (3.1.5)$$

Уравнение (3.1.5) достаточно хорошо описывает поведение кавитационного пузырька в поле ультразвуковой волны, но допущения о несжимаемости жидкости не позволяют правильно оценить конечную стадию захлопывания кавитационного пузырька.

Динамику кавитационного пузырька с учетом сжимаемости описывает уравнение Херринга-Флинна:

$$\begin{aligned} & R \left(1 - 2 \frac{V}{c_0} \right) \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{4}{3} \frac{V}{c_0} \right) \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \\ & + \frac{1}{\rho_0} \left[P_\infty - P_{II} - P_m \sin \omega t + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu V}{R} - \left(P_\infty + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] + \\ & + \frac{R}{\rho_0} \frac{V}{c_0} \left(1 - \frac{V}{c_0} \right) \frac{dP(R)}{dR} = 0, \end{aligned} \quad (3.1.6)$$

где μ - коэффициент динамической вязкости, Па·с; c_0 - скорость звука в невозмущенной жидкости, м/с.

Уравнение (3.1.6) более точно описывает динамику кавитационного пузырька с учетом сжимаемости, но неадекватно при скоростях движения, сравнимых со скоростью звука, что характерно для конечной стадии захлопывания пузырька.

В большинстве исследований кавитации, особенно теоретических, рассматривают поведение одиночного пузырька. В реальных условиях необходим целый комплекс мер, чтобы добиться существования одиночного пузырька. Даже при давлении не намного превышающем порог кавитации сразу появляется множество кавитационных пузырьков, занимающих определенную часть пространства, которую называют кавитационной областью [22].

В развитой кавитационной области количество кавитационных пузырьков превышает количество зародышей примерно в 10^5 раз. Это объясняется тем, что процесс возникновения кавитационных пузырьков является цепной реакцией [13]. Кавитация, возникшая на единичном зародыше, за время в несколько десятков периодов ультразвуковых колебаний развивается в стабильную область, состоящую из множества кавитационных пузырьков. Процесс развития кавитационной области представляется следующим образом. При захлопывании кавитационный пузырек может терять устойчивость и распасться на части, а так как давление и температура в этот момент в пузырьке максимальны, то давление и температура парогазовой смеси в образовавшихся "осколках" тоже повышены. В фазе растяжения они легко расширяются и становятся новыми зародышами кавитации, менее прочными, чем постоянно имеющиеся в жидкости. Кавитационные полости, возникшие на этих зародышах, порождают новые. Внутри кавитационной области идет непрерывный процесс размножения и коагуляции кавитационных пузырьков, причем кавитационный порог несколько уменьшается, так как в установившемся режиме роль кавитационных зародышей начинают выполнять равновесные пузырьки, объем и газосодержание у которых больше, чем у зародышей [22].

В качестве величины, характеризующей степень развитости кавитации, Л. Д. Розенберг предложил использовать индекс кавитации

$$K = \Delta v / v, \quad (3.1.7)$$

где Δv - объем кавитационных пузырьков в фазе их наибольшего расширения, м^3 ; v - объем, выделенный в кавитационной области, м^3 .

Выделенный объем v должен удовлетворять следующим двум требованиям: линейные размеры этого объема должны быть: 1) малы по сравнению с длиной волны, чтобы первичное возбуждающее кавитацию звуковое давление можно было считать внутри этого объема постоянным по величине и синфазным; 2) намного больше размеров кавитационного пузырька [22].

Индекс кавитации есть мера пространственной плотности энергии, а величина Δv пропорциональна потенциальной энергии, запасенной всеми содержащимися в объеме v пузырьками. Работа, совершаемая n пузырьками с одинаковыми максимальными размерами, записывается в виде

$$A_k \approx \frac{4}{3} \pi R_{\max}^3 P n = P \Delta v. \quad (3.1.8)$$

В установившемся режиме, при неизменных внешних условиях (статическое давление, температура, газосодержание и т.п.) индекс кавитации есть функция координат поля. Рассматривая K в предельном случае как функцию точки, можно ввести понятие среднего (по объему кавитационной области) индекса кавитации $\langle K \rangle$ в виде

$$\langle K \rangle = \frac{1}{v} \int_v K dv. \quad (3.1.9)$$

Величина K лежит в пределах $0 \leq K \leq 1$. Нижний предел соответствует отсутствию кавитации, верхний предел достижим только в локальном объеме. Усреднять индекс кавитации можно не только по области, но и по какому-либо сечению.

В настоящее время нет удовлетворительной модели кавитационной области, адекватно описывающей ее поведение и поведение принадлежащего к ней отдельного кавитационного пузырька. Поведение кавитационной области зависит от многих явлений и факторов: размножение и коагуляция (коалесценция) пузырьков; их взаимодействие; изменение характера пульсаций пузырька за счет ударных волн и звукового излучения соседних пузырьков; изменение средних акустических свойств среды; микропотоки внутри кавитационной области и на границе пузырька; распределение зародышей кавитации; газосодержание и т.д.

Таким образом, кавитационная область представляет собой своеобразный трансформатор энергии, в котором сравнительно медленно накапливаемая энергия освобождается в течение очень короткого времени, в результате чего мгновенная мощность во много раз превосходит среднюю, вводимую излучателем в кавитационную область [22]. На развитие и интенсивность кавитации большое влияние оказывают внешние условия и свойства жидкости.

При кавитации в дегазированной жидкости в кавитационные пузырьки поступает меньше количества воздуха, чем в отстоявшейся, что приводит к уменьшению демпфирующего эффекта парогазовой смеси в пузырьке при его смыкании и возрастании давления в ударной волне. Дегазация жидкости приводит к уменьшению области кавитации с одновременным увеличением интенсивности ударной волны, создаваемой кавитационными пузырьками [13].

При повышении температуры давление внутри пузырька, определенное давлением пара и газа, увеличивается, и ударная волна ослабляется, но это также приводит к росту кавитационной области.

Из теоретических предпосылок следует, что увеличение гидростатического давления приводит к уменьшению времени захлопывания пузырька и увеличению интенсивности ударных волн. Эксперименты, проведенные по исследованию кавитационной эрозии, сонолюминесценции и измерению амплитуды давления в момент захлопывания кавитационного пузырька показывают, что увеличение гидростатического давления приводит к заметному увеличению этих явлений, а затем некоторому уменьшению с выраженным оптимумом. Все эти зависимости получили многочисленное экспериментальное подтверждение в различных исследованиях [18 - 25].

Акустическая кавитация в жидкостях инициирует различные физико-химические явления: сонолюминесценцию (свечение жидкостей); химические эффекты (звукохимические реакции); эрозию твердого тела (разрушение поверхности); диспергирование и эмульгирование.

Сонолюминесценция и кавитационные химические реакции являются взаимно связанными процессами, могут оказывать взаимное влияние, но в принципе они могут осуществляться независимо один от другого [24, 25].

Ультразвуковая люминесценция и свечение, возникающее при гидродинамической кавитации, являются близкими по своей природе процессами. При экспериментальном исследовании кавитации в низкочастотных звуковых полях была выявлена аналогия по физико-химическим эффектам между низкочастотной и ультразвуковой кавитацией [24, 25].

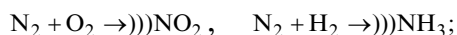
Модель физико-химических процессов, происходящих в кавитационном пузырьке и прилегающем к нему объеме жидкости, представляют в следующем виде [24]: в кавитационную полость могут проникать пары воды, растворенные газы, а также вещества с высокой упругостью пара и не могут проникать ионы или молекулы нелетучих растворенных веществ. Выделяющейся в процессе схлопывания пузырька энергии достаточно для

возбуждения, ионизации и диссоциации молекул воды, газов и веществ с высокой упругостью пара внутри кавитационной полости. На этой стадии любой из присутствующих газов является активным компонентом, участвуя в передаче энергии возбуждения, перезарядке и других процессах. Действие звукового поля на вещества, проникающие в полость, является непосредственным, прямым, причем действие активных газов, таких как кислород, водород и азот, в кавитационной полости двойственное:

1) во-первых, кислород и водород участвуют в реакциях трансформирования радикалов:



а азот - в газовых звукохимических реакциях, конечным результатом которых является фиксация азота:



2) во-вторых, химически активные газы, проникая в кавитационную полость, участвуют, так же как и благородные газы, в передаче энергии электронного возбуждения молекулам воды, а также в процессе перезарядки.

Здесь символом H° обозначено химическое действие звука.

При схлопывании кавитационного пузырька в раствор переходят радикалы H° , OH° , ионы и электроны малой энергии, образовавшиеся в газовой фазе при расщеплении молекулы H_2O и веществ с высокой упругостью пара, продукты их взаимодействия и частичные рекомбинации, а также метастабильные возбужденные молекулы H_2O .

Суммарную схему кавитационного расщепления молекул воды представляют в следующем виде $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^\circ, \text{OH}^\circ, \text{H}_2, \text{H}_2\text{O}_2$.

Эти возникающие в системе активные частицы после перехода в раствор сольватируются и реагируют с растворенными веществами. На этой стадии, когда осуществляются косвенные действия акустических колебаний, на ход процесса могут оказывать влияние практически только химически активные газы - O_2 и H_2 .

В конечном счете, воздействие кавитации на водные растворы сводится к единственному процессу - расщеплению молекул воды в кавитационных пузырьках. Независимо от природы растворенных веществ звук действует на одно вещество - на воду [24, 25].

Эрозия твердого тела (разрушение поверхности), очистка поверхностей, удаление заусенцев и микронеровностей, диспергирование твердых частиц и эмульгирование осуществляются, в основном, двумя характерными проявлениями кавитации: ударными волнами и кумулятивными струйками, образующимися при схлопывании кавитационных пузырьков.

На поверхностях частиц и твердых тел имеются концентраторы напряжений в виде микротрещин, неровностей поверхности и т.п., на которых образуются зародыши кавитации. Под действием звукокапиллярного эффекта и интенсивных микропотоков, жидкость проникает в поры и трещины, где при захлопывании кавитационных пузырьков возникает мощная ударная волна, способствующая разрушению материалов. Кумулятивные струйки разрушают поверхность твердого тела за счет кинетической энергии жидкости. Мелкие частицы твердого тела, размеры которых соизмеримы с поперечным сечением кумулятивных струй, увлекаются ими и дают дополнительный вклад в процесс разрушения твердого тела или твердых частиц, находящихся в жидкости. Более подробно ознакомиться с кинетикой диспергирования, очистки, эрозии и эмульгирования в поле ультразвуковой кавитации можно в работах [12, 13, 18, 20 - 29].

3.1.2. ДИНАМИКА КАВИТАЦИОННОГО ПУЗЫРЬКА

Для импульса давления, который генерируется в ПАРТ, максимальная скорость стенки пузырька не превышает 100 м/с. Численные решения уравнения Херринга-Флинна (3.1.6), учитывающего сжимаемость жидкости, и Нолтинга-Неппайраса (3.1.5), не учитывающего сжимаемость жидкости, отличаются друг от друга менее чем на 10 %.

Уравнение Нолтинга-Неппайраса для нашего случая записывается в следующем виде:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{2}{3} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} \left(P_k - P_n + P_m + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu}{R} \frac{dR}{dt} - \left(P + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right) = 0, \quad (3.1.11)$$

где P_k - давление в канале статора, Па.

При развитой кавитации, в канале статора ПАРТ образуется кавитационный кластер (облако) - объем, почти полностью занятый кавитационными пузырьками. При импульсных растягивающих напряжениях в жидкости, зародыши кавитации начинают расти, образуя кавитационный кластер, форма и длина которого определяется начальным спектром размеров кавитационных зародышей, характером прикладываемого напряжения и граничными условиями. Все зародыши достигают максимального размера одновременно, и среда может считаться монодисперсной, содержащей пузырьки только одного размера [30].

При малых расстояниях между пузырьками в плотном кавитационном кластере, кавитационные пузырьки взаимодействуют друг с другом в процессе пульсаций. В этом случае в уравнении (3.1.11) необходимо ввести слагаемое, выражающее давление, генерируемое соседними пузырьками. Запишем уравнение (3.1.11) учитывая давление, генерируемое всеми кавитационными пузырьками $P_{\text{кав}}$:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{2}{3} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} \left(P_{\text{стат}} - P_n + P_m + P_{\text{кав}} + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu}{R} \frac{dR}{dt} - \left(P + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right) = 0. \quad (3.1.12)$$

Рассмотрим отдельную область кавитационных пузырьков, равномерно распределенных в пространстве с постоянной плотностью ρ_n [31]. Каждое схлопывание пузырька производит волну давления и вносит свой вклад во вторичное давление $P_{\text{кав}}$ в уравнении (3.1.12). Точное решение уравнения (3.1.12) требует решения отдельного уравнения для каждого кавитационного пузырька.

ПРОИЗВЕДЕМ НЕКОТОРЫЕ УПРОЩЕНИЯ. ПРИМЕМ, ЧТО ВСЕ ПУЗЫРЬКИ ИМЕЮТ ОДИНАКОВЫЙ РАЗМЕР И ВНЕШНИЕ УСЛОВИЯ ОДИНАКОВЫ ДЛЯ ВСЕХ ПУЗЫРЬКОВ. СЛЕДОВАТЕЛЬНО, КАЖДЫЙ ИЗ ПУЗЫРЬКОВ КАВИТАЦИОННОГО КЛАСТЕРА СХЛОПЫВАЕТСЯ В МОМЕНТ ВРЕМЕНИ T_c И ИЗЛУЧАЕТ ВОЛНУ ДАВЛЕНИЯ $P_{\text{КАВ}1}$, ОДИНАКОВУЮ ДЛЯ ВСЕХ ПУЗЫРЬКОВ. ОБЩЕЕ ВТОРИЧНОЕ ДАВЛЕНИЕ $P_{\text{КАВ}}$ НАХОДИТСЯ КАК СУПЕРПОЗИЦИЯ ВСЕХ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ, ВЗЯТЫХ В КОЛИЧЕСТВЕ, ОГРАНИЧЕННОМ ВРЕМЕНЕМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ. ВЫДЕЛИМ В КАВИТАЦИОННОМ КЛАСТЕРЕ СФЕРУ РАДИУСОМ R , ВКЛЮЧАЮЩУЮ МНОЖЕСТВО КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ. В ЦЕНТРЕ СФЕРЫ НАХОДИТСЯ РАССМАТРИВАЕМЫЙ ПУЗЫРЕК. В ПРЕДЕЛАХ ОГРАНИЧЕННОГО ОБЪЕМА ВКЛАД ВСЕХ ПУЗЫРЬКОВ БУДЕТ СОСТАВЛЯТЬ $\rho_n P_n (t - t_c - r/c) R_{\text{мин}} \frac{dv}{r}$ ПРИ $dv = 4\pi r^2 dr$. ИНТЕГРИРУЯ ПО ВСЕМУ ОБЪЕМУ, ПОЛУЧАЕМ

$$P_{\text{кав}}(t) = \rho_n R_{\text{мин}} \iiint P_n (t - t_c - r/c) \frac{dv}{r} \quad \text{ИЛИ}$$

$$P_{\text{кав}}(t) = 4\pi\rho_{\text{п}}R_{\text{мин}}c^2 \int_{-\infty}^{t-t_c} P_{\text{п}}(\tau)(t-t_c-\tau)d\tau, \quad (3.1.13)$$

ГДЕ $\tau = t - t_c - r/c$.

ПРИ $\tau = 0$ УРАВНЕНИЕ (3.1.13) ПРИНИМАЕТ ВИД

$$P_{\text{кав}}(t) = 4\pi c^2 \rho_{\text{п}} R_{\text{мин}} (t - t_c) \int_{-\infty}^{t-t_c} P_{\text{п}}(\tau) d\tau = 4\pi\rho_{\text{п}}c^2 BR_0^2 (t - t_c) \sqrt{2\rho P_{\text{макс}}}, \quad \text{ДЛЯ } T > T_C. \quad (3.1.14)$$

ЗДЕСЬ $R_{\text{МИН}}$ - МИНИМАЛЬНЫЙ РАДИУС ПУЗЫРЬКА ПРИ СХЛОПЫВАНИИ, М; C - СКОРОСТЬ ЗВУКА В ЖИДКОСТИ, М/С; $P_{\text{МАКС}}$ - ДАВЛЕНИЕ ГАЗА В ПУЗЫРЬКЕ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ, ПА; $\rho_{\text{п}}$ - ПЛОТНОСТЬ ПУЗЫРЬКОВ, М⁻³. ЧИСЛЕННАЯ КОНСТАНТА $B = \Gamma(1/2)\Gamma(3k - 1/2)/\Gamma(3k)$. ДЛЯ АДИАБАТИЧЕСКОЙ ЭКСПОНЕНТЫ $K = 1,4$ (ВОЗДУХ) ЭТА ВЕЛИЧИНА РАВНА $B = 0,953$, Γ - ГАММА-ФУНКЦИЯ. ДЛЯ $T < T_C$ ВТОРИЧНОЕ КАВИТАЦИОННОЕ ДАВЛЕНИЕ РАВНО НУЛЮ.

УРАВНЕНИЕ (3.1.12) НЕ ИМЕЕТ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ, И ПОЭТОМУ ДЛЯ ЕГО РЕШЕНИЯ ПРИМЕНЯЛОСЬ ЧИСЛЕННОЕ ИНТЕГРИРОВАНИЕ ПО МЕТОДУ РУНГЕ-КУТТА С ПОСТОЯННЫМ ШАГОМ. В РЕЗУЛЬТАТЕ ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ ПОЛУЧЕНЫ ЗАВИСИМОСТИ РАДИУСА ПУЗЫРЬКА И УСКОРЕНИЯ СТЕНКИ ПУЗЫРЬКА ОТ ВРЕМЕНИ (РИС. 3.1.1). КАК ВИДНО ИЗ РИСУНКА, КАВИТАЦИЯ ПОЯВЛЯЕТСЯ СРАЗУ КАК ТОЛЬКО ПРОЙДЕТ ПИК РАЗРЕЖЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОГО ПАРТ.

НЕПОСРЕДСТВЕННО КАВИТАЦИОННОЕ ДАВЛЕНИЕ, ГЕНЕРИРУЕМОЕ КАВИТАЦИОННЫМИ ПУЗЫРЬКАМИ, ДАЕТ МАЛО ИНФОРМАЦИИ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗЛУЧАТЕЛЯ. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРТ БУДЕМ ХАРАКТЕРИЗОВАТЬ ОТНОСИТЕЛЬНЫМ КАВИТАЦИОННЫМ ДАВЛЕНИЕМ $P_{\text{КАВ}}/P_M$. ПОСТРОИМ ЗАВИСИМОСТЬ $P_{\text{КАВ}}/P_M$ ОТ КРИТЕРИЯ СТРУХАЛЯ Sh , ХАРАКТЕРИЗУЮЩЕГО ЭНЕРГОЕМКОСТЬ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА. КРИТЕРИЙ СТРУХАЛЯ ЗАПИШЕМ В ВИДЕ

$$Sh = l_3 \omega R_p / (a_c \bar{v}),$$

ГДЕ $\bar{v} = \sqrt{2\Delta\bar{P}/\rho}$ - СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ СТАТОРА ЗА ПЕРИОД, М/С; $\Delta\bar{P}$ - ОБЩИЙ ПЕРЕПАД ДАВЛЕНИЯ МЕЖДУ ПОЛОСТЬЮ РОТОРА И РАБОЧЕЙ КАМЕРОЙ, ПА.

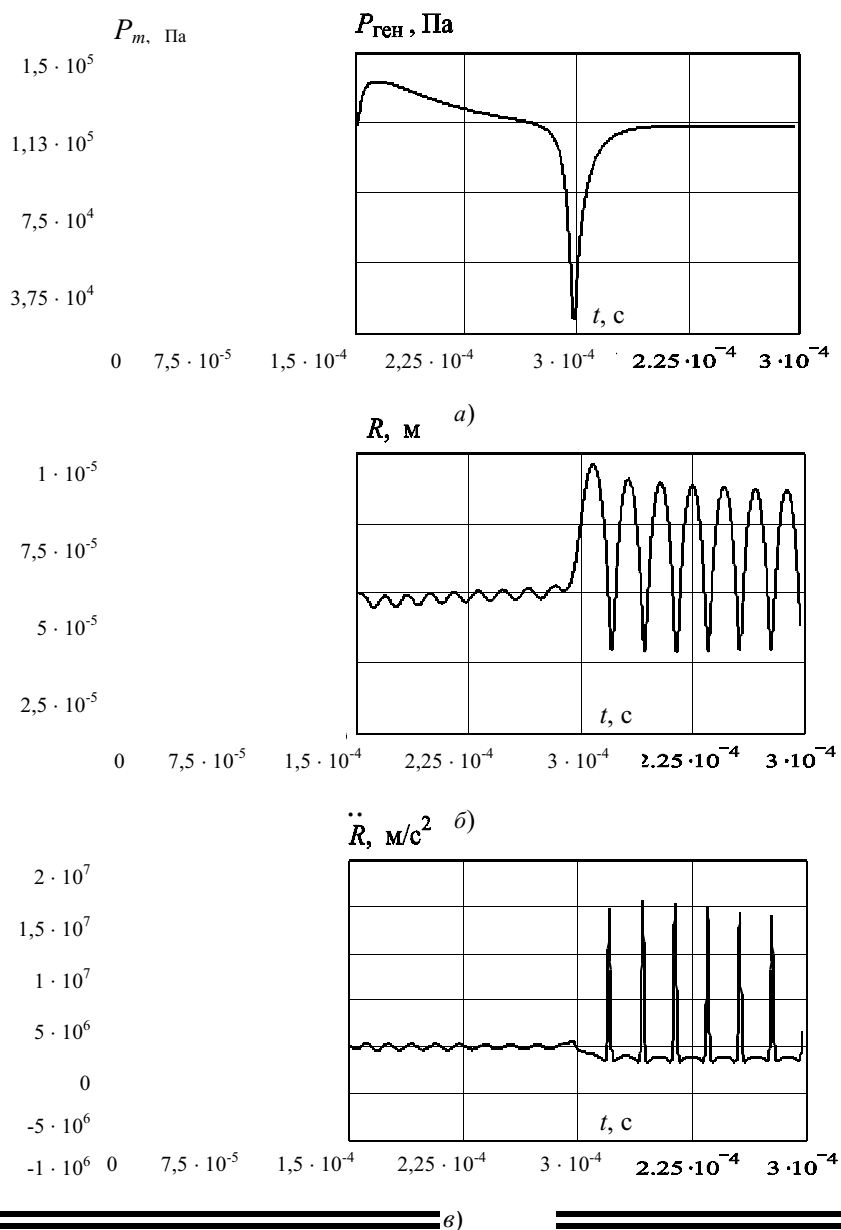


Рис. 3.1.1. Графики численных решений уравнений:
 а - уравнение (2.4.4) импульс возбуждающего давления;
 б - уравнение (3.1.12) - зависимость радиуса пузырька от времени;
 в - уравнение (3.1.12) - зависимость ускорения стенки пузырька от времени

На основании анализа графиков зависимостей, представленных на рис. 3.1.2 видно, что зависимости имеют экстремальный характер.

С уменьшением начального радиуса зародыша кавитационной полости, экстремум зависимости отношения кавитационного давления к амплитуде задающего импульса акустического давления смещается в сторону наибольших значений критерия Струхала. При увеличении угловой скорости вращения ротора ПАРТ вклад в общее акустическое давление, генерируемое кавитационным облаком, начинают оказывать более мелкие пузырьки. При уменьшении угловой скорости ротора ПАРТ в общее кавитационное давление вносят вклад более крупные пузырьки.

$$P_{кав}/P_m$$

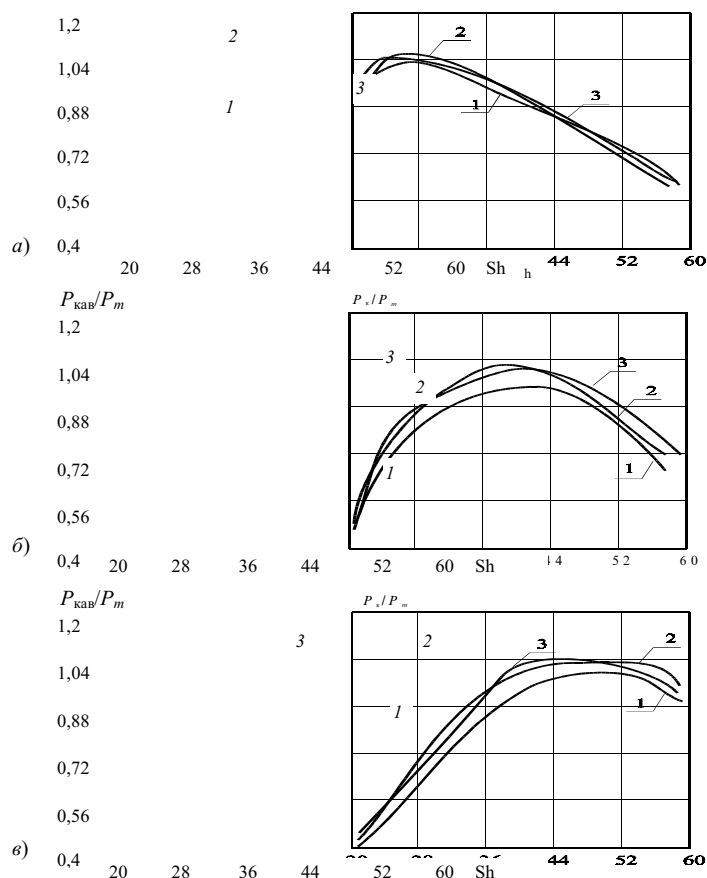


Рис. 3.1.2. Зависимости отношения генерируемого кавитационного давления пузырька к амплитуде задающего импульса от значения критерия Струхала:
a - начальный радиус пузырька $R_0 = 10^{-4}$ м; *б* - начальный радиус пузырька $R_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ м;
в - начальный радиус пузырька $R_0 = 3 \cdot 10^{-5}$ м.
1 - первая пульсация пузырька, *2* - вторая пульсация пузырька,
3 - третья пульсация пузырька

3.2. АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ РАБОТЕ ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТОВ РОТОРНОГО ТИПА

ПАРТ являются мощным средством для интенсификации химико-технологических процессов. Одним из факторов воздействия на обрабатываемую среду служат гидроакустические эффекты, обусловленные пульсациями давления и скорости потока жидкости. Для повышения эффективности работы ПАРТ используются дополнительные источники гидроакустических колебаний. Дополнительные источники гидроакустических колебаний можно разделить на активные, которые требуют автономного источника энергии для генерации колебаний, и пассивные, которые приводятся в колебательное движение за счет энергии обрабатываемой жидкости.

Технологические системы, включающие в себя ПАРТ, содержат также технологическое оборудование и трубопроводы, связывающие систему в единый комплекс. С точки зрения гидроакустики, это оборудование и трубопровод имеют свои собственные резонансные частоты и могут содержать дополнительные источники гидроакустических колебаний. В ПАРТ, как генераторе гидроакустических импульсов, акустические поля вспомогательного технологического оборудования в совокупности формируют сложную картину и тем самым оказывают определенное влияние на интенсивность проводимых процессов. Это влияние

может дать как положительный, так и отрицательный эффект и его необходимо учитывать. Синхронизация собственных гидроакустических эффектов технологического оборудования и дополнительных источников гидроакустических колебаний с основным генератором гидроакустических импульсов - ПАРТ, будет благоприятно сказываться на интенсификации химико-технологических процессов. В этом случае могут иметь место автоколебательные и резонансные режимы работы ПАРТ и технологической системы, отдача энергии гидроакустических импульсов при таких режимах значительно выше.

Автоколебательной системой называют устройство, преобразующее движение постоянного направления в колебательное движение. Под термином "движение" следует понимать не механическое движение, а движение в общем смысле [32]. Автоколебательная система содержит источник энергии, клапан и колебательную систему. Клапан - это устройство, регулирующее поступление энергии в колебательную систему. Все эти элементы находятся между собой во взаимодействии. С одной стороны клапан управляет поведением колебательной системы, а с другой стороны, движение системы управляет работой клапана (рис. 3.2.1).



Рис. 3.2.1. Схема автоколебательной системы

Многие исследователи находили различные автоколебательные эффекты, возникающие при обработке жидкости в ПАРТ. Так, в работе [33] исследовано явление синхронизации частот вихреобразования и пульсаций давления в потоке обрабатываемой жидкости. Образование вихрей обусловлено резким изменением скорости и, соответственно, давления при выходе жидкости из зазора между ротором и статором в каналы. При этом происходит отрыв пограничного слоя с одновременным образованием вихрей, что порождает импульсы давления. При экспериментальных исследованиях зависимости амплитуды кавитационных импульсов от статического давления при постоянном расходе жидкости был выявлен максимум амплитуды импульсов давления, генерируемых коллапсирующим ансамблем кавитационных пузырьков, что объясняется размерами образующейся кавитационной области [34]. Теоретически такое поведение кавитационного кластера было описано в работе [35]. Попадая в область повышенного давления, пузырьки схлопываются не сразу, а продолжают пульсировать, сбрасывая энергию и уменьшаясь в размерах ступенчато. При обработке газожидкостных смесей происходит частичная сепарация и жидкость протекает через каналы ПАРТ порциями, пульсируя с определенным периодом [36].

По способу организации нагнетания обрабатываемой жидкости, ПАРТ можно разделить на аппараты, имеющие лопатки или другого вида подающие элементы на роторе, и аппараты с внешней подачей обрабатываемой жидкости. Внешняя подача жидкости возможна самотеком из резервуара или при помощи насоса. Любые насосы: центробежные, вихревые, ротационные, шестеренчатые, мембранные, шнековые и другие осуществляют подачу жидкости дискретно. Дискретность подачи жидкости в насосах обусловлена конечным числом рабочих элементов. В этом случае насос является дополнительным источником гидроакустических колебаний. При работе ПАРТ с дополнительным источником гидроакустических колебаний имеет место взаимодействие двух взаимосвязанных генераторов колебаний, что создает благоприятные условия для возникновения автоколебательных явлений и возможность управлять этими явлениями. В этой системе источником гидроакустической энергии является движущийся поток жидкости. Суммарное акустическое поле, создаваемое при вторичной модуляции потока в ПАРТ, является

колебательной системой, а регулятором – акустическое поле, создаваемое первичным модулятором, в роли которого выступает дополнительный источник колебаний (насос). В свою очередь, ПАРТ вследствие обратной связи – упругих колебаний в жидкости, воздействует на величину амплитуды колебаний в жидкости на выходе из насоса (рис. 3.2.2).

Спектр акустического поля дополнительного источника колебаний является сплошным, с ярко выраженными дискретными составляющими [37]. Наибольшими дискретными составляющими спектра акустического поля дополнительного источника являются колебания на лопаточной частоте:

$$f_n = \omega_n z_n / (2\pi), \quad (3.2.1)$$

где ω_n – угловая скорость рабочего колеса насоса, c^{-1} ; z_n – число лопаток на рабочем колесе насоса.

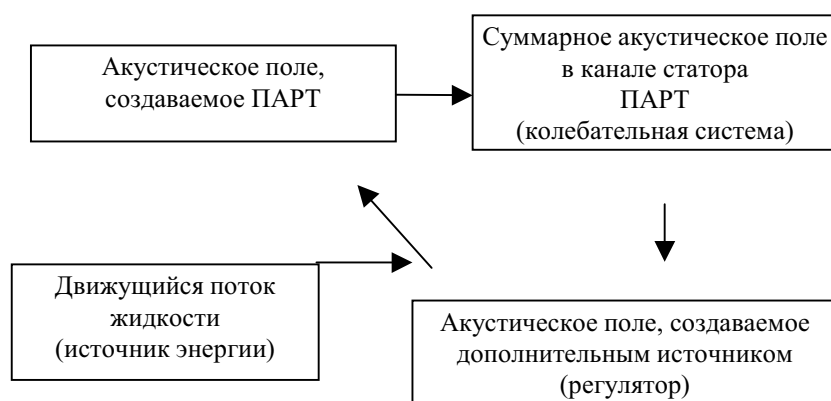


Рис. 3.2.2. Схема автоколебательной системы ПАРТ

Более подробно процесс звукообразования в лопаточных центробежных нагнетательных машинах описан в работе [38]. Так как число лопаток на рабочем колесе имеет конкретное целое значение, то в транспортируемой жидкой или газообразной среде возникают колебания давления. "Язык" корпуса центробежного устройства (выходной патрубков), близко расположенный к наружному радиусу колеса, подвергается в силу конечного числа лопаток периодическому силовому воздействию со стороны среды, вытекающей из межлопаточных каналов. Акустические колебания, возникающие в результате такого взаимодействия, являются дискретными по своему спектральному составу и частоты f_{nk} этих дискретных составляющих связаны с параметрами центробежной нагнетательной машины соотношением

$$f_{nk} = \omega_n z_n / (2\pi) k,$$

где $k=1, 2, 3, \dots$

У свободного лопаточного колеса также можно обнаружить дискретную составляющую акустических колебаний на частоте f_n [38]. Параметры выходного патрубка и зазор между корпусом и рабочим колесом насоса влияют на интенсивность генерируемых акустических колебаний, т.е. на глубину модуляции. ПАРТ генерирует гидроакустические колебания в жидкости в канале статора с основной частотой, равной

$$f = \omega z_p / (2\pi), \quad (3.2.2)$$

где ω – угловая скорость ротора, c^{-1} ; z_p – число каналов в роторе.

Кроме основной частоты в канал статора генерируется широкий спектр колебаний с ярко выраженными дискретными составляющими, кратными основной частоте.

Движущийся поток жидкости является источником гидроакустической энергии. Он служит генератором и носителем гидроакустических колебаний при генерировании колебаний и в дополнительном источнике и в ПАРТ. При прохождении жидкости через дополнительный источник колебаний поток подвергается первичной модуляции. Акустическое поле, создаваемое дополнительным источником колебаний, является регулятором при вторичной модуляции в ПАРТ. Основная модуляция потока жидкости происходит в ПАРТ, который и предназначен для создания гидроакустических колебаний в обрабатываемой жидкости. Дополнительный источник колебаний создает модуляцию потока жидкости значительно менее интенсивную, чем ПАРТ.

В то же время, при совпадении частот гидроакустических колебаний, создаваемых дополнительным источником, следует ожидать увеличения амплитуды пульсаций давления в канале статора и рабочей камере ПАРТ. Аппарат вследствие обратной связи, в свою очередь, воздействует на величину амплитуды пульсаций в жидкости на выходе из дополнительного источника колебаний. При совпадении основной частоты колебаний в ПАРТ или ее гармоник с лопаточной частотой дополнительного источника колебаний амплитуда колебаний, создаваемых дополнительным источником, должна увеличиться.

Рассмотрим модель, описывающую генерацию импульсов давления в ПАРТ с учетом внешнего источника дополнительных колебаний. Функцию изменения давления в канале статора ПАРТ с учетом нестационарности расхода жидкости в подающем насосе можно представить в виде

$$P(t) = \frac{\rho}{2z_c^2} \frac{[Q_H(t)]^2}{[S(t)]^2}. \quad (3.2.3)$$

Здесь функция изменения проходного сечения канала статора согласно уравнению (2.3.1) имеет вид

Функция изменения расхода в подающем насосе зависит от геометрии и конструкции нагнетательных элементов насоса. В качестве примера рассмотрим центробежный насос, как один из наиболее распространенных типов устройств для нагнетания и транспортировки маловязких жидкостей.

$$S(t) = \begin{cases} S_{\min} + th\omega R_p, \\ S_{\max}, \\ (a_c + a_p) h - th\omega R_p, \\ S_{\min}, \end{cases}$$

Функцию изменения проходного сечения центробежного насоса можно представить аналогичной функции изменения проходного сечения ПАРТ, исходя из того, что центробежный насос может быть представлен как ПАРТ с одним каналом в статоре - выходным патрубком и каналами в роторе, ширина которых больше, чем расстояние между ними. Развертка сечения выходного патрубка и рабочего колеса центробежного насоса показана на рис. 3.2.3.

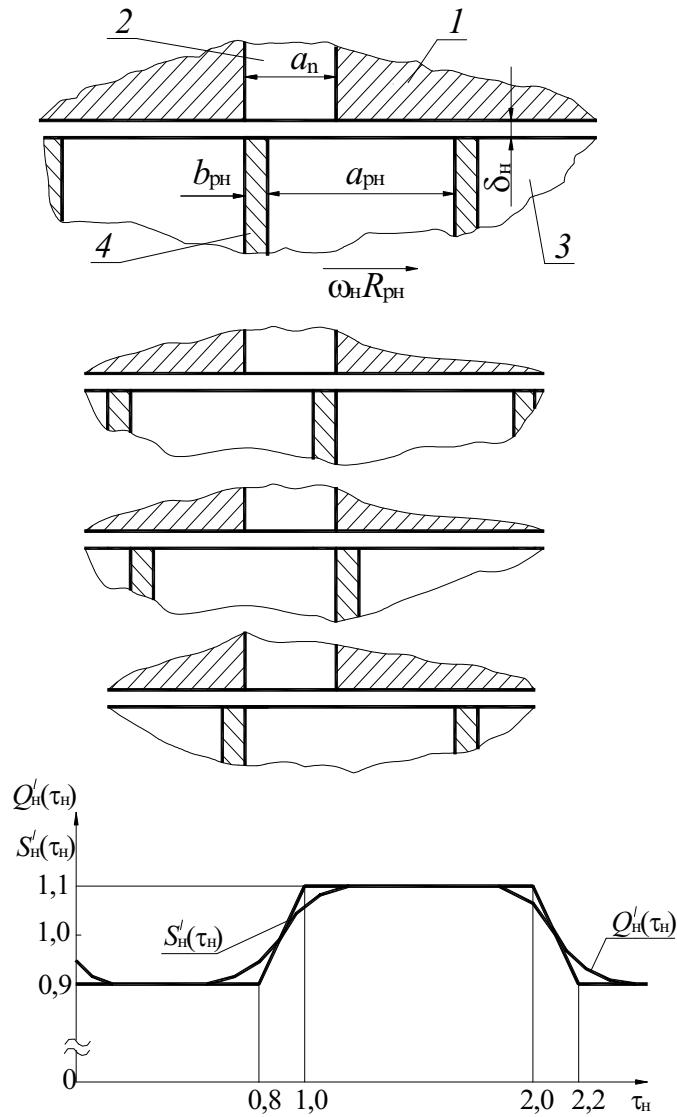


Рис. 3.2.3. Развертка сечения рабочего колеса и выходного патрубка центробежного насоса в различные промежутки времени и графики функции $S'_н(\tau_н)$ и $Q'_н(\tau_н)$ при $a_н = 2$; $b_н = 0,2$; $\Delta_н = 0,1$

В этом случае функция изменения проходного сечения выходного патрубка центробежного насоса имеет вид:

$$S_н(t) = \begin{cases} S_{\min} + (a_н - b_{рн}) h_н, & 0 < t \leq (a_н - b_{рн}) / (\omega_н R_{рн}); \\ S_{\min} + t h_н \omega_н R_{рн}, & (a_н - b_{рн}) / (\omega_н R_{рн}) < t \leq a_н / (\omega_н R_{рн}); \\ S_{\min} + S_{\max}, & a_н / (\omega_н R_{рн}) < t \leq a_{рн} / (\omega_н R_{рн}); \\ S_{\min} + S_{\max} + a_{рн} h_н - t h_н \omega_н R_{рн}, & a_{рн} / (\omega_н R_{рн}) < t \leq (a_{рн} + b_{рн}) / (\omega_н R_{рн}). \end{cases} \quad (3.2.4)$$

где $S_{\min} = \delta_н h_н$ - площадь проходного сечения зазора между выходным патрубком и рабочим колесом, m^2 ; $\delta_н$ - величина зазора между выходным патрубком и рабочим колесом насоса, м; $R_{рн}$, $\omega_н$ - радиус и угловая скорость рабочего колеса насоса, м, c^{-1} ; $b_{рн}$, $a_{рн}$ - ширина лопатки и расстояние между соседними лопатками на рабочем колесе насоса, м; $a_н$ - ширина (диаметр) выходного патрубка насоса, м; $h_н$ - высота лопатки рабочего колеса, м;

$S_{H\max} = a_{\Pi} h_H$ - площадь проходного сечения при совмещении полости между лопастями рабочего колеса и выходным патрубком, м².

Введем обозначения:

$$A_H = a_{pH}/a_{\Pi}; \quad B_H = \frac{b_{pH}}{a_{\Pi}}; \quad t_{H0} = a_{\Pi}/(\omega_H R_{pH});$$

$$\tau_H = t/t_{H0}; \quad S'_H = S_H(t)/S_{H\max}; \quad \Delta_H = \delta_H/a_{\Pi}.$$

Перепишем уравнение (3.2.4) в безразмерном виде

$$S'_H(\tau_H) = \begin{cases} \Delta_H + 1 - B, & 0 < \tau_H \leq 1 - B; \\ \Delta_H + \tau_H, & 1 - B_H < \tau_H \leq 1; \\ \Delta_H + 1, & 1 < \tau_H \leq A_H; \\ \Delta_H + 1 + A_H - \tau_H, & A_H < \tau_H \leq A_H + B_H. \end{cases} \quad (3.2.5)$$

График функции $S'_H(\tau_H)$ при $A = 2$, $B = 0,2$, $\Delta = 0,1$ показан на рис. 3.2.3, б. Здесь же показан график функции $Q'_H(\tau_H)$, который имеет аналогичную зависимость как и график функции $S'_H(\tau_H)$, но со сглаженными участками кривой в местах перелома графика функции $S'_H(\tau_H)$. Сглаженный характер функции $Q'_H(\tau_H)$ обусловлен влиянием релаксационных свойств реальной жидкости. Следует иметь в виду, что реальный график функции $Q'_H(\tau_H)$ несколько сдвинут вправо относительно графика функции $S'_H(\tau_H)$, что не влияет на форму кривой. Сглаживание функции $Q'_H(\tau_H)$ может быть произведено частями синусоиды.

Безразмерная функция пульсаций давления в канале статора примет следующий вид:

$$P'(\tau) = k \frac{[Q'_H(\tau_H)]^2}{[S'(\tau)]^2},$$

где k - коэффициент пропорциональности.

Рассмотрим функцию $P'(\tau)$ как интегральную функцию за весь период колебаний расхода обрабатываемой жидкости в дополнительном источнике колебаний:

$$P'_{\text{инт}} = \frac{1}{\tau_H} k \int_0^{\tau_H} \frac{[Q'_H(\tau_H)]^2}{[S'(\tau)]^2} d\tau_H. \quad (3.2.6)$$

Эта функция показывает, при каких частотах колебания расхода жидкости в дополнительном источнике колебаний и площади проходного сечения канала статора ПАРТ следует ожидать увеличения амплитуды пульсаций давления.

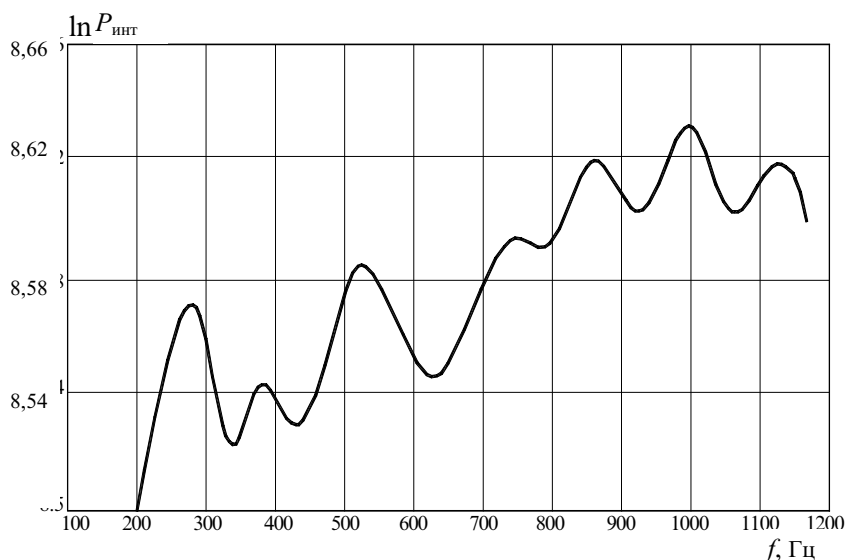


Рис. 3.2.4. Зависимость амплитуды давления звуковой волны в канале статора от основной частоты излучения $f_n = 280$ Гц

График функции $\ln P_{\text{инт}}$ показан на рис. 3.2.4, откуда видно, что увеличение величины $P'_{\text{инт}}$ наблюдается при целых соотношениях τ_n/τ или, соответственно, f/f_n .

3.3. РЕЗОНАНСНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТОВ РОТОРНОГО ТИПА

Одним из наиболее простых и доступных способов повысить эффективность работы какого-либо излучателя является использование резонансных эффектов [40]. Такой подход применяли и к ПАРТ. Так, в работах [39, 41] предлагается рассчитывать геометрические и кинематические параметры таким образом, чтобы при совмещении каналов ротора и каналов статора происходил прямой гидроудар. В этом случае происходят резонансные колебания в приближении плоских волн, как в рабочей камере, так и в полости ротора. Аналогичный подход был сделан в работах [42, 43], где резонансные колебания потока жидкости устанавливаются при определенном соотношении времени пробега вдоль канала статора, импульса давления и времени перекрытия канала статора.

Замкнутые технологические объемы аппаратов, заполненные определенной жидкостью или газом, имеют собственные резонансные частоты. Распространение колебаний в таких замкнутых объемах можно описать волновым уравнением. Зимин А. И. [44 - 46] разработал метод совместного решения уравнений, определяющих параметры собственных частот полости ротора и рабочей камеры. При совпадении собственных частот полости ротора и рабочей камеры с частотой излучаемых пульсаций давления возникает явление акустического резонанса, что способствует интенсификации химико-технологических процессов. Собственные частоты определялись при условии, что высота рабочей камеры равна высоте полости ротора, что не всегда выполняется.

Рассмотрим задачу определения собственных частот и форм колебаний рабочей камеры и полости ротора по общему волновому уравнению

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0. \quad (3.3.1)$$

Для замкнутого цилиндрического объема полости ротора собственные частоты находят, решая волновое уравнение в цилиндрических координатах при следующих граничных условиях:

$$\left. \frac{\partial \Psi(r, \varphi, z, t)}{\partial r} \right|_{r=R_p-l_p}; \quad \left. \frac{\partial \Psi(r, \varphi, z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \Psi(r, \varphi, z, t)}{\partial z} \right|_{z=h_p} = 0, \quad (3.3.2)$$

где l_p – длина канала ротора, м; h_p – высота полости ротора, м.

Собственная частота полости ротора [47]:

$$f_{mnp} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\alpha_{mn}}{(R_p - l_p)} \right)^2 + \left(\frac{\pi p}{h_p} \right)^2}, \quad (3.3.3)$$

где α_{mn} – корни уравнения $I'_m(x) = 0$; $I'_m(x)$ – производная от функции Бесселя порядка m ; z – координата по высоте полости ротора, м; r, φ, t – радиальная, угловая и временная координаты, м, рад, с;

$$m = 0, 1, 2, \dots; \quad n = 1, 2, 3, \dots; \quad p = 1, 2, 3;$$

m, n, p – моды колебаний; c – скорость звука в среде, м/с.

Для замкнутого объема рабочей камеры в виде прямоугольного тора граничные условия имеют вид [48]:

$$\left. \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right|_{r=R_k} = 0; \quad \left. \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right|_{r=R_p+l_c} = 0; \quad \left. \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right|_{z=h_k} = 0; \quad (3.3.4)$$

где R_k – внешний радиус рабочей камеры, м.

Для установившихся колебаний представим потенциал скорости в виде

$$\Psi = \psi(r, \varphi, z) e^{i(\omega t + \beta)}. \quad (3.3.5)$$

После подстановки (3.3.5) в (3.3.1) получим уравнение Гельмгольца в цилиндрических координатах:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \psi = 0, \quad (3.3.6)$$

Используя метод Фурье, представим амплитудную функцию в виде произведения трех функций разных переменных, но у каждой функции – одной:

$$\psi = R(r) \Phi(\varphi) Z(z). \quad (3.3.7)$$

Подставим (3.3.7) в (3.3.6) и произведем некоторые преобразования уравнения Гельмгольца для амплитудной функции $\psi(r, \varphi, z)$, заменяя его тремя обыкновенными дифференциальными уравнениями:

$$\frac{d^2\Phi}{d\varphi^2} + m^2\Phi = 0; \quad (3.3.8)$$

$$\frac{d^2Z}{dz^2} + \gamma^2 Z = 0; \quad (3.3.9)$$

$$\frac{d^2R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \left(K^2 - \frac{m}{r^2} \right) R = 0, \quad (3.3.10)$$

$$K = \omega_k^2 / c^2 - \gamma^2, \quad (3.3.11)$$

где m, γ – произвольные, целые числа; ω_k – круговая частота, c^{-1} .

Решая уравнения (3.3.8) - (3.3.10), находим резонансные частоты как

$$f_{mnp} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{K_{mn}^2 + \left(\frac{\pi p}{h_k} \right)^2}, \quad (3.3.12)$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$; $n = 1, 2, 3, \dots$; $p = 1, 2, 3, \dots$; K_{mn} – корни соответствующего дисперсионного уравнения; h_k – высота рабочей камеры.

Определим низшие собственные частоты полости рабочей камеры при $m = 0$ как

$$f_{0np} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{K_{0n}^2 + \left(\frac{\pi p}{h_k} \right)^2}, \quad (3.3.13)$$

где K_{0n} – корни уравнения

$$I_1(K_{0n} R_k) Y_1(K_{0n} (R_p + l_c)) - Y_1(K_{0n} R_k) I_1(K_{0n} (R_p + l_c)) = 0. \quad (3.3.14)$$

Уравнение (3.3.14) совпадает с уравнением А. И. Зимины [44 - 46] для расчета собственных чисел рабочей камеры. Данное уравнение использовалось не для расчета собственной частоты рабочей камеры, а для нахождения внешнего и внутреннего радиусов рабочей камеры, значения которых, при подстановке в уравнение (3.3.14), определяли собственное число рабочей камеры, равное собственному числу полости ротора в приближении цилиндрических волн (неполный резонанс). Второй член подкорневой суммы в уравнениях (3.3.3) и (3.3.13) учитывает колебания по высоте рабочей камеры и полости ротора, и это является основным отличием данного метода расчета собственных чисел (собственных частот) рабочей камеры и полости ротора. В общем случае, высота рабочей камеры может быть не равна высоте полости ротора. Это два независимых размера.

Перепишем уравнение (3.3.14) в виде

$$Y_1(x_n) I_1(\lambda x_n) - Y_1(\lambda x_n) I_1(x_n) = 0, \quad (3.3.15)$$

где $x_n = K_{0n} (R_p + l_c)$; $\lambda = R_k / (R_p + l_c)$; Y_1 – функция Неймана.

Используя таблицы корней некоторых выражений, содержащих функции Бесселя и Неймана [49], находим n -ый положительный корень x_n , отсюда

$$K_{0n} = x_n / (R_p + l_c).$$

K_{mn} определяется из уравнения

$$I'_m(\lambda x_{mn}) Y'_m(x_{mn}) - I'_m(x_{mn}) Y'_m(\lambda x_{mn}) = 0. \quad (3.3.16)$$

Полный резонансный режим работы ПАРТ будет наблюдаться при выполнении условий

$$\frac{\omega z_p z_c}{Dc} = \sqrt{K_{mn}^2 + \left(\frac{\pi p}{h_k}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\alpha_{mn}}{(R_p - l_p)}\right)^2 + \left(\frac{\pi p}{h_p}\right)^2}, \quad (3.3.17)$$

где z_p, z_c – числа каналов в роторе и статоре; ω – угловая скорость ротора, c^{-1} ; D – наибольший общий делитель z_p, z_c .

Неполный резонанс будет выполняться при соблюдении первого равенства в уравнении (3.3.17).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 3

1. Балабышко А. М., Зимин А. И., Ружицкий В. П. Гидромеханическое диспергирование. М.: Наука, 1998. С. 331.
2. Оборудование для получения и обработки высоковязких дисперсных сред / Б. И. Басок, А. П. Гартвич, А. Р. Коба и др. // Пром. теплотехника, 1996. Т. 18. № 1. С. 50 - 56.
3. Перник А. Д. Проблемы кавитации. Л.: Судостроение, 1966. 439 с.
4. Пирсол И. Кавитация. М.: Мир, 1975. 95 с.
5. Рождественский В. В. Кавитация. Л.: Судостроение, 1977. 248 с.
6. Левковский Ю. Л. Структура кавитационных течений. Л.: Судостроение, 1977. 248 с.
7. Арзуманов З. С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. М.: Энергия, 1978. 303 с.
8. Буйвол В. Н. Тонкие каверны в течениях с возмущениями. К.: Наукова думка, 1980. 296 с.
9. Терентьев А. Г. Математические вопросы кавитации: Учебное пособие. Чебоксары: Изд-во Чувашского гос. ун-та, 1981. 132 с.
10. Исследования по развитой кавитации: Сб. науч. тр. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1976. 144 с.
11. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. М.: Мир, 1974. 668 с.
12. Федоткин И. М., Немчин А. Ф. Использование кавитации в технологических процессах. Киев: Вища шк., 1984. 68 с.
13. Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкостях. В кн.: Физическая акустика / Под ред. У. Мезона. М.: Мир, 1967. Т. 1. Ч.Б. С. 7 - 138.
14. Шутилов В. А. Основы физики ультразвука: Учебное пособие. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. 280 с.
15. Young F. R. Cavitation. London: McGraw-Hill, 1989.
16. Leighton T. G. The Acoustic bubble. - London: Academic, 1994.
17. Apfel R. E. Sonic effervescence: A tutorial on acoustic cavitation // J. Acoust. Soc. Am.. 1997. V.101. № 3. P. 1227 - 1237.

18. *Сиротюк М. Г.* Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации. В кн.: Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л. Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. Ч. 5. С. 168 - 220.
19. *Акуличев В. А.* Кавитация в криогенных и кипящих жидкостях. М.: Наука, 1978. 220 с.
20. *Основы физики и техники ультразвука: Учебное пособие для вузов / Б. А. Агранат, М. Н. Дубровин, Н. Н. Хавский и др.* М.: Высш. шк., 1987. 352 с.
21. *Юдаев В. Ф.* Гидромеханические процессы в роторных аппаратах с модуляцией проходного сечения потока обрабатываемой среды // Теор. основы хим. технол. 1994. Т. 28. № 6. С. 581 - 590.
22. *Розенберг Л. Д.* Кавитационная область. В кн.: Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л. Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. Ч. 6. С. 221 - 266.
23. *Бергман Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Иностран. лит-ра, 1957. 726 с.
24. *Маргулис М. А.* Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях): Учебное пособие для хим. и хим.-технол. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1984. 272 с.
25. *Маргулис М. А.* Звукохимические реакции и сонолюминисценция. М.: Химия, 1986. 288 с.
26. *The acoustic emission from single-bubble sonoluminescence / T. J. Matula, I. M. Hallaj, R. O. Cleveland et al. // J. Acoust. Soc. Am., 1998. V. 103. № 3. P. 1377 - 1382.*
27. *Новицкий Б. Г.* Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. М.: Химия, 1983. 192 с.
28. *Бронин Ф. А., Чернов А. П.* Удаление заусенцев и диспергирование порошковых материалов при воздействии ультразвука. М.: Машиностроение, 1978. 55 с.
29. *Козырев С. П.* Гидроабразивный износ металлов при кавитации. М.: Машиностроение, 1971. 240 с.
30. *Кедринский В. К., Бесов А. С., Гутник И. Э.* Инверсия двухфазного состояния жидкости при импульсном нагружении // Доклады АН РФ. 1997. Т. 352. № 4. С. 477 - 479.
31. *K. Heinrich Kuttruff.* Pressure-induced interaction between bubbles in cavitation field // J. Acoust. Soc. Am. 1999. V. 106. № 1. P. 190 - 194.
32. *Харкевич А. А.* Избранные труды. Линейные и нелинейные системы. М.: Наука, 1973. Т. 2. 566 с.
33. *О гидромеханических автоколебательных явлениях / А. А. Барам, О. А. Лошакова, В. Б. Коган, Б. А. Клоцунг // Теор. основы хим. технол. 1982. Т. 16. № 1. С. 132 - 135.*
34. *Звездин А. К.* Использование аппаратов типа РАМП для получения высокодисперсных эмульсий в режиме акустической кавитации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МИХМ, 1983. 16 с.
35. *Зимин А. И.* Нестационарная гидромеханика прерывистых течений. М.: Фолиант, 1997. 308 с.
36. *Зимин А. И., Юдаев В. Ф.* Абсорбция диоксида углерода водой в роторном аппарате с модуляцией потока // Теор. основы хим. технол. 1989, Т. 23. № 5. С. 673 - 676.
37. *Зотов Б. Н.* Вибрация на лопаточных частотах в центробежных насосах с одинаковым числом лопастей колеса и лопаток отвода // Лопастные насосы: Сб. науч. тр. Л., 1975. С. 267 - 271.

38. Римский-Корсаков А. В., Баженов Д. В., Баженова Л. А. Физические основы образования звука в воздуходушных машинах. М.: Наука, 1988. 173 с.
39. Юдаев В. Ф., Кокорев Д. Т., Сопин А. И. К вопросу о расчете геометрических параметров аппаратов типа гидромеханической сирены // Изв. вузов. Машиностроение. 1972. № 6. С. 80 - 85.
40. Островский Г. М., Малышев П. А., Аксенова Е. Г. О работе пульсационных аппаратов в резонансном режиме // Теор. основы хим. технол. 1990. Т. 24. № 6. С. 835 - 839.
41. Сопин А. И. Исследование параметров гидродинамической сирены с целью получения высокодисперсных гетерогенных систем: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МИХМ, 1975. 16 с.
42. Червяков В. М. Растворение твердого в жидкости и диспергирование жидкостей в длинноканальном роторном аппарате с модуляцией потока: Дис. ... канд. техн. наук. М.: МИХМ, 1982. 169 с.
43. О механизме генерирования пульсаций давления в роторно-пульсационных аппаратах / Т. И. Евстигнеева, В. Н. Колесник, Ю. С. Кравченко, М. М. Ходыкер // Пром. теплотехника. 1991. Т. 13. № 2. С. 63 - 67.
44. Зимин А. И., Звездин А. К., Юдаев В. Ф. Оптимальные соотношения геометрических и кинематических параметров аппаратов типа гидромеханической сирены // Совершенствование конструкций машин и аппаратов химических производств: Межвуз. сб. науч. тр. М.: МИХМ, 1982. С. 47 - 50.
45. Зимин А. И., Звездин А. К. Оптимизация конструктивных параметров и режимов работы роторно-пульсационных устройств // Оптимальное проектирование в задачах химического машиностроения: Межвуз. сб. науч. тр. М.: МИХМ, 1983. С. 31 - 34.
46. Зимин А. И., Ружицкий В. П., Старцев В. Н. Анализ резонансного режима работы роторного гидромеханического диспергатора // Горная техника на пороге XXI века / Тез. докл. межд. симп. М.: МГГУ, 1996. С. 248-249.
47. Лепендин А. Ф. Акустика: Учеб. пособ. для вузов. М.: Высшая школа, 1978. 448 с.
48. Promtov M. A., Kuleshov Yu.V. The use of resonant phenomena for effectiveness of acoustic technological apparatuses // Transactions TSTU. 1999. V. 5. № 1. P. 90 - 94.
49. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. М. Стигана. М.: Наука, 1978. 832 с.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

В ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТАХ РОТОРНОГО ТИПА

ПАРТ предназначены для интенсификации ХТП, но, естественно, не для всех, а только для определенной группы процессов. Учитывая то, что основное воздействие на обрабатываемую среду происходит за счет гидроакустических и гидромеханических факторов, основной фазой должна быть жидкость. Следовательно, ХТП реализуемые в ПАРТ относятся к классу гетерогенных процессов и подразделяются на группы: "жидкость - жидкость"; "жидкость - твердое тело"; "жидкость - газ". ПАРТ наиболее эффективен для таких

процессов, как эмульгирование, экстракция, растворение, диспергирование и гомогенизация. В этой главе разрабатывается метод расчета указанных процессов на основе энергетического подхода.

4.1. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТАХ РОТОРНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Интенсификация процессов переноса обычно сводится к увеличению одного или нескольких параметров, обозначенных в линейном дифференциальном уравнении: $dM = kSFdt$, где F - движущая сила процесса; S - единица площади или объема; k - коэффициент скорости технологического процесса; t - время; M - количество перенесенного вещества или энергии. Однозначно можно сказать, что увеличение времени процесса, площади поверхности переноса является экстенсивным методом. Для повышения интенсивности за счет рационального распределения энергии на организацию процесса необходимо увеличивать параметры k и F . Тем не менее, увеличение площади поверхности S для ряда процессов может служить основным критерием, характеризующим интенсивность процесса. Это характерно для таких процессов, как эмульгирование и диспергирование. Увеличение параметров k и F требует увеличения кинетической энергии для создания больших скоростей относительного движения фаз и уменьшения времени обновления межфазной поверхности. Это подтверждается различными гипотезами и моделями теплопереноса: межфазной турбулентности Кафарова; многослойной Левича; пленочной Нерста и Льюнгмюра; пенетрационной Хигби, Данкверста и Кишиневского; пленочно-пенетрационной Тура-Марчелло и Рукенштейна [1 - 3].

Увеличение кинетической энергии потока жидкости возможно за счет увеличения разности скоростных напоров на характерных участках аппарата, создания интенсивной турбулентности и т.п. Этот способ требует больших затрат энергии, что повышает энергоемкость аппарата и снижает его К.П.Д. Другой способ заключается в увеличении мощности за счет уменьшения времени трансформации энергии в аппарате. Чем меньше время воздействия на жидкую гетерогенную среду определенного количества энергии, тем больше мощности вкладывается в определенный объем жидкости, т.е., повышается удельная мощность аппарата. Наиболее эффективен ввод энергии в виде короткого, мощного импульса. Импульсный ввод энергии существенно интенсифицирует процессы диспергирования и эмульгирования, так как процесс дробления частиц является единичным актом, для которого требуется мощное воздействие за малый промежуток времени.

Для увеличения степени интенсификации, процесс трансформации энергии необходимо реализовать не только во времени, но и в определенном объеме. Наиболее эффективно импульсное воздействие непосредственно в ограниченном пространстве около частицы гетерогенной жидкости. Для этого необходимо создавать большое число активных зон, в которых происходит импульсное воздействие на частицу. Такая организация процесса минимизирует непродуктивные затраты энергии на весь объем аппарата.

Способ повышения интенсивности химико-технологических процессов и повышение эффективности аппаратов за счет дискретизации энергии во времени и в пространстве назван принципом дискретно-импульсного ввода энергии (ДИВЭ) [3 - 6]. Такой подход предполагает, что диссипация вводимой энергии должна происходить преимущественно в окрестности дисперсной частицы за короткий промежуток времени, а факторы, способствующие потерям энергии вне этих зон, должны быть по возможности устранены.

Разработчики принципа ДИВЭ в качестве основного реализующего фактора рассматривают механизмы трансформации энергии большим количеством парогазовых пузырьков [7, 8]. Парогазовые пузырьки возникают за счет различных механизмов: кавитации, взрывного вскипания жидкости, барботирования острого пара через холодную

жидкость. Парогазовые пузырьки служат трансформаторами аккумулированной в системе потенциальной энергии в кинетическую энергию радиального движения жидкости в зоне каждого пузырька. За короткий промежуток времени происходит выделение мощного импульса энергии, который реализуется в форме ударной сферической волны, генерируемой пузырьком, в виде кумулятивной струйки, возникающей при схлопывании пузырька, высоких градиентов скорости микропотоков жидкости около пульсирующих пузырьков.

Авторы рассматриваемого принципа считают, что ДИВЭ реализуется в ПАРТ в виде кавитационных эффектов и за счет больших сдвиговых напряжений в зазоре между ротором и статором [5, 6]. Пульсации давления и скорости потока рассматриваются как известный, тривиальный метод интенсификации процессов в рамках теории локально-изотропной турбулентности.

Такой подход не может считаться полностью обоснованным, так как в самом принципе ДИВЭ заложен механизм неоднократно повторяющегося разгонно-тормозного движения, т.е. периодически пульсационного [3, 9]. Необходимо расширить область реализации принципа ДИВЭ, так как возможно интенсивное направленное пульсационное воздействие в локальных объемах жидкости или газа и в более крупных масштабах, нежели пузырьковые механизмы.

Импульсный подвод энергии в ограниченном объеме также интенсифицирует многие химико-технологические процессы и в отсутствие кавитации. Кавитационные эффекты характеризуют более высокий качественный уровень пульсационной организации процесса движения жидкости. Интенсификация технологических процессов обусловлена не только преобладающим интенсифицирующим фактором, а всей совокупностью факторов воздействия на жидкую гетерогенную среду.

ПАРТ представляет собой простую механическую конструкцию, но при его работе наблюдаются сложные многокомпонентные гидродинамические и акустические эффекты. Жидкая гетерогенная среда подвергается многофакторному воздействию, заключающемуся в пульсациях давления и скорости потока, микропульсациях кавитационных пузырьков с излучением сферических ударных волн, жестком кумулятивном воздействии за счет схлопывания кавитационных пузырьков, больших сдвиговых напряжений в зазоре между ротором и статором. Рассмотрим каждый из этих механизмов интенсификации технологических процессов в ПАРТ по отдельности.

В отсутствие кавитации основное воздействие на жидкую гетерогенную среду происходит за счет турбулентных пульсаций скорости в потоке жидкости при ее импульсном вводе в канал статора. Величину элементарного объема жидкости, введенного в канал статора за время совмещения канала ротора с каналом статора, можно рассчитать, как

$$v_0 = S_c \int_0^{t_1} V(t) dt, \quad (4.1.1)$$

где $S_c = a_c h_c$; $t_1 = (a_p + a_c) / \omega R_p$.

Энергия импульса давления, генерируемого в канал статора, определяется по формуле

$$E_{и} = \frac{1}{\rho c} \iint P^2(t) dS dt, \quad (4.1.2)$$

где c - скорость звука в жидкости, м/с; ρ - плотность жидкости, кг/м³; $P(t)$ - мгновенное значение давления, генерируемого прерывателем аппарата с площадью сечения канала статора S_c .

С учетом того, что S_c является постоянной величиной, уравнение (4.1.2) можно записать как

$$E_{и} = \frac{S_c}{\rho c} \int_0^{t_1} P^2(t) dt. \quad (4.1.3)$$

Мгновенное значение импульсного давления определяется из выражения

$$P(t) = \rho \sqrt{\frac{S_c}{2\pi}} \frac{dV}{dt}, \quad (4.1.4)$$

где $V(t)$ - среднерасходная скорость жидкости через канал статора, м/с.
Подставляя правую часть формулы (4.1.4) в выражение (4.1.3), получим

$$E_{и} = \frac{\rho S_c^2}{2\pi c} \int_0^{t_1} \left(\frac{dV}{dt} \right)^2 dt. \quad (4.1.5)$$

Мощность импульса давления, генерируемого в канал статора, запишем в виде

$$N_{и} = \frac{E_{и}}{t_0} = \frac{\rho S_c^2}{2\pi c t_0} \int_0^{t_1} \left(\frac{dV}{dt} \right)^2 dt. \quad (4.1.6)$$

Удельную энергию импульса давления рассчитаем по формуле

$$\varepsilon_{и} = \frac{N_{и}}{v_0 \rho} = \frac{S_c^2}{2\pi c t_0 v_0} \int_0^{t_1} \left(\frac{dV}{dt} \right)^2 dt. \quad (4.1.7)$$

При возникновении кавитации в канале статора, интенсификация технологических процессов осуществляется также за счет пульсаций и схлопывания кавитационных пузырьков. При пульсациях кавитационных пузырьков образуются ударные сферические волны.

Энергия, сообщенная окружающей жидкости кавитационным пузырьком, определяется в виде

$$E_{п1} = 4\pi P_k (R_{\max}^3 - R_0^3) / 3. \quad (4.1.8)$$

Суммарная энергия, сообщенная элементарному объему жидкости всеми кавитационными пузырьками, есть

$$E_{п} = n_k E_{п1}, \quad (4.1.9)$$

где n_k - количество кавитационных пузырьков.

Число кавитационных пузырьков определяем как отношение объема кавитационного кластера к объему кавитационного пузырька:

$$n_k = 3v_k / (4\pi R_{\max}^3). \quad (4.1.10)$$

Время захлопывания кавитационного пузырька определим по формуле Рэлея без учета вязкости и сжимаемости пара и газа в пузырьке:

$$t_3 = 0,915 R_{\max} \sqrt{\rho / P_k}, \quad (4.1.11)$$

где P_k - давление в канале статора, принимаемое равным давлению в рабочей камере, Па.

Суммарная энергия, сообщенная жидкости всеми кавитационными пузырьками с учетом количества пульсаций, определяется в виде

$$E_{\Pi} = n_{\kappa} E_{\Pi 1} .$$

Переходя к мощности, запишем:

$$N_{\Pi} = n_{\kappa} E_{\Pi 1} / t_3 . \quad (4.1.12)$$

Диссипацию мощности в элементарном объеме определим как

$$\varepsilon_{\Pi} = N_{\Pi} / v_0 \rho = \frac{E_{\Pi 1} n_{\kappa}}{t_3 v_0 \rho} = \frac{3 E_{\Pi 1} v_{\kappa}}{4 t_3 \rho \pi R_{\max}^3 v_0} . \quad (4.1.13)$$

Учитывая, что отношение объема кавитационного кластера v_{κ} к объему, введенному в канал статора v_0 , есть индекс кавитации K , запишем:

$$\varepsilon_{\Pi} = \frac{3 E_{\Pi 1} K}{4 t_3 \rho \pi R_{\max}^3} . \quad (4.1.14)$$

Или, с учетом ранее полученных соотношений

$$\varepsilon_{\Pi} = \frac{P_{\kappa} K}{t_3 \rho} \left(1 - \frac{R_0^3}{R_{\max}^3} \right) . \quad (4.1.15)$$

Сферическая ударная волна, генерируемая пузырьком, быстро затухает при распространении в жидкости. Давление в ударной волне в зависимости от расстояния, подчиняется зависимости вида

$$P = P_i R / r , \quad (4.1.16)$$

где P_i - ударное давление на поверхности пузырька, Па; r - расстояние, на которое распространяется волна, м; R - текущий радиус пузырька.

Возьмем за текущий радиус пузырька величину R_0 , когда ударное давление максимально, и будем считать, что давление ударной волны существенно уменьшится на расстоянии $r = R_{\max}$. Тогда коэффициент затухания ударной волны будет иметь величину (R_0 / R_{\max}) . С учетом того, что энергия пропорциональна квадрату давления, коэффициент ослабления энергии будет иметь величину $(R_0 / R_{\max})^2$. С учетом этого предположения формула (4.1.15) примет вид

$$\varepsilon_{\Pi} = \frac{P_{\kappa} K}{t_3 \rho} \left(1 - \frac{R_0^3}{R_{\max}^3} \right) \left(\frac{R_0}{R_{\max}} \right)^2 . \quad (4.1.17)$$

За время своего жизненного цикла кавитационный пузырек может совершить несколько пульсаций. Последняя пульсация заканчивается схлопыванием кавитационного пузырька. Это происходит потому, что в начале нового цикла генерирования импульса давления в канал статора, давление в канале возрастает и вызывает схлопывание пузырька. При схлопывании кавитационного пузырька образуется высокоскоростная кумулятивная струйка, которая действует на окружающие частицы жидкости как твердое тело. Кинетическую энергию единичной кумулятивной струйки можно записать в виде

$$E_{\text{кл}} = m_{\text{кл}} V_{\text{кл}}^2 / 2 , \quad (4.1.18)$$

где $m_{kl} = \rho v_{kl}$ - масса кумулятивной струйки, кг; V_{kl} - скорость кумулятивной струйки, м/с.

Объем кумулятивной струйки определим как

$$v_{kl} = l_{kl} \pi D_{kl}^2 / 4, \quad (4.1.19)$$

где D_{kl} , l_{kl} - диаметр и длина кумулятивной струйки, м.

Диаметр и длину кумулятивной струйки запишем, согласно рекомендациям [10, 11]:

$$D_{kl} = 0,092 R_{\max}; \quad l_{kl} = 0,116 R_{\max}$$

Таким образом, выражение для определения мощности единичной кумулятивной струйки записывается в виде:

$$N_{kl} = \frac{E_{kl}}{t_3} = \frac{m_{kl} V_{kl}^2}{2 \cdot 0,915 R_{\max} \sqrt{\rho/P_k}}. \quad (4.1.20)$$

Число кумулятивных струек в кавитационной области принимаем равным числу кавитационных пузырьков. Мощность всех кумулятивных струек в кавитационном кластере определим как:

$$N_k = N_{kl} n = \frac{10^{-4} \rho V_k^2 D_k^3 v_k}{R_{\max}^4 \sqrt{\rho/P_k}}. \quad (4.1.21)$$

Диссипацию мощности кумулятивных струек во введенном объеме v_0 определим по формуле:

$$\varepsilon_k = \frac{N_k}{\rho v_0} = \frac{10^{-4} V_k^2 D_k^3 v_k}{R_{\max}^4 \sqrt{\rho/P_k} v_0}. \quad (4.1.22)$$

Скорость кумулятивной струйки найдем как

$$V_k = k V_3, \quad (4.1.23)$$

где $V_3 = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\left(\frac{R_{\max}}{R_0} \right)^3 - 1 \right) \frac{P_k}{\rho}}$ - скорость захлопывания кавитационной полости, м/с; k -

энергетический коэффициент, $k \approx 4$, [10].

Наибольшей трудностью является определение максимального и начального радиуса кавитационного пузырька в момент наибольшего расширения и захлопывания. Согласно [12], при импульсных растягивающих напряжениях в жидкости зародыши кавитации начинают расти, образуя кавитационный кластер, форма и длина которого определяется начальным спектром размеров кавитационных зародышей, характером прикладываемого напряжения и граничными условиями. Все зародыши достигают максимального размера одновременно, и среда может считаться монодисперсной, содержащей пузырьки только одного размера.

Максимальный и минимальный радиусы кавитационного пузырька определяются по уравнению (3.1.12). Анализ решения уравнения показывает, что отношение (R_{\max}/R_0)

находится в пределах 3 - 6, что подтверждается экспериментальными данными [13 - 15], согласно которым конечный радиус кавитационного пузырька всего в 3 - 5 раз меньше исходного. С учетом этого и других допущений, и учитывая, что $K = v_k/v_0$, запишем:

$$\varepsilon_k = 0,028 \frac{P_k K}{R_{\max} \rho \sqrt{\rho/P_k}} \quad (4.1.24)$$

При малой величине зазора, транзитный расход жидкости через зазор невелик, и им можно пренебречь. При большой величине зазора между ротором и статором перепад давления небольшой, транзитный расход жидкости существенен, а интенсивность кавитации мала. В этом случае определенная часть жидкости подвергается обработке в зазоре между ротором и статором за счет больших сдвиговых напряжений. Мощность, которая расходуется на преодоление вязких сил трения при вращении ротора, определяется в соответствии с формулой (2.1.38)

$$N_3 = \frac{2a}{a+b} N_1 + \frac{b-a}{a+b} (N_I + N_{II} + N_{III} + N_{IV}),$$

$$\text{где } N_1 = (b-a)zh\mu \int_0^\delta \left(\frac{\partial V_{\omega R}}{\partial y} \right)^2 dy; \quad V_{\omega R} = \omega R_p \left(0,5 - 0,3831g \frac{y/\delta}{1-y/\delta} \right);$$

$$N_I + N_{III} = \frac{1}{2} \rho V a h \omega^2 R_p^2; \quad V_{II} = V_{\omega R} - V_{\Delta P}; \quad V_{IV} = V_{\omega R} + V_{\Delta P};$$

$$V_{\Delta P} = \frac{\Delta P}{2\mu} \delta^2 \left(\frac{y}{\delta} - \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 \right);$$

$$N_{II} + N_{IV} = S\mu \left(\int_0^\delta \left(\frac{\partial V_{II}}{\partial y} \right)^2 dy + \int_0^\delta \left(\frac{\partial V_{IV}}{\partial y} \right)^2 dy \right);$$

$$S = \frac{1}{2} (b_p - a_p) z_p h; \quad V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho \xi_{\max}}}.$$

Диссипация мощности в зазоре определяется по формуле

$$\varepsilon_3 = N_3 / (\rho v_3), \quad (4.1.25)$$

где $v_3 = 2\pi R_3 h_3 \delta$ - объем зазора между ротором и статором, м³; $R_3 = R_p + \delta/2$ - средний радиус зазора, м; h_3 - высота поверхностей, образующих зазор, м.

Суммарные удельные энергозатраты при обработке жидкости в активных зонах ПАРТ определяются по формуле

$$\varepsilon = \varepsilon_{II} + \varepsilon_k + \varepsilon_{II} + \gamma \varepsilon_3, \quad (4.1.26)$$

где γ - коэффициент, учитывающий соотношение транзитного расхода жидкости через зазор и расхода жидкости через каналы ротора и статора непосредственно.

Коэффициент γ можно рассчитать следующим образом. Расход жидкости, проходящей только через каналы ротора и статора, определяем как

$$Q_0 = v_0 z_c f, \quad (4.1.27)$$

где f - частота совмещения каналов ротора с каналом статора, с⁻¹.

Тогда расход жидкости, протекающей через зазор между ротором и статором, найдем как

$$Q_3 = Q - Q_0, \quad (4.1.28)$$

где Q – общий расход через аппарат, м³/с.

Коэффициент γ определим в виде

$$\gamma = \frac{Q_3}{Q_0} = \frac{Q - Q_0}{Q_0} = \frac{Q}{Q_0} - 1 = \frac{Q}{v_0 z_c f} - 1. \quad (4.1.29)$$

В рассматриваемой модели принимается, что основные механизмы диссипации энергии в объеме жидкости трансформируют ее на интенсификацию технологического процесса. В действительности, часть энергии переходит в тепло и другие виды потерь энергии. В связи с этим в формуле (4.1.26) необходимо перед каждым слагаемым ввести коэффициенты, учитывающие эффективные затраты каждого вида удельной энергии на интенсификацию технологического процесса:

$$\varepsilon = k_{\Pi} \varepsilon_{\Pi} + k_K \varepsilon_K + k_{\text{И}} \varepsilon_{\text{И}} + k_N \varepsilon_3 \gamma. \quad (4.1.30)$$

Величина каждого коэффициента зависит как от типа химико-технологического процесса, так и от степени эффективности трансформации энергии в полезную работу. Аналитическое определение величин коэффициентов k_{Π} , k_K , $k_{\text{И}}$ и k_N проблематично, и наиболее правильным методом определения этих коэффициентов будут экспериментальные исследования.

Исходя из их физического смысла, можно заключить, что границы изменения этих коэффициентов лежат в пределах от 0 до 1. Соотношения коэффициентов между собой должны иметь вид $k_{\text{И}} \geq k_N \geq k_{\Pi} \geq k_K$.

Соотношения коэффициентов установлены из следующих соображений. Первичным интенсифицирующим фактором технологических процессов в ПАРТ является дискретно-импульсный ввод потока жидкости в канал статора. Импульсная (разгонно-тормозная) организация течения потока жидкости является базовой формой для развития в последующем кавитационных эффектов. От амплитуды, формы колебаний, скорости и давления в потоке жидкости зависит степень развитости кавитации и турбулентности. Кавитационных образований может и не быть или они будут слабо развиты и не смогут внести существенный вклад в усиление интенсифицирующих факторов - увеличение относительной скорости движения фаз, развитие межфазной поверхности.

При малом зазоре между ротором и статором влияние больших сдвиговых напряжений и касательных градиентов скорости оказывает не меньшее влияние на интенсификацию химико-технологических процессов, чем пульсации давления и скорости потока и кавитационные эффекты в канале статора, а может быть и даже в большей степени. Влияние коэффициента k_N ослабевает в связи с тем, что поток жидкости через зазор мал и чем меньше зазор, тем слабее в нем турбулентность потока. С другой стороны уменьшение зазора приводит к резкому возрастанию амплитуды пульсаций в прерывателе аппарата и, соответственно, качественному переходу в факторах воздействия - к развитой кавитации.

В то же время, несмотря на существенную энергетическую составляющую кавитационных эффектов, их влияние строго локализовано ближайшими к пузырьку слоями жидкости. При удалении от поверхности пузырька пульсационные эффекты резко ослабевают, ударная волна быстро затухает. Кумулятивные струйки при схлопывании

пузырька возникают не всегда, а если возникают, то их направленность и сконцентрированность ориентированы хаотично, коэффициент полезного действия невысок. Для того, чтобы кавитационный фактор существенно воздействовал на интенсификацию химико-технологических процессов, необходима обширная кавитационная область, через которую будет проходить весь поток обрабатываемой жидкости.

На суммарное значение диссипации энергии в канале статора и в зазоре между ротором и статором будут влиять не только коэффициенты k_n , k_N , k_n , k_k , но и характер зависимостей каждого вида удельной энергии от геометрических и режимных параметров ПАРТ. Графики зависимостей удельных энергий от каждого фактора воздействия при изменении основного управляющего параметра интенсивностью воздействия - относительной скоростью движения рабочих поверхностей ротора и статора ωR_p и, соответственно, каналов ротора относительно каналов статора показаны на рис. 4.1.1. - 4.1.4.. Линейная скорость относительного движения ротора и статора является тем параметром, изменение которого существенным образом сказывается на каждом факторе воздействия и диссипации энергии. Кроме линейной скорости относительного движения поверхностей ωR_p при расчете изменялись параметры, которые также существенно влияют на величину удельной энергии в рабочем объеме.

К таким параметрам относятся: ΔP - статический перепад давления; P_k - давление в камере; R_{\max} - максимальный радиус кавитационных пузырьков; δ - зазор между ротором и статором. Удельная энергия импульсного воздействия потока жидкости ϵ_n изменяется по параболической зависимости при изменении ωR_p , вид этой зависимости не меняется от увеличения статического перепада давления ΔP . При увеличении параметра ΔP происходит увеличение степени $n > 1$ в уравнении $\epsilon_n = f(\omega R_p)^n$, но не существенным образом. Это происходит потому, что существенное влияние на амплитуду импульса давления оказывает центробежное давление, которое возрастает квадратично при увеличении угловой скорости и радиуса ротора.

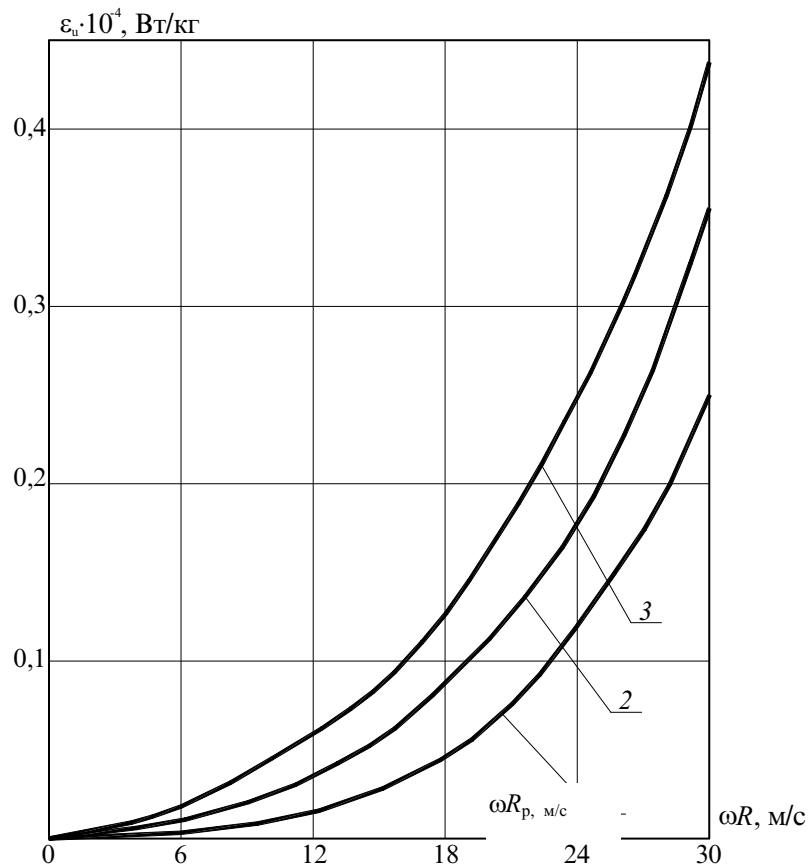


Рис. 4.1.1. График зависимости удельной энергии импульса объема жидкости, введенного в канал статора за время совмещения его с каналом ротора от скорости совмещения: 1 – $\Delta P_{ст} = 20$ кПа; 2 – $\Delta P_{ст} = 40$ кПа; 3 – $\Delta P_{ст} = 60$ кПа

Плотность кавитационной энергии в канале статора характеризует индекс кавитации K . Поэтому удельная пульсационная энергия и удельная кумулятивная энергия изменяются в соответствии с характером зависимости индекса кавитации от линейной скорости совмещения каналов ротора с каналом статора. Графики зависимостей $\varepsilon_{п}$ и $\varepsilon_{к}$ от ωR_p показывают резкое приращение удельной энергии в канале статора, когда параметр ωR_p принимает некоторое критическое значение, после которого происходят качественные изменения в потоке жидкости, т.е. происходит резкое увеличение числа кавитационных пузырьков. Графики на рис. 4.1.2. и 4.1.3 показывают, что кавитационная энергия проявляется только при $\omega R_p \approx 10$ м/с и более. В реальности, кавитационные образования и энергия, которую они сообщают окружающей жидкости существуют при $\omega R_p < 10$ м/с.

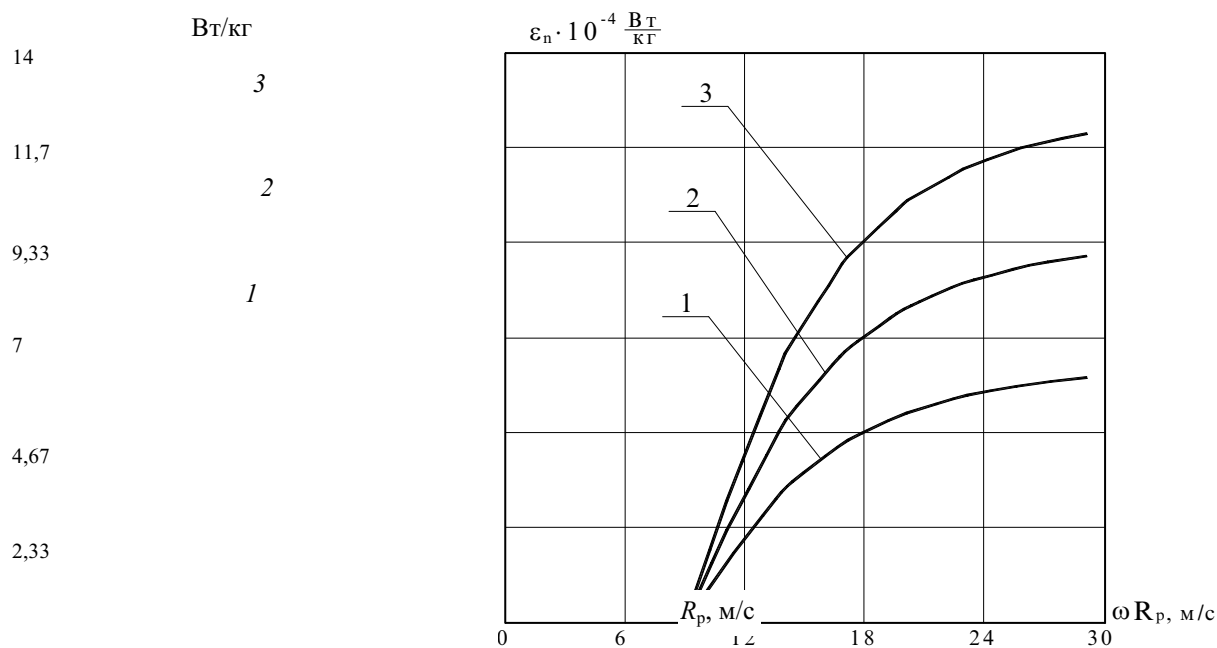


РИС. 4.1.2. ГРАФИКИ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ, РАСХОДУЕМОЙ КАВИТАЦИОННЫМ КЛАСТЕРОМ В ЭЛЕМЕНТАРНОМ ОБЪЕМЕ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ СТАТОРА ОТ СКОРОСТИ СОВМЕЩЕНИЯ КАНАЛОВ РОТОРА С КАНАЛАМИ СТАТОРА:

$$1 - P_k = 0,5 \cdot 10^5 \text{ Па} ; 2 - P_k = 0,75 \cdot 10^5 \text{ Па} ; 3 - P_k = 1 \cdot 10^5 \text{ Па} .$$

$$\Delta P = 0,5 \cdot 10^5 \text{ Па}, l = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}, R_{\max} = 5 \cdot 10^{-4}$$

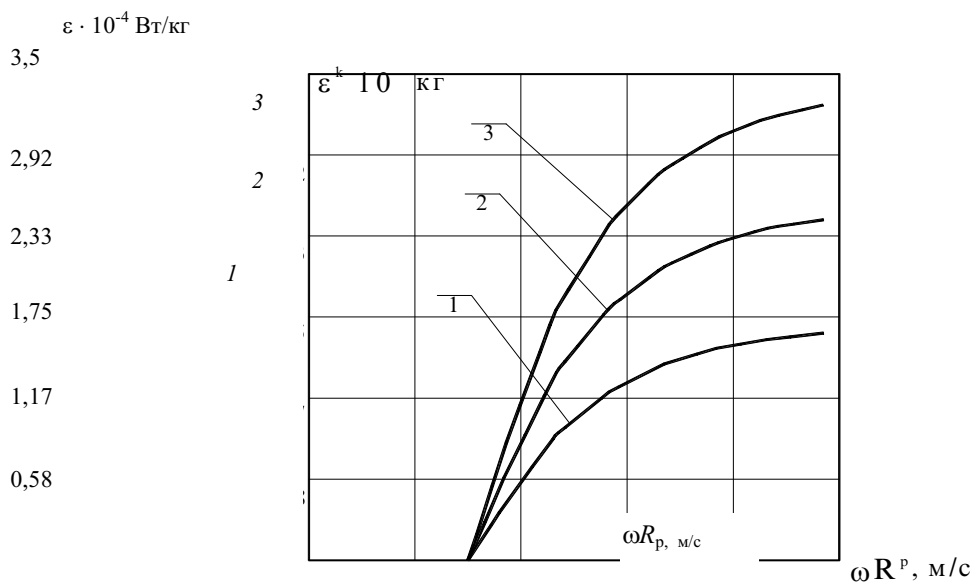


Рис. 4.1.3. Графики зависимости удельной энергии, сообщаемой кумулятивными струйками кавитационного кластера элементарному объему жидкости в канале статора от скорости

совмещения каналов ротора с каналами статора: $1 - P_k = 0,5 \cdot 10^5$ Па ; $2 - P_k = 0,75 \cdot 10^5$ Па ;

$$3 - P_k = 1 \cdot 10^5 \text{ Па .}$$

$$\Delta P = 0,5 \cdot 10^5 \text{ Па, } l_c = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м, } R_{\max} = 5 \cdot 10^{-3}$$

Погрешности расчета при этих значениях просто превышают значения кавитационных составляющих удельной энергии и поэтому графики сливаются с осью абсцисс (рис. 4.1.4). Истинный вид кривых имеет S-образную форму.

Перепад давления слабо влияет на эту зависимость, основное влияние здесь оказывает величина зазора между ротором и статором. В то же время необходимо отметить, что уменьшение или увеличение величины зазора соответствующим образом изменяет величину гидравлического сопротивления прерывателя аппарата и, соответственно, изменяет перепад давления. Но перепад давления можно поддерживать постоянным, изменяя другие режимные и конструктивные параметры ПАРТ.

При приближении линейной скорости движения поверхности ротора к значению $\omega R_p \approx 30$ м/с, происходит "насыщение" кавитационной энергией объема жидкости в канале статора. Это происходит в связи с тем, что объем кавитационного кластера при больших ωR_p растет слабо, что и вызывает соответствующие уменьшение приращения индекса кавитации K и удельной кавитационной (пульсационной и кумулятивной) энергии.

Характер изменения диссипации энергии в зазоре между ротором и статором в зависимости от параметра ωR_p , обусловлен потерями на трение при относительном движении слоев жидкости в соответствии с моделью, рассмотренной в параграфе 2.1.

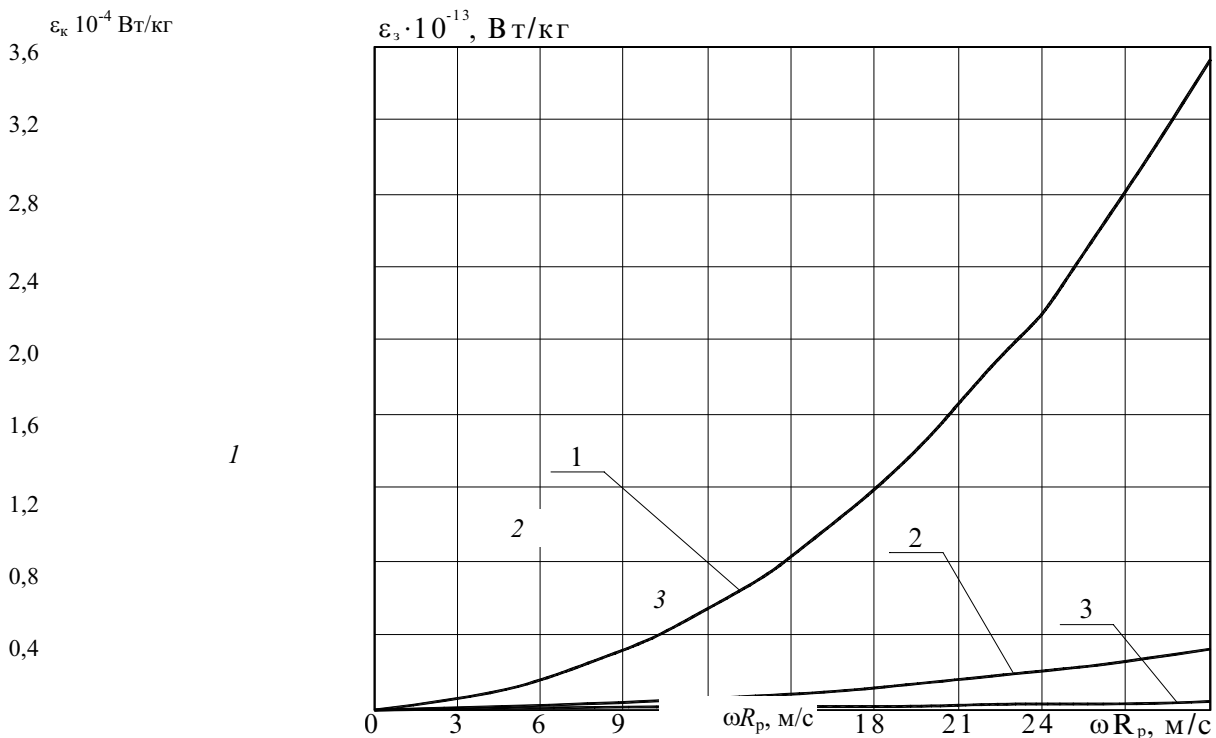


Рис. 4.1.4. График зависимости удельной энергии в зазоре между ротором и статором РИКА, $1 - \delta = 10^{-5}$ м, $2 - \delta = 10^{-4}$ м, $3 - \delta = 10^{-3}$ м, $\Delta P = 0,5 \cdot 10^5$ Па

4.2. ЭМУЛЬГИРОВАНИЕ В ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ РОТОРНОГО ТИПА

4.2.1. ЭМУЛЬГИРОВАНИЕ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ

При эмульгировании две несмешивающиеся жидкости должны быть определенным образом распределены одна в другой в виде капелек, устойчивых по отношению к коалесценции [16].

На одиночную каплю действуют два противоположных фактора [17]:

- 1) разность динамических напоров, деформирующих каплю;
- 2) поверхностное натяжение, которое проявляется в возникновении капиллярного давления $P_{\text{кап}}$, препятствующего деформации:

$$P_{\text{кап}} = 4\sigma / d, \quad (4.2.1)$$

где σ - поверхностное натяжение, Н/м; d - диаметр капли, м.

Разность динамических напоров $P_{\text{дин}}$ обуславливается [18, 19]:

- градиентом скорости сплошной фазы в окрестностях капли,

$$\Delta P_{\text{дин}} = \rho (\Delta V^2 / 2); \quad (4.2.2)$$

- колебанием самой капли,

$$\Delta P_{\text{дин}} = \rho_d (\Delta V^2 / 2). \quad (4.2.3)$$

Здесь ρ и ρ_d - плотность сплошной и дисперсной фаз, кг/м³; ΔV - разность в скорости между каплей и сплошной фазой, м/с.

Если $P_{\text{кап}} \geq \Delta P_{\text{дин}}$, то капля сохраняет сферическую форму, если $P_{\text{кап}} < \Delta P_{\text{дин}}$, то капля деформируется и приобретает форму эллипсоида вращения [17].

По Тейлору [16], механизм распада капли состоит в вытягивании капли и придании ей нитевидной формы. Когда эта нить разрывается, она образует ряд капель размером около 0,01 диаметра исходной капли. По данным авторов [17] соотношение диаметра исходной и произвольной капли или капель составляет от 10 : 1 до 2 : 1.

Разность динамических напоров, деформирующих каплю, сообщает капле кинетическую энергию

$$E_k = (\Delta V^2 / 2) \rho \pi d^3 / 6, \quad (4.2.4)$$

которой достаточно для увеличения площади поверхности капли на величину

$$\Delta S = E_k / \sigma = \rho \pi d^3 \Delta V^2 / 12 \sigma. \quad (4.2.5)$$

Для создания условий, необходимых для эмульгирования, т.е. разности динамических напоров, необходимо привести жидкость в состояние гидродинамической неустойчивости.

При движении двух жидкостей с разными скоростями относительно поверхности раздела, возникает неустойчивость, называемая неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца. Смещение жидкостей вызывается волнообразными возмущениями поверхности раздела, которое обусловлено кинетической энергией движения [20]. Неустойчивость Рэлея-Тейлора возникает на поверхности между двумя жидкостями, если поверхность испытывает ускорение от более легкой жидкости к более тяжелой. Одним из хорошо известных видов гидродинамической неустойчивости является переход от ламинарного течения к турбулентному, такой вид неустойчивости называется неустойчивостью Толмина-Шлихтинга [20]. Разности динамических напоров возникают вследствие мелкомасштабных пульсаций в турбулентном потоке. Учет взаимосвязи между определенными характеристиками этих пульсаций и интенсивностью эмульгирования осуществляется на основе выводов теории локально-изотропной турбулентности Колмогорова-Обухова. Для того, чтобы произошло дробление капли при каком-либо виде неустойчивости, необходимо, чтобы время действия неустойчивости превышало критическое время [21]:

$$t_{кр} = (d/\Delta V)(\rho/\rho_d)^{0,5}. \quad (4.2.6)$$

Развитое турбулентное течение жидкости характеризуется наложением на осредненный направленный поток случайных пульсаций скорости с переменными направлением и амплитудой. При однородной и изотропной турбулентной среде значение пульсаций скорости за достаточно большие промежутки времени равно нулю [18]. В связи с этим пульсационное движение масштаба $\lambda_0 < \lambda \ll \lambda_{max}$ характеризуется среднеквадратичным значением пульсационной скорости

$$\bar{V} = \sqrt{V_\lambda^2}. \quad (4.2.7)$$

Здесь λ - расстояние, на котором мгновенное значение скорости изменяется на величину V_λ ; λ_0, λ_{max} - критический и максимальный масштабы пульсаций.

В масштабах $\lambda > \lambda_0$ пульсационная скорость определяется известным законом "двух третей" Колмогорова-Обухова:

$$\bar{V}^2 \approx (\varepsilon \lambda)^{2/3}, \quad (4.2.8)$$

где ε - локальное значение энергии потока, Вт/кг.

Пульсационная скорость может рассматриваться как разность мгновенных значений скорости в точках, отстоящих одна от другой на расстоянии λ . Пульсации масштаба d будут создавать в противоположных точках поверхности капли разность динамических напоров

$$\Delta P_{дин} = \rho V_d^2 / 2. \quad (4.2.9)$$

Размер наибольших капель, устойчивых в турбулентном потоке удовлетворяет условию

$$\rho V^2 / 2 = 4\sigma / d. \quad (4.2.10)$$

Подставляя (4.2.8) в (4.2.10) и учитывая, что $d \approx \lambda$, получаем уравнение для расчета диаметра наибольших устойчивых капель в турбулентном потоке

$$d = k(\sigma/\rho)^{0,6} (\varepsilon)^{-0,4}, \quad (4.2.11)$$

где k - константа.

При акустическом эмульгировании процесс состоит из двух стадий [20, 22]. На первой стадии происходит образование крупных капель (порядка 30 - 70 мкм) во время разрыва поверхности раздела фаз поверхностными волнами. На второй стадии происходит разбивание крупных капель на мелкие под действием ударных волн, возникающих в момент схлопывания кавитационных пузырьков.

Эмульгирование акустической кавитацией, по мнению автора работ [23, 24], осуществляется за счет дробления капли в момент захлопывания кавитационного пузырька. В развитие этой гипотезы предлагается, что при захлопывании кавитационного пузырька вблизи или на границе раздела фаз, возникают высокоскоростные кумулятивные струи одной жидкости в другой, которые затем распадаются, образуя дисперсные частицы [25,26]. Наиболее вероятный диаметр образующихся капель эмульсии определится согласно теории распада струй:

$$d = (D_k / V_k)^{2/3} [4,5\pi\sigma/(\rho + \rho_d)]^{1/3}, \quad (4.2.12)$$

где D_k и V_k - диаметр и скорость кумулятивной струи.

Уравнение кинетики кавитационного эмульгирования имеет вид [20]:

$$d(vC)/dt = \alpha S - \beta v C^2, \quad (4.2.13)$$

где t - время, с; v - объем, м³; C - концентрация эмульсии; S - площадь межфазной поверхности, м²; α, β - константы.

Решение этого уравнения записывается в виде

$$C = C_{\text{п}} \operatorname{th}(bt); \quad C_{\text{п}} = (S\alpha/v\beta)^{0.5}; \quad b = (S\alpha\beta/v)^{0.5},$$

где $C_{\text{п}}$ - предельная концентрация.

Кроме формулы (4.2.12), учет влияния кавитации на диаметр образующихся капель при эмульгировании в распылительных форсунках предложен в работе [27]. Математическая модель, учитывающая вклад гидродинамической кавитации, представлена в критериальном виде. Для ПАРТ такая модель непригодна потому, что она основана на гидродинамической кавитации, а в ПАРТ кавитация импульсная акустическая.

4.2.2. МНОГОФАКТОРНОЕ ЭМУЛЬГИРОВАНИЕ В ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ РОТОРНОГО ТИПА

При эмульгировании несмешивающихся жидкостей в ПАРТ, обработка будет происходить под влиянием основных четырех факторов воздействия, которые были описаны в параграфе 4.1. В отсутствие кавитации основное воздействие на частицы эмульсии будет осуществляться за счет макротурбулентных пульсаций скорости в потоке жидкости при ее импульсном вводе в канал статора. При относительно большой величине зазора между ротором и статором часть гетерогенной жидкости будет подвергаться обработке в зазоре за счет больших сдвиговых напряжений при вращении ротора. Основное воздействие на эмульсию будут оказывать кавитационные пузырьки: ударные волны при пульсациях и выброс высокоскоростных кумулятивных струй при схлопывании. Все эти факторы воздействия вызывают большие градиенты скорости жидкости в локальных областях. Масштаб этих пульсаций соизмерим с масштабом турбулентных пульсаций скорости жидкости в потоке. На основании этой гипотезы расчет диаметра частиц эмульсии при ее обработке в ПАРТ будем производить в соответствии с уравнением теории локально-изотропной турбулентности (4.2.11):

$$d = k (\sigma/\rho)^{0.6} (\varepsilon)^{-0.4}, \quad (4.2.14)$$

где: $\varepsilon = k_{\text{п}}\varepsilon_{\text{п}} + k_{\text{и}}\varepsilon_{\text{и}} + k_{\text{к}}\varepsilon_{\text{к}}$ - суммарная величина диссипации энергии в элементарном объеме жидкости, вошедшем в канал статора за время совмещения канала ротора с каналом статора.

Составляющие суммарной величины диссипации мощности в элементарном объеме жидкости рассчитываются в соответствии с формулами (4.1.7), (4.1.17) и (4.1.22).

Проведем расчет среднеарифметического диаметра частиц эмульсии по формуле (4.2.14), принимая для эмульсии плотность сплошной фазы $\rho = 10^3$ кг/м³, поверхностное натяжение $\sigma = 0,05$ Н/м. Величины геометрических и режимных параметров ПАРТ примем так же, как и в параграфе 4.1. Расчетные кривые зависимости диаметра частиц эмульсии d_c от линейной скорости совмещения каналов ротора и статора ωR_p показаны на рис. 4.2.1 - 4.2.3.

Линейная скорость совмещения является основным параметром, определяющим величину диссипации энергии в канале статора аппарата. На рис. 4.2.4 построены графики зависимости диаметра частиц эмульсии от перепада давления на прерывателе и давления в рабочей камере.

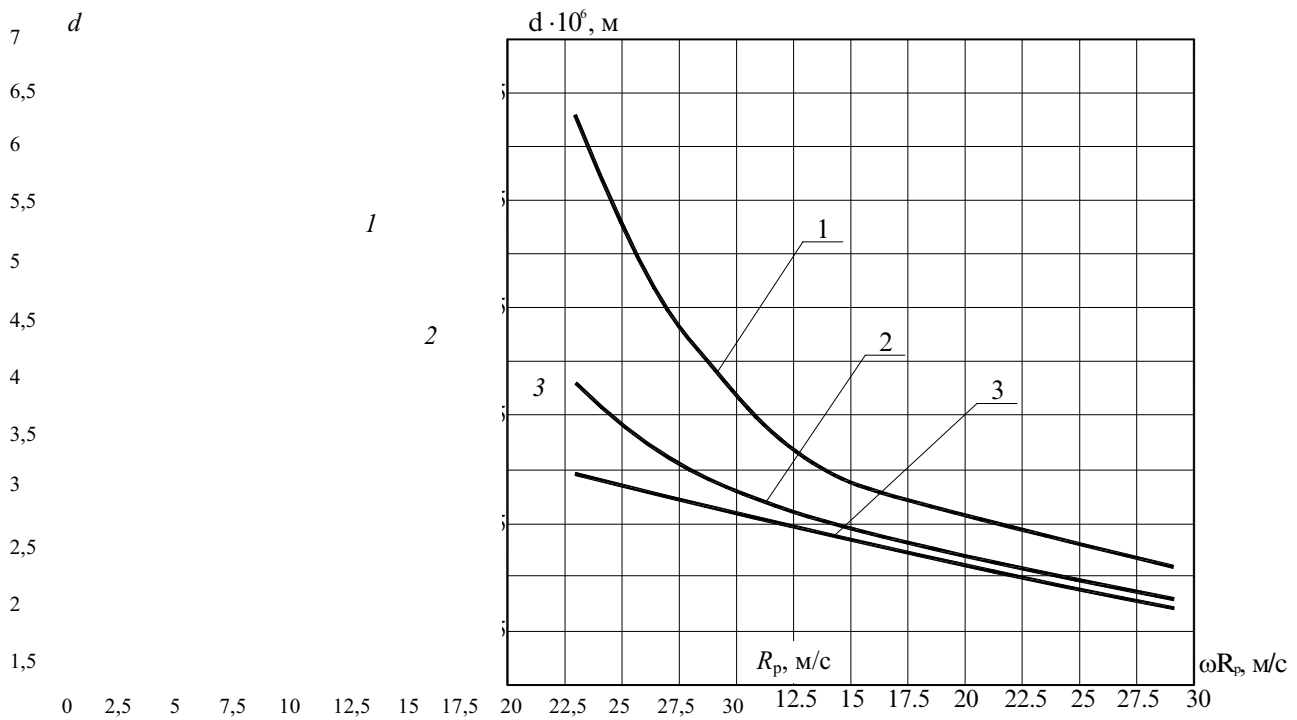


РИС. 4.2.1. ГРАФИКИ ЗАВИСИМОСТИ ДИАМЕТРА ЧАСТИЦ ЭМУЛЬСИИ ОТ СКОРОСТИ СОВМЕЩЕНИЯ КАНАЛА РОТОРА С КАНАЛОМ СТАТОРА $R_{\max} = 10^{-4}$ м, $P_k = 0,5 \cdot 10^5$ Па :
 $1 - \Delta P = 0,6 \cdot 10^5$ Па ; $2 - \Delta P = 0,8 \cdot 10^5$ Па ; $3 - \Delta P = 1 \cdot 10^5$ Па

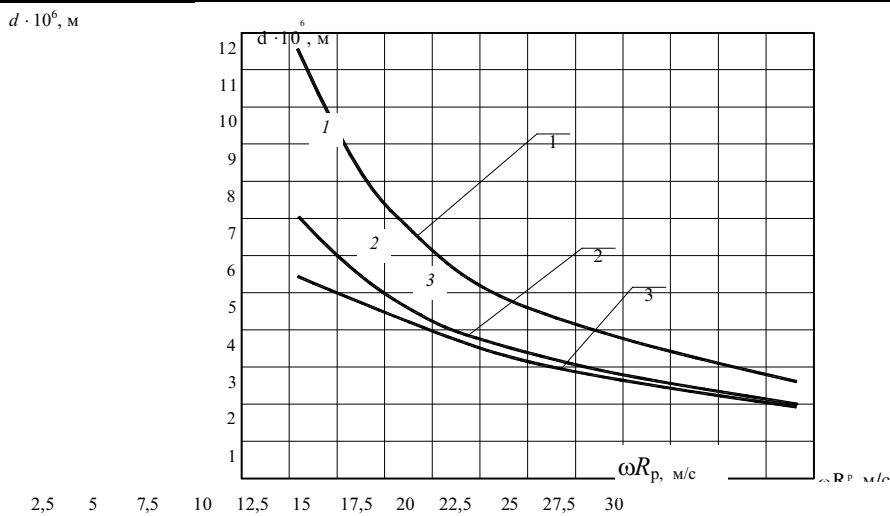


РИС. 4.2.2. ГРАФИКИ ЗАВИСИМОСТИ ДИАМЕТРА ЧАСТИЦ ЭМУЛЬСИИ ОТ СКОРОСТИ СОВМЕЩЕНИЯ КАНАЛА РОТОРА С КАНАЛОМ СТАТОРА $R_{\max} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м, $P_k = 0,5 \cdot 10^5$ Па :

$1 - \Delta P = 0,6 \cdot 10^5$ Па ; $2 - \Delta P = 0,8 \cdot 10^5$ Па ; $3 - \Delta P = 1 \cdot 10^5$ Па

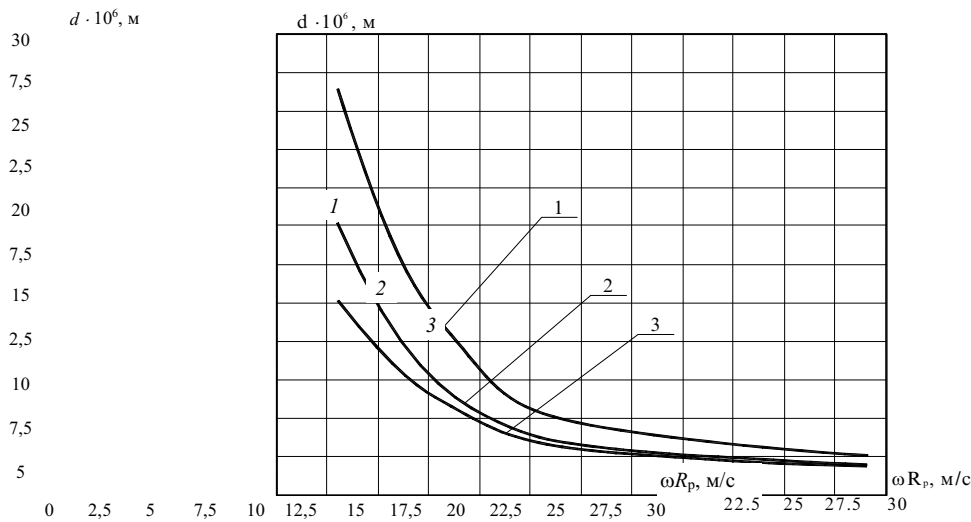


РИС. 4.2.3. ГРАФИКИ ЗАВИСИМОСТИ ДИАМЕТРА ЧАСТИЦ ЭМУЛЬСИИ ОТ СКОРОСТИ СОВМЕЩЕНИЯ КАНАЛА РОТОРА С КАНАЛОМ СТАТОРА

$$R_{\max} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \Delta P = 0,5 \cdot 10^5 \text{ Па} :$$

$$1 - P_k = 0,6 \cdot 10^5 \text{ Па} ; 2 - P_k = 0,8 \cdot 10^5 \text{ Па} ; 3 - P_k = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

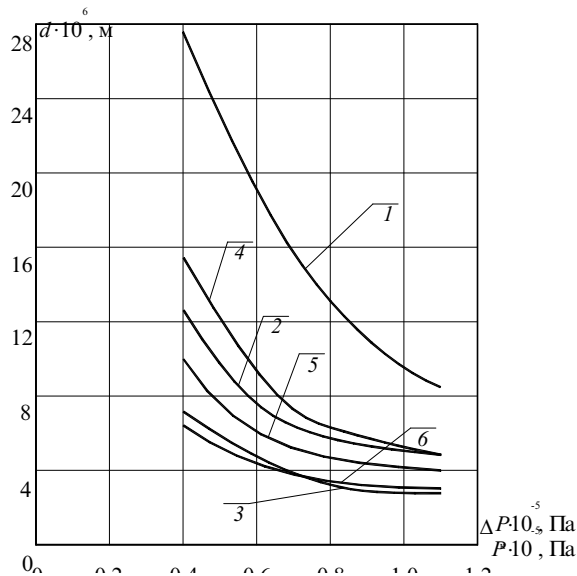


РИС. 4.2.4. ГРАФИКИ ЗАВИСИМОСТИ ДИАМЕТРА ЧАСТИЦ ЭМУЛЬСИИ ОТ ДАВЛЕНИЯ В

РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ И ОТ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ. $R_{\max} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$

$$P_k: 1 - \omega R_p = 5 \text{ М/С}; 2 - \omega R_p = 10 \text{ М/С}; 3 - \omega R_p = 15 \text{ М/С};$$

$$\Delta P: 4 - \omega R_p = 5 \text{ М/С}; 5 - \omega R_p = 10 \text{ М/С}; 6 - \omega R_p = 15 \text{ М/С}$$

Анализ графиков показывает, что все три параметра практически равнозначно влияют на величину диаметра частиц эмульсии. Чем больше значение каждого из управляющих параметров (ωR_p , ΔP , P_k), тем меньше и значение диаметра частиц, и тем больше характер зависимостей приближается к линейному. Такой характер зависимостей показывает, что при переходе на новый качественный уровень воздействия - кавитационное воздействие, изменение диаметра частиц выходит на "предел насыщения". Чем больше величина диссипации энергии в объеме эмульсии, тем больше характер зависимостей приближается к линейной, и дальнейшее увеличение энергии на реализацию процесса не дает значительного эффекта.

4.3. ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ РОТОРНОГО ТИПА

4.3.1. АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Основным вопросом теории измельчения является установление связи между затратами энергии и размерами конечных и начальных кусков материала. По теории П. Риттингера работа A при измельчении пропорциональна площади вновь образованной поверхности ΔS

$$A = k_1 \Delta S, \quad (4.3.1)$$

где k_1 - коэффициент пропорциональности.

Согласно гипотезе В. Л. Кирпичева и Ф. Кика энергия, необходимая для одинакового изменения формы подобных и однородных тел, пропорциональна их объемам:

$$A = k_2 d_{cp}^3, \quad (4.3.2)$$

где k_2 - коэффициент пропорциональности; d_{cp} - средний размер частицы, м.

П. А. Ребиндер и Ф. Бонд предложили определять энергетический расход при дроблении частиц с учетом работы как деформации частиц, так и образования новых поверхностей.

Твердый материал под действием приложенных сил разрушается и измельчается до частиц требуемого размера следующими способами [28 - 30]:

1) *раздавливание* - разрушение тела при преобладании внутреннего напряжения над пределом прочности на сжатие;

2) *раскалывание* - разрушение тела в местах концентрации наибольших нагрузок;

3) *разламывание* - разрушение тела под действием изгибающих сил;

4) *резание* - разделение тела на части под действием приложенных сил;

5) *истирание* - измельчение тела под действием сжимающих, растягивающих и срезающих сил;

6) *удар* - разрушение тела под действием динамической нагрузки.

Современная теория разрушения твердого тела выделяет две основные стадии процесса разрушения [31 - 34]:

- объемная деформация частицы с образованием микротрещин;

- разрушение при достижении частицей состояния предельных деформаций.

При невысоких значениях приложенной нагрузки деформация (смещение, отнесенное к единице длины) и напряжение (сила, отнесенная к единице площади) в большинстве твердых тел связаны линейным соотношением и не зависят от времени действия нагрузки. Если при снятии нагрузки восстанавливается исходная форма тела, то деформация называется упругой. При упругой деформации может наблюдаться постепенное возникновение микрощелей под нагрузкой и их смыкание при снятии нагрузки. Если снятие внешних сил не приводит к мгновенному уменьшению деформации, то наблюдается неупругая деформация. При сохранении деформации после снятия нагрузки деформация называется пластической, а величина напряжения, соответствующая пластической деформации, называется пределом упругости. Разрушение твердого тела с возникновением пластических деформаций называется пластическим, а без заметной пластической деформации - хрупким [31, 32].

Наиболее важным типом деформации является сдвиг (скольжение), при котором происходит перемещение двух частей твердого тела по определенной кристаллографической плоскости под действием деформирующих напряжений. Сдвиг зарождается в определенном месте линейного дефекта кристаллической решетки в виде краевой или винтовой дислокации.

В плоскости скольжения образуется скопление дислокаций, возникающих при их блокировке препятствием. При этом на препятствие действует касательное напряжение,

превышающее приложенное и пропорциональное числу дислокаций в скоплении. Концентрация напряжений может привести к слиянию ведущих дислокаций и образованию зародышевой микротрещины. Трещина будет распространяться через область высокой концентрации напряжений в конце полосы скольжения и остановится, если ее длина меньше критического размера, необходимого для самопроизвольного распространения.

При воздействии переменных нагрузок уже на начальной стадии процесса разрушения формируются микротрещины. Имеющиеся в частице и вновь образованные микротрещины и микродефекты постоянно растут, сливаются и формируют макротрещины. Распространение макротрещин ослабляет частицу и приводит к ее лавинному разрушению.

При ударных нагрузках возникающие напряжения достигают значительных величин из-за кратковременности нагрузки, и величина напряжения в любой точке определяется наложением падающей и отраженной ударных волн. Наложение этих волн может вызвать высокие напряжения, приводящие к разрушению.

Разрушение частицы значительно ускоряется при наличии вкрапленных микродефектов и в хрупком материале разрушение происходит из-за распространения этих трещин по всему материалу.

При крупном измельчении размеры дефектов и микротрещин ничтожно малы по сравнению с размерами измельченных частиц и их разрушение происходит по поверхностям наибольших напряжений с раскрытием дефектов одного наивысшего порядка. В области тонкого и сверхтонкого измельчения, когда размеры дефектов соизмеримы с размерами частиц, при той же объемной плотности микротрещин их количество мало. Поэтому образование новых поверхностей идет с включением дефектов структуры более низкого порядка, требующих более высоких разрушающих напряжений [31].

Под воздействием внешних сил в измельчаемых частицах возникает объемно-напряженное состояние, приводящее с ростом его интенсивности к разрушению частиц. Все дефекты в твердых частицах развиваются с ростом интенсивности напряженного состояния и со временем его существования в частицах. Такое развитие дефектов имеет место и в области упругих и в области пластических деформаций. Постепенно переходя в разряд опасных, развивающиеся дефекты определяют резко пониженную реальную прочность твердых частиц по сравнению с их теоретической прочностью. Особое значение приобретают при этом поверхностные дефекты, которые чувствительны к адсорбционному действию ПАВ.

Тонкое измельчение сухим способом без добавок ПАВ после замедления процесса, вследствие упрочнения мелких частиц, достигает некоторого предела измельчения. После этого начинает преобладать обратный процесс - образование плотных агрегатов.

При измельчении твердых частиц наблюдается их активация - сложный многоступенчатый процесс изменения энергетического состояния вещества. Активации способствуют также такие явления, как изменение структуры кристаллической решетки вещества, частичная аморфизация поверхности и приповерхностных слоев частиц, различные виды излучений, возникающие при разрушении, изменение вида химических связей на поверхности и в глубинных слоях вещества, электронизация и другие процессы [31].

Системный анализ процесса измельчения показывает, что исходной причиной дробления частиц является внешняя механическая энергия, которая расходуется на работу по преодолению сил молекулярного притяжения и электрического взаимодействия, по преодолению сил взаимодействия внутри частицы за счет химических связей, на накопление энергии упругих деформаций. Энергия упругих деформаций частично переходит в пластические деформации, которые переходят в тепловую энергию и аккумулируются в структурно обусловленную систему внутренних напряжений. Система внутренних напряжений характеризуется дефектами структуры твердой частицы, которые благодаря пластической деформации могут накапливаться в определенном месте, причем их энергия

концентрируется и достигает значения, необходимого для возникновения разрыва и образования микротрещины [31].

Под действием механической нагрузки подведенная энергия расходуется на создание упругих и пластических деформаций в частицах. Пластическая деформация изменяет форму частиц, нарушает упорядоченность кристаллической решетки и образует дислокацию. Энергия пластических деформаций при сдвиге деформирующего усилия частично переходит в тепло, частично увеличивает внутреннюю энергию измельчаемых частиц.

Под увеличением внутренней энергии частиц понимается увеличение той части полной внутренней энергии, которая включает в себя энергию взаимодействия микрочастиц, энергию кристаллической решетки, энергию электронных оболочек ионов и атомов, энергию микро- и макродефектов структуры материала и т.д.

Упругая деформация частиц характеризуется наведением в них трещин, развивающихся из макродефектов. При некоторой предельной, объемной концентрации трещин в частице образуется как минимум одна трещина с размером больше критического. Это ведет к разрушению частицы и релаксации упругих напряжений в осколках. Энергия упругой деформации переходит в энергию вновь образованной поверхности, в тепло и внутреннюю энергию частиц [31].

В ПАРТ основными факторами измельчения являются раскалывание, истирание и удар. Ударные нагрузки возникают как при механическом контакте твердых частичек с рабочими поверхностями ПАРТ и друг с другом, так и за счет кумулятивных воздействий при развитой кавитации. Диспергирование осуществляется в жидкой среде и обычно совмещается с другими ХТП: гомогенизацией, экстрагированием, растворением. Запишем основные уравнения теории измельчения.

Кинетическая энергия твердого тела в момент удара определяется как

$$E_{к1} = mV_y^2 / 2, \quad (4.3.3)$$

где m - масса тела, кг; V_y - скорость движения тела в момент удара, м/с.

Кинетическая энергия твердого тела после удара:

$$E_{к2} = mV_k^2 / 2, \quad (4.3.4)$$

где V_k - скорость тела после удара, м/с.

Отношение $\varepsilon = V_k/V_y$ - называется коэффициентом восстановления и зависит от природы сталкивающихся тел [28].

Кинетическая энергия, переданная телу в момент удара, равна

$$E = E_{к1} - E_{к2} = V_y^2(1 - \varepsilon^2)/2. \quad (4.3.5)$$

Ударными нагрузками измельчают твердые и хрупкие материалы, у которых после снятия статической нагрузки отсутствует остаточная деформация [28]. Для таких тел работу однократного разрушения определяют в соответствии с теорией Кика-Кирпичева:

$$A = \sigma^2 v / 2E_y, \quad (4.3.6)$$

где σ - предел прочности материала, Па; v - объем разрушаемого тела, м³; E_y - модуль упругости, Па.

Для разрушения твердой частицы при ударе необходимо соблюдать условия $E \geq A$. Исходя из этого соотношения, используя (4.3.5) и (4.3.6) определяют разрушающую скорость при ударе твердой частицы [28]:

$$V_y = \sigma \sqrt{v E_y (1 - \varepsilon^2)}. \quad (4.3.7)$$

В ПАРТ твердые частицы разрушаются в основном за счет взаимодействия с зубьями ротора или с зубьями статора. Скорость, с которой зуб ротора ударяет по частице, равна

$$V_{yp1} = \omega R_{p1}, \quad (4.3.8)$$

где ω - угловая скорость ротора, c^{-1} ; R_{p1} - радиус внутренней поверхности ротора, м.

Скорость, с которой твердая частица вылетает из канала ротора и сталкивается с зубьями статора, рассчитывается как

$$V_{yc} = V^2 + V_{yp2}^2 \cos \alpha, \quad (4.3.9)$$

где $V = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} V(t) dt$ - осредненная скорость истечения из канала ротора в момент совмещения с каналом статора, м/с; $t_1 = (a_p + a_c) / (\omega R_p)$; $V_{yp2} = \omega R_p^2$; R_p - наружный радиус ротора, м; a_p , a_c - ширина прямоугольного канала ротора и статора, м; $\alpha = \arctg(V / V_{yp2})$ - угол проекции равнодействующего вектора скорости V_{yc} на ось вектора скорости V_{yp} .

При большой угловой скорости вращения ω скоростью истечения можно пренебречь, так же как и центробежной скоростью, за счет проскальзывания жидкости в полости ротора. Приведенная формула справедлива для частиц, размер которых больше величины зазора между ротором и статором.

Если на твердую частицу действует кумулятивная струя, то скорость кумулятивной струи при кавитации можно найти по формуле (4.1.23).

При размере частиц меньше величины зазора между ротором и статором часть из них разрушается за счет сдвиговых напряжений [35]:

$$\sigma = 2,5 V_{C\mu} - \text{для сферических частиц, Па};$$

$$\sigma = V_{C\mu} - \text{для цилиндрических частиц, Па};$$

$$V_C = dV_x / dy - \text{скорость сдвига, м/с; } \mu - \text{динамическая вязкость жидкости, Па}\cdot\text{с}.$$

Для больших чисел Рейнольдса сдвиговое напряжение на стенках цилиндрических частиц

$$\sigma = 0,5 V_C^2 \rho d^2,$$

где ρ - плотность жидкости, $кг/м^3$, d - текущий диаметр частиц, м.

При вращении частиц в сдвиговом потоке в них также возникают центробежные напряжения:

$$\sigma_{ц} = 0,4 \omega_T^2 \rho_T d^2 - \text{для сферических частиц};$$

$$\sigma_{ц} = 0,41 \omega_T^2 \rho_T d^2 - \text{для цилиндрических частиц};$$

где $\omega_T \cong V_C / 2$ - угловая скорость вращения частицы, c^{-1} ; ρ_T - плотность материала частицы, $кг/м^3$.

Все рассуждения приведены для случая разрушения непосредственно твердых частиц. Случай разрушения агломератов не рассматривался ввиду относительно небольших значений сил связи между частицами в агломерате (от 10^{-5} Па до 10^{-2} Па) [35].

На процесс разрушения тел в жидкой среде влияют свойства жидкости: вязкость, плотность, химический состав. При увеличении значений вязкости и плотности снижается величина ударных воздействий. Наличие в жидкости поверхностно-активных веществ снижает прочность частиц, ослабляет силы сцепления и способствует диспергированию частиц. Расклинивающее действие жидкости в микротрещинах также облегчает разрушение частиц.

4.3.2. АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ЧАСТИЦ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

Рассмотрим процесс разрушения твердых частиц при контакте их с ротором и статором в период прохождения через прерыватель аппарата. Введем ограничения на параметры частиц, ротора и статора:

1) ТВЕРДОСТЬ ЧАСТИЦ ДОСТАТОЧНО ВЫСОКАЯ, ПЛАСТИЧЕСКИЕ И УПРУГИЕ ДЕФОРМАЦИИ ИСКЛЮЧАЮТСЯ, ТВЕРДОСТЬ МАТЕРИАЛА РОТОРА И СТАТОРА БОЛЬШЕ ТВЕРДОСТИ ЧАСТИЦ;

2) СВОБОДНОЕ СОУДАРЕНИЕ С ЭЛЕМЕНТАМИ РОТОРА И СТАТОРА, А ТАКЖЕ С ПОТОКОМ ЖИДКОЙ ФАЗЫ НЕ ПРИВОДИТ К РАЗРУШЕНИЮ ЧАСТИЦЫ;

3) НАИБОЛЬШИЙ РАЗМЕР ЧАСТИЦ D ДОЛЖЕН БЫТЬ МЕНЬШЕ ШИРИНЫ A_p КАНАЛА РОТОРА $d < a_p$, ТАК КАК В ПРОТИВНОМ СЛУЧАЕ ПРОИЗОЙДЕТ ЗАБИВКА АППАРАТА ЧАСТИЦАМИ;

4) НАИМЕНЬШИЙ РАЗМЕР ЧАСТИЦ B ДОЛЖЕН БЫТЬ БОЛЬШЕ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРА МЕЖДУ РОТОРОМ И СТАТОРОМ, $b > \delta$, ТАК КАК В ПРОТИВНОМ СЛУЧАЕ ЧАСТИЦА ПРОСКОЧИТ ЧЕРЕЗ АППАРАТ;

5) КРИВИЗНА РОТОРА И СТАТОРА НЕ УЧИТЫВАЕТСЯ, РАДИУС ЗАКРУГЛЕНИЯ КРОМОК РОТОРА И СТАТОРА R БЕСКОНЕЧНО МАЛ, $R \ll D$;

6) ПРИ СОВМЕЩЕНИИ КАНАЛОВ РОТОРА И СТАТОРА, МЕХАНИЧЕСКОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ПОДВЕРГАЕТСЯ ТОЛЬКО ОДНА ЧАСТИЦА.

Для анализа условий диспергирования форма частицы не играет решающей роли. Важен профиль сечения твердой частицы в точках контакта с кромками каналов ротора и статора. Рассмотрим условия диспергирования при различных вариантах профиля сечения частицы в точках контакта.

Вариант 1. Профиль сечения твердой частицы в момент контакта с ротором и статором является окружностью (рис. 4.3.1, *a*). Этот вариант рассмотрен в работе [36] и для него сформулированы следующие условия диспергирования:

$$90^\circ - 2\varphi \leq \alpha + \beta \leq 90^\circ + 2\varphi, \quad (4.3.10)$$

$$\text{где } \alpha = \arccos(1 - 2h/d), \text{ при } 0 \leq h/d \leq 0,5; \alpha = 90^\circ \text{ при } 0,5 \leq h/d \leq 1; \quad (4.3.11)$$

$$\beta = 0^\circ \text{ при } 0 < (h + \delta)/d \leq 0,5; \beta = \arcsin(2(h - \delta)/d - 1) \text{ при } 0,5 \leq (h + \delta)/d \leq 1.$$

Вариант 2. Профиль сечения твердой частицы в момент контакта с ротором и статором является равносторонним треугольником (рис. 4.3.1).

Пусть в момент времени соприкосновения с ротором и статором положение частицы будет произвольным, направление движения потока жидкости, несущего твердые частицы не влияет на положение частицы. Тогда запишем уравнения моментов сил, действующих со стороны ротора (т. *B*) на частицу относительно статора (т. *A*):

$$M_T = T \cos \alpha \delta + T \sin \alpha l; \quad (4.3.12)$$

$$M_P = P \cos \alpha l - P \sin \alpha \delta. \quad (4.3.13)$$

Здесь $T = Pf$ - сила трения, Н; P - реакция со стороны ротора, Н; δ - зазор между ротором и статором, м; l - расстояние между встречными стенками каналов ротора и статора в момент контакта, м; f - коэффициент трения.

При $M_P > M_T$ частица будет вращаться относительно точки *A*, пока равнодействующие от сил P и T не будут направлены навстречу друг другу, и будет выполняться равенство $M_P = M_T$. Условие перемещения частицы под действием сил F запишется в виде

$$f < (l - \operatorname{tg}\alpha) / (\delta + \operatorname{tg}\alpha l). \quad (4.3.14)$$

Когда частица займет положение, как показано на рис. 4.3.1, σ на нее будут действовать две противоположно направленные силы:

$$P' = 2P \sin 30^\circ \quad \text{и} \quad T' = 2T \sin 60^\circ, \quad T = Pf. \quad (4.3.15)$$

Если $T' \geq P'$, то происходит разрушение частицы при соблюдении условия $f \geq 1/\sqrt{3}$, что получается путем элементарных математических преобразований уравнений (4.3.15). Если $T' < P'$ - частица выталкивается. Выталкивание частицы может произойти как в канал ротора, так и в канал статора, в зависимости от положения частицы. Если частица выталкивается в канал ротора, то возможно ее разрушение при повторном контакте с ротором и статором при выполнении необходимого условия $f \geq 1/\sqrt{3}$. Если частица выталкивается в канал статора, то происходит проскок частицы.

Вариант 3. Профиль сечения твердой частицы в момент контакта с ротором и статором является прямоугольником (рис. 4.3.2). Здесь возможны несколько положений частицы, характеризуемых углом α между стороной канала ротора и стороной частицы. Начальное положение частицы при $\alpha = 0$ показано на рис. 4.3.2, *a*.

При дальнейшем движении ротора происходит вращение частицы (рис. 4.3.2). Угол α изменяется в пределах $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$. Моменты сил, действующих со стороны ротора (т. *B*) на частицу относительно статора (т. *A*):

$$M_T = Pf h_T ; \quad M_P = Ph_P , \quad (4.3.16)$$

где h_P и h_T - плечи, $h_T = a$, $h_P = \sqrt{l^2 + \delta^2 - d^2}$.

Частица вращается из первоначального положения при $M_P > M_T$ (рис. 4.3.2). В этом случае должно выполняться неравенство

$$f < \sqrt{l^2 + \delta^2 - d^2} / d . \quad (4.3.17)$$

Так как в начальный момент контакта $l \approx d$, то условие вращения частицы запишется в виде $f < \delta/d$. Вращение частицы прекратится, когда вектора силы P выйдут навстречу друг другу (рис. 4.3.2). В этом положении происходит раскалывание частицы. Равенство $\alpha = 90^\circ$ возможно только в том случае, если $d = \delta$, что невозможно из-за наложенных ограничений.

Справедливость неравенства (4.3.17) была проверена экспериментально. Для частицы в виде параллелепипеда был смоделирован механический контакт с ротором и статором, как это показано на рис. 4.3.2. Все геометрические размеры увеличены по сравнению с реальными размерами примерно в 100 раз для удобства проведения замеров. Проверялась возможность вращения частицы с прямоугольным сечением из начального положения для двух пар материалов с известным коэффициентом трения, который определяли перед проведением испытания. Условия и результаты приведены в табл. 4.3.1.

Таблица 4.3.1

Сухой контакт				Мокрый контакт			
δ	$\frac{\sqrt{l^2 + \delta^2 + d^2}}{d}$	Коэффициент трения f	Вращение частицы	δ	$\frac{\sqrt{l^2 + \delta^2 + d^2}}{d}$	Коэффициент трения f	Вращение частицы
10	0,21			10	0,17		

1 5	0,24	0,36	Her	2 5	0,15	0,20	Her
2 0	0,18			2 0	0,12		
2 5	0,12			2 5	0,09		

Таким образом, в результате проведенного анализа видно, что если точка контакта частицы с ротором и статором лежит на взаимно параллельных гранях частицы, то создаются условия для диспергирования частиц. К таким телам относятся частицы, сечением которых является правильный шестиугольник, восьмиугольник и т.д. Для таких частиц число граней равно $2n$, $n = 2, 3, 4, \dots$. Частицы, для которых $n > 2$, могут контактировать с ротором и статором на непараллельных гранях (рис. 4.3.3, б, в).

Для частиц, профиль сечения которых близок к правильным фигурам с нечетным числом граней $2n + 1$, диспергирование - по варианту 2.

Ограничения по коэффициенту трения с увеличением числа граней уменьшается. Так, для пятиугольника необходимым условием диспергирования является неравенство $f > 0,325$, для семиугольника возможны два случая контакта и т.д. (значения коэффициентов трения получают аналогично с помощью уравнений (4.3.15)).

Для трапециевидных фигур и для фигур с $n > 2$, контактирующих как показано на рис. 4.3.3, б, в, необходимым условием диспергирования также является ограничение по f . Если это ограничение не выполняется, происходит выталкивание частицы из рабочей зоны. Таким образом, наиболее вероятно разрушение частиц в ПАРТ с прямоугольным профилем сечения или близким к прямоугольному.

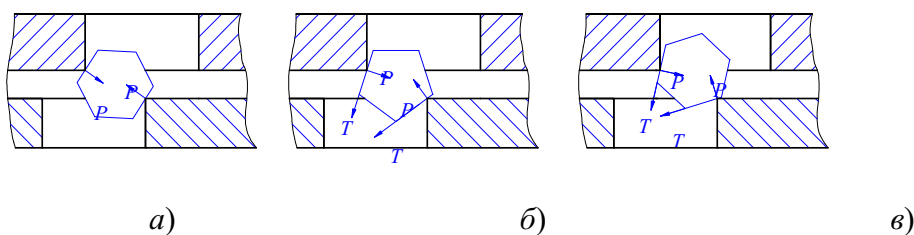


Рис. 4.3.3. Варианты контакта частиц с ротором и статором

Проведем анализ разрушения частицы, имеющей форму параллелепипеда с прямоугольным профилем сечения. До момента совмещения каналов ротора и статора частица будет находиться в канале ротора, прижимаясь к стенке канала ротора за счет инерционной силы. Так как наибольший размер частицы, исходя из начальных условий, меньше ширины канала ротора, то частица будет ориентирована наибольшей гранью вдоль оси канала ротора (рис. 4.3.4, а). При совмещении канала ротора с каналом статора частица будет оставаться в том же положении, пока стенка канала ротора, к которой прижата частица, не совместится с ответной стенкой канала статора (рис. 4.3.4, б). Длительность этого временного интервала равна $t_3 = a_p / \omega R_p$. После этого момента частица начинает двигаться вперед вместе с потоком жидкости. Будем считать, что инерционность частицы мала и скорость ее передвижения в канал статора равна скорости потока жидкости. Частица будет двигаться, пока не прижмется к противоположной стенке канала статора (рис. 4.3.4, в). Длительность этого временного интервала заканчивается в момент времени $t_4 = (a_p + a_c - d) / (\omega R_p)$. Величина перемещения частицы вдоль канала статора определяется по формуле

$$L = \int_{t_3}^{t_4} V(t) dt, \quad (4.3.18)$$

где $V(t)$ - функция скорости потока жидкости через прерыватель ПАРТ.

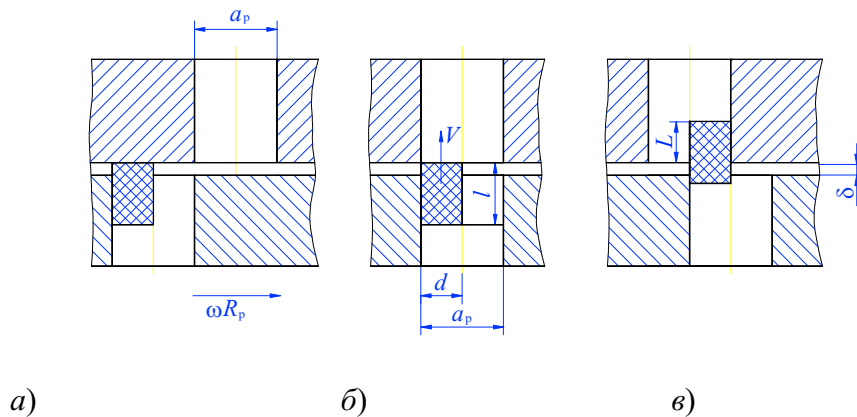


Рис. 4.3.4. Схема перемещения частиц в каналах ротора и статора

При наступлении момента времени t_4 частица зафиксирована, и ее разрушение будет происходить по механизму, описанному в варианте 3. Часть частицы, оставшаяся в канале статора, будет выведена из аппарата.

Часть частицы, оставшаяся в канале ротора, будет подвергаться дальнейшему дроблению по рассмотренному механизму при следующем совмещении канала ротора с каналом статора, если наибольший размер частицы будет больше величины зазора или больше L .

Составим алгоритм методики расчета гранулометрического состава полидисперсной смеси твердых частиц, имеющих форму параллелепипеда при диспергировании в ПАРТ типа РПА.

1. По исходной кривой гранулометрического состава сырья создается таблица, каждая ячейка которой определяет количество частиц n_i , у которых характерный размер входит в диапазон (d_{n_i}, d_{k_i}) , где i - номер ячейки таблицы.

2. Частицы каждой ячейки проверяются по схеме, сформулированной следующим образом: если $d < \delta$, то частица проскакивает в канал статора, если $L > d + \delta$, то частица выводится в канал статора, если $L < d + \delta$, происходит раскалывание частицы на две части, характерные размеры которых будут равны L и $d - (L + \delta)$ соответственно.

3. Для частицы с характерным размером $d - (L + \delta)$ производятся операции, описанные в п. 2.

4. Сортировка полученных частиц по характерному размеру. Построение новой таблицы.

5. Построение по данной таблице кривой гранулометрического состава.

Блок-схема описанного алгоритма приведена на рис. 4.3.5. На рис. 4.3.6 показаны расчетные характерные гистограммы распределения частиц по размерам до диспергирования и после диспергирования в ПАРТ.

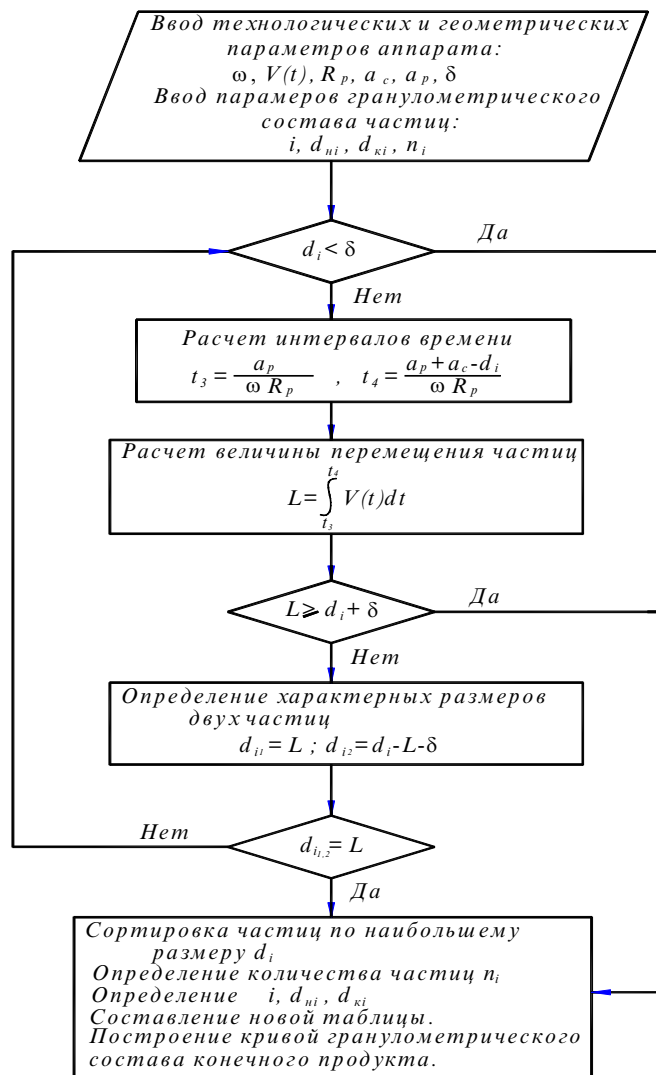


Рис. 4.3.5. Блок-схема алгоритма расчета размеров частиц при обработке в ПАРТ

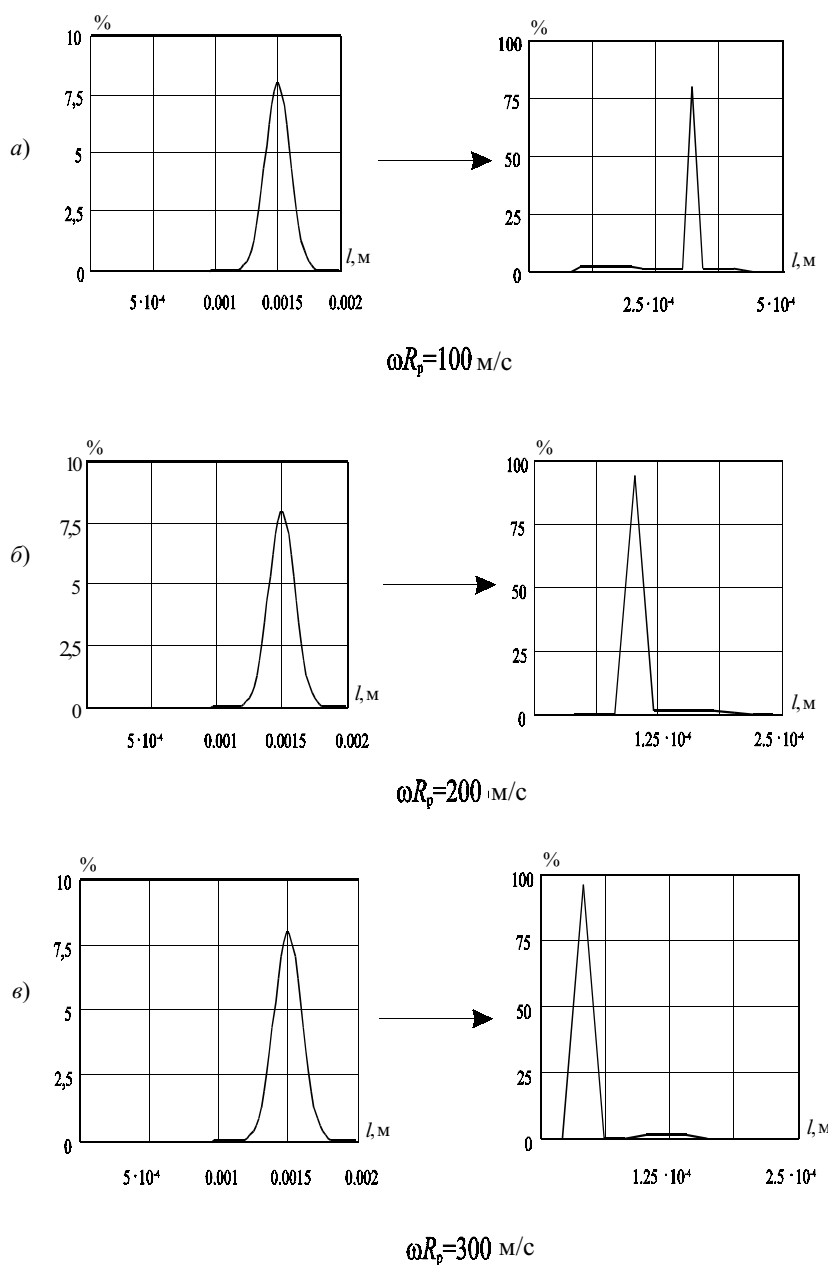


Рис. 4.3.6. Расчетные зависимости гранулометрического состава. $\overline{\Delta P} = 1,0 \text{ атм}$

4.4. ЭКСТРАГИРОВАНИЕ В СИСТЕМЕ "ТВЕРДОЕ ТЕЛО - ЖИДКОСТЬ" В ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ РОТОРНОГО ТИПА

4.4.1. АНАЛИЗ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА ЭКСТРАГИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ "ТВЕРДОЕ ТЕЛО - ЖИДКОСТЬ"

Под экстрагированием в системе твердое тело - жидкость понимаются процессы растворения, выщелачивания, а также непосредственно процессы экстрагирования (извлечение одного или нескольких целевых компонентов из твердой фазы на основе их избирательной растворимости в жидком растворителе) [37].

Процесс экстрагирования включает следующие стадии:

- 1) подвод экстрагента (растворителя) к поверхности раздела твердой и жидкой фаз;
- 2) перенос экстрагента к целевому компоненту, находящемуся в твердом материале;
- 3) взаимодействие растворителя в результате протекания химической реакции или физического растворения с извлекаемым компонентом;

4) перенос извлеченного компонента к границе раздела твердой и жидкой фаз;

5) отвод целевого компонента в ядро потока растворителя.

Процесс растворения является простейшим случаем процесса экстрагирования, когда твердое тело однородно и состоит из вещества, полностью растворимого в растворителе. Под растворением понимают гетерогенные реакции, протекающие между твердым веществом и жидкостью, которые вызывают переход этого вещества в раствор. Вещество, переходящее в раствор, контактирует с движущейся жидкостью в течение всего процесса растворения [38].

Выщелачиванием называют процесс извлечения твердых включений из твердых частиц тела - носителя. Под экстрагированием в системах твердое тело - жидкость понимают процессы селективного извлечения растворителем одного или нескольких компонентов из твердого тела [37].

На процесс переноса вещества влияют: форма и размеры частиц твердого тела; его внутреннее строение; размеры, расположение и вид пор капилляров (сквозные, открытые, закрытые); химический состав частиц твердого тела.

По характеру контактирования с жидкостью твердые вещества разделяются на следующие типы:

1) сплошные твердые тела (растворение);

2) пористые тела, в которых извлекаемое вещество содержится в растворе или на стенках пор (диффузионное извлечение, сорбция, ионный обмен);

3) пористые тела, содержащие в себе извлекаемый твердый материал (диффузионное извлечение твердой фазы);

4) пористые тела, способные к набуханию;

5) сплошные или пористые тела, испытывающие термические деформации (неизотермическое экстрагирование, растворение) [39].

Для характеристики сплошных тел используются данные об их форме, размерах и химическом составе, а для пористых тел учитываются особенности их внутреннего строения, которые характеризуются размерами и геометрией пор.

На механизм переноса вещества в порах влияет гидродинамический режим перемешивания жидкой фазы и соотношение размеров пор и молекул жидкости. Если размеры молекул жидкости значительно меньше пор, то вещество переносится по механизму конвективной диффузии, если размеры молекул жидкости близки к размерам пор - молекулярной диффузией.

На процесс экстракции влияет также размер твердых частиц. Целесообразно проводить процесс с мелкими частицами, предварительно измельчив материал.

Растворители и экстрагенты должны удовлетворять следующим условиям:

1) малая растворимость в первичном растворителе;

2) высокая селективность;

3) высокий коэффициент распределения;

4) высокий коэффициент диффузии;

5) невоспламеняемость;

6) низкая коррозионная активность;

7) низкая температура замерзания;

8) малая токсичность;

9) низкая теплоемкость и высокая летучесть [39].

В химической, фармацевтической, нефтехимической, пищевой и других отраслях промышленности широкое распространение получили такие экстрагенты как вода, этиловый спирт, четыреххлористый углерод, бензол, хлороформ, трихлорэтилен, ацетон, диэтиловый эфир, бензин и др.

При экстрагировании в системе твердое тело - жидкость процесс может лимитироваться следующими стадиями:

1) внешнедиффузионной - скорость процесса определяется скоростью диффузии в объеме при условии, что концентрация растворителя в порах и на поверхности твердого материала меньше его концентрации в объеме;

2) внутريدиффузионной - скорость процесса определяется скоростью диффузии в порах вещества;

3) внутренней кинетической - при условии, что пористый материал обладает относительно низкой химической активностью, а концентрация растворителя в порах равна концентрации в объеме;

4) внешней кинетической - реагент имеет относительно высокую химическую активность, вследствие чего реакция протекает на поверхности пористого материала при условии, что скорость реакции лимитирует скорость всего процесса.

Скорость процесса экстрагирования обычно лимитируется скоростью протекания самой медленной стадии, которой в процессах экстрагирования является стадия подвода и отвода растворителя и экстрагированного ценного компонента. В этом случае скорость процесса определяется скоростью диффузии, а движущей силой является разность концентраций [37].

В условиях растворения растворяемое вещество должно преодолевать очень малое сопротивление диффузионного слоя. Для веществ, растворяющихся по диффузионному механизму, величина этого сопротивления может значительно уменьшаться с увеличением скорости движения жидкости относительно частиц вещества, что способствует возрастанию скорости растворения. Закономерности процесса растворения существенно не изменяются, если растворяющийся материал представляет собой механическую смесь растворимых и нерастворимых частиц.

Различают три типа процесса растворения:

- физическое растворение, при котором исходное твердое вещество не меняет своего химического состава;

- химическое растворение, при котором в системе твердое тело - жидкость протекает гетерогенная химическая реакция;

- электрохимическое растворение протекает в условиях, когда процессу сопутствует перенос электрических зарядов.

В условиях простого физического растворения в первую очередь обогащаются веществом слои жидкости, примыкающие к поверхности растворения. С возрастанием концентрации и приближением ее к концентрации насыщения эти слои теряют способность воспринимать вещество, и поэтому дальнейшее растворение связано с отводом вещества из области вблизи поверхности растворения. Механизмом такого отвода является молекулярная или конвективная диффузия. Согласно закону Фика, плотность диффузионного тока прямо пропорциональна градиенту концентрации:

$$j = -D \text{grad } C \quad \text{или} \quad \frac{dM}{dt} = -DS \frac{dC}{dn}, \quad (4.4.1)$$

где M - масса диффундирующего вещества, кг; S - площадь поверхности растворения, м^2 ; D - коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; dC/dn - градиент концентрации в направлении диффузии; t - продолжительность диффузии, с.

Основной закон физического растворения, сформулированный А. Н. Щукаревым, записывается в виде

$$\frac{dM}{dt} = \beta S (C_n - C_p), \quad (4.4.2)$$

где C_n - концентрация насыщения; C_p - концентрация раствора; β - коэффициент скорости растворения - массоотдачи, $\text{м}/\text{с}$.

Согласно пленочной модели Льюиса и Уитмена, основанной на модели диффузионного слоя Нерста, коэффициент массоотдачи зависит от коэффициента диффузии и толщины пленки на поверхности контактирующих фаз [40, 41]:

$$\beta = D/\delta_{\text{п}}, \quad (4.4.3)$$

где $\delta_{\text{п}}$ - толщина пленки, м.

По модели обновления поверхности фазового контакта (пенетрационной) Хигби, турбулентные пульсации постоянно подводят к поверхности раздела фаз свежую жидкость, и коэффициент массоотдачи зависит от времени обновления порции жидкости:

$$\beta = 2\sqrt{D/\pi t}, \quad (4.4.4)$$

где t - время контакта или обновления поверхности фаз, с.

Для экстрагирования в системах "твердое - жидкость" в условиях интенсивного смешения и высокоскоростных режимах движения фаз относительно друг друга уравнение по расчету коэффициента массоотдачи записывают в виде [42 - 46]:

$$\beta = 0,267\varepsilon^{0,25} \text{Pr}^{-0,75}, \quad (4.4.5)$$

где $\text{Pr} = \mu/(\rho D)$ - критерий Прандтля; ε - диссипация энергии, Вт/кг; μ - динамическая вязкость, Па·с; ρ - плотность жидкости, кг/м³.

Способы интенсификации массообменных процессов в системах с твердой фазой по механизму воздействия на кинетику диффузионного переноса делят на три группы [38]:

- 1) способы, основанные на развитии поверхности фаз;
- 2) способы, основанные на увеличении скорости обтекания твердых частиц жидкостью;
- 3) комбинированные способы.

Интенсификацию массообменных процессов в ПАРТ следует отнести к комбинированным способам. Развитие поверхности контакта фаз происходит за счет разрушения твердых частиц с образованием новых поверхностей по механизму, рассмотренному в параграфе 4.3. Макротурбулентные пульсации скорости потока жидкости при импульсном вводе в канал статора, и микропульсации кавитационных пузырьков с образованием кумулятивных струек способствуют развитию больших градиентов скоростей жидкости относительно твердых частиц. Звукокапиллярный эффект позволяет жидкости проникать в поры и капилляры твердого тела на большую глубину. Все эти факторы воздействия способствуют постоянному обновлению поверхности фазового контакта за счет воздействия высокоскоростных микропотоков жидкости, которые образуются при пульсациях кавитационных пузырьков и воздействиях кумулятивных струй. Возможен не только импульсный подвод новых порций жидкости, но и срыв диффузионного слоя с поверхности частицы. Такой эффект достигается за счет "игольчатого" высокоэнергетического воздействия, дискретного в пространстве и времени.

Рассмотрим кинетику периодического растворения или растворения в прямоходе для полидисперсной системы частиц. Движущая сила в этом случае переменна. Такой тип организации процесса наиболее характерен для установок на базе ПАРТ. Растворение, как правило, осуществляется в циркуляционном контуре, содержащем ПАРТ, за несколько циклов или последовательно в нескольких аппаратах при прямоточной организации процесса.

Уравнение материального баланса может быть представлено в виде [38, 44]:

$$C = C_0 + k(1 - y), \quad (4.4.6)$$

где $k = M_0/v$; $y = M/M_0$; C, M - текущие значения концентрации и массы растворяемого вещества в объеме жидкости, кг/м^3 , м^3 ; C_0, M_0 - начальная концентрация и исходная масса растворяемого вещества в объеме жидкости, кг/м^3 , м^3 ; v - объем жидкости, м^3 .

Уравнение кинетики имеет вид

$$\frac{d\Delta d}{dt} = \frac{x\beta}{\rho_m} [(C_n - C_0) - k(1 - y)], \quad (4.4.7)$$

где x - коэффициент, зависящий от формы частиц; ρ_m - плотность растворяемого вещества, кг/м^3 ; $\Delta d = d_0 - d$; d_0, d - характерный размер частиц до растворения и в процессе растворения, м ; C_n - концентрация насыщения, кг/м^3 .

Для определения функции $y(t)$ необходимо определить функции $y(\Delta d)$ и $\Delta d(t)$, которые определяются по уравнениям:

$$y(\Delta d) = \int_{\Delta d}^{d_{\max}} \left(1 - \frac{\Delta d}{d_0}\right) \varphi(d_0) dd_0; \quad (4.4.8)$$

$$\Delta d(t) = \int \frac{x\beta}{\rho_m} [(C_n - C_0) - k(1 - y)] dt, \quad (4.4.9)$$

где $\varphi(d_0)$ - функция распределения частиц по размерам до процесса растворения.

Затем из уравнений $y(\Delta d)$ и $\Delta d(t)$ определяют зависимость $y(t)$.

4.4.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ ТВЕРДОГО В ЖИДКОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ В ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ РОТОРНОГО ТИПА

Растворение твердых частиц в жидкости при обработке в ПАРТ происходит одновременно с процессом диспергирования при механическом контакте частиц с рабочими поверхностями ротора и статора по механизму, описанному в параграфе 4.3. Процесс разрушения предшествует основной стадии процесса растворения, так как механический контакт и дробление частиц происходит на острых кромках выхода из канала ротора и входа в канал статора. После раскалывания в прерывателе на две части, часть частицы, которая оказалась в канале статора подвергается интенсивному многофакторному воздействию, включающему в себя турбулентные пульсации скорости потока жидкости при импульсном вводе в канал статора, ударные сферические волны при пульсациях и кумулятивные струи при схлопывании кавитационных полостей. Часть частицы, которая осталась в канале ротора подвергается механическому воздействию при следующем совмещении канала ротора с каналом статора, если ее размер в радиальном направлении больше величины зазора и длины пути, который может пройти частица при открытии канала статора. Таким образом, основными факторами, интенсифицирующими процесс растворения твердых частиц в жидкости являются импульсное и пульсационное воздействие.

Импульсное воздействие потока жидкости на растворяемую частицу аналогично воздействию высокоскоростного турбулентного потока в канале переменного сечения и конфигурации. Хаотические турбулентные флуктуации скорости слоев жидкости создают большие сдвиговые усилия на поверхности твердой частицы, что способствует уменьшению величины диффузионного слоя, усиливает его подвижность, обеспечивает приток свежей жидкости к поверхности твердой частицы. Механизм растворения твердой частицы в

импульсном потоке практически не отличается от механизма растворения твердой частицы в сильно развитом турбулентном потоке.

Пульсационное воздействие на твердую частицу в жидкости при пульсациях близлежащих кавитационных пузырьков заключается в создании высокоскоростных потоков жидкости у поверхности частицы. Кавитационные пузырьки должны находиться в непосредственной близости от твердой частицы, так как ударная волна при пульсациях пузырька быстро затухает при распространении в жидкости. Хотя затухание давления в ударной волне прямо пропорционально расстоянию от его поверхности, энергия волны падает по квадратичной зависимости и уже на расстоянии от поверхности пузырька, превышающем R_{\max} волна гасится волнами от других пузырьков и затухает. Высокоскоростные потоки жидкости создают большие сдвиговые напряжения на поверхности частицы и также уменьшают величину диффузионного слоя.

Кавитационные пузырьки, находящиеся вблизи поверхности твердой частицы схлопываются с образованием кумулятивной струйки. Кумулятивная струйка ориентирована в направлении поверхности твердой частицы. Размеры твердых частиц при растворении в ПАРТ могут лежать в интервале 0,1 - 5 мм. Радиус кавитационного пузырька при расширении находится в интервале 0,1 - 0,5 мм. Таким образом, максимальный радиус пузырька меньше или соизмерим с размерами твердых частиц, находящихся в жидкости. Диаметр кумулятивной струйки примерно в 10 раз меньше максимального радиуса пузырька. Необходимо учесть, что скорость кумулятивной струи достигает сотни метров в секунду и ее действие подобно действию твердого тела.

Рассмотрим механизм кумулятивного воздействия на твердую частицу, имеющую плоские грани. На поверхности твердого тела всегда есть мелкие газовые или паровые пузырьки, концентрирующиеся в микродефектах поверхности частицы. При воздействии импульсного разрежения в жидкости пузырек расширяется, а при повышении давления в жидкости пузырек схлопывается с образованием кумулятивной струйки, проникающей в твердое тело (рис. 4.4.1, а). "Осколки" схлопнувшегося пузырька служат зародышами для возникновения кавитационных пузырьков. Действие кавитационного пузырька, находящегося вблизи поверхности твердой частицы, не отличается от вышерассмотренного механизма, но механическое разрушение поверхности частицы несколько меньше (рис. 4.4.1, б).

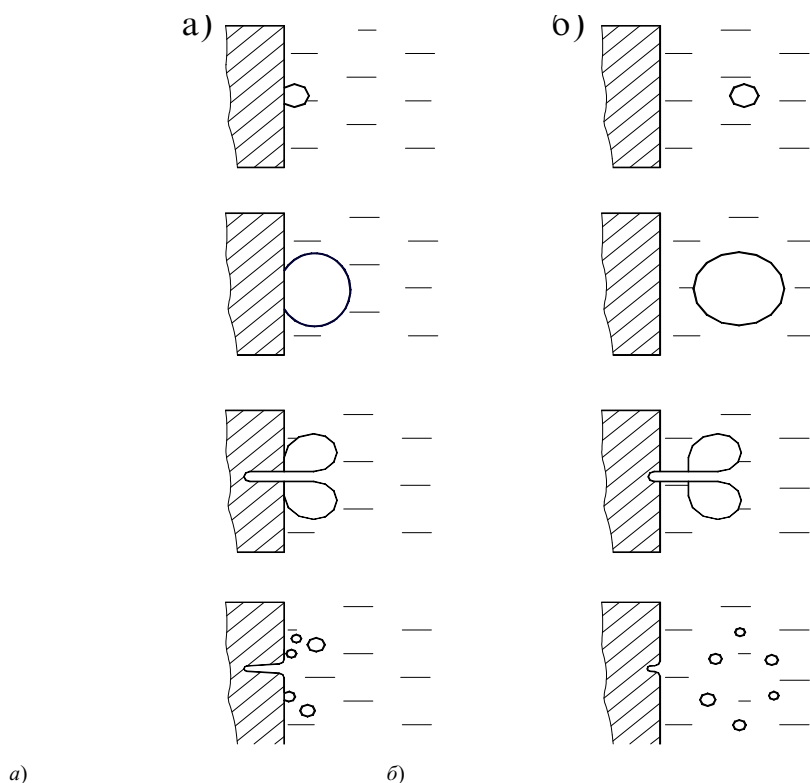


РИС. 4.4.1. СХЕМА МЕХАНИЗМА ДЕЙСТВИЯ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУЙКИ НА ПОВЕРХНОСТЬ ТВЕРДОЙ ЧАСТИЦЫ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ КАВИТАЦИОННОГО ПУЗЫРЬКА

Интенсификация процесса растворения твердой частицы при кумулятивном воздействии достигается как за счет увеличения площади поверхности частицы, так и за счет уменьшения толщины диффузионного слоя на поверхности частицы. Наибольшее воздействие на диффузионный слой будет осуществляться при касательном к поверхности или наклонном действии кумулятивной струйки.

Кинетика процесса растворения твердых частиц в жидкости при интенсивном смешении и больших градиентах скорости движения фаз определяется уравнением (4.4.5):

$$\beta = 0,267\varepsilon^{0,25} \text{Pr}^{-0,75} .$$

Основным сомножителем в этом уравнении, определяющем интенсивность процесса растворения и величину коэффициента массоотдачи, является величина диссипации энергии на единицу массы гетерогенной жидкой смеси в единицу времени. Так как интенсивность растворения, в основном, зависит от кинетической энергии потока жидкости при течении потока через прерыватель аппарата и кавитационной энергии в канале статора, то удельную энергию на единицу объема гетерогенной жидкости можно записать в виде

$$\varepsilon = k_{и}\varepsilon_{и} + k_{п}\varepsilon_{п} + k_{к}\varepsilon_{к}, \quad (4.4.10)$$

где $k_{и}$, $k_{п}$, $k_{к}$ - коэффициенты, учитывающие эффективность использования импульсной, пульсационной и кумулятивной составляющих суммарной диссипации энергии в элементарном объеме жидкости, введенном в канал статора. Коэффициенты $k_{и}$, $k_{п}$, $k_{к}$ определяются при сравнительном анализе расчетных и экспериментальных данных.

В формуле (4.4.10) опущено слагаемое для диссипации энергии в зазоре, так как растворяющиеся частицы проходят через канал ротора и канал статора непосредственно, не попадая в зазор, и лишь очень малая их часть, размер которых меньше величины зазора, попадает в зазор между ротором и статором.

Распишем формулу (4.4.10):

$$\varepsilon = k_{\text{и}} \frac{S_{\text{с}}^2}{2\pi c t_1 v_0} \int_0^{t_1} \left(\frac{dV}{dt} \right)^2 dt + k_{\text{п}} \frac{P_{\text{к}} K}{t_3 \rho} \left(1 - \frac{R_0^3}{R_{\text{max}}^3} \right) \left(\frac{R_0}{R_{\text{max}}} \right)^2 + k_{\text{к}} \frac{0,028 P_{\text{к}} K}{R_{\text{max}} \rho (\rho/P_{\text{к}})^{0,5}}.$$

Основное влияние на диссипацию энергии оказывает величина ускорения потока жидкости в канале статора, давление в канале статора и величина максимального радиуса кавитационного пузырька. Величина ускорения потока жидкости и, соответственно, генерируемое давление в основном зависят от общего перепада давления. Давление в канале статора принимаем, равное давлению в рабочей камере. Графики на рис. 4.4.2 и 4.4.3 построены при численном решении уравнения (4.4.5) и показывают зависимость коэффициента массоотдачи β от скорости совмещения каналов ротора и статора $\omega R_{\text{р}}$.

В качестве модельного был выбран процесс растворения NaCl в воде при $t = 20$ °C. Процесс растворения NaCl в воде хорошо исследован и широко используется в различных технологических процессах. Анализ графиков позволяет сделать вывод, что их форма сильно зависит от величины максимального радиуса кавитационного пузырька и от давления в канале статора. Перепад давления незначительно влияет на коэффициент массоотдачи. Это означает, что основной вклад в увеличение величины коэффициента массоотдачи и, соответственно, в интенсификацию процесса растворения вносят кавитационные эффекты, а макроимпульсные параметры потока жидкости слабо определяют ход процесса.

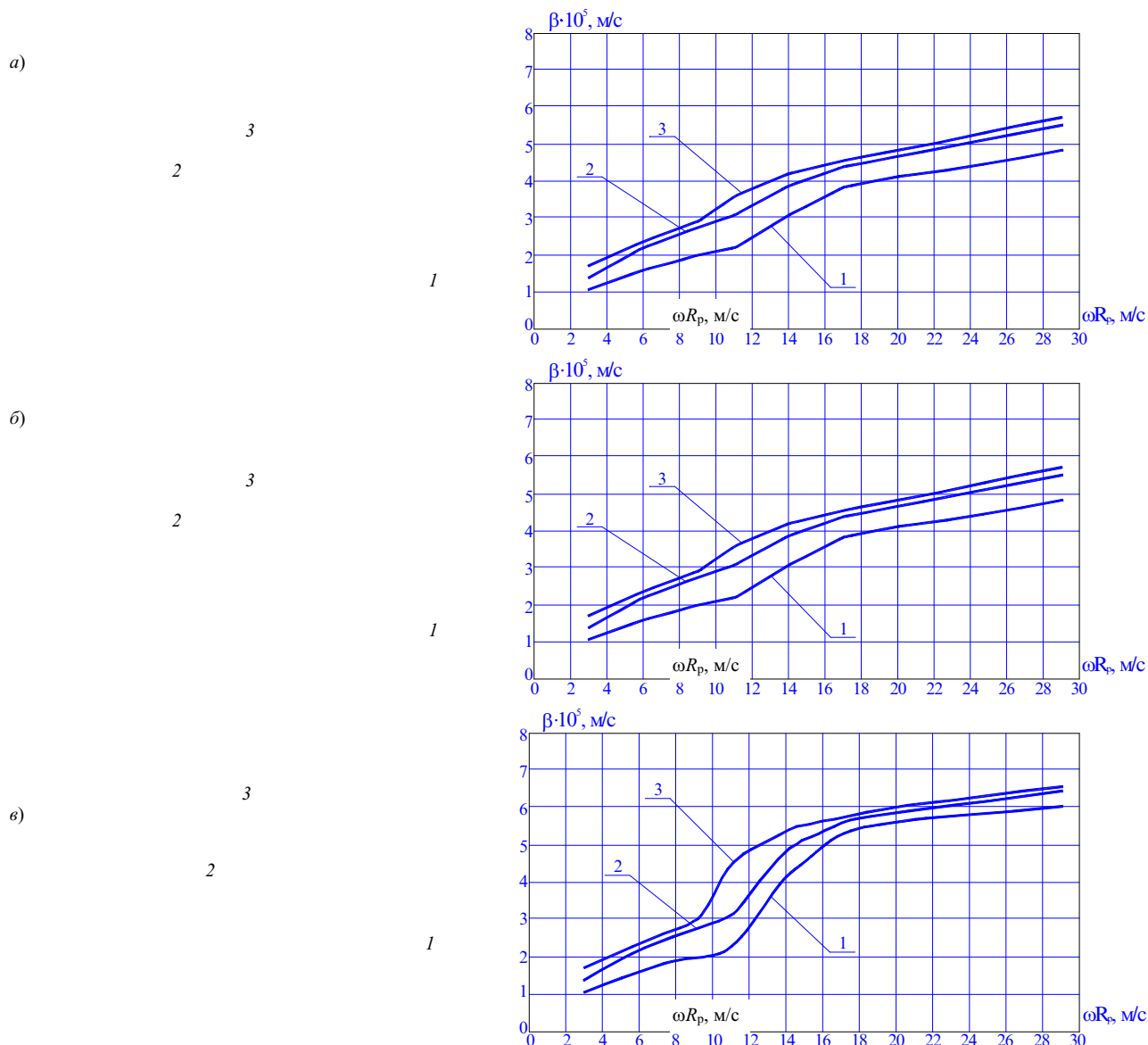


Рис. 4.4.2. Графики зависимости коэффициента массоотдачи при растворении NaCl в воде от скорости совмещения каналов ротора и статора при $R_{\text{max}} = 10^{-4}$ мм : а - $P_k = 0,5 \cdot 10^5$ Па; б - $P_k = 1,5 \cdot 10^5$ Па; в - $P_k = 2,5 \cdot 10^5$ Па; 1 - $\Delta P = 0,5 \cdot 10^5$ Па; 2 - $\Delta P = 0,7 \cdot 10^5$ Па; 3 - $\Delta P = 1 \cdot 10^5$ Па

Тем не менее, интенсивность кавитации зависит от динамических и кинематических параметров потока жидкости в прерывателе аппарата. Качественные изменения, перелом кривых графиков на рис. 4.4.2 и 4.4.3, обусловлены новым качественным уровнем интенсификации процесса растворения - кавитационными эффектами.

Начиная со значений $\omega R_p \approx 10 \div 12$ м/с резко увеличивается количество кавитационных пузырьков, увеличивается объем кавитационного кластера, возрастает плотность энергии элементарного объема жидкости ν_0 . Этот процесс численно характеризуется индексом кавитации k . Увеличение давления в канале статора, повышает потенциальную энергию кавитационного пузырька при пульсациях и схлопывании с выбросом кумулятивной струйки, т.е. происходит трансформация потенциальной энергии в кинетическую. Таким образом, при кавитационной обработке гетерогенная жидкость подвергается

многофакторному, высокоэнергетическому, дискретному во времени и в пространстве, воздействию.

Расчет кинетических закономерностей процесса экстрагирования и растворения, как одного из типов экстрагирования, необходимо проводить с учетом процесса диспергирования твердых частиц при контакте с рабочими поверхностями ротора и статора. Основная стадия процесса растворения осуществляется в канале статора за счет многофакторного воздействия на твердые частицы.

Алгоритм расчета выглядит следующим образом. Определяется экспериментально или считается уже известным гранулометрический состав растворяемого вещества. При этом необходимо выполнить условие ограничения по размерам твердых частиц и отсеять все частицы, наибольший размер которых превышает ширину канала ротора. Затем производится аппроксимация гранулометрического состава кривой распределения по размерам, и определяются параметры распределения. После этого, в соответствии с механизмом, описывающим процесс разрушения твердых частиц при прохождении их через ПАРТ, определяется конечный гранулометрический состав диспергированных частиц, и определяются параметры конечной кривой распределения по размерам частиц.

Функция $\varphi(d_0)$, описывающая конечный состав твердых частиц подставляется в уравнение (4.4.8) и определяется функция $y(\Delta d)$. По уравнению (4.4.5) определяется величина коэффициента массоотдачи β . При этом считаются известными геометрические и режимные параметры ПАРТ и физико-химические параметры сплошной фазы.

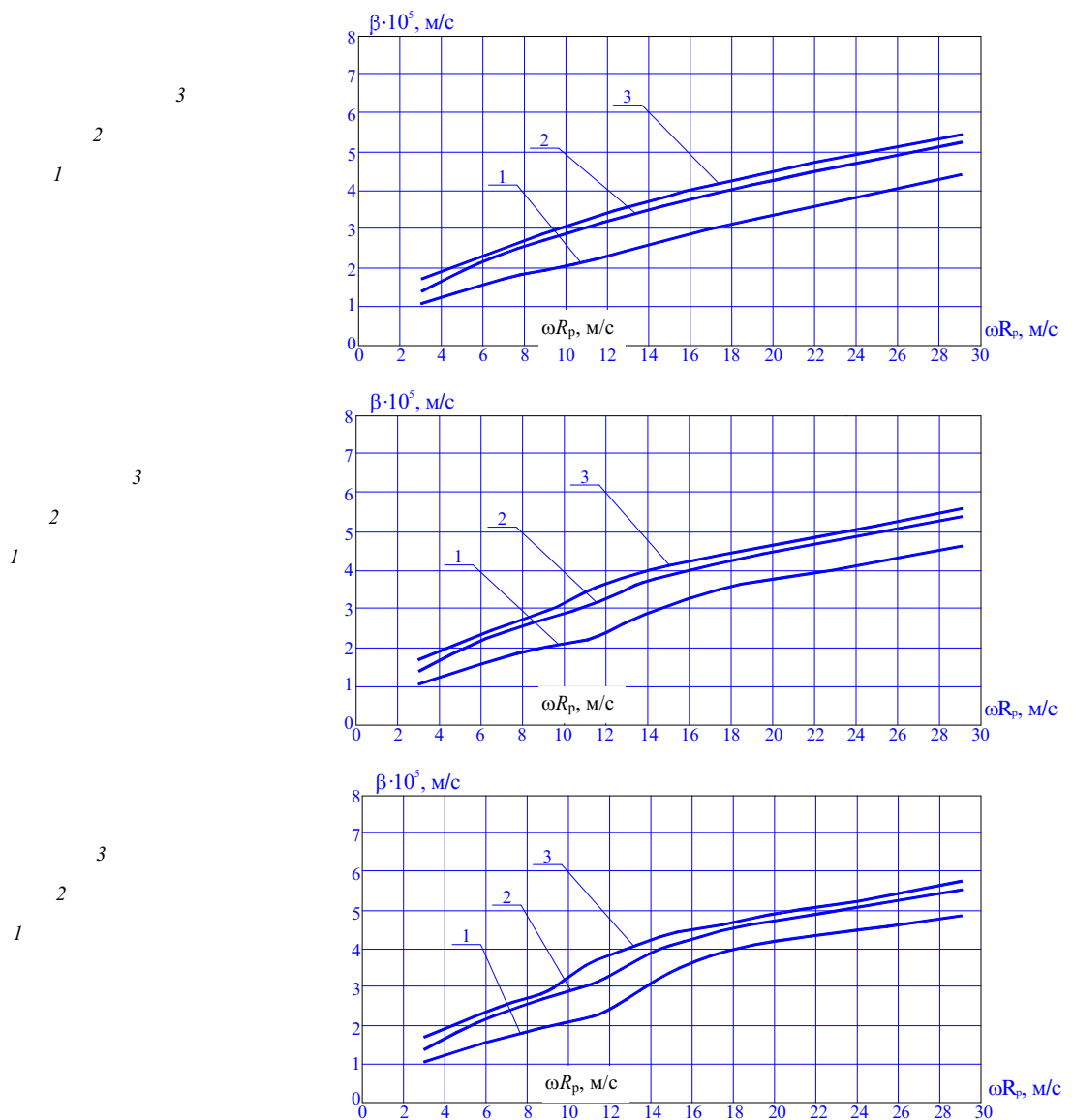


Рис. 4.4.3. Графики зависимости коэффициента массоотдачи при растворении NaCl в воде от скорости совмещения каналов ротора и статора при $R_{\max} = 10^{-3}$ мм :

$$a - P_k = 0,5 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad b - P_k = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad v - P_k = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$1 - \Delta P = 0,5 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad 2 - \Delta P = 0,7 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad 3 - \Delta P = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

Подставив значение коэффициента массоотдачи в уравнение (4.4.9) определяется зависимость $\Delta d(t)$. Решая совместно уравнения (4.4.8) и (4.4.9) получают кинетическую зависимость процесса растворения в ПАРТ - $y(t)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 4

1. Кафаров В. В. Основы массопередачи. М.: Высш. шк., 1979. 439 с.
2. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. Изд. 2-е. В 2-х кн. Ч. 2. Массообменные процессы и аппараты. М.: Химия, 1995. 368 с.
3. Долинский А. А., Накорчевский А. И. Принципы оптимизации массообменных технологий на основе метода дискретно-импульсного ввода энергии // Пром. теплотехника. 1997. Т. 19. № 6. С. 5 - 9.
4. Дискретно-импульсный ввод энергии в теплотехнологиях / А. А. Долинский, Б. И. Басок, С. И. Гулый и др. Киев: ИТТФ НАНУ, 1996. 206 с.

5. *Долинский А. А., Иваницкий Г. К.* Принципы разработки новых энергосберегающих технологий и оборудования на основе методов дискретно-импульсного ввода энергии // Пром. теплотехника. 1997. Т. 19. № 4-5. С. 13 - 25.
6. *Долинский А. А.* Использование принципа дискретно-импульсного ввода энергии для создания эффективных энергосберегающих технологий // Инж.-физ. журнал, 1996. Т. 69. № 6. С. 885 - 896.
7. *Долинский А. А., Иваницкий Г. К.* Теоретическое обоснование принципа дискретно-импульсного ввода энергии. II. Модель динамики одиночного парового пузырька // Пром. теплотехника. 1995. Т. 17. № 5. С. 3 - 28.
8. *Долинский А. А., Иваницкий Г. К.* Теоретическое обоснование принципа дискретно-импульсного ввода энергии. I. Исследование поведения ансамбля паровых пузырьков // Пром. теплотехника. 1996. Т. 18. № 1. С. 3 - 20.
9. *Накорчевский А. И.* Особенности и эффективность межфазного тепломассопереноса при пульсационной организации процесса // Инж.-физ. журнал. 1998. Т. 71. № 2. С. 317 - 322.
10. *Майер В. В.* Кумулятивный эффект в простых опытах. М.: Наука, 1989. 192 с.
11. *Лаврентьев М. А., Шабат Б. В.* Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1973. 416 с.
12. *Кедринский В. К., Бесов А. С., Гутник И. Э.* Инверсия двухфазного состояния жидкости при импульсном нагружении // Доклады АН РФ. 1997. Т. 352. № 4. С. 477 - 479.
13. *Козырев С. П.* О захлопывании кавитационных камер, образованных электрическим разрядом в жидкости // Доклады АН СССР. 1968. Т. 183. № 3. С. 568 - 571.
14. *Козырев С. П.* Гидроабразивный износ металлов при кавитации. М.: Машиностроение, 1971. 240 с.
15. *Немчин А. Ф.* Новые технологические эффекты тепломассопереноса при использовании кавитации // Пром. теплотехника. 1997. Т. 19. № 6. С. 39 - 47.
16. *Клейтон В.* Эмульсии. Их теория и техническое применение / Пер. с англ. под ред. П. А. Ребиндера. М.: Иностран. лит., 1950. 680 с.
17. *Брагинский Л. Н., Бегачев В. И., Барабаш В. Н.* Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета. Л.: Химия, 1984. 336 с.
18. *Колмогоров А. Н.* О дроблении капель в турбулентном потоке // Доклады АН СССР. 1949. Т. 66. № 5. С. 825 - 828.
19. *Левич В. Г.* Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. 968 с.
20. *Эмульсии* / Пер. с англ. под ред. Ф. Шермана. Л.: Химия, 1972. 448 с.
21. *Нигматулин Р. И.* Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука 1987. 464 с.
22. *Условие неустойчивости поверхности* раздела фаз жидкость-жидкость в ультразвуковом поле / ВЦП. № В-50238. М., 1987. 17 с.- Пер. ст. Tal-Figiel V. из журн.: Inzynieria chemiczna procesowa. 1986. № 4. Р. 637 - 652.
23. *Недужий С. А.* О характере возмущений, вызывающих образование дисперсной фазы в акустическом поле // Акуст. журнал. 1964. Т. 10. № 4. С. 157 - 159.
24. *Недужий С. А.* Исследование процесса образования эмульсии, вызываемого действием ультразвука: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МИХМ, 1963. 16 с.
25. *Кардашев Г. А., Михайлов Л. Е.* Тепломассообменные акустические процессы и аппараты. М.: Машиностроение, 1973. 223 с.
26. *Салосин А. В.* Исследование работы магнитоэлектрических аппаратов для проведения процессов эмульгирования: Дис. ... канд. техн. наук. М.: МИХМ, 1969. 176 с.
27. *Ламекин Н. С.* Математическая модель диспергирования с учетом кавитации // Теор. основы хим. технол. 1987. Т. 21. № 5. С. 709-710.
28. *Сиденко П. М.* Измельчение в химической промышленности. М.: Химия, 1977. 368 с.

29. *Ходаков Г. С.* Тонкое измельчение строительных материалов. М.: Изд-во лит-ры по строит-ву, 1972. 238 с.
30. *Ермилов П. И.* Диспергирование пигментов. М.: Химия, 1971. 300 с.
31. *Кафаров В. В., Дорохов И. Н., Арутюнов С. Ю.* Системный анализ процессов химической технологии. Кн. 5: Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов. М.: Наука, 1985. 440 с.
32. *Ребиндер П. А.* Избранные труды. Физико-химическая механика. М.: Наука, 1979. 384 с.
33. *Качанов Л. Н.* Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. 311 с.
34. *Партон В. З., Борисковский В. Г.* Динамическая механика разрушения. М.: Машиностроение, 1985. 263 с.
35. *Новицкий Б. Г.* Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. М.: Химия, 1983. 192 с.
36. *Балабудкин М. А.* Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности. М.: Медицина, 1983. 160 с.
37. *Белоглазов И. Н.* Твердофазные экстракторы. Л.: Химия, 1985. 240 с.
38. *Аксельруд Г. А., Молчанов А. Д.* Растворение твердых веществ. М.: Химия, 1977. 272 с.
39. *Романков С. П., Курочкина М. И.* Экстрагирование из твердых материалов. Л.: Химия, 1983. 256 с.
40. *Рудобахта С. П.* Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия, 1980. 248 с.
41. *Шервуд Т., Пигфорд Р. Л., Уилки Ч.* Массопередача / Пер. с англ. под ред. В. А. Малюсова. М.: Химия, 1982. 696 с.
42. *Романков П. Г., Фролов В. Ф.* Массообменные процессы химической технологии. Л.: Химия, 1990. 384 с.
43. *Общий курс* процессов и аппаратов химической технологии / Под ред В. Г. Айнштейна. М.: Химия, 1999. Кн. 2. 888 с.
44. *Аксельруд Г. А.* Массообмен в системе твердое тело - жидкость. Львов: Изд-во Львовского ун-та, 1970. 186 с.
45. *Аксельруд Г. А., Лысянский В. М.* Экстрагирование (система твердое тело - жидкость). Л.: Химия, 1974. 256 с.
46. *Вигдорчик Е. М., Шейнин А. Б.* Математическое моделирование непрерывных процессов растворения. Л.: Химия, 1971. 248 с.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ РОТОРНОГО ТИПА

Теоретические модели гидродинамических и гидроакустических процессов, разработанные в предыдущих главах, требуют экспериментальной проверки. Сложность экспериментального исследования этих процессов заключается в их взаимосвязанности и влиянии друг на друга. Эту сложность мы пытались преодолеть с помощью системного подхода и выявления параметров, существенным образом влияющих на исследуемый процесс.

5.1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

НЕОБХОДИМОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ БОЛЬШОГО НАБОРА ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОТРЕБОВАЛА РАЗРАБОТКИ СПЕЦИАЛЬНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА, СХЕМА КОТОРОГО ПРИВЕДЕНА НА РИС 5.1.1. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ВКЛЮЧАЛ В СЕБЯ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ПАРТ 1, МЕРНЫЙ БАК 2, ПОДВОДЯЩИЙ 3 И ОТВОДЯЩИЙ 4 ТРУБОПРОВОДЫ, ЛИНИЮ БАЙПАСА 5, ЛИНИИ ПОДВОДА ВОДЫ 6 И СЛИВА ВОДЫ 7, ПАТРУБОК ОТБОРА ПРОБ 8, ПАТРУБОК УДАЛЕНИЯ ВОЗДУХА 9, СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ 10 И ПОДОГРЕВА 11. ВАЛ Парт ПРИВОДИЛИ ВО ВРАЩЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА 12 ТИПА ПБС-Т33 ЧЕРЕЗ РЕМЕННУЮ ПЕРЕДАЧУ 13. РАСХОД МОДЕЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ РЕГУЛИРОВАЛИ ВЕНТИЛЯМИ 14 - 20 И ИЗМЕРЯЛИ РАСХОДОМЕРОМ 21 МАРКИ УВК-25. ДАВЛЕНИЕ В ПОЛОСТИ РОТОРА И РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ ФИКСИРОВАЛИ ОБРАЗЦОВЫМИ МАНОМЕТРАМИ 22 И 23, ТЕМПЕРАТУРУ ЖИДКОСТИ - ТЕРМОМЕТРОМ 24 МАРКИ ЭТП-М. ЗВУКОВОЕ ДАВЛЕНИЕ В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ РЕГИСТРИРОВАЛИ ПРИ ПОМОЩИ ГИДРОФОНА 25 ИЗ ТИТАНАТА БАРИЯ. СИГНАЛ С ГИДРОФОНА ПОДАВАЛИ НА АНАЛИЗАТОР ГАРМОНИК НИЗКИХ ЧАСТОТ 26 МАРКИ С5-3 ИЛИ НА ОСЦИЛЛОГРАФ 27 МАРКИ С1-69. ЧАСТОТУ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА ИЗМЕРЯЛИ ПРИ ПОМОЩИ ТАХОМЕТРА 28 МАРКИ ТЦ-3М. ФОТОГРАФИРОВАНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В КАНАЛЕ СТАТОРА ПРОВОДИЛИ ЧЕРЕЗ СПЕЦИАЛЬНОЕ ОКОШКО. В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА ИМПУЛЬСНОГО СВЕТА ИСПОЛЬЗОВАЛИ ФОТОВСПЫШКУ 30 С ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ СВЕТОВОГО ИМПУЛЬСА 2 МКС. НАСТРОЙКУ ФОКУСА ФОТОАППАРАТА 29 ОСУЩЕСТВЛЯЛИ НАВОДКОЙ ПО "ЛАЗЕРНОМУ НОЖУ" С ПОМОЩЬЮ РУБИНОВОГО ЛАЗЕРА. МОДЕЛЬНУЮ ЖИДКОСТЬ В Парт ПОДАВАЛИ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ НАСОСОМ 31 ТИПА К45/30. НАПРЯЖЕНИЕ И СИЛУ ТОКА НА ДВИГАТЕЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА ИЗМЕРЯЛИ ВОЛЬТМЕТРОМ 32 И АМПЕРМЕТРОМ 33. ФОТОГРАФИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ПРИВЕДЕНЫ НА РИС. 5.1.2.

ГИДРОФОН ИЗ ТИТАНАТА БАРИЯ ВАТЮ БЫЛ УСТАНОВЛЕН НАПРОТИВ КАНАЛА СТАТОРА С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВДОЛЬ РАДИАЛЬНОЙ ОСИ КАНАЛА. ЗВУКОВОЕ ДАВЛЕНИЕ ПОДЧИНЯЕТСЯ ЗАКОНУ ПАСКАЛЯ, И НЕБОЛЬШОЕ ОТКЛОНЕНИЕ ОТ ОСЕВОГО НАПРАВЛЕНИЯ НЕ ВНОСИТ СУЩЕСТВЕННОГО ИСКАЖЕНИЯ В ОБЩУЮ КАРТИНУ. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ГОЛОВКА ГИДРОФОНА ИМЕЕТ ВИД ЦИЛИНДРА С ДИАМЕТРОМ 8 ММ И ВЫСОТОЙ 10 ММ. ЛИНЕЙНЫЕ РАЗМЕРЫ ГИДРОФОНА НЕ ВЛИЯЮТ НА АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, ЕСЛИ ОНИ МЕНЬШЕ $1/4$ ДЛИНЫ ВОЛНЫ В ЖИДКОСТИ [1].

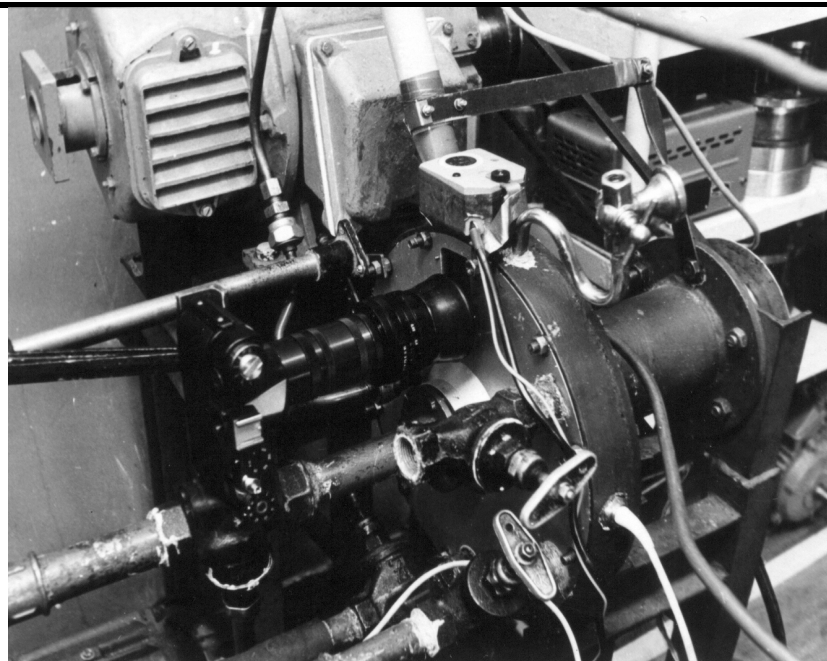


РИС. 5.1.2. ФОТОГРАФИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ИСКАЖЕНИЯ КАРТИНЫ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ ИЗ-ЗА НЕНАПРАВЛЕННОСТИ И ИЗ-ЗА НЕГАРМОНИЧНОСТИ ГЕНЕРИРУЕМЫХ ВОЛН БЫЛИ ВВЕДЕНЫ БОЛЕЕ ЖЕСТКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ - ДО $1/10$ ДЛИНЫ ВОЛНЫ. МАКСИМАЛЬНАЯ ОСНОВНАЯ ЧАСТОТА ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ В Парт БЫЛА НЕ БОЛЕЕ 1100 ГЦ, СЛЕДОВАТЕЛЬНО, ПРИ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОДЕ, РАВНОЙ 1500 М/С, ДЛИНА ВОЛНЫ ПЕРВОЙ ГАРМОНИКИ БЫЛА НЕ МЕНЕЕ 1,36 М, ЧТО УДОВЛЕТВОРЯЕТ ОГРАНИЧЕНИЯМ НА РАЗМЕРЫ ГИДРОФОНА. ПРИ ТАКИХ РАЗМЕРАХ ГИДРОФОНА ЕГО ЧАСТОТА МЕХАНИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА ЛЕЖИТ В ДИАПАЗОНЕ СОТЕН КГЦ, ЧТО ТАКЖЕ НЕ ВЛИЯЕТ НА ЧАСТОТУ ВОСПРИНИМАЕМОГО СИГНАЛА [2].

ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ЭТОГО ПОЛОЖЕНИЯ БЫЛИ ПРОИЗВЕДЕНЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ ГИДРОФОНА НА ВЕЛИЧИНУ ВОСПРИНИМАЕМОГО СИГНАЛА. НА ГИДРОФОН ИЗ ТИТАНАТА БАРИЯ БЫЛА УСТАНОВЛЕНА НАКЛАДКА С

РАЗМЕРАМИ ДИАМЕТРОМ 18 ММ И ТОЛЩИНОЙ 3 ММ. СИГНАЛ С ГИДРОФОНА ПОДАВАЛИ НА АНАЛИЗАТОР ГАРМОНИК НИЗКИХ ЧАСТОТ С5-3 И ОПРЕДЕЛЯЛИ АМПЛИТУДУ ОСНОВНОЙ ГЕНЕРИРУЕМОЙ ВОЛНЫ (ПЕРВОЙ ГАРМОНИКИ). НА РИС. 5.1.3 ПОКАЗАНЫ ГРАФИКИ АМПЛИТУДЫ ВОЛНЫ ВОСПРИНИМАЕМОГО СИГНАЛА НА ГИДРОФОНЕ С НАКЛАДКОЙ (КРИВАЯ 1) И БЕЗ НАКЛАДКИ (КРИВАЯ 2). АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ГИДРОФОНА С НАКЛАДКОЙ И БЕЗ НАКЛАДКИ ПРАКТИЧЕСКИ НЕ ИЗМЕНЯЮТСЯ. НЕБОЛЬШОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ГИДРОФОНА С НАКЛАДКОЙ ОБЪЯСНЯЕТСЯ ТЕМ, ЧТО ЕГО АКТИВНАЯ ПЛОЩАДЬ УВЕЛИЧИЛАСЬ, И ЭТО ПРИВЕЛО К УВЕЛИЧЕНИЮ СИЛЫ АКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ. КРИВАЯ 3 НА РИС. 5.1.3. ПОКАЗЫВАЕТ ВЕЛИЧИНУ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ МЕЖДУ ВЕЛИЧИНАМИ АМПЛИТУД СИГНАЛА ГИДРОФОНА С НАКЛАДКОЙ И БЕЗ НАКЛАДКИ. ГРАФИКИ АМПЛИТУД НА РИС. 5.1.3 ДАНЫ В ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦАХ ПОКАЗАНИЙ ПРИБОРА, ТАК КАК ПРИ СРАВНИТЕЛЬНОМ АНАЛИЗЕ НЕТ НЕОБХОДИМОСТИ ОПЕРИРОВАТЬ АБСОЛЮТНЫМИ ВЕЛИЧИНАМИ.

КРОМЕ ГИДРОФОНА ИЗ ТИТАНАТА БАРИЯ, В ИЗМЕРЕНИЯХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ИСПОЛЬЗОВАЛИ ДАТЧИК АКУСТИЧЕСКИЙ ЛХ-610 С ДИАПАЗОНОМ ИЗМЕРЯЕМЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ $(0,05 - 5,0) \cdot 10^5$ ПА, ЧАСТОТНЫМ ДИАПАЗОНОМ 30 - 10 000 ГЦ, ДИАПАЗОНОМ ИЗМЕРЯЕМЫХ УРОВНЕЙ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ 150 - 194 ДБ, ОСНОВНОЙ ПОГРЕШНОСТЬЮ 10,6 %.

ГИДРОФОН ИЗ ТИТАНАТА БАРИЯ УСТАНАВЛИВАЛИ В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ НАПРОТИВ КАНАЛА СТАТОРА С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВДОЛЬ РАДИАЛЬНОЙ ПРЯМОЙ. КРЕПЛЕНИЕ ГИДРОФОНА ОСУЩЕСТВЛЯЛОСЬ В КОРПУСЕ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ ПРИ ПОМОЩИ САЛЬНИКОВОГО УЗЛА, КОТОРЫЙ КРОМЕ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ, ВЫПОЛНЯЛ ТАКЖЕ ДЕМПФИРУЮЩИЕ ФУНКЦИИ. ИЗМЕРЕНИЕ КООРДИНАТЫ ГИДРОФОНА В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ ПРОВОДИЛИ ПРИ ПОМОЩИ МЕРНОГО УКАЗАТЕЛЯ. ДАТЧИК ЛХ-610 БЫЛ ВСТАВЛЕН В СТЕНКУ КОРПУСА РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ ЗАПОДЛИЦО СО СТОРОНЫ ВНУТРЕННЕЙ СТЕНКИ С ПОСТОЯННОЙ ФИКСАЦИЕЙ.

ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ БЫЛИ ИСПОЛЬЗОВАНЫ МЕТОДИКИ, ПРЕДЛОЖЕННЫЕ В РАБОТАХ [5 - 9]. ПРОВЕРКА ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТА ОСУЩЕСТВЛЯЛАСЬ ПО КРИТЕРИЮ КОХРЕНА [9]

$$G_p = \max D_i / \sum_{i=1}^n D_i, \quad (5.1.1)$$

ГДЕ D_i - ДИСПЕРСИЯ СМЕЩЕННАЯ; $i = 1, 2, 3, \dots, N$ - ЧИСЛО ОПЫТОВ В СЕРИИ.

ВЕЛИЧИНА G_p ЗАТЕМ СРАВНИВАЛАСЬ С ТАБЛИЧНЫМ ЗНАЧЕНИЕМ.

ДЛЯ ТОГО, ЧТОБЫ ИЗБЕЖАТЬ ПОЯВЛЕНИЯ НЕКОТОРОЙ НЕСЛУЧАЙНОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ РЕАЛИЗАЦИЕЙ КАЖДОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ИЛИ СЕРИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, ПРОВОДИЛАСЬ РАНДОМИЗАЦИЯ. ПРИ РАНДОМИЗАЦИИ ПОРЯДОК РЕАЛИЗАЦИИ ОПЫТОВ СОСТАВЛЯЕТСЯ ПРИ ПОМОЩИ ТАБЛИЦЫ СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ.

ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ПРОМЫШЛЕННОМ Парте С РАСХОДОМ ЖИДКОСТИ ДО 6 М³/Ч, ПОЗВОЛИЛО НЕ ПРИМЕНЯТЬ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПРИЕМОВ МАСШТАБИРОВАНИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ. ПРОМЫШЛЕННЫЙ Парт ТИПА

РОТОРНОГО ИМПУЛЬСНО-КАВИТАЦИОННОГО АППАРАТА (РИКА) БЫЛ РАЗРАБОТАН НА КАФЕДРЕ ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ, МАШИН И ДЕЛАЛИ МАШИН ТАМБОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА И ИЗГОТОВЛЕН НА МИЧУРИНСКОМ ЗАВОДЕ "ПРОГРЕСС".

РАЗРАБОТАННАЯ КОНСТРУКЦИЯ ХОРОШО ЗАРЕКОМЕНДОВАЛА СЕБЯ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА РЯДЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ. СБОРОЧНЫЙ ЧЕРТЕЖ РИКА-200 ПОКАЗАН НА РИС. 5.1.4.

КРОМЕ БАЗОВОЙ МОДЕЛИ РИКА-200, РЯД ЭКСПЕРИМЕНТОВ БЫЛ ПРОВЕДЕН НА ДВУХСТУПЕНЧАТОМ РОТОРНОМ АППАРАТЕ АР-1, КОНСТРУКЦИИ НПО "БИОТЕХНОЛОГИЯ"; ПРОМЫШЛЕННОМ ДИСПЕРГАТОРЕ ДР-02 И ЛАБОРАТОРНОМ ДИСПЕРГАТОРЕ КОНСТРУКЦИЙ АВТОРА, СХЕМЫ КОТОРЫХ ПОКАЗАНЫ НА РИС. 5.1.5 - 5.1.7. НИЖЕ ПРИВЕДЕНЫ ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ УКАЗАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ.

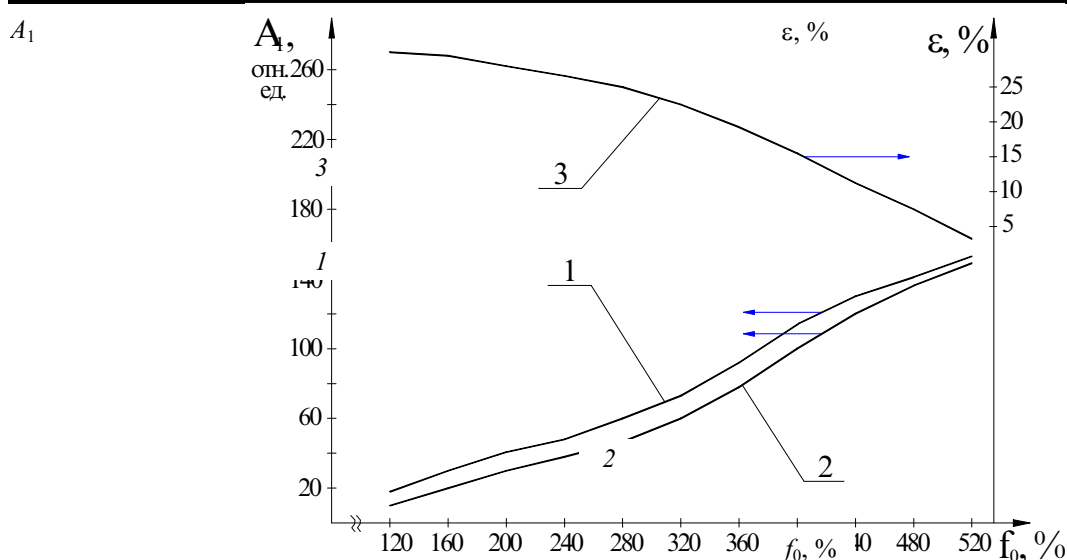


Рис. 5.1.3. График амплитудно-частотной зависимости гидрофона с накладкой (кривая 1) и без накладки (кривая 2).

Кривая 3 — величина относительной погрешности между кривыми 1 и кривой 2

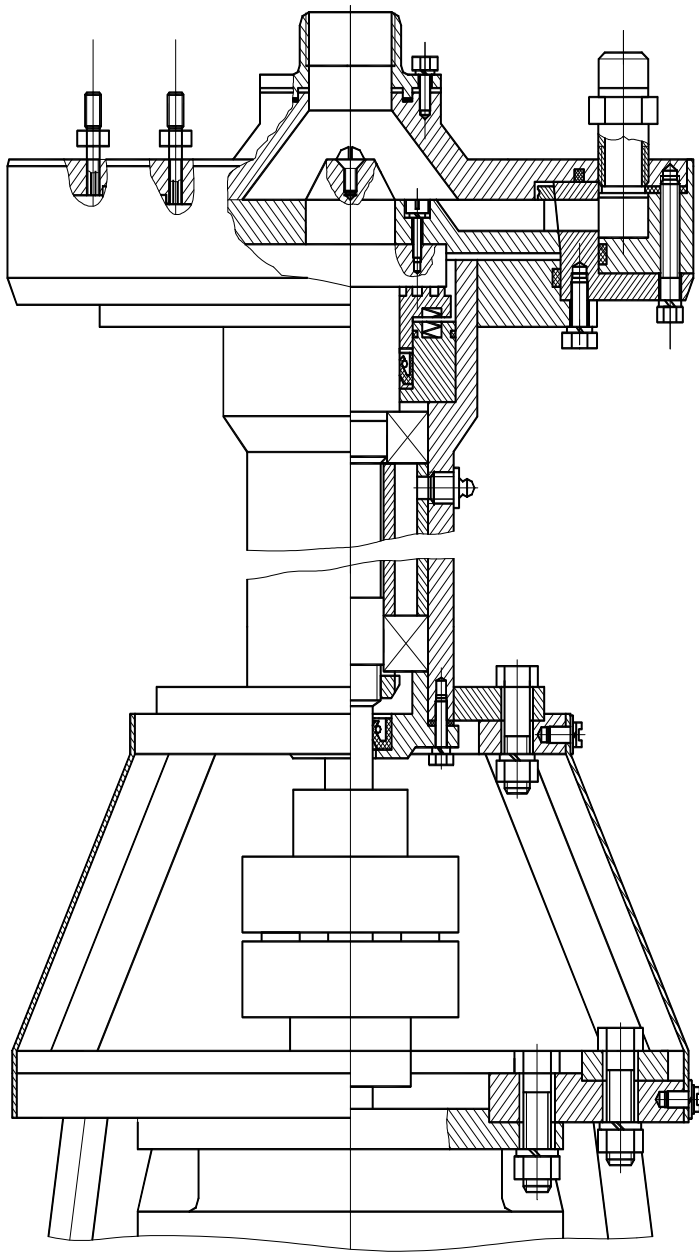


РИС. 5.1.4. РИКА-200

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РИКА-200:

РАДИУС	РОТОРА,	М	0,1	
.....				
РАДИУС РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ,	М	0,15		
.....				
ДЛИНА КАНАЛОВ СТАТОРА,	М	0,01	–	
.....		0,03		
ШИРИНА КАНАЛОВ СТАТОРА,	М	0,002		
.....				
ШИРИНА КАНАЛОВ РОТОРА,	М	0,002		
.....				
ЧИСЛО КАНАЛОВ В РОТОРЕ		20		
.....				
ЧИСЛО КАНАЛОВ В СТАТОРЕ		20		
.....				
РАСХОД ОБРАБАТЫВАЕМОЙ		0,005	–	
ЖИДКОСТИ, М³/С	0,015		
				$(0,1-2,0) \cdot 10^5$

ДАВЛЕНИЕ В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ, ПА

.....	
ЗАЗОР МЕЖДУ РОТОРОМ И СТАТОРОМ, М	0,0001 – 0,0005
УГЛОВАЯ СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА, С⁻¹	36 – 340
МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ, КВТ	2,35

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АР-1:

РАДИУС РОТОРА, М	0,1
РАДИУС РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ, М	0,2
ДЛИНА КАНАЛОВ РОТОРА, М	0,03
ДЛИНА КАНАЛОВ СТАТОРА, М	0,05
ДИАМЕТР КАНАЛОВ В РОТОРЕ И СТАТОРЕ, М	0,005
ЧИСЛО КАНАЛОВ СТАТОРА ПЕРВОЙ СТУПЕНИ	16
ЧИСЛО КАНАЛОВ РОТОРА ПЕРВОЙ СТУПЕНИ	60
ЧИСЛО КАНАЛОВ СТАТОРА ВТОРОЙ СТУПЕНИ	20
ЧИСЛО КАНАЛОВ РОТОРА ВТОРОЙ СТУПЕНИ	30
ЗАЗОР МЕЖДУ РОТОРОМ И СТАТОРОМ, М	0,0001
РАСХОД ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ЖИДКОСТИ, М³/Ч	5
ДАВЛЕНИЕ В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ, ПА	(0,1–2,0)·10⁵
УГЛОВАЯ СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА, С⁻¹	314
ПЕРЕПАД ДАВЛЕНИЙ МЕЖДУ ВХОДОМ И ВЫХОДОМ, ПА	(0,6–3,2)·10⁵
МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ, КВТ	4

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АР-1 ЗАКЛЮЧАЮТСЯ В ТОМ, ЧТО АППАРАТ ИМЕЕТ ДВЕ СТУПЕНИ ОБРАБОТКИ ЖИДКОСТИ:

- 1) С ЖЕСТКИМ КАВИТАЦИОННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ;**
- 2) С МЯГКИМ КАВИТАЦИОННЫМ И ИНТЕНСИВНЫМ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ.**

ПРИ ЖЕСТКОМ КАВИТАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ОБРАБАТЫВАЕМАЯ ЖИДКОСТЬ ЧЕРЕЗ ОБВОДНЫЕ ЗАВИХРЯЮЩИЕ ТРУБКИ ПОПАДАЕТ В КОНИЧЕСКУЮ РЕЗОНАНСНУЮ КАМЕРУ И ВЫВОДИТСЯ ИЗ АППАРАТА. ДЛЯ МЯГКОГО КАВИТАЦИОННОГО И ИНТЕНСИВНОГО ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБВОДНЫЕ ТРУБКИ ПЕРЕКРЫВАЮТСЯ, И ЖИДКОСТЬ ИЗ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ ПЕРЕХОДИТ В РЕЗОНАНСНУЮ КАМЕРУ ЧЕРЕЗ ВТОРУЮ СТУПЕНЬ.

ОДНОЙ ИЗ СЛОЖНЫХ ЗАДАЧ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЯВЛЯЕТСЯ ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ. СЛОЖНОСТЬ ЗАКЛЮЧАЕТСЯ В ТОМ, ЧТО КАВИТАЦИОННЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ ВОЗНИКАЮТ И ИСЧЕЗАЮТ ЗА ОДИН ПЕРИОД ОСНОВНЫХ КОЛЕБАНИЙ В КАНАЛЕ СТАТОРА. ПРИ КАЖДОМ СОВПАДЕНИИ И ПЕРЕКРЫТИИ КАНАЛА СТАТОРА ВОЗНИКАЮТ, РАЗВИВАЮТСЯ И КОЛЛАПСИРУЮТ НОВЫЕ КАВИТАЦИОННЫЕ ПУЗЫРЬКИ. ЕСЛИ ПУЗЫРЬКИ НЕ СХЛОПНУЛИСЬ ЗА ОДИН ПЕРИОД, ТО ОНИ ВЫНОСЯТСЯ ИЗ КАНАЛА СТАТОРА И СХЛОПЫВАЮТСЯ В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ.

СЛОЖНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ ЗАКЛЮЧАЕТСЯ ЕЩЕ И В ТОМ, ЧТО КАВИТАЦИЯ ВОЗНИКАЕТ В ДВИЖУЩЕМСЯ ПОТОКЕ, И ПРИ ЭТОМ ЖИДКОСТЬ ПОДВЕРГАЕТСЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМУ СЖАТИЮ И РАЗРЕЖЕНИЮ, ТО ЕСТЬ, КОЛЕБАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ЯВЛЯЮТСЯ ПСЕВДОЗВУКОВЫМИ И ПРИЕМНИК ЗВУКА, ДВИЖУЩИЙСЯ СО СКОРОСТЬЮ ПОТОКА НЕ БУДЕТ РЕГИСТРИРОВАТЬ ИЗМЕНЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ [3, 4].

Мощность, потребляемую РИКА-200, измеряли по методике, рекомендуемой в работе [10]. Вращающий момент на валу ротора пропорционален магнитному потоку и току в обмотке якоря двигателя постоянного тока независимого возбуждения:

$$M_{кр} = \kappa_M \Phi I_{я}, \quad (5.1.2)$$

где $M_{кр}$ - вращающий момент на валу электродвигателя, Н м; κ_M - кратность пускового момента; Φ - магнитный поток, Вб; $I_{я}$ - ток в обмотке якоря, А.

Если принять, что в электродвигателе магнитный поток постоянен, $\Phi = \text{const}$, то можно записать по [10]:

$$M_{кр} = C_M I_{я}. \quad (5.1.3)$$

Коэффициент C_M находится по формуле

$$C_M = 9,55 (U_n - I_{ня} R_{я}) / n_n, \quad (5.1.4)$$

где U_n - нормальное напряжение, В; $I_{ня}$ - нормальный ток якоря, А; $R_{я}$ - сопротивление обмотки якоря, Ом; n_n - нормальная частота вращения вала электродвигателя, мин⁻¹.

Ток якоря измеряли амперметром типа М42100. Потребляемую мощность определяли по формуле:

$$N = M_{кр}\omega \quad (5.1.5)$$

5.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ СТАТОРА РОТОРНОГО ИМПУЛЬСНО-КАВИТАЦИОННОГО АППАРАТА

5.2.1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В КАНАЛЕ СТАТОРА

В главе 2 было обосновано утверждение, что наиболее активным технологическим объемом РИКА является канал статора, так как объем жидкости, протекающей через зазор между ротором и статором, значительно меньше объема жидкости, протекающей через канал статора. Кроме того, гидроакустический и гидромеханический импульсы направлены в канал статора, и вся обрабатываемая жидкость проходит через канал статора. Поэтому одним из важных объектов для исследования технологических параметров жидкости являются гидродинамические характеристики потока жидкости в канале статора. В первую очередь нас будут интересовать скорость и ускорение потока жидкости и закономерности их изменения. Наибольшее влияние на интенсивность ХТП оказывают пульсации давления и скорости потока жидкости. Мерой изменения скорости является ускорение потока прямо пропорциональное динамическому давлению.

Закономерности изменения давления в потоке жидкости в канале статора за период цикла пульсации в РИКА исследовались на экспериментальном стенде, описанном в параграфе 5.1. Пульсации давления измерялись при помощи гидрофона, сигналы с которого подавались на осциллограф и фотографировались. Фотографии полученных осциллограмм показаны на рис. 5.2.1.

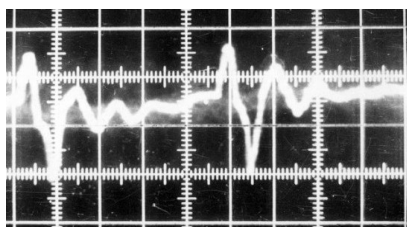
Фотографии осциллограмм, полученные при различных коэффициентах горизонтальной и вертикальной разверток (времени и амплитуды) не позволяют провести прямой сравнительный анализ различных режимов. Поэтому наиболее типичный вид осциллограмм пульсаций давлений представлен в графической форме на рис. 5.2.2 и 5.2.3. Здесь временная шкала приведена с единым коэффициентом. По оси ординат отложена величина напряжения, снимаемого с гидрофона. Перевод из значений напряжения в значения давления осуществляется при помощи переводного коэффициента, одинакового для всех рисунков. Детальный анализ осциллограмм возможен только до $\omega R_p = 16,3$ м/с. При режимах с $\omega R_p > 16,3$ м/с пульсации давления кавитационных пузырьков накладываются на осциллограммы импульсов давления потока жидкости и возможно проведение только качественного анализа. Чем выше угловая скорость ротора, тем интенсивнее кавитация и сложнее различить на осциллограмме кривую импульсов давления потока жидкости в канале статора. Для удобства анализа изменения давления за период цикла генерирования колебаний в канале статора, построены рис. 5.2.4 и 5.2.5, на которых показаны кривые осциллограмм пульсаций давления за один период.

Изменения давления в полости ротора и расхода жидкости через аппарат не влияют на характер кривых осциллограмм. Импульсы давления передаются со скоростью звука в жидкости. Длина волны во много раз превосходит расстояние от входа в канал статора до гидрофона, и изменение этого расстояния ($l_{гидр}$) не влияет на величину и форму пульсаций давления.

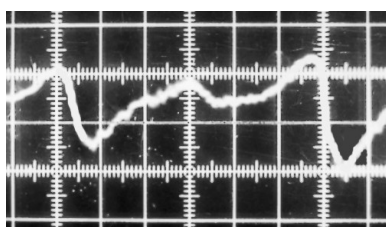
Наиболее правильным представляется проведение сравнительного анализа осциллограмм, построенных за один период цикла колебаний. При большой длительности периода цикла наблюдается несколько "внутренних" колебаний давления в канале статора в период времени, когда канал статора перекрыт стеной ротора. По мере уменьшения длительности периода цикла колебаний количество и амплитуда внутренних колебаний давления уменьшается.

Экспериментальные осциллограммы и их схематическое изображение на рис. 5.2.1 - 5.2.5 удовлетворительно совпадают с расчетными зависимостями колебания давления в канале статора за период времени $[0, t_2]$, полученными в соответствии с моделью (2.4.10). Особенно хорошо это заметно при малых угловых скоростях ротора и не сильно развитой кавитации.

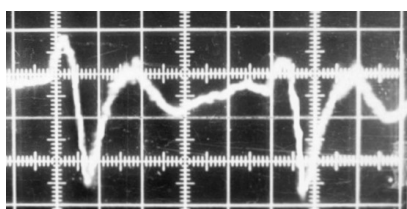
При больших угловых скоростях импульсы давления кавитационных пузырьков накладываются на кривую осциллограммы изменения давления в канале статора и размывают основную кривую. Несмотря на то, что при малых угловых скоростях ротора кавитационные всплески не прослеживаются на осциллограммах, в жидкости все равно находятся кавитационные пузырьки, и среда является гомогенной жидкостно-газовой средой. То есть, газовые пузырьки равномерно распределены в жидкости, и скорость звука в этом случае соответственно ниже.



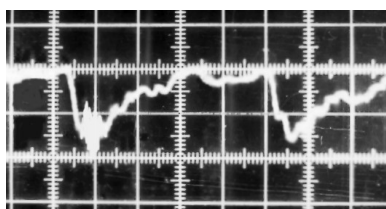
$$n = 6 \text{ об/с}, \quad \omega R = 3,8 \text{ м/с}, \\ A = 2 \text{ мВ/см}, \quad \tau = 2 \text{ мС/см}.$$



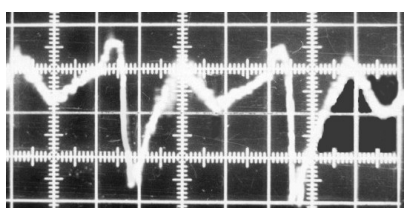
$$n = 18 \text{ об/с}, \quad \omega R = 11,3 \text{ м/с}, \\ A = 5 \text{ мВ/см}, \quad \tau = 0,5 \text{ мС/см}.$$



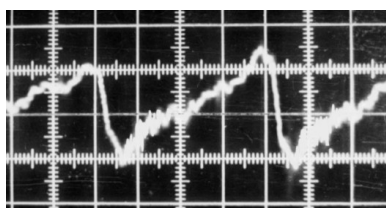
$$n = 10 \text{ об/с}, \quad \omega R = 6,28 \text{ м/с}, \\ A = 2 \text{ мВ/см}, \quad \tau = 1 \text{ мС/см}.$$



$$n = 22 \text{ об/с}, \quad \omega R = 13,8 \text{ м/с}, \\ A = 5 \text{ мВ/см}, \quad \tau = 0,5 \text{ мС/см}.$$

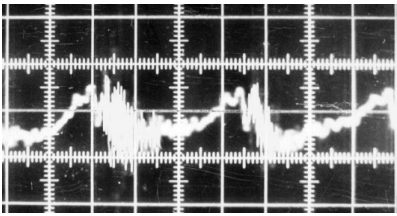


$$n = 14 \text{ об/с}, \quad \omega R = 8,8 \text{ м/с}, \\ A = 2 \text{ мВ/см}, \quad \tau = 1 \text{ мС/см}.$$

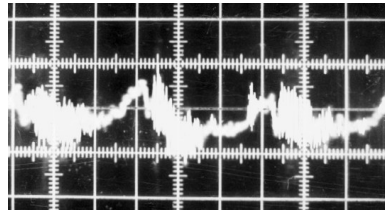


$$n = 26 \text{ об/с}, \quad \omega R = 16,3 \text{ м/с}, \\ A = 5 \text{ мВ/см}, \quad \tau = 0,5 \text{ мС/см}.$$

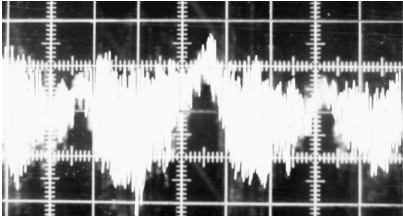
Рис. 5.2.1. Осциллограммы импульсов давления



$$n = 30 \text{ об/с}, \quad \omega R = 18,8 \text{ м/с}, \\ A = 10 \text{ мВ/см}, \quad \tau = 0,5 \text{ мС/см}.$$



$$n = 34 \text{ об/с}, \quad \omega R = 21,4 \text{ м/с}, \\ A = 10 \text{ мВ/см}, \quad \tau = 0,5 \text{ мС/см}.$$



$$P_p = 1,48 \text{ атм}; \quad P_c = 0,68 \text{ атм}; \\ Q = 4,32 \text{ м}^3/\text{ч}; \quad t = 20^\circ\text{C}; \quad l_{\text{гидр}} = 30 \text{ мм}.$$

$$n = 38 \text{ об/с}, \quad \omega R = 24,0 \text{ м/с}, \\ A = 10 \text{ мВ/см}, \quad \tau = 0,5 \text{ мС/см},$$

Продолжение рис. 5.2.1

Детальный анализ графиков теоретической модели и реальных осциллограмм показывает, что модель адекватна не только качественно, но и количественно, так как количество "переколебаний", форма кривых, абсолютные значения давления в одни и те же моменты времени дают хорошее совпадение.

Рис. 5.2.6 получен по данным, снятым с рис. 5.2.4 и 5.2.5. Здесь показан график зависимости максимальной амплитуды импульса давления (по модулю) в канале статора от линейной скорости совмещения канала ротора с каналом статора. График подтверждает данные численного решения уравнения Бернулли (2.4.3), описывающего процесс изменения ускорения жидкости, и, следовательно, генерируемого прерывателем аппарата давления. Расчетные значения максимальной амплитуды импульса давления при различных β показывают, что величину этого коэффициента при решении уравнения (2.4.3) надо брать в пределах 0,2 - 0,3. Если экстраполировать график до $\omega R_p = 0$ м/с, то мы получим значения $|P_{\text{имп}}|_{\text{max}} \approx 0,3 \cdot 10^5$ Па. Практически такого быть не может, но теоретически это объясняется тем, что при $\omega R_p \rightarrow 0$ существует некоторое значение перепада давления между входом и выходом прерывателя аппарата, которое обусловлено давлением, создаваемым внешним источником, то есть центробежным насосом. В случае отсутствия внешнего источника, кривая на рис. 5.2.6 выходила бы из начала координат, так как перепад давления (движущая сила) создавался бы только за счет центробежных сил, как это было показано в работе [11]. Значения перепада давления на рис. 5.2.6 являются суммарными, полученными по измерению давления в полости ротора и камере статора.

$$\omega R_p = 3,8 \text{ м/с}; \\ f = 120 \text{ Гц}; \\ T = 8,33 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \\ 1 \text{ мВ} = 6 \cdot 10^3 \text{ Па}.$$

$$\omega R_p = 8,88 \text{ м/с}; \\ f = 280 \text{ Гц}; \\ T = 3,57 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \\ 1 \text{ мВ} = 6 \cdot 10^3 \text{ Па}.$$

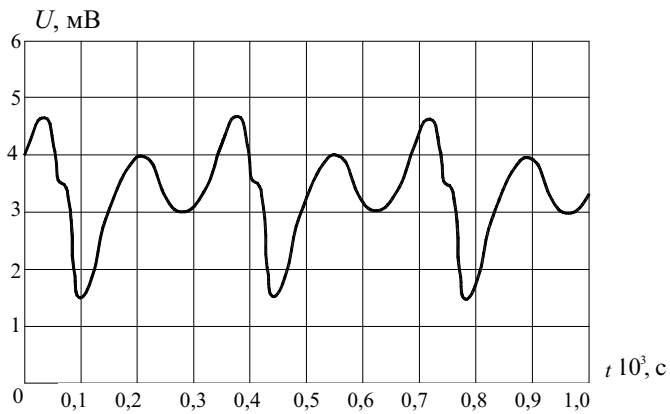
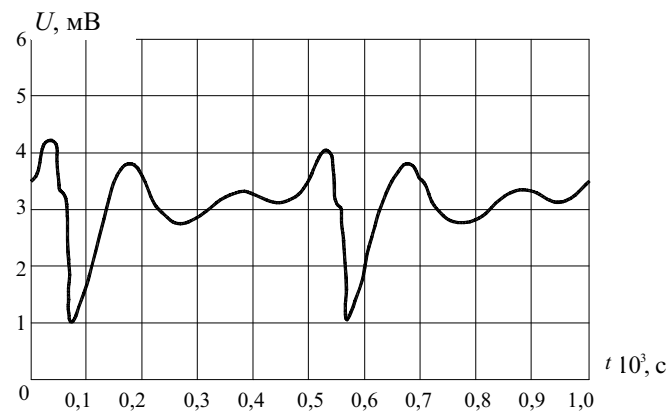
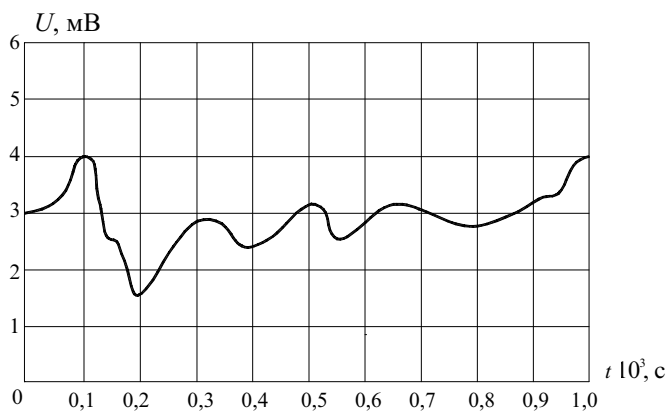


Рис. 5.2.2. Схемы экспериментальных осциллограмм

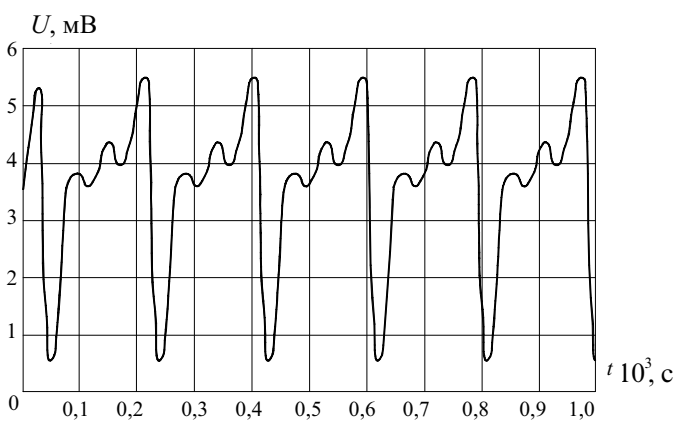
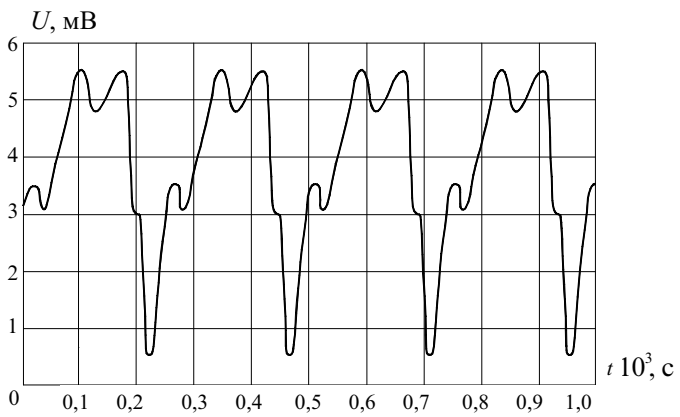
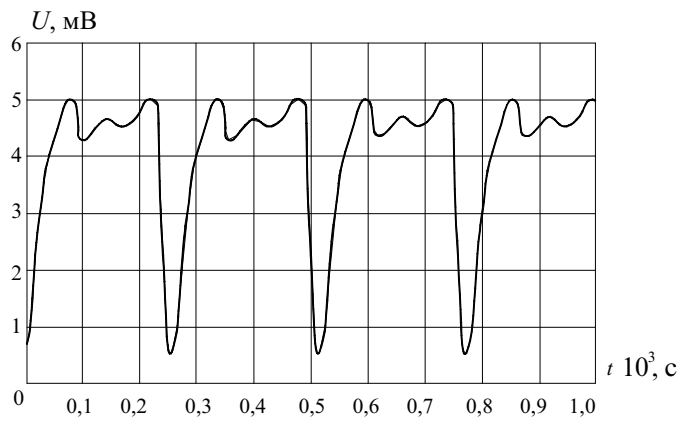


Рис. 5.2.3. Схемы экспериментальных осциллограмм

$\omega R_p = 3,8 \text{ м/с};$
 $f = 120 \text{ Гц};$
 $T = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ с};$
 $1 \text{ мВ} = 6 \cdot 10^3 \text{ Па}.$

$\omega R_p = 6,28 \text{ м/с};$
 $f = 200 \text{ Гц};$
 $T = 5,28 \cdot 10^{-3} \text{ с};$
 $1 \text{ мВ} = 3,57 \cdot 10^3 \text{ Па};$
 $1 \text{ мВ} = 6 \cdot 10^3 \text{ Па}.$

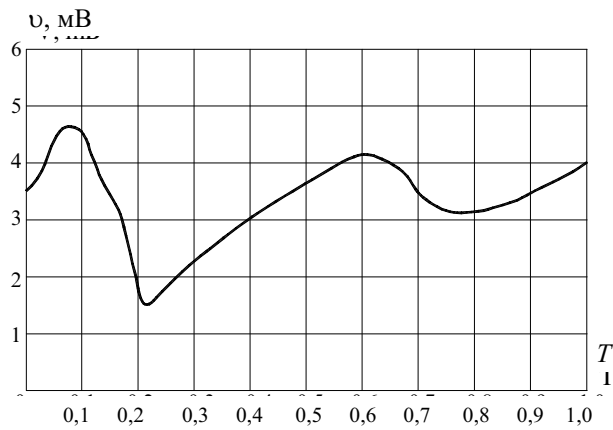
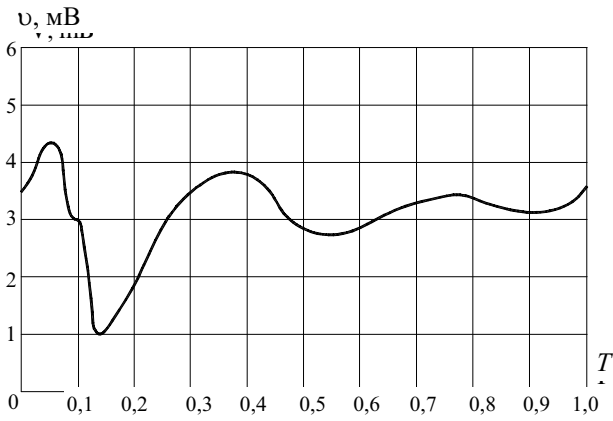
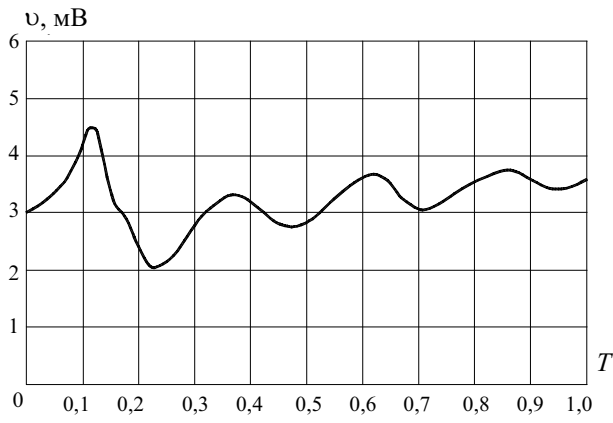


Рис. 5.2.4. Схемы экспериментальных осциллограмм

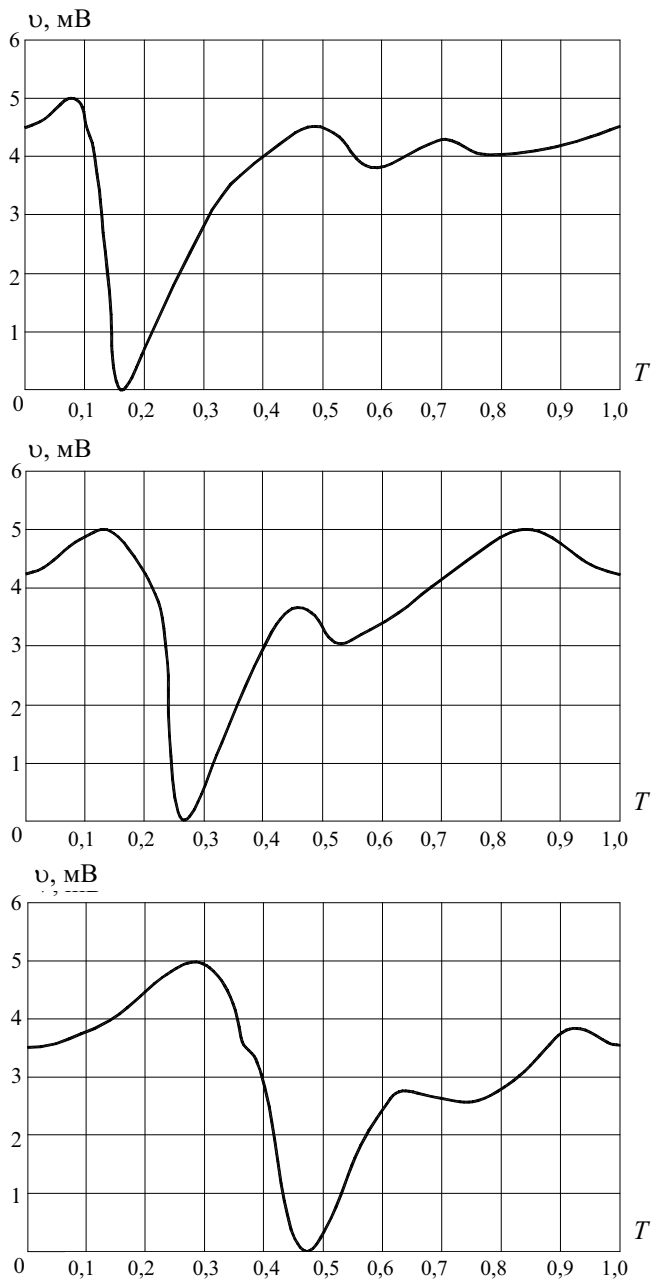


Рис. 5.2.5. Схемы экспериментальных осциллограмм

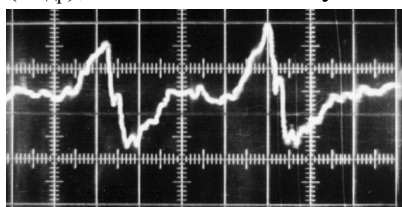
5.2.2. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЖИДКОСТИ НА ПОГЛОЩЕНИЕ ГЕНЕРИРУЕМОЙ ВОЛНЫ

Изменение температуры жидкости вызывает изменение ее характеристик: вязкости, плотности, поверхностного натяжения, давления насыщенных паров и газосодержания. При увеличении температуры увеличивается газосодержание и давление насыщенных паров и уменьшается плотность и вязкость жидкости. Изменение этих параметров приводит к росту парогазовых пузырьков, содержащихся в жидкости. Демпфирующий эффект за счет увеличения неоднородности жидкости увеличивается, и излучаемая волна при прохождении через гетерогенную жидкую среду поглощается более интенсивно.

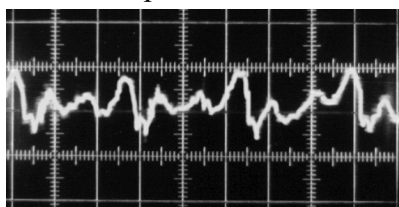
Анализ результатов численного решения нестационарного уравнения Бернулли (2.4.3) при изменении параметров вязкости и плотности показывает, что с уменьшением плотности и вязкости жидкости наблюдается некоторое уменьшение величины d^2V/dt^2 , пропорциональной давлению в генерируемой волне.

Экспериментальные исследования по выявлению влияния температуры жидкости на величину амплитуды генерируемой волны проводились на экспериментальном стенде (параграф 5.1.). Методика проведения экспериментов заключалась в том, что свежую, охлажденную до 13 - 15 °С воду заливали в бак и подогревали электронагревателем. Для равномерного нагрева жидкость циркулировала по замкнутому контуру через РИКА, бак и насос. В процессе циркуляции жидкости, ее температура плавно повышалась. При увеличении температуры жидкости на 5 °С проводили фотографирование сигнала, поступающего с гидрофона на осциллограф. Фотографии полученных осциллограмм показаны на рис. 5.2.7 и 5.2.8.

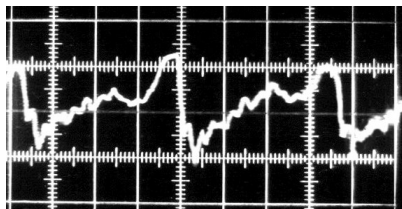
Анализ осциллограмм генерируемых импульсов показывает, что при увеличении температуры возрастает влияние нелинейных факторов, влияющих на распространение волны в жидкости. Наблюдается изменение формы волны, она становится более некогерентной, более изломанной. Одновременно с этим происходит уменьшение ее амплитуды. График зависимости отношения амплитуды волны, измеренной при определенной температуре к амплитуде волны, измеренной при $t = 15$ °С, при изменении температуры показан на рис. 5.2.9. Угловая скорость ротора и, следовательно, частота и период генерируемой волны не влияют на интенсивность поглощения волны. Исследования проводились на режимах без интенсивного развития кавитации. Падение амплитуды импульсов давления при увеличении температуры жидкости с 20 до 50 °С носит линейный характер. Расстояние, на котором производилось измерение амплитуды генерируемой волны ($l_{\text{гидр}}$), не влияет на полученные закономерности.



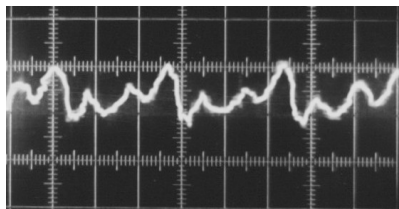
$t = 15$ °С, $\tau = 1$ мин



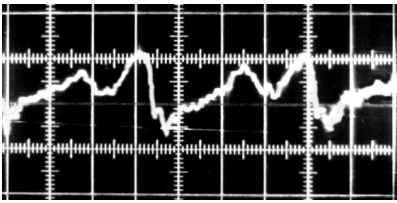
$t = 35$ °С, $\tau = 11$ мин



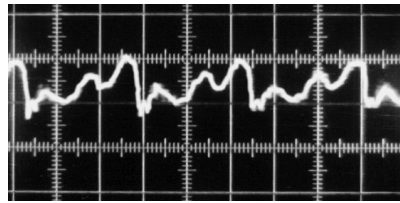
$t = 20$ °С, $\tau = 4$ мин



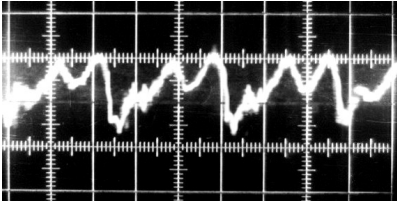
$t = 40$ °С, $\tau = 14$ мин



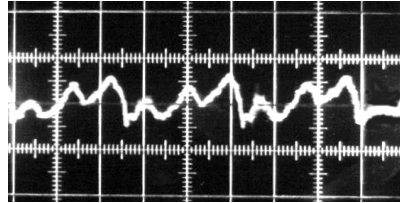
$t = 25 \text{ }^\circ\text{C}, \tau = 7 \text{ мин}$



$t = 45 \text{ }^\circ\text{C}, \tau = 18 \text{ мин}$



$t = 30 \text{ }^\circ\text{C}, \tau = 9 \text{ мин}$



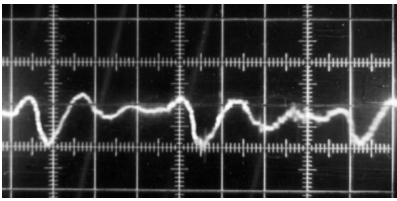
$t = 50 \text{ }^\circ\text{C}, \tau = 24 \text{ мин}$

$n = 26 \text{ об/с}; \omega R_p = 16,3 \text{ м/с};$

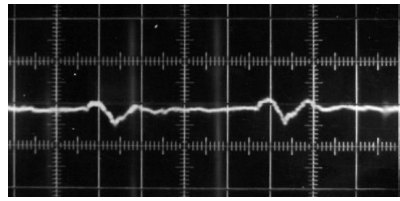
$P_p = 1,46 \text{ атм}; P_c = 0,68 \text{ атм}; Q = 4,2 \text{ м}^3/\text{ч};$

$l_{\text{гидр}} = 40 \text{ мм}; A = 5 \text{ мВ/см}; \tau_p = 2 \text{ мС/см}.$

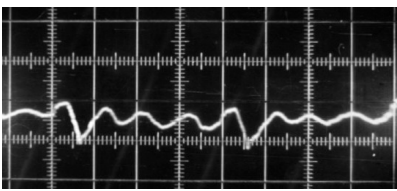
Рис. 5.2.7. Осциллограммы импульсов давления



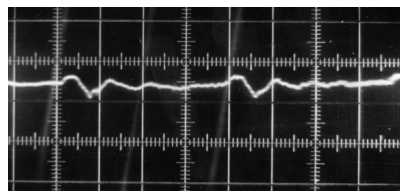
$t = 13 \text{ }^\circ\text{C}, \tau = 1 \text{ мин}$



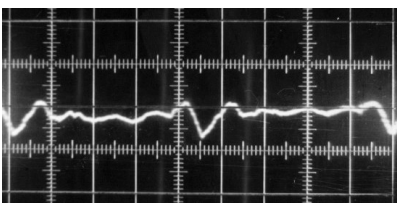
$t = 35 \text{ }^\circ\text{C}, \tau = 16 \text{ мин}$



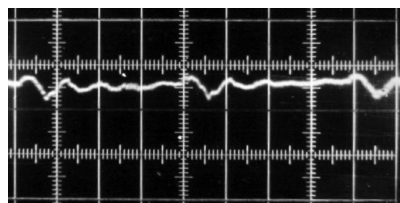
$t = 16 \text{ }^\circ\text{C}, \tau = 4 \text{ мин}$



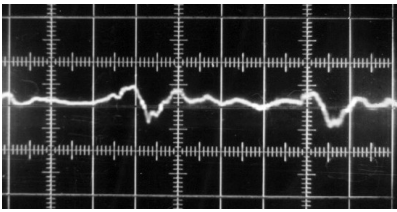
$t = 40 \text{ }^\circ\text{C}, \tau = 19 \text{ мин}$



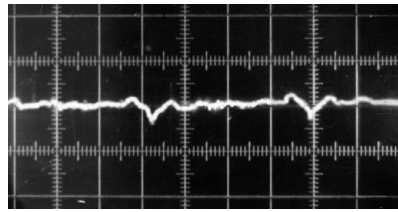
$t = 20 \text{ }^\circ\text{C}, \tau = 8 \text{ мин}$



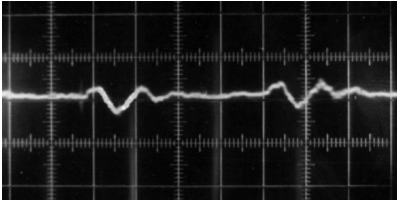
$t = 45 \text{ }^\circ\text{C}, \tau = 21 \text{ мин}$



$t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 11 \text{ мин}$



$t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 25 \text{ мин}$



$t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 13 \text{ мин}$

$n = 6 \text{ об/с}$; $\omega R_p = 3,4 \text{ м/с}$;
 $P_p = 1,36 \text{ атм}$; $P_c = 0,76 \text{ атм}$; $Q = 4,5 \text{ м}^3/\text{ч}$;
 $l_{\text{гидр}} = 25 \text{ мм}$; $A = 5 \text{ м}^2/\text{см}$; $\tau_p = 10 \text{ мс/см}$

Рис. 5.2.8. Осциллограммы импульсов давления

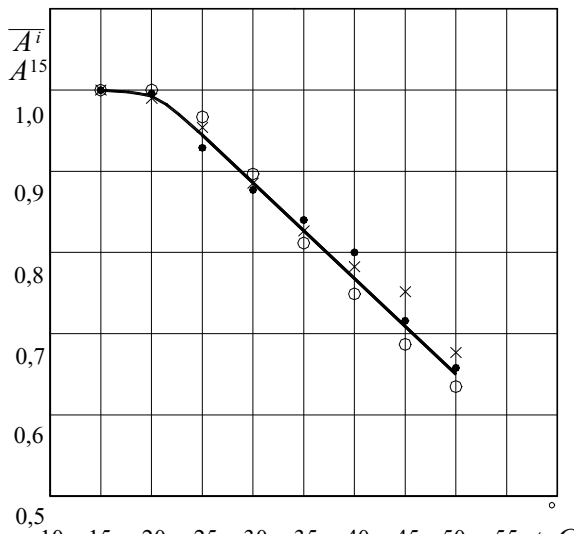


Рис. 5.2.9. График зависимости относительной амплитуды пульсаций давления от температуры: \circ - $\omega R_p = 3,8 \text{ м/с}$; \bullet - $\omega R_p = 10 \text{ м/с}$; \times - $\omega R_p = 13,8 \text{ м/с}$

Падение амплитуды генерируемой волны при повышении температуры наблюдали так же в гидродинамическом излучателе типа "сопло - лунка" [12]. Авторы этой работы падение амплитуды волны связывают, в основном, с увеличением давления насыщенных паров в жидкости и рекомендуют для гидродинамических излучателей диапазон рабочих температур 15 ... 30 °C.

5.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ

Методы исследования кавитации можно разделить на прямые и косвенные.

К прямым методам относятся:

1) *визуальные* - фото-, кино-, и видеосъемка кавитационных образований;

2) *акустические* - измерение давления в ударной волне, изучаемой одним пузырьком или совокупностью кавитационных пузырьков при пульсациях и схлопывании.

Косвенные методы включают в себя такие методы, как:

1) *фотоэлектрические* - регистрация сонолюминесценции при кавитации;

2) *химические* - исследование изменения массы, концентрации или объема химических реагентов за счет звукохимических реакций в кавитационном поле;

3) *гидродинамические* - изменение гидродинамических параметров потока жидкости, связанных с интенсивностью кавитации (обычно в качестве таких параметров используют расход или перепад давления между полостью ротора и рабочей камерой);

4) *механические* - измерение величины кавитационной эрозии, которую обычно выражают через убыль веса образцов в виде алюминиевых цилиндриков или через площадь вырывов в алюминиевой фольге;

5) *технологические* - изменения качественных показателей обрабатываемой среды, связанных с интенсивностью кавитации (в качестве обрабатываемой среды используют эмульсии, суспензии и т.п., в которых протекают гидромеханические и тепло-массообменные процессы).

В качестве безразмерных параметров, характеризующих кавитацию, используют индекс кавитации

$$K = \Delta v / v, \quad (5.3.1)$$

где Δv - суммарный объем кавитационных пузырьков, м^3 ; v - выделенный расчетный объем, м^3 .

Критерии гидродинамической и акустической кавитации [13 - 17]:

$$x_e = \frac{P_k - P_n + 2\sigma/R_0}{\rho V^2 / 2}; \quad (5.3.2)$$

$$x_a = \frac{P_k - P_n + 2\sigma/R_0}{P_m}, \quad (5.3.3)$$

где $V = \sqrt{(\omega R_p)^2 + \bar{Q}^2 / S_c^2}$; P_k - давление в рабочей камере, Па; ω - угловая скорость ротора, с^{-1} ; R_p - радиус внешней поверхности ротора, м; \bar{Q} - средний за период расход жидкости через один канал статора, $\text{м}^3/\text{с}$; S_c - площадь поперечного сечения канала статора, м^2 ; P_m - амплитуда пульсации давления, Па.

Используются также комбинированный и эффективный критерии кавитации:

$$x_k = \frac{P_k - P_n + 2\sigma/R_0}{\rho V^2 / 2 + P_m}; \quad (5.3.4)$$

$$x_3 = \frac{x_a x_r}{x_a + x_r}. \quad (5.3.5)$$

В некоторых случаях вследствие малости P_n и $2\sigma/R_0$ этими членами пренебрегают.

Оценка кавитации по формулам (5.3.2) - (5.3.5) имеет свои особенности и трудности, так как x_r зависит в основном от Q/S и ωR_p , а x_a - от P_m . Величина P_m при $\omega R_p > 10$ м/с, практически не изменяется за счет проскальзывания жидкости относительно поверхности ротора и определяется при неизменных конструктивных параметрах ПАРТ величинами давления в рабочей камере (P_k) и давлением в полости ротора (P_p). Кроме того, x_r и x_a варьируются в различных интервалах: $0 < x_a < 1$, а x_r - от нуля и до чисел больше единицы. Критерии x_a и x_r имеют также разные коэффициенты корреляции с интенсивностью кавитации, характеризуемой амплитудой импульса давления, излучаемого кавитационным пузырьком [14 - 16]. Индекс кавитации K существенно зависит от величины выделенного расчетного объема v .

Критерии кавитации x и индекс кавитации K отражают различные количественно-качественные параметры кавитации. Критерии кавитации x характеризуют гидродинамическую и акустическую обстановку. В многочисленных исследованиях

установлено, что максимум величины ударного давления, генерируемого кавитационным пузырьком, наблюдается при $0,2 \leq x_a \leq 0,3$ [13 - 16]. Индекс кавитации K характеризует распространение кавитационных пузырьков в технологическом объеме и является мерой пространственной плотности энергии.

Нам представляется, что замечания, высказанные Е. Адиутори [18] о недопустимости чрезмерного увлечения относительными критериями отчасти справедливы. Для более полного представления о физической картине кавитации в ПАРТ, следует характеризовать ее величиной ударного давления ($P_{\text{кав}}$), и по величине объема кавитационных образований (Δv). Относительные параметры типа ($P_{\text{кав}}/P_m$) и K также необходимы, так как они характеризуют эффективность излучателя.

Наиболее перспективным является комбинированный способ исследования кавитации - фото- и видео съемка, совмещенные с измерением акустических и гидродинамических параметров кавитационного поля. Этот способ хорошо зарекомендовал себя во многих исследованиях кавитации [19 - 27].

Первые шаги в реализации этого метода применительно к ПАРТ были сделаны авторами работы [19]. При фотографировании кавитации в канале статора установлено, что совокупность кавитационных пузырьков образует своеобразную "трубку", вытянутую параллельно щели статора, которая затем разрушается. Проанализировав большое число фотографий, авторы [19] сделали вывод, что поступательное движение пузырька происходит со скоростью $\cong 20$ м/с, и это близко к линейной скорости вращения наружной поверхности ротора. Пузырьки достигают видимого размера через 100 мкс после момента полного совмещения каналов. Максимальный радиус пузырьков достигает 200 мкм. Схлопывание пузырьков происходит вблизи стенки канала статора, а затем наблюдается повторный рост пузырьков до радиуса 50 - 80 мкм, причем направление поступательного движения изменяется. Длина пути поступательного движения пузырька не превышает 2-3 мм. Период пульсаций пузырьков составил $\cong 75$ мкс, что соответствовало интервалу между максимумами кавитационного шума по снятым осциллограммам. При помощи фотоэлектронного умножителя были получены осциллограммы импульсов, регистрируемых при вспышках люминесценции. Наблюдалось две серии вспышек в течении одного цикла перекрытия каналов, а временной промежуток между ними также составлял $\cong 75$ мкс. В среднем возникает одна вспышка за 5 циклов перекрытия. Во второй серии наблюдалось значительно меньшее число вспышек, т.е. вероятность возникновения свечения при повторном сжатии пузырька еще ниже. Световые вспышки совпадают по времени с импульсом ударного давления при схлопывании пузырька.

Анализируя данные в статье [19] можно сделать вывод, что отношение длины канала статора к его ширине равно единице. Время, за которое происходит открывание канала статора, равно времени его закрывания и составляет 100 мкс. То есть, пузырек достигает видимых размеров в тот момент, когда произошло закрытие канала статора. Время жизни пузырька значительно меньше основного периода колебаний давления в ПАРТ. Время продолжительности жизни пузырька $t = (0,1 - 0,15) \cdot 10^{-3}$ с, длительность периода основных колебаний потока $T = 10^{-3}$ с. Следовательно, пузырек завершает свой жизненный цикл до того, как каналы ротора и статора вновь совпадут и давление в канале статора возрастет, а это значит, что пузырек просто выносится потоком из канала статора. К сожалению, в работе [19] не приводятся данные по гидродинамическим параметрам потока жидкости в ПАРТ и по самой жидкости.

Нами проведено исследование кавитации в канале статора ПАРТ типа РИКА фотографическими и акустическими методами [28, 29]. Фотографирование кавитационных образований осуществляли через специальное окошко в крышке РИКА с наводкой по "лазерному ножу". Длительность светового импульса источника света составляла 2 мкс.

Эксперимент проводили на водопроводной воде при температурах 12 - 60 °С. Необходимо отметить, что статор РИКА был длинноканальным, т.е. отношение длины

канала статора l_c к его эквивалентному диаметру d_3 было больше 3. При $l/d_3 > 3-4$ в гидравлике каналы считают длинными [30].

Анализ фотоснимков показал, что кластер, состоящий из кавитационных пузырьков, довольно компактен и несколько смещен к стенке канала статора, на которую направлен вектор скорости потока жидкости в начальный момент открытия канала статора. Сечение кавитационного кластера по форме является эллипсом, наибольшая ось которого, как правило, параллельна радиальной оси канала статора. Форму эллипсоида кавитационный кластер приобретает вследствие того, что по мере увеличения кавитационного объема стенки канала статора препятствуют его равномерному росту, а поток жидкости растягивает его вдоль канала. Поэтому, при развитой кавитации приращение объема кавитационного кластера возможно только вдоль оси канала статора, как это и отмечалось в работе [19]. Наибольшая длина оси эллипсоида не превышала 5,5 мм. Кавитационный кластер начинает формироваться на расстоянии 1,0 - 1,5 мм от входа в канал статора. Наибольшая плотность кавитационного кластера наблюдалась на расстоянии 3,0 - 3,5 мм от передней кромки канала статора, что соответствовало отношению $l_c/d_3 = 1$. Здесь необходимо отметить, что наиболее развитая гидродинамическая кавитация наблюдается при течении жидкости через каналы с $l_c/d_3 = 1$ [31].

Визуальные наблюдения кавитационного кластера при постоянном освещении рубиновым лазером показали, что кавитационный кластер находится постоянно на одном месте, не перемещаясь по каналу статора. В тоже время он постоянно меняет свою конфигурацию и как бы "дрожит" подобно целлулоидному шарик, поддерживаемому струей воды. Анализируя наблюдаемое явление, можно сделать вывод, что кавитационные пузырьки схлопываются, в основном, в канале статора, а в рабочую камеру выносятся лишь небольшое их количество. В длинноканальных РИКА растягивающим напряжениям подвергается начальный участок потока жидкости в канале статора. Наиболее характерные снимки кавитационного кластера представлены на рис. 5.3.1.

ПЛОТНОСТЬ КАВИТАЦИОННОГО КЛАСТЕРА ХАРАКТЕРИЗОВАЛИ ИНДЕКСОМ КАВИТАЦИИ K . КАК БЫЛО ОТМЕЧЕНО ВЫШЕ, ИНДЕКС КАВИТАЦИИ МОЖЕТ ОПРЕДЕЛЯТЬСЯ КАК ПО ОБЪЕМУ, ТАК И КАКОМУ-ЛИБО СЕЧЕНИЮ. НА РИС. 5.3.2 - 5.3.4 ПРЕДСТАВЛЕНЫ ГРАФИКИ ЗАВИСИМОСТИ ИНДЕКСА КАВИТАЦИИ ПО ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЯМ ВДОЛЬ ОСИ КАНАЛА СТАТОРА. ЭТИ КРИВЫЕ ХАРАКТЕРИЗУЮТ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ КАВИТАЦИОННОГО КЛАСТЕРА ПО КАНАЛУ СТАТОРА. ЗА НАЧАЛО КООРДИНАТ БЫЛА ПРИНЯТА ТОЧКА НА ПЕРЕДНЕЙ КРОМКЕ КАНАЛА СТАТОРА.

Чтобы дать интегральную характеристику развития кавитации рассмотрим средний по объему кавитационного кластера индекс кавитации согласно формуле (5.3.1). В качестве выделенного расчетного объема v в формуле (5.3.1) выбирали параллелепипед с высотой и шириной, равной высоте и ширине канала статора, а длиной, равной наибольшей длине кавитационного кластера, так как линейные размеры должны быть малы по сравнению с длиной волны, чтобы первичное, возбуждающее кавитацию звуковое давление, можно было считать внутри этого объема постоянным по величине и синфазным, и, в то же время, эти размеры должны превышать размеры кавитационного пузырька [32]. Параллелепипед располагали таким образом, чтобы его центр совпадал с центром кавитационного кластера.

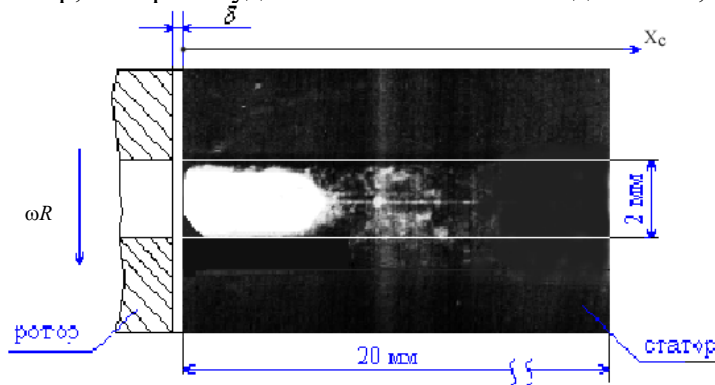
По результатам экспериментальных исследований были построены графики зависимости индекса кавитации K от критериев и геометрических симплексов $Re, Sh, \delta/a_c, l_c/d_3$, полученных методом анализа размерностей величин, влияющих на развитие кавитации (рис. 5.3.5 и 5.3.6).

Экспериментальные кривые аппроксимируются зависимостью вида:

$$K = \left(\frac{\delta}{a_c} \right)^{-0.6} \left(0,144 - 168 \left(\frac{l_c}{d_3} - 4,5 \right)^2 \exp \left(-0,082 \text{ Sh} - 19 \cdot 10^{-5} \text{ Re} \right) \right), \quad (5.3.6)$$

где $\text{Re} = V d_3 \rho / \mu$; $\text{Sh} = 2 l_3 / V t_0$; $t_0 = a_c / (\omega R_p)$; $V = \sqrt{2 (P_p - P_k) / \rho}$; $d_3 = 2 a_c h_c / (a_c + h_c)$; a_c, h_c - высота канала статора, м; ω - угловая скорость ротора, с^{-1} ; R_p - внешний радиус ротора, м; P_p, P_k - давление в полости ротора и в рабочей камере, Па.

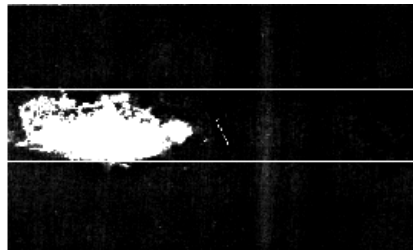
Интенсивность кавитации можно косвенно охарактеризовать величиной импульса ударного давления, излучаемого кавитационным пузырьком в момент схлопывания или пульсации. Это давление регистрируют при помощи гидрофона, подавая снимаемые сигналы на осциллограф или вольтметр. Перед регистрирующим прибором можно установить фильтр, который будет отсекал колебания давления, генерируемые РИКА.



$$n = 46 \text{ об/с}, \quad \omega R = 29 \text{ м/с}$$

$$\text{Sh} = 60, \quad \text{Re} = 46200, \quad Q = 5,04 \text{ м}^3/\text{с}$$

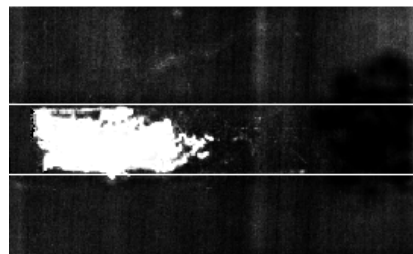
$$P_p = 1,68 \text{ атм}, \quad \Delta P = 1 \text{ атм}, \quad P_c = 0,68 \text{ атм}$$



$$m = 42 \text{ об/с}, \quad \omega R = 26 \text{ м/с}$$

$$\text{Sh} = 57, \quad \text{Re} = 46200, \quad Q = 5,04 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$P_p = 1,64 \text{ атм}, \quad \Delta P = 0,98 \text{ атм}, \quad P_c = 0,66 \text{ атм}$$



$$n = 34 \text{ об/с}, \quad \omega R = 21 \text{ м/с}$$

$$\text{Sh} = 50, \quad \text{Re} = 53000, \quad Q = 5,08 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\Delta P = 1,2 \text{ атм}$$

РИС. 5.3.1. ХАРАКТЕРНЫЕ ФОТОСНИМКИ КАВИТАЦИОННОГО КЛАСТЕРА

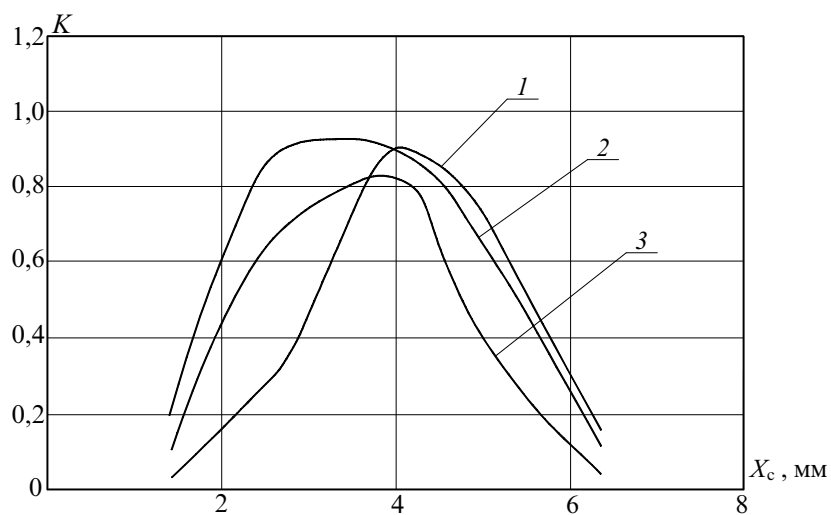


Рис. 5.3.2. Распределение плотности кавитационного кластера вдоль радиальной оси канала статора: $Sh = 57$, $\omega = 264 \text{ c}^{-1}$:
 1 - $Re = 53\,000$, $\Delta P = 1,26 \text{ атм.}$; 2 - $Re = 47\,000$, $\Delta P = 0,98 \text{ атм.}$;
 3 - $Re = 46\,200$, $\Delta P = 1,02 \text{ атм.}$

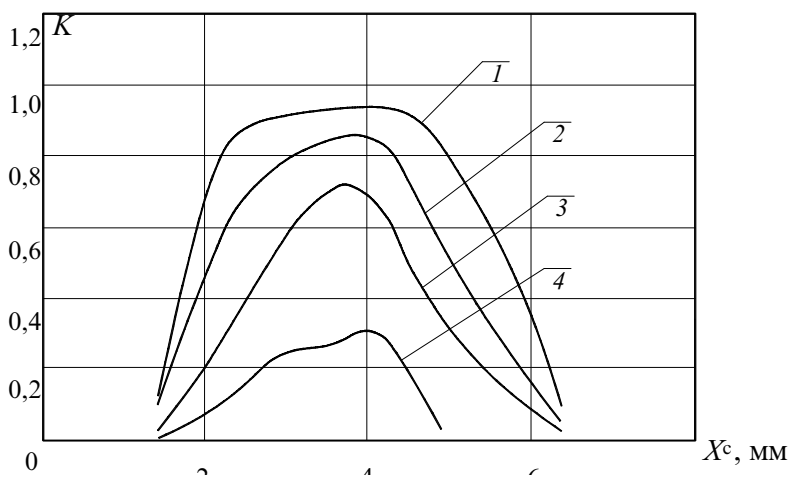


Рис. 5.3.3. Распределение плотности кавитационного кластера вдоль радиальной оси канала статора: $Re = 46\,200$; $\Delta P = 0,98 \text{ атм.}$;
 1 - $\omega R_p = 29,0 \text{ м/с}$; 2 - $\omega R_p = 26,4 \text{ м/с}$; 3 - $\omega R_p = 24,0 \text{ м/с}$; 4 - $\omega R_p = 21,4 \text{ м/с}$

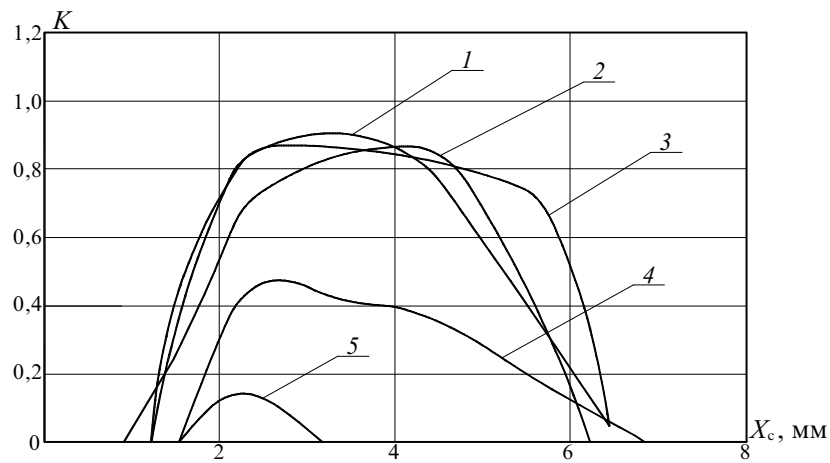


Рис. 5.3.4. Распределение плотности кавитационного кластера вдоль радиальной оси канала статора: $Re = 53\ 000$; $\Delta P = 1,26$ атм.

1 - $\omega R_p = 24,0$ м/с; 2 - $\omega R_p = 29,0$ м/с; 3 - $\omega R_p = 21,4$ м/с;
 4 - $\omega R_p = 26,4$ м/с; 5 - $\omega R_p = 18,8$ м/с

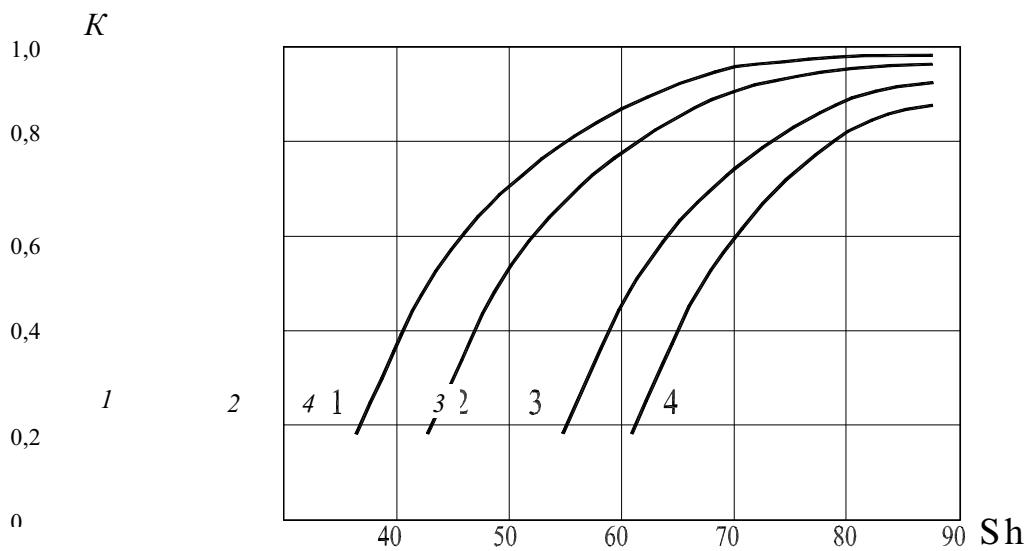


Рис. 5.3.5. Графики зависимости индекса кавитации K от критериев Re , Sh ,

δ/a_c , l_c/d_3 , $\delta/a_c = 0,05$.

$l_c/d_3 = 6$: 1 - $Re = 53\ 000$; 2 - $Re = 47\ 000$.

$l_c/d_3 = 7,5$: 3 - $Re = 46\ 600$; 4 - $Re = 51\ 600$

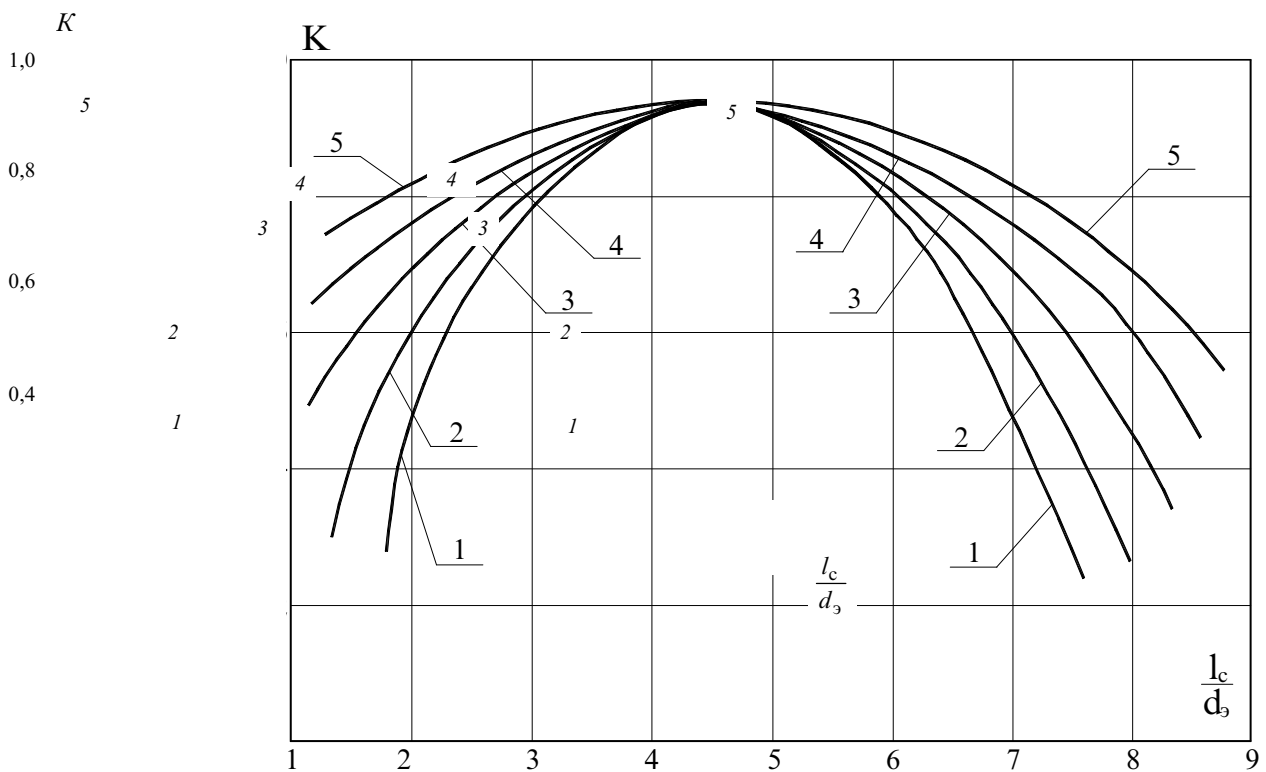


Рис. 5.3.6. Графики зависимости индекса кавитации K от критериев Re , Sh , δ/a_c , l_c/d_3 . $Re = 44\,200$, $\delta/a_c = 0,05$.
 1 - $Sh = 64$; 2 - $Sh = 68$; 3 - $Sh = 72$; 4 - $Sh = 76$; 5 - $Sh = 80$

Гидрофон регистрирует ударное давление пузырьков в кавитационном кластере, которые схлопываются практически синфазно.

Кавитационный кластер начинает формироваться, когда величина импульса ударного давления достигает своего максимального значения при неизменных геометрических параметрах РИКА. Графики зависимостей импульса ударного давления и давления, усредненного за период и объема кавитационного кластера от скорости перекрытия канала статора показаны на рис. 5.3.7. Некоторый вклад в эти зависимости вносит центробежное давление, но примерно при $\omega R_p = 16$ м/с наблюдается проскальзывание жидкости относительно ротора и приращение центробежного давления прекращается (рис. 5.3.8).

Кривые на рис. 5.3.7 вполне закономерны. Кавитация начинает развиваться при увеличении интенсивного параметра - ударного давления и, следовательно, роста P_{max} . Затем, при достижении определенного значения P_{max} , кавитация развивается за счет экстенсивного параметра - количества кавитационных пузырьков и, следовательно, роста Δv . Заметим, что в опытах каждый раз измеряются параметры новых кавитационных образований, так как предыдущие выносятся из РИКА.

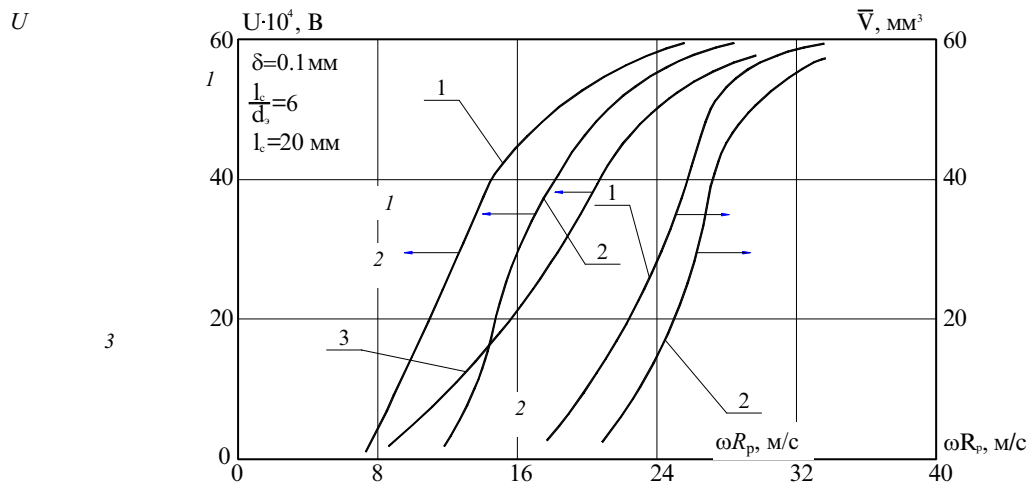


Рис. 5.3.7. Графики зависимостей амплитуды импульсов напряжения на гидрофоне (U) и среднего объема кавитационного кластера, за период от скорости перекрывания канала статора: 1 – $\Delta P = 1,26$ атм ($Re = 53\,000$); 2 – $\Delta P = 0,98$ атм ($Re = 46\,200$); 3 – качественная зависимость $U(\omega R)$ из [33]:

$$R_p = 0,07 \text{ м}, a_c = 0,002 \text{ м}, l_c = 0,005 \text{ м}, z_p = 36, \delta = 0,23 \text{ мм}$$

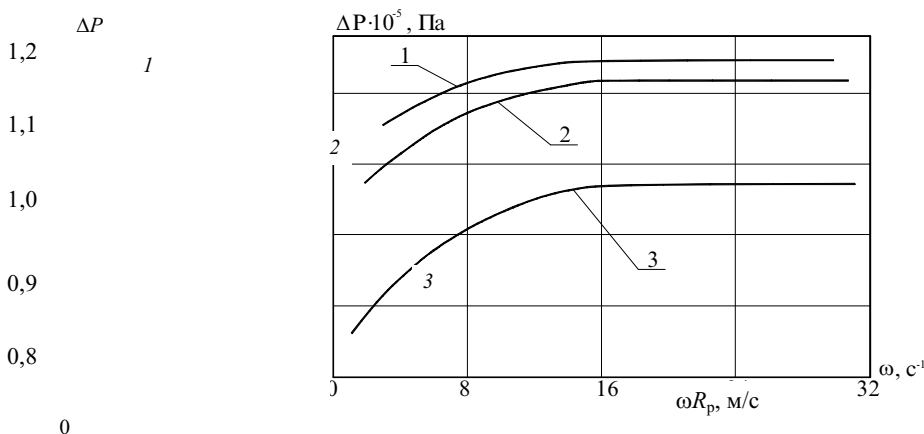


Рис. 5.3.8. Графики зависимостей среднего перепада давлений от угловой скорости ротора:

$$1 - Q = 0,0014 \text{ м}^3/\text{с}, 2 - Q = 0,00125 \text{ м}^3/\text{с}, 3 - Q = 0,001 \text{ м}^3/\text{с}$$

На рис. 5.3.7 приведена кривая 3, полученная по данным из [33]. Исследования, проведенные автором работы [33] подтверждают приведенные зависимости.

Эффективность генерируемых акустических колебаний в жидкости можно также оценить по отношению амплитуды кавитационных импульсов к амплитуде генерируемой волны $P_{\text{кав}}/P_m$. Характерные осциллограммы кавитационных импульсов давления и их соотношение с генерируемой волной показаны на рис. 5.3.9.

Осциллограммы показывают, что кавитационные пузырьки начинают схлопываться сразу же после образования, на отрицательном кратковременном импульсе давления после того, как давление в жидкости начинает возрастать.

На рис. 5.3.10 показаны графики зависимости $P_{\text{кав}}/P_m = f(Sh, Re)$. Эта зависимость аппроксимируется формулой

$$\frac{P_{\text{кав}}}{P_m} = 4 \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{\text{Sh} + 166 \cdot 10^{-5} (\text{Re} - 58\,000)}{13} \right)^2 \right] \right), \quad (5.7)$$

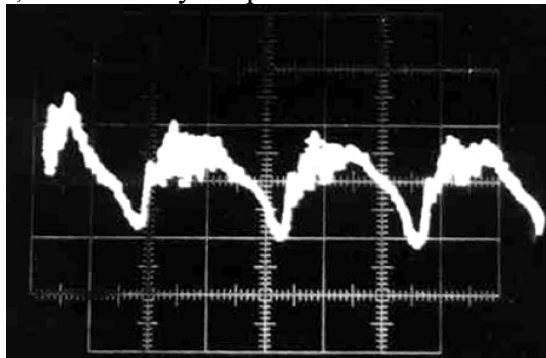
если $\text{Sh} < -166 \cdot 10^{-5} (\text{Re} - 58\,000)$, то $P_{\text{кав}}/P_m = 0$.

Важным параметром является величина статического давления в рабочей камере и в канале статора РИКА, так как она влияет на интенсивность и развитие кавитации. В работе [16] приведены графики зависимости напряжения на гидрофоне, пропорционального воспринимаемому акустическому давлению, от давления в камере $U_{\text{кав}}(P_k)$, которые имеют максимум при давлениях 1,8–2,0 атм. ($\omega R_p = 4$ м/с). Наши исследования показали, что при более высоких значениях ωR_p эти максимумы смещаются в сторону уменьшения P_k при увеличении ωR_p (рис. 5.3.11). Это можно объяснить тем, что при увеличении ωR_p увеличивается ΔP и среднее сопротивление прерывателя РИКА. Аналогичные зависимости получены нами и для объема кавитационного кластера $v_k(P_k)$ (рис. 5.3.12).

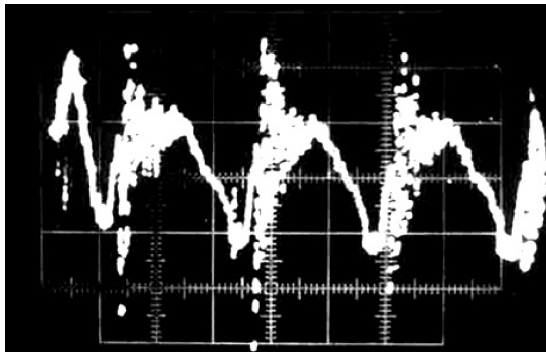
По вопросу о влиянии температуры обрабатываемой жидкости на интенсивность и развитие кавитации в литературных источниках встречаются противоречивые данные. Так, в работе [34] интенсивность кавитации оценивали по изменению веса алюминиевого цилиндрика, помещенного в зону кавитации. Вес цилиндрика при кавитационном воздействии уменьшается с увеличением температуры жидкости.

Авторы работ [35 - 37] показали, что интенсивность сонолюминисценции уменьшается при увеличении температуры. При исследовании кавитации в воде при температуре 298 - 368 К амплитуда кавитационных импульсов уменьшается на 70 %.

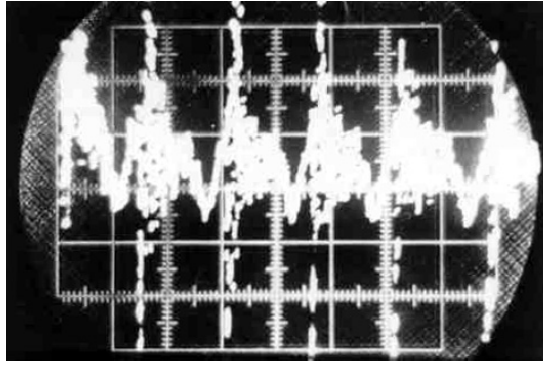
Совершенно противоречащие вышеуказанным данным получены результаты в работах [26, 38]. Были обнаружены максимумы эрозии алюминиевых пластин при кавитации в воде, этиловом спирте и четыреххлористом углероде при увеличении температуры. Для воды, например максимум эрозии, соответствует приблизительно 50 °С.



$\omega R_p = 15,7$ м/с



$\omega R_p = 18,8$ м/с



$$\omega R_p = 22 \text{ м/с}$$

Рис. 5.3.9. Осциллограммы кавитационных импульсов

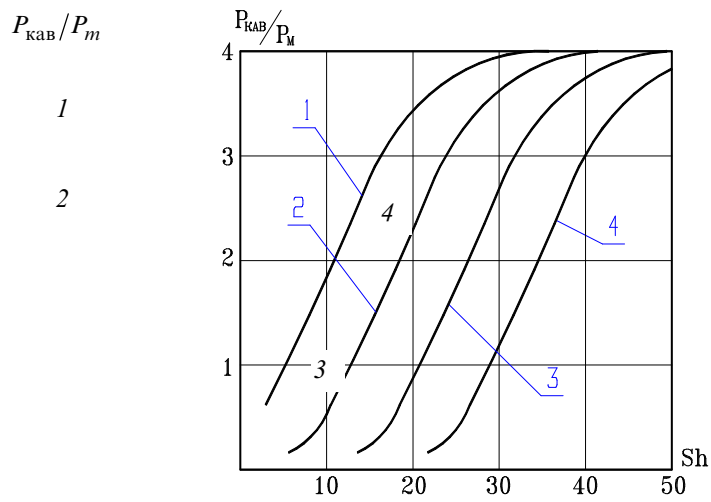


Рис. 5.3.10. Зависимость относительной амплитуды кавитационных импульсов от критерия Sh.

1 - Re = 58 000; 2 - Re = 53 000; 3 - Re = 49 000; 4 - Re = 46 000

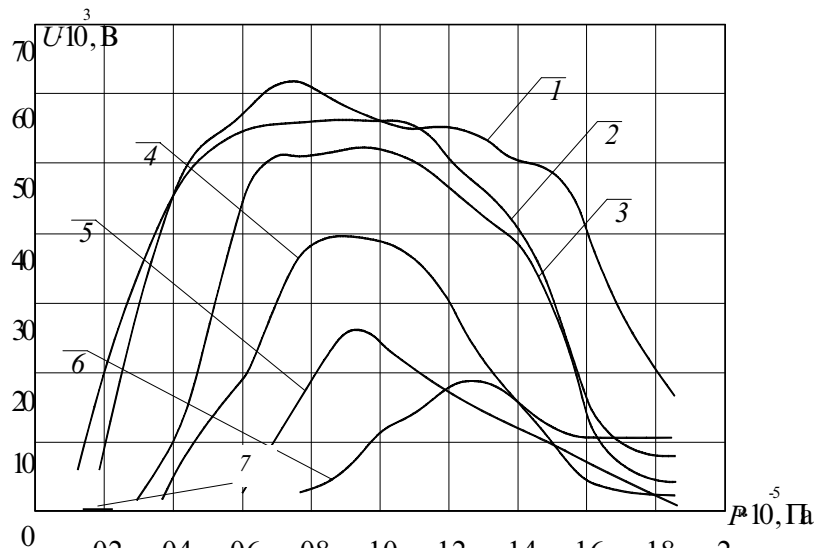


Рис. 5.3.11. Зависимость интенсивности кавитации от давления в рабочей камере:

1 – $\omega R_p = 25,1$ м/с; 2 – $\omega R_p = 22,5$ м/с; 3 – $\omega R_p = 18,8$ м/с; 4 – $\omega R_p = 15,1$ м/с;
5 – $\omega R_p = 12,6$ м/с; 6 – $\omega R_p = 9,90$ м/с; 7 – $\omega R_p = 6,30$ м/с

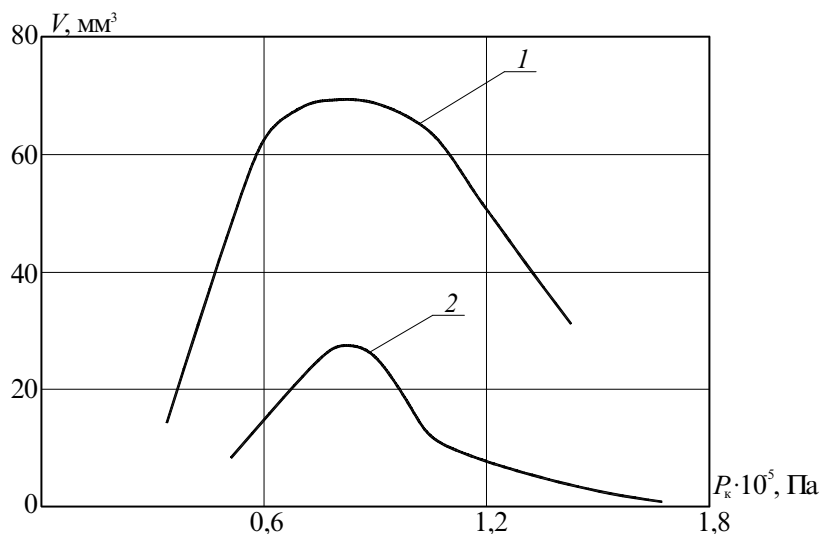


РИС. 5.3.12. ЗАВИСИМОСТЬ ОБЪЕМА КАВИТАЦИОННОГО КЛАСТЕРА ОТ ДАВЛЕНИЯ В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ ОЗВУЧИВАНИЯ

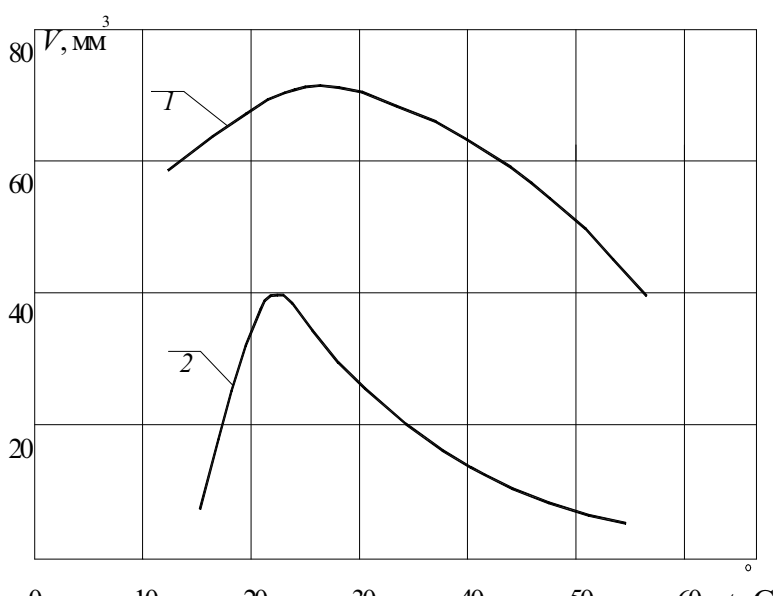


Рис. 5.3.13. Зависимость объема кавитационного кластера от температуры воды

Интенсивность кавитации в РИКА от температуры была исследована в [33]. Здесь максимум зависимости амплитуды кавитационных пульсаций от температуры приходится, примерно, на температуру равную 50 °С. Экспериментальные исследования подтверждают гипотезу о пропорциональности плотности кинетической энергии среды кавитационному давлению на конечной стадии захлопывания пузырька, выдвинутую в [33]. Исходя из этой гипотезы, также предполагается, что начальный радиус кавитационных зародышей равен 10^{-5} м. Однако, надо заметить, что техника эксперимента была построена таким образом, что воду предварительно нагревали до 90 °С, а затем по мере остывания проводили измерения

кавитационных импульсов. Таким образом, вода предварительно была доведена почти до кипения, и газосодержание воды было значительно меньше при остывании, чем газосодержание воды при температуре, которая ниже температуры кипения. Зародышей кавитации, следовательно, было тоже меньше, и меньше, соответственно, кавитационных пузырьков. Кавитационные пузырьки, таким образом, не мешали друг другу, и не происходило сильного поглощения импульсов.

В силу наличия этих противоречий, необходимо было уточнить зависимость кавитации от температуры. Было изучено влияние температуры жидкости на средний объем кавитационного кластера. Эксперименты проводились на свежей водопроводной воде. Нагрев воды происходил непосредственно в мерном баке экспериментального стенда, и вода циркулировала по замкнутому контуру через бак и аппарат. По мере нагревания проводилась фотосъемка кавитационных образований.

Графики, представленные на рис. 5.3.13, показывают, что зависимость среднего объема кавитационного кластера от температуры имеет экстремальный характер. Особенно заметен максимум объема кавитационного кластера при температуре 25 °С и $\omega R_p = 22,8$ м/с. Это значение скорости перекрытия является пороговым для начала роста кавитационного кластера, и поэтому максимум зависимости является более выраженным.

Максимум объема кавитационного кластера на 25 °С, вероятно, зависит от таких физических характеристик жидкости, как вязкость, плотность, поверхностное натяжение, давление насыщенных паров, газосодержание. Увеличение температуры приводит к повышению давления насыщенных паров в жидкости, газосодержания и к уменьшению плотности и вязкости. Повышение давления насыщенных паров благоприятно сказывается на развитии кавитации, так как в этом случае требуется более низкая величина амплитуды импульсного давления для достижения фиксированного значения параметра кавитации. Таким же образом проявляется и влияние вязкости на процесс развития кавитации.

Влияние плотности и газосодержания жидкости на кавитацию неоднозначно. Газосодержание свободного газа в жидкости возрастает за счет того, что мелкие пузырьки увеличиваются в объеме при повышении температуры. Это приводит к уменьшению общего числа зародышей кавитации и число кавитационных пузырьков уменьшается.

За счет увеличения объемного газосодержания жидкости ее плотность уменьшается. Увеличение газосодержания и уменьшение плотности приводит к тому, что излучаемая волна интенсивно поглощается в такой среде, и увеличивается демпфирующий эффект. В этом случае должна уменьшаться амплитуда импульсов давления, генерируемых аппаратом, что и было подтверждено экспериментально.

5.4. РАБОТА ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТОВ РОТОРНОГО ТИПА В АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОМ И РЕЗОНАНСНОМ РЕЖИМАХ

5.4.1. Исследование автоколебательного режима работы пульсационного аппарата роторного типа с дополнительным источником колебаний в виде центробежного насоса

Модель автоколебательной системы в виде ПАРТ - дополнительный источник колебаний была рассмотрена в параграфе 3.2.1. Более подробно было описано взаимодействие РИКА с дополнительным источником колебаний в виде центробежного насоса. Для экспериментальной проверки этой модели ко входному патрубку ПАРТ типа

РИКА был подключен центробежный насос типа К 45/30. Работоспособность автоколебательной системы проверяли по анализу спектра пульсаций давления на различных участках автоколебательной системы. Спектральный анализ проводили при помощи гидрофона из титана бария и анализатора гармоник низких частот С 5-3. Спектр колебаний снимали на выходе из дополнительного источника колебаний и в рабочей камере аппарата.

Дискретный спектр колебаний в рабочей камере снимали в нескольких точках вдоль радиальной прямой. Расстояние от входа в канал статора до точки, в которой устанавливали гидрофон, обозначим как $l_{\text{гидр}}$. Гидрофон устанавливали строго напротив канала статора на $l_{\text{гидр}}=20\div 40$ мм. В качестве переменного параметра, от которого зависел дискретный спектр, была выбрана основная частота колебаний f , генерируемых прерывателем $f = nz_p$, где n - частота вращения ротора, об/с; z_p - число каналов в роторе.

Эксперименты проводились на свежей водопроводной воде при температуре $t=20-22$ °С и давлении в рабочей камере $P_k = (0,62 \div 0,78) \cdot 10^5$ Па. Все экспериментальные данные проходили статистическую обработку. Относительная погрешность измерений напряжения, снимаемого с гидрофона не превышала 8 %. В подобных исследованиях нет необходимости переводить напряжение в единицы давления, так как нас интересует соотношение величин амплитуд пульсаций между собой при различных f . Напряжение на гидрофоне пропорционально воспринимаемому давлению (в данном диапазоне частот).

ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ НАСОС БЫЛ ПОДКЛЮЧЕН КО ВХОДНОМУ ПАТРУБКУ АППАРАТА, ИМЕЛ ШЕСТЬ ЛОПАТОК НА РАБОЧЕМ КОЛЕСЕ И УГЛОВУЮ СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА $\omega = 300$ с⁻¹. ОСНОВНАЯ ЧАСТОТА ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ НАСОСЕ ОПРЕДЕЛЯЛАСЬ КАК

$$f_n = \frac{\omega_n z_n}{2\pi} = \frac{300 \cdot 6}{2 \cdot 3,14} = 286 \text{ Гц.}$$

На рис. 5.4.1 - 5.4.4 показаны графики зависимости амплитуд первой, второй, третьей и четвертой гармоник спектра пульсаций в рабочей камере в зависимости от частоты f при различных $l_{\text{гидр}}$. Как видно из графиков, на частотах 150, 280, 380, 570, 750, 860, 1000 Гц прослеживаются максимумы амплитуд пульсаций давления на 1 - 4 гармониках. Максимумы амплитуд гармоник основной частоты колебаний в аппарате удовлетворительно совпадают с дискретным рядом частот, полученных при решении уравнения (3.2.6). Отклонения от расчетных значений составляют 10 - 15 %. Особенно заметны возрастания амплитуд на указанных частотах во 2 и 3 гармониках основной частоты колебаний в аппарате.

Анализ амплитуд гармоник в зависимости от координаты точки измерения в рабочей камере показывает, что по мере удаления от прерывателя аппарата акустические волны несколько затухают. Увеличение амплитуды волны при $l_{\text{гидр}} = 40$ мм по сравнению с меньшими $l_{\text{гидр}}$ объясняется тем, что гидрофон в этой точке улавливает не только волны, идущие из канала статора, напротив которого он установлен, но и волны, распространяющиеся из соседних каналов статора.

U

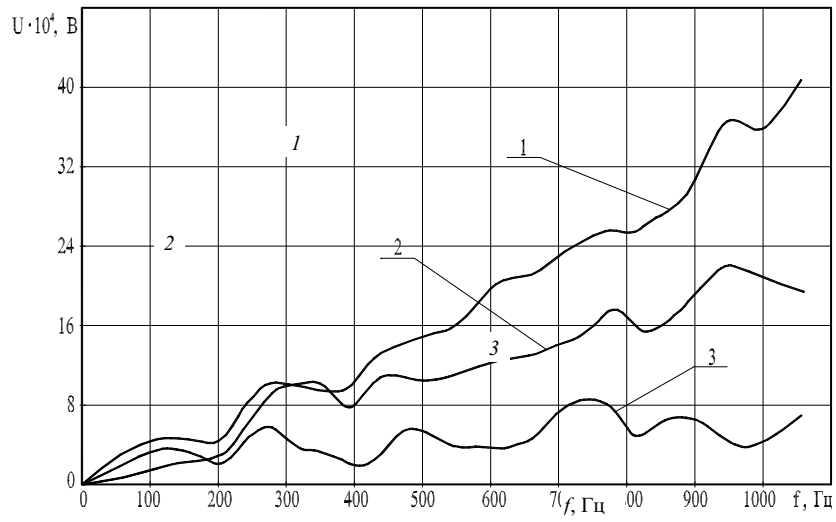


Рис. 5.4.1. Графики зависимости амплитуд 1, 2, 3 гармоник от основной частоты колебаний.

$l_{\text{гидр}} = 20 \text{ мм}$, 1–1 гарм.; 2–2 гарм.; 3–3 гарм.

U

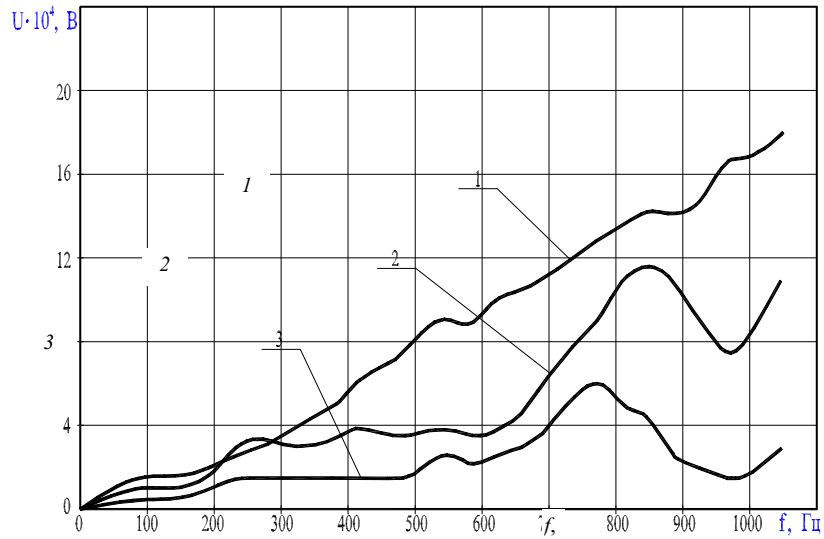


Рис. 5.4.2. Графики зависимости амплитуд 1, 2, 3 гармоник, от основной частоты колебаний ($l_{\text{гидр}} = 25 \text{ мм}$)

U

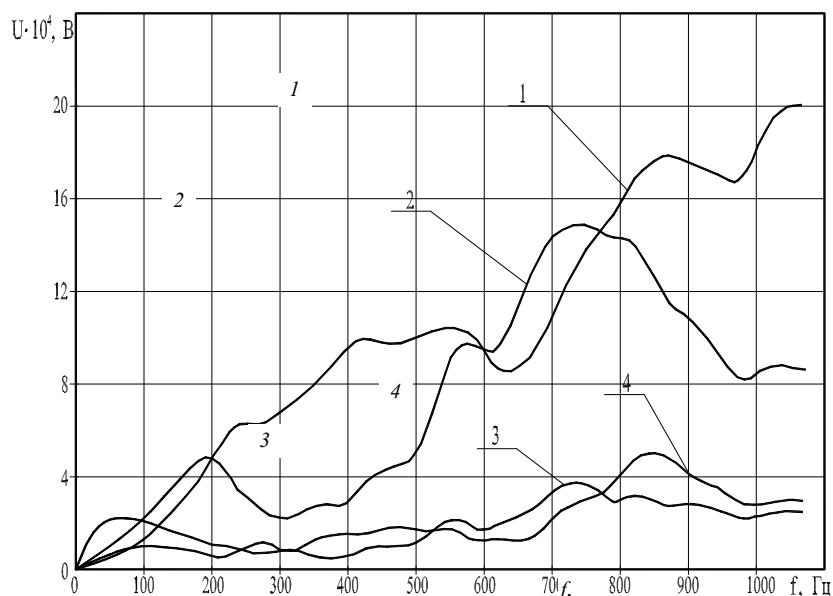


Рис. 5.4.3. Графики зависимости амплитуд 1, 2, 3, 4 гармоник, от основной частоты колебаний ($l_{\text{гидр}} = 30 \text{ мм}$)

U

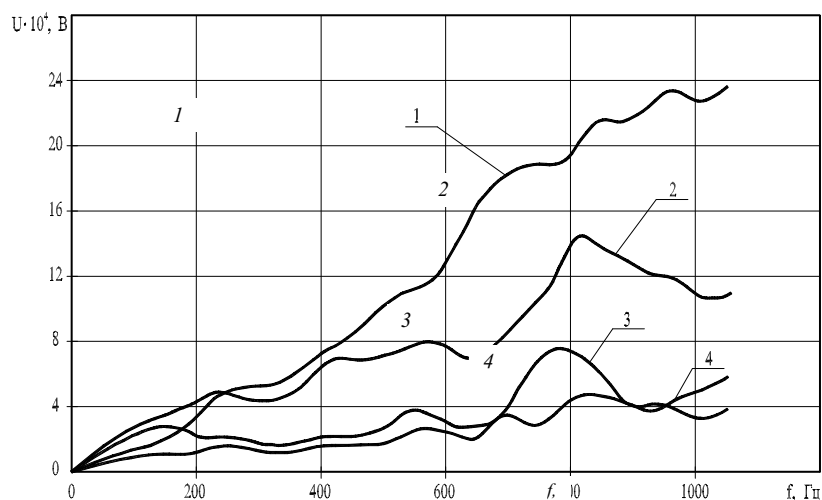


Рис. 5.4.4. График зависимости амплитуд 1, 2, 3, 4 гармоник от основной частоты колебаний

Для проверки воздействия акустического поля, создаваемого прерывателем ПАРТ, на акустическое поле, создаваемое дополнительным источником колебаний, то есть, обратной связи в автоколебательной системе, гидрофон устанавливали на выходном патрубке дополнительного источника колебаний. Зависимость колебаний, регистрируемых гидрофоном, от основной частоты колебаний в аппарате показана на рис. 5.4.5.

Из анализа графика следует, что амплитуда пульсаций в центробежном насосе заметно возрастает при совпадении основной частоты колебаний f , генерируемой ПАРТ, с лопастной частотой дополнительного источника колебаний или ее второй гармонике.

Для проведения спектрального анализа колебаний в дополнительном источнике аппарат выключали из системы, а гидрофон устанавливали на выходном патрубке источника колебаний. Сплошной спектр акустического поля дополнительного источника колебаний показан на рис. 5.4.6. На спектре заметно сильное преобладание пульсаций на всех гармониках и субгармониках лопастной частоты дополнительного источника колебаний.

Волна, излучаемая в рабочую камеру аппарата, является немонохроматической волной, т.е. ангармоничной. Это обусловлено тем, что период времени t_1 , за который каналы ротора совпадают с каналами статора, значительно меньше, чем период времени t_2 , в течение которого канал статора закрыт стенкой ротора. В нашем случае отношение t_1 к t_2 равно 15, 7. Это приводит к тому, что профиль генерируемой волны отличается от синусоидальной и приближается к ударной. Кроме ангармоничности прерывателя аппарата, на спектр акустического поля влияют также физические свойства обрабатываемой жидкости.

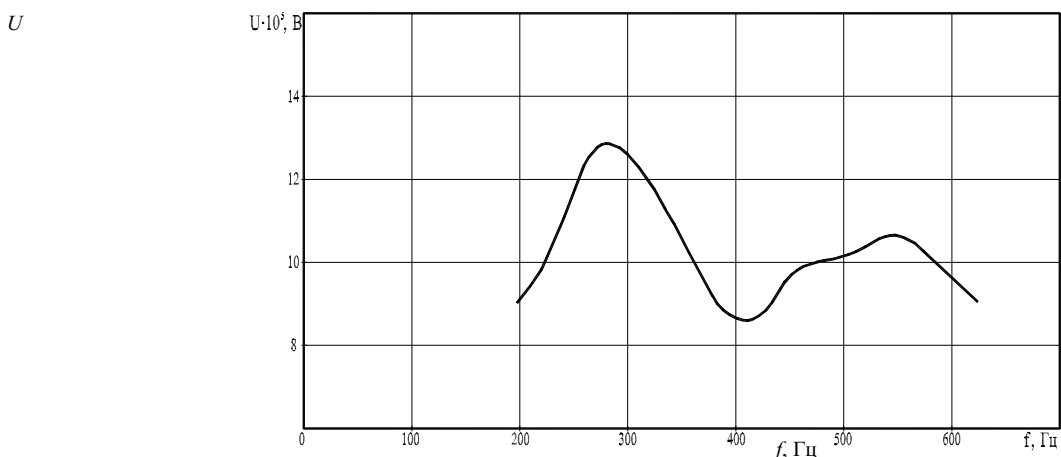


Рис. 5.4.5. Зависимость амплитуды пульсации давления на выходном патрубке дополнительного источника колебаний от основной частоты колебания в РИКА

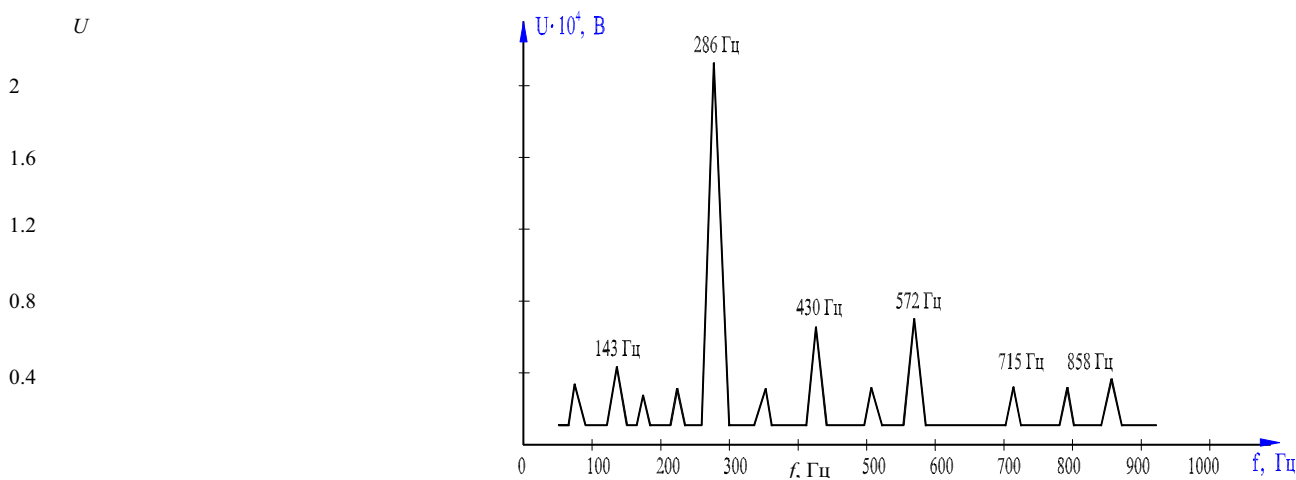


Рис. 5.4.6. Спектр пульсаций давления, генерируемых дополнительным источником колебаний

Рассмотрим влияние нелинейных свойств жидкости на характер распространения акустических волн в жидкости. Для описания акустических полей волн конечной амплитуды необходимо учитывать нелинейные члены в уравнениях гидродинамики [39]. Под волнами конечной амплитуды в нелинейной акустике понимают волны большой амплитуды, исключая сильные ударные волны типа взрывных или разрядных.

Для учета нелинейных свойств среды вводят нелинейный параметр $\varepsilon_0 = B/K_a$, где $n = 46$ об/с, $f = 920$ Гц

$N_i = 511$ частиц

$d_{cp} = 2,816047$ мкм

$K_{II} = 0,563909$

$d_{II} = 3,516952$ мкм

$d_g = 6,236737$ мкм

$\omega R_p = 28,888$ м/с

- адиабатический модуль объемной упругости; B - "нелинейный"

модуль объемной упругости. Нелинейный коэффициент ε_0 увеличивает добавку к местной скорости волны в среде. Волна в реальной среде в процессе распространения претерпевает искажения. Это учитывается нелинейным параметром. Нелинейный параметр не является постоянной величиной. Он зависит от многих характеристик среды. Например, при увеличении температуры воды в интервале 20 - 100 °С происходит увеличение $\varepsilon_0 = 4,5 - 6,5$. Также ε_0 несколько возрастает с увеличением гидростатического давления и концентрации растворов ионных солей [40]. Если в жидкости находятся пузырьки газа, то нелинейный параметр может увеличиваться значительно, даже при малой концентрации. Обычная водопроводная вода обязательно содержит пузырьки газа. Существенное увеличение числа и размеров газовых пузырьков вызывает кавитация, которая вносит значительную поправку в нелинейный параметр.

Нелинейные свойства реальной жидкости и ангармоничность прерывателя аппарата (как акустического источника) приводят к тому, что излучаемая волна относится к классу волн конечной амплитуды. Вследствие этого наблюдается перенос звуковой энергии от низших гармоник к высшим. Чем сильнее волна отличается от гармонической, тем богаче ее спектр [2].

Интенсивность немонахроматичной волны можно представить в виде [40]

$$I = \sum_{k=1}^{\infty} V_k^2 \rho c / 2, \quad (5.4.1)$$

где V_k - амплитуда колебательной скорости на k -той гармонике, м/с; ρ - равновесная плотность среды, кг/м³; c - скорость звука, м/с.

Связь между давлением и колебательной скоростью для плоской волны в канале статора

$$V = P / \rho c.$$

С учетом этой формулы имеем

$$I = \sum_{k=1}^{\infty} (P_k / \rho c)^2 / 2 = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{P_k^2}{\rho^2 c^2 2}. \quad (5.4.2)$$

Вводя величину φ , можем записать:

$$\varphi = 1 / (2 \rho^2 c^2).$$

Таким образом, получаем

$$I = \varphi \sum_{k=1}^{\infty} P_k^2, \quad (5.4.3)$$

где φ - коэффициент пропорциональности.

График изменения интенсивности излучаемой волны в рабочей камере аппарата в зависимости от частоты излучения при различных $l_{гидр}$, представлен на рис. 5.4.7. Анализируя эти кривые, можно сделать вывод, что на частотах, на которых по уравнению (3.2.6) должна возрастать амплитуда излучаемой волны, интенсивность излучаемой волны

возрастает скачками, а в некоторых случаях даже превышает последующую. В то же время, при большой частоте вращения ротора вклад центробежного компонента в генерируемое давление должен возрастать. Если сделать поправку на давление, создаваемое центробежной силой, то видно, что на указанных частотах интенсивность акустической волны выше.

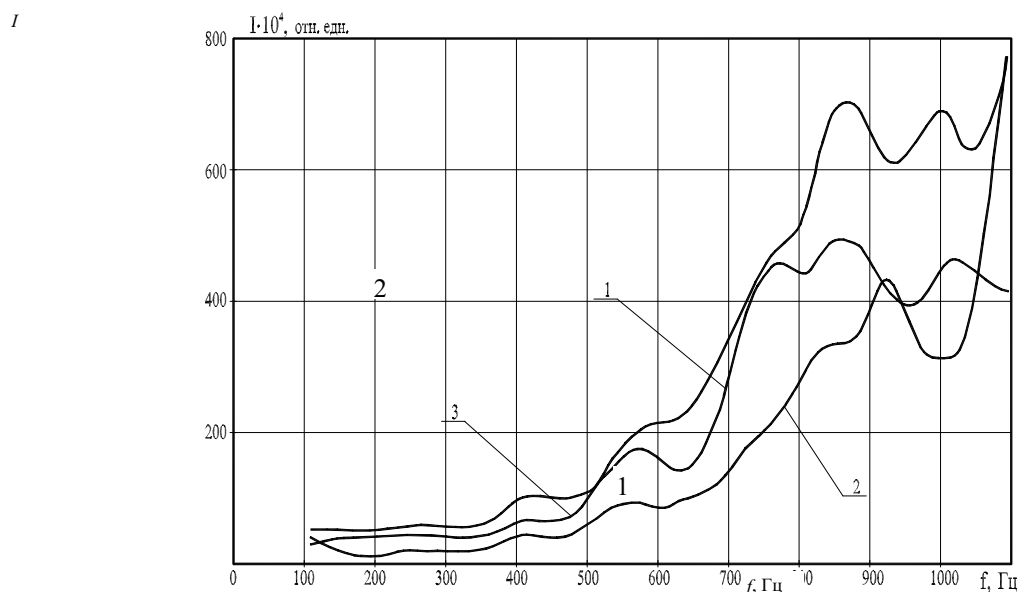


РИС. 5.4.7. ГРАФИК ИЗМЕНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧАЕМОЙ ВОЛНЫ В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ РИКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ:

1 - $l_{\text{гидр}} = 30$ мм; 2 - $l_{\text{гидр}} = 25$ мм; 3 - $l_{\text{гидр}} = 40$ мм

5.4.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕМОВ НА АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Использование явления резонанса - один из наиболее простых и доступных методов для увеличения эффективности акустических излучателей и использования энергии акустического поля. Причем, для этого не надо разрабатывать дополнительные технологические устройства, а можно использовать уже имеющиеся технологические объемы, согласовав собственные частоты колебаний в одномерном, двумерном или трехмерном пространстве с частотой излучателя.

В справедливости этого можно убедиться на достаточно простом опыте [41]. Для ультразвуковой ванны УЗВ с генератором УЗГ 2-0,1 рабочая частота излучения ультразвука составляет $18\,600 \pm 50$ Гц. Рассчитаем размеры параллелепипеда, имеющего резонансную частоту $f_{\text{рез}} = 18\,600$ Гц, по формуле

$$f_{\text{рез}} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{m^2}{x^2} + \frac{n^2}{y^2} + \frac{p^2}{z^2}}, \quad (5.4.1)$$

где x, y, z - длина, ширина и высота параллелепипеда, м; m, n, p - целые числа; $c = 1490$ - скорость звука для воды, м/с.

Длина, ширина и высота соответственно составляют 0,7 м, 0,7 м и 0,68 м. Опустим в УЗВ параллелепипед с рассчитанными размерами, ограничив им объем ультразвуковой ванны. Генерирование колебаний осуществляется внутри параллелепипеда и фиксируется на анализаторе спектра С5-3 при помощи гидрофона ЛХ-610. При изменении последовательно длины, ширины или высоты параллелепипеда, уровень воспринимаемого сигнала снижается в среднем на 20 %.

Аналогичные исследования были проведены авторами работы [42]. Показано, что спектр излучения давления от кавитационного пузырька в цилиндрическом резонаторе зависит от значения собственной частоты резонатора.

Для излучателей типа РИКА рабочая камера, в которую генерируются колебания, имеет вид прямоугольного тора. Собственные частоты такого объема находятся по формуле (3.2.19)

$$f_{mnp} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{K_{mn}^2 + \left(\frac{\pi p}{h_k}\right)^2},$$

где $m=0, 1, 2, \dots$; $n=1, 2, 3, \dots$; $p=1, 2, 3, \dots$; h_k - высота рабочей камеры, м; K_{mn} - корни уравнения

$$I'_m(\lambda X_{mn}) Y'_m(X_{mn}) - I'_m(X_{mn}) Y'_m(\lambda \cdot X_{mn}) = 0;$$

$$\lambda = R_k / (R_c + l_c);$$

I, Y - функции Бесселя и Неймана порядка m .

Для $m=0, n=1$ и $p=1$, первое значение собственной частоты рабочей камеры определяется как

$$f_{011} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{X_1}{R_p + l_c}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{h_k}\right)^2},$$

где $X_1 = K_{01}(R_p + l_c)$ - первый положительный корень, при $\lambda = R_k / (R_p + l_c)$.

Для экспериментальной проверки резонансного режима был спроектирован РИКА погружного типа с радиусом рабочей камеры $R_k = 0,83$ м, радиусом ротора $R_p = 0,045$ м, высотой камеры $h_k = 0,5$ м, длиной канала статора $l_c = 0,003$ м и зазором между ротором и статором $\delta = 2$ мм. Число прямоугольных каналов в роторе и статоре $z = 40$, ширина каналов $a = 2$ мм, высота $h = 40$ мм. Ротор с шестью лопатками приводили во вращение двигателем постоянного тока с угловой скоростью $\omega = 188 - 314 \text{ с}^{-1}$. Основная частота генерируемых импульсов лежала в диапазоне $f = 1200 - 2000$ Гц.

Для $m=0$ определим низшие собственные частоты камеры как

$$f_{0np} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{K_{0n}^2 + \left(\frac{\pi p}{h_k}\right)^2},$$

где K_{0n} - корни уравнения

$$Y_1(X_n) I_1(\lambda X_n) - Y_1(\lambda X_n) (X_n) = 0;$$

$$X_n = K_{0p} (R_p + l_c + \delta) = K_{0p} 0,05;$$

$$\lambda = R_k / (R_p + l_c + \delta) = 16,6.$$

Используя таблицы корней некоторых выражений, содержащих функции Бесселя и Неймана [43], находим n -й положительный корень X_n и определяем $K_{0p} = X_n / 0,05$.

Низшие собственные частоты рабочей камеры составляют ряд:

$$f_{0np} = 1853; 2520; 3177 \text{ Гц.}$$

Гидрофон из титаната бария устанавливали напротив канала статора и измеряли общий интегральный уровень пульсаций давления. На рис. 5.4.8 представлен график зависимости интегрального уровня пульсаций давления от основной частоты пульсаций давления на частотах, удовлетворительно совпадающих с собственными частотами рабочей камеры аппарата.

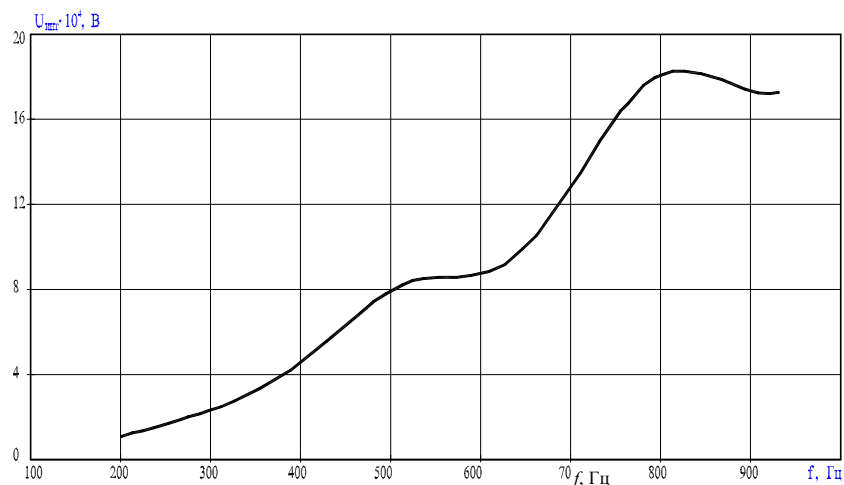


Рис. 5.4.8. График зависимости интегрального уровня пульсации давления от основной частоты пульсаций

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 5

1. Макаров Л. О. Акустические измерения в процессах ультразвуковой технологии. М.: Машиностроение, 1983. 56 с.
2. Ультразвук: Маленькая энциклопедия / Под ред. И. П. Голяминой. М.: Сов. энциклопедия, 1979. 400 с.
3. Юдаев В. Ф. Гидромеханические процессы в роторных аппаратах с модуляцией проходного сечения потока обрабатываемой среды // Теорет. основы хим. технол. 1994. Т. 28. № 6. С. 581 - 590.
4. Блохинцев Д. И. Акустика неоднородной движущейся среды. М.: Наука, 1981.
5. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. пособ. М.: Высш. шк., 1988. 239 с.
6. Дьяконов В. П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. М.: Наука, 1989. 240 с.
7. Кассандрова О. М., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. М.: Наука, 1970. 104 с.
8. Котельников Р. Б. Анализ результатов наблюдений. М.: Энергоатомиздат, 1986. 144 с.
9. Красовский Г. И., Филаретов Г. Ф. Планирование эксперимента. Минск: Изд-во БГУ, 1982. 302 с.
10. Олейник В. С. Практикум по автоматизированному электроприводу. М.: Колос, 1978. 224 с.
11. Балабышко А. М., Зимин А. И., Ружницкий В. П. Гидромеханическое диспергирование. М.: Наука, 1998. 330 с.
12. Особенности работы гидродинамического излучателя в вязкой среде / Л. А. Бореймагорская, А. П. Морозов, А. Ф. Назаренко, В. П. Шестаков // Новые физ. методы интенсификации технол. процессов: Сб. науч. тр. М., 1977. С. 93 - 95.
13. Балабышко А. М., Юдаев В. Ф. Роторные аппараты с модуляцией потока и их применение в промышленности. М.: Недра, 1992. 176 с.
14. Биглер В. И., Лавренчик В. Н., Юдаев В. Ф. Возбуждение кавитаций в аппаратах типа гидродинамической сирены // Акуст. журн., 1978. Т. 24. № 1. С. 34 - 39.

15. *Биглер В. И., Юдаев В. Ф.* Импульсная акустическая кавитация в аппаратах типа гидродинамической сирены // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 3. С. 409 - 412.
16. *Звездин А. К., Зимин А. И.* Возбуждение импульсной акустической кавитации // Гидродинамика и акустика одно- и двухфазных потоков. Новосибирск, 1983. С. 92 - 97.
17. *Юдаев В. Ф.* Об акустической кавитации в гидродинамических сиренах // Акустика и ультразвуковая техника. К.: Техника, 1983. С. 13 - 18.
18. *Адиутори Е. Ф.* Новые методы в теплопередаче / Пер. с англ. под ред. А. И. Леонтьева. М.: Мир, 1977. 230 с.
19. *Курочкин А. К., Смородов Е. А.* Экспериментальные исследования кавитации в роторных гидродинамических излучателях // Акуст. журнал. 1987. Т. 33. № 4. С. 707 - 711.
20. *Neppiras E. A.* Acoustic cavitation // Phys. Repts. 1980. V. 61. № 3. P. 159 - 251.
21. *Кортнев А. В., Макаров В. К.* Кинематографические исследования ультразвуковой кавитации // Акустика и ультразвуковая техника. К.: Техника, 1968. С. 3 - 14.
22. *Lauterborn W.* Cavitation: general and basic aspect // In: Symp. on finite - amplitude wave effects in fluids. Copenhagen, 1973, Proc., 1974. P. 195 - 202.
23. *Ke Jian, Yamaguchi Atsushi.* Cavitation characteristics of long orifices in unsteady flows // J. Jap. Hydraul. and Pneum. Soc., 1995. V. 26. № 1. P. 82 - 87.
24. *De Chizelle Y. Kuhn, Ceccio S.L., Brennen C.E.* Observations and scaling of travelling bubble cavitation // J. Fluid Mech., 1995. V. 293. P. 99 - 126.
25. *Jungelaus H. J.* Uber den einfluss des kavetationsvolumens auf den kavitationsmechanismus // Acustica, 1971. V. 27. № 3. P. 145 - 150.
26. *Flynn H. G.* Pulsations and models for cavitation bubbles // J. Acoustical Society of America, 1975. V. 58. № 6. P. 1160 - 1170.
27. *Покусаев Б. Г., Корабельников А. В., Прибатурин Н. А.* Волны давления в жидкости с пузырьками пара // Волновые процессы в двухфазных средах. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1980. С. 20 - 46.
28. *Промтов М. А., Червяков В. М.* О формировании кавитационных образований в роторном аппарате с модуляцией потока // Вестник ТГТУ. 1995. Т. 1. № 3, 4. С. 311 - 315.
29. *Промтов М. А.* Экспериментальные исследования импульсной кавитации в аппарате типа гидродинамической сирены // Акуст. журнал. 1997. Т. 43. № 4. С. 566 - 569.
30. *Константинов Ю. М.* Гидравлика. К.: Вища шк., 1988. 398 с.
31. *Арзуманов Э. С.* Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. М.: Энергия, 1978. 304 с.
32. *Розенберг Л. Д.* Кавитационная область. В кн.: Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л. Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. Ч. 5. С. 221 - 266.
33. *Зимин А. И.* Прикладная механика прерывистых течений. М.: Фолиант, 1997. 308 с.
34. *Сиротюк М. Г.* Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации. В кн.: Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л. Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. Ч. 5. С. 168 - 220.
35. *Бергман Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Иностр. лит-ра, 1957. 726 с.
36. *Сонолюминисценция, возникающая при гидродинамической кавитации / В. С. Вербанов, М. А. Маргулис, С. В. Демин и др. // Журн. физ. химии. 1990. Т. 64. № 12. С. 3357 - 3361.*

37. Химические и физико-химические процессы в полях, создаваемых гидроакустическими излучателями / А. К. Курочкин, Е. А. Смородов, Ю. В. Бадиков, М. А. Маргулис // Журн. физ. химии. 1986. Т. 60. № 4. С. 893 - 897.
38. Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкостях. В кн.: Физическая акустика / Под ред. У. Мэсона. М.: Мир, 1967. Т.1. Ч.Б. С. 7- 138.
39. Зарембо Л. К., Красильников В. А. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 519 с.
40. Шутилов В. А. Основы физики ультразвука: Учеб. пособ. Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. 280 с.
41. Promtov M. A., Kuleshov Yu.V. The use of resonant phenomena for effectiveness of acoustic technological apparatuses // Transactions of TSTU, 1999. V. 5. № 1. P. 90 - 94.
42. Experimental detection of a subharmonic route to chaos in acoustic cavitation through the tutig of a piezoelectric cavity / C. Cabeza, A.C. Sicardi - Schifino, C. Negreira, and G. Montaldo // J. Acoustical Society of America. - 1998, 103 (6). P. 3227 - 3229.
43. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. Стигана. М.: Наука, 1978. 832 с.

На рис. 5.3.7 приведена кривая 3, полученная по данным из [33]. Исследования, проведенные автором работы [33] подтверждают приведенные зависимости.

Эффективность генерируемых акустических колебаний в жидкости можно также оценить по отношению амплитуды кавитационных импульсов к амплитуде генерируемой волны $P_{\text{кав}}/P_m$. Характерные осциллограммы кавитационных импульсов давления и их соотношение с генерируемой волной показаны на рис. 5.3.9.

Осциллограммы показывают, что кавитационные пузырьки начинают схлопываться сразу же после образования, на отрицательном кратковременном импульсе давления после того, как давление в жидкости начинает возрастать.

На рис. 5.3.10 показаны графики зависимости $P_{\text{кав}}/P_m = f(\text{Sh}, \text{Re})$. Эта зависимость аппроксимируется формулой

$$\frac{P_{\text{кав}}}{P_m} = 4 \left[1 - \exp \left[- \left(\frac{\text{Sh} + 166 \cdot 10^{-5} (\text{Re} - 58\,000)}{13} \right)^2 \right] \right], \quad (5.7)$$

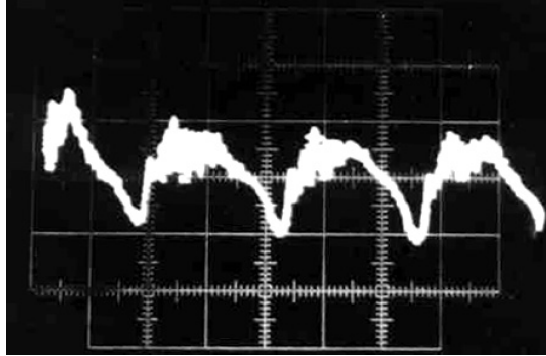
если $\text{Sh} < -166 \cdot 10^{-5} (\text{Re} - 58\,000)$, то $P_{\text{кав}}/P_m = 0$.

Важным параметром является величина статического давления в рабочей камере и в канале статора РИКА, так как она влияет на интенсивность и развитие кавитации. В работе [16] приведены графики зависимости напряжения на гидрофоне, пропорционального воспринимаемому акустическому давлению, от давления в камере $U_{\text{кав}}(P_k)$, которые имеют максимум при давлениях 1,8–2,0 атм. ($\omega R_p = 4 \text{ м/с}$). Наши исследования показали, что при более высоких значениях ωR_p эти максимумы смещаются в сторону уменьшения P_k при увеличении ωR_p (рис. 5.3.11). Это можно объяснить тем, что при увеличении ωR_p увеличивается ΔP и среднее сопротивление прерывателя РИКА. Аналогичные зависимости получены нами и для объема кавитационного кластера $v_k(P_k)$ (рис. 5.3.12).

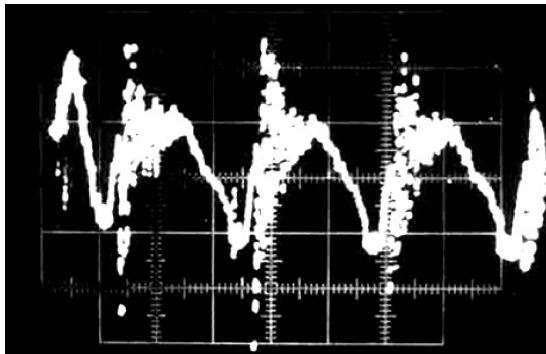
По вопросу о влиянии температуры обрабатываемой жидкости на интенсивность и развитие кавитации в литературных источниках встречаются противоречивые данные. Так, в работе [34] интенсивность кавитации оценивали по изменению веса алюминиевого цилиндрика, помещенного в зону кавитации. Вес цилиндрика при кавитационном воздействии уменьшается с увеличением температуры жидкости.

Авторы работ [35 - 37] показали, что интенсивность сонолюминисценции уменьшается при увеличении температуры. При исследовании кавитации в воде при температуре 298 - 368 К амплитуда кавитационных импульсов уменьшается на 70 %.

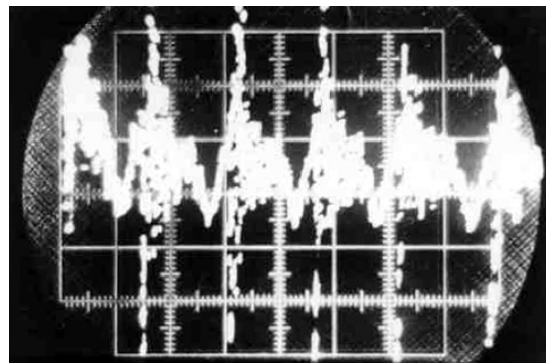
Совершенно противоречащие вышеуказанным данным получены результаты в работах [26, 38]. Были обнаружены максимумы эрозии алюминиевых пластин при кавитации в воде, этиловом спирте и четыреххлористом углероде при увеличении температуры. Для воды, например максимум эрозии, соответствует приблизительно 50 °С.



$$\omega R_p = 15,7 \text{ м/с}$$



$$\omega R_p = 18,8 \text{ м/с}$$



$$\omega R_p = 22 \text{ м/с}$$

Рис. 5.3.9. Осциллограммы кавитационных импульсов

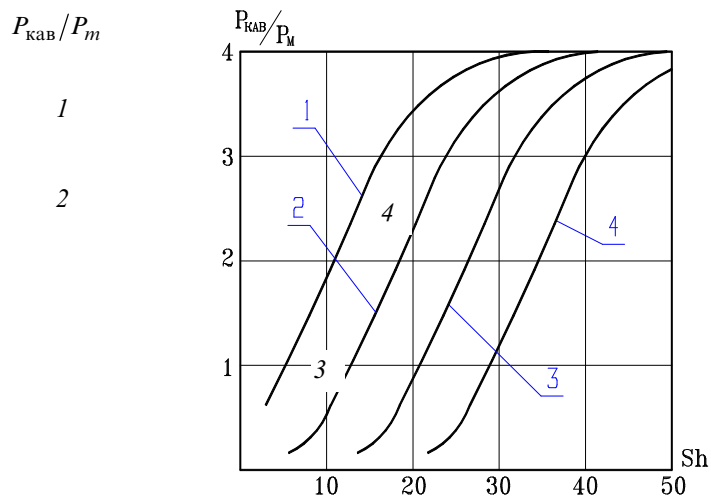


Рис. 5.3.10. Зависимость относительной амплитуды кавитационных импульсов от критерия Sh .
 1 - $Re = 58\ 000$; 2 - $Re = 53\ 000$; 3 - $Re = 49\ 000$; 4 - $Re = 46\ 000$

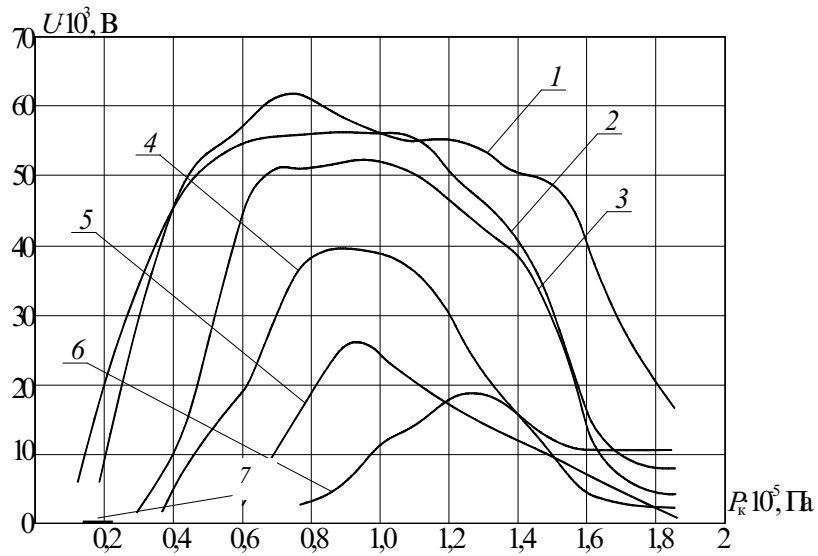


Рис. 5.3.11. Зависимость интенсивности кавитации от давления в рабочей камере:
 1 - $\omega R_p = 25,1$ м/с; 2 - $\omega R_p = 22,5$ м/с; 3 - $\omega R_p = 18,8$ м/с; 4 - $\omega R_p = 15,1$ м/с;
 5 - $\omega R_p = 12,6$ м/с; 6 - $\omega R_p = 9,90$ м/с; 7 - $\omega R_p = 6,30$ м/с

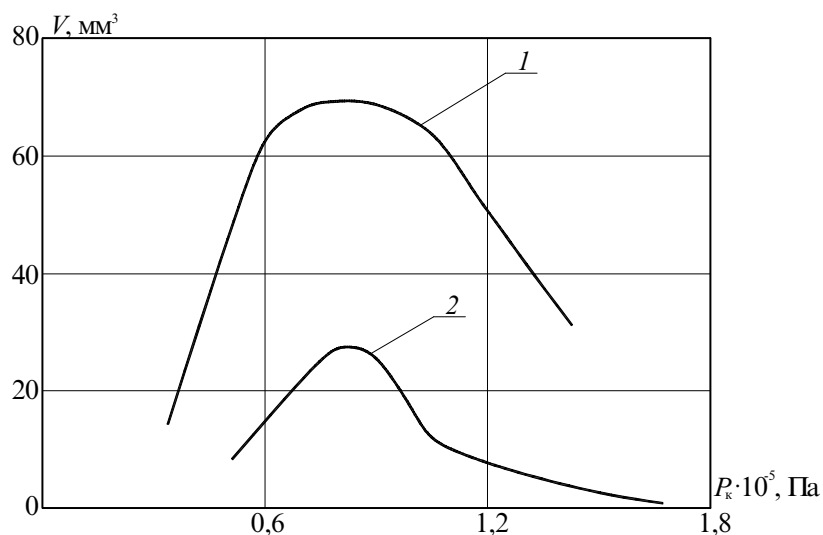


РИС. 5.3.12. ЗАВИСИМОСТЬ ОБЪЕМА КАВИТАЦИОННОГО КЛАСТЕРА ОТ ДАВЛЕНИЯ В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ ОЗВУЧИВАНИЯ

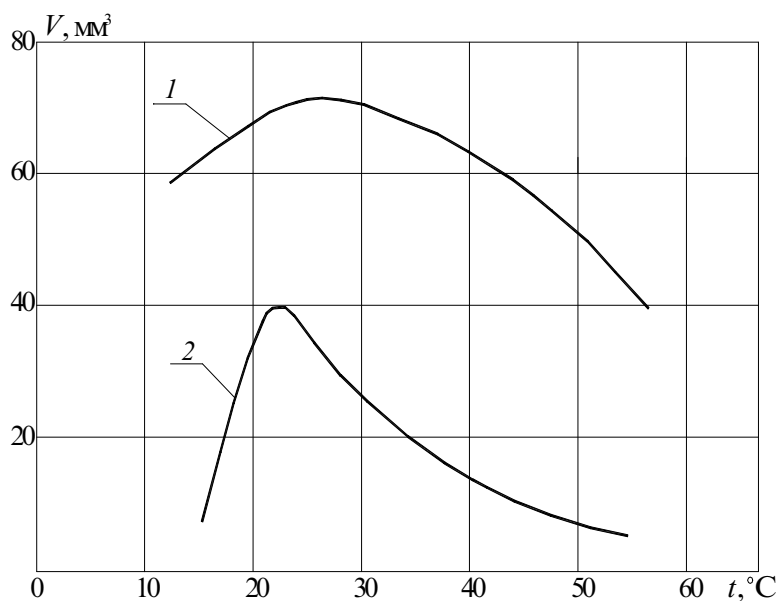


Рис. 5.3.13. Зависимость объема кавитационного кластера от температуры воды

Интенсивность кавитации в РИКА от температуры была исследована в [33]. Здесь максимум зависимости амплитуды кавитационных пульсаций от температуры приходится, примерно, на температуру равную 50 °С. Экспериментальные исследования подтверждают гипотезу о пропорциональности плотности кинетической энергии среды кавитационному давлению на конечной стадии захлопывания пузырька, выдвинутую в [33]. Исходя из этой гипотезы, также предполагается, что начальный радиус кавитационных зародышей равен 10^{-5} м. Однако, надо заметить, что техника эксперимента была построена таким образом, что воду предварительно нагревали до 90 °С, а затем по мере остывания проводили измерения кавитационных импульсов. Таким образом, вода предварительно была доведена почти до кипения, и газосодержание воды было значительно меньше при остывании, чем газосодержание воды при температуре, которая ниже температуры кипения. Зародышей кавитации, следовательно, было тоже меньше, и меньше, соответственно, кавитационных

пузырьков. Кавитационные пузырьки, таким образом, не мешали друг другу, и не происходило сильного поглощения импульсов.

В силу наличия этих противоречий, необходимо было уточнить зависимость кавитации от температуры. Было изучено влияние температуры жидкости на средний объем кавитационного кластера. Эксперименты проводились на свежей водопроводной воде. Нагрев воды происходил непосредственно в мерном баке экспериментального стенда, и вода циркулировала по замкнутому контуру через бак и аппарат. По мере нагревания проводилась фотосъемка кавитационных образований.

Графики, представленные на рис. 5.3.13, показывают, что зависимость среднего объема кавитационного кластера от температуры имеет экстремальный характер. Особенно заметен максимум объема кавитационного кластера при температуре $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\omega R_p = 22,8\text{ м/с}$. Это значение скорости перекрытия является пороговым для начала роста кавитационного кластера, и поэтому максимум зависимости является более выраженным.

Максимум объема кавитационного кластера на $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, вероятно, зависит от таких физических характеристик жидкости, как вязкость, плотность, поверхностное натяжение, давление насыщенных паров, газосодержание. Увеличение температуры приводит к повышению давления насыщенных паров в жидкости, газосодержания и к уменьшению плотности и вязкости. Повышение давления насыщенных паров благоприятно сказывается на развитии кавитации, так как в этом случае требуется более низкая величина амплитуды импульсного давления для достижения фиксированного значения параметра кавитации. Таким же образом проявляется и влияние вязкости на процесс развития кавитации.

Влияние плотности и газосодержания жидкости на кавитацию неоднозначно. Газосодержание свободного газа в жидкости возрастает за счет того, что мелкие пузырьки увеличиваются в объеме при повышении температуры. Это приводит к уменьшению общего числа зародышей кавитации и число кавитационных пузырьков уменьшается.

За счет увеличения объемного газосодержания жидкости ее плотность уменьшается. Увеличение газосодержания и уменьшение плотности приводит к тому, что излучаемая волна интенсивно поглощается в такой среде, и увеличивается демпфирующий эффект. В этом случае должна уменьшаться амплитуда импульсов давления, генерируемых аппаратом, что и было подтверждено экспериментально.

5.4. РАБОТА ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТОВ РОТОРНОГО ТИПА В АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОМ И РЕЗОНАНСНОМ РЕЖИМАХ

5.4.1. Исследование автоколебательного режима работы пульсационного аппарата роторного типа с дополнительным источником колебаний в виде центробежного насоса

Модель автоколебательной системы в виде ПАРТ - дополнительный источник колебаний была рассмотрена в параграфе 3.2.1. Более подробно было описано взаимодействие РИКА с дополнительным источником колебаний в виде центробежного насоса. Для экспериментальной проверки этой модели ко входному патрубку ПАРТ типа РИКА был подключен центробежный насос типа К 45/30. Работоспособность автоколебательной системы проверяли по анализу спектра пульсаций давления на различных участках автоколебательной системы. Спектральный анализ проводили при помощи

гидрофона из титана бария и анализатора гармоник низких частот С 5-3. Спектр колебаний снимали на выходе из дополнительного источника колебаний и в рабочей камере аппарата.

Дискретный спектр колебаний в рабочей камере снимали в нескольких точках вдоль радиальной прямой. Расстояние от входа в канал статора до точки, в которой устанавливали гидрофон, обозначим как $l_{\text{гидр}}$. Гидрофон устанавливали строго напротив канала статора на $l_{\text{гидр}}=20\div 40$ мм. В качестве переменного параметра, от которого зависел дискретный спектр, была выбрана основная частота колебаний f , генерируемых прерывателем $f = nz_p$, где n - частота вращения ротора, об/с; z_p - число каналов в роторе.

Эксперименты проводились на свежей водопроводной воде при температуре $t=20-22$ °С и давлении в рабочей камере $P_k = (0,62\div 0,78)\cdot 10^5$ Па. Все экспериментальные данные проходили статистическую обработку. Относительная погрешность измерений напряжения, снимаемого с гидрофона не превышала 8 %. В подобных исследованиях нет необходимости переводить напряжение в единицы давления, так как нас интересует соотношение величин амплитуд пульсаций между собой при различных f . Напряжение на гидрофоне пропорционально воспринимаемому давлению (в данном диапазоне частот).

ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ НАСОС БЫЛ ПОДКЛЮЧЕН КО ВХОДНОМУ ПАТРУБКУ АППАРАТА, ИМЕЛ ШЕСТЬ ЛОПАТОК НА РАБОЧЕМ КОЛЕСЕ И УГЛОВУЮ СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА $\omega = 300$ с⁻¹. ОСНОВНАЯ ЧАСТОТА ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ НАСОСЕ ОПРЕДЕЛЯЛАСЬ КАК

$$f_n = \frac{\omega_n z_n}{2\pi} = \frac{300 \cdot 6}{2 \cdot 3,14} = 286 \text{ Гц.}$$

На рис. 5.4.1 - 5.4.4 показаны графики зависимости амплитуд первой, второй, третьей и четвертой гармоник спектра пульсаций в рабочей камере в зависимости от частоты f при различных $l_{\text{гидр}}$. Как видно из графиков, на частотах 150, 280, 380, 570, 750, 860, 1000 Гц прослеживаются максимумы амплитуд пульсаций давления на 1 - 4 гармониках. Максимумы амплитуд гармоник основной частоты колебаний в аппарате удовлетворительно совпадают с дискретным рядом частот, полученных при решении уравнения (3.2.6). Отклонения от расчетных значений составляют 10 - 15 %. Особенно заметны возрастания амплитуд на указанных частотах во 2 и 3 гармониках основной частоты колебаний в аппарате.

Анализ амплитуд гармоник в зависимости от координаты точки измерения в рабочей камере показывает, что по мере удаления от прерывателя аппарата акустические волны несколько затухают. Увеличение амплитуды волны при $l_{\text{гидр}} = 40$ мм по сравнению с меньшими $l_{\text{гидр}}$ объясняется тем, что гидрофон в этой точке улавливает не только волны, идущие из канала статора, напротив которого он установлен, но и волны, распространяющиеся из соседних каналов статора.

U

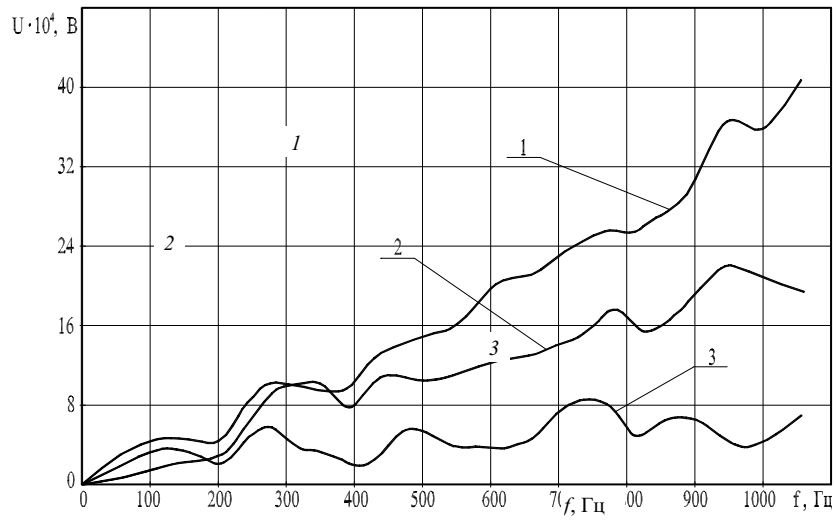


Рис. 5.4.1. Графики зависимости амплитуд 1, 2, 3 гармоник от основной частоты колебаний.

$l_{\text{гидр}} = 20$ мм, 1–1 гарм.; 2–2 гарм.; 3–3 гарм.

U

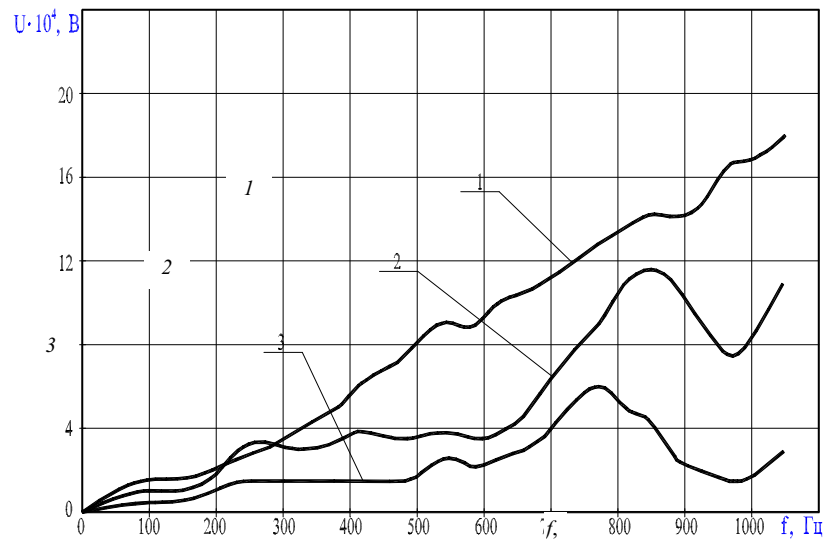


Рис. 5.4.2. Графики зависимости амплитуд 1, 2, 3 гармоник, от основной частоты колебаний ($l_{\text{гидр}} = 25$ мм)

U

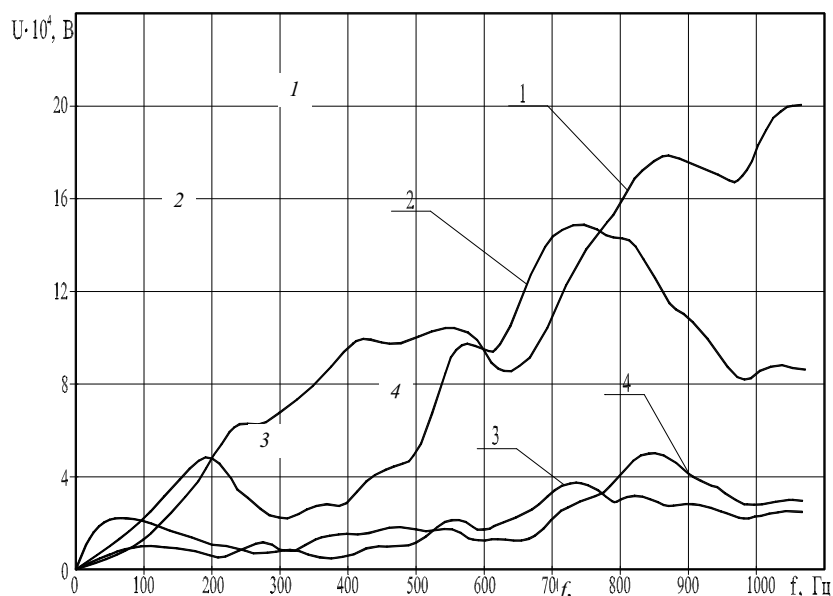


Рис. 5.4.3. Графики зависимости амплитуд 1, 2, 3, 4 гармоник, от основной частоты колебаний ($l_{\text{гидр}} = 30 \text{ мм}$)

U

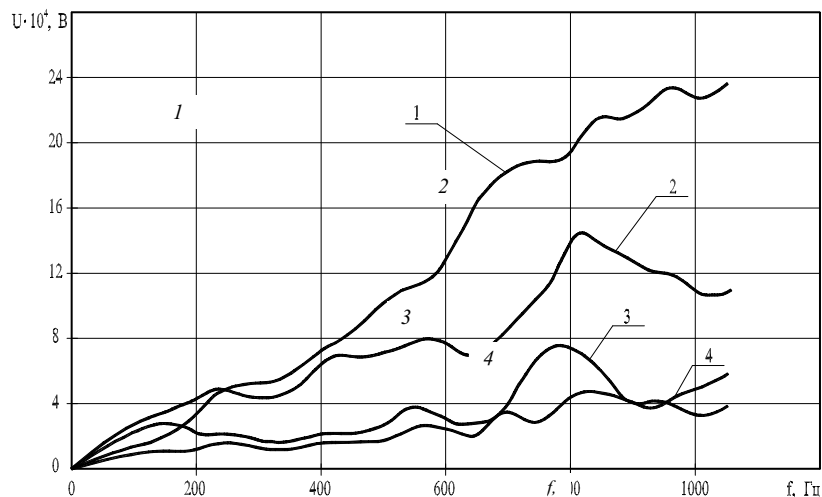


Рис. 5.4.4. График зависимости амплитуд 1, 2, 3, 4 гармоник от основной частоты колебаний

Для проверки воздействия акустического поля, создаваемого прерывателем ПАРТ, на акустическое поле, создаваемое дополнительным источником колебаний, то есть, обратной связи в автоколебательной системе, гидрофон устанавливали на выходном патрубке дополнительного источника колебаний. Зависимость колебаний, регистрируемых гидрофоном, от основной частоты колебаний в аппарате показана на рис. 5.4.5.

Из анализа графика следует, что амплитуда пульсаций в центробежном насосе заметно возрастает при совпадении основной частоты колебаний f , генерируемой ПАРТ, с лопастной частотой дополнительного источника колебаний или ее второй гармонике.

Для проведения спектрального анализа колебаний в дополнительном источнике аппарат выключали из системы, а гидрофон устанавливали на выходном патрубке источника колебаний. Сплошной спектр акустического поля дополнительного источника колебаний показан на рис. 5.4.6. На спектре заметно сильное преобладание пульсаций на всех гармониках и субгармониках лопастной частоты дополнительного источника колебаний.

Волна, излучаемая в рабочую камеру аппарата, является немонохроматической волной, т.е. ангармоничной. Это обусловлено тем, что период времени t_1 , за который каналы ротора совпадают с каналами статора, значительно меньше, чем период времени t_2 , в течение которого канал статора закрыт стенкой ротора. В нашем случае отношение t_1 к t_2 равно 15, 7. Это приводит к тому, что профиль генерируемой волны отличается от синусоидальной и приближается к ударной. Кроме ангармоничности прерывателя аппарата, на спектр акустического поля влияют также физические свойства обрабатываемой жидкости.

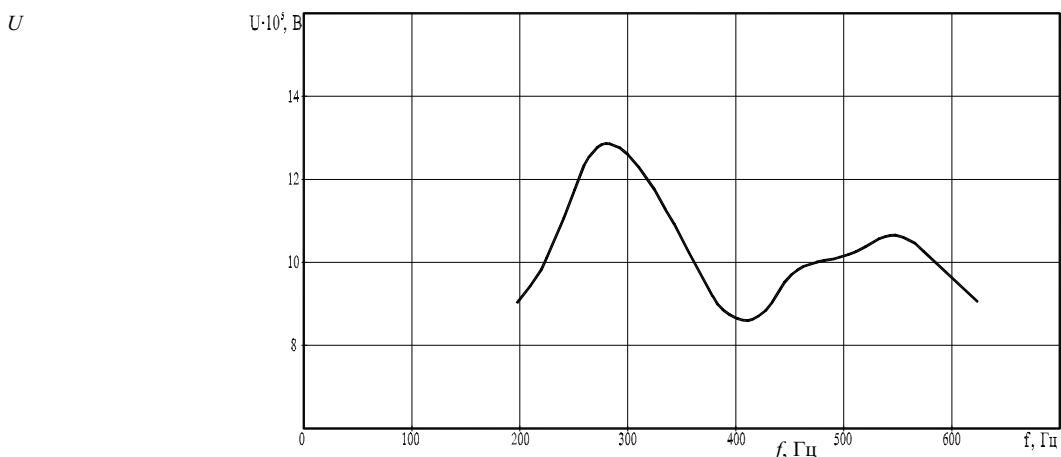


Рис. 5.4.5. Зависимость амплитуды пульсации давления на выходном патрубке дополнительного источника колебаний от основной частоты колебания в РИКА

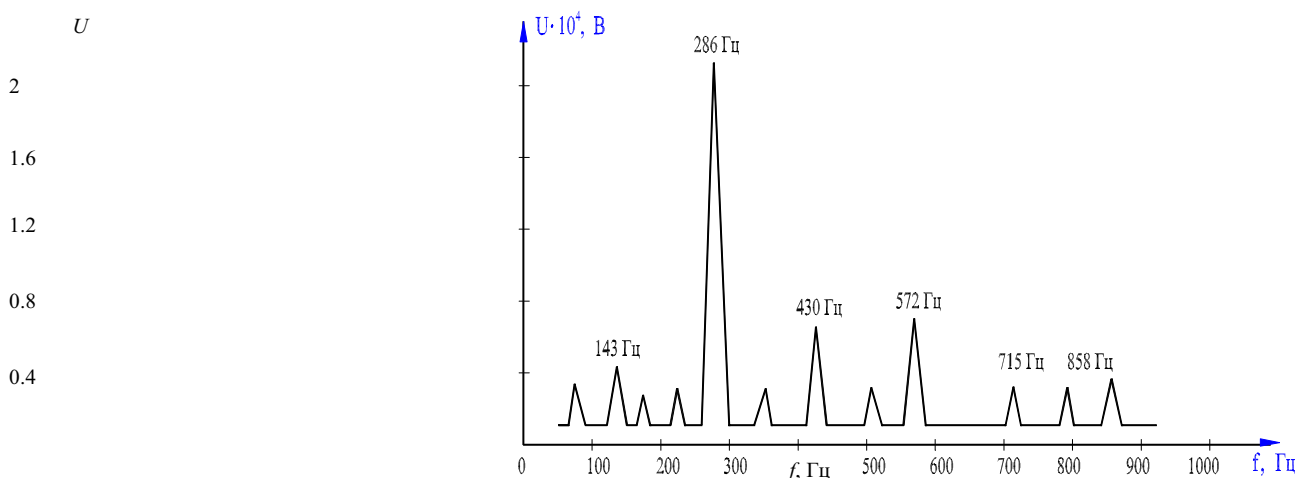


Рис. 5.4.6. Спектр пульсаций давления, генерируемых дополнительным источником колебаний

Рассмотрим влияние нелинейных свойств жидкости на характер распространения акустических волн в жидкости. Для описания акустических полей волн конечной амплитуды необходимо учитывать нелинейные члены в уравнениях гидродинамики [39]. Под волнами конечной амплитуды в нелинейной акустике понимают волны большой амплитуды, исключая сильные ударные волны типа взрывных или разрядных.

Для учета нелинейных свойств среды вводят нелинейный параметр $\varepsilon_0 = B/K_a$, где $n = 46$ об/с, $f = 920$ Гц
 $N_i = 511$ частиц
 $d_{cp} = 2,816047$ мкм
 $K_{II} = 0,563909$
 $d_{II} = 3,516952$ мкм
 $d_g = 6,236737$ мкм
 $\omega R_p = 28,888$ м/с - адиабатический модуль объемной упругости; B - "нелинейный"

модуль объемной упругости. Нелинейный коэффициент ε_0 увеличивает добавку к местной скорости волны в среде. Волна в реальной среде в процессе распространения претерпевает искажения. Это учитывается нелинейным параметром. Нелинейный параметр не является постоянной величиной. Он зависит от многих характеристик среды. Например, при увеличении температуры воды в интервале 20 - 100 °С происходит увеличение $\varepsilon_0 = 4,5 - 6,5$. Также ε_0 несколько возрастает с увеличением гидростатического давления и концентрации растворов ионных солей [40]. Если в жидкости находятся пузырьки газа, то нелинейный параметр может увеличиваться значительно, даже при малой концентрации. Обычная водопроводная вода обязательно содержит пузырьки газа. Существенное увеличение числа и размеров газовых пузырьков вызывает кавитация, которая вносит значительную поправку в нелинейный параметр.

Нелинейные свойства реальной жидкости и ангармоничность прерывателя аппарата (как акустического источника) приводят к тому, что излучаемая волна относится к классу волн конечной амплитуды. Вследствие этого наблюдается перенос звуковой энергии от низших гармоник к высшим. Чем сильнее волна отличается от гармонической, тем богаче ее спектр [2].

Интенсивность немонахроматичной волны можно представить в виде [40]

$$I = \sum_{k=1}^{\infty} V_k^2 \rho c / 2, \quad (5.4.1)$$

где V_k - амплитуда колебательной скорости на k -той гармонике, м/с; ρ - равновесная плотность среды, кг/м³; c - скорость звука, м/с.

Связь между давлением и колебательной скоростью для плоской волны в канале статора

$$V = P/\rho c.$$

С учетом этой формулы имеем

$$I = \sum_{k=1}^{\infty} (P_k/\rho c)^2 / 2 = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{P_k^2}{\rho^2 c^2 2}. \quad (5.4.2)$$

Вводя величину φ , можем записать:

$$\varphi = 1/(2\rho^2 c^2).$$

Таким образом, получаем

$$I = \varphi \sum_{k=1}^{\infty} P_k^2, \quad (5.4.3)$$

где φ - коэффициент пропорциональности.

График изменения интенсивности излучаемой волны в рабочей камере аппарата в зависимости от частоты излучения при различных $l_{гидр}$, представлен на рис. 5.4.7. Анализируя эти кривые, можно сделать вывод, что на частотах, на которых по уравнению (3.2.6) должна возрастать амплитуда излучаемой волны, интенсивность излучаемой волны

возрастает скачками, а в некоторых случаях даже превышает последующую. В то же время, при большой частоте вращения ротора вклад центробежного компонента в генерируемое давление должен возрастать. Если сделать поправку на давление, создаваемое центробежной силой, то видно, что на указанных частотах интенсивность акустической волны выше.

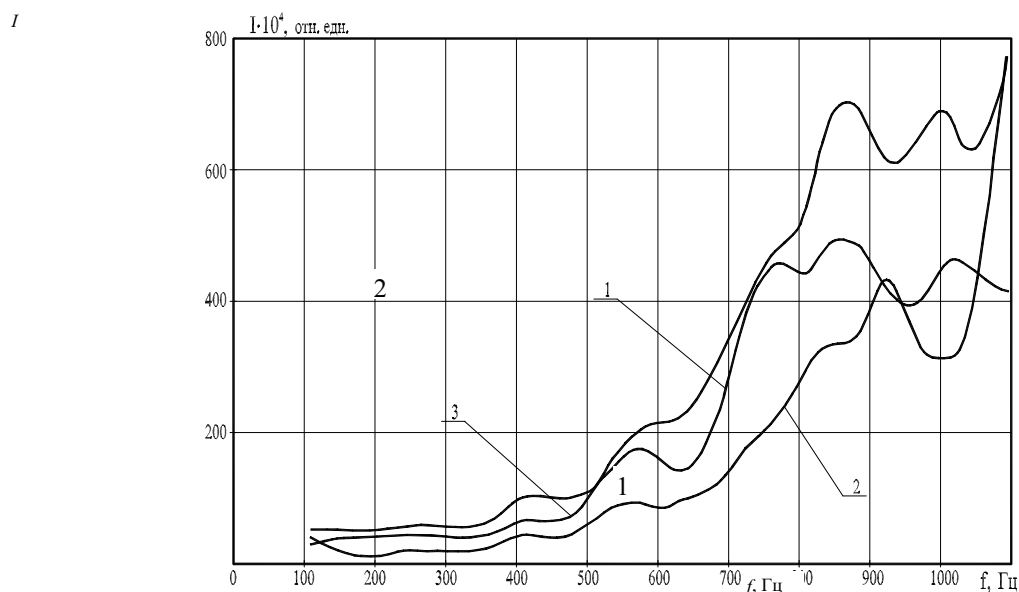


РИС. 5.4.7. ГРАФИК ИЗМЕНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧАЕМОЙ ВОЛНЫ В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ РИКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ:

1 - $l_{\text{гидр}} = 30$ мм; 2 - $l_{\text{гидр}} = 25$ мм; 3 - $l_{\text{гидр}} = 40$ мм

5.4.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕМОВ НА АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Использование явления резонанса - один из наиболее простых и доступных методов для увеличения эффективности акустических излучателей и использования энергии акустического поля. Причем, для этого не надо разрабатывать дополнительные технологические устройства, а можно использовать уже имеющиеся технологические объемы, согласовав собственные частоты колебаний в одномерном, двумерном или трехмерном пространстве с частотой излучателя.

В справедливости этого можно убедиться на достаточно простом опыте [41]. Для ультразвуковой ванны УЗВ с генератором УЗГ 2-0,1 рабочая частота излучения ультразвука составляет $18\,600 \pm 50$ Гц. Рассчитаем размеры параллелепипеда, имеющего резонансную частоту $f_{\text{рез}} = 18\,600$ Гц, по формуле

$$f_{\text{рез}} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{m^2}{x^2} + \frac{n^2}{y^2} + \frac{p^2}{z^2}}, \quad (5.4.1)$$

где x, y, z - длина, ширина и высота параллелепипеда, м; m, n, p - целые числа; $c = 1490$ - скорость звука для воды, м/с.

Длина, ширина и высота соответственно составляют 0,7 м, 0,7 м и 0,68 м. Опустим в УЗВ параллелепипед с рассчитанными размерами, ограничив им объем ультразвуковой ванны. Генерирование колебаний осуществляется внутри параллелепипеда и фиксируется на анализаторе спектра С5-3 при помощи гидрофона ЛХ-610. При изменении последовательно длины, ширины или высоты параллелепипеда, уровень воспринимаемого сигнала снижается в среднем на 20 %.

Аналогичные исследования были проведены авторами работы [42]. Показано, что спектр излучения давления от кавитационного пузырька в цилиндрическом резонаторе зависит от значения собственной частоты резонатора.

Для излучателей типа РИКА рабочая камера, в которую генерируются колебания, имеет вид прямоугольного тора. Собственные частоты такого объема находятся по формуле (3.2.19)

$$f_{mnp} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{K_{mn}^2 + \left(\frac{\pi p}{h_k}\right)^2},$$

где $m=0, 1, 2, \dots$; $n=1, 2, 3, \dots$; $p=1, 2, 3, \dots$; h_k - высота рабочей камеры, м; K_{mn} - корни уравнения

$$I'_m(\lambda X_{mn}) Y'_m(X_{mn}) - I'_m(X_{mn}) Y'_m(\lambda \cdot X_{mn}) = 0;$$

$$\lambda = R_k / (R_c + l_c);$$

I, Y - функции Бесселя и Неймана порядка m .

Для $m=0, n=1$ и $p=1$, первое значение собственной частоты рабочей камеры определяется как

$$f_{011} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{X_1}{R_p + l_c}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{h_k}\right)^2},$$

где $X_1 = K_{01}(R_p + l_c)$ - первый положительный корень, при $\lambda = R_k / (R_p + l_c)$.

Для экспериментальной проверки резонансного режима был спроектирован РИКА погружного типа с радиусом рабочей камеры $R_k = 0,83$ м, радиусом ротора $R_p = 0,045$ м, высотой камеры $h_k = 0,5$ м, длиной канала статора $l_c = 0,003$ м и зазором между ротором и статором $\delta = 2$ мм. Число прямоугольных каналов в роторе и статоре $z = 40$, ширина каналов $a = 2$ мм, высота $h = 40$ мм. Ротор с шестью лопатками приводили во вращение двигателем постоянного тока с угловой скоростью $\omega = 188 - 314 \text{ с}^{-1}$. Основная частота генерируемых импульсов лежала в диапазоне $f = 1200 - 2000$ Гц.

Для $m=0$ определим низшие собственные частоты камеры как

$$f_{0np} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{K_{0n}^2 + \left(\frac{\pi p}{h_k}\right)^2},$$

где K_{0n} - корни уравнения

$$Y_1(X_n) I_1(\lambda X_n) - Y_1(\lambda X_n) (X_n) = 0;$$

$$X_n = K_{0p} (R_p + l_c + \delta) = K_{0p} 0,05;$$

$$\lambda = R_k / (R_p + l_c + \delta) = 16,6.$$

Используя таблицы корней некоторых выражений, содержащих функции Бесселя и Неймана [43], находим n -й положительный корень X_n и определяем $K_{0p} = X_n / 0,05$.

Низшие собственные частоты рабочей камеры составляют ряд:

$$f_{0np} = 1853; 2520; 3177 \text{ Гц.}$$

Гидрофон из титаната бария устанавливали напротив канала статора и измеряли общий интегральный уровень пульсаций давления. На рис. 5.4.8 представлен график зависимости интегрального уровня пульсаций давления от основной частоты пульсаций давления на частотах, удовлетворительно совпадающих с собственными частотами рабочей камеры аппарата.

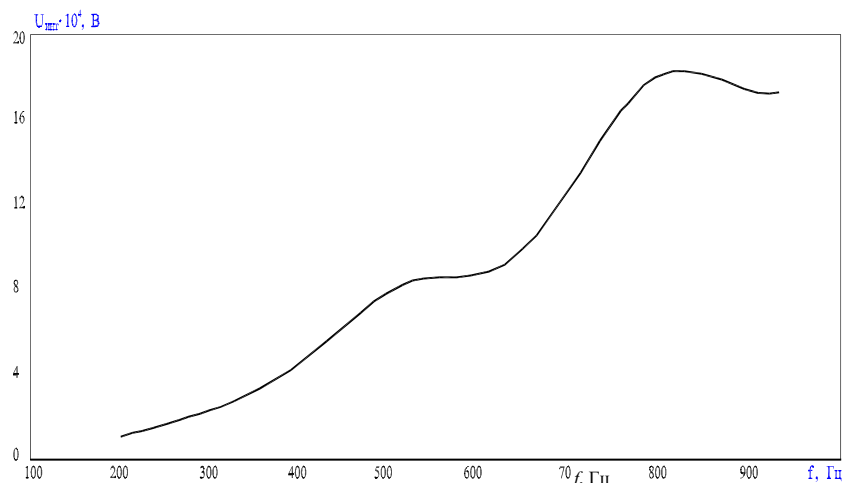


Рис. 5.4.8. График зависимости интегрального уровня пульсации давления от основной частоты пульсаций

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 5

1. Макаров Л. О. Акустические измерения в процессах ультразвуковой технологии. М.: Машиностроение, 1983. 56 с.
2. Ультразвук: Маленькая энциклопедия / Под ред. И. П. Голяминой. М.: Сов. энциклопедия, 1979. 400 с.
3. Юдаев В. Ф. Гидромеханические процессы в роторных аппаратах с модуляцией проходного сечения потока обрабатываемой среды // Теорет. основы хим. технол. 1994. Т. 28. № 6. С. 581 - 590.
4. Блохинцев Д. И. Акустика неоднородной движущейся среды. М.: Наука, 1981.
5. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. пособ. М.: Высш. шк., 1988. 239 с.
6. Дьяконов В. П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. М.: Наука, 1989. 240 с.
7. Кассандрова О. М., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. М.: Наука, 1970. 104 с.
8. Котельников Р. Б. Анализ результатов наблюдений. М.: Энергоатомиздат, 1986. 144 с.
9. Красовский Г. И., Филаретов Г. Ф. Планирование эксперимента. Минск: Изд-во БГУ, 1982. 302 с.
10. Олейник В. С. Практикум по автоматизированному электроприводу. М.: Колос, 1978. 224 с.
11. Балабышко А. М., Зимин А. И., Ружицкий В. П. Гидромеханическое диспергирование. М.: Наука, 1998. 330 с.
12. Особенности работы гидродинамического излучателя в вязкой среде / Л. А. Бореймагорская, А. П. Морозов, А. Ф. Назаренко, В. П. Шестаков // Новые физ. методы интенсификации технол. процессов: Сб. науч. тр. М., 1977. С. 93 - 95.
13. Балабышко А. М., Юдаев В. Ф. Роторные аппараты с модуляцией потока и их применение в промышленности. М.: Недра, 1992. 176 с.
14. Биглер В. И., Лавренчик В. Н., Юдаев В. Ф. Возбуждение кавитаций в аппаратах типа гидродинамической сирены // Акуст. журн., 1978. Т. 24. № 1. С. 34 - 39.

15. Биглер В. И., Юдаев В. Ф. Импульсная акустическая кавитация в аппаратах типа гидродинамической сирены // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 3. С. 409 - 412.
16. Звездин А. К., Зимин А. И. Возбуждение импульсной акустической кавитации // Гидродинамика и акустика одно- и двухфазных потоков. Новосибирск, 1983. С. 92 - 97.
17. Юдаев В. Ф. Об акустической кавитации в гидродинамических сиренах // Акустика и ультразвуковая техника. К.: Техника, 1983. С. 13 - 18.
18. Адиутори Е. Ф. Новые методы в теплопередаче / Пер. с англ. под ред. А. И. Леонтьева. М.: Мир, 1977. 230 с.
19. Курочкин А. К., Смородов Е. А. Экспериментальные исследования кавитации в роторных гидродинамических излучателях // Акуст. журнал. 1987. Т. 33. № 4. С. 707 - 711.
20. Neppiras E. A. Acoustic cavitation // Phys. Repts. 1980. V. 61. № 3. P. 159 - 251.
21. Кортнев А. В., Макаров В. К. Кинематографические исследования ультразвуковой кавитации // Акустика и ультразвуковая техника. К.: Техника, 1968. С. 3 - 14.
22. Lauterborn W. Cavitation: general and basic aspect // In: Symp. on finite - amplitude wave effects in fluids. Copenhagen, 1973, Proc., 1974. P. 195 - 202.
23. Ke Jian, Yamaguchi Atsushi. Cavitation characteristics of long orifices in unsteady flows // J. Jap. Hydraul. and Pneum. Soc., 1995. V. 26. № 1. P. 82 - 87.
24. De Chizelle Y. Kuhn, Ceccio S.L., Brennen C.E. Observations and scaling of travelling bubble cavitation // J. Fluid Mech., 1995. V. 293. P. 99 - 126.
25. Jungelaus H. J. Uber den einfluss des kavetationsvolumens auf den kavitationsmechanismus // Acustica, 1971. V. 27. № 3. P. 145 - 150.
26. Flynn H. G. Pulsations and models for cavitation bubbles // J. Acoustical Society of America, 1975. V. 58. № 6. P. 1160 - 1170.
27. Покусаев Б. Г., Корабельников А. В., Прибатулин Н. А. Волны давления в жидкости с пузырьками пара // Волновые процессы в двухфазных средах. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1980. С. 20 - 46.
28. Промтов М. А., Червяков В. М. О формировании кавитационных образований в роторном аппарате с модуляцией потока // Вестник ТГТУ. 1995. Т. 1. № 3, 4. С. 311 - 315.
29. Промтов М. А. Экспериментальные исследования импульсной кавитации в аппарате типа гидродинамической сирены // Акуст. журнал. 1997. Т. 43. № 4. С. 566 - 569.
30. Константинов Ю. М. Гидравлика. К.: Вища шк., 1988. 398 с.
31. Арзуманов Э. С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. М.: Энергия, 1978. 304 с.
32. Розенберг Л. Д. Кавитационная область. В кн.: Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л. Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. Ч. 5. С. 221 - 266
33. Зимин А. И. Прикладная механика прерывистых течений. М.: Фолиант, 1997. 308 с.
34. Сиротюк М. Г. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации. В кн.: Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л. Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. Ч. 5. С. 168 - 220.
35. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Иностран. лит-ра, 1957. 726 с.
36. Сонолюминисценция, возникающая при гидродинамической кавитации / В. С. Вербанов, М. А. Маргулис, С. В. Демин и др. // Журн. физ. химии. 1990. Т. 64. № 12. С. 3357 - 3361.

37. *Химические* и физико-химические процессы в полях, создаваемых гидроакустическими излучателями / А. К. Курочкин, Е. А. Смородов, Ю. В. Бадиков, М. А. Маргулис // Журн. физ. химии. 1986. Т. 60. № 4. С. 893 - 897.
38. *Флинн Г.* Физика акустической кавитации в жидкостях. В кн.: Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1967. Т.1. Ч.Б. С. 7- 138.
39. *Зарембо Л. К., Красильников В. А.* Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 519 с.
40. *Шутилов В. А.* Основы физики ультразвука: Учеб. пособ. Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. 280 с.
41. *Promptov M. A., Kuleshov Yu.V.* The use of resonant phenomena for effectiveness of acoustic technological apparatuses // Transactions of TSTU, 1999. V. 5. № 1. P. 90 - 94.
42. *Experimental* detection of a subharmonic route to chaos in acoustic cavitation through the tutig of a piezoelectric cavity / C. Cabeza, A.C. Sicardi - Schifino, C. Negreira, and G. Montaldo // J. Acoustical Society of America. - 1998, 103 (6). P. 3227 - 3229.
43. *Справочник* по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. Стигана. М.: Наука, 1978. 832 с.

6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ РОТОРНОГО ТИПА

6.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭМУЛЬГИРОВАНИЯ В ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ РОТОРНОГО ТИПА

Модель эмульгирования, описанная в параграфе 4.2, в качестве основных факторов воздействия на гетерогенную жидкую среду выделяет гидроакустический фактор, который содержит в себе две основные составляющие: макропульсационную - пульсации давления и скорости потока жидкости в канале статора; микропульсационную - пульсации кавитационных пузырьков и их схлопывание с образованием кумулятивных струек. Эти две составляющие приведены к масштабам пульсаций в теории локально-изотропной турбулентности, каждая со своим масштабным коэффициентом.

Экспериментальное исследование процесса эмульгирования осуществлялось на экспериментальном стенде, описанном в параграфе 5.1. В качестве модельной диспергируемой жидкости было выбрано масло М-10Г с вязкостью $\mu = 0,865 \cdot 10^{-3}$ Па·с при $t = 20$ °С; в качестве дисперсионной среды - водопроводная вода. По своим характеристикам это масло практически не отличается от обычно применяемых эмульсолов для приготовления смазочно-охлаждающих жидкостей.

Наиболее распространенными являются эмульсии типа "масло-вода" с концентрацией от 1 до 20 % масла. В лабораторных условиях для удобства работы и оценки параметров получаемой эмульсии, концентрация масла была выбрана равной 2,5 % .

Методика проведения процесса эмульгирования и оценки качества получаемой эмульсии заключалась в следующем. Водопроводную воду и масло в заданном соотношении предварительно смешивали в баке с тихоходной рамной мешалкой для создания грубодисперсной эмульсии. Затем смесь подвергали обработке в ПАРТ типа РИКА.

Эмульсия циркулировала по замкнутому контуру из мерного бака в РИКА и обратно. Через определенные промежутки времени отбирались пробы полученной эмульсии. Начальная температура эмульсии во всех опытах составляла 18 ± 2 °С.

Из взятых проб капли эмульсии наносили на предметные стекла и затем фотографировали с помощью биологического микроскопа МБ-30 с фотонасадкой. Анализ дисперсности эмульсии осуществляли с помощью объект - микрометра ОМП методом проецирования полученного негативного изображения на экран и измерения диаметра частиц масла. Для получения достоверных данных в каждой пробе оценивался диаметр 800 - 1000 частиц.

По полученным данным для каждой пробы составлялись гистограммы распределения частиц масла в воде по фракциям, определялся закон распределения (рис. 6.1.1).

В качестве величин, характеризующих дисперсность полученной эмульсии, были использованы:

а) среднеарифметический диаметр частиц масла в воде

$$d_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{N^*} d_i n_i}{\sum_{i=1}^{N^*} n_i}, \quad (6.1.1)$$

где d_i - диаметр i -ой частицы в пробе, мкм; n_i - число частиц во фракции со средним диаметром d_i ;

б) среднечисловой диаметр частиц

$$d_n^v = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N^*} n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^{N^*} n_i} \right)^{1/3}; \quad (6.1.2)$$

в) средневесовой диаметр частиц [9]

$$d_g^v = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N^*} n_i d_i^6}{\sum_{i=1}^{N^*} n_i d_i^3} \right)^{1/3}; \quad (6.1.3)$$

Однородность эмульсии определяли по коэффициенту полидисперсности K_n , который количественно характеризуется отношением среднечислового диаметра к средневесовому:

$$K_n = d_n^v / d_g^v. \quad (6.1.4)$$

Для полидисперсных систем K_n всегда меньше единицы, для монодисперсных - равен единице.

На рис. 6.1.2 показаны графики среднеарифметического диаметра частиц эмульсии, полученной в РИКА (кривая 1) при однократной обработке в зависимости от линейной скорости перекрывания каналов статора. Кривая 2 на рис. 6.1.2 получена теоретически при тех же технологических параметрах согласно формуле (4.2.11):

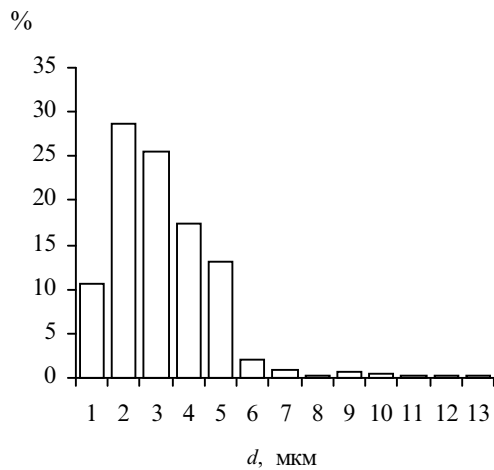
$$d_c = k_c \left(\frac{\delta}{\rho} \right)^{-0,6} \varepsilon_c^{0,4}, \quad (6.1.5)$$

где k_c - эмпирический коэффициент.

Для наших исследований эмпирические коэффициенты приняты равными $k_n = k_p = k_k = 1$, $k_c = 1,2$ с погрешностью не более 15 %. На рис. 6.1.2 построены логарифмические кривые $\ln d_c (\omega R_p)$, показывающие, что интенсивность эмульгирования по теоретическим расчетам больше, чем по экспериментальным исследованиям, вследствие того, что теоретическая модель не учитывает процесс коалесценции, протекающий одновременно с

процессом эмульгирования. При линейной скорости перекрытия каналов статора $\omega R_p > 16$ м/с, эмпирический коэффициент k_c становится постоянным по величине и не зависит от ωR_p .

$n = 6$ об/с, $f = 120$ Гц
 $N_i = 809$ частиц
 $d_{cp} = 3,164401$ мкм
 $K_{II} = 0,5231148$
 $d_{II} = 3,982672$ мкм
 $d_g = 7,613381$ мкм
 $\omega R_p = 3,768$ м/с



$n = 26$ об/с, $f = 520$ Гц
 $N_i = 372$ частиц
 $d_{cp} = 3,067204$ мкм
 $K_{II} = 0,4986998$
 $d_{II} = 3,947283$ мкм
 $d_g = 7,915149$ мкм
 $\omega R_p = 16,328$ м/с

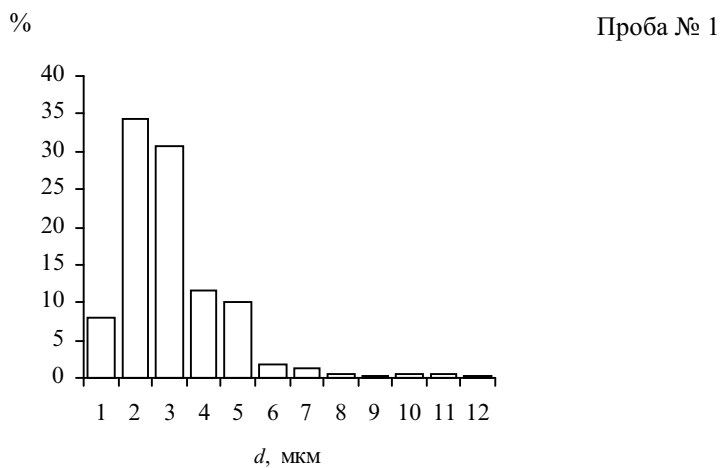
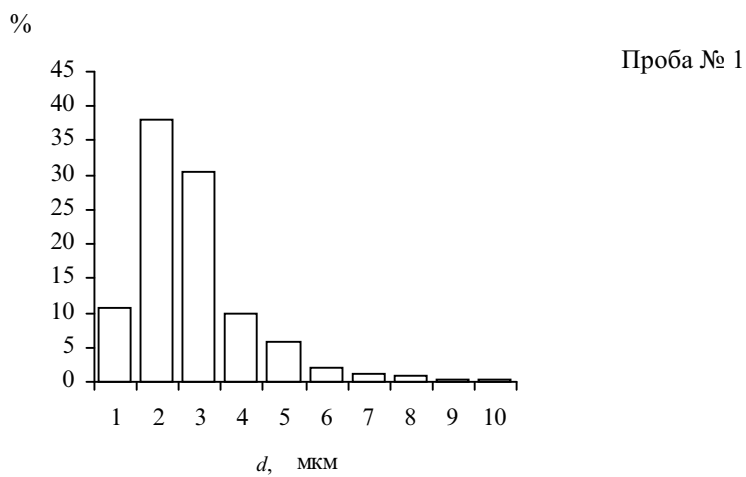
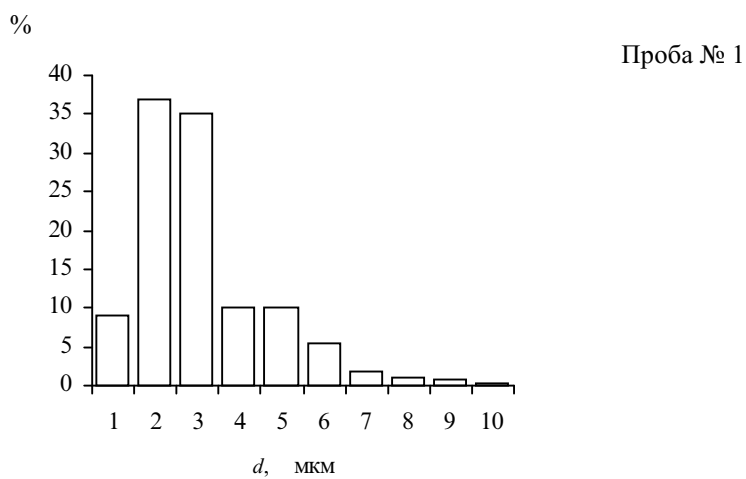


Рис. 6.1.1. Гистограммы распределения частиц масла в воде по фракциям



Продолжение рис. 6.1.1

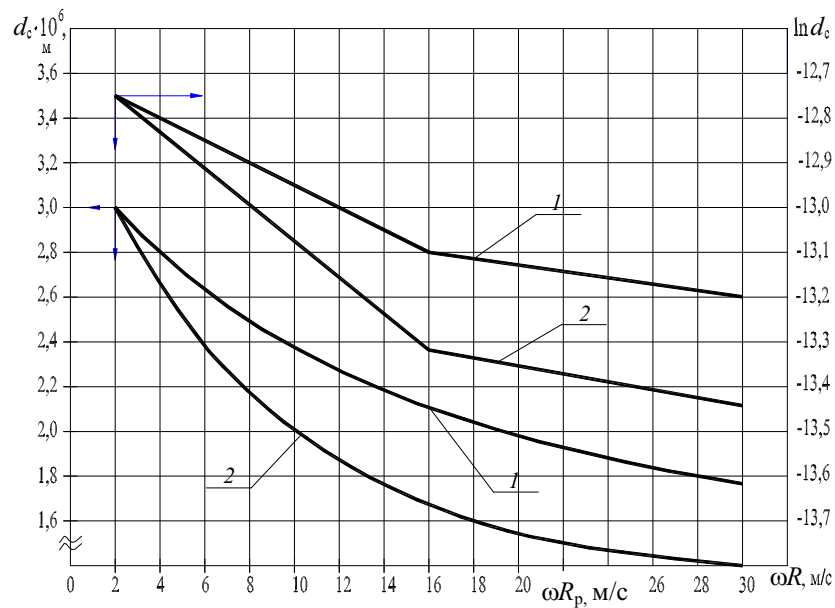


Рис. 6.1.2. Графики экспериментальной (1) и теоретической (2) зависимости среднеарифметического диаметра частиц от скорости перекрытия каналов статора при $\Delta P = 0,8 \cdot 10^5$ Па, $P_k = 0,7 \cdot 10^5$ Па

Это показывает, что при невысокой угловой скорости основное влияние на процесс эмульгирования оказывает увеличение гидродинамического воздействия за счет приращения центробежного давления, но при $\omega R_p > 16$ м/с приращение центробежного давления прекращается за счет проскальзывания жидкости относительно ротора.

К важным параметрам, влияющим на режим работы РИКА, относится угловая скорость ротора и, соответственно, частота генерируемой акустической волны.

Были проведены эксперименты по выявлению влияния частоты основных колебаний ($f = z_p \omega / (2\pi)$) на дисперсность получаемой эмульсии по методике, описанной выше. Первую пробу эмульсии отбирали через 10 с, вторую - через 30 с, третью - через 60 с и четвертую - через 180 с. Время одного цикла прохождения эмульсии по замкнутому контуру установки составляло 20 с. Таким образом, при отборе первой пробы эмульсия проходила через аппарат только один раз. На рис. 6.1.3 показаны графики зависимостей среднеарифметического диаметра частиц и коэффициента полидисперсности от основной частоты колебаний при четырехкратной обработке.

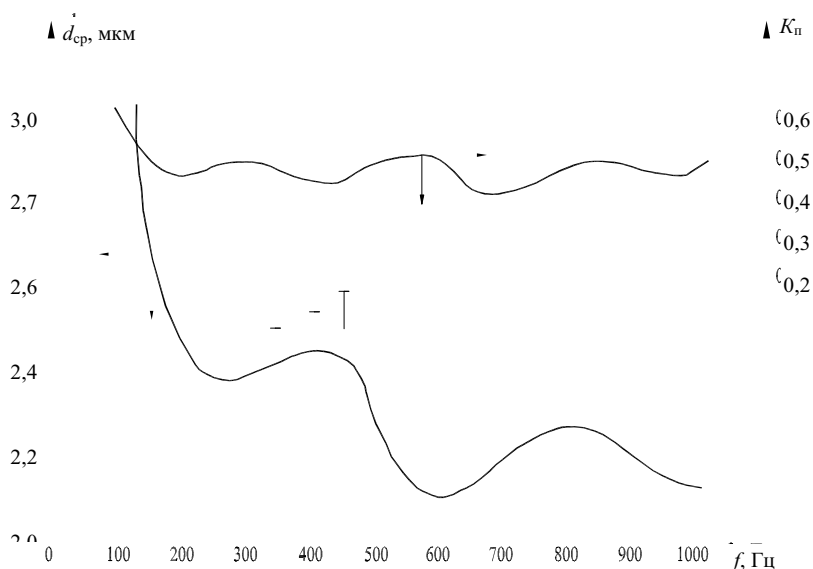


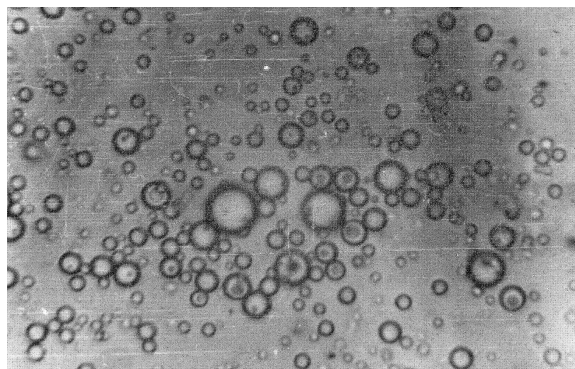
Рис. 6.1.3. Графики зависимости среднеарифметического диаметра частиц и коэффициента полидисперсности эмульсии от основной частоты колебаний

Как видно из рисунков, график этой зависимости имеет несколько экстремумов. Для всех проб по мере увеличения угловой скорости ротора среднеарифметический диаметр частиц эмульсии имеет тенденцию к уменьшению. Максимумы и минимумы кривой располагаются примерно в одних и тех же местах. Минимумы кривой наблюдаются на частотах 280, 560, 1000 Гц. Особенно заметен минимум на $f = 560$ Гц. График изменения коэффициента полидисперсности на указанных частотах, как правило, имеет максимумы.

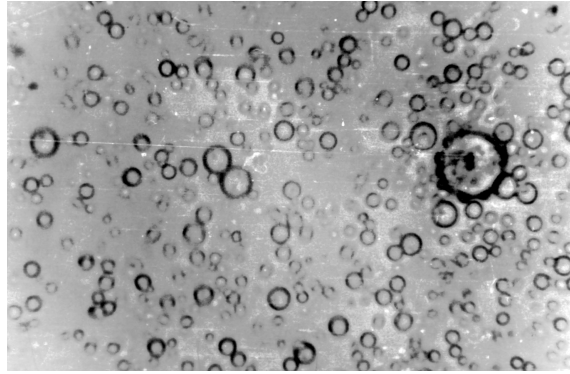
Такой характер кривых объясняется тем, что на указанных скоростях система РИКА - центробежный насос работает в автоколебательном режиме, который подробно описан в параграфе 3.2 и подтвержден экспериментально.

По мере возрастания частоты вращения ротора на процесс эмульгирования начинают влиять кавитационные явления, о чем свидетельствует более сглаженный вид кривой, после того, как аппарат выходит на режим развитой кавитации.

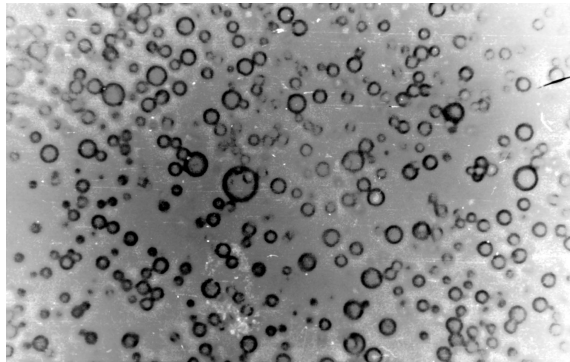
Необходимо отметить, что вместе с процессом эмульгирования идет также процесс коалесценции масляных капель [1]. Равновесной системе эмульсии "масло-вода" энергетически выгодно сдвинуться в сторону процесса коалесценции, чем эмульгирования. Поэтому при обработке эмульсии в РИКА идут одновременно два процесса - эмульгирования и коалесценции капель, и заранее трудно предсказать, какой из процессов в данный момент времени будет преобладать [2, 3]. Таким образом, процессом эмульгирования можно управлять при помощи автоколебательных явлений. Такое же предположение было высказано в работах [4, 5]. Наиболее характерные фотоснимки полученной эмульсии, при различных режимах эмульгирования показаны на рис. 6.1.4.



$$\omega R_p = 3,8 \text{ м/с}$$



$$\omega R_p = 13,8 \text{ м/с}$$



$$\omega R_p = 15 \text{ м/с}$$

Рис. 6.1.4. Фотографии полученной эмульсии

Получить эмульсию со значением среднеарифметического диаметра частиц менее 10^{-6} м крайне затруднительно потому, что частицы масла, имеющие размер менее 10^{-6} м, термодинамически неустойчивы [3]. При микроскопических исследованиях проб эмульсии наблюдалось то обстоятельство, что частицы масла размером менее 10^{-6} м как бы дрожат и постоянно перемещаются.

Экспериментальная зависимость среднеарифметического диаметра частиц эмульсии для кавитационного и автоколебательного режима РИКА удовлетворительно аппроксимируется эмпирической формулой

$$d_{cp} = 2,616 - 5,1 \cdot 10^{-3} \omega + 1,035 \cdot 10^{-5} \omega^2 + \omega^{-0,25} \left| \sin \left(\frac{\omega z_p}{\omega_n z_n} \pi \right) \right|, \quad (6.1.6)$$

Аппроксимация проводилась для частиц, которые при дальнейшей обработке уже не изменяют своего размера, то есть, при $i > 3$ (i - число циклов обработки). Необходимо отметить, что наилучшие параметры имеет эмульсия, приготовленная на РИКА, работающем одновременно в автоколебательном режиме и в режиме развитой кавитации.

Вероятнее всего стабилизация капель эмульсии без введения эмульгаторов происходит за счет образования двойного электрического слоя на границе раздела фаз [2, 3]. Известно, что кавитационные явления вызывают образование в воде свободных ионов [6]. Поэтому при $\omega R_p \leq 7 \text{ м/с}$, где кавитация менее развита, наблюдается разрушение эмульсии после достижения диаметра капель определенного размера, так как в этом режиме обработки

частицы стабилизируются незначительно. Подтверждением этому являются также экспериментальные данные, полученные в работе [7].

Делая вывод, можно отметить, что кавитация способствует увеличению дисперсности и стабильности эмульсии, и автоколебательные явления вносят заметный вклад в процесс дробления капель.

При эмульгировании в промышленных условиях необходимо точно знать, когда дальнейшее проведение процесса становится неэффективным. Под этим подразумевается, что при определенном количестве циклов обработки при непрерывном процессе или определенной длительности периодического процесса дальнейшее уменьшение размера частиц эмульсии очень мало и затраты энергии и времени экономически невыгодны.

Для каждого конкретного состава эмульсии существует свой определенный "предел насыщения". Этот предел зависит также от интенсивности эмульгирования. На рис. 6.1.5 показаны графики зависимости среднеарифметического диаметра частиц 2,5 % эмульсии дизельного масла М-10Г в воде от кратности обработки при различных скоростях вращения ротора. "Выпадение" графика кривой $d_{cp} = f(\omega R_p)$ при $\omega R_p = 18,8$ м/с из общей закономерности является результатом работы РИКА в автоколебательном режиме, что обсуждалось уже выше. Аналогичную зависимость имеют кривые на рис. 6.1.6, взятые из работы [8] для 3 % эмульсии "кубовые остатки синтетических жирных кислот - вода".

Чтобы абстрагироваться от конкретных численных данных, построим график зависимости отношения величины изменения среднеарифметического диаметра частиц при увеличении кратности обработки на единицу к диаметру предыдущего цикла (рис. 6.1.7). Как видно из рисунка, на зависимость этого параметра от цикличности обработки не влияет интенсивность эмульгирования. То есть, относительное уменьшение среднеарифметического диаметра частиц не зависит от увеличения угловой скорости ротора или уменьшения величины зазора между ротором и статором, которые регулируют интенсивность воздействия на обрабатываемую жидкость в конкретном аппарате, а зависит от совокупности всех геометрических и режимных параметров аппарата, физических свойств жидкостей и начального размера частиц эмульсии.

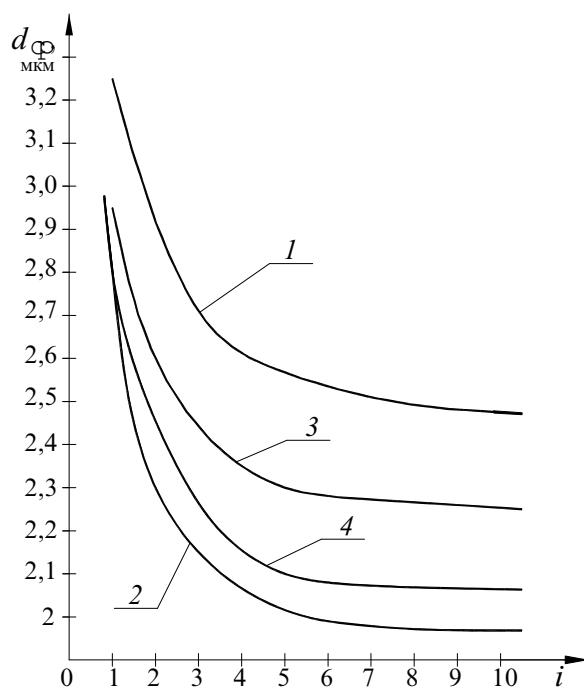


Рис. 6.1.5. Зависимости среднеарифметического диаметра частиц эмульсии от кратности обработки в РИКА $\delta = 0,1$ мм:

1 – $\omega R_p = 13,8$ м/с; 2 – $\omega R_p = 18,8$ м/с; 3 – $\omega R_p = 23,9$ м/с; 4 – $\omega R_p = 28,9$ м/с

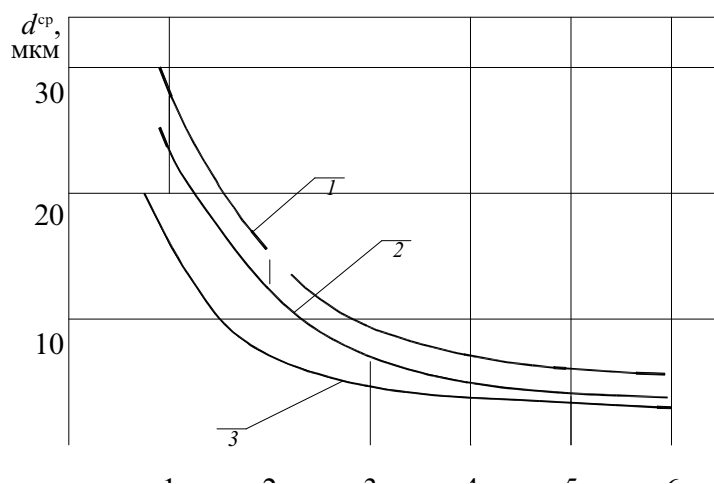


Рис. 6.1.6. Зависимость среднеарифметическая диаметра частиц эмульсии

от количества циклов обработки в РИКА: $\omega R_p = 12,6$ м/с:

1 - $\delta = 0,2$ мм; 2 - $\delta = 0,15$ мм; 3 - $\delta = 0,1$ мм

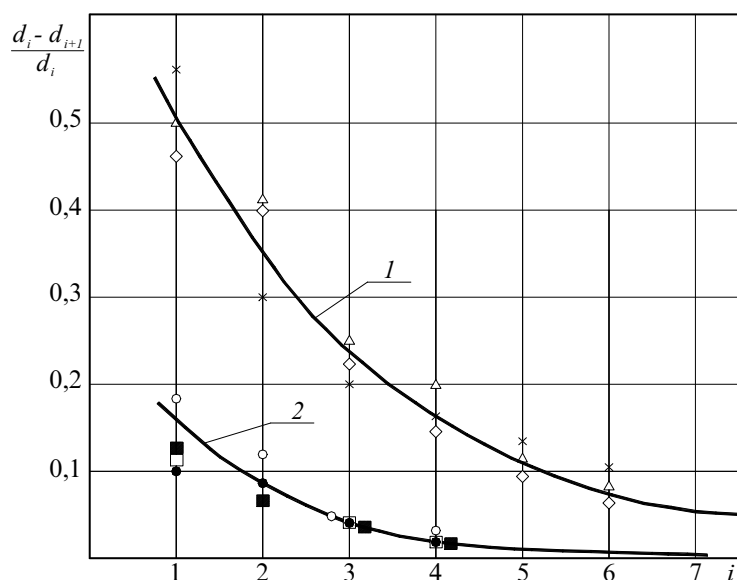


Рис. 6.1.7. Кривая 1 - по данным рис. 6.1.6; кривая 2 - по данным рис. 6.1.5:
 • - $\omega R_p = 13,8$ м/с; ◻ - $\omega R_p = 18,8$ м/с; ◼ - $\omega R_p = 23,9$ м/с; ◻ - $\omega R_p = 28,9$ м/с
 $\omega R_p = 12,6$ м/с; ◊ - $\delta = 0,2$ мм; △ - $\delta = 0,15$ мм; × - $\delta = 0,1$ мм

6.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИСПЕРГИРОВАНИЯ

Процесс приготовления высокодисперсных суспензий широко распространен в химической технологии. Измельчение твердых частиц необходимо как для получения конечного продукта (краски, строительные материалы и т.п.), так и для подготовки сырья к основному процессу (выщелачивание, растворение, адсорбция и т.п.).

Для экспериментальной проверки модели разрушения твердых частиц в ПАРТ, разработанной в параграфе 4.3, проведены эксперименты по диспергированию модельных частиц, близких по форме к параллелепипеду, в качестве которых были взяты частицы литьевого полиметилметакрилата ПММА марки Дакрил-2М (ТУ 6-01-707-72), смола капроновая литьевая, поликапроамид (ТУ 6-06-309-70) и формованные частицы алебаstra (строительного гипса). Частицы полимеров представляли собой экструзионный продукт с размерами: полиметилметакрилат - $3 \times 2 \times 1,7$ мм; поликапроамид - диаметр $1 \times 2,5$ мм. Частицы алебаstra специально формовали перед проведением экспериментов по измельчению. Водный раствор алебаstra наносили на чистую металлическую поверхность слоем толщиной 2 мм. После того как произошло первичное схватывание раствора, его нарезали на кубики со стороной 2 мм. После нарезки частицы высушивали при комнатной температуре и оставляли на сутки до полного схватывания. Полученную смесь частиц просеивали на ситах и определяли гранулометрический состав. Это необходимо было делать потому, что, несмотря на стремление к формированию частиц одного размера, при высыхании происходила деформация и разрушение некоторых частиц.

Эксперименты по измельчению частиц поликапроамида, полиметакрилата и асбеста проводили на РИКА-200. Для того, чтобы уменьшить объем используемого материала, и, в то же время, приготовить суспензию с содержанием твердой фазы не менее 10 % от объема, выходной патрубков аппарата был закольцован с входным патрубком, а циркуляция суспензии через аппарат осуществлялась за счет центробежных сил, для чего в роторе были установлены лопатки. На выходном патрубке был установлен фильтр, в котором собирались все частицы прошедшие через аппарат. Таким образом, частицы проходили через аппарат

только один раз, и все частицы, которые подверглись измельчению, проходили однократную обработку в активной зоне аппарата.

Для относительно пластичных и упругих материалов, таких как поликапроамид и полиметилметакрилат характерна традиционная схема изменения гранулометрического состава частиц. Графики зависимости изменения наибольшего размера частиц при обработке от угловой скорости ротора показаны на рис. 6.2.1. Формы кривых обоих графиков близки к прямой линии.

Экспериментальные кривые распределения частиц поликапроамида и полиметилметакрилата по размеру после диспергирования при различных угловых скоростях вращения ротора показаны на рис. 6.2.2 и 6.2.3. Изменение формы кривых распределения по размеру для обоих материалов при увеличении угловой скорости вращения ротора показывает, что смесь частиц стремится к монодисперсности.

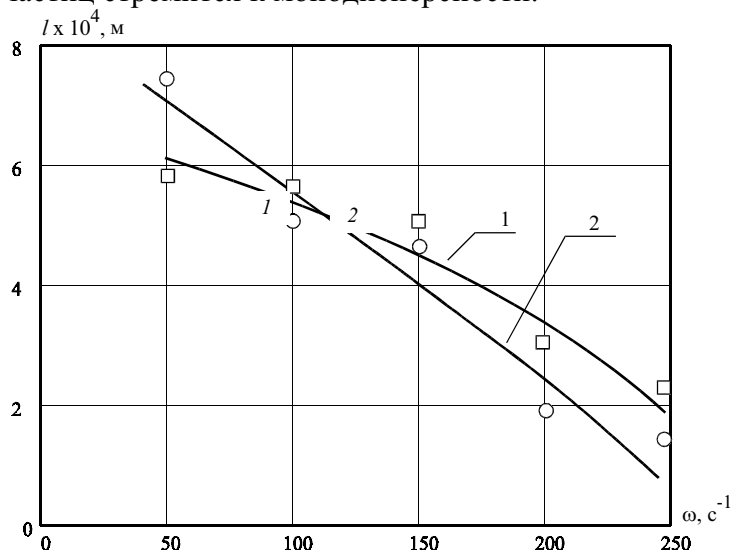


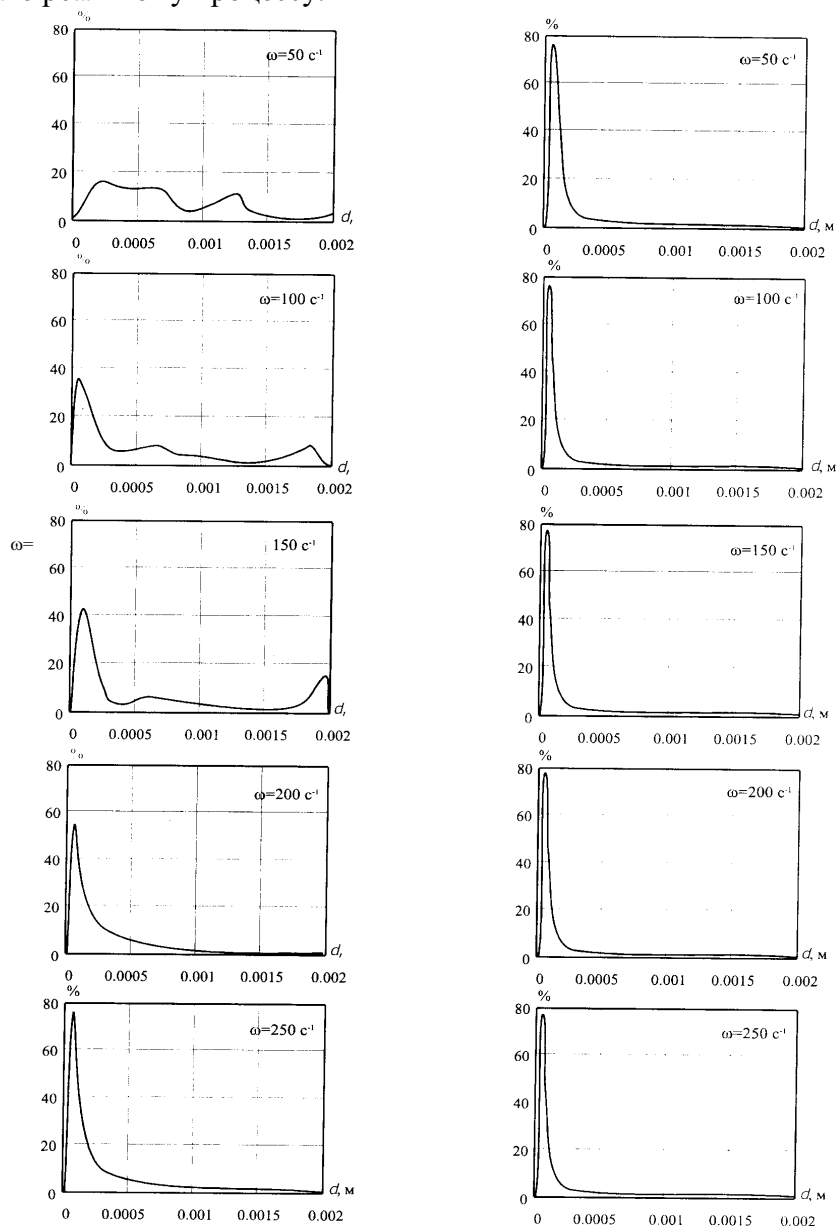
Рис. 6.2.1. График зависимости среднеарифметического диаметра частиц от угловой скорости ротора: 1 - поликапроамид; 2 - полиметилакрилат

На рис. 6.2.2 и 6.2.3 показаны также расчетные кривые распределения частиц по размерам, полученным в соответствии с методикой расчета гранулометрического состава частиц, описанной в параграфе 4.3. Сравнение расчетных и экспериментальных кривых показывает, что расчетные и экспериментальные данные дают удовлетворительное совпадение при больших угловых скоростях вращения ротора. Несовпадение расчетных и экспериментальных кривых распределения частиц при низких угловых скоростях можно объяснить небольшой скоростью совмещения каналов ротора и статора и, соответственно, низкой частотой механического контакта рабочих поверхностей ротора и статора с обрабатываемыми частицами.

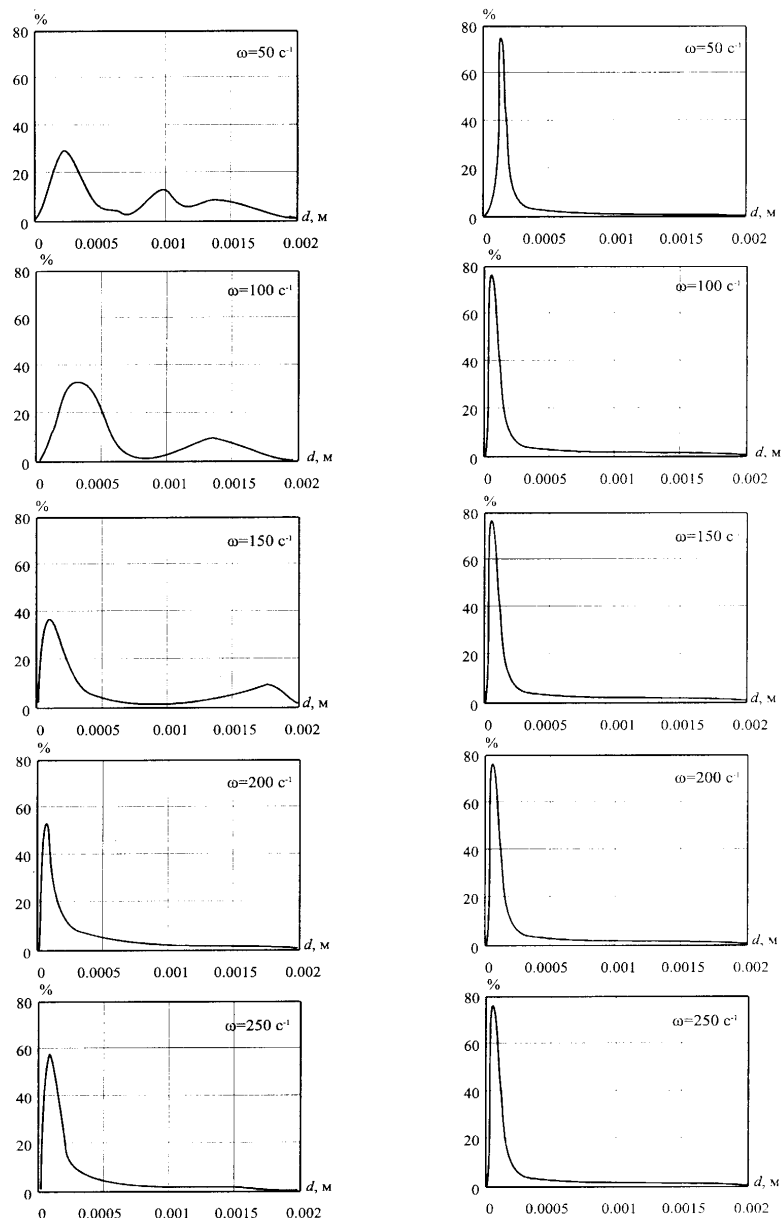
Эксперименты по диспергированию частиц алебаstra показали, что их измельчение происходит, практически, до пылевидного состояния. Изменение угловой скорости ротора не влияет на процесс измельчения. Кривые распределения частиц по размерам при диспергировании не отличаются друг от друга. Средний размер частиц алебаstra после измельчения составлял около 0,1 мм. Таким образом, можно сделать вывод, что для хрупких частиц со слабой межмолекулярной связью диспергирование происходит за счет механического и гидродинамического факторов воздействия, т.е. за счет истирающих и ударных нагрузок.

В заключение хотелось бы отметить, что в задачи настоящего исследования не входило изучение всех особенностей процесса измельчения твердых материалов в ПАРТ в

зависимости от их размеров, закона распределения частиц по размеру в смеси, физических параметров материала, геометрических и технологических параметров аппарата и т.п. Задачей являлось определение адекватности разработанной модели разрушения твердых частиц в аппарате реальному процессу.



**РИС. 6.2.2. КРИВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА ПО РАЗМЕРАМ ПОСЛЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛОВЫХ СКОРОСТЯХ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА:
СЛЕВА - ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ, СПРАВА- РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ**



**РИС. 6.2.3. КРИВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПОЛИКАПРОАМИДА ПО РАЗМЕРУ ПОСЛЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛОВЫХ СКОРОСТЯХ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА:
СЛЕВА - ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ, СПРАВА- РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ**

6.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ NaCl В ВОДЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ В ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ РОТОРНОГО ТИПА

Растворение различных солей является распространенным процессом в химической технологии. ПАРТ хорошо зарекомендовали себя как устройства, существенно интенсифицирующие процесс растворения в системах "твердое - жидкость" [10]. Растворение твердых частиц в жидкости при обработке в ПАРТ происходит одновременно с процессом диспергирования при механическом контакте частиц с рабочими поверхностями ротора и статора аппарата. Растворяемые частицы сразу же после механического разрушения подвергаются многофакторному воздействию в канале статора, включающему в себя турбулентные пульсации скорости потока жидкости при импульсном вводе в канал статора,

ударные сферические волны при пульсациях кавитационных пузырьков и кумулятивное воздействие при их схлопывании.

Импульсное воздействие потока жидкости на растворяемую частицу аналогично воздействию высокоскоростного турбулентного потока в канале переменного сечения и конфигурации. Хаотические турбулентные флуктуации скорости различных слоев жидкости создают большие сдвиговые усилия на поверхности твердой частицы, что способствует уменьшению величины диффузионного слоя, усиливает его подвижность, обеспечивает приток свежей жидкости к поверхности растворяемой частицы. Пульсационное воздействие на твердую частицу в жидкости при пульсациях близлежащих кавитационных пузырьков заключается в создании высокоскоростных потоков жидкости у поверхности частицы.

На поверхности твердых тел всегда находятся мелкие газовые или паровые пузырьки. При воздействии импульса разрежения в жидкости пузырек расширяется, а при повышении давления - схлопывается с образованием кумулятивной струйки, проникающей в твердое тело. Ускорение процесса растворения твердой частицы при кумулятивном воздействии достигается как за счет увеличения площади поверхности частиц, так и за счет уменьшения толщины диффузионного слоя.

Экспериментальное исследование процесса растворения в ПАРТ типа РИКА проводили на установке, описанной в параграфе 5.1. Вода в определенном объеме заливалась в мерный бак и циркулировала через насос РИКА и обратно в мерный бак по замкнутому контуру[11]. Навеска каменной соли (NaCl) засыпалась в мерный бак за время, равное времени цикла прокачки воды через РИКА. Вес порции соли рассчитывался таким образом, чтобы концентрация соли была на 10 % больше концентрации насыщения рассола. Подобное превышение необходимо в силу наличия примесей в каменной соли. Химический состав соли (ГОСТ 13830-87) был следующим: NaCl - 89,4; Ca - 0,89; Mg - 0,96; SO₄ - 1,79; влага - 0,8; нерастворимый осадок - 6,16 %. Чтобы не произошло забивки каналов ротора в процессе растворения, вся соль просеивалась на калибровочных ситах и все фракции более 2 мм отсеивались. Гранулометрический состав кристаллов каменной соли, засыпаемой в мерный бак установки: фракция до 0,5 мм - 33,8 %; фракция от 0,5 до 1,0 мм - 34,4 %; фракция от 1,0 до 1,5 мм - 24 %; фракция от 1,5 до 2,0 мм - 4,1 %.

В процессе растворения измеряли концентрацию соли в воде путем отбора проб и изменения плотности рассола. Для определения концентрации NaCl в воде использовался набор стандартных денсиметров № 19 (ГОСТ 1500-57). Кривые изменения концентрации соли в процессе растворения показаны на рис. 6.3.1. Из графиков видно, что предельная концентрация достигается практически за 20 с, что соответствует одному циклу прохождения жидкости через РИКА.

По известной зависимости "концентрация - время" определялся коэффициент массоотдачи (скорости растворения) β по формуле Щукарева:

$$\frac{dM}{dt} = \beta S(C_n - C_p).$$

Основной трудностью при определении коэффициента массоотдачи в этом уравнении является расчет площади растворения. В нашем случае были введены следующие допущения: кристаллы NaCl имеют правильную кубическую форму; распределение размеров кристаллов внутри одной фракции соответствует нормальному закону.

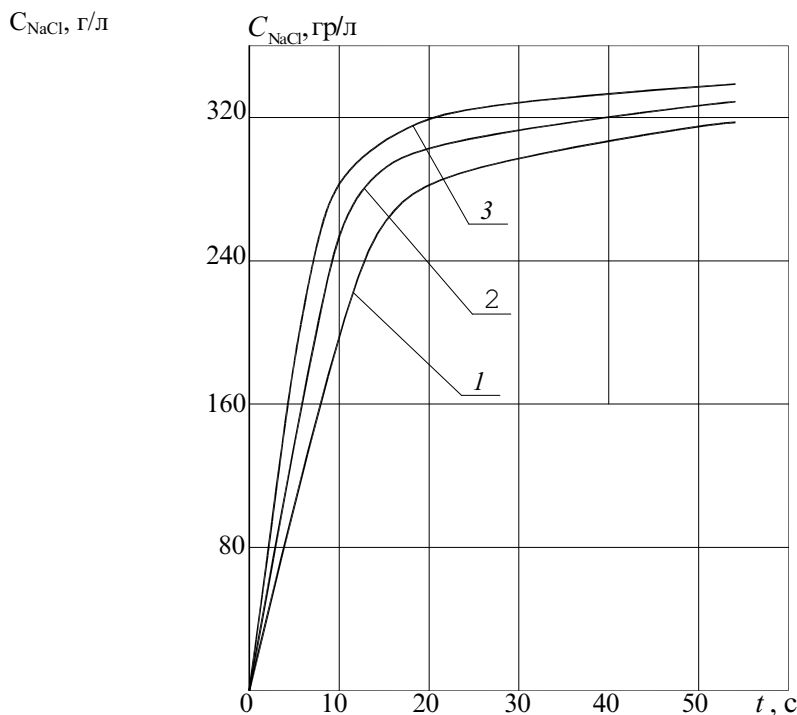


Рис. 6.3.1. Графики зависимости концентрации NaCl в воде от времени при растворении в РИА. $P_k = 2,5 \cdot 10^5$ Па :

1 - $\omega R_p = 5,2$ м/с; 2 - $\omega R_p = 15,7$ м/с; 3 - $\omega R_p = 26,2$ м/с

Количество кристаллов в каждой фракции определялось путем подсчета кристаллов в пробах, и считалось что все эти кристаллы имеют размер, равный среднему размеру фракции. Определялась площадь поверхности частиц одной фракции, а затем общая площадь частиц в навеске. По формуле Щукарева определяли среднюю величину коэффициента массоотдачи.

В параграфе 4.4 была разработана модель процесса растворения "твердого в жидкости" при обработке в РИКА в виде уравнения (4.4.5):

$$\beta = 0,267 \varepsilon^{0,25} Pr^{-0,75} .$$

Для проверки адекватности предлагаемой модели растворения оценивался коэффициент массоотдачи при различных режимах работы РИКА. На рис. 6.3.2 показаны графики зависимости коэффициента массоотдачи от скорости совмещения каналов ротора и статора. Кривые, построенные по расчету в соответствии с уравнением (4.4.5), удовлетворительно соответствуют экспериментальным данным, полученным при таких же параметрах. Коэффициенты эффективности использования энергии соответственно имели следующие значения: $k_{II} = 0,1$; $k_{II} = 8 \cdot 10^{-5}$; $k_K = 8 \cdot 10^{-5}$. Перегиб кривой на $\omega R_p \approx 10$ м/с показывает, что выше этого значения ωR_p начинает сказываться влияние кавитационных эффектов.

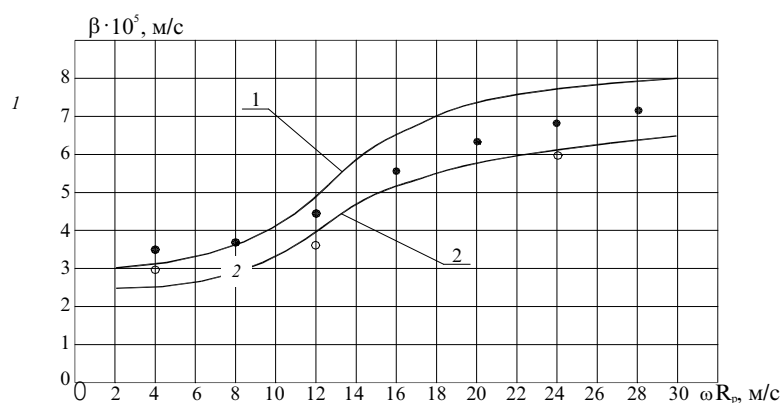


Рис. 6.2.2. Графики зависимости коэффициента ассоотдачи от скорости совмещения каналов ротора и статора. Сплошные линии - расчет, точки - эксперимент.

$$1 - P_k = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Па}, \quad 2 - P_k = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}, \quad R_{\text{max}} = 10^{-4} \text{ мм}, \quad R_{\text{max}} / R_0 = 3$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 6

1. Крупин С. В. Суспензии и эмульсии в нефтепромысловом деле. Казань: Изд-во КХТИ, 1978. 78 с.
2. Клейтон В. Эмульсии. Их теория и техническое применение / Пер. с англ. под ред. П. А. Ребиндера. М.: Иностран. лит., 1950. 680 с.
3. Эмульсии. Пер. с англ. / Под ред. Ф. Шермана. Л.: Химия, 1972. 448 с.
4. Карпенко Л. А., Трошкин О. А., Карпенко И. А. Исследование характеристик дисперсности эмульсий, полученных при диспергировании жидкостей роторно-пульсационным аппаратом // Теорет. основы хим. технол. 1978. Т. 12. № 5. С. 780 - 783.
5. Карпенко Л. А., Карпенко И. А. Исследование виброрезонансного диспергирования несмешивающихся жидкостей щелевыми насадками // Теорет. основы хим. технол. 1976. Т. 10. № 1. С. 87 - 95.
6. Маргулис М. А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция. М.: Химия, 1986. 288 с.
7. Бутко Г. Ю. Исследование процессов эмульгирования в роторно-пульсационных аппаратах применительно к целлюлозно-бумажному производству: Дис. ... канд. техн. наук. Л., 1975. 146 с.
8. Балабышко А. М., Зимин А. И., Ружижский В. П. Гидромеханическое диспергирование. М.: Наука, 1998. 331 с.
9. Практикум по коллоидной химии и электронной микроскопии / Под ред. С. С. Воюцкого и Р. М. Пашич. М.: Химия, 1974. 224 с.
10. Аксельруд Г. А., Молчанов А. Д. Растворение твердых веществ. М.: Химия, 1977. 272 с.
11. Промтов М. А., Червяков В. М. Кинетика растворения NaCl в воде при обработке в роторно-импульсном аппарате // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2000. Т. 43. № 6. С. 133 - 135.

7. РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ, ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТОВ РОТОРНОГО ТИПА

7.1. АНАЛИЗ, ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ И ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТОВ РОТОРНОГО ТИПА

При проектировании оборудования всегда стоит задача сделать его максимально эффективным. Эффективность любого объекта выражается через соотношение результата и затрат для достижения данного результата [1]. Основные критерии эффективности разделяют на две группы: а) отдельных элементов системы; б) системы и подсистемы. Они подразделяются по следующим классификационным признакам:

- *по виду*: натуральный, энергетический, термодинамический, эксергетический, экономический;

- *структуре*: абсолютный, удельный, относительный, свернутый;

- *уровню*: глобальный, локальный, обобщенный;

- *приложению*: предпроектный, проектный, производственный, эксплуатационный, ликвидационный;

- *масштабу использования*: промышленность, отрасль, промышленное объединение, технологический процесс;

- *сроку действия*: оперативный, годовой, долгосрочный [1].

Наиболее распространенными являются оценки с помощью экономических критериев. Натуральные критерии оценки эффективности наиболее применимы при анализе низших уровней системы. К натуральным критериям относятся мощность, масса, объем, габариты, расход энергии, площадь или объем рабочей зоны, долговечность и т.п. Для сравнительного анализа удобно пользоваться такими относительными параметрами, как:

- общий КПД;

- эксергетический КПД, $K_e = E_2/E_1$, где E_1 , E_2 - эксергия входящих и выходящих потоков, Дж/с [2];

- термодинамический КПД, $K_T = E_n/E_p$, где E_n , E_p - используемая и располагаемая эксергия, Дж/с;

- энергоемкость, $e = N/M$, Вт/кг (Вт/Дж), показывающая количество потока энергии на единицу перенесенного вещества или энергии;

- материалоемкость, $m = G/M$, кг/кг (кг/Дж), показывающая количество массы ХТА на единицу перенесенного вещества или энергии;

- производительность, $Q = M/t$, кг/с (Дж/с), показывающая величину потока массы или энергии в единицу времени.

Критерии эффективности на предпроектном этапе носят оценочный, ориентировочный характер. На проектном этапе расчет проводится по эффективности капитальных вложений в ХТС. Производственный этап предусматривает изготовление и установку объекта для ввода его в эксплуатацию, с проектными параметрами при наименьших затратах. Здесь главную роль отводят такому экономическому показателю, как себестоимость объекта. На эксплуатационном этапе основной задачей является определение оптимального режима функционирования ХТС и ее элементов. Здесь критериями эффективности ХТС являются обобщенные показатели: абсолютная эффективность функционирования ХТС; срок окупаемости капитальных вложений; прибыль; суммарный расход и стоимость энергии; реальный годовой экономический эффект. На всех этапах жизненного цикла ХТС в качестве

критериев эффективности рекомендуется использовать такие интегральные критерии, как суммарные приведенные затраты и суммарный реальный экономический эффект, которые в неявном виде включают в себя все частные критерии, указанные выше [1].

При сравнении нескольких различных ХТС одного назначения можно получить равный размер прибыли, но эффективность этих ХТС может быть различной, так как на их реализацию потребуются различные затраты. Кроме непосредственных экономических показателей необходимо также учитывать и экологическую чистоту ХТС и социальные показатели проекта. Методы расчета реального приведенного экономического эффекта, срока окупаемости, внутренней нормы прибыли, рентабельности и других показателей экономической эффективности на современном этапе приводятся во многих литературных источниках.

При анализе и выборе критериев и методов расчета ПАРТ необходимо выделить две задачи:

1) расчет и проектирование универсального ПАРТ, предназначенного для проведения химико-технологических процессов в жидких средах;

2) расчет и проектирование ПАРТ, предназначенного для конкретного процесса.

При решении первой задачи, когда проектируется многофункциональный аппарат, оперировать можно критериями, применяемыми на предпроектном, проектном и производственном этапах. Основное внимание необходимо уделять натуральным и относительным критериям, а затем уже экономическим, т.е. сначала необходимо максимизировать критерии, показывающие техническую и технологическую эффективность, а затем при прочих равных условиях минимизировать затраты на изготовление аппарата.

При решении второй задачи, когда технологическая цепочка и технологический цикл полностью определены, необходимо проводить расчет с использованием экономических критериев. "Жизненный цикл" включает в себя предпроектный, проектный, производственный и эксплуатационный этапы. Здесь решающими критериями должны являться срок окупаемости капитальных вложений и годовой экономический эффект.

В литературе, в основном, приводятся критерии и методы расчета универсального ПАРТ. Эти методики расчета ориентированы на определенный фактор, интенсифицирующий ХТП в жидкости.

Основными интенсифицирующими факторами ХТП в ПАРТ являются:

1) механическое воздействие на дисперсную фазу в жидкости;

2) гидродинамическое воздействие, под которым понимается развитая турбулентность и формирование потоков с определенной траекторией и скоростью, макропульсации давления;

3) гидроакустическое воздействие, проявляющееся в акустических и кавитационных эффектах.

Как уже указывалось, при проектировании РПА в основу берутся первый и второй факторы, а при расчете РИКА - второй и третий факторы.

После того, как определены границы оптимальных параметров РПА или РИКА с точки зрения интенсивности обработки жидкой среды, проводят корректирующий расчет для проектирования аппарата с оптимальными затратами мощности. Таков традиционный алгоритм расчета ПАРТ.

Универсальные ПАРТ обычно используются в малотоннажном производстве с широким спектром номенклатуры производимого продукта и для решения исследовательских задач. В крупном промышленном производстве, а также, когда оправдано применение аппарата для проведения только одного технологического процесса, наиболее эффективным является использование специально спроектированного ПАРТ для данного технологического процесса.

Для универсальных ПАРТ необходимо заранее определить, какой из основных факторов воздействия закладывается в принцип функционирования и эффективности работы аппарата. Механический фактор воздействия редко бывает определяющим, так как ПАРТ неэффективны по сравнению со специальными машинами для разрушения твердых частиц.

Как правило, механическое воздействие является сопутствующим в таких процессах, как эмульгирование и экстрагирование.

Наиболее существенными и определяющими интенсивность ХТП и эффективность работы ПАРТ являются гидродинамический и гидроакустический факторы воздействия. Сущность этих факторов была проанализирована в главе 1. ПАРТ, в основу работы которых положены эти факторы воздействия, относятся к классу роторных гидродинамических излучателей, которые обычно называются роторными аппаратами с модуляцией потока (РАМП) или роторными импульсно-кавитационными аппаратами (РИКА). Последнее название наиболее точно определяет факторы воздействия на жидкую среду.

К гидродинамическим факторам относятся пульсации давления и скорости потока, развитая турбулентность потока жидкости. Более обоснованный подход в определении наилучших условий для эффективного гидродинамического воздействия является расчет на основе уравнения истечения жидкой среды через прерыватель аппарата. Ориентиром на эффективную работу аппарата служит максимум амплитуды пульсаций скорости и давления в потоке жидкости в канале статора:

$$\frac{dV}{dt} \rightarrow \max \quad \text{или} \quad P_m \rightarrow \max .$$

К гидроакустическим факторам воздействия относится кавитационное воздействие, выражающиеся в ударных волнах и высокоскоростных кумулятивных струйках при схлопывании и пульсациях кавитационных пузырьков. К гидроакустическому воздействию можно отнести также автоколебательные и резонансные эффекты, но эти эффекты не обладают прямым воздействием на обрабатываемую жидкость, а усиливают гидродинамический и кавитационный факторы.

Относительными параметрами, определяющими степень энергоемкости на единицу (кг) обрабатываемой жидкой среды служит величина диссипации энергии:

$$\varepsilon = N / v_p.$$

Величина диссипации энергии существенно зависит от объема v , в котором происходит основная обработка жидкой среды.

Анализируя вышеперечисленные критерии, составим список геометрических и технологических параметров ПАРТ и обрабатываемой жидкой среды, которые входят в эти критерии.

Геометрические параметры: δ - зазор между ротором и статором, м; R_p , R_c - радиусы внешних поверхностей ротора и статора, м; l_p , l_c - длины каналов ротора и статора, м; h_c - высота канала статора, м; a_p , a_c - ширина каналов ротора и статора, м; b_p - расстояние между ближайшими точками боковых стенок соседних каналов ротора, м; h_p , h_k - высоты полости ротора и рабочей камеры, м; z_p , z_c - числа каналов в роторе и статоре.

Технологические параметры: Q - расход жидкости через аппарат, м³/с; P_p , P_k - давление в полости ротора и рабочей камере, Па; ω - угловая скорость ротора, с⁻¹; P_n - давление насыщенных паров жидкости, Па; T - температура обрабатываемой жидкости, К; ρ - плотность жидкости, кг/м³; μ - динамическая вязкость жидкости, Па·с; σ - поверхностное натяжение жидкости, Н/м; R_0 - начальный радиус пузырьков в жидкости (усредненный), м.

Все геометрические параметры можно варьировать в определенных пределах, исходя из конструктивных соображений и наложенных ограничений. Технологические параметры разделяются на постоянные, такие как ρ , μ , σ , R_0 , и условно постоянные (рекомендуемые для конкретного процесса) - Q , P_p , P_k , ω , P_n , T . В зависимости от конкретной технологической

задачи и ХТП возможность варьирования условно постоянными параметрами следует оговаривать отдельно.

7.2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО ПУЛЬСАЦИОННОГО АППАРАТА РОТОРНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ МНОГОФАКТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Для проектирования любого аппарата по критериям оптимальности необходимо четко обозначить эти критерии. Как уже было указано в параграфе 7.1, при проектировании ПАРТ возможна постановка задачи двух типов:

1) проектирование универсального ПАРТ, основанного на определенном методе воздействия на обрабатываемую среду;

2) проектирование универсального ПАРТ для конкретного технологического процесса.

В задаче второго типа, как правило, задаются основные параметры технологического процесса, такие как расход, давление, температура, характеристики среды и т.п. Необходимо спроектировать аппарат, основными критериями эффективности которого будут качественные и количественные показатели продукта, получаемого при обработке в ПАРТ. Исходя из требований, предъявляемых к этим показателям, и выбираются режимные и геометрические параметры ПАРТ. Связь режимных и геометрических параметров ПАРТ с показателями обрабатываемого продукта является опосредственной, через критерии, показывающие эффективность ПАРТ (индекс кавитации, амплитуда пульсаций давления и т.п.). Задача первого типа является более четкой, так как отсутствует опосредственная связь, а в качестве критериев оптимального расчета фигурируют критерии эффективности ПАРТ.

Необходимо отметить, что основными критериями, на которые следует ориентироваться проектировщику - это экономические показатели эффективности. Однако, оперировать экономическими показателями можно только при конкретно поставленной производственной задаче. Без конкретных цифр, которые можно сравнивать при расчете экономических показателей, говорить об оптимальном варианте было бы неправильным.

Сформулируем алгоритм расчета и основные параметры эффективности ПАРТ универсального типа, факторами воздействия на обрабатываемую жидкость в котором являются гидродинамическое и гидроакустическое воздействия. То есть, спроектируем оптимальный ПАРТ типа РИКА.

Для того, чтобы максимально приблизиться к экономическим критериям расчета, рассмотрим, от чего зависят основные капитальные и эксплуатационные затраты на изготовление и функционирование аппарата. Капитальные затраты на изготовление аппарата зависят, в основном, от геометрических параметров аппарата, точности изготовления и сборки, стоимости материала, комплектующих и т.п. Стоимость материала и комплектующих слабо поддается оптимизации, так как не зависит от проектировщика. Включение в проект материала с невысоким качеством не может служить методом оптимизации затрат. Основными параметрами, от которых зависят габариты аппарата в целом и деталей в отдельности являются: внешний радиус ротора, длина канала статора, радиус рабочей камеры; высота каналов ротора и статора и рабочей камеры. Точность изготовления и сборки зависит от точности изготовления каждой детали и от основных геометрических размеров аппарата, а также от величины зазора между ротором и статором.

Таким образом, основными геометрическими параметрами РИКА, влияющими на величину капитальных затрат, являются:

- 1) радиус ротора - R_p ;
- 2) радиус рабочей камеры - R_k ;
- 3) высота канала статора - h_c ;
- 4) высота канала ротора - h_p ;
- 5) высота рабочей камеры - h_k ;
- 6) зазор между ротором и статором - δ .

Эксплуатационные затраты для эффективного функционирования РИКА, в основном, зависят от потребляемой мощности и от энергии, расходуемой на подачу обрабатываемой жидкости под давлением. Текущие технологические и ремонтные затраты во внимание принимать не будем. Таким образом, при минимизации эксплуатационных затрат следует оптимизировать:

- 1) потребляемую мощность - N ;
- 2) расход жидкости - Q ;
- 3) давление в полости ротора - P_p .

Проведем анализ критериев эффективности аппарата, по которым можно производить оптимизацию, добиваясь максимальной эффективности РИКА. Основными факторами воздействия на жидкую гетерогенную среду в таком аппарате являются импульсное и кавитационное воздействия. Параметрами, характеризующими импульсное и кавитационное воздействия, служат: удельная энергия импульса давления - Q ; удельная энергия пульсационного воздействия - ε_{II} ; удельная энергия кумулятивного воздействия - ε_K . В соответствии с формулами (4.1.7), (4.1.17) и (4.1.24) эти параметры имеют вид:

$$\varepsilon_{II} = \frac{S_c^2}{2\pi t_1 v_0} \int_0^t \left(\frac{dV}{dt} \right)^2 dt;$$

$$\varepsilon_{II} = \frac{P_k K}{t_3 \rho} \left(1 - \frac{R_0^3}{R_{max}^3} \right) \left(\frac{R_0}{R_{max}} \right)^2;$$

$$\varepsilon_K = 0,028 \frac{P_k K}{R_{max} \rho \sqrt{\rho/P_k}}.$$

Для интенсификации химико-технологических процессов необходимо, чтобы эти параметры имели как можно большую величину, т.е. $\varepsilon_{II} \rightarrow \max$, $\varepsilon_{II} \rightarrow \max$, $\varepsilon_K \rightarrow \max$.

Бесконечно увеличивать удельную энергию невозможно и в этом случае необходимо ввести параметр, который бы уравнивал стремление интенсифицировать ХТП чисто энергетическим способом. Примем, что основным управляющим параметром будет угловая скорость ротора, тогда, в качестве уравнивающего параметра, введем мощность, затрачиваемую на вращение ротора в соответствии с формулой (2.1.38):

$$N = \frac{a_c + a_p}{a_c + b_c} N_I + \frac{b_c - a_c}{a_c + b_c} (N_I + N_{II} + N_{III} + N_{IV}).$$

Уравнивающий параметр необходимо минимизировать, т.е. $N \rightarrow \min$. Существенным образом на ε_{II} и ε_K влияет P_k , которое условимся определять как разность давления в полости ротора и перепада давления, $P_k = P_p - \Delta P_{сум}$. Так как перепад давления является

переменной величиной, то условимся определять $\Delta P_{\text{сум}}$ как среднюю величину за весь период T . Так как расход жидкости и давление, создаваемое насосом, являются неизменными для каждого типа насоса, переведем параметры Q и P_p в разряд постоянных.

Сформулируем задачу расчета РИКА с оптимальными параметрами. Необходимо найти такие технологические и геометрические параметры РИКА, чтобы потребляемая мощность, необходимая для вращения ротора и подачи жидкости, была минимальной, а удельные энергии импульсного, пульсационного и кумулятивного воздействия были максимальны: $N_3 \rightarrow \min$, $\varepsilon_{\text{и}} \rightarrow \max$, $\varepsilon_{\text{п}} \rightarrow \max$, $\varepsilon_{\text{к}} \rightarrow \max$.

Заранее задаются и считаются постоянными следующие величины: Q , P_p , ρ , μ , δ_n , P_n . Оптимизация проводится по одиннадцати переменным: a_p , a_c , h_p , h_c , z_p , z_c , δ , R_p , ω , l_p , l_c . Для упрощения задачи принимаем $a_p = a_c$, $h_p = h_c$, $z_p = z_c$. Каждая из переменных ограничена сверху и снизу, а $z_p = z_c = z$ является целочисленной величиной.

Чтобы не выходить за рамки построенных моделей, ограничиваем поле поиска: $Sh_{\min} \leq Sh \leq Sh_{\max}$; $Re_{\min} \leq Re \leq Re_{\max}$; $0 < K < 1$.

Все вспомогательные параметры, необходимые для расчета, N_3 , $\varepsilon_{\text{и}}$, $\varepsilon_{\text{п}}$, $\varepsilon_{\text{к}}$ определяются из уравнений (2.1.18) - (2.1.38), (2.4.3), (4.1.1) - (4.1.24); (5.3.6) и других, приведенных в настоящей работе. В качестве основного уравнения, закладываемого базу для расчета многих кинетических и динамических параметров, служит нестационарное уравнение Бернулли

$$\beta_1 l_3 \frac{dV}{dt} + \frac{V^2}{2} \left(\xi(t) + \lambda l_3 + \frac{B(t)\mu}{d_3 \rho V} + k_v \right) = \\ = \frac{\Delta P}{\rho} + l_p \omega^2 \left(R_p - \frac{l_p}{2} \right) + \omega^2 (R_p - l_p)^2 (1 - \varphi).$$

Численное решение этого уравнения позволяет определить зависимости dV/dt , $V(t)$, $\Delta P(t)$, $P_1(t)$, рассчитать их средние значения:

$$\Delta P_{\text{сум}}(t) = \Delta P + l_p \omega^2 (R_p - l_p / 2) \rho + \omega^2 \rho (R_p - l_p)^2 (1 - \varphi) - (V^2 \rho / 2) k_v; \\ V = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} V(t) dt; \quad \Delta P_{\text{сум}} = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta P_{\text{сум}}(t) dt; \quad P_1(t) = \rho \frac{dV}{dt} \left(\frac{S}{2\pi} \right)^{0,5}; \\ P_1 = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} P_1(t) dt; \quad \Delta P = \frac{Q^2 \rho}{2z^2 S}.$$

При расчете удельных энергий пульсационного и кумулятивного воздействия давление в канале статора определяется как $P_k = P_p - \Delta P_{\text{сум}}$. Для определения максимального радиуса пузырька R_{max} и конечного радиуса пузырька R_0 используется уравнение Нолтинга-Неппайраса. Индекс кавитации K определяется по полученному эмпирическому уравнению. В уравнение Нолтинга-Неппайраса подставляется функция изменения давления в канале статора $P(t)$ за весь период T .

При расчете мощности, перепад давления между ротором и статором следует определять за период времени $[t_1, t_2]$, когда каналы статора перекрыты стенкой ротора:

$$\Delta P_2 = \int_{t_1}^{t_2} \Delta P_{\text{сум}}(t) dt.$$

Остальные параметры при решении указанных уравнений не требуют комментариев.

Для решения данной задачи необходимо подобрать метод оптимизации. Как правило, методы оптимизации рассматриваются как методы поиска экстремума целевой функции. К таким методам относятся градиентные и безградиентные методы поиска экстремума функции. Эти группы методов имеют свои недостатки и положительные стороны. Не вдаваясь в излишние подробности по достоинствам и недостаткам каждого метода, для решения нашей задачи будем использовать безградиентный метод, а именно, метод сравнений целевых функций (метод сеток). Метод сеток один из простых и распространенных методов оптимизации, он не уступает в точности другим методам и позволяет проводить пошаговый анализ решения поставленной задачи, что очень важно для инженерного метода расчета [3, 4].

Практическая реализация решения поставленной задачи методом сеток показана блок-схемой алгоритма, представленной восемью основными блоками (рис. 7.2.1). Целевая функция представлена в виде

$$\left[t_1, t_2 \right]$$

$$F(\omega, \delta, a, h, l_c, R_p, z) \rightarrow \min .$$

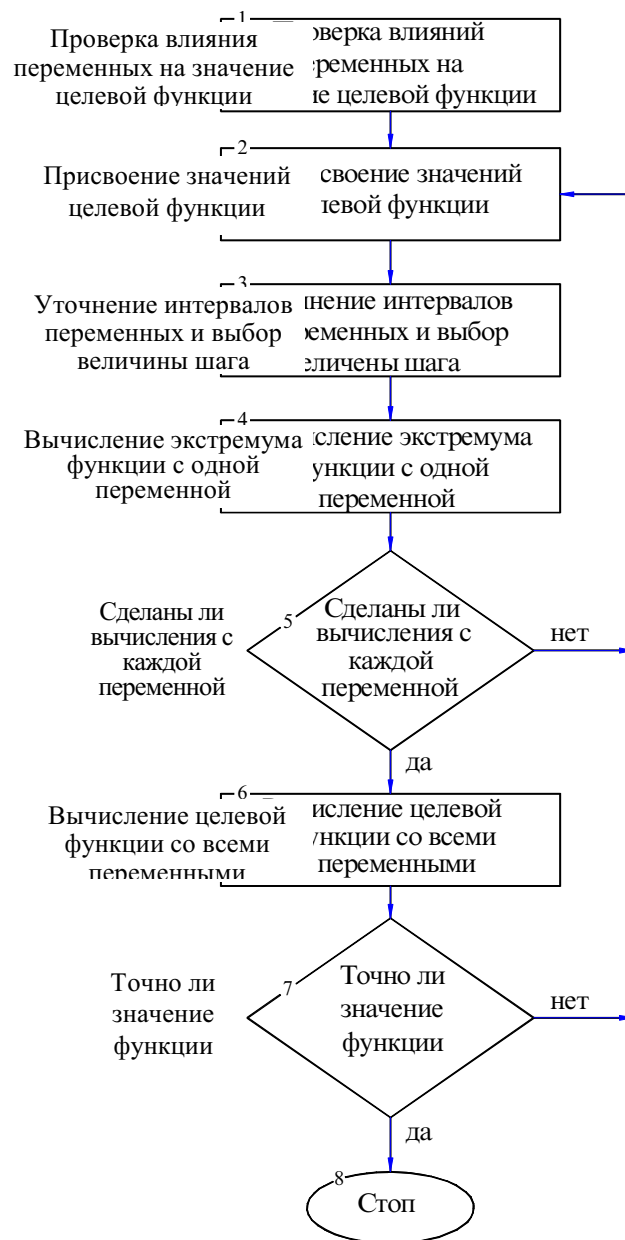


Рис. 7.2.1. Блок-схема алгоритма метода сеток

Здесь k_1, k_2, k_3, k_4 - весовые коэффициенты, от выбора которых зависит, какой именно из параметров оптимизации представляет для проектировщика наибольший интерес. Варьируя этими коэффициентами можно выбирать в качестве приоритета либо потребляемую мощность, либо один или несколько показателей эффективности воздействия на обрабатываемую гетерогенную жидкость.

Прокомментируем этапы расчета параметров оптимального пульсационного аппарата роторного типа методом сеток. В блоке 1 определяется влияние каждой из переменных на целевую функцию, при этом, варьируя какую-либо одну переменную, остальные переменные остаются постоянными (им присваивается минимальное значение). Если влияние одной или нескольких переменных на целевую функцию невелико, то ее или их переводят в разряд постоянных величин. Процедуру оптимизационного расчета следует начинать с наиболее влиятельной переменной.

Блок 2 - целевой функции присваивается заведомо минимальное значение, которое можно достичь только теоретически. Ориентиром для выбора значения целевой функции может служить информация, полученная в блоке 1.

Блок 3 - производим выбор величины шага для изменения каждой из переменных. Выбор величины шага основывается на нахождении "золотой середины" между временем, затрачиваемым на расчет, и точностью расчета. Количество шагов для каждой переменной лучше выбирать одинаковое.

Блоки 4 и 5 - производится вычисление минимума целевой функции для одной переменной. При этом все остальные переменные остаются постоянными. Такой расчет осуществляется для каждой переменной, и определяются оптимальные значения целевой функции в соответствии с количеством переменных.

Блок 6 - определяется экстремум целевой функции, причем каждая переменная для определения этого экстремума имеет наилучшее значение, взятое из блока 4.

Блок 7 - полученное в блоке 6 значение целевой функции сравнивается со значением, присвоенным целевой функции в блоке 2. Если разница значений целевой функции в блоках 2 и 7 превышает 0,1 %, то происходит возврат в блок 2 и присвоение целевой функции значения из блока 7. Если разница в значениях целевой функции в блоках 2 и 7 равна или меньше 0,1 %, то расчет закончен.

Еще раз необходимо отметить, что, несмотря на оптимизирующий расчет, задача является многовариантной в зависимости от значений весовых коэффициентов. Подбор весовых коэффициентов является сложной задачей в методе расчета ПАРТ и правильный выбор этих коэффициентов наиболее вероятен после накопления определенного опыта и соответствующего анализа результатов расчета при различных значениях весовых коэффициентов.

7.3. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТОВ РОТОРНОГО ТИПА

На основании теоретических и экспериментальных исследований можно заключить, что основными факторами воздействия на жидкую гетерогенную среду в пульсационных аппаратах роторного типа являются: 1) механическое; 2) гидродинамическое; 3) гидроакустическое воздействия.

Исторически сложилось так, что пульсационные аппараты роторного типа, в основу работы которых положены первый и второй факторы воздействия, называются роторно-пульсационными аппаратами (РПА), гидродинамическими аппаратами роторного типа (ГАРТ). Пульсационные аппараты, в основу работы которых положены второй и третий факторы воздействия, называются роторными аппаратами с модуляцией потока (РАМП), гидродинамическими сиренами (СГД). В последнее время часто встречается название роторно-импульсный аппарат (РИА), которым называют как РПА, так и РАМП. РПА эффективны для гетерогенных процессов с твердой фазой и вязкими жидкостями, а РАМП - в маловязких системах жидкость - жидкость. Необходимо отметить, что четкой границы по факторам воздействия между РПА и РАМП нет, и подобное разделение носит условный характер. С нашей точки зрения для аппаратов, в основу работы которых положены второй и третий факторы воздействия, более подходящим является название роторные импульсно-кавитационные аппараты (РИКА).

Характерными конструктивными признаками РПА является наличие нескольких последовательных роторов и статоров (многоступенчатость), а зазор между ротором и статором одной ступени лежит в пределах 0,5 - 2 мм. Для РИКА характерна одна ступень - один ротор и один статор - с зазором 0,1 - 0,5 мм и большим шагом расположения каналов в роторе и статоре по боковым стенкам ротора и статора. Наиболее активной рабочей зоной в РПА является зазор между ротором и статором, в РИКА - каналы статора.

Спектр конструкций и технологических особенностей работы пульсационных аппаратов роторного типа был классифицирован в работах [5, 6]. Нами предложена уточненная и расширенная классификация конструкций и принципов организации функционирования пульсационных аппаратов роторного типа в табл. 7.3.1.

Многие из этих конструктивных и технологических особенностей аппаратов направлены на повышение эффективности работы за счет трех основных факторов воздействия. При разработке новых аппаратов практически все новые конструктивные элементы проектируются для повышения амплитуды пульсаций давления, сдвиговых напряжений, развития турбулентности и кавитации.

Таблица 7.3.1

Признак	Тип	Признак	Тип
1. По типу организации процесса	- периодические - непрерывные	12 По количеству ступеней	- одноступенчатые - многоступенчатые
2. По типу функционирования	- погружные - вмонтированные - проходные	13 Наличие дополнительных источников колебаний	- с дополнительным источником - без дополнительного источника
3. По виду конструкции ротор-статор	- радиальные - конические - осевые	14 По виду дополнительных источников колебаний	- механические - гидродинамические - электромагнитные - гидромеханические
4. Подвод обрабатываемой среды	- в полость ротора - в полость статора	15 По виду подвода компоненто в среды	- совместный - отдельный

5. Подача обрабатываемой среды	- самовсасывание - внешним насосом - смешанная	16 По типу . дополнительных диспергирующих элементов	- тела качения - била - ножи - колебательные элементы
6. По типу входного патрубка	- центральный - тангенциальный	17 По виду . расположения отверстий	- однорядные - многорядные - по определенному закону
7. По типу сечения каналов в статоре и роторе	- круглые - прямоугольные - треугольные - четырехугольные - трапециидальные - сложной конфигурации	18 По типу . организации потоков в аппарате	- с рециркуляцией - с полным отводом
8. По направлению каналов	- прямые - наклонные - сходящиеся - криволинейные - пересекающиеся	19 По типу . рабочей поверхности и ротора и статора	- гладкая - с произвольной шероховатостью - поверхность специального профиля
9. По виду рабочей камеры	- тороидальная - цилиндрическая	20 По способу . расположения статора	- статор внутри ротора - статор снаружи ротора
10 По типу . сечения рабочей камеры	- прямоугольная - круглая - другие формы	21 По типу . расположения центральных осей ротора и статора	- коаксильные - с эксцентриситетом
11 Зазор между . ротором и статором	- регулируемый - постоянный	22 По . организации прохождения среды	- параллельно - последовательно

7.3.1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ И РЕЗОНАНСНЫХ ЭФФЕКТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТОВ РОТОРНОГО ТИПА

В главах 3 и 5 приведено теоретическое и экспериментальное обоснование автоколебательного режима работы ПАРТ с дополнительным источником колебаний в виде центробежного насоса. Кроме центробежного насоса в автоколебательную систему в качестве дополнительного источника колебаний можно включить и другие нагнетательные устройства с дискретной подачей: шестеренчатый, ротационный, мембранный и аналогичные насосы [7].

Общим недостатком ПАРТ является наличие "холостого хода", т.е. времени работы, когда каналы статора перекрыты промежутками между каналами ротора. В этот момент возникают транзитные течения через радиальный зазор между ротором и статором, уменьшающие гидравлическое сопротивление аппарата и, в конечном счете, уменьшающие интенсивность акустических колебаний.

Чтобы избавиться от этого недостатка, в ПАРТ, обеспечивающих самостоятельный напор, предлагается конструкция статора, в котором чередуются глухие и сквозные каналы. Глухие каналы снабжены дополнительными каналами, соединяющими их с патрубками входа среды и расположенными в крышке аппарата. Таким образом, в аппарате имеется основной источник колебаний - прерыватель со сквозными каналами в статоре и дополнительный - с глухими и дополнительными каналами [8].

На рис. 7.3.1 изображен ПАРТ, содержащий корпус 1 с патрубком выхода 2, крышку 3 с коаксиально расположенным патрубком входа 4, скрепленную с корпусом 1, статор 5 с глухими каналами 6 в боковой стенке, соединенными дополнительными каналами 7, расположенными в крышке 3, с патрубком входа 4, и сквозными каналами 8, ротор 9 с каналами 10 в боковой стенке, рабочую камеру 11, образованную корпусом 1, крышкой 3 и статором 5.

Обрабатываемая среда поступает через патрубок 4 самотеком в полость ротора 9. Затем возможны два пути следования обрабатываемой среды. В первом случае, когда каналы ротора 10 совпадают со сквозными каналами статора 8, среда проходит через каналы 10 и 8 в рабочую камеру 11 и выводится из аппарата через патрубок 2. Во втором случае, когда каналы ротора 10 совпадают с глухими каналами статора 6, среда через каналы 10, 6, 7, поступает в патрубок входа 4. Глухие каналы 6 расположены равномерно между сквозными каналами 8, поэтому при вращении ротора 9 происходит поочередная реализация двух случаев движения обрабатываемой среды.

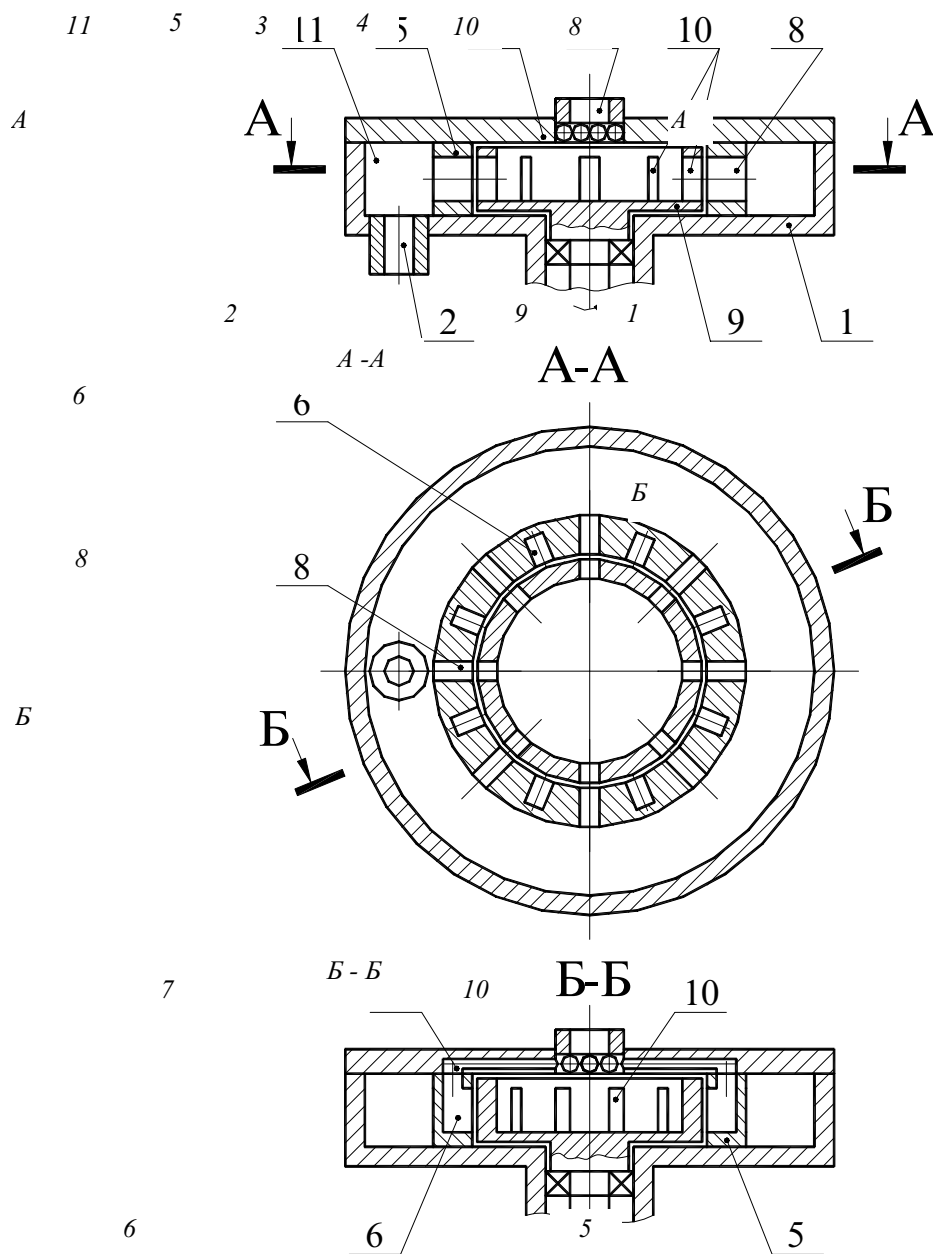


Рис. 7.3.1. Пульсационный аппарат роторного типа с дополнительными каналами

При предварительной модуляции поступающего потока обрабатываемой среды с частотой, равной частоте, генерируемой аппаратом, повышается интенсивность акустических колебаний. Это достигается тем, что в период "холостого хода" аппарата, т.е. при перекрытии сквозных каналов статора промежутками между отверстиями ротора, обрабатываемая среда через глухие и дополнительные каналы подается на вход аппарата. Таким образом, предварительно промодулированная обрабатываемая среда поступает в полость ротора и при открытии сквозных отверстий статора выходит в рабочую камеру, подвергаясь вторичной модуляции. При этом происходит возрастание амплитуды акустических колебаний. Необходимым условием усиления амплитуды колебаний является равенство частот колебаний, генерируемых первичным и вторичным модуляторами. В пульсационных аппаратах роторного типа частота акустических колебаний зависит от угловой частоты вращения ротора и числа каналов, следовательно, в предлагаемой конструкции необходимо соблюдение равенства числа глухих и сквозных каналов статора. Кроме того, необходимо поочередное открытие глухих z_{c1} и сквозных z_{c2} отверстий статора, так как при одновременном их открытии только часть среды модулируется в глухих каналах

и поступает на вход аппарата. Другая, большая часть (за счет разных гидравлических сопротивлений сквозных и глухих каналов) проходит в рабочую камеру, подвергаясь только однократной модуляции. Для выполнения изложенных условий и условия синфазного открытия каналов методом графического моделирования получены следующие соотношения между числом отверстий ротора z_p и статора $z_c = z_{c1} = z_{c2}$:

а) в случае $z_p > z_c$:

$$z_p = kz_c, \quad k = 1, 3, 5, \dots \text{ (ряд нечетных чисел);}$$

б) в случае $z_p \leq z_c$:

$$z_c = kz_p, \quad k = 1, 2, 3, 4, \dots \text{ (ряд натуральных чисел).}$$

Для каждого технологического процесса существует вполне определенная оптимальная частота налагаемых акустических колебаний, при которой он протекает наиболее быстро и качественно, то есть, в существующих конструкциях невозможно сократить время "холостого хода" простым увеличением числа каналов (изменится частота колебаний и уменьшится их амплитуда). В предложенной конструкции при неизменной частоте колебаний значительно уменьшится время "холостого хода" за счет наличия глухих и дополнительных каналов в статоре и, следовательно, уменьшается транзитное течение, за счет чего также возрастет интенсивность акустических колебаний. Таким образом, в аппарате более полно используется рабочее время, т.е. повышается его КПД.

К преимуществам такой конструкции также следует отнести увеличение времени пребывания обрабатываемой среды в аппарате за счет ее прохождения через глухие и дополнительные каналы в период "холостого хода". Это способствует интенсификации технологического процесса.

Добиться снижения продолжительности "холостого хода" можно также за счет увеличения количества рядов каналов ротора и статора. Необходимо, чтобы ряды каналов в роторе имели сдвиг каналов относительно друг друга. Это приводит к увеличению частоты генерируемых пульсаций и к оптимальному распределению акустической нагрузки на обрабатываемую жидкость во времени.

Высокочастотный многорядный ПАРТ работает следующим образом (рис. 7.3.2). Жидкая смесь подается под давлением в полость вращающегося ротора 4, далее по каналам б ротора 4 через зазор 3 поток жидкости поступает в канал 7 статора 5, при этом при совмещении канала ротора и ближайшего к нему в данный момент канала статора и последующем их расхождении генерируется импульс давления [9].

Экспериментально и теоретически установлено, что генерируемый каждой парой "канал ротора - канал статора" импульс давления имеет пологую положительную часть и короткую и глубокую отрицательную часть. Длительность отрицательной части импульса составляет долю от всей длительности генерируемого импульса, равную $0,2K_1$.

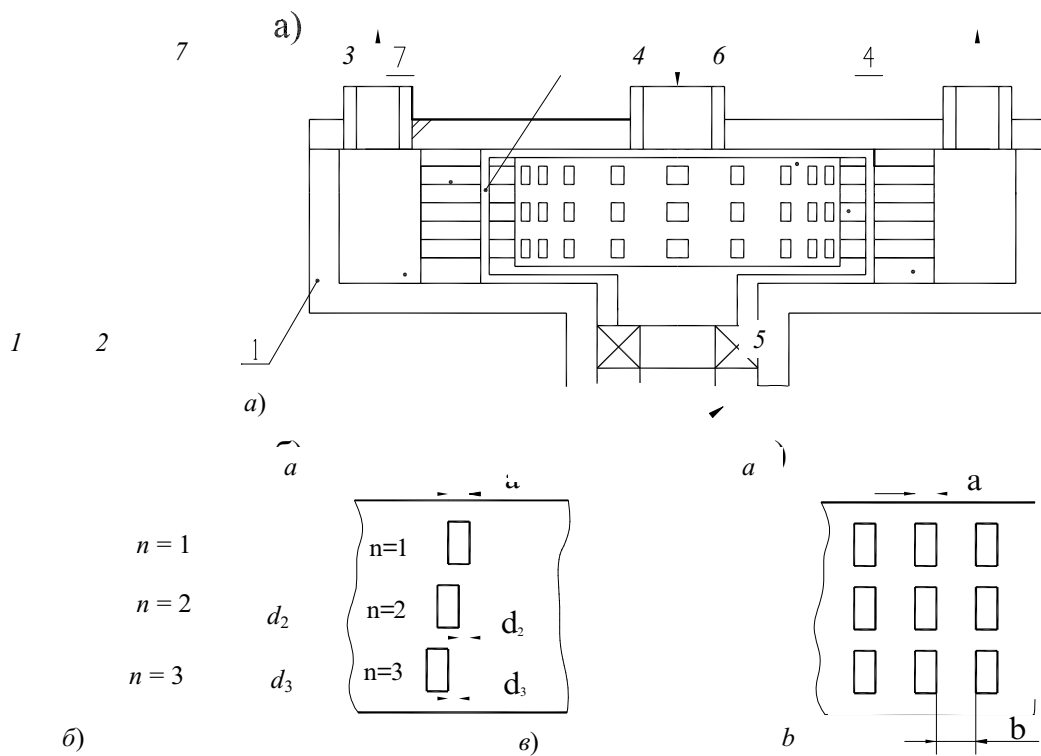


РИС. 7.3.2. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ МНОГОРЯДНЫЙ РОТОРНЫЙ ИМПУЛЬСНО-КАВИТАЦИОННЫЙ АППАРАТ: А - ПРОДОЛЬНЫЙ РАЗРЕЗ; Б - РАЗВЕРТКА БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ РОТОРА; В - РАЗВЕРТКА БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ СТАТОРА

Величина K_1 в зависимости от параметров аппарата и режима его работы равна числу, лежащему в диапазоне: $0,9 < K_1 < 1,1$. Так как длительность импульса пропорциональна величине, равной удвоенной ширине канала - величине $2a$, то для разделения во времени отдельных импульсов от разных рядов аппарата минимальный сдвиг в окружном направлении составляет величину $d_n = 0,1K_1a$. При этом для получения максимального количества разделенных во времени импульсов, минимальное количество рядов n равно целой части числовой величины $(a+b)/(0,1K_1a)$. Здесь b - расстояние в окружном направлении между соседними каналами. При этом величину b необходимо выбирать в интервале, определяемом коэффициентом K_2 : $b = K_2a$, где K_2 выбирается из условия $1,1 < K_2 < 1,3$. Нижняя граница диапазона определена из условия эффективного торможения жидкости при расхождении каналов ротора и статора, а верхняя граница определена из условия максимизации количества каналов, а количество каналов в каждом ряду определяет частоту генерируемых импульсов всем аппаратом в целом.

Так как количество рядов каналов в аппарате более одного и может достигать нескольких десятков, а каналы каждого ряда генерируют импульсы, разделенные во времени, то частота генерации импульсов давления в рассмотренной конструкции значительно выше, чем в стандартных аппаратах.

Для конструкции ПАРТ, в которых закон изменения давления близок к синусоидальному, для того, чтобы увеличить время падения давления, т.е. $dP/dt > 0$, необходимо дать дополнительный импульс разряжения в канале статора. Это достигается при совмещении канала статора с глухим каналом ротора, в котором давление меньше за счет растягивающих усилий, создаваемых центробежной силой (рис. 7.3.3). Расстояние b_k по ходу ротора, на котором следует сделать глухой канал в теле ротора, равно $b_k = 3\pi R_p / (2z_p)$. Для

создания достаточного импульса разряжения необходимо, чтобы сечение глухих каналов в роторе было идентично сечению каналов в статоре [10].

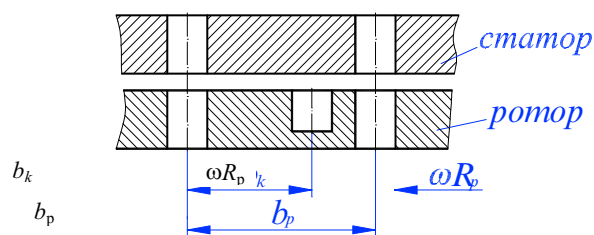


РИС. 7.3.3. ПУЛЬСАЦИОННЫЙ АППАРАТ РОТОРНОГО ТИПА С ГЛУХИМИ КАНАЛАМИ В РОТОРЕ

Резонансный режим работы аппарата можно реализовать, если в аппарат встроить дополнительный пассивный источник акустических колебаний. Так как скорость потока в канале статора велика, то целесообразно использовать кинетическую энергию потока обрабатываемой среды для генерирования акустических колебаний. Наиболее простым и надежным в плане генерирования акустических колебаний в движущемся потоке жидкости является гидродинамический излучатель типа жидкостного свистка К. Польмана и В. Яновского [11]. Принцип действия пластинчатого излучателя (одно из названий жидкостного свистка) заключается в том, что при натекании на пластину потока жидкости она возбуждается на одной из собственных частот. Имеется ряд схем крепления пластины. При обтекании потоком жидкости пластины происходит периодический срыв вихрей то с одной, то с другой стороны пластины. Завихрения на обеих сторонах пластины вызывают периодические импульсы давления, которые распространяются со скоростью звука. Наиболее эффективным является режим работы при равенстве собственной частоты колебаний пластины частоте вихреобразования. Настройка пластины в резонанс с колебаниями струи на практике осуществляется регулировкой скорости истечения струи и подбором расстояния между пластиной и соплом, формирующим поток жидкости.

С целью интенсификации процессов эмульгирования была разработана конструкция роторного аппарата, в которой в качестве дополнительного источника колебаний использовали пластину, обтекаемую потоком обрабатываемой среды. Наиболее рациональным, если говорить об уменьшении потерь акустической энергии и увеличении интенсивности обработки, местом расположения пластины является канал статора. В канале статора обрабатываемая среда имеет высокую скорость течения, и поток среды сформирован. Настройку пластинчатого излучателя в канале статора можно осуществить подбором геометрических и физических параметров пластины и перемещением пластины вдоль радиальной оси канала статора [12]. Схема такой конструкции ПАРТ показана на рис. 7.3.4.

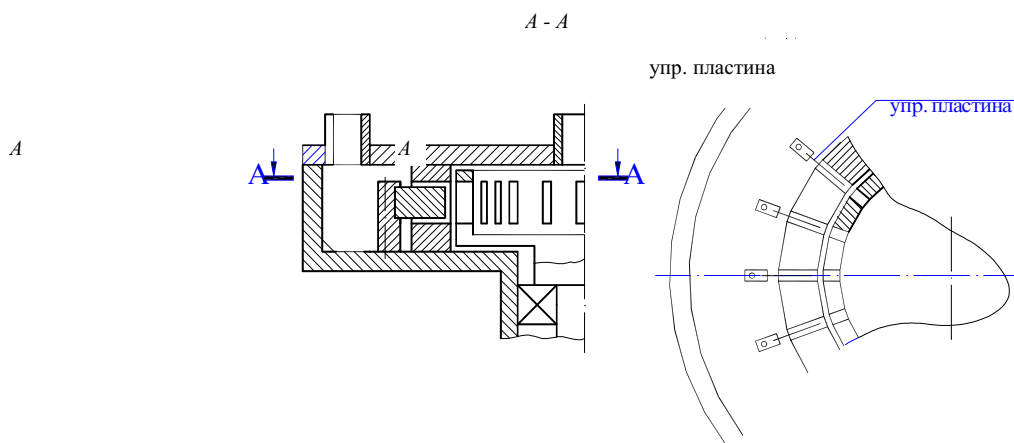


Рис. 7.3.4. Пульсационный аппарат роторного типа с упругими пластинами

Преимущества расположения пластины в канале статора следующие: канал статора является наиболее близкой к прерывателю, а поэтому и более активной частью аппарата; вся обрабатываемая среда проходит через каналы статора и подвергается воздействию колебаний, генерируемых упругой пластиной, в небольшом объеме, ограниченном стенками канала статора, что приводит к увеличению плотности акустической энергии. Таким образом, среда в рассматриваемой конструкции аппарата обрабатывается в малом объеме канала статора, что приводит к увеличению плотности акустической энергии, и двумя источниками акустических колебаний прерывателем аппарата и упругой пластиной, обтекаемой потоком. Для работы данной конструкции в резонансном режиме необходимо выполнить условие равенства частоты волны, генерируемой пластиной, и частоты волны, генерируемой прерывателем аппарата или их гармоник.

Собственная частота пластины определяется по формуле

$$f_n = (\alpha b_n / \ell_n^2) \sqrt{E / \rho_n}, \quad (7.3.1)$$

где α - коэффициент пропорциональности, зависящий от способа крепления пластины; ℓ_n - длина пластины, м; b_n - толщина пластины, м; E - модуль продольной упругости материала пластины, Па; ρ_n - плотность материала пластины, кг/м³.

Значение коэффициента α можно подобрать по специальной литературе [11]. Приравнявая частоту колебаний в канале статора к собственной частоте пластины, получаем

$$\frac{\alpha b_n}{\ell_n^2} \sqrt{\frac{E}{\rho_n}} = \frac{k \omega z_p}{2\pi}, \quad (7.3.2)$$

где $k=1, 2, 3, \dots$ - ряд натуральных чисел.

Таким образом, посредством варьирования геометрическими и режимными параметрами аппарат настраивается на резонансный режим.

Одним из путей повышения эффективности работы ПАРТ является увеличение плотности акустического поля и усложнение его структуры. Для этого каналы статора выполняют сложной формы и располагают их особым образом.

Нами предложена конструкция каналов статора в виде пары расходящихся каналов от входного участка под углом к радиальной оси [13]. При этом геометрические параметры аппарата должны находиться в следующем соотношении:

$$R_{c2} - R_{c1} = (kb) / (2 \operatorname{tg} \alpha), \quad (7.3.3)$$

где R_{c1}, R_{c2} - радиусы внутренней и внешней стенки статора, м; b - шаг каналов статора по внутренней стенке, м; $k=1, 2, 3, \dots$ - ряд натуральных чисел; α - угол наклона каналов к радиальной оси.

При таком исполнении каналы статора пересекаются между собой (исключая вариант при $k=1$) внутри стенки статора и сходятся попарно на внешней стенке статора (рис. 7.3.5). Длина стенки статора вдоль радиальной оси $\Delta R = R_{c2} - R_{c1}$.

Разность между наружным и внутренним радиусом статора ΔR , шаг каналов по хорде внутреннего радиуса b и угол отклонения расходящихся каналов от радиальной оси α , находятся между собой в соотношении $\Delta R = (kb)/(2tg\alpha)$. Взяв в качестве постоянных величин любые два параметра, можно получить ряд величин третьего параметра. Рассмотрим это положение на конкретном примере. Зафиксировав в качестве постоянных величины α и b , получаем ряд ΔR при различных k . На рис. 7.3.6 показаны фрагменты разверток сечений ротора и статора при различных k . Как видно из рисунка, при увеличении k возрастает длина канала статора и число пересечений каналов между собой. Бесконечно увеличивать k невозможно, так как при этом возрастают габариты аппарата. Разумным требованием к длине канала статора l_c необходимо поставить равенство или кратность длины канала статора длине излучаемой волны λ , чтобы образовывались стоячие волны. Длина волны - $\lambda = c/f$, где $f = \omega z_p / (2\pi)$ - частота генерируемой волны, Гц; ω - угловая скорость ротора, c^{-1} ; z_p - число каналов в роторе.

В этом случае в точках пересечений каналов статора образуются пучности давления волн. Волна, выходящая из канала статора, отражается от стенки рабочей камеры под углом α . Если положить длину рабочей камеры в радиальном направлении $l_k = \Delta R/k$, то отраженная от стенки рабочей камеры волна попадает в один из каналов статора. Таким образом, в каналах статора образуются квазистоячие волны с большой плотностью акустического поля, а это, как известно, интенсифицирует тепло-массообменные процессы.

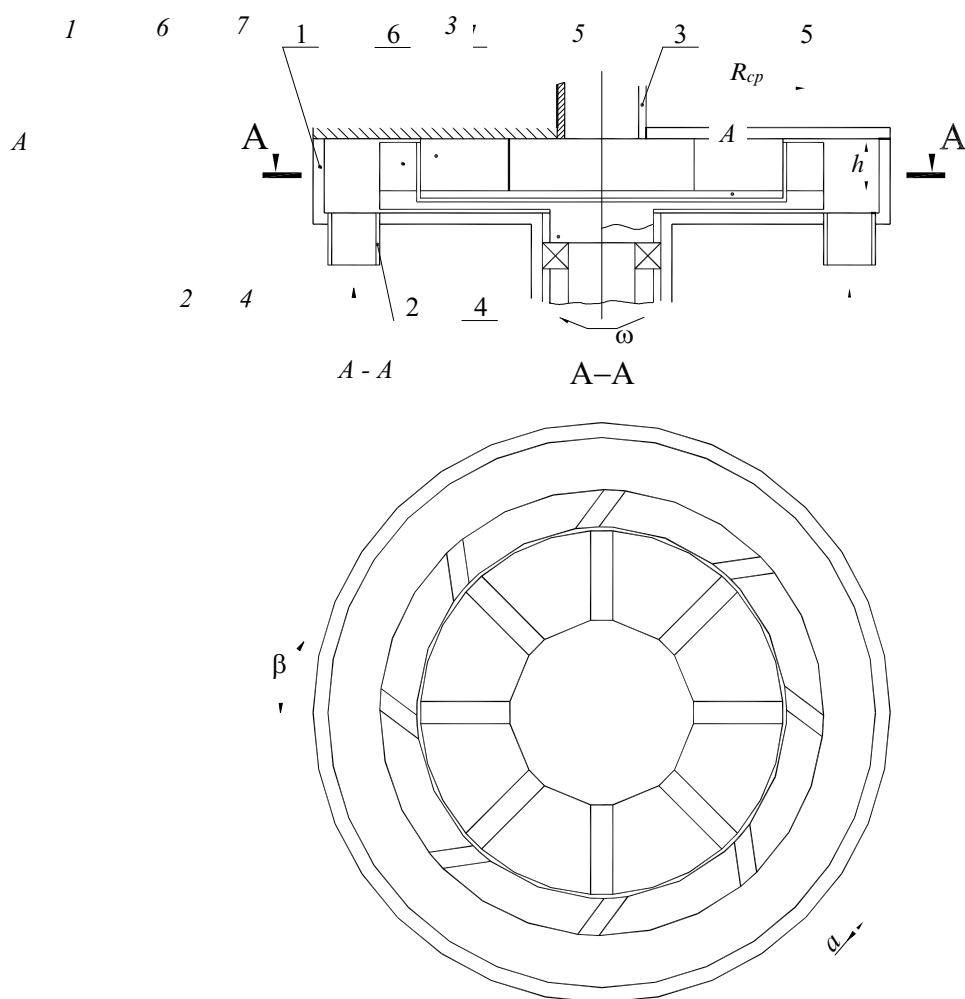


Рис. 7.3.7. Пульсационный аппарат роторного типа с внутренним статором

Иногда, чтобы достичь желаемого результата, изобретатели пользуются известным приемом "сделай все наоборот". В нашем случае желаемый результат - это повышение эффективности РИКА, а "сделать все наоборот" предлагается изменением конструкции ротор-статор. Статор 5 располагается внутри ротора 4, и обрабатываемая жидкость подается через входной патрубок 2 в рабочую камеру и выводится через выходной патрубок 3 из внутренней полости статора (рис. 7.3.7). Принцип работы ПАРТ сохраняется - периодическое совпадение каналов ротора 6 с каналом статора 7. Так как каналы статора направлены навстречу друг другу, то в полости статора происходит концентрация акустических колебаний. Чтобы каналы статора располагались строго напротив друг друга необходимо, чтобы их число было четным. Так как вся обрабатываемая жидкость проходит через внутреннюю полость статора, то концентрация акустических колебаний в малом объеме способствует интенсификации химико-технологических процессов [14].

Если длину каналов статора выбирать равной радиусу внутренней полости статора, то возможно возникновение стоячей волны в полости статора. Это достигается при кратности длины канала статора к радиусу полости статора равной длине излучаемой волны. Для синфазного излучения волны в полость статора необходимо, чтобы число каналов в статоре было равно числу каналов в роторе.

При вращении ротора на жидкость, проходящую через его каналы, действует центробежная сила, создающая противодействие, рассчитываемая по формуле Эйлера [15]:

$$P_{ц} = \rho \omega^2 R_{cp}^2, \quad (7.3.4)$$

где ρ - плотность жидкости, кг/м^3 ; ω - угловая скорость ротора, с^{-1} ; R_{cp} - средний радиус ротора, м.

Для предотвращения превышения противодействия, давлению в полости ротора необходимо соблюсти условие $P_{вх} > P_{ц}$. Исходя из этого условия, выбираем

$$\omega R_{cp} < \sqrt{P_{вх} / \rho}, \quad (7.3.5)$$

где $P_{вх}$ - давление на входе в аппарат.

Для того, чтобы облегчить прохождение жидкости через каналы ротора, их выполняют наклонными под углом к радиальной оси

$$\beta = \arctg(\omega R_{cp} ah / Q). \quad (7.3.6)$$

Исходя из теории лопастных насосов, лопасти в центробежных насосах рекомендуют выполнять под углом β , который является углом отклонения вектора скорости истечения жидкости от радиальной прямой при вращении ротора.

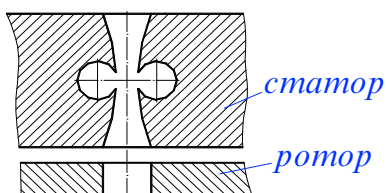


Рис. 7.3.8.
Пульсационный аппарат
роторного типа с
вихревыми каналами
статора в виде сопла и
резонаторами

Логическим развитием метода повышения эффективности работы ПАРТ за счет использования дополнительных акустических излучателей является конструкция канала статора в виде сопла с цилиндрическими резонаторами (рис. 7.3.8). Канал статора выполнен в виде сопла и имеет в суженной части два цилиндрических резонатора, соединенных с ним. Работа канала статора в качестве генератора акустических колебаний основана на высокой чувствительности плоских течений к боковому давлению. То есть при небольшом изменении давления у корня струи, поток заметно меняет свое направление. Тангенциально расположенный цилиндрический резонатор с продольной прорезью можно рассматривать как объемный, частота которого зависит от его диаметра [16].

7.3.2. КОНСТРУКТИВНЫЕ МЕТОДЫ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТОВ РОТОРНОГО ТИПА

Кроме создания условий для возникновения автоколебательных и резонансных явлений для интенсификации ХТП имеются и другие приемы для повышения интенсифицирующего воздействия ПАРТ. К таким приемам относится увеличение турбулизации обрабатываемой среды и времени обработки в ПАРТ.

Используя такие конструктивные приемы, разработана конструкция ПАРТ, схема которой приведена на рис. 7.3.9. ПАРТ содержит корпус 1 с патрубком подвода 2 и отвода 3 среды, соосно расположенные в нем ротор 4 с каналами 5 и статор 6 с каналами 7. На внутреннем конусе кольцевого сужающегося канала 8 выполнены спиральные выступы 9, шаг которых уменьшается в сторону вершины конуса, а на наружном конусе кольцевого сужающегося канала 8 - идентичные спиральным выступам 9 спиральные канавки 10.

Спиральные выступы 9 и спиральные канавки 10 способствуют турбулизации среды. Исходя из закона сохранения энергии, жидкость стремится пройти конический кольцевой канал по наименьшему пути. Этому препятствует спиральная навивка, что приводит к повышению сдвиговых усилий в потоке, срыву вихрей при обтекании верхней части спиральной навивки и турбулизации потока жидкости [17].

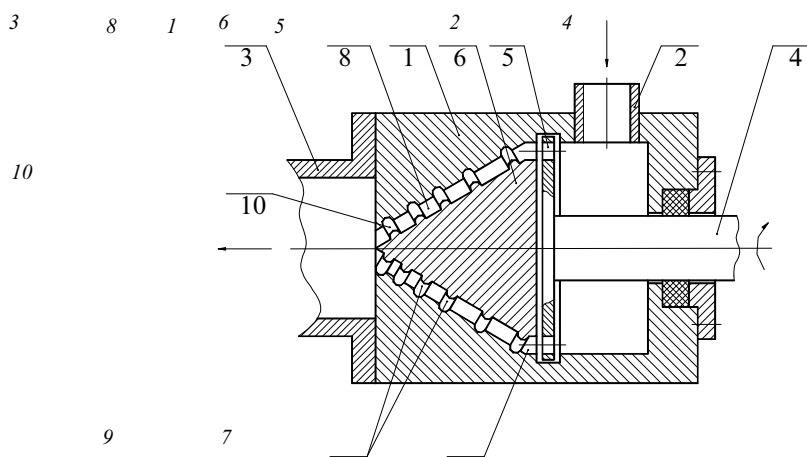


Рис. 7.3.9. Пульсационный аппарат роторного типа с конической рабочей камерой

Так как спиральная навивка увеличивает путь, проходимый жидкостью, то соответственно увеличивается и время обработки в ПАРТ. В коническом кольцевом канале увеличивается скорость потока вследствие уменьшения проходного сечения и шага спиральных выступов, что интенсифицирует технологические процессы.

Увеличение турбулизации обрабатываемой жидкости достигается также за счет выполнения каналов статора в виде последовательных сужений и расширений. Такая форма каналов статора обеспечивает изменение скорости жидкости: в сужении она больше, а в расширении - меньше. При этом возникают турбулентные пульсации с произвольно направленными векторами скоростей. Это вызывает увеличение относительной скорости обтекания частиц гетерогенной среды. Увеличение относительной скорости обтекания уменьшает диффузионный слой и увеличивает касательные напряжения на частице, что приводит к интенсификации процессов эмульгирования, диспергирования и массообмена. Кроме того, при срыве потока при резком расширении канала развивается гидродинамическая кавитация, интенсифицирующая гидромеханические и массообменные процессы [18].

Форма расширения канала статора в виде кольцевой проточки и смещение сужений относительно друг друга обеспечивают резкое изменение направления потока среды, исключают образование застойных зон и способствуют интенсивному смешению потоков в каналах статора (рис. 7.3.10).

Соблюдение условий равенства длин участков расширений и сужений приводит к возникновению, при определенных условиях, стоячих волн в системе сужение-расширение. Условие, необходимое для возникновения стоячих волн может быть выражено в виде следующего уравнения:

$$l_c = l_p = ck/(4f), \quad f = \omega z_p / (2\pi) \quad (7.3.7)$$

где l_c - длина участка сужения, м; l_p - длина участка расширения, м; c - скорость звука в обрабатываемой среде, м/с; f - основная частота генерируемой волны, Гц; ω - угловая скорость ротора, c^{-1} ; z_p - число каналов в роторе; $k=1, 3, 5, \dots$.

В поле стоячих волн движущиеся частицы гетерогенной среды ускоряются в сторону пучностей давления и замедляются в сторону узлов давления. Эти эффекты увеличивают абсолютную величину скорости обтекания частиц относительно движущейся среды и интенсифицируют гидромеханические и массообменные процессы.

Снижения энергозатрат на нагнетание жидкости в полости ротора и продавливания ее через каналы ротора и статора можно добиться за счет оптимизации формы каналов. Жидкость, находящаяся в роторе участвует в движениях двух видов: 1) радиальном - за счет перепада давления между входным и выходными патрубками; 2) тангенциальном - за счет вращения ротора (без проскальзывания). В этом случае суммарный вектор скорости частиц жидкости направлен под некоторым углом к радиальной оси. Для снижения среднего гидравлического сопротивления необходимо каналы в роторе и статоре ориентировать в соответствии с суммарным вектором скорости частиц жидкости.

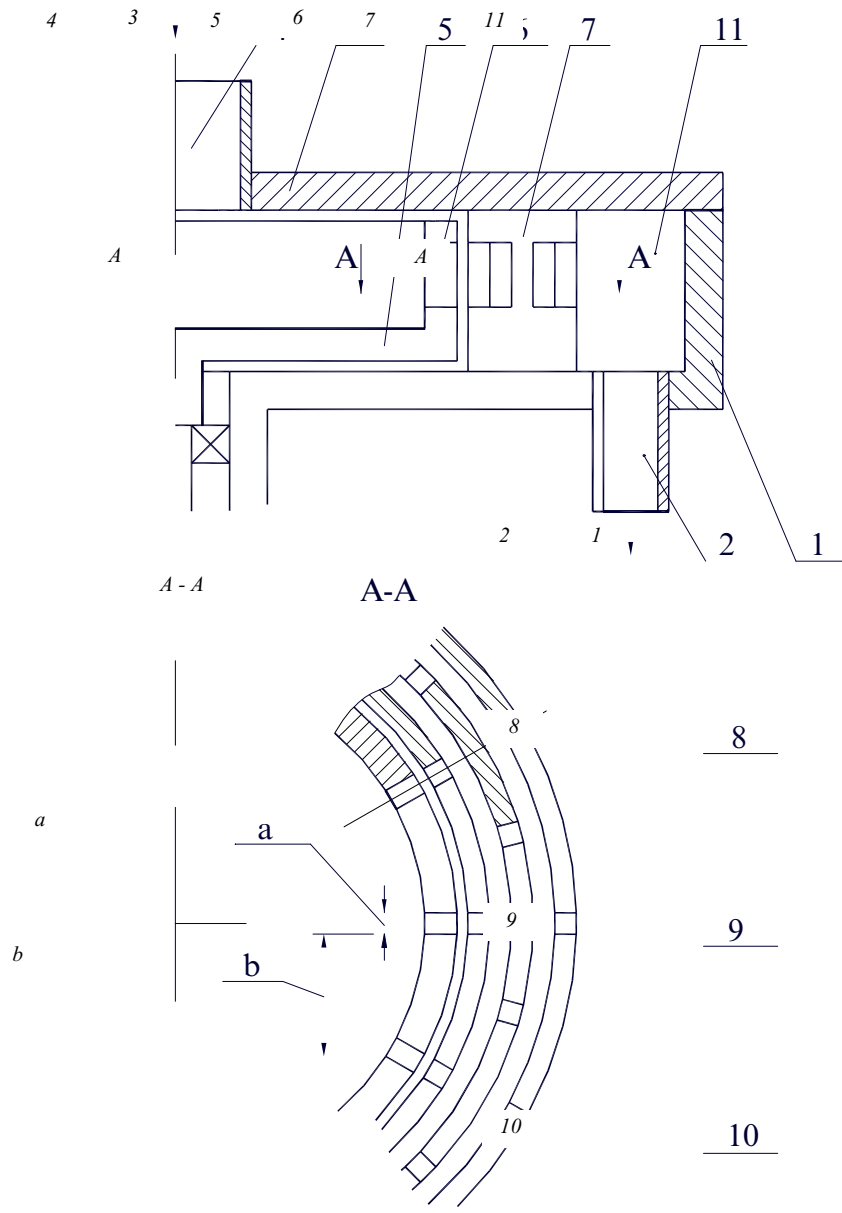


РИС. 7.3.10. ПУЛЬСАЦИОННЫЙ АППАРАТ РОТОРНОГО ТИПА С СУЖЕНИЯМИ И РАСШИРЕНИЯМИ КАНАЛОВ СТАТОРА

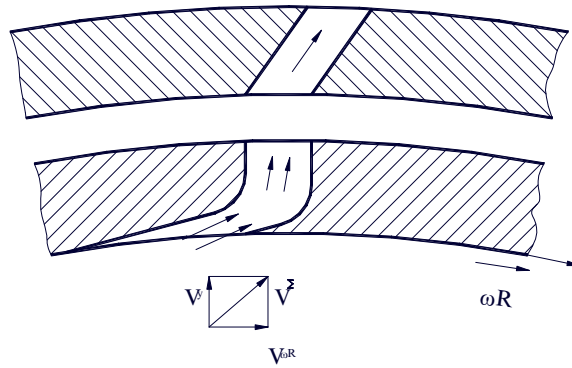


Рис. 7.3.11. Форма каналов ротора и статора

На рис. 7.3.11 показан поперечный разрез ротора и статора, каналы которых ориентированы в соответствии с вектором скорости жидкости на входных участках. Жидкость подается в полость ротора, и далее поток жидкости движется тангенциально в соответствии с направлением движения вязкой жидкости на периферии ротора. За счет ориентации входного участка канала ротора в соответствии с суммарным вектором скорости частиц жидкости, гидравлическое сопротивление входа в канал ротора минимально. Затем жидкость движется по каналу ротора и, так как частицы жидкости движутся вместе с каналом ротора, то минимальные потери давления будут при кратчайшем пути к выходу из канала - при условии, что канал ротора в выходной его части радиален. Затем вязкая жидкость поступает в зазор между статором и ротором. Из зазора между ротором и статором жидкость, увлекаемая внешней поверхностью боковой стенки ротора, тангенциально подается в канал статора. При этом направление движения жидкости не претерпевает изменений и поэтому гидравлическое сопротивление тангенциального канала статора в этом случае также минимально. Далее обработанную жидкость через выходной патрубок направляют для дальнейшего использования и (или) переработки. Благодаря вышеописанному выполнению каналов ротора и статора при работе аппарата его среднее гидравлическое сопротивление минимально. Это позволяет уменьшить потери давления (и энергии) и повысить эффективность использования энергии потока жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 7

1. Каневец Г. Е., Евдокимов Ю. В., Розенфельд А. И. Иерархия критериев эффективности химико-технологических, энерготехнологических и теплоэнергетических систем и их элементов // Хим. технология. 1987. № 5. С. 5 - 13.
2. Сажин Б. С., Буленков А. П. Эксергетический метод в химической технологии. М.: Химия, 1992. 208 с.
3. Волков Е. А. Численные методы. М.: Наука, 1987. 234 с.
4. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ. - М.: Мир, 1982. 238 с.
5. Балабудкин М. А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности. Л.: Химия. 1983. 160 с.
6. Балабышко А. М., Зимин А. И., Ружицкий В. П. Гидромеханическое диспергирование. М.: Наука, 1998. 330 с.
7. А. с. 1768269 СССР, МКИ В 01 F 7/28. Роторный аппарат / М. А. Промтов, В. М. Червяков, Ю. В. Воробьев. Оpubл. 15.10.1992. Бюл. № 38.
8. А. с. 1719045 СССР, МКИ В 01 F 7/28. Роторный аппарат / В. М. Червяков, Е. С. Шитиков, Ю. В. Воробьев и др. Оpubл. 15.03.1992. Бюл. № 10.
9. Заявка 2000106386 Пат. РФ. Высокочастотный многорядный роторно-импульсный аппарат / А. И. Зимин, М. А. Промтов, С. К. Карепанов. Приор. 14.03.2000.

10. *Пат.* 2165787 РФ МКИ В 01 F 7/12. Роторный аппарат / М. А. Промтов, М. В. Монастырский. Оpubл. 27.04.2001. Бюл. № 12.
11. *Кардашев Г. А., Михайлов П. Е.* Теплообменные акустические процессы и аппараты. М.: Машиностроение, 1973. 223 с.
12. *А. с.* 1674942 СССР, МКИ В 01 F 7/28. Роторный аппарат / В. М. Червяков, М. А. Промтов, Ю. В. Воробьев и др. Оpubл. 07.09.1991. Бюл. № 33.
13. *Пат.* 2155634 РФ, МКИ В 01 F 7/00. Роторный аппарат / М. А. Промтов, В. М. Червяков, Ю. В. Воробьев и др. Оpubл. 10.09.2000. Бюл. № 25.
14. *Пат.* 2149713 РФ, МКИ В 06 В 1/18. Акустический излучатель / М. А. Промтов. Оpubл. 27.05.2000. Бюл. № 15.
15. *Гиргидов А. Д.* Техническая механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. 895 с.
16. *Пат.* 21655292 РФ, МКИ В 01 F 7/00. Роторный аппарат / В. М. Червяков, М. А. Промтов, А. А. Коптев. Оpubл. 20.04.2001. Бюл. № 11.
17. *А. с.* 1773469 СССР, МКИ В 01 F 7/28. Роторный аппарат / М. А. Промтов, В. М. Червяков, Ю. В. Воробьев и др. Оpubл. 07.11.1992. Бюл. № 41.
18. *Пат.* 2150318 РФ, МКИ В 01 F 7/00. Роторный аппарат / А. А. Коптев, В. М. Червяков, М. А. Промтов. Оpubл. 10.06.2000. Бюл. № 16.
19. *Заявка* 2000105802 Пат. РФ. Роторно-импульсный аппарат / А. И. Зимин, М. А. Промтов, С. К. Карепанов. Приор. 13.03.2000.

8. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ВНЕДРЕНИЕ ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТОВ РОТОРНОГО ТИПА В ПРОИЗВОДСТВО

**ПУЛЬСАЦИОННЫЕ АППАРАТЫ РОТОРНОГО ТИПА УСПЕШНО
ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТАКИХ ПРОЦЕССОВ, КАК
ДИСПЕРГИРОВАНИЕ, ЭМУЛЬГИРОВАНИЕ, ГОМОГЕНИЗАЦИЯ, ЭКСТРАКЦИЯ,
РАСТВОРЕНИЕ И ДРУГИХ. ШИРОКОМУ ВНЕДРЕНИЮ ПАРТ В
ПРОМЫШЛЕННОСТЬ ПРЕПЯТСТВУЕТ СЛАБАЯ ИЗУЧЕННОСТЬ ФИЗИКО-
ХИМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И ЯВЛЕНИЙ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ПАРТ. В ЭТОЙ
ГЛАВЕ ОПИСАН НАШ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПАРТ ДЛЯ РЯДА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.**

8.1. ПРИГОТОВЛЕНИЕ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ

Необходимость приготовления эмульсии существует во многих отраслях промышленности. Одной из областей применения эмульсий является их использование в качестве смазочно-охлаждающих жидкостей - СОЖ. Наиболее распространены в обработке металлов резанием эмульсионные СОЖ. Получение высококачественных СОЖ требует разработки и применения нового высокоэффективного оборудования [1 - 2].

Для достижения этой цели в условиях Мичуринского ПО "Завод им. В. И. Ленина" была разработана и изготовлена промышленная установка для получения СОЖ на базе

РИКА. Установка предназначена для получения эмульсий типа "вода - масло" или "масло - вода", а также для растворения исходных компонентов СОЖ в воде.

Установка состоит из бака Б1 для эмульсий и бака Б2 для эмульсола. Эмульсол и эмульсия перекачиваются шестеренчатым и центробежным насосами, как показано на рис. 8.1.1. Предварительное перемешивание осуществляется при помощи рамной мешалки М и за счет барботирования сжатым воздухом. В процессе приготовления СОЖ измеряется объем приготовленной эмульсии, давление в РИКА и температура в технологической емкости Б1. Расход эмульсии и ее компонентов регулируется при помощи вентилей ВР 1-15. Необходимая температура смеси поддерживается при помощи змеевикового теплообменника в баке Б1.

В заводских условиях применяется эмульсол марки ЭТ-2 ТУ 38-1228-69, из которого готовится 5 % эмульсия. В качестве ингибиторов коррозии добавляется нитрат натрия и кальцинированная сода.

Установка работает следующим образом. Вода заливается в бак Б1 и подогревается "глухим" паром до определенной температуры. После подогрева в бак закачивается эмульсол в объеме, соответствующем заданной концентрации, и другие компоненты СОЖ. Затем осуществляется предварительное перемешивание мешалкой М и барботирование воздухом. Предварительно перемешанная смесь подается насосом Н1 в РИКА для окончательной обработки, и готовая СОЖ отводится в систему раздачи. Для предварительной оценки качества СОЖ предусмотрен патрубок для отбора проб эмульсии и патрубок для нецентрализованной раздачи СОЖ (в драгу).

В установке предусмотрена линия для рециркуляции эмульсии в случае, когда качество получаемой СОЖ не соответствует техническим условиям, и необходима более длительная обработка эмульсии. Это также делается для поддержания дисперсности эмульсии на необходимом уровне при длительном хранении.

Аналогичная установка была спроектирована для Мичуринского приборостроительного завода "Прогресс". Для выявления влияния качества СОЖ на износ режущего инструмента были проведены испытания в условиях этого завода.

Производственные испытания проводились для сравнения эффективности СОЖ, полученной на РИКА и на существующем оборудовании, при оценке износа реза во времени. До внедрения РИКА СОЖ приготавливали с помощью лопастной мешалки.

Порядок проведения производственных испытаний включал в себя следующие этапы: формулирование цели работы и разработка плана выполнения; отбор инструментов и подготовка его к испытаниям; проведение предварительных испытаний для проверки условий работы, состояния оборудования, выявления возможных нарушений операций и т.д.; установление критерия замены инструмента; уточнение порядка проведения испытаний; проведения испытаний СОЖ; обработка и анализ результатов испытаний [1].

Испытание СОЖ осуществлялось на выбранных для этой цели рабочих местах. Условия испытаний удовлетворяли следующим требованиям: проводились в существующих на данном рабочем месте производственных условиях без нарушения нормальной работы на данной операции; соответствовали обычным условиям эксплуатации инструмента; заготовками для испытаний служила обрабатываемая на данной операции обычная продукция цеха; выбранная для испытаний операция была постоянной.

При проведении испытаний на одношпиндельном станке необходима поочередная смена инструмента для сравниваемых партий с целью рандомизации отклонений свойств заготовок, а также других неконтролируемых условий испытаний, которые могут меняться со временем. При выборе каждой операции и позиции инструмента для производственных испытаний руководствовались следующими положениями. Выбранная операция должна в наибольшей степени отвечать целям испытаний и быть характерной для поставленной задачи. Для сокращения времени испытаний, а также для получения более достоверных результатов выбиралась массовая операция. Исключались при этом операции с большим периодом стойкости режущего инструмента.

Станок и оснастка были в исправном состоянии, замеченные неполадки были устранены. Условия и режимы испытаний проверялись до начала испытаний на рабочем месте, периодически проверялись свойства материала заготовок.

Производственные испытания не предполагали возможность вмешательства в производственный процесс, внесения в него каких-либо изменений, так как это связано с риском его нарушения.

Инструмент для испытаний отбирали из готовой продукции, принятой ОТК, клеймили в каждой партии порядковыми номерами, тщательно промывали и измеряли по всем параметрам. Результаты измерений использовали для отбраковки негодного для испытаний инструмента.

Испытания СОЖ проводились по методике, которая подробно описывается в работе [1]. Основные серии испытаний проводились на скорости резания, обеспечивающей среднюю скорость инструмента, соответствующую минимальной себестоимости выполнения операции обработки резанием.

Производственные испытания влияния СОЖ на износ режущего инструмента проводились в цехе завода. Контроль и отбор инструментов проводили в заводской лаборатории, в соответствии с требованиями стандартов. Предварительно по рекомендациям назначали допустимый износ. Изучалась зависимость износ-время для пяти режущих инструментов с испытуемой СОЖ на временном интервале, составляющем около одной трети периода стойкости.

Затем статистически обрабатывали результаты и отбирали 2-3 инструмента с минимальными отклонениями величины износа от среднего; на них продолжали изучение зависимости износ - время. Приведенная методика позволила снизить объем работ при проведении испытаний и получить достоверные данные. В опытах по установлению зависимости износ - время принимали: скорость резания $V_p = 0,5 - 1,0$ м/с; подача $S_n = 0,006 - 0,02$ м/с; глубина резания $L_p = 0,001$ м.

На рис. 8.1.2 представлена зависимость от времени износа резца из стали Р18 по задней поверхности при обработке стали 45. Смазочно-охлаждающая жидкость, приготовленная на РИКА в условиях развитой кавитации увеличивала стойкость резца в среднем на 37,3 %. В условиях $h_y \cdot 10^3, \tilde{m}$ кавитации стойкость резца увеличивалась в среднем на 28,2 %.

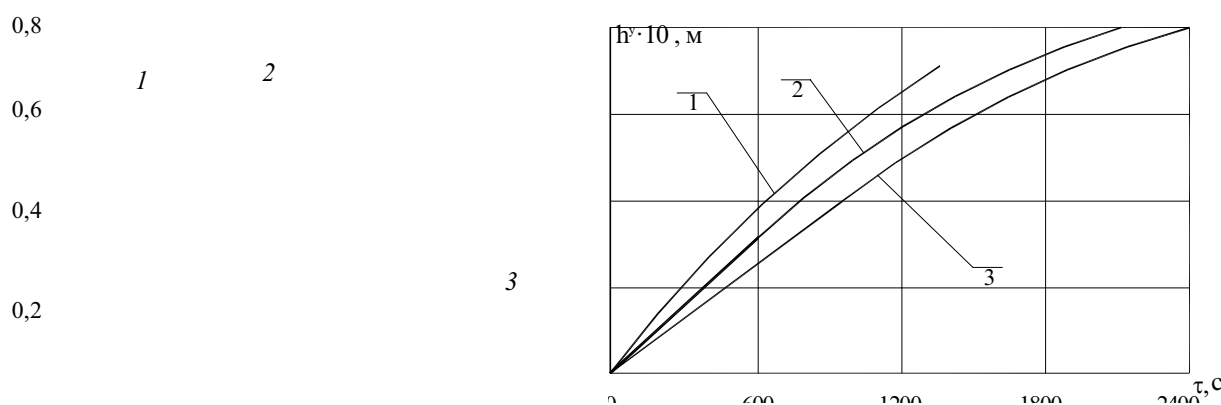


Рис. 8.1.2. Зависимость износа h_y резцов из стали Р18 от времени резания τ при точении стали 45 ($V_p = 1$ м/с; $L_p = 0,001$ м; $S_n = 0,02$ м/с)
 1 - заводская СОЖ; 2 - СОЖ, приготовленная на РИКА при $\omega = 160$ с⁻¹;
 3 - СОЖ, приготовленная на РИКА при $\omega = 290$ с⁻¹

Повышение качества СОЖ за счет увеличения ее дисперсности, стабильности, а также активации в акустическом и кавитационном полях при приготовлении в РИКА, позволило повысить стойкость режущего инструмента в среднем по заводу на 30 %. В результате

получен годовой экономический эффект на Мичуринском приборостроительном заводе "Прогресс" в сумме 68,920 тыс. р. (в ценах до 1992 г.).

Экономический эффект за счет повышения стойкости режущего инструмента на Мичуринском ПО "Завод им. В. И. Ленина" при использовании РИКА для повышения качества СОЖ за два года составил 40,470 тыс. р. (в ценах до 1992 г.).

Необходимо добавить, что на интенсификацию процесса эмульгирования большое влияние оказывает поверхностное натяжение и наличие поверхностно-активных веществ, снижающих поверхностное натяжение и оказывающих большое влияние на стабильность и диспергируемость эмульсий. Реологические свойства эмульсий зависят, в основном, от вязкости и концентрации дисперсной и дисперсионной фаз, а также от добавок. Так как в нашем случае концентрация эмульсии не превышала 5 % и не вводилось специальных добавок, то получаемая эмульсия соответствовала по свойствам ньютоновской жидкости.

8.2. ОБРАБОТКА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМАЗОЧНЫХ СОСТАВОВ В РОТОРНОМ ИМПУЛЬСНО-КАВИТАЦИОННОМ АППАРАТЕ

Отличительной особенностью выпускаемых в Российской Федерации и за рубежом смазочных материалов является то, что более 90 % используемых смазочных материалов - это смазки, приготовленные на маслах нефтяного происхождения. К сожалению, смазочные материалы на нефтяной основе во многих случаях не отвечают требованиям эксплуатации, так как несмотря на обилие легирующих присадок, исчерпали возможности повышения функциональных характеристик. Установлено, что часть смазок практически неработоспособны в режиме граничного трения и обедненной смазки, длительного воздействия внешней среды [3]. Кроме того, смазки на нефтяной и синтетической основах, как свежие, так и отработанные, являются источником углеводородного загрязнения окружающей среды, вследствие низкой биоразлагаемости и экотоксичности многих из них. Уже при содержании нефтепродуктов 0,3 - 0,5 мг/л вода имеет нефтяной запах и привкус, вследствие чего она становится непригодной для водоснабжения населенных пунктов. Вода, содержащая нафтеновые кислоты, образующиеся при распаде нефтепродуктов, при концентрации 3 - 5 мг/л смертельна для большинства рыб [4]. По санитарным нормам концентрация нефтепродуктов не должна превышать 0,05 мг/л в водоемах рыбохозяйственного назначения и 0,3 мг/л в водоемах санитарно-бытового значения. Для высокосернистых масел, которые являются основой большинства используемых смазок и масел, эта норма составляет 0,1 мг/л [4].

В связи с этим возрос интерес к смазочным маслам растительного и животного происхождения, которые могут быть использованы в качестве базовых масел. Такие масла не токсичны и обладают практически полной биоразлагаемостью.

Анализ показал, что перспективным направлением является использование растворов неорганических полимеров (водных растворов щелочных силикатов - жидких силикатных стекол и их смесей) [5, 6], так как растворы полимеров содержат поверхностно и химически активные вещества (ПАВ и ХАВ) и, следовательно, способны модифицировать поверхности трения. Высокий уровень смазочных характеристик полимерных растворов обуславливается более высокой теплоемкостью, а также физической и химической активностью полимеров и продуктов их деструкции, свойствами образующихся граничных слоев вторичного происхождения [7].

Одной из актуальных задач современной трибологии является разработка новых экономически безопасных смазочных материалов. Так, например, заменой широко используемых нефтемасляных базовых сред могут быть силикато-масляные составы,

представляющие собой многокомпонентные дисперсии коллоидного характера, технология приготовления которых основана на смешивании компонентов. Одной из проблем при получении таких смазок является приготовление состава с высокой коллоидной стабильностью. Типовое оборудование для перемешивания жидких сред энергоемко и недостаточно эффективно.

Как показали наши исследования, РИКА является высокоэффективным аппаратом для получения высокостабильных дисперсных систем. При получении силикатного масла для редуторных механизмов в РИКА продукт получается высокого качества и с низкими затратами энергии. В состав силикатного масла входит водный раствор силиката натрия, рапсовое масло и комплекс компонентов стабилизаторов структуры, присадки и наполнители. Соотношение воды, силиката натрия и масла составлял 1 : 1 : 1.

Эксперименты по приготовлению силикатного масла проводились на установке, описанной в параграфе 5.1. Для сравнения качества обработки в РИКА аналогичный состав смешивали на лабораторной лопастной мешалке. Качественные показатели силикатного масла, обрабатываемого в РИКА и в аппарате с лопастной мешалкой, приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Наименование показателей	Обработка смеси	
	в аппарате с лопастной мешалкой	в РИКА
Время обработки, мин.	15	2
Испаряемость, %	5 - 7	2 - 5
Коллоидная стабильность, %	40 - 50	10 - 12
Время расслаивания, сут.	3	30

Данные, приведенные в таблице, показывают, что качественные показатели силикатного масла обработанного в РИКА значительно выше по сравнению с обработкой в аппарате с лопастной мешалкой. Объем аппарата с лопастной мешалкой - 0,01 м³, частота вращения вала мешалки - 1500 об/мин. Кроме улучшения качественных показателей, можно сделать вывод о высокой эффективности обработки подобных смесей в РИКА.

8.3. ПРИГОТОВЛЕНИЕ ПАРАФИНОВОЙ ПАСТЫ - ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДОБАВКИ ДЛЯ БЕТОНОВ

Для получения железобетона с высокими эксплуатационными свойствами для строительных, морских и т.п. сооружений проводят химизацию бетона комплексными добавками. В качестве комплексных добавок (смесей из гидрофолизирующих и гидрофобилизирующих поверхностно-активных веществ) применяют коллоидную парафиновую пасту. В основе она представляет собой комплексное соединение двух различных по своей химической природе веществ - полярного растворителя (воды) с неполярным гидрофобным веществом (парафином).

Введение такой добавки в бетонную смесь позволяет решить многие задачи. Присутствие дозированного количества парафина способствует гидрофобизации бетона. Наличие вокруг микрочастиц парафина сольватных оболочек воды позволяет легко и

равномерно распределить его в объеме бетонной смеси. При этом паста является мягким пластификатором.

Исследования показали, что для создания устойчивой во времени системы "парафин - вода" необходима специальная обработка указанных веществ.

Химическая обработка осуществляется введением в систему ПАВ, способного адсорбироваться на поверхности раздела фаз. В результате имеющее место на границе жидкой фазы с неполярной (гидрофобной) поверхностью высокое межфазное поверхностное напряжение уменьшается, что способствует преодолению несовместимости компонентов и увеличивает удельную поверхность раздела фаз [8].

Физическая обработка осуществляется в РИКА при многофакторном воздействии на смесь. Развитая турбулентность, пульсации давления и скорости потока, пульсации и схлопывание кавитационных каверн способствуют интенсификации процесса эмульгирования.

Эксперименты по приготовлению парафиновой пасты проводились на экспериментальном стенде, описанном в параграфе 5.1. Технология приготовления была следующая. Нагретые в общей массе до расплавления парафин и моноэтаноламид и отдельно водопроводная вода до температуры 80 °С в заданном соотношении подавались в бак с тихоходной рамной мешалкой и предварительно перемешивались. Далее грубодисперсная смесь подвергалась основной обработке в РИКА. Смесь циркулировала на экспериментальном стенде по замкнутому контуру. В ходе обработки смеси отбирались пробы. Опыты показали, что уже после одного цикла обработки вода оказалась химически связанной микрочастицами парафина, т.е. образовалась коллоидная система, при остывании образовавшаяся гель (коллоидную парафиновую пасту).

Изучение влияния парафиновой пасты на свойства бетонной смеси и бетона проводились на образцах состава: цемент : песок : щебень = 1 : 1,7 : 3,5 по массе. В опытах использовали бетон, приготовленный на портландцементе М500, кварцевом песке $M_k = 1,5$ и гранитном щебне фракции 5 - 20 мм. Образцы бетона с размерами 7 × 7 × 7 см изготавливались по обычной лабораторной технологии. Парафиновую пасту вводили вместе с водой затворения в лабораторную бетономешалку. После формирования образцы выдерживались в течение трех часов в нормально-влажных условиях, а затем подвергались термовлажностной обработке по режиму 3 + 6 + 3 часов. При температуре около 60 °С частицы парафина переходят в вязкотекучее состояние, коагулируя капилляры и поры бетона. При остывании бетона парафин возвращается в первоначальное состояние, придавая бетону водостойкость. Наблюдался эффект объемной гидрофобизации.

Результаты исследований физико-механических свойств бетонов показали, что введение парафиновой пасты существенно пластифицирует бетонную смесь, так как при равной ее подвижности водоцементное отношение снижается с 0,53 для бездобавочного состава до 0,44 - 0,39.

Оптимальное количество добавки для бетонов составляет 1 - 3 % от массы цемента, а дальнейшее ее увеличение приводит к снижению прочности бетонных образцов в сравнении с эталонной.

Многофакторное воздействие на обрабатываемую смесь в РИКА способствует очень быстрому интенсивному дроблению микрочастиц парафина и созданию коллоидной системы "парафин - вода", с высокой степенью дисперсности. Высокая устойчивость системы во времени обеспечивается за счет адсорбции на поверхности раздела фаз пленки из ПАВ - моноэтаноламида СЖК С₂₁ - С₂₅.

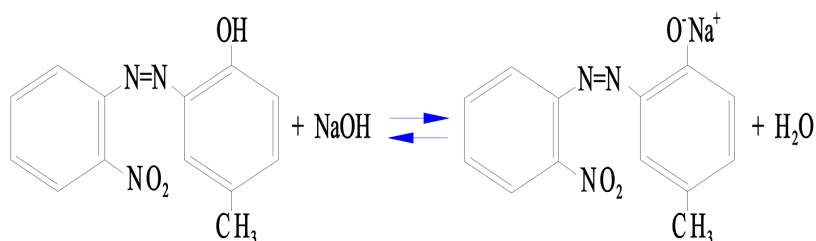
Благодаря пластифицирующей способности парафиновой пасты снижается водопотребность смеси. Технологическое преимущество этого эффекта заключается в возможности экономии цемента на 5 - 10 %, повышения плотности и непроницаемости бетона.

Объемная гидрофобизация бетона частицами парафина снижает водопоглощение на 40 - 50 %, повышая его коррозионную стойкость и долговечность в условиях воздействия жидких агрессивных сред.

8.4. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ РАСТВОРА АЗОКРАСИТЕЛЯ НАБ В 0,5 % ВОДНО-ЩЕЛОЧНОЙ СРЕДЕ

В производстве полимеров в качестве светостабилизаторов применяют 2-(2'-гидрокси-5'-метилфенил)-бензтриазол (БТ), который синтезируют из 2-нитро-2'-гидрокси-5'-метилазобензола (НАБ). Процесс характеризуется высоким расходом реагентов, образованием большого количества отходов и невысоким выходом целевого продукта, поэтому разработка малоотходных технологий для получения светостабилизатора является важной и перспективной задачей.

Растворимость НАБ в водно-щелочной среде обусловлена образованием натриевой соли по фенольной группе. Щелочная среда способствует увеличению выхода конечного продукта. При перемешивании лопастной мешалкой, растворимость НАБ составляет $5 \cdot 10^{-4}$ моль/л в 0,5 % растворе гидроксида натрия.



Увеличение концентрации NaOH до 40 % позволяет повысить растворимость НАБ до 0,024 моль/л. Вопреки стехиометрии реакции избыток гидроксида натрия, необходимого для полного растворения, по отношению к НАБ составляет 200 - 400 молей [9, 10]. Этот предел обусловлен низкой константой диссоциации натриевой соли азокрасителя (НАБ), которая подобно другим замещенным фенолам очень низка [11]. Диффузия вещества в жидкой фазе является наиболее медленным процессом, лимитирующим скорость всего процесса растворения НАБ в водно-щелочной среде.

Были проведены экспериментальные исследования по выявлению влияния гидроакустического воздействия на процесс растворения НАБ в водно-щелочной среде. В экспериментах использовали гидроксид натрия квалификации "чистый" и НАБ, перекристаллизованный из этанола, чистоту НАБ контролировали с помощью тонкослойной хроматографии и определения температуры плавления (т. пл. 117 °С).

Растворение азокрасителя НАБ в 0,5 % водно-щелочной среде проводили на установке, описанной в параграфе 5.1 и ультразвуковой ванне УМ-2. Перед растворением порошок НАБ высушивали до постоянной массы вещества. Расчет массы порошка НАБ, необходимой для растворения, проводили по сухому веществу. Порции NaOH и НАБ взвешивали на аналитических весах с точностью до 0,01 г. После этого, навеску NaOH растворяли в необходимом объеме воды. Затем в этот объем засыпали порошок НАБ, размешивали лопаточкой до полного смачивания всего порошка раствором и отбирали порцию исходного раствора. В дальнейшем исходный раствор использовали в качестве фона для сравнения с раствором НАБ, обработанным в РИКА. Полученную смесь заливали в бак установки и проводили растворение циркулирующей потока среды по замкнутому контуру через РИКА. После определенного числа циклов обработки отбирали пробы полученного раствора. Процесс растворения проводили при постоянных: температуре - $t = 18 - 22$ °С; давлении - $P_k = 10^5$ Па; расходе - $Q = 0,014$ м³/с.

Для определения концентрации НАБ в водно-щелочном растворе измеряли относительное светопропускание полученного раствора на фотоэлектрическом колориметре типа KF-5 с помощью тарировочного графика по традиционным методикам анализа [12]. Светопропускание полученного раствора сравнивали с исходным раствором, светопропускание которого считали равным 100 %. Перед фотоколориметрическим анализом из каждой пробы раствора удаляли твердые частички центрифугированием на высокоскоростной центрифуге типа W-310. Таким образом, из раствора был удален весь нерастворенный порошок НАБ.

На рис. 8.4.1 приведены графики зависимости концентрации C полученного раствора НАБ от удельных энергозатрат ε на обработку раствора, которые показывают количество энергии, затраченной на обработку единицы объема раствора за определенный промежуток времени. Интенсификация процесса растворения НАБ в 0,5 % щелочном растворе обусловлена кавитационным воздействием, которое, во-первых, приводит к диссоциации молекул воды на ионы гидроксила и гидроксония. Во-вторых, оказывает общее влияние на систему растворителя, заключающееся в том, что под действием кавитации молекулы неэлектролита, каковыми являются молекулы воды, приобретают некоторый заряд. При достаточно большом соотношении между зарядом и радиусом молекулы соседние частицы растворителя оказываются жестко ориентированными в поле ионов-молекул НАБ и отдельных молекул воды и образуют сольватационную оболочку, где атомы кислорода обращены к катиону, а атомы водорода - к аниону, т.е., происходит структурообразование. Этот эффект сопровождается понижением энтропии и ростом времени корреляции молекулярного движения. Под воздействием жестко ориентированных молекул растворителя, образующих первичную оболочку, возникает частичное упорядочивание более удаленных молекулярных диполей вне первичной сольватной оболочки - это так называемая вторичная физическая или диэлектрическая сольватация. В данном случае происходит стабилизация растворенного вещества (НАБ) растворителем. В-третьих, развитая турбулентность, пульсации и схлопывание кавитационных каверн способствуют уменьшению диффузионного слоя и увеличению поверхности фазового контакта за счет диспергирования твердых частиц. В-четвертых, при кавитационной обработке происходит активация растворителя, которая выражается в повышении рН среды.

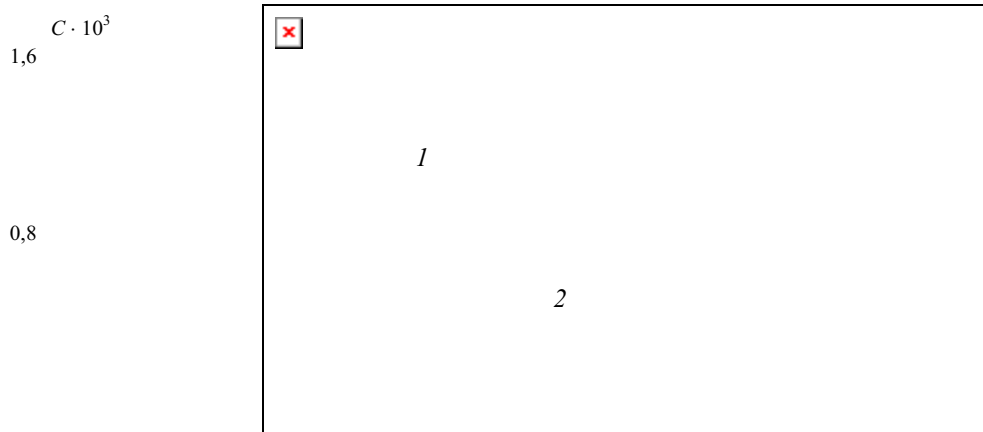
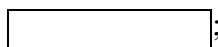


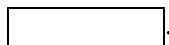
Рис. 8.4.1. Зависимость концентрации C (моль/л) полученного раствора НАБ от удельных энергозатрат ε ($\text{Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$) на обработку раствора.
Растворение: 1 - в РИКА, 2 - в ультразвуковой ванне

При отстаивании полученного раствора в течение трех суток концентрация НАБ уменьшается в среднем на 50 %. Это объясняется тем, что энергия, которая была получена системой при кавитационном воздействии, медленно диссипирует при изменении структуры растворителя и постепенном понижении рН. На рис. 8.4.2 показаны графики зависимости приращения рН воды от времени обработки в ультразвуковой ванне и РИКА.

Эффект увеличения рН среды можно объяснить протеканием следующих химических реакций: на первой стадии вода реагирует с растворенным кислородом с образованием пероксида водорода:



на второй стадии протекает реакция разложения пероксида водорода:



Этот механизм согласуется с данными, приведенными в работах [13, 14].

В ходе кавитационного воздействия измерялась также концентрация пероксида водорода методом перманганатометрии. После прекращения кавитационной обработки в системе преобладают обратные химические реакции, и рН среды со временем понижается до исходной величины, то есть, в нашем случае до нейтральной. Концентрация пероксида водорода также снижается, а это говорит о том, что реакции обратимы. При обработке водных сред возможен синтез продуктов сонолиза в водных системах на воздухе - оксидов азота. Экспериментальными исследованиями обнаружено накопление ионов NO_2 при обработке дистиллированной воды. Образующиеся в кавитационном пузырьке атомы азота могут реагировать с гидроксильными радикалами с образованием либо HNO_3 , либо смеси $\text{HNO}_2 + \text{HNO}_3$ [14].

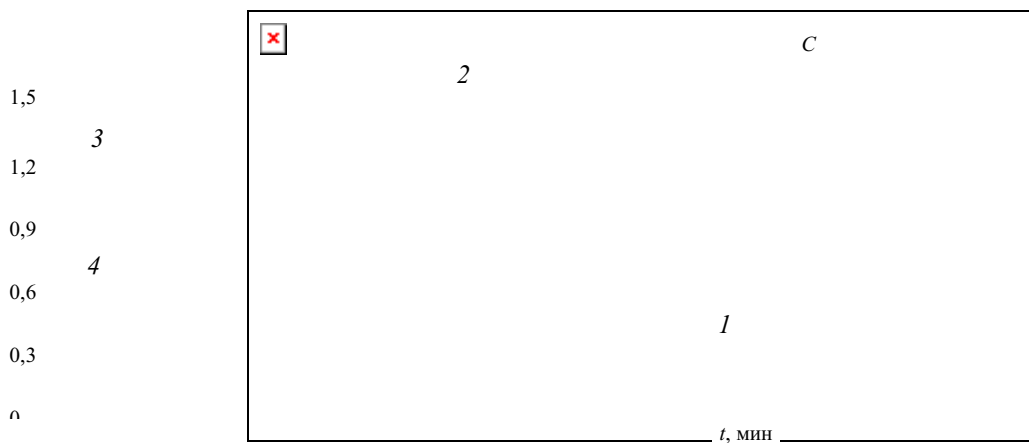


Рис. 8.4.2. Временные зависимости приращения pH, изменения концентрации $[H_2O_2]$ и $[OH^-]$ воды при кавитационной обработке в ультразвуковой ванне и в РИКА.

1, 3, 4 - обработка воды в ультразвуковой ванне (3 - изменение концентраций $[OH^-]$; 4 - изменение концентрации $[O_2H_2]$); 2 - обработка воды в РИКА

При кавитационной обработке происходит интенсификация процесса растворения НАБ в водно-щелочной среде за счет активации растворителя и "ударного" воздействия на систему. Кавитационное воздействие на водные растворы приводит к образованию пероксида водорода, который, разлагаясь на гидроксил-ионы, увеличивает pH среды. Данные реакции являются, по-видимому, реакциями первого порядка. Кавитационная обработка системы позволяет проводить с ней химические и электрохимические синтезы восстановления НАБ до бензтриазола в водно-щелочной среде с меньшей концентрацией NaOH при том же выходе готового продукта.

Настройка на автоколебательный и кавитационный режимы работы РИКА можно производить изменением угловой скорости ротора. Исходя из этого, проводили эксперименты по исследованию влияния угловой скорости ротора аппарата, а, следовательно, и частоты пульсаций, на интенсивность процесса растворения НАБ в водно-щелочной среде. В качестве показателя, характеризующего интенсивность растворения, была выбрана концентрация растворенного вещества в растворителе после определенного числа циклов обработки в РИКА.

На рис. 8.4.3 показан график зависимости концентрации НАБ в 0,5 % растворе NaOH в воде от частоты колебаний при различном числе циклов обработка в РИКА. Максимальные значения концентрации НАБ были получены при частотах колебаний и . Значения этих частот удовлетворительно совпадают с частотами, при которых наблюдается автоколебательный режим работы РИКА с дополнительным источником колебаний в виде центробежного насоса. Анализируя график, можно сделать вывод, что кавитация также вносит свой вклад в интенсификацию процесса растворения НАБ, так как с увеличением угловой скорости ротора интенсивность кавитации возрастает, то и концентрация НАБ также растет с ростом угловой скорости ротора.

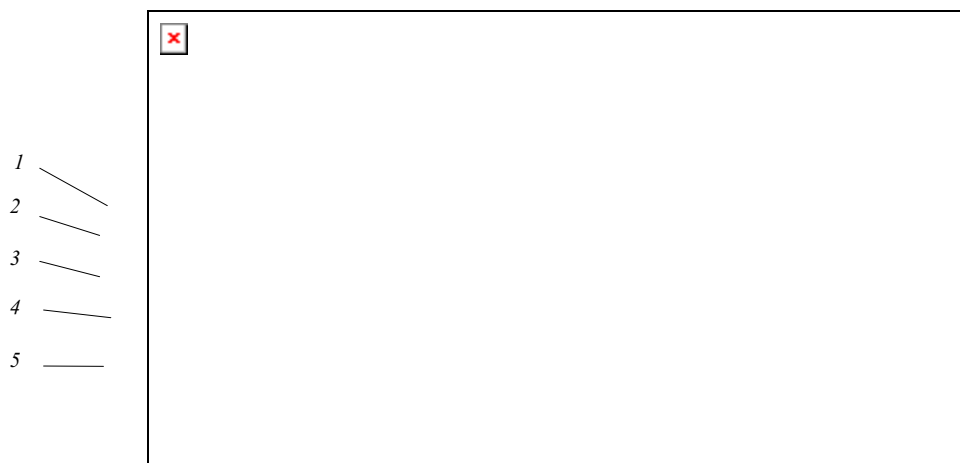


Рис. 8.4.3. Графики зависимости концентрации НАБ - 1 в 0,5 % водно-щелочном растворе от частоты колебаний.
Кривые: 1 - 40 циклов обработки; 2 - 25 циклов; 3 - 15 циклов;
4 - 5 циклов; 5 - 3 цикла

8.5. ВЫДЕЛЕНИЕ ЖИРОВОЙ ФРАКЦИИ ИЗ БЕЛКОВО-ЛИПИДНЫХ КОМПЛЕКСОВ

РИКА нашел применение в решении некоторых технологических и экотехнологических задач ряда производств рыбо-мясоперерабатывающей промышленности и переработки молока, которые связаны с выделением жировой фракции из белково-липидных комплексов (БЛК), содержащих до 30 % жира. Технологический и экономический эффект от выделения "связанного" жира из БЛК заключается в получении дополнительной или более качественной продукции (например, казеин с низкой концентрацией жира) и утилизации биологически-активных (пищевых и кормовых) компонентов из сточных вод предприятия.

Проведенные экспериментальные исследования процесса выделения жира при обработке в РИКА "подпрессовых бульонов" производства рыбкоостной кормовой муки и "обрата", получаемого после сепарации цельного молока показали, что степень выделения жировой фракции из "обрата" превышала 70 % уже через 10 - 15 мин, а из "подпрессового бульона" - через 20 - 25 мин. По существующим технологиям с использованием кислотного ферментативного гидролиза, пенного фракционирования время выделения жира из БЛК составляет 4 - 10 ч.

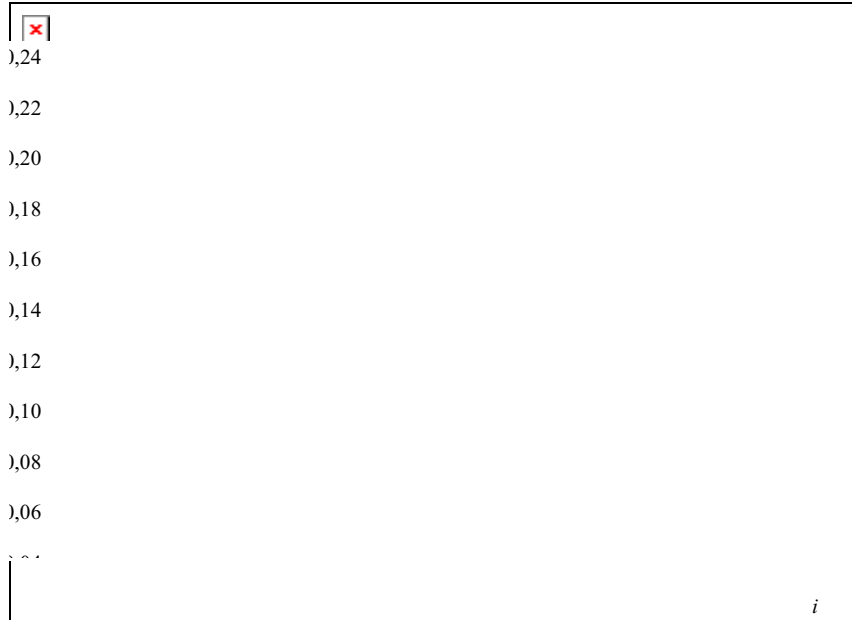
Микроскопический анализ проб показал увеличение числа и размеров капель жира. Средний диаметр капель жира составил 2 - 4 мкм. Впервые обнаружена коалиценция капель жира при обработке в РИКА. Это объясняется тем, что в обезжиренном молоке после сепарации остается только связанный и мелкодисперсный жир с размером частиц менее 1 мкм. Мощное энергетическое импульсное воздействие на обрабатываемую среду способствует разрыву физических (адсорбционных) связей, выделению жира и дальнейшей коалиценции капель жира.

Обработка молочного обраты проводилась в РИКА, установленном в технологической цепи первичной обработки молока Новоузенского молочного завода (Саратовская область). Молоко проходило первичную сепарацию, а затем поступало в РИКА. Обрат несколько раз проходил по замкнутому циклу через РИКА. Для разделения циклов обработки обраты использовали две технологические емкости. Температура обраты в начале обработки составляла 37 °С, кислотность - 21 Т, исходное содержание жира - 0,06 %. Процентное содержание свободного жира в обрате определяли методом титрования по известной методике [15].

На рис. 8.5.1 показан график изменения процентного содержания жира в зависимости от числа циклов обработки. График показывает, что после трех циклов обработки происходит

некоторое снижение процентного содержания жира, что объясняется частичной сепарацией жира и его осаждением на участках технологической цепочки. После 15 циклов обработки, проводили сепарацию обраты. Доля содержания жира в "сливках" обработанного обраты составила 0,2 %.

Таким образом, кавитационная обработка молочного обраты позволяет увеличить долю содержания свободного жира в 3-4 раза, а затем провести его сепарацию.



...мента волокнистую структуру. Казалось бы, чем меньше размер частицы, тем легче ее диспергировать. Однако, если размер частицы превышает 30 мкм чрезвычайно трудно даже при кавитационной диспергизации волокнистые частицы такого размера измельчаются на гомогенизаторах высокого давления, энергоемкость которых в

8.7. ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ПИГМЕНТОВ ЛАКОКРАСОЧНОЙ СУСПЕНЗИИ

Перспективным направлением применения ПАВ в лакокрасочной промышленности. Одна из важных проблем в приготовлении лакокрасочных суспензий с высокой степенью дисперсности. Чем меньше размер частицы краски, ее эксплуатационные и потребительские показатели.

Исследование процесса диспергирования лакокрасочных суспензий. В работе рассмотрены вопросы диспергирования лакокрасочной суспензии обработки краски ГФ-125 (черная) относящейся к группе маслорастворимых суспензий пигментов и наполнителей в различных олифах, а также добавок (аэросил, лецитин и др.), препятствующих

.....

В результате испытаний установлено, что сп производительность процесса на 20 - 30 % в среднем по с ликвидирован ручной труд за счет механизации технологичес

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАЕ

1. *Башков В. М., Кацев П. Г.* Испытания режущего и Машиностроение, 1985. 136 с.
2. *Технологические свойства* новых СОЖ для обработки Клушина. М.: Машиностроение, 1985. 136 с.
3. *Меркурьев Г. Д., Елисеев Л. С.* Смазочные мат транспорте: Справочник. М.: Транспорт, 1985. 255 с.
4. *Кламман Д.* Смазки и родственные продукты. С

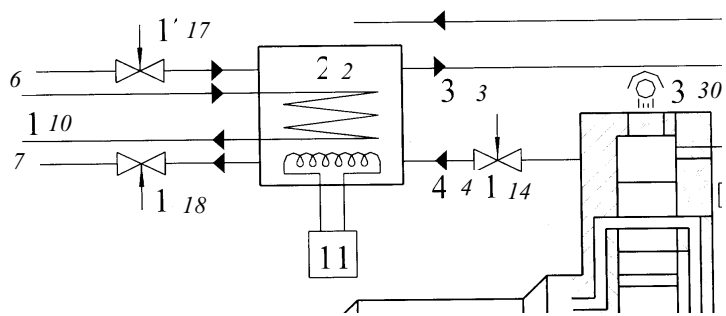




a)

б)

Рис. 4.3.1. Схема взаимодействия твердой частицы сферической частицы
(сечение - треугольник)



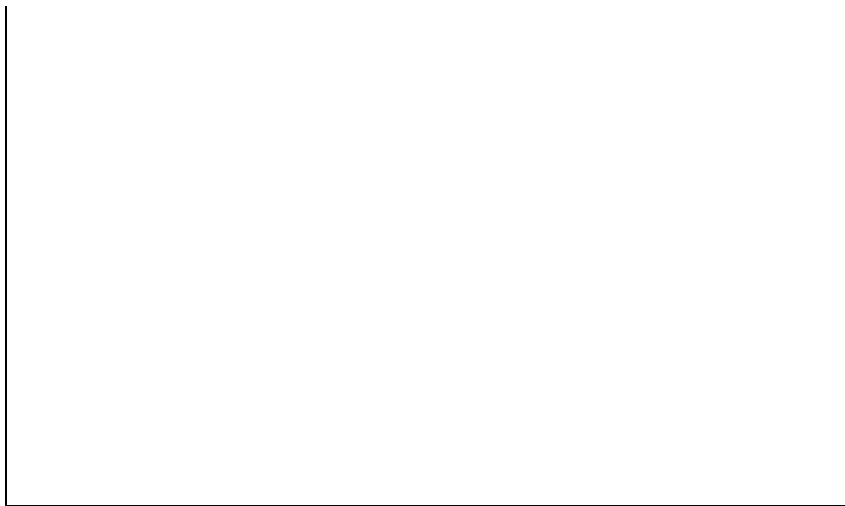


Рис. 5.1.3. График амплитудно-частотной зависимости гидро
без накладки (кривая 2).

-- -

..