

Научное издание

ЛЕОНТЬЕВА Альбина Ивановна,  
БРЯНКИН Константин Вячеславович,  
ДЕГТЯРЕВ Андрей Александрович,  
ОРЕХОВ Владимир Святославович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ ПРОЦЕССА  
СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ В ВИБРОАЭРОКИПЯЩЕМ СЛОЕ**

Монография

Редактор Л.В. Комбарова  
Инженер по компьютерному макетированию М.С. Анурьева

Подписано в печать 09.02.2011.  
Формат 60×84 /16. 4,65 усл. печ. л. Тираж 50 экз. Заказ № 60

Издательско-полиграфический центр ГОУ ВПО ТГТУ  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

**А.И. ЛЕОНТЬЕВА, К.В. БРЯНКИН,  
А.А. ДЕГТЯРЕВ, В.С. ОРЕХОВ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ  
ПРОЦЕССА СУШКИ  
ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
В ВИБРОАЭРОКИПЯЩЕМ СЛОЕ**

Тамбов  
◆ Издательство ГОУ ВПО ТГТУ ◆  
2011





Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тамбовский государственный технический университет»

**А.И. ЛЕОНТЬЕВА, К.В. БРЯНКИН,  
А.А. ДЕГТЯРЕВ, В.С. ОРЕХОВ**

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ ПРОЦЕССА СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВИБРОАЭРОКИПЯЩЕМ СЛОЕ**

Рекомендовано Научно-техническим  
советом ГОУ ВПО ТГТУ в качестве монографии



---

Тамбов  
Издательство ГОУ ВПО ТГТУ  
2011

УДК 66.018.4  
ББК 35.113  
М744

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор ГОУ ВПО ТГТУ  
*Н.Ц. Гатапова*

Доктор физико-математических наук, профессор ГОУ ВПО ТГТУ  
*С.М. Дзюба*

- 744 Моделирование и расчёт процесса сушки термолabileльных материалов в виброаэрокипящем слое : монография / А.И. Леонтьева, К.В. Брянкин, А.А. Дегтярев, В.С. Орехов. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – 80 с. – 50 экз. – ISBN 978-5-8265-0973-9.

Изложены подходы к моделированию процесса сушки термолabileльных материалов, в рамках которого процесс сушки рассматривается как совмещённый процесс термического обезвоживания и термической деструкции на примере сушилок с виброаэрокипящим слоем. Представлена математическая модель, позволяющая на основании технологических параметров процесса, физико-химических свойств веществ и начальных параметров процесса получить данные о конечном влагосодержании материала и выходе по целевому веществу. Приведена инженерная методика расчёта процесса сушки термолabileльных материалов, осложнённого термическим разложением целевого вещества, учитывающая величину выхода по целевому веществу при рассмотрении кинетики сушки материала для конечного момента времени.

Предназначена для научных и инженерно-технических работников химической и других отраслей промышленности. Будет полезна студентам и аспирантам, специализирующимся в области процессов и аппаратов химической и нефтехимической технологии.

УДК 66.018.4  
ББК 35.113

**ISBN 978-5-8265-0973-9** © Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ГОУ ВПО ТГТУ), 2011

## ВВЕДЕНИЕ

Сушка – сложный и энергоёмкий процесс в технологии производства полупродуктов органических красителей (ПОК). Выбор метода процесса сушки ПОК и определение его технологических параметров существенно осложняется их ярко выраженными термолабильными свойствами. Применение традиционно используемых в химической промышленности методов сушки требует расчёта параметров процесса для достижения низкой конечной влажности при сохранности целевого вещества, что связано со спецификой этих продуктов, для которых при длительном воздействии даже относительно невысокой температуры (45...90 °С) на органический материал наблюдается снижение концентрации основного вещества вследствие активизации процессов его термического разложения.

Таким образом, проблема организации стадии сушки в производствах органического синтеза связана преимущественно с отсутствием достаточно надёжных методик расчёта процесса сушки, учитывающих специфику ПОК, их термочувствительность как объектов сушки.

Принимая во внимание, что наиболее важными показателями качества химических продуктов органического синтеза являются концентрация целевого вещества и химическая чистота при выборе метода обезвоживания ПОК, его технологических режимов и аппаратурного оформления необходимо учитывать термическую устойчивость органических соединений. Исходя из этого, при разработке методов расчёта процесса сушки ПОК предлагается в качестве доминирующего показателя использовать термическую устойчивость материала.

Наиболее важным с практической точки зрения, является вопрос сохранения целевого вещества ПОК при его термической обработке, так как с величиной его потерь связаны себестоимость и рентабельность производства в целом.

Учитывая выше сказанное, предлагается в качестве основного критерия при оценке эффективности процесса сушки ПОК принять величину потерь целевого вещества, выраженную в процентах относительно его начальной концентрации, или, что тоже самое, значение разницы между максимально возможным и фактическим выходом ПОК на стадии его термической обработки.

Выбор и расчёт сушильного аппарата осуществляется на основе комплексного анализа характеристик материала как объекта сушки. Данные по термической устойчивости материалов при выборе метода сушки могут быть получены экспериментально или приняты по справочной литературе как тепловые, сорбционно-структурные и гигро-термические характеристики.

Учёт термоллабильности продуктов проводится, как правило, на этапе выбора метода сушки и предельной по максимуму температуры, но не при расчёте сушильного аппарата. Результаты экспериментальных исследований показывают, что даже при самых «комфортных» для высушиваемого материала условиях наблюдается уменьшение концентрации целевого продукта вследствие термодеструкции. Таким образом, при осуществлении процесса сушки ПОК необходимо учитывать наличие этого процесса (термодеструкцию).

Предлагается при моделировании процесса обезвоживания ПОК рассматривать его как химико-технологический процесс (ХТП), включающий в себя тепло- и массообменный процесс (сушку) и химический процесс (термодеструкцию). Причём, оба этих процесса протекают одновременно. Эффективность такого ХТП (получение ПОК с заданной конечной влажностью при сохранении основного вещества) зависит от рассмотрения каждой составляющей ХТП в совокупности.



# 1. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВИБРОАЭРОКИПАЮЩЕМ СЛОЕ

Моделирование процессов сушки термоллабильных материалов рассматривается на примере сушилки с виброаэрокипящим слоем (сушилка с активным гидродинамическим режимом), наиболее приемлемой для обезвоживания полупродуктов органических красителей.

## 1.1. СПЕЦИФИКА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ ПОЛУПРОДУКТОВ ОРГАНИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЕЙ

Все продукты и полупродукты органического синтеза, которые поступают на стадию сушки в виде сыпучих материалов, влажных паст, суспензий и растворов, являются термоллабильными.

В сушилках виброаэрокипящего слоя обезвоживаются сыпучие ПОК, представляющие собой дисперсные материалы с начальной влажностью 10...35% и диаметром частиц 0,01...5 мм. Во избежание уноса мелкой фракции при сушке в виброаэрокипящем слое разброс частиц по диаметру должен быть небольшим. При небольших скоростях газа ( $Re < Re_{pl}$ ) в виброаэрокипящем слое можно сушить материал с низкой способностью к когезии, в то время как при высоких скоростях газового потока ( $Re \geq Re_{pl}$ ) можно сушить материал как с низкой, так и с высокой способностью к когезии, в том числе изначально скомковавшийся материал при наложении вибрационного воздействия разрушает свои агрегаты [77, 86]. Сушилki виброаэрокипящего слоя непригодны для сушки материалов, склонных к адгезии, так как происходит налипание материала на стенки аппарата, однако при применении аппаратов особой конструкции [99] сушка таких материалов в виброаэрокипящем слое становится возможной.

Влажные пасты ПОК представляют собой вязкие глинообразные продукты с начальной влажностью 25...80%. Основными характеристиками которых, помимо влажности, являются текучесть и адгезионно-когезионные свойства. Пасты с низкой текучестью, т.е. со свойствами, близкими к сыпучим материалам, сушатся в виброаэрокипящем слое с предварительной формовкой, пасты с высокой текучестью и со свойствами, близкими к жидкости, сушатся в установках с виброаэрокипящим слоем инертного материала [67, 86].

Суспензии и растворы ПОК представляют собой жидкие продукты с начальной влажностью 80...97%, их сушка возможна только на установках с виброаэрокипящим слоем инертного материала или с грануляцией на затравке [67, 86].

Основной характеристикой ПОК является концентрация целевого вещества при достижении материалом низкого показателя влажности.

Сушилкам с виброаэрокипящим слоем отдаётся предпочтение для обезвоживания сыпучих материалов или влажных паст с предварительной формовкой, с низкими адгезионными свойствами, устойчивостью к пылению и истиранию, и с узким диапазоном по размеру частиц дисперсной фазы.

## 1.2. КИНЕТИКА ПРОЦЕССА РАЗЛОЖЕНИЯ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ ПОЛУПРОДУКТОВ ОРГАНИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЕЙ

Механизмы реакций деструкции термолабильных ПОК можно предположительно разделить на три группы:

- 1) окисление кислородом воздуха;
- 2) разрыв или перегруппировка химических связей в молекуле под воздействием температуры;
- 3) взаимодействие между молекулами различных веществ, присутствующих в высушиваемом материале.

Реакции окисления относятся к гетерогенным процессам. Реакции разрыва или перегруппировки химических связей могут быть как гетерогенными (разрыв связей с образованием газообразных продуктов), так и гомогенными (разрыв связей с образованием только кристаллических продуктов, перегруппировка связей без фазового перехода). То же самое можно сказать и о реакциях на межмолекулярном уровне.

Для гомогенных химических реакций кинетика описывается уравнением Аррениуса [90]:

$$\frac{dC}{d\tau} = -k_0 C^n \exp\left(\frac{-E_A}{Rt}\right). \quad (1.1)$$

Для гетерогенных химических процессов уравнения кинетики определяются характером химической реакции при учёте следующих аспектов:

- сопротивления внешней диффузии;
- сопротивления внутренней диффузии (если имеется твёрдый продукт реакции);
- сопротивления собственно химической реакции.

Для описания механизма процесса деструкции необходимо определить вклады отдельных стадий в общее сопротивление скорости процесса и выявить наличие или отсутствие лимитирующей стадии.

Для процессов разложения ПОК характерно значительное влияние температуры [51], что свойственно для реакций, протекающих в кинетической области. В подтверждение высказанного заключения

говорит отличие от единицы наблюдаемого порядка реакции [90, 103], для ПОК он составлял от 0,3 до 0,8 при энергии активации  $E_A = 30 \dots 65$  кДж/моль.

При оценке влияния концентрации кислорода в сушильном агенте на скорость процесса термического разложения установлено, что при разбавлении воздуха инертным веществом (азотом) скорость реакции термического разложения снижается [51].

### 1.3. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ТЕРМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Факторы, определяющие изменения свойств термолабильных материалов можно условно разделить на две группы:

- 1) технологические параметры процесса;
- 2) физико-химические свойства высушиваемого материала.

К первой группе факторов, влияющих на изменение концентрации целевого вещества продукта, относятся температура, время и гидродинамический режим процесса термического обезвоживания.

Зависимость скорости разложения термолабильного вещества от его температуры имеет прямолинейный характер, что подтверждает кинетический характер реакций [90, 103]. При этом значения энергий активации имеют положительное значение для подавляющего большинства химических превращений [48, 90].

При малоактивном гидродинамическом режиме даже при достаточно низкой температуре наблюдается значительное разложение целевого вещества, однако при использовании активного гидродинамического режима даже при увеличении температуры в 1,5...2 раза по сравнению с малоактивным режимом падение концентрации целевого вещества не наблюдается, что объясняется уменьшением времени термообработки и преобладанием скорости сушки над скоростью деструкции [51].

Для уменьшения термического воздействия на материал можно использовать аппараты с чередующимися зонами горячего и холодного сушильного агента [70]. При этом в холодные зоны необходимо подавать сушильный агент с низким влагосодержанием.

При активном гидродинамическом режиме, близком к режиму идеального смешения, потери целевого вещества будут значительней из-за неоднородности времени пребывания материала в аппарате. В аппаратах с режимом, близким к режиму идеального вытеснения по дисперсному материалу, время пребывания частиц в аппарате одинаково, и, следовательно, применение активного гидродинамического режима приводит к незначительным потерям целевого вещества. К аппаратам подобного типа можно отнести сушилки виброаэрокипящего слоя и сушилки с псевдооживленным слоем инертного носителя [9, 85].

Ко второй группе факторов, влияющих на сохранность целевого вещества продукта, относятся химическая структура целевого вещества, количество примесей в продукте и их катализирующе-ингибирующие свойства, геометрические и сорбционно-структурные характеристики материала.

Реакционная способность органических продуктов определяется совокупностью составляющих молекулу атомов веществ, что в свою очередь определяет его волновую функцию и формирует все свойства органического продукта [2, 13, 26, 89, 95, 104].

Волновые функции молекул органического продукта рассчитываются с использованием приближенных методов, среди которых можно выделить методы Хартри–Фока [13, 44, 89, 94, 102, 104, 116]. Имея волновую функцию органического вещества можно рассчитать индексы реакционной способности, которые и характеризуют реакционную способность молекул органического продукта [13, 69, 88, 104].

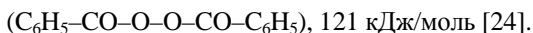
Оценка термической устойчивости органических соединений осуществляется по энергии связи атомов в их молекуле, определяемых экспериментально или расчётным путём с использованием волновой функции [2, 59, 80, 104]. В табл. 1.1 представлены значения энергии связи атомов в молекулах органических соединений [24, 58].

Значения энергии связи изменяются в широком диапазоне, т.е., органические соединения могут содержать в своём составе как очень прочные (C=C, C–H, C=O, C–F, O–H, O=P, O=S), так и слабые связи (N–N, O–O, O–N, C–I). Симметричные связи наиболее устойчивы при электроотрицательности между атомами в пределах (2...2,5), если элементы имеют высокую или низкую электроотрицательность, связи

### 1.1. Энергии химических связей, кДж/моль

Тип связи	Энергия связи	Тип связи	Энергия связи
C–H	414	C–F	486
C–C	339	C–Cl	326
C=C	611	C–Br	272
C–C	833	C–I	238
C–O	360	O–O	146
C=O	749	O=O	498
C–N	305	O–H	460
C=N	594	O–N	222
C–N	887	O=P	607
N–N	163	O=S	536
N–H	389	C–S	272

непрочные, если связь образована неодинаковыми элементами, то чем больше разница в электроотрицательности, тем прочнее связь. Энергия связи изменяется в зависимости от природы заместителей, находящихся у связанных атомов, так, например, энергия связи O–O в перекиси водорода (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) равна 205 кДж/моль, а в перекиси бензоила



Реакционную способность можно определить по коэффициентам полуэмпирических уравнений: Гаммета, Тафта, Кабачника [34, 69]. Особо следует выделить уравнение Клопмана [53], учитывающее взаимное возмущение молекулярных орбиталей двух реагентов.

Термическая устойчивость органических соединений зависит от химической структуры органических соединений: наличие электронодонорных заместителей в молекуле повышает её термическую устойчивость, наличие электроноакцепторных заместителей, соответственно, снижает её; протонирование аминогруппы в кислой среде вызывает изменение донорных свойств на акцепторные, что повышает термостабильность соединения; соли органических сульфокислот имеют более высокую термическую стабильность по сравнению с самими сульфокислотами [51].

Наличие примесей в продуктах также сказывается на их термической устойчивости. Это влияние может быть химическим, проявляющееся каталитическо-ингибиторной активностью [48, 90], или влиянием среды на реакционную активность [88], что больше свойственно гомогенным реакциям. Примеси могут увеличивать время сушки материала, повышая тем самым вероятность его разложения. Такими примесями в органических соединениях являются серная кислота, хлориды и сульфаты щелочных металлов [49 – 52].

Влияние размера частиц и их сорбционно-структурных характеристик проявляется в неравномерности профилей температуры и влажностермодержания по сечению частиц, и вызывает перегрев её поверхности при высокой влажности в её центре, тем самым способствуя деструкции целевого вещества при влажностермодержании выше конечного заданного [85].

К термолабильным органическим соединениям относятся вещества, имеющие одну или несколько непрочных химических связей; при наличии примесей, замедляющих процесс сушки и катализирующих процесс их деструкции.

#### 1.4. ДВИЖЕНИЕ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

Интенсификация процесса сушки при наложении вибрационного воздействия является следствием обеспечения однородности псевдооживления дисперсной фазы.

В микрогетерогенных дисперсных системах твёрдых частиц преобладает влияние поверхностных сил и контактных взаимодействий между частицами. В системах, представляющих собой совокупность частиц достаточно крупных размеров ( $d > 10^3$  мкм), поведение системы зависит от массы каждой отдельной частицы, её геометрии, сообщаемого ей ускорения. Контактными силами сцепления обычно можно пренебречь [28 – 30].

Вибрационное воздействие на сыпучие материалы создаёт однородную порозность во всём объёме и увеличивает скорость массообменных процессов и устраняет диффузионное сопротивление на границе раздела фаз [14].

Использование низкочастотной вибрации способствует не только уменьшению силы сцепления между твёрдыми частицами, их сегрегации, но и их равномерному распределению по объёму [23, 40, 73].

Влияние вибрационных нагрузок на структуру дисперсных материалов достаточно полно изучено для крупных частиц, когда можно пренебречь молекулярными силами сцепления по сравнению с силой тяжести частицы. Для тонкодисперсных сыпучих материалов силы сцепления выступают как основной фактор образования агрегатов. В подобных случаях для разрушения связей требуются вибрации значительно большей интенсивности [23, 45, 46, 82].

Для обработки тонкодисперсных сыпучих материалов эффективно совместное воздействие вибрации и аэрации газа, причем вибрационное воздействие разрушает образующиеся газовые каналы и, как следствие, снижается унос мелких частиц [14, 23].

## 1.5. ТЕПЛО- И МАССООБМЕН ПРИ СУШКЕ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВИБРОАЭРОКИПЯЩЕМ СЛОЕ

Процесс сушки в виброаэрокипящем слое осуществляется при различных методах подвода тепла к материалу, кондуктивном, конвективном, инфракрасном излучении, комбинированных методах [3, 20, 55, 105, 108, 115, 117].

При конвективном методе подвода тепла к материалу направления движения потоков определяются свойствами дисперсного материала как объекта сушки, а также технологическими возможностями процесса [55, 79].

Перекрестная схема движения потоков обеспечивает лучший контакт фаз, формирует более однородную структуру слоя и позволяет снизить затраты на механическое воздействие [55, 79].

Перекрестная схема подачи теплоносителя в виброаэрокипящий слой применяется для трудно подающихся переводу во взвешенное состояние материалов, а также когда необходимо снизить скорость оживающего агента для снижения уноса частиц из слоя.

Процесс переноса тепла и массы при сушке описывается системой дифференциальных уравнений, которая не всегда может быть решена применительно к конкретным условиям проведения процесса. Тогда методы расчёта базируются на результатах экспериментальных исследований [18, 21, 55, 79].

Основополагающими факторами, определяющими интенсивность процесса тепло- и массообмена в виброаэрокипящем слое, являются его гидродинамические параметры (скорость сушильного агента, параметры вибрации) [14, 105].

При относительном ускорении вибрации  $a_{vib}/g < 1$  коэффициент массообмена практически не зависит от параметров вибрации; при  $a_{vib}/g \geq 1$  (при переходе слоя из состояния виброожижения к виброаэрокипению) коэффициент массообмена резко увеличивается; при дальнейшем увеличении  $a_{vib}/g$  коэффициент массообмена увеличивается незначительно.

Для определения коэффициента теплообмена виброаэрокипящего слоя [95] для частиц с размерами 1...5 мм получена эмпирическая зависимость:

$$Nu = 1,16Re \left( \frac{A}{H} \right)^{0,8} \left( \frac{fv_h}{g} \right)^{0,96}. \quad (1.2)$$

Результаты экспериментальных исследований по кинетике сушки угля при конвективном и кондуктивном подводе тепла свидетельствуют о том, что кинетические характеристики сушки при конвективным подводе тепла были выше, чем при кондуктивном, даже при более высоких температурах теплообменной поверхности.

При исследовании процесса массообмена при сушке поливинилхлорида различных марок В.И. Муштаевым и другими была получена зависимость коэффициента массоотдачи от параметров вибрации и скорости воздуха [60]:

$$\beta = \frac{0,181Dv_h^{0,4}}{(1-\varepsilon)^{0,4}v_c^{0,4}d_s^{0,6}} \left( \frac{4\pi^2 Af^2}{g} \right). \quad (1.3)$$

Паковски З. [91] предложил для расчёта внешнего теплообмена при сушке в виброаэрокипящем слое зависимость, аналогичную зависимости (1.2):

$$Nu = 0,827Re^{1,04} \left( \frac{d_s}{H} \right)^{1,17} \left( \frac{4\pi^2 Af^2}{g} \right)^{0,483}. \quad (1.4)$$

Для определения коэффициента массоотдачи при сушке термолабильных химических продуктов в виброаэрокипящем слое была предложена эмпирическая зависимость [107]:

$$\text{Nu}_d = 2,22 \cdot 10^3 \text{Re}^{0,48} \text{Sc}^{0,3} . \quad (1.5)$$

Для расчёта коэффициента массоотдачи при сушке в движущемся виброаэрокипящем слое авторы работ [111, 112] рекомендуют следующую зависимость:

$$\text{Nu}_d = \frac{2 + 0,6\text{Re}^{0,5} \text{Sc}^{0,333}}{\left(1 + \frac{c_a(t_c - t)}{r}\right)} . \quad (1.6)$$

При изучении внешнего тепло- и массообмена в виброаэрокипящем слое установлено, что вибрация оказывает более сильное влияние на межфазный теплообмен в случае мелкодисперсных материалов, чем крупнодисперсных. При сушке в виброаэрокипящем слое фармацевтических препаратов с различными размерами частиц коэффициент теплообмена в 1,5...3,0 раза выше, чем в кипящем, а для силикагеля – не более, чем в 1,3...1,5 раза.

Таким образом, в виброаэрокипящем слое коэффициенты тепло- и массообмена имеют величины большие, чем в кипящем слое.

## 1.6. СПОСОБЫ СОЗДАНИЯ ВИБРОАЭРОКИПАЩЕГО СЛОЯ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

От амплитуды, частоты и траектории колебательного движения зависит структура слоя дисперсного материала, интенсивность и характер перемешивания твёрдой фазы и скорость его направленного перемещения в аппаратах непрерывного действия.

Создать однородный кипящий слой для тонкодисперсных материалов трудно, также сложно создать и виброкипящий слой. Сочетание вибрации и продувки газа через слой обеспечивает выравнивание структуры дисперсного материала. Вибрационное воздействие способствует однородности в объёме слоя.

Для характеристики структуры виброслоя авторами [105] приведено уравнение для расчёта коэффициента режима, сформированное при условии отрыва частиц от горизонтальной вибрирующей поверхности с учётом движения газа через слой снизу вверх:

$$k_v = \left(1 - \frac{v_h^2}{v_{vit}^2} \frac{1}{\cos(\alpha)}\right) \sqrt{\pi^2 k^2 + 1} , \quad (1.7)$$



где  $k$  – эмпирический коэффициент, принимающий значения 1 или 2.

При принудительной фильтрации газа через слой критическое ускорение вибрации, при котором слой переходит из состояния виброоживления к виброаэрокипению, не равно ускорению свободного падения. Если поток фильтруемой через материал среды направлен сверху вниз слоя, критическое ускорение вибрации будет выше, а если снизу вверх – ниже ускорения свободного падения.

Когда подъёмная сила потока становится равной весу слоя, ускорение вибрации перфорированной поверхности может быть равно нулю. Однако это справедливо только для слоя с идеальной структурой, когда не возникают каналы, не создаются застойные зоны, оживающий агент равномерно распределяется по всей площади аппарата и не происходит агломерации частиц. Если же указанные явления имеют место, вибрация при оптимальных параметрах способствует их устранению или значительному снижению.

В случае круговой траектории колебаний аппарата материал совершает циркуляционное перемещение внутри камеры. Установки, работающие по данному принципу, очень близки к аппаратам идеального смешения.

Для непрерывного процесса сушки большую эффективность демонстрирует гидродинамический режим идеального вытеснения [21, 55, 114].

Анализ конструкций вибросушилок [37, 66, 86, 113, 115, 117, 118] показывает, что наибольшее распространение получили сушилки с прямоугольной формой желоба, перекрестным движением материала и теплоносителя, при подаче последнего снизу вверх.

Параметрами, влияющими на процесс сушки в виброаэрокипящем слое, являются: скорость начала псевдооживления, порозность, вязкость слоя дисперсного материала, скорость распространения механических колебаний в дисперсной среде, гидравлическое сопротивление слоя.

Для песка сахара влажностью 0,3% при высоте неподвижного слоя 30 мм получено, что в диапазоне частот колебаний 30...70 Гц и амплитуд 0,5...2,5 мм высота виброаэрокипящего слоя в основном зависит от амплитуды вибрации. Зависимость между величиной приращения высоты слоя и амплитудой колебаний имеет линейный характер [4, 6, 7, 8, 12, 14, 16, 18, 19, 40, 60 – 63, 105]:

$$\Delta h = 5,48A . \quad (1.8)$$

К выводу об уменьшении порозности засыпки в состоянии виброоживления и о линейном её изменении в зависимости от амплитуды вибрации приходят также Г.К. Бахман и др. [105].

Определение порозности для тонкодисперсных порошков поливинилхлорида было предложено рассчитывать по зависимости [60]:

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon} = 1 - \exp\left[-0,96(v_h - v_{pl})^{0,4}\right], \quad (1.9)$$

где  $\varepsilon_0$  – порозность неподвижного слоя.

Под действием вибрации дисперсный материал становится подобным вязкой жидкости, а коэффициент эффективной вязкости этого материала существенно зависит от ускорения его вибрации [4].

При вибрационном воздействии такие сруктуры приобретают текучесть, свойственную вязким жидкостям, и могут быть охарактеризованы реологическими константами, которые позволяют количественно выразить состояние слоя сыпучего материала, установить условия перемешивания и перемещения дисперсного материала [57, 105].

При увеличении энергетического воздействия коэффициент внутреннего трения в материалах снижается на 25...30% [7].

Течение тонкодисперсных порошков при определённых режимах вибрационного воздействия подчиняется законам, характерным для ньютоновской жидкости [105]. Однако каждому уровню вибрационного воздействия на дисперсный материал соответствует своя величина вязкости.

В виброаэрокипящем слое частицы находятся в постоянном движении, энергия от частиц, расположенных непосредственно у вибрирующей поверхности, передаётся в глубь слоя при соударении частиц. При этом при ударах и проскальзывании неизбежны потери энергии, что исключает использование виброаэрокипящих слоёв большой высоты.

Высота слоя, на которую проникают низкочастотные колебания, зависит от физико-механических свойств дисперсного материала, от параметров вибрационного воздействия и скорости оживающего агента.

Если виброкипящий слой создаётся только вибрационным воздействием, то интенсивность вибраций по высоте слоя убывает по экспоненциальному закону [7].

При фильтрации оживающего агента через слой влияние вибрации на структуру слоя распространяется по всей высоте виброаэрокипящего слоя. Это объясняется тем, что вибрация газораспределительной решётки вызывает колебание не только частиц твёрдой фазы, но и создаёт пульсации скорости оживающего агента, который распространяет эти колебания по всей высоте материала [33, 83].

Характерным для кривых перепада давления вибропсевдооживленного слоя является отсутствие пика давления. Для слоёв высотой не более 80 мм была предложена эмпирическая зависимость для расчёта перепада давления в виброаэрокипящем слое [60, 61]:

$$\Delta p_{vpl} = \Delta p_{pl} \left( \frac{a_{vib}}{g} \right)^{-n}, \quad (1.10)$$

где  $\Delta p_{vpl}$ ,  $\Delta p_{pl}$  – перепад давления в слое материала в условиях виброкипания и в условиях обычного псевдооживления.

Показатель степени  $n$  определяется по следующему уравнению:

$$n = 0,41 + 1,96, (d_s \rho) \cdot 10^{-2}. \quad (1.11)$$

На основе анализа баланса сил, действующих на частицу материала в виброаэрокипящем слое, получили выражение для расчёта минимальной скорости газа, необходимой для псевдооживления слоя материала [61]

$$v_{vpl} = v_{pl} - \frac{2\pi f A (1+k)}{\exp\left(\frac{n}{Af}\right) - 1}, \quad (1.12)$$

где  $k$  – коэффициент восстановления скорости частицы при ударе о лоток.

Плановским А.Н. и другими [61] было теоретически подтверждено предположение о снижении скорости псевдооживления твёрдого материала при наложении на него вибраций.

## 1.7. ПЕРЕМЕШИВАНИЕ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА НА ПЛОСКОСТИ, СОВЕРШАЮЩЕЙ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Неравномерность пребывания частиц в рабочей зоне виброкипящего слоя ведёт к неоднородности влагосодержания материала. Для снижения неравномерности времени пребывания материала в рабочей зоне применяют аппараты непрерывного действия с направленным перемещением материала.

Максимальное относительное отклонение продолжительности пребывания частиц в сушильной камере от среднего значения для трёх четвертей всего количества материала в вибро сушилке не превышает 17%, в то время как в установке с кипящим слоем оно достигает значения 38% [97].

Для описания движения дисперсной фазы материала рекомендуется использовать однопараметрическую диффузионную модель [68], по которой расчёт коэффициента продольного перемешивания в виброкипящем слое можно провести по следующей зависимости [35]:

$$D = 0,076 \left( \frac{a_{vib}}{g} \right)^{2,2}. \quad (1.13)$$

Влажность высушиваемого материала в значительной степени влияет на коэффициент его продольного перемешивания [32]. Зависимость коэффициента продольного перемешивания материала от его влажности аппроксимируется полиномом второй степени:

$$D = (5,64 - 19,31u + 18,23u^2) \cdot 10^{-4}. \quad (1.14)$$

Уравнение (1.14) было получено для фиксированной скорости воздуха и параметров вибрации.

Для определения коэффициента диффузии дисперсного материала можно использовать зависимость [106]:

$$D = 11,36 \cdot 10^{-4} A^{0,46} f^{0,1} (1+u)^b. \quad (1.15)$$

Которая учитывает как влагосодержание материала, так и параметры вибрации. Показатель степени  $b$  зависит от природы вещества и колеблется в пределах  $-(3,5 \dots 4,1)$ .

При вибротранспортировании частиц дисперсного материала с размерами менее 0,05 мм существуют предельные параметры вибрации, при которых перемещение прекращается.

Среднюю скорость вибротранспортирования частиц сыпучего материала по желобу со сплошным дном можно рассчитать по формуле [60]

$$v_\ell = k_{п.с} k_{т.с} k_{у.н} 2\pi A f \cos(\beta), \quad (1.16)$$

где  $k_{п.с}$  – коэффициент передачи скорости;  $k_{т.с}$  – коэффициент, учитывающий толщину слоя материала;  $k_{у.н}$  – коэффициент, зависящий от угла наклона лотка к горизонту  $\alpha$ .

Для зернистых материалов с частицами размером 0,5...5 мм  $k_{п.с} = 0,85 \dots 0,70$ ; для порошкообразных материалов с размерами частиц 0,1...0,5 мм  $k_{п.с} = 0,75 \dots 0,60$ .

Для сплошного лотка при углах направленных колебаний с углом  $\beta = 20 \dots 35^\circ$  среднюю скорость транспортирования материала можно рассчитать по следующей зависимости [105]:

$$v_\ell = k 2\pi f A \cos(\beta) \sqrt{1 - \left( \frac{g \cos(\alpha)}{4\pi^2 A f^2 \sin(\beta)} \right)^2}, \quad (1.17)$$

где  $k$  – эмпирический коэффициент (для молотого мела  $k = 0,7$ ; для соли  $k = 0,84$ ; для пылевидных материалов  $k = 0,2 \dots 0,5$ ).

Скорость перемещения дисперсного материала по лотку при подаче воздуха под слой, увеличивается в 1,5...3,0 раза [7].

## 1.8. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ДИСПЕРСНЫХ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВИБРОАЭРОКИПАЮЩЕМ СЛОЕ

При моделировании гидродинамики виброаэрокипящего слоя его можно рассмотреть как частный случай псевдооживленного слоя. Основными моделями для описания движения частиц дисперсной фазы в псевдооживленном слое являются модели идеального смешения, ячеичные и диффузионные модели [99].

Модель полного перемешивания непригодна для описания гидродинамики движения дисперсной фазы, так как геометрия аппарата не позволяет сформировать такую структуру (длина много больше высоты) [41, 42, 103], что и подтверждается экспериментальными исследованиями [68].

Для параллельно соединённых ячеек [99] одинакового размера и при отсутствии обратного потока плотность распределения частиц дисперсного материала по времени пребывания в аппарате определяется по зависимости [99]:

$$\varphi(\tau) = \frac{\tau^{n_y - 1} \exp\left(-\frac{\tau}{(\bar{\tau}/n_y)}\right)}{(n_y - 1)! (\bar{\tau}/n_y)^{n_y}}. \quad (1.18)$$

Для моделирования гидродинамической картины псевдооживленного слоя используют однопараметрическую и двухпараметрические диффузионные модели [42, 68, 99]. Для аппаратов с цилиндрическим корпусом используют радиальную двухпараметрическую модель, для аппаратов с прямоугольным сечением двухпараметрическую модель с декартовыми координатами.

При использовании однопараметрической диффузионной модели принимается гидродинамический режим для частиц материала в вертикальном направлении – идеальное перемешивание, а в горизонтальном направлении направленное движение со средней скоростью  $v_\ell$  при наличии диффузионного перемешивания частиц.

Коэффициент диффузии дисперсного материала можно рассчитать по уравнению дисперсии времени пребывания его в аппарате, записанному в безразмерных координатах [41]:

$$\sigma^2 = 2 \left( \frac{D_\ell}{v_\ell L} - \frac{D_\ell^2}{(v_\ell L)^2} \left( 1 - \exp\left(-\frac{v_\ell L}{D_\ell}\right) \right) \right). \quad (1.19)$$

Для случаев, когда  $Pe = v_\ell L / D_\ell > 10$  можно пользоваться упрощённой зависимостью [41, 42]:

$$\sigma^2 = 2 \frac{D_\ell}{v_\ell L}. \quad (1.20)$$

Эффективность использования однопараметрической диффузионной модели для описания гидродинамической картины виброаэрокипящего слоя была подтверждена результатами экспериментальных исследований [32, 68].

Кроме рассмотренных одно- и двухпараметрических диффузионных моделей, для описания гидродинамической обстановки в аппарате процесса сушки дисперсных материалов в псевдооживленном слое существуют статистические модели.

Для моделирования движения газового потока в виброаэрокипящем слое могут быть приняты как модель идеального смешения, так и модель идеального вытеснения (при небольшой высоте слоя), а также можно использовать переходную модель (однопараметрическую диффузионную).

Для описания гидродинамического режима движения дисперсного материала в виброаэрокипящем слое наиболее приемлемы диффузионная и статистическая модели, для моделирования гидродинамики газового потока – диффузионная модель.

При моделировании кинетики процесса сушки в виброаэрокипящем слое мелкодисперсных материалов не учитывается градиент температуры и влагосодержания по объёму частицы [85, 99, 100].

Для периода прогрева предлагается не учитывать изменение влагосодержания и ограничиться только рассмотрением теплового баланса [54, 55, 99, 100].

Для первого периода сушки скорость процесса находят из уравнения для расчёта коэффициента теплообмена [54, 76, 85, 99]:

$$v_{vl} = \frac{K(t_c - t)}{r}. \quad (1.21)$$

В период постоянной скорости сушки кинетические параметры процесса являются функциями температуры и влагосодержания материала.

В качестве расчётной зависимости для определения скорости процесса сушки можно использовать линейную аппроксимационную зависимость, полученную на значениях текущего влагосодержания материала (приближенный метод Шервуда–Лыкова) [54, 76, 85, 99]:

$$v_{vl} = \frac{u - u_p}{u_{kr} - u_p} v_{vl1} . \quad (1.22)$$

При значительной кривизне графической зависимости скорости сушки от влагосодержания применяется степенная аппроксимация для расчёта кинетических характеристик процесса [60]

$$v_{vl} = \frac{(u - u_p)^m}{u_{kr} - u_p} v_{vl1} , \quad (1.23)$$

которая при значении  $m = 1$  идентична методу Шервуда–Лькова.

Возможно представление кинетических характеристик процесса сушки аппроксимационной зависимостью влагосодержания материала во времени [99]:

$$u = u_0 - \frac{\tau}{A + B\tau} , \quad (1.24)$$

где  $A$  и  $B$  – константы, зависящие от теплофизических свойств материала и режима его сушки.

Для материалов, не имеющих достаточно выраженного периода постоянной скорости сушки, но дающих специфическую  $S$ -образную кривую процесса предложена зависимость [85, 98]:

$$v_{vl} = K_c (u_{0p} - u)(u - u_p) , \quad (1.25)$$

где  $K_c$  – константа скорости сушки;  $u_{0p}$  – начальное равновесное влагосодержание после периода прогрева при температуре мокрого термометра.

На скорость процесса сушки во втором периоде существенное влияние оказывает энергия связи влаги с материалом [54], определение которой можно осуществить калориметрическим методом [27, 64, 101,] или по давлению пара над свободной поверхностью воды [54].

## 1.9. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ ЦЕЛЕВОГО ВЕЩЕСТВА ПОЛУПРОДУКТОВ ОРГАНИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЕЙ

Деструкция термолабильных материалов имеет гетерогенный процесс, чаще всего протекающий в кинетической области для аппаратов с интенсивным гидродинамическим режимом.

Для гетерогенных процессов системы газ–твёрдое тело используется модель, характеризующая продвижение фронта химической реакции в глубь частицы материала [90, 103].

Для полупродуктов органических красителей скорость деструкции зависит от концентрации адсорбированного газа [74] (кислорода) на поверхности фронта химической реакции, которая зависит от величины парциального давления газа [103]:

$$r_{x,p} = k_f F_f C_{O_2f}, \quad (1.26)$$

где  $k_f$  – кинетический коэффициент;  $F_f$  – площадь фронта химической реакции;  $C_{O_2f}$  – концентрация кислорода в сушильном агенте.

Концентрация целевого вещества входит в кинетический коэффициент, а площадь фронта реакции величина переменная.

Количество кислорода, поступающего с сушильным агентом, больше количества, необходимого для протекания химической реакции окисления, поэтому концентрацию кислорода можно принять постоянной и ввести в кинетический коэффициент.

При наличии в процессе деструкции кроме окислительных реакций других химических превращений (комплексобразования, рекомбинации, димеризации, протонирования и пр.), которые могут влиять на скорость химической реакции [90], уравнение для скорости химической реализации будет выглядеть следующим образом:

$$r_{x,p} = k_f F_f C^n. \quad (1.27)$$

Порядок реакции по целевому веществу при сушке ПОК отличается от единицы ( $n = 0,3 \dots 0,8$ ), следовательно предположение о наличии таких превращений имеет достаточную степень достоверности [51].

Относительно рассмотренных вопросов по специфике сушки термолабильных продуктов органического синтеза можно сказать следующее.

В виброаэрокипящем слое можно сушить дисперсные термолабильные материалы или влажные суспензии с предварительной формовкой, с низкими адгезионными свойствами, устойчивостью к пылению и истиранию, и узким разбросом по размеру частиц.

На процесс перемешивания частиц дисперсной фазы влияние оказывают параметры вибрационного воздействия механического устройства или лотка, скорость аэрируемого воздуха и влажность материала.

Для описания гидродинамики виброаэрокипящего слоя рекомендуется однопараметрическая диффузионная модель как по дисперсному материалу, так и по газовой фазе.

Термолабильными органическими веществами считаются следующие: органическое соединение имеет одну или несколько непрочных связей; имеются примеси, замедляющие процесс сушки или ката-



лизирующие процесс деструкции. Увеличение размера частиц материала способствует химической деструкции.

Сушку термолабильных материалов необходимо проводить при активном гидродинамическом режиме, близком к идеальному вытеснению.

Процессы деструкции термолабильных материалов имеют гетерогенный характер и протекают в кинетической области.

Надёжных методик, позволяющих определить термическую устойчивость конкретного материала при заданных параметрах процесса сушки, не существует.

## **2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ ПРОЦЕССА СУШКИ В ВИБРОАЭРОКИПЯЩЕМ СЛОЕ, ОСЛОЖНЁННОГО ТЕРМОДЕСТРУКЦИЕЙ**

Выбор и расчёт сушильного аппарата для обработки термолabileльного продукта осуществляется на основе комплексного анализа характеристик материала как объекта сушки (структурно-химических, физических, тепловых, сорбционно-структурных и гидротермических) [84, 85].

Учёт термолabileльных характеристик продуктов осуществляется на этапе выбора метода сушки и его температуры. Большой объём полученных авторами экспериментальных данных показывает, что даже при самых «комфортных» для высушиваемого материала условиях наблюдается уменьшение концентрации целевого продукта вследствие термодеструкции. При выборе метода сушки параметров обезвоживания необходимо учитывать наличие этого фактора.

Предлагается рассматривать процесс обезвоживания ПОК как сложный химико-технологический процесс (ХТП), включающий в себя тепло- и массообменный процесс (термическую сушку) и химическую реакцию (термодеструкцию). Причём, оба этих процесса протекают одновременно. Эффективность такого ХТП (получение ПОК с заданной конечной влажностью при сохранении основного вещества) зависит в равной степени от каждого процесса, входящего в ХТП.

Подробно рассмотреть данный подход к моделированию и расчёту ХТП предлагается на примере моделирования и расчёта процесса сушки ПОК в виброаэрокипящем слое, осложнённого термодеструкцией.

### **2.1. РАСЧЁТНАЯ СХЕМА ПРОЦЕССА СУШКИ В ВИБРОАЭРОКИПЯЩЕМ СЛОЕ**

Процесс сушки материала в виброаэрокипящем слое проходит в аппарате с прямоугольной формой желоба, перекрестным движением материала и сушильного агента, при подаче последнего снизу вверх через слой (рис. 2.1).

При составлении математического описания процесса полагаем, что известны начальные параметры потоков материала и сушильного агента, дисперсный состав высушиваемого материала, параметры виброаэрокипящего слоя (коэффициент теплообмена, высота и длина слоя, плотность распределения времени пребывания материала и сушильного агента в аппарате, параметры вибрации).



Рис. 2.1. Схема движения материала и сушильного агента

Математическая модель процесса сушки в виброаэрокипящем слое для термолabileльных материалов должна определять зависимость выхода по целевому веществу ( $\Omega$ ) и его конечного влагосодержания ( $u_k$ ) от технологических параметров процесса ( $t_c, K, G, G_c, A, f, \alpha, \beta$ ), физико-химических свойств сред ( $C, \rho, m_s, S_s, u_{kr}, k_0, n, E_A, E$ ) и начальных параметров процесса ( $t_0, u_0$ ).

## 2.2. ДОПУЩЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ ПРОЦЕССА СУШКИ, ОСЛОЖНЁННОГО ТЕРМОДЕСТРУКЦИЕЙ, В ВИБРОАЭРОКИПЯЩЕМ СЛОЕ

1. Частицы материала имеют шарообразную форму.
2. Градиентом температуры по радиусу частицы материала пренебрегаем.
3. Поток тепла в газовой фазе, обусловленным теплопроводностью, ввиду его малого значения пренебрегаем.
4. Температура и влагосодержание материала и сушильного агента постоянны по ширине аппарата.
5. Теплоёмкости веществ, участвующие в процессе, постоянны.
6. Теплотерями в окружающую среду пренебрегаем.
7. Истирание, унос материала из аппарата и налипание на стенки не учитываются.
8. Поток вещества и энергии, обусловленные химическими процессами, не учитываются.
9. Материал равномерно распределён по всему объёму аппарата.
10. Формирование застойных зон не рассматривается.

### 2.3. ВЫХОД ПО ЦЕЛЕВОМУ ВЕЩЕСТВУ В ВЫСУШИВАЕМОМ МАТЕРИАЛЕ

Для оценки количества целевого вещества, не претерпевшего деструктивных превращений при термической обработке, введём понятие выход по целевому веществу ( $\Omega$ ), численно равное отношению массы целевого вещества в потоке материала к массе целевого вещества в эквивалентном потоке на входе в аппарат (при неизменном числе частиц материала в потоке, т.е. при отсутствии уноса, это эквивалентно отношению действующей массы целевого вещества в частице к начальной массе целевого вещества в этой же частице):

$$\Omega = \frac{m_{qs}}{m_{qs0}} . \quad (2.1)$$

Начальная масса целевого вещества в частице выражается через массу абсолютно сухой частицы и долю целевого вещества в расчёте на абсолютно сухой продукт:

$$m_{qs0} = \bar{x}_{q0} m_{s0} . \quad (2.2)$$

Действующую массу целевого вещества находим исходя из количества вещества в частице:

$$m_{qs} = v_{qs} M_q . \quad (2.3)$$

С учётом уравнений (2.1) – (2.3), зависимость для выхода по целевому веществу принимает вид

$$\Omega = \frac{M_q}{\bar{x}_{q0} m_{s0}} v_{qs} . \quad (2.4)$$

Зависимость (2.4) является функцией одной переменной, количества целевого вещества в частице, которое определяется из кинетики химической реакции.

Величина выхода по целевому веществу может принимать значения от 0, соответствующее полному разложению целевого вещества, до 1, соответствующее полной его сохранности.

### 2.4. ОПИСАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСУШИВАЕМОГО МАТЕРИАЛА

Высушиваемый материал имеет полидисперсный состав, и его физические свойства зависят от размера частиц и носят стохастический характер.

Характеристикой, позволяющей учесть полидисперсность материала, является плотность распределения частиц по размеру (для частиц шарообразной формы – диаметр) –  $\psi(d_s)$ , которая определяется экспериментальным путём. Расчёт параметров математической модели ведётся при различных диаметрах частиц.

Неоднородность температуры и влагосодержания частицы материала в точке ( $\ell$ ) учитываем через величину  $p_{ut}$  – плотность распределения частиц по влагосодержанию и температуре,  $p_{ut} = f(u, t, \ell)$ , которая должна удовлетворять условию:

$$\int \int_{TU} p_{ut} du dt = 1, \quad (2.5)$$

где  $U$  и  $T$  – области существования переменных  $u$  и  $t$ ; это условие должно выполняться для всех точек ( $\ell$ ).

Запишем функции распределения частиц материала по влагосодержанию и температуре в следующем виде:

$$p_u = \int_T p_{ut} dt, \quad (2.6)$$

$$p_t = \int_U p_{ut} du. \quad (2.7)$$

Условие зависимости (2.5) для функций  $p_u$  и  $p_t$  удовлетворяется автоматически.

Функция плотности распределения частиц материала по влагосодержанию ( $p_u$ ) не зависит от температуры ( $t$ ), а функция плотности распределения частиц материала по температуре ( $p_t$ ) не зависит от влагосодержания ( $u$ ). Следовательно, плотность распределения частиц по влагосодержанию и температуре ( $p_{ut}$ ) можно представить как произведение функций распределения частиц по температуре ( $p_t$ ) и влагосодержанию ( $p_u$ )

$$p_{ut} = p_u p_t. \quad (2.8)$$

Тогда зависимость (2.5) будет иметь следующий вид:

$$\int_U p_u du \int_T p_t dt = 1. \quad (2.9)$$

Используя функции  $p_u$  и  $p_t$ , можно найти значения величин температуры и влагосодержания материала в любой точке ( $\ell$ ).

## 2.5. ДЕСТРУКЦИЯ ЦЕЛЕВОГО ВЕЩЕСТВА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА МАТЕРИАЛ

Разложение целевого вещества при термической обработке материала представляем как процесс химического окисления. Кинетическое уравнение такого процесса будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{dv_{qs}}{d\tau} = -\pi d_f^2 k_0 C^n \exp\left(\frac{-E_A}{Rt}\right). \quad (2.10)$$

Концентрация кислорода считается постоянной и учитывается коэффициентом  $k_0$ .

Решая уравнение (2.10), получим функцию для расчёта количества вещества в частице материала, подвергнутого деструкции, и, используя её, по зависимости (2.4) находим количество вещества, не подвергнутого разложению.

В математическом выражении (2.10) три параметра являются переменными: диаметр частицы, характеризующий продвижение фронта химической реакции ( $d_f$ ), концентрация целевого вещества в частице ( $C$ ) и её температура ( $t$ ).

Диаметр частицы, характеризующий продвижение фронта химической реакции, находим исходя из следующих характеристик: объёма частицы, его массы и концентрации:

$$C = \frac{v_{qs}}{V_f} \Rightarrow V_f = \frac{v_{qs}}{C} = \frac{\pi d_f^3}{6},$$

$$d_f = \sqrt[3]{\frac{6v_{qs}}{\pi C}}. \quad (2.11)$$

В виброаэрокипящем слое сушатся материалы с низкой начальной влажностью, поэтому изменением объёма материала, обусловленного потерей влаги при сушке, пренебрегаем, следовательно, концентрация целевого вещества, как функция отношения количества вещества к его объёму может считаться постоянной:

$$C = \frac{v_{qs0}}{V_{s0}} = \frac{6m_{qs0}}{M_q \pi d_{s0}^3}. \quad (2.12)$$

С учётом выражения (2.2) для определения концентрации целевого вещества получаем зависимость:

$$C = \frac{6\bar{x}_{q0}m_{s0}}{M_q\pi d_{s0}^3}. \quad (2.13)$$

Выражение (2.11) можно представить в следующем виде:

$$d_f = d_{s0} \sqrt[3]{\frac{v_{qs}M_q}{\bar{x}_{q0}m_{s0}}}. \quad (2.14)$$

Температуру частицы определяем из материального и теплового балансов слоя материала.

С учётом выражений (2.13) – (2.14) уравнение кинетики реакции разложения целевого вещества приобретает вид

$$\frac{dv_{qs}}{d\tau} = -6^n \pi^{1-n} k_0 v_{qs}^{2/3} \left( \frac{M_q d_{s0}^3}{\bar{x}_{q0} m_{s0}} \right)^{2/3 - n} \exp\left(\frac{-E_A}{Rt}\right). \quad (2.15)$$

Решая дифференциальное уравнение (2.15), можно найти количество вещества в частице материала, подвергшегося деструкции, в любой точке аппарата, и, следовательно, выход по целевому веществу.

## 2.6. ОПИСАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА

Для описания динамики движения дисперсного материала в виброаэрокипящем слое принимаем модель идеального перемешивания частиц материала в направлении, перпендикулярном их движению и диффузионное перемешивание с коэффициентом диффузии  $D_\ell$  по направлению движения дисперсных частиц (однопараметрическая диффузионная модель) [42, 99].

Для описания структуры движения сушильного агента принимаем модифицированную однопараметрическую диффузионную модель, которая отличается от классической исключением из рассмотрения процесса перемешивания в направлении, перпендикулярном движению газового потока. Использование двухпараметрической диффузионной модели осложняется необходимостью экспериментального определения коэффициента диффузии газа в направлении перпендикулярном его движению. В направлении движения сушильного агента принимаем диффузионное перемешивание с коэффициентом диффузии  $D_{ch}$ .

Параметры моделей движения сред в виброаэрокипящем слое (скорости движения дисперсного материала и газа, коэффициенты

диффузии) определяются либо экспериментально, либо по эмпирическим зависимостям автора работы [106].

Экспериментальное определение скоростей движения и коэффициентов диффузии потоков сред осуществляется по плотностям распределения времени пребывания дисперсного материала и сушильного агента в аппарате, приведённым к безразмерному виду ( $\varphi(\theta)$  и  $\varphi_c(\theta)$ ).

Имея значения среднего времени пребывания сред в аппарате (слое) находим скорости их движения:

$$v_\ell = \frac{L}{\bar{\tau}}, \quad (2.16)$$

$$v_h = \frac{H}{\bar{\tau}_c}. \quad (2.17)$$

Коэффициенты диффузии сред определяем, решая следующие уравнения:

$$\sigma_{\theta}^2 = 2 \left( \frac{D_\ell}{v_\ell L} - \frac{D_\ell^2}{(v_\ell L)^2} \left( 1 - \exp\left(-\frac{v_\ell L}{D_\ell}\right) \right) \right), \quad (2.18)$$

$$\sigma_{\theta_c}^2 = 2 \left( \frac{D_{ch}}{v_h H} - \frac{D_{ch}^2}{(v_h H)^2} \left( 1 - \exp\left(-\frac{v_h H}{D_{ch}}\right) \right) \right). \quad (2.19)$$

Скорости движения и коэффициент диффузии дисперсного материала рассчитываем с учётом влияния на их значения параметров вибропсевдооживления. Скорости движения дисперсного материала рассчитываем по предложенной авторами [106] зависимости:

$$v_\ell = f\Delta\ell, \quad (2.20)$$

где  $\Delta\ell$  – линейное перемещение частицы вдоль лотка за один период колебаний:

$$\Delta\ell = k_2' \left( g \sin(\alpha)\Delta\tau + k_1' + (g \sin(\alpha)k_2' - k_1') \exp\left(\frac{-\Delta\tau}{k_2'}\right) + g \sin(\alpha)k_2' \right),$$

$$k_1' = 2\pi A f \cos(2\pi f \tau_{\text{отп}}) \cos(\beta), \quad (2.21)$$

$$k_2' = \frac{m_s}{3\pi s_{st}}.$$

Отрезок  $\Delta\tau$  находим решением следующего уравнения:



$$\begin{aligned}
 g\Delta\tau + 2A\sin(2\pi f\Delta\tau) + k_1k_2\operatorname{tg}(\beta) &= \\
 &= \frac{-(\Delta\tau)d_s}{k_2'} \cdot \left( gk_1'd_s - (gk_1'd_s - k_1'k_2'\operatorname{tg}(\beta))e \right) \cdot e^{-k_2'\Delta\tau} \quad (2.22)
 \end{aligned}$$

Значение времени отрыва частицы материала от лотка ( $\tau_{\text{отр}}$ ), считая от начала периода, находим по формуле

$$\tau_{\text{отр}} = \frac{1}{2\pi f} \left( \pi - \arcsin \left( \frac{g\sin(\alpha) - \frac{4}{3}\zeta v_h^2 \left( \frac{\rho_c}{\rho} \right)}{4\pi^2 f^2 A \sin(\beta)} \right) \right), \quad (2.23)$$

где  $\zeta$  – коэффициент, учитывающий гидродинамику движения дисперсной фазы, определяем по уравнениям [79]:

$$\zeta = \begin{cases} 25,5/\operatorname{Re} & \operatorname{Re} < 1, \\ 26,3/\operatorname{Re}^{0,8} & 1 \leq \operatorname{Re} \leq 13, \\ 12,3/\operatorname{Re}^{0,5} & 13 \leq \operatorname{Re} \leq 800, \\ 0,44 & 800 \leq \operatorname{Re} \leq 10^5. \end{cases} \quad (2.24)$$

Коэффициент диффузии дисперсного материала определяем по зависимости [106]:

$$D = 11,36 \cdot 10^{-4} A^{0,46} f^{0,1} (1+u)^b, \quad (2.25)$$

где коэффициент  $b$  учитывает физические свойства твёрдой фазы.

Скорость движения газовой фазы находим по следующей зависимости:

$$v_h = \frac{G_c}{\rho_c \varepsilon LB}. \quad (2.26)$$

Уравнения (2.16) – (2.26) дают возможность рассчитать тепловой и материальный балансы процесса сушки термолabileного материала в виброаэрокипящем слое.

## 2.7. КИНЕТИКА УДАЛЕНИЯ ВЛАГИ ПРИ СУШКЕ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА

Скорость удаления влаги из материала определяем как поток влаги через элемент поверхности:

$$v_{vl} = \frac{dm_{vl}}{d\tau dF}. \quad (2.27)$$

Скорость сушки является функцией технологических параметров процесса и физико-химических свойств высушиваемого материала и сушильного агента.

Первый период сушки характеризуется равенством потоков тепла, подводимого к материалу и затрачиваемого на испарение влаги:

$$(r + E)dm_{vl} = K(t_c - t)dFd\tau. \quad (2.28)$$

Из условия (2.28) с учётом (2.27) скорость удаления влаги в первом периоде можно рассчитать по зависимости:

$$v_{vl} = \frac{K(t_c - t)}{r + E}. \quad (2.29)$$

Температура материала является функцией температуры и влаго-содержания сушильного агента и находится решением следующей системы уравнений [98]:

$$\begin{cases} x_{nas} = \frac{0,622 p_{nas}(t_m)}{P - p_{nas}(t_m)}, \\ c_c t_c + (r_0 + c_v t_c)x_c = c_c t_m + (r_0 + c_v t_m)x_{nas}. \end{cases} \quad (2.30)$$

Если материал нерастворим в воде, то можно пренебречь энергией осмотически и механически связанной влаги, если материал растворим в воде, удельная энергия связи рассчитывается по эмпирической зависимости [54]:

$$E = \frac{a_e b_e}{(b_e + u)^2}, \quad (2.31)$$

где  $a_e$  и  $b_e$  – экспериментальные постоянные, индивидуальные для каждого вещества.

Для аппроксимации скорости сушки во втором периоде будем использовать зависимость [99], первая точка при аппроксимации – это равенство нулю её значения при достижении равновесного влагосодержания:

$$[u_p, 0].$$

Вторая точка характеризует равенство скоростей сушки первого и второго периодов при влагосодержании материала, равном гигроскопическому:

$$\left[ u_{kr}, \frac{K(t_c - t_m)}{r + E} \right].$$

Тогда скорость сушки для второго периода рассчитываем по зависимости:

$$v_{vl} = \frac{K(t_c - t_m)}{(r + E)} \frac{(u - u_p)}{(u_{kr} - u_p)}. \quad (2.32)$$

Выражение для скорости сушки во втором периоде состоит из двух составляющих, характеризующих количество тепла, подводимого к материалу, и коэффициента, показывающего долю теплового потока, идущего на испарение влаги.

Рассмотрим период прогрева (или охлаждения до температуры мокрого термометра, если материал был перегрет). В этом случае скорость сушки выше, чем в первом периоде, если температура материала выше температуры мокрого термометра и ниже, если температура материала ниже температуры мокрого термометра. В этом случае уравнение аппроксимации будет выглядеть следующим образом:

$$v_{vl} = \frac{K(t_c - t)}{r + E} \left( \frac{t}{t_m} \right)^{k_1}. \quad (2.33)$$

Коэффициент  $k_1$  определяется эмпирически. Выражение (2.33) преобразовывается в уравнение вида (2.29) при  $t = t_m$ . Можно предположить, что введение в уравнение (2.32) добавочного множителя может повысить точность аппроксимации, учитывая данный факт, а также, применив вместо линейной более общую степенную зависимость, уравнения для аппроксимации скорости сушки будут выглядеть следующим образом:

$$v_{vl} = \begin{cases} \frac{K(t_c - t)}{r + E} \left( \frac{t}{t_m} \right)^{k_1} & u \geq u_{kr}, \\ \frac{K(t_c - t_m)}{(r + E)} \frac{(u - u_p)^{k_2}}{(u_{kr} - u_p)} \left( \frac{t}{t_m} \right)^{k_1} & u < u_{kr}. \end{cases} \quad (2.34)$$

Коэффициент  $k_2$  зависит от теплофизических свойств материала.

Для использования зависимости (2.34) необходимо с помощью системы уравнений (2.30) определить зависимость  $t_m = f(x_c, t_c)$ .

## 2.8. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ПРОЦЕССА СУШКИ

### 2.8.1. Материальный баланс по влаге дисперсного материала

Рассмотрим функцию плотности распределения частиц по влагосодержанию и температуре ( $p_{ut}$ ) в четырёхмерном гильбертовом пространстве независимых переменных  $\ell$ ,  $h$ ,  $u$ ,  $t$  (две геометрические координаты, координата по влагосодержанию и координата по температуре).

Выделим в этом пространстве произвольную область  $VUT$  с границей  $\mathcal{FVUT}$  [47] и  $n$  – внешней нормалью к поверхности  $\mathcal{FVUT}$ .

Примем за положительное направление процесса сушки перенос влаги из материала в сушильный агент.

Опишем поток влаги  $p_{ut}$  внутрь области  $VUT$  через поверхность  $\mathcal{FVUT}$ .

Поток частиц дисперсного материала по оси  $\ell$ :

$$v_{\ell} N m_s p_{ut} . \quad (2.35)$$

Поток частиц дисперсного материала по оси  $\ell$ , сформированный диффузионным процессом:

$$- D_{\ell} N m_s \frac{\partial p_{ut}}{\partial \ell} . \quad (2.36)$$

По оси  $h$  происходит перемешивание дисперсного материала, следовательно, поток частиц в элемент  $VUT$  по оси  $h$  будет отсутствовать (точнее его сумма будет равна нулю), нулю будет равна и производная функции  $p_{ut}$  по  $h$ .

Поток частиц дисперсного материала:

$$-v_{vl} N S_s p_{ut} . \quad (2.37)$$

Поток векторного поля внутрь области  $VUT$  рассчитывается через дивергенцию векторов. Векторы (2.35) и (2.36) параллельны оси  $\ell$  и, следовательно, их дивергенции равны:

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(v_{\ell} N m_s p_{ut}) &= \frac{\partial v_{\ell} N m_s p_{ut}}{\partial \ell} = v_{\ell} N m_s \frac{\partial p_{ut}}{\partial \ell} , \\ \operatorname{div}\left(-D_{\ell} N m_s \frac{\partial p_{ut}}{\partial \ell}\right) &= \frac{\partial\left(-D_{\ell} N m_s \frac{\partial p_{ut}}{\partial \ell}\right)}{\partial \ell} = \\ &= -D_{\ell} N m_s \frac{\partial^2 p_{ut}}{\partial \ell^2} . \end{aligned} \quad (2.38)$$

Вектор (2.37) параллелен оси  $u$  и его дивергенция равна:

$$\operatorname{div}(-v_{vl}NS_s P_{ut}) = \frac{\partial(-v_{vl}NS_s P_{ut})}{\partial u} = -NS_s \frac{\partial(v_{vl}P_{ut})}{\partial u}. \quad (2.39)$$

Полный поток через поверхность будет равен сумме всех потоков и, так как ни одна точка исследуемого пространства не может быть ни источником, ни стоком функции  $p_{ut}$ , то сумма потоков (2.38) и (2.39) должна быть равна нулю:

$$v_\ell Nm_s \frac{\partial p_{ut}}{\partial \ell} - D_\ell Nm_s \frac{\partial^2 p_{ut}}{\partial \ell^2} - NS_s \frac{\partial(v_{vl}P_{ut})}{\partial u} = 0. \quad (2.40)$$

Преобразуя выражение (2.40), получаем:

$$v_\ell \frac{\partial p_{ut}}{\partial \ell} - D_\ell \frac{\partial^2 p_{ut}}{\partial \ell^2} = \frac{S_s}{m_s} \frac{\partial(v_{vl}P_{ut})}{\partial u}. \quad (2.41)$$

Дифференциальное уравнение (2.41) описывает материальный баланс влаги для дисперсного материала.

## 2.8.2. Материальный баланс по влаге сушильного агента

Рассмотрим функцию  $x_c = f(\ell, h, u, t)$  в четырёхмерном гильбертовом пространстве  $\ell, h, u, t$ .

Эта функция не имеет чёткого физического смысла, реальное влагосодержание сушильного агента в точке  $(\ell, h)$  определяется по формуле

$$x_c(\ell, h) = \iint_{UT} p_{ut} x_c(\ell, h, u, t). \quad (2.42)$$

Выделим в пространстве произвольную область  $VUT$  с поверхностью  $\mathcal{FVUT}$  и внешней нормалью к поверхности  $n$ .

Опишем поток  $x_c$  внутрь области  $VUT$  через поверхность  $\mathcal{FVUT}$ .

Поток влаги, формируемый движением сушильного агента по оси  $h$ :

$$v_h \rho_c x_c p_{ut} \cos(n, h). \quad (2.43)$$

Поток влаги, обусловленный диффузией сушильного агента по оси  $h$ :

$$-D_{ch} \rho_c p_{ut} \frac{\partial x_c}{\partial h} \cos(n, h). \quad (2.44)$$

Перемешиванием сушильного агента по оси  $\ell$  пренебрегаем, следовательно, поток в элемент  $VUT$  по оси  $\ell$  будет равен нулю, производная функции  $x_c(\ell, h, u, t)$  по  $\ell$  будет отлична от нуля.  $\cos(n, h)$  косинус угла между нормалью  $n$  и осью  $h$ .

Полный поток через поверхность  $\mathcal{FVUT}$  будет равен интегралу по поверхности всех потоков:

$$\iiint_{\mathcal{FVUT}} \left( v_h x_c p_{ur} - D_{ch} p_{ur} \frac{\partial x_c}{\partial h} \right) \cos(n, h) \rho_c d\mathcal{FVUT}. \quad (2.45)$$

По формуле Остроградского–Гаусса, принимая допущение о независимости коэффициентов  $v_h$  и  $D_{ch}$  от геометрических координат, и учитывая независимость от  $h$  функции  $p_{ur}$ , интеграл по поверхности (2.45) преобразуется в интеграл по объёму:

$$\int \iiint_{VUT} \left( v_h \frac{\partial x_c}{\partial h} - D_{ch} \frac{\partial^2 x_c}{\partial h^2} \right) \rho_c p_{ur} dVUT. \quad (2.46)$$

Внутренний источник влаги в области  $VUT$  будет равен:

$$\int \iiint_{VUT} NS_s v_{vl} p_{ur} dVUT. \quad (2.47)$$

По закону сохранения массы имеем:

$$\begin{aligned} \int \iiint_{VUT} \left( v_h \frac{\partial x_c}{\partial h} - D_{ch} \frac{\partial^2 x_c}{\partial h^2} \right) \rho_c p_{ur} dVUT = \\ = \int \iiint_{VUT} NS_s v_{vl} p_{ur} dVUT. \end{aligned} \quad (2.48)$$

Ввиду произвольности области  $VUT$  подынтегральные выражения в (2.48) должны быть равны, преобразуя их получаем следующее выражение:

$$v_h \frac{\partial x_c}{\partial h} - D_{ch} \frac{\partial^2 x_c}{\partial h^2} = \frac{NS_s v_{vl}}{\rho_c}. \quad (2.49)$$

Дифференциальные уравнения (2.42) и (2.49) описывают материальный баланс по влаге сушильного агента.

## 2.9. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПРОЦЕССА СУШКИ

### 2.9.1. Тепловой баланс по дисперсному материалу

Рассмотрим функцию плотности распределения частиц по влаго-содержанию и температуре ( $p_{ut}$ ) в четырёхмерном гильбертовом пространстве независимых переменных  $\ell$ ,  $h$ ,  $u$ ,  $t$  (две геометрические координаты, координата по влагосодержанию и координата по температуре).

Выделим в этом пространстве произвольную область  $VUT$  с границей  $\mathcal{FVUT}$  и внешней нормалью к поверхности  $n$ .

Опишем поток тепла внутрь области  $VUT$  через поверхность  $\mathcal{FVUT}$ .

Поток тепла с частицами материала по оси  $\ell$ :

$$v_{\ell}(c + c_a u)Nm_s p_{ut} . \quad (2.50)$$

Поток тепла, обусловленный диффузией частиц материала по оси  $\ell$ :

$$-D_{\ell}Nm_s(c + c_a u)\frac{\partial p_{ut}}{\partial \ell} . \quad (2.51)$$

Суммарный поток тепла по оси  $h$  равен нулю.

Поток тепла, сформированный в результате теплообмена дисперсного материала и сушильного агента:

$$KNS_s(t_c - t)p_{ut} . \quad (2.52)$$

Поток тепла, затраченный на испарение (разрыв связи вода-материал):

$$-(r + E)v_{vl}NS_s p_{ut} . \quad (2.53)$$

Соответственно:

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(v_{\ell}(c + c_a u)Nm_s p_{ut}) &= \frac{\partial(v_{\ell}(c + c_a u)Nm_s p_{ut})}{\partial \ell} = \\ &= v_{\ell}(c + c_a u)Nm_s \frac{\partial p_{ut}}{\partial \ell} , \\ \operatorname{div}\left(-D_{\ell}Nm_s(c + c_a u)\frac{\partial p_{ut}}{\partial \ell}\right) &= \frac{\partial\left(-D_{\ell}Nm_s(c + c_a u)\frac{\partial p_{ut}}{\partial \ell}\right)}{\partial \ell} = \\ &= -D_{\ell}Nm_s(c + c_a u)\frac{\partial^2 p_{ut}}{\partial \ell^2} . \end{aligned} \quad (2.54)$$

Векторы (2.52) и (2.53) параллельны оси  $t$  и их дивергенции равны:

$$\begin{aligned}
 \operatorname{div}(KNS_s(t_c - t)p_{ut}) &= \frac{\partial(KNS_s(t_c - t)p_{ut})}{\partial t} = \\
 &= KNS_s \frac{\partial((t_c - t)p_{ut})}{\partial t}, \\
 \operatorname{div}(-(r + E)v_{vl}NS_s p_{ut}) &= \frac{\partial(-(r + E)v_{vl}NS_s p_{ut})}{\partial t} = \\
 &= -(r + E)NS_s p_{ut} \frac{\partial(v_{vl} p_{ut})}{\partial t}.
 \end{aligned} \tag{2.55}$$

Полный поток через поверхность будет равен сумме всех потоков и, так как ни одна точка исследуемого пространства не может быть ни источником, ни стоком функции  $p_{ut}$ , то сумма потоков (2.54) и (2.55) равна нулю:

$$\begin{aligned}
 v_\ell(c + c_{au})Nm_s \frac{\partial p_{ut}}{\partial \ell} - D_\ell Nm_s(c + c_{au}) \frac{\partial^2 p_{ut}}{\partial \ell^2} + \\
 + KNS_s \frac{\partial((t_c - t)p_{ut})}{\partial t} - (r + E)NS_s p_{ut} \frac{\partial(v_{vl} p_{ut})}{\partial t} = 0.
 \end{aligned} \tag{2.56}$$

Преобразуя выражение (2.56), получаем:

$$\begin{aligned}
 \left( v_\ell \frac{\partial p_{ut}}{\partial \ell} - D_\ell \frac{\partial^2 p_{ut}}{\partial \ell^2} \right) \frac{(c + c_{au})m_s}{KS_s} + \\
 + \left( \frac{(r + E)}{K} \frac{\partial(v_{vl} p_{ut})}{\partial t} - \frac{\partial((t_c - t)p_{ut})}{\partial t} \right) = 0.
 \end{aligned} \tag{2.57}$$

Дифференциальное уравнение (2.57) описывает тепловой баланс для дисперсного материала.

### 2.9.2. Тепловой баланс сушильного агента

Рассмотрим функцию  $t_c = f(\ell, h, u, t)$  в четырёхмерном гильбертовом пространстве  $\ell, h, u, t$ .

Температура сушильного агента в точке  $(\ell, h)$  определяется по формуле

$$t_c(\ell, h) = \iint_{UT} p_{ut} t_c(\ell, h, u, t). \tag{2.58}$$

Выделим в этом пространстве произвольную область  $VUT$  с поверхностью  $\mathcal{FVUT}$  и внешней нормалью к поверхности  $n$ .

Опишем поток тепла внутрь области  $VUT$  через поверхность  $\mathcal{FVUT}$ .



Поток тепла, обусловленный движением сушильного агента по оси  $h$ :

$$v_h(c_c + c_v x_c) \rho_c t_c p_{ut} \cos(n, h). \quad (2.59)$$

Поток, обусловленный диффузией сушильного агента по оси  $h$ :

$$-D_{ch} \rho_c (c_c + c_v x_c) p_{ut} \frac{\partial t_c}{\partial h} \cos(n, h). \quad (2.60)$$

Перемешивание сушильного агента по оси  $\ell$  не учитываем, следовательно, поток тепла в элемент  $VUT$  по оси  $\ell$  будет равен нулю, производная функции  $t_c(\ell, h, u, t)$  по  $\ell$  будет отлична от нуля.

$\cos(n, h)$  косинус угла между нормалью  $n$  и осью  $h$ .

Полный поток через поверхность  $\mathcal{FVUT}$  будет равен интегралу по поверхности суммы всех потоков:

$$\iiint_{\mathcal{FVUT}} \left( v_h t_c - D_{ch} \frac{\partial t_c}{\partial h} \right) p_{ut} (c_c + c_v x_c) \cos(n, h) \rho_c d\mathcal{FVUT} \quad (2.61)$$

По формуле Остроградского–Гаусса, принимая допущение о независимости коэффициентов  $v_h$  и  $D_{ch}$  от координат, интеграл по поверхности (2.61) преобразуется в интеграл по объёму:

$$\int \iiint_{VUT} \left( v_h \frac{\partial((c_c + c_v x_c) t_c)}{\partial h} + (-1) D_{ch} \frac{\partial \left( (c_c + c_v x_c) \frac{\partial t_c}{\partial h} \right)}{\partial h} \right) p_{ut} \rho_c dVUT. \quad (2.62)$$

Внутренний источник (сток) тепла в области  $VUT$  будет равен:

$$\int \iiint_{VUT} -KNS_s (t_c - t) p_{ut} dVUT. \quad (2.63)$$

По закону сохранения энергии имеем равенство интегралов (2.62) и (2.63):

$$\int \iiint_{VUT} \left( v_h \frac{\partial((c_c + c_v x_c) t_c)}{\partial h} + (-1) D_{ch} \frac{\partial \left( (c_c + c_v x_c) \frac{\partial t_c}{\partial h} \right)}{\partial h} \right) p_{ut} \rho_c dVUT = \int \iiint_{VUT} -KNS_s (t_c - t) p_{ut} dVUT. \quad (2.64)$$

Ввиду произвольности области  $VUT$  подынтегральные выражения в (2.64) должны быть равны, следовательно, преобразуя к более компактному виду, получаем:

$$\begin{aligned} c_v \left( v_h t_c - D_{ch} \frac{\partial t_c}{\partial h} \right) \frac{\partial x_c}{\partial h} + (c_c + c_v x_c) \left( v_h \frac{\partial t_c}{\partial h} - D_{ch} \frac{\partial^2 t_c}{\partial h^2} \right) = \\ = - \frac{KNS_s (t_c - t)}{\rho_c}. \end{aligned} \quad (2.65)$$

Дифференциальные уравнения (2.58) и (2.65) описывают тепловой баланс для сушильного агента.

## 2.10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ ТЕПЛООВОГО И МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСОВ ПРОЦЕССА СУШКИ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА

Зависимости (2.41), (2.49), (2.57), (2.65) представляют полную систему уравнений, следовательно, можно определить все четыре переменные величины: плотности распределения частиц материала по температуре и влагосодержанию ( $p_u$  и  $p_t$ ), температуру ( $t_c$ ) и влагосодержание сушильного агента ( $x_c$ ).

Для решения системы уравнений (2.41), (2.49), (2.57), (2.65) необходимо сформировать граничные условия для всех неизвестных функций.

Рассмотрим плотность распределения частиц по влагосодержанию и температуре.

Определим граничные условия по координате  $\ell$ .

Материал подходит к границе  $\ell = 0$  с массовым расходом  $G$ , скоростью, определяемой по зависимости 2.20 и начальным распределением  $p_{ut0}$ , движется от границы  $\ell = 0$  вглубь аппарата со скоростью  $v_\ell$  и подходит к границе из глубины аппарата с учётом процесса обратной диффузии. Материал подходит к границе  $\ell = L$  из глубины аппарата со скоростью  $v_\ell$ , отходит от границы  $\ell = L$  вглубь аппарата в результате процесса обратной диффузии и выходит из аппарата с эквивалентной скоростью  $v_\ell$ . При  $\ell = L$  дополнительно берётся допущение об отсутствии скачка функции на выходе из аппарата (т.е.  $p_{ut} = p_{xtk}$ ) (граничные условия по Данкверсту) [41, 99]. Тогда материальный баланс для сушки с виброаэрокипящим слоем запишется в следующем виде:

при  $\ell = 0$ :

$$v_\ell p_{ut0} + D_\ell \frac{\partial p_{ut}}{\partial \ell} - v_\ell p_{ut} = 0, \quad (2.66)$$

при  $\ell = L$ :

$$v_\ell p_{ut} - v_\ell p_{ut} - D_\ell \frac{\partial p_{ut}}{\partial \ell} = 0. \quad (2.67)$$

Граничные условия по координате  $\ell$  будут выглядеть следующим образом:

$$\frac{\partial p_{ut}}{\partial \ell}(0, h, u, t) = \frac{v_\ell}{D_\ell}(p_{ut} - p_{ut0}), \quad (2.68)$$

$$\frac{\partial p_{ut}}{\partial \ell}(L, h, u, t) = 0. \quad (2.69)$$

При рассмотрении теплового баланса сушилки на границе: при  $\ell = 0$ :

$$-v_\ell(c + c_a u)p_{ut} + v_\ell(c + c_a u)p_{uto} + D_\ell(c + c_a u)\frac{\partial p_{ut}}{\partial \ell} = 0, \quad (2.70)$$

при  $\ell = L$ :

$$v_\ell(c + c_a u)p_{ut} - v_\ell(c + c_a u)p_{ut} - D_\ell(c + c_a u)\frac{\partial p_{ut}}{\partial \ell} = 0. \quad (2.71)$$

Сокращая выражения (2.70) и (2.71) на  $(c + c_a u)$ , получаем выражения (2.66) и (2.67) из которых получаются граничные условия (2.68), (2.69) и определяем граничные условия по координате  $h$ .

При отсутствии уноса частиц поток твёрдой фазы через границы по координате  $h$  отсутствует, а также учитывая, что производная функции  $p_{ut}$  по координате  $h$  равна нулю в любой точке слоя, граничные условия будут выглядеть следующим образом:

$$\frac{\partial p_{ut}}{\partial h}(\ell, 0, u, t) = \frac{\partial p_{ut}}{\partial h}(\ell, H, u, t) = \frac{\partial p_{ut}}{\partial h}(\ell, h, u, t) = 0. \quad (2.72)$$

Определим граничные условия по координате  $u$ .

Влагосодержание дисперсного материала стремится к равновесному, следовательно, значение функции распределения  $p_{ut}$  по координате  $u = u_p$  будет равно нулю – граничное условие по координате  $u$ :

$$p_{ut}(\ell, h, u_p, t) = 0. \quad (2.73)$$

Определим граничные условия по координате  $t$ .

Температура влажного материала стремится к температуре сушильного агента, следовательно, значение функции распределения  $p_{ut}$  при координате  $t = t_c$  будет равно нулю – граничное условие по координате  $t$ :

$$p_{ut}(\ell, h, x, t_c) = 0. \quad (2.74)$$

Определим граничные условия функции влагосодержания сушильного агента по координате  $\ell$ .

Поток сушильного агента, поступающий в аппарат и уходящий из аппарата вместе с дисперсным материалом, считаем пренебрежимо малым, следовательно, поток через границу отсутствует, и граничные условия запишутся в виде:

$$\frac{\partial x_c}{\partial \ell}(0, h) = 0, \quad (2.75)$$

$$\frac{\partial x_c}{\partial \ell}(L, h) = 0. \quad (2.76)$$

Определим граничные условия по координате  $h$ .

Сушильный агент подходит к границе  $h = 0$  с массовым расходом  $G_c$ , скоростью, определяемой по зависимости (2.26) и начальным влагосодержанием  $x_{c0}$ , проходит от границы  $h = 0$  вглубь аппарата со скоростью  $v_h$ , и подходит к границе из глубины аппарата с учётом процесса обратной диффузии. Сушильный агент подходит к границе  $h = H$  из глубины аппарата со скоростью  $v_h$ , возвращается от границы  $h = H$  вглубь аппарата за счёт процесса обратной диффузии и выходит из аппарата со скоростью  $v_h$ . При  $h = H$  дополнительно принимается допущение об отсутствии скачка влажности на выходе из аппарата (т.е.  $x_c = x_{ck}$ ) (граничные условия по Данкверсту) [41, 99]. Тогда материальный баланс сушильного агента на границах по  $h$  будет выглядеть следующим образом:

при  $h = 0$ :

$$v_h x_{c0} - v_h x_c + D_{ch} \frac{\partial x_c}{\partial h} = 0, \quad (2.77)$$

при  $h = H$ :

$$v_h x_c - v_h x_c - D_{ch} \frac{\partial x_c}{\partial h} = 0. \quad (2.78)$$

Отсюда граничные условия по координате  $h$  будут выглядеть следующим образом:

$$\frac{\partial x_c}{\partial h}(\ell, 0) = \frac{v_h(x_c - x_{c0})}{D_{ch}}, \quad (2.79)$$

$$\frac{\partial x_c}{\partial h}(\ell, H) = 0. \quad (2.80)$$

Определим граничные условия функции температуры сушильного агента по координате  $\ell$ .

Поток сушильного агента, поступающий в аппарат и уходящий из аппарата вместе с материалом, считаем пренебрежимо малым, следовательно, через границу поток тепла отсутствует, и граничные условия запишутся в следующем виде:

$$\frac{\partial t_c}{\partial \ell}(0, h) = 0, \quad (2.81)$$

$$\frac{\partial t_c}{\partial \ell}(L, h) = 0. \quad (2.82)$$

Определим граничные условия по координате  $h$ .

По рассмотренным ранее потокам сушильного агента через границы  $h = 0$  и  $h = H$ , с аналогичным допущением об отсутствии скачка температуры на выходе из аппарата (т.е.  $t_c = t_{ck}$ ) (граничные условия по Данкверсту) [41, 99], тепловой баланс на границах по  $h$  будет выглядеть следующим образом:

при  $h = 0$ :

$$v_h(c_c + c_v x_{c0})t_{c0} - v_h(c_c + c_v x_c)t_c + D_{ch}(c_c + c_v x_c)\frac{\partial t_c}{\partial h} = 0, \quad (2.83)$$

при  $h = H$ :

$$v_h(c_c + c_v x_c)t_c - v_h(c_c + c_v x_c)t_c + D_{ch}(c_c + c_v x_c)\frac{\partial t_c}{\partial h} = 0. \quad (2.84)$$

Граничные условия по координате  $h$ :

$$\frac{\partial t_c}{\partial h}(\ell, 0) = \frac{v_h((c_c + c_v x_c)t_c - (c_c + c_v x_{c0})t_{c0})}{D_{ch}(c_c + c_v x_c)}, \quad (2.85)$$

$$\frac{\partial t_c}{\partial h}(\ell, H) = 0. \quad (2.86)$$

Рассмотренные граничные условия для функций  $x_c(\ell, h)$  и  $t_c(\ell, h)$  должны также соблюдаться и для функций  $x_c(\ell, h, u, t)$ ,  $t_c(\ell, h, u, t)$  при всех  $u$  и  $t$ . Граничные условия для этих функций по координатам  $u$  и  $t$  находятся решением уравнений (2.49) и (2.65).

Выражения (2.68), (2.69), (2.72) – (2.76), (2.79) – (2.82), (2.85), (2.86) являются граничными условиями к системе (2.41), (2.49), (2.57), (2.65) и позволяют её решить.

## 2.11. РАСЧЁТ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ МАТЕРИАЛА НА ВЫХОДЕ ИЗ АППАРАТА

Влагосодержание материала на выходе из сушилки виброаэрокипящего слоя рассчитывается как влагосодержание при  $\ell = L$ , для чего изначально необходимо решить систему уравнений (2.41), (2.49), (2.57), (2.65) и определить функцию распределения частиц материала по влагосодержанию и температуре. Используя значения этой функции при  $\ell = L$  совместно со свойствами плотности распределения случайной величины [22], рассчитываем конечное влагосодержание материала на выходе из аппарата:

$$u_k = \iint_{UT} u p_{ut}(L, u, t) dt du . \quad (2.87)$$

Влагосодержание материала будет являться функцией параметров процесса сушки ( $t_c, v_h, A, f, \alpha, \beta$ ), и для обеспечения заданного конечного влагосодержания на выходе необходимо варьирование параметрами процесса для достижения заданной величины.

## 2.12. РАСЧЁТ КОЛИЧЕСТВА ЦЕЛЕВОГО ВЕЩЕСТВА, ПОДВЕРГШЕГОСЯ ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ

Для определения выхода по целевому веществу по зависимости (2.4) необходимо определить количество целевого вещества в частице. Количество целевого вещества в частице находим, решая дифференциальное уравнение (2.15). Для использования его значений при моделировании процесса сушки в виброаэрокипящем слое делаем замену переменной времени ( $\tau$ ) на переменную по длине слоя ( $\ell$ ), воспользовавшись соотношением:

$$v_\ell = \frac{d\ell}{d\tau} . \quad (2.88)$$

Уравнение (2.15) преобразуется к виду:

$$\frac{dv_{qs}}{d\ell} = \frac{-6^n \pi^{1-n} k_0 v_{qs}^{2/3}}{v_\ell} \left( \frac{M_q d_{s0}^3}{\bar{x}_{q0} m_{s0}} \right)^{2/3 - n} \exp\left(\frac{-E_A}{Rt}\right) . \quad (2.89)$$

Из выражений (2.7) и (2.89), учитывая неоднородность распределения частиц по температуре, получаем:

$$\frac{dv_{qs}}{d\ell} = \frac{-6^n \pi^{1-n} k_0 v_{qs}^{2/3}}{v_\ell} \times \left( \frac{M_q d_{s0}^3}{\bar{x}_{q0} m_{s0}} \right)^{2/3 - n} \iint_{UT} \exp\left(\frac{-E_A}{Rt}\right) p_{ut} dt du. \quad (2.90)$$

Для расчёта количества целевого вещества в частице по координате ( $\ell$ ), необходимо найти функцию  $p_{ut}$  и решить дифференциальное уравнение (2.90).

Выход по целевому веществу из сушильного аппарата рассчитывается по зависимости (2.90) при условии  $\ell = L$ .

### 3. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПРОЦЕССА СУШКИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НАЛИЧИИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ЦЕЛЕВОГО ВЕЩЕСТВА

Математическое описание процесса сушки (уравнения (2.41), (2.49), (2.57), (2.65), (2.87), (2.90)) не имеет аналитического решения, следовательно, для их решения используем численный метод, который необходимо разработать, применительно к данной задаче. Математическая модель позволяет провести исследования процесса сушки в виброаэрокипящем слое при различных параметрах процесса, и сформулировать рекомендации по технологическим параметрам сушки, в зависимости от термолабильных свойств высушиваемого материала.

Разработка инженерной методики расчёта предполагает решение следующих задач:

- составление численной схемы, позволяющей максимально быстро и достаточно точно решать систему уравнений ((2.41), (2.49), (2.57), (2.65), (2.87), (2.90));
- оценка адекватности математического описания процесса сушки путём сравнения расчётных и экспериментальных данных;
- исследование поведения модели при варьировании параметров процесса сушки;
- разработка инженерной методики определения величины выхода по целевому веществу.

#### 3.1. ЧИСЛЕННАЯ СХЕМА РАСЧЁТА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Система дифференциальных уравнений в частных производных ((2.41), (2.49), (2.57), (2.65)) сложна как для точных, так и для приближенных аналитических методов решения, необходимо подобрать численную (конечно-разностную) схему, обеспечивающую аппроксимацию системы уравнений ((2.41), (2.49), (2.57), (2.65)) и граничных условий ((2.68), (2.69), (2.72) – (2.76), (2.79) – (2.82), (2.85), (2.86)) на четырёхмерной сетке переменных  $\ell, h, u, t$ .

Для упрощения записи дифференциальных уравнений вводятся операторы:

$$L = v_{\ell} \frac{\partial}{\partial \ell} - D_{\ell} \frac{\partial^2}{\partial \ell^2}, \quad (3.1)$$



$$L_c = v_h \frac{\partial}{\partial h} - D_{ch} \frac{\partial^2}{\partial h^2}. \quad (3.2)$$

Систему уравнений ((2.41), (2.49), (2.57), (2.65)) переписываем с вычисленным дифференциалом произведений функций, решив уравнения (2.41) и (2.57) относительно производных функции  $p_{ut}$  по  $u$  и по  $t$ , и используя операторы (3.1) и (3.2):

$$\frac{\partial p_{ut}}{\partial u} = -\frac{1}{v_{vl}} \left( p_{ut} \frac{\partial v_{vl}}{\partial u} + \frac{m_s}{S_s} L(p_{ut}) \right), \quad (3.3)$$

$$L_c(x_c) = \frac{NS_s v_{vl}}{\rho_c}, \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{ut}}{\partial t} = & \frac{1}{S_s ((t_c - t)K - (r + E)v_{vl})} \times \\ & \times \left( L(p_{ut})(c + c_a u)m_s + S_s p_{ut} \left( (r + E) \frac{\partial v_{vl}}{\partial t} + K \left( 1 - \frac{\partial t_c}{\partial t} \right) \right) \right), \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$c_v \left( v_h t_c - D_{ch} \frac{\partial t_c}{\partial h} \right) \frac{\partial x_c}{\partial h} + (c_c + c_v x_c) L_c(t_c) = -\frac{KNS_s(t_c - t)}{\rho_c}. \quad (3.6)$$

Введём пространство сеточных функций –  $Z$ , пусть в нём задано множество точек (сетка)  $\{(\ell_i, h_j, u_k, t_l)\}$ :

$$i = 0 \dots N_\ell,$$

$$j = 0 \dots N_h,$$

$$k = 0 \dots N_u,$$

$$l = 0 \dots N_t.$$

Каждая из точек множества является узлом сетки, числа  $N_\ell, N_h, N_u$  и  $N_t$  являются количеством отрезков разбиения по переменным  $\ell, h, u, t$ . Значения шага по переменным  $\ell, h, u, t$  обозначаем соответственно  $\lambda, \eta, \chi$  и  $\theta$  (значения шага – константы, сетка с постоянным шагом):

$$\lambda = \ell_i + 1 - \ell_i,$$

$$\eta = h_j + 1 - h_j,$$

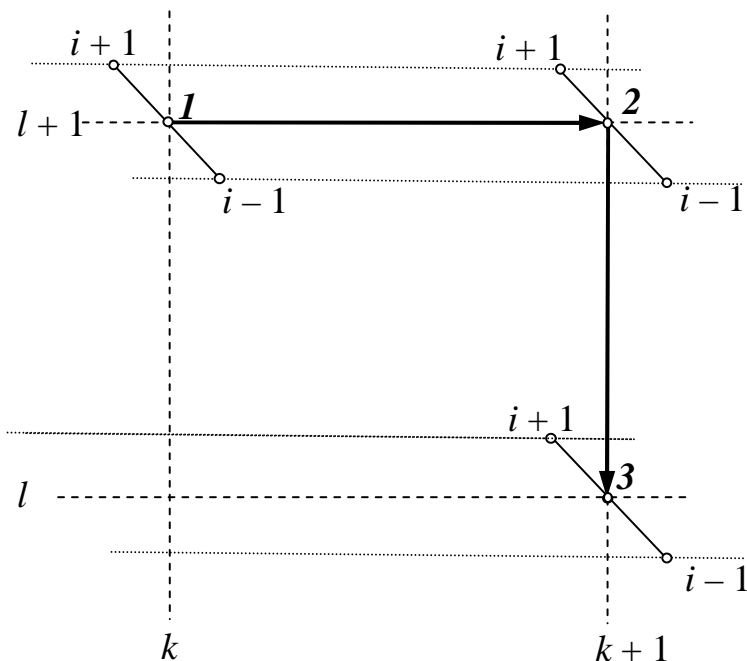
$$\chi = u_k + 1 - u_k,$$

$$\theta = t_l + 1 - t_l.$$

Уравнения (3.3) и (3.5) являются уравнениями параболического типа, для их аппроксимации на сетку  $Z$  воспользуемся симметричной схемой с весами на шеститочечном шаблоне (схему Кранка–Николсона), являющейся схемой второго порядка точности как по геометрическим, так и по «временным» координатам (рис. 3.1) [5, 15, 17, 38, 88, 92, 93].

Из схемы (рис. 3.1) видно, для перехода к следующему слою необходимо осуществить 2 шага, на первом из которых (переход  $1 - 2$ ) используется уравнение (3.3), а на втором (переход  $2 - 3$ ) уравнение (3.5). Можно составить аналогичную схему, где на первом шаге будет использоваться уравнение (3.5), а на втором уравнение (3.3) (рис. 3.1 переход  $1 - 2$  перейдет на нижнюю ось  $l$ , переход  $2 - 3$  сместится на левую ось  $k$ ).

Разностные уравнения, аппроксимирующие дифференциальные, на каждом из шагов будут записываться в следующем виде:



**Рис. 3.1. Шаблон численной схемы для решения параболических уравнений (3.3) и (3.5)**

Первый шаг (переход  $l - 2$ ):

$$\frac{p_{ut}[i, j, k+1, l+1] - p_{ut}[i, j, k, l+1]}{\chi} = \frac{\Delta_u[k+1] + \Delta_u[k]}{2}. \quad (3.7)$$

Второй шаг (переход  $2 - 3$ ):

$$\frac{p_{ut}[i, j, k+1, l] - p_{ut}[i, j, k+1, l+1]}{\theta} = -\frac{\Delta_t[l] + \Delta_t[l+1]}{2}, \quad (3.8)$$

где

$$\Delta_u[k] = \frac{-1}{v_{vl}[i, j, k, l]} \left( p_{ut}[i, j, k, l] \frac{\partial v_{vl}}{\partial u}[i, j, k, l] + \frac{m_s}{S_s} L(p_{ut}[i, j, k, l]) \right), \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \Delta_t[l] &= \frac{1}{S_s((t_c[i, j, k, l] - t[l])K - (r + E)v_{vl}[i, j, k, l])} \times \\ &\times [L(p_{ut}[i, j, k, l])(c + c_a u[k])m_s + S_s p_{ut}[i, j, k, l] \times \\ &\times \left( (r + E) \frac{\partial v_{vl}}{\partial t}[i, j, k, l] + K \left( 1 - \frac{t_c[i, j, k, l+1] - t_c[i, j, k, l-1]}{2\theta} \right) \right)], \quad (3.10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L(p_{ut}[i, j, k, l]) &= \frac{v_\ell}{2\lambda} (p_{ut}[i+1, j, k, l] - p_{ut}[i-1, j, k, l]) + \\ &+ (-1) \frac{D_\ell}{\lambda^2} (p_{ut}[i+1, j, k, l] - 2p_{ut}[i, j, k, l] + p_{ut}[i-1, j, k, l]), \quad (3.11) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial v_{vl}}{\partial u}[i, j, k, l] = \frac{v_{vl}[i, j, k+1, l] - v_{vl}[i, j, k-1, l]}{2\chi}, \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial v_{vl}}{\partial t}[i, j, k, l] = \frac{v_{vl}[i, j, k, l+1] - v_{vl}[i, j, k, l-1]}{2\theta}. \quad (3.13)$$

Знак минус в уравнении (3.8) появляется из особенностей задания граничного условия по температуре, функция  $p_{ut}$  задаётся при максимальном значении температуры  $t = t_c$  (точки  $l = N_t$ ), и следовательно, при нахождении решения мы движемся против направления оси  $t$ , и производная по  $t$  меняет знак.

Входящие в правые части уравнений (3.3) и (3.5) первые производные функций аппроксимируются центральными конечными разностями, что обеспечивает второй порядок точности [15, 93], однако на границе сетки используются правые разностные производные, обеспе-

чивающие первый порядок точности, так как центральные производные требуют конкретные значения в узлах вне сетки.

Количество уравнений на переходах (1-2) и (2-3) равно  $(N_\ell - 1)$ , количество же неизвестных равно  $(N_\ell + 1)$ , недостающие уравнения формируются из граничных условий. Производные при граничных условиях аппроксимируются правой разностной производной [11, 38, 72, 87]. Из граничных условий (2.68) и (2.69) получаем:

$$\frac{p_{ut}[1, j, k, l] - p_{ut}[0, j, k, l]}{\lambda} = \frac{v_\ell}{D_\ell} (p_{ut}[0, j, k, l] - p_{ut0}), \quad (3.14)$$

$$\frac{p_{ut}[N_\ell, j, k, l] - p_{ut}[N_\ell - 1, j, k, l]}{\lambda} = 0. \quad (3.15)$$

Промежуточные результаты решения уравнений (3.3), (3.5) (точка 2 схемы, рис. 3.1) в общем решении не учитываются. Расчёт функции  $p_{ut}$  в узлах сетки происходит «диагонально», совместным использованием уравнений (3.3) и (3.5) (рис. 3.2).

Исходя из вышесказанного, общий порядок точности будет равен двум, для решения последующих уравнений следует использовать схемы, обеспечивающие такой же порядок точности.

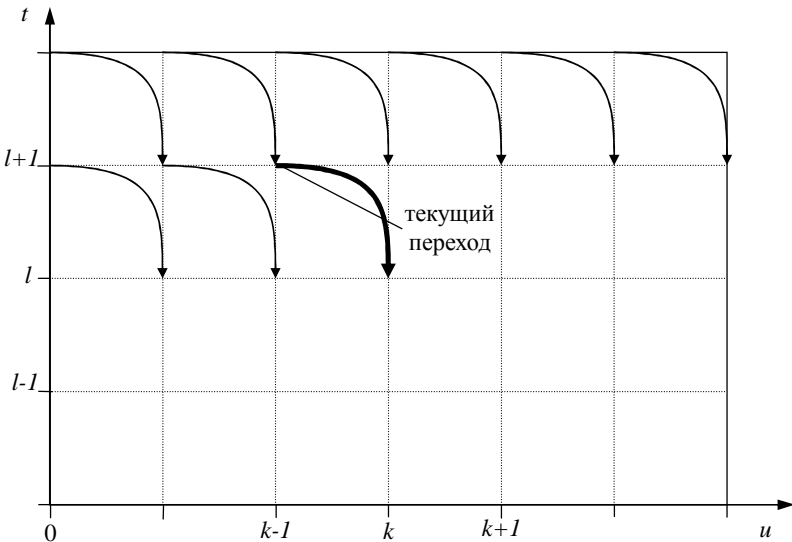


Рис. 3.2. Пояснение к совместному решению уравнений (3.3) и (3.5)

Уравнения (3.4) и (3.6) по сути представляют собой обыкновенные дифференциальные уравнения по переменной  $h$ , в которых оставшиеся координаты можно представить как параметры. Таким образом, процесс решения уравнений (3.4), (3.6) превращается в краевую задачу для системы обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка с граничными условиями (2.79), (2.80), (2.85), (2.86).

Задача состоит в нахождении значений функций  $x_c(\ell, h, u, t)$  и  $t_c(\ell, h, u, t)$  в узлах сетки  $Z$ , для последующего применения их для решения уравнений (3.3) и (3.5) по схеме (3.7) – (3.13), следовательно, можно использовать любой метод конечных разностей (МКР) для решения краевых задач, для этого используем схему трапеций (схема второго порядка точности) с экстраполяцией по Ричардсону [15, 71].

Для упрощения расчётов по схеме (3.7) – (3.13) необходимо перейти от непрерывной функции плотности распределения  $p_{ul}$  к дискретной. Тогда условие нормированности на единицу 2,5 будет иметь следующее выражение:

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_l p_{ul}[i, j, k, l] = 1. \quad (3.16)$$

Граничные условия по  $\ell$  приобретают следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{if } t = t_0 \text{ and } u = u_0, \\ \text{then} \\ p_{ul0} = 1, \\ \text{else} \\ p_{ul0} = 0. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Скорость сушки можно рассчитать по уравнению:

$$v_{vl}[i, j, k, l] = \begin{cases} \frac{K(t_c[i, j, k, l] - t[l]) \left(\frac{t[l]}{t_m}\right)^{k_1}}{r + E}, & u[k] \geq u_{kr}, \\ \frac{K(t_c[i, j, k, l] - t_m) (u[k] - u_p)^{k_2} \left(\frac{t[l]}{t_m}\right)^{k_1}}{(r + E) (u_{kr} - u_p)}, & u[k] < u_{kr}. \end{cases} \quad (3.18)$$

Воспользовавшись значениями функции  $p_{ul}$  в узлах сетки  $Z$ , определяются значения влагосодержания и температуры сушильного агента в точках  $[i, j]$ , соответствующих геометрическим координатам по длине и высоте слоя:

$$x_c[i, j] = \sum_k \sum_l p_{ul}[i, j, k, l] x_c[i, j, k, l], \quad (3.19)$$

$$t_c[i, j] = \sum_k \sum_l p_{ut}[i, j, k, l] t_c[i, j, k, l]. \quad (3.20)$$

Далее приводим функцию  $p_{ut}[i, j, k, l]$  к виду  $p_{ut}[i, k, l]$  суммированием по координате  $j$ :

$$p_{ut}[i, k, l] = \sum_j p_{ut}[i, j, k, l]. \quad (3.21)$$

Воспользовавшись значениями функции  $p_{ut}[i, k, l]$  и свойствами дискретной случайной величины, определим средние значения влагодержаний и температур по длине слоя:

$$u[i] = \sum_k u[k] \sum_l p_{ut}[i, k, l], \quad (3.22)$$

$$t[i] = \sum_l t[l] \sum_k p_{ut}[i, k, l]. \quad (3.23)$$

Для определения количества целевого вещества в частице и расчёта выхода по целевому веществу необходимо решить дифференциальное уравнение (2.90). Для этого воспользуемся методом Хойна (методом «предиктор-корректор»), являющимся методом второго порядка сходимости [15].

Численная схема для уравнения (2.90) будет иметь вид:

$$v_{qs}[i+1] = v_{qs}[i] + \frac{\lambda}{2}(K_1 + K_2), \quad (3.24)$$

где

$$K_1 = \frac{-6^n k_0 v_{qs}^{2/3}[i] \left( \frac{M_q d_{s0}^3}{\bar{x}_{q0} m_{s0}} \right)^{2/3 - n}}{v_\ell \pi^{n-1}} \sum_l \exp\left( \frac{-E_A}{R(t[l] + 273)} \right) \sum_k p_{ut}[i, k, l], \quad (3.25)$$

$$K_2 = \frac{-6^n k_0 (v_{qs}^{2/3}[i] + \lambda K_1) \left( \frac{M_q d_{s0}^3}{\bar{x}_{q0} m_{s0}} \right)^{2/3 - n}}{v_\ell \pi^{n-1}} \times \sum_l \exp\left( \frac{-E_A}{R(t[l] + 273)} \right) \sum_k p_{ut}[i+1, k, l]. \quad (3.26)$$

Таким образом, влагодержание материала и выход по целевому веществу будут рассчитываться как:

$$u_k = u[N_u], \quad (3.27)$$

$$\Omega = \frac{M_q}{\bar{x}_{q0} m_{s0}} v_{qs} [N_\ell]. \quad (3.28)$$

Если дисперсией частиц по размеру пренебречь нельзя, следует провести дополнительное варьирование параметров с использованием плотности распределения частиц по диаметру:

$$u_k = \sum_i u_{ki} \Psi_i(d_{si}), \quad (3.29)$$

$$\Omega = \frac{M_q}{\bar{x}_{q0} m_{s0}} \sum_i v_{qsi} \Psi_i(d_{si}), \quad (3.30)$$

где  $u_{ki}$  и  $v_{qsi}$  – значения влагосодержания материала и концентрации целевого вещества в нём при фиксированном диаметре  $d_{si}$ ; количество точек  $i$ , взятое в расчёт будет зависеть от дисперсии частиц материала по размеру.

Для варьирования параметров процесса и поиска точек, обеспечивающих минимальное разложение целевого вещества при заданном конечном влагосодержании, методом Нелдера–Мида (методом деформируемого симплекса), представляющим собой метод нелинейной, неградиентной численной оптимизации. Для учёта ограничения (меньше либо равное заданному влагосодержанию на выходе из аппарата) воспользуемся методом штрафных функций [5, 43].

В качестве штрафной функции будем использовать функцию Хевисайда [72]:

$$\sigma_0(x) = \begin{cases} 0 & x < 0, \\ 1 & x \geq 0. \end{cases} \quad (3.31)$$

В качестве параметров оптимизации выберем начальную температуру и скорость сушильного агента, критерием оптимизации ( $Y$ ) будет произведение оптимизируемой величины (выход по целевому веществу) на штрафную функцию:

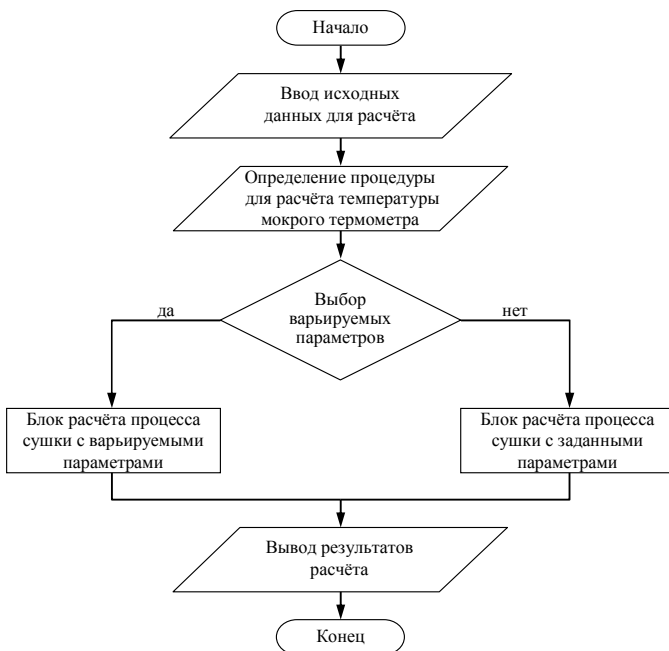
$$Y = \Omega \sigma_0(u_{kz} - u_k), \quad (3.32)$$

где  $u_{kz}$  – заданное конечное влагосодержание материала, кг/кг.

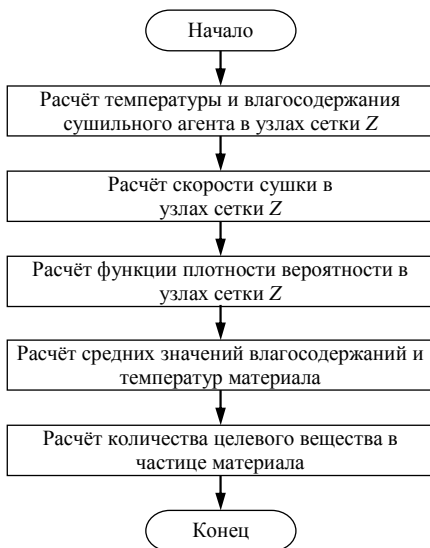
Необходимо найти максимальное значение критерия оптимизации.

Для расчёта точек симплекса будем использовать следующие коэффициенты: редукции – 0,5; сжатия 0,5; отражения 1; растяжения 2.

Блок-схемы расчёта процесса сушки приведена на рис. 3.3 – 3.5.



**Рис. 3.3. Алгоритм расчёта математической модели процесса сушки термолабильных материалов**



**Рис. 3.4. Блок-схема расчёта процесса сушки с заданными параметрами**



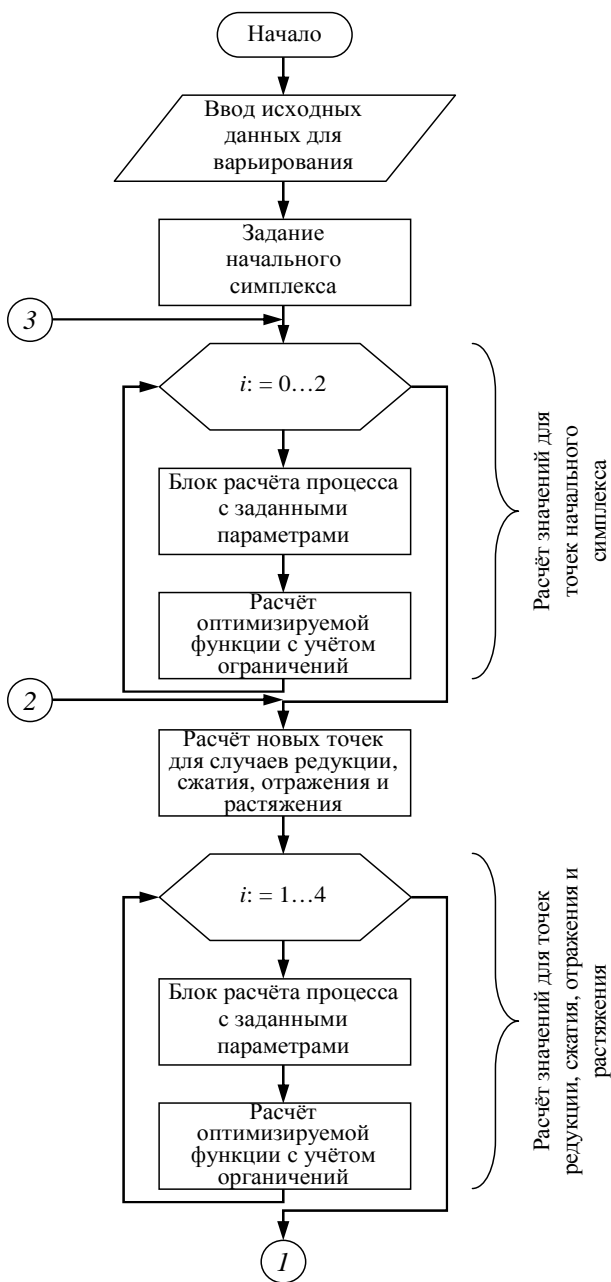


Рис. 3.5. Блок-схема расчёта процесса сушки с варьированием параметров

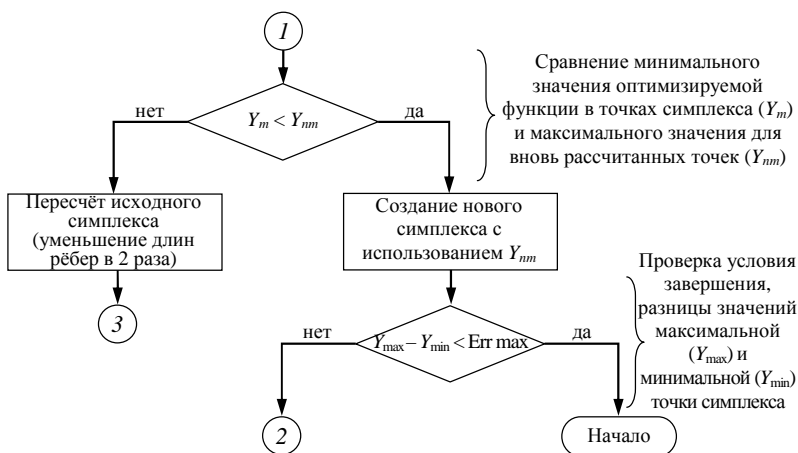


Рис. 3.5. Продолжение

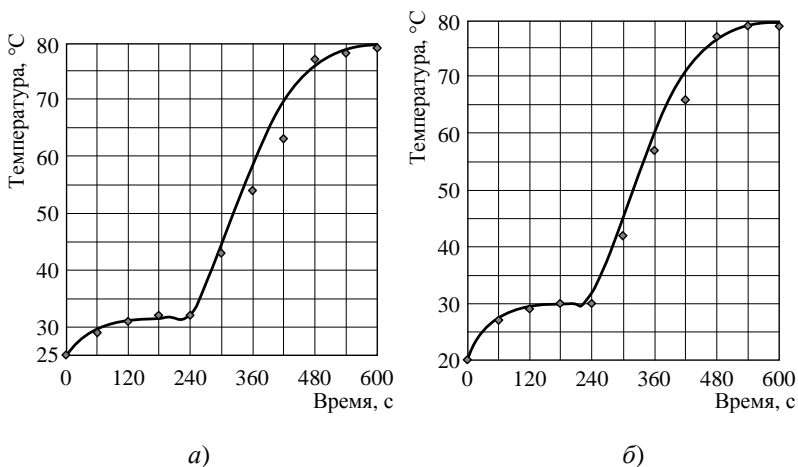
### 3.2. АДЕКВАТНОСТЬ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Задачей математической модели процесса сушки термолабильных материалов в виброаэрокипящем слое является определение количества разложившегося целевого вещества, уравнения (2.90), (3.24). Кинетические коэффициенты процесса деструкции целевого вещества определены экспериментально, следовательно, для расчёта его количества необходимо аппроксимировать значения температуры высушиваемого материала во втором периоде сушки при максимальных её значениях.

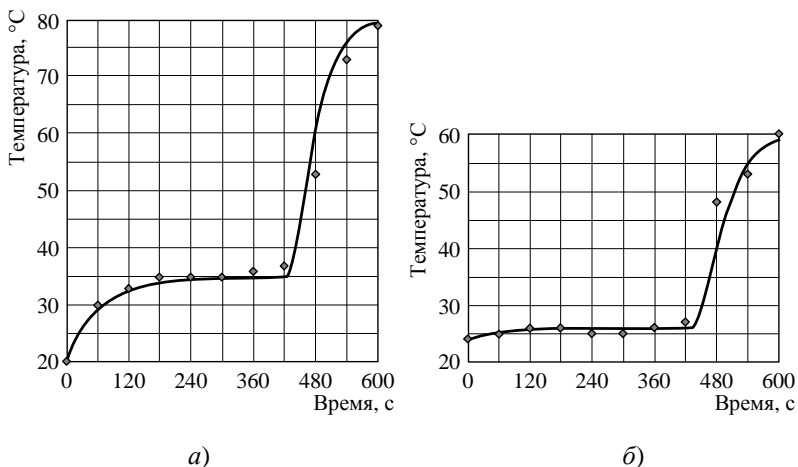
Так как оценить функцию плотности распределения частиц по температуре не представляется возможным, для проверки адекватности математической модели будем использовать сравнение экспериментальных и расчётных значений, полученных по уравнению (2.28). Температурные кривые процесса сушки в виброаэрокипящем слое были получены экспериментально для термолабильных материалов фенил-метил-пиразолона (ФМП) и анилида ацетоуксусной кислоты (АУК).

Температура сушильного агента варьировалась в диапазоне (60...80 °С), начальная температура материала (17...23 °С) и амплитуда колебаний сушильного лотка (0,0015...0,002 м).

Графическое изображение экспериментальных и расчётных зависимостей представлено на рис. 3.6 – 3.7.



**Рис. 3.6. Температура материала (ФМП) при сушке:**  
 сплошная линия – расчётные значения;  $\diamond$  – экспериментальные точки;  
 а –  $t_{c0} = 80$  °С,  $t_0 = 23$  °С,  $A = 0,0015$  м,  $f = 15$  Гц;  
 б –  $t_{c0} = 80$  °С,  $t_0 = 17$  °С,  $A = 0,002$  м,  $f = 15$  Гц



**Рис. 3.7. Температуры материала (анализа АУК) при сушке:**  
 сплошная линия – расчётные значения;  $\diamond$  – экспериментальные точки;  
 а –  $t_{c0} = 80$  °С,  $t_0 = 17$  °С,  $A = 0,002$  м,  $f = 15$  Гц;  
 б –  $t_{c0} = 60$  °С,  $t_0 = 20$  °С,  $A = 0,002$  м,  $f = 15$  Гц

Анализ результатов показал, что среднеквадратичное отклонение экспериментальных и расчётных данных для процесса сушки составляет 2...2,5 °С, для второго периода 3...6 °С, максимальное отклонение для процесса в целом составило 5...9 °С.

Анализ результатов (рис. 3.6, 3.7) позволяет сделать вывод об адекватности математической модели реальному процессу сушки термолабильных материалов в виброаэрокипящем слое.

### 3.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Исследования процесса сушки термолабильных материалов в виброаэрокипящем слое проводим, анализируя характер зависимостей выхода целевого вещества от параметров процесса сушки, с использованием математической модели.

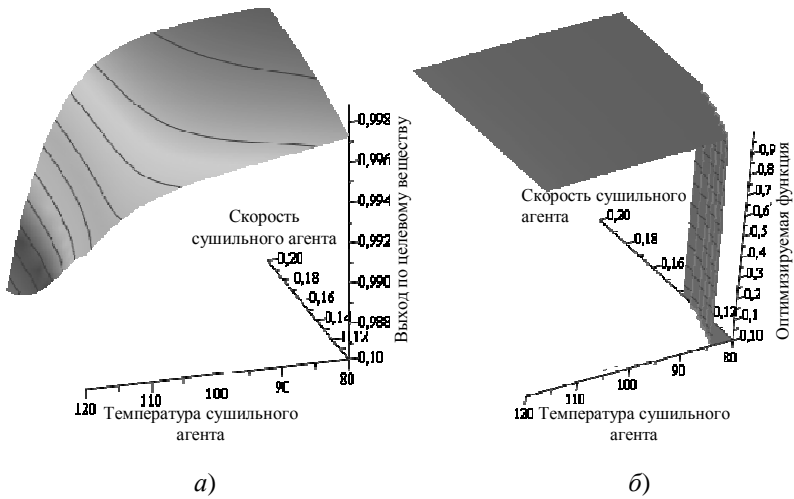
В качестве переменных параметров принимаются начальная температура и скорость сушильного агента. Варьирование производится методом полного перебора, с заданным шагом, в заданной области изменения параметров.

Для оценки влияния параметров процесса сушки на выход целевого вещества в качестве примера приводим результаты исследования для полупродукта (ФМП) и нескольких модельных веществ с фиксированными характеристиками кинетики процесса деструкции ( $n$ ,  $E_a$ ,  $k_0$ ).

Дополнительно проводим сравнение значений функции выхода целевого вещества и оптимизируемой функции  $Y$  (зависимость (2.37)).

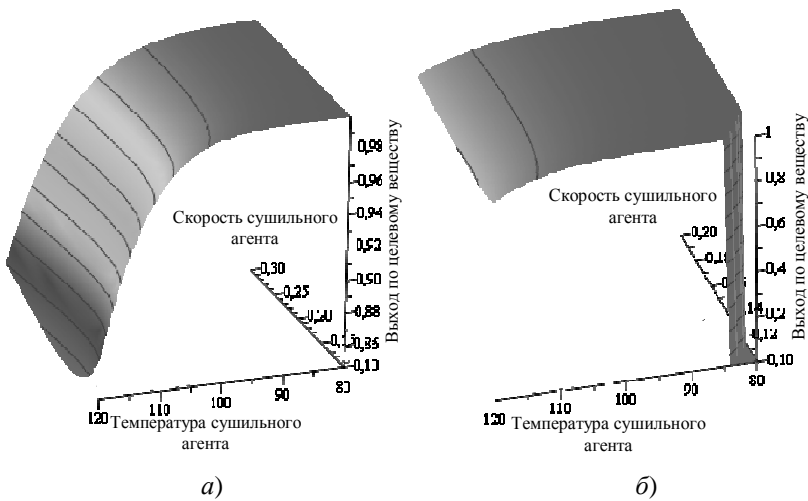
Графические изображения для функций  $\Omega$  и  $Y$  в диапазоне изменения скорости сушильного агента 0,1...0,2 м/с и температуры 80...120 °С для материала ФМП приведены на рис 3.8. Количество варьируемых точек равно 50 по обоим параметрам.

Для модельных веществ принимались характеристики процесса деструкции так, чтобы можно было оценить их влияние на вид зависимости функций  $\Omega$  и  $Y$  от варьируемых параметров. Для этого проводили изменение параметров процесса сушки со следующими значениями порядка реакции деструкции – 0,2, 0,5 и 0,9, и энергии активации – 30, 50 и 100 кДж/моль, получив таким образом 9 точек для оценки параметров  $\Omega$  и  $Y$ . Значения предэкспоненциального множителя  $k_0$  принимали таким образом, чтобы минимальное значение выхода по целевому веществу изменялось в пределах (0,5...0,95), для удобства визуальной оценки характера зависимости. Количество точек для расчёта принимали 50 по обоим параметрам.

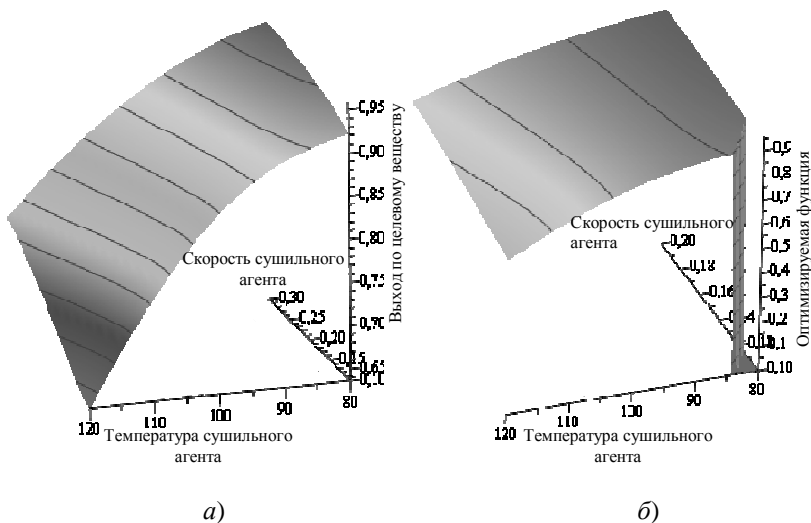


**Рис. 3.8. Функции  $\Omega$  (a) и  $Y$  (a) для ФМП в зависимости от изменения параметров процесса сушки:**  
 $n = 0,27$ ,  $E_a = 59,7$  кДж/моль,  $v_h \in [0,1; 0,2]$ ,  $t_{c0} \in [80; 120]$

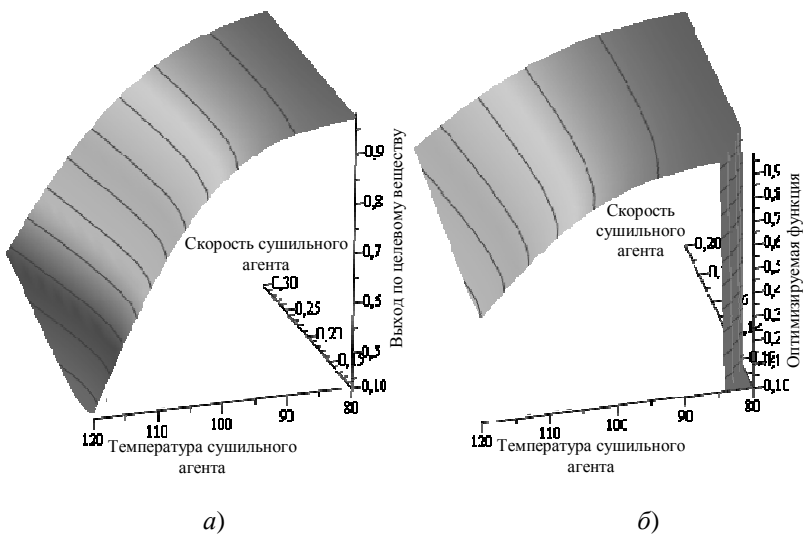
Графические изображения зависимостей для модельных веществ представлены на рис. 3.9 – 3.17.



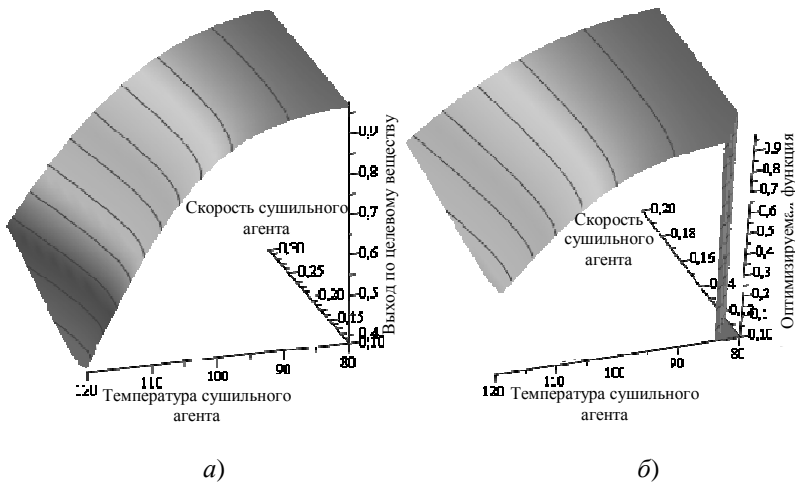
**Рис. 3.9. Функции  $\Omega$  (a) и  $Y$  (a) для ФМП в зависимости от изменения параметров процесса сушки:**  
 $n = 0,5$ ,  $E_a = 100$  кДж/моль,  $v_h \in [0,1; 0,3]$ ,  $t_{c0} \in [80; 120]$



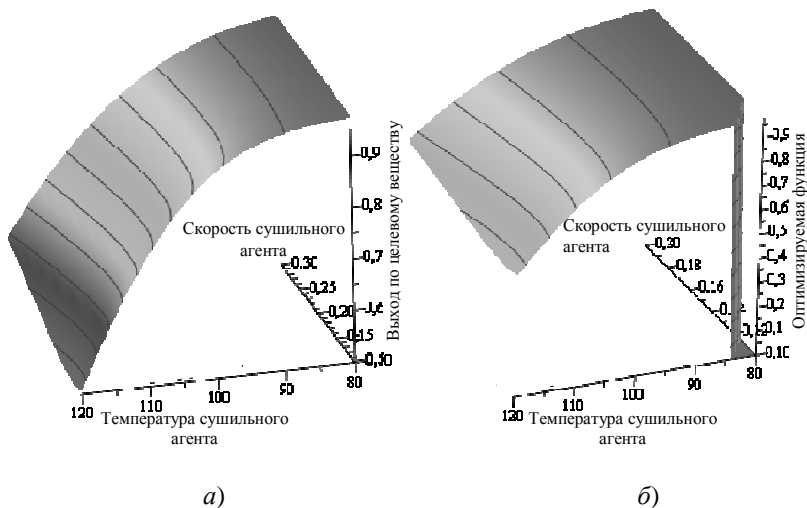
**Рис. 3.10. Функции  $\Omega$  (a) и  $Y$  (a) в зависимости от изменения параметров процесса сушки:**  
 $n = 0,5$ ,  $E_a = 30$  кДж/моль,  $v_h \in [0,1; 0,3]$ ,  $t_{c0} \in [80; 120]$



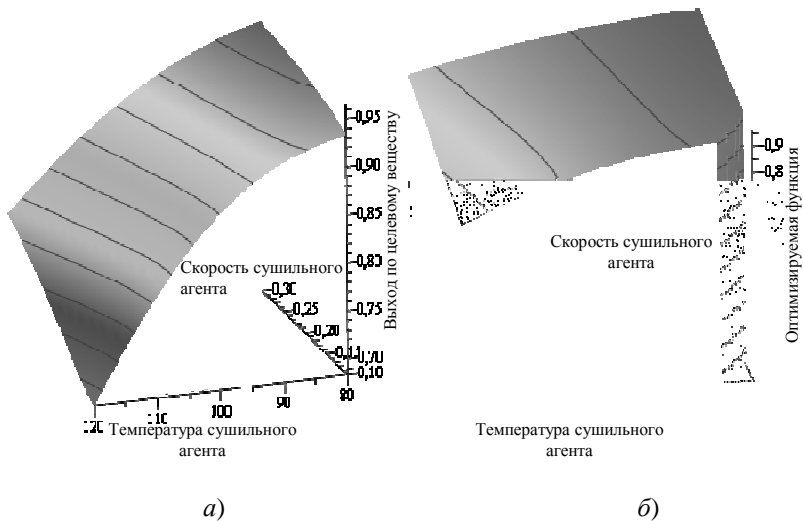
**Рис. 3.11. Функции  $\Omega$  (a) и  $Y$  (a) в зависимости от изменения параметров процесса сушки:**  
 $n = 0,5$ ,  $E_a = 50$  кДж/моль,  $v_h \in [0,1; 0,3]$ ,  $t_{c0} \in [80; 120]$



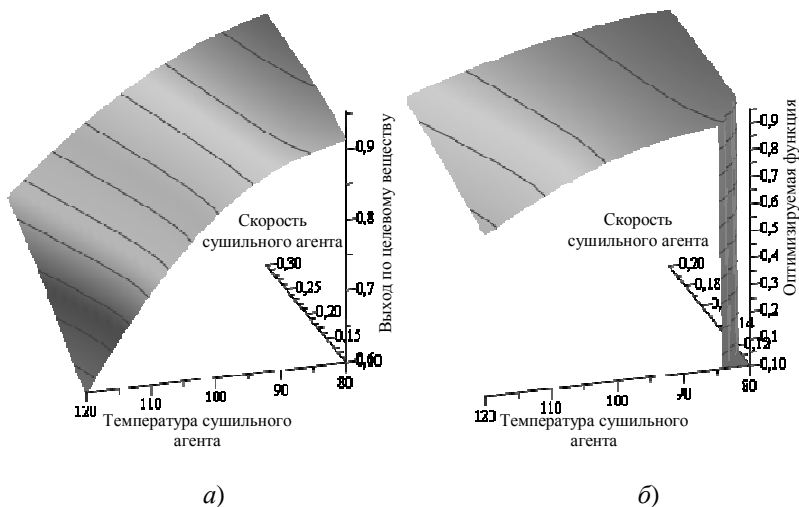
**Рис. 3.12. Функции  $\Omega$  (a) и  $Y$  (a) в зависимости от изменения параметров процесса сушки:**  
 $n = 0,2$ ,  $E_a = 50$  кДж/моль,  $v_h \in [0,1; 0,3]$ ,  $t_{c0} \in [80; 120]$



**Рис. 3.13. Функции  $\Omega$  (a) и  $Y$  (a) в зависимости от изменения параметров процесса сушки:**  
 $n = 0,9$ ,  $E_a = 50$  кДж/моль,  $v_h \in [0,1; 0,3]$ ,  $t_{c0} \in [80; 120]$

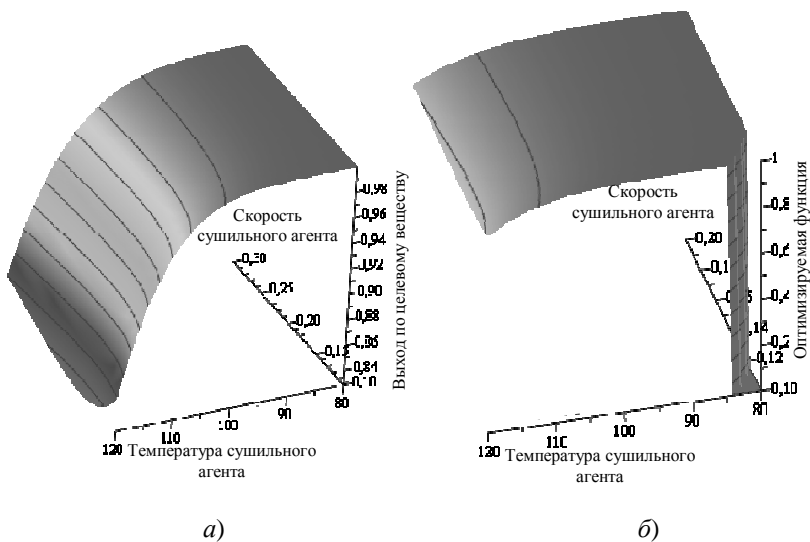


**Рис. 3.14. Функции  $\Omega$  (a) и  $Y$  (a) в зависимости от изменения параметров процесса сушки:**  
 $n = 0,9$ ,  $E_a = 30$  кДж/моль,  $v_h \in [0,1; 0,3]$ ,  $t_{c0} \in [80; 120]$

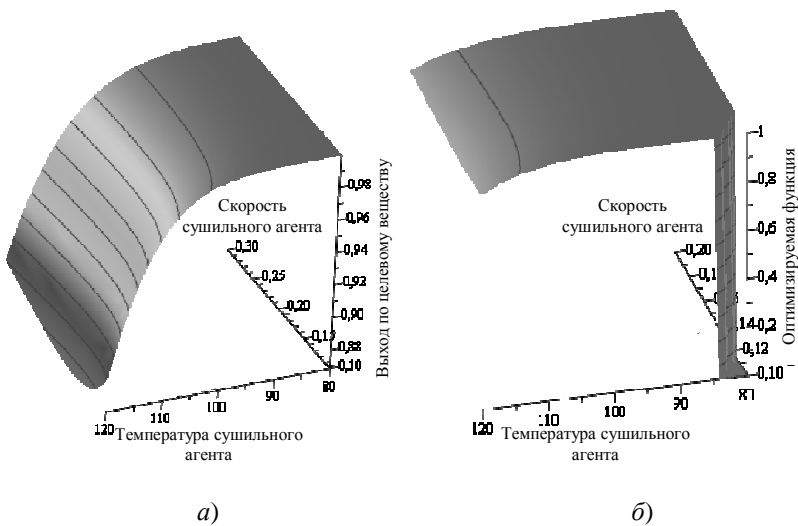


**Рис. 3.15. Функции  $\Omega$  (a) и  $Y$  (a) в зависимости от изменения параметров процесса сушки:**  
 $n = 0,2$ ,  $E_a = 30$  кДж/моль,  $v_h \in [0,1; 0,3]$ ,  $t_{c0} \in [80; 120]$





**Рис. 3.16. Функции  $\Omega$  (a) и  $Y$  (a) в зависимости от изменения параметров процесса сушки:**  
 $n = 0,2$ ,  $E_a = 100$  кДж/моль,  $v_h \in [0,1; 0,3]$ ,  $t_{c0} \in [80; 120]$



**Рис. 3.17. Функции  $\Omega$  (a) и  $Y$  (a) в зависимости от изменения параметров процесса сушки:**  
 $n = 0,9$ ,  $E_a = 100$  кДж/моль,  $v_h \in [0,1; 0,3]$ ,  $t_{c0} \in [80; 120]$

Разница в значениях функций  $\Omega$  и  $Y$  для ФМП и модельных веществ связана с различием в кинетических коэффициентах для уравнения скорости сушки (для модельных веществ брались усреднённые величины для четырёх ПОК,  $k_1 = 0,7$ ,  $k_2 = 0,85$ ).

Анализ графических зависимостей (рис. 3.9 – 3.17) показал, что для всех модельных веществ максимальное значение выхода по целевому веществу наблюдается при минимальном значении температуры и максимальной скорости сушильного агента, что согласуется с результатами экспериментальных исследований процесса сушки ПОК.

На характер зависимости выхода целевого вещества от варьируемых параметров температуры и скорости сушильного агента влияет значение энергии активации процесса деструкции при малых значениях энергии активации (30 кДж/моль). Зависимость выхода целевого вещества от скорости сушильного агента в исследуемом диапазоне имеет линейный характер, с максимумом при наибольших значениях скорости сушильного агента, при больших энергиях активации (50 и 100 кДж/моль) в графической зависимости появляется минимум, в точке близкой к наименьшим значениям скорости сушильного агента, при увеличении энергии активации минимум становится более явно выраженным и смещается в сторону увеличения значений скорости сушильного агента.

При увеличении энергии активации наблюдается увеличение влияния температуры на выход целевого вещества. Аналогичный вывод следует из анализа уравнения кинетики химической реакции.

Уменьшение порядка реакции при прочих равных варьируемых параметрах приводит к большим потерям целевого вещества.

#### 3.4. ОЦЕНКА ВЫХОДА ЦЕЛЕВОГО ВЕЩЕСТВА ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ ПРОДУКТОВ ПОСЛЕ ТЕРМООБРАБОТКИ (СУШКИ)

Предложенный алгоритм расчёта, описывающий процесс сушки термолабильных материалов в виброаэрокипящем слое, позволяет рассчитывать выход по целевому веществу при заданных параметрах процесса, однако он является достаточно сложным и требует много ресурсов машинного времени для расчёта.

Исходя из этого, данный алгоритм может быть рекомендован для исследовательских целей, требующих большой точности и широты охвата исследуемых параметров. Для инженерных же расчётов предлагается на основе данного алгоритма создать более простой, но позволяющий с достаточной для инженерных расчётов точностью опреде-

лять выход целевого вещества при заданных параметрах процесса сушки.

Методику, использующую более простой алгоритм и требующую меньше расчётов, реализуем на основании значений скорости сушки материала и скорости деструкции целевого вещества в конечный момент времени. Для этого вводится понятие относительной скорости деструкции ( $Rv$ ), равной отношению скорости деструкции к скорости сушки для одиночной частицы, выраженной в моль/с:

$$Rv = \frac{r_{x.p}}{v_{vl\_mol} S_s}, \quad (3.33)$$

$$v_{vl\_mol} = \frac{v_{vl}}{M_a}. \quad (3.34)$$

С учётом уравнений (3.15) и (3.34), для второго периода сушки имеем:

$$Rv = \frac{k_0 M_a v_{qs}^{2/3} \left( \frac{M_q}{\bar{x}_{q0} m_{s0}} \right)^{2/3 - n} \left( \frac{6}{\pi d_{s0}^3} \right)^n \exp\left( \frac{-E_A}{Rt} \right)}{\frac{K(t_c - t_m) (u - u_p)^{k_2} \left( \frac{t}{t_m} \right)^{k_1}}{(r + E) (u_{kr} - u_p)}}. \quad (3.35)$$

Примем температуры материала и сушильного агента равными  $t_{c0}$ , влагосодержание материала равное конечному заданному и количество вещества в частице равное начальному (идеализированный случай, материал досушился до заданного влагосодержания и не разложился), тогда выражение (3.35) примет вид:

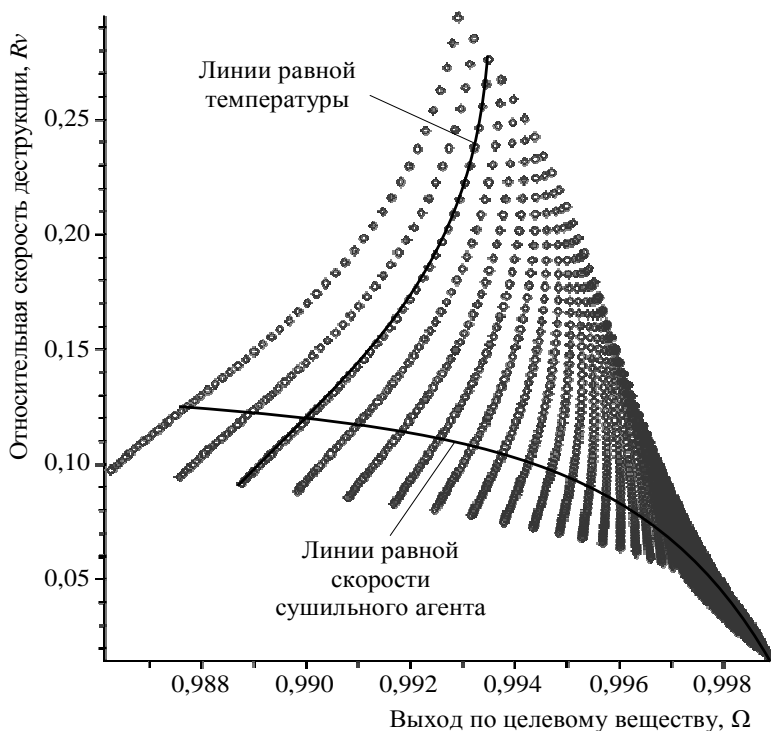
$$Rv = \frac{k_0 M_a (\bar{x}_{q0})^{n-2/3} \left( \frac{\rho}{M_q} \right)^n \exp\left( \frac{-E_A}{Rt_{c0}} \right)}{\frac{K(t_{c0} - t_m) (u_{kz} - u_p)^{k_2} \left( \frac{t_{c0}}{t_m} \right)^{k_1}}{(r + E) (u_{kr} - u_p)}}. \quad (3.36)$$

Исследуем характер зависимости критерия  $Rv$  от параметров процесса сушки и выхода целевого вещества, варьируя начальную температуру и скорость сушильного агента.

Результаты исследований для ФМП представлены в виде графической зависимости на рис. 3.18.

Анализ зависимости, представленной на рис. 3.18 показывает, что связать относительную скорость деструкции и выход целевого вещества однозначной зависимостью нельзя, необходимо учитывать также параметры процесса сушки.

Предлагается зафиксировать какой-либо из варьируемых параметров, и построить график зависимости относительной скорости деструкции для фиксированного параметра процесса сушки, повторяя эту процедуру для нескольких значений, строится диаграмма зависимости относительной скорости деструкции от выхода целевого вещества и выбранных параметров процесса сушки.

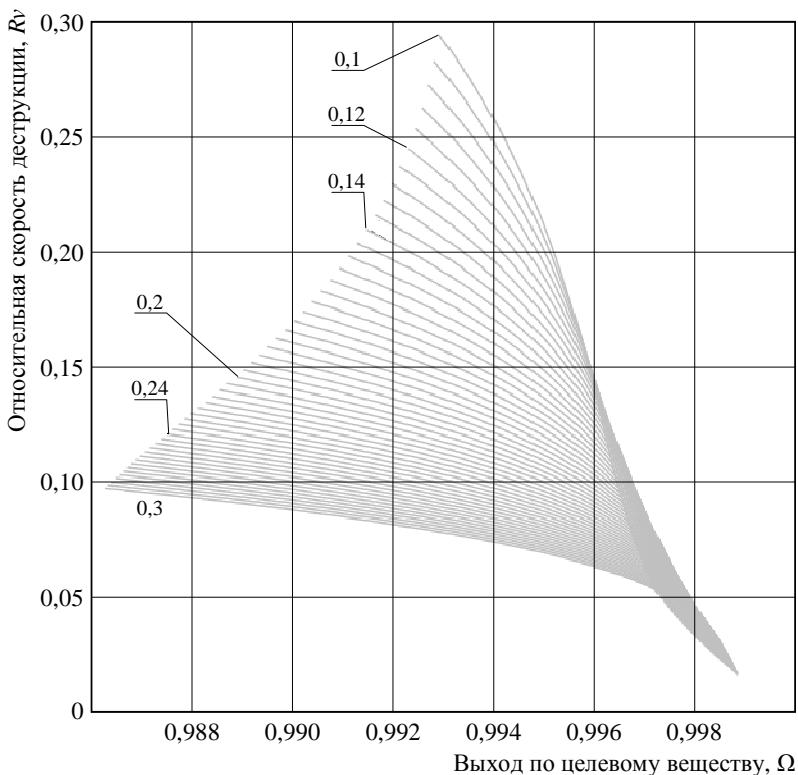


**Рис. 3.18. Зависимость относительной скорости деструкции от выхода целевого вещества и от параметров процесса сушки для ФМП**

Для ФМП подобная диаграмма при фиксированных значениях скорости сушильного агента приведена на рис. 3.19.

Таким образом, если для высушиваемого материала получена подобная диаграмма, можно по известным свойствам вещества и параметрам процесса сушки рассчитать критерий  $Rv$ , и по его значению определить выход целевого вещества при данных параметрах процесса сушки.

Полученную графическую зависимость можно аппроксимировать для получения эмпирической зависимости с коэффициентами, индивидуальными для каждого термолабильного продукта.



**Рис. 3.19.** Диаграмма зависимости относительной скорости деструкции от выхода целевого вещества и скорости сушильного агента для ФМП

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен численный алгоритм расчёта математической модели процесса сушки термолабильных материалов и на его основе – программа расчёта математической модели с использованием современных вычислительных методов.

Проведённая оценка адекватности математического описания процесса сушки термолабильных материалов путём сравнения расчётных и экспериментальных данных показала, что среднеквадратичное отклонение экспериментальной и расчётной температур влажного материала составляет 2...2,5 °С, для второго периода 3...6 °С, максимальное отклонение для процесса в целом составило 5...9 °С.

Исследовано поведение предложенной математической модели при варьировании начальной температуры и скорости сушильного агента, а также термолабильных свойств ПОК. В результате, можно заключить следующее:

- максимальное значение выхода целевого вещества, наблюдается при минимальном значении температуры и максимальной скорости сушильного агента;
- наибольшее влияние на значения параметров, соответствующих максимальному значению выхода целевого вещества, оказывает значение энергии активации процесса деструкции целевого вещества;
- уменьшение порядка реакции при прочих равных характеристиках приводит к большим потерям целевого вещества.

Предложена инженерная методика оценки величины выхода целевого вещества, реализуемая на основе значений скорости сушки материала и деструкции целевого вещества в конечный момент времени и позволяющая определить его выход при заданных параметрах процесса и свойствах высушиваемого материала.

## ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$A$  – амплитуда колебаний решётки, м;  $C$  – концентрация целевого вещества, моль/м<sup>3</sup>;  $c$  – теплоёмкость, Дж/(кг·К);  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $d$  – диаметр, м;  $E$  – удельная энергия связи влаги с материалом, Дж/кг;  $E_A$  – энергия активации, Дж/моль;  $f$  – частота колебаний, Гц;  $G$  – массовый расход, кг/с;  $h$  – координата по высоте слоя, м;  $k_0$  – предэкспоненциальный множитель;  $\ell$  – координата по длине слоя, м;  $m$  – масса, кг;  $n$  – порядок реакции;  $p$  – давление, Па;  $p_u$  – функция распределения частиц по влагосодержанию;  $p_t$  – функция распределения частиц по температуре;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $r$  – удельная теплота испарения влаги, Дж/кг;  $Rv$  – относительная скорость деструкции;  $S$  – площадь, м<sup>2</sup>;  $t$  – температура, °С;  $u$  – влагосодержание материала, кг/кг;  $u_p$  – равновесное влагосодержание материала, кг/кг;  $v_\ell$  – скорость движения материала, м/с;  $v_h$  – скорость движения сушильного агента, м/с;  $v_{vl}$  – скорость сушки, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $x$  – влагосодержание сушильного агента, кг/кг;  $Re$  – критерий Рейнольдса;  $Nu$  – критерий Нуссельта;  $\alpha$  – угол наклона короба аппарата к горизонту, град.;  $\beta$  – угол наклона направления колебаний к лотку аппарата, град.;  $v$  – количество вещества, моль;  $\varepsilon$  – порозность слоя;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\Omega$  – выход по целевому веществу;  $\tau$  – время, с;  $\bar{\tau}$  – среднее время пребывания материала в аппарате, с;  $\sigma_\theta^2$  – дисперсия среднего времени пребывания;  $\varphi(\theta)$  – функция распределения времени пребывания частиц в аппарате в безразмерном виде;  $\psi(r)$  – функция распределения частиц по размеру.

## Индексы

$0$  – начальные значения параметров;  $c$  – сушильный агент;  $v$  – пар;  $a$  – вода;  $k$  – конечное;  $nas$  – насыщения;  $s$  – одиночная частица материала;  $vl$  – влага;  $pl$  – псевдоожижение;  $vit$  – витание;  $st$  – слой материала;  $vpl$  – вибропсевдоожижение;  $f$  – фронт химической реакции;  $q$  – целевое вещество;  $kp$  – примеси;  $mol$  – молярное;  $ia$  – И-кислота;  $ga$  – Гамма-кислота;  $fmp$  – фенил-метил-пиразолон;  $aAUK$  – анилид ацетоуксусной кислоты.

## Аббревиатура

ПОК – полупродукты органических красителей; СИН – сушилка с инертным носителем; ВГС – вакуум-гребковая сушиллка; СВЛ – сушиллка вальцеленточная; ХТП – химико-технологический процесс.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аладьев, В.З. Программирование и разработка приложений в Maple / В.З. Аладьев, В.К. Бойко, Е.А. Ровба. – Гродно : ГрГУ; Таллинн : Междунар. Акад. Ноосферы, Балт. отд-ние, 2007. – 458 с.
2. Аликберова, Л.Ю. Основы строения вещества : методическое пособие [электронный ресурс] / Л.Ю. Аликберова, Е.В. Савинкина, М.Н. Давыдова. – М. : МИТХТ, 2004.
3. Базилевич, Л.П. Современная аппаратура для сушки токсичных сыпучих материалов / Л.П. Базилевич, А.К. Жебровский // Химическое, нефтеперерабатывающее и целлюлознобумажное машиностроение. – 1966. – № 2. – С. 19–20.
4. Баркан, Д.Д. Виброметод в строительстве / Д.Д. Баркан. – М. : Госстройиздат, 1959. – 120 с.
5. Бахвалов, Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М. : Бином, 2004. – 634 с.
6. Блехман, И.И. Что может вибрация? / И.И. Блехман. – М. : Наука, 1988. – 208 с.
7. Блехман, И.И. Вибрационное перемещение / И.И. Блехман, Г.Ю. Джанелидзе. – М. : Наука, 1964. – 198 с.
8. Бондаренко, И.С. Локальная порозность виброкипящего слоя при круговой траектории рабочей камеры аппарата / И.С. Бондаренко, В.Д. Гвоздев, В.Г. Табунщиков // Гидродимика, тепло- массообмен в зернистых средах : Межвуз. сб. науч. тр. – Иваново, 1983. – С. 50 – 54.
9. Брянкин, К.В. Кинетика и аппаратурное оформление процесса сушки полупродуктов органических красителей на инертных телах : дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / К.В. Брянкин. – Тамбов, 1997. – 190 с.
10. Математическое моделирование процесса сушки термолабильных материалов в кипящем слое / К.В. Брянкин, А.А. Дегтярёв, Н.Е. Пахлова, И.В. Панова // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-22 : сб. тр. XXII Междунар. науч. конф.: в 10 т. / под общ. ред. В.С. Балакирева. – Псков : Изд-во Псков. гос. политехн. ун-та, 2009. – Т. 9. Секция 10. – С. 125 – 127.
11. Бубнова, Р.С. Термический анализ и фазовые равновесия / Р.С. Бубнова, С.К. Филатов, А.А. Фотиев. – Пермь : Изд-во ПГУ, 1988. – 155 с.
12. Исследование закономерностей образования статического разрежения под виброкипящим слоем / М.Ф. Букарева, Р.А. Татевосян, В.А. Членов и др. // ТОХТ. – 1974. – Т.8, № 1. – С. 139 – 142.
13. Бурштейн, К.Я. Квантовохимические расчёты в органической химии и молекулярной спектроскопии / К.Я. Бурштейн, П.П. Шорыгин. – М. : Наука, 1989. – 104 с.



14. Варсанюфьев, В.Д. Вибрационная техника в химической промышленности / В.Д. Варсанюфьев, Э.Э. Кольман-Иванов. – М. : Химия, 1985. – 240 с.
15. Вержбицкий, В.М. Основы численных методов / В.М. Вержбицкий. – М. : Высшая школа, 2002. – 840 с.
16. Волик, Р.Н. Некоторые теоретические вопросы воздействия вертикальных вибраций на слой зернового материала и экспериментальные исследования / Р.Н. Волик // Проблемы сепарирования зерна и других сыпучих продуктов. – М. : ВНИИЗ, 1963. – 146 с.
17. Ворожцов, Е.В. Разностные методы решения задач механики сплошных сред. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 1998. – 86 с.
18. Об агрегатировании дисперсных материалов в вибрирующем слое / А.П. Ворошилов, А.В. Васильев, В.И. Муштаев и др. // Современные машины и аппараты химических производств / Химтехника-83. 3 Всесоюзн. науч. конф. – Ташкент, 1983. – С. 140–141.
19. Об определении скорости начала виброаэрооживления увлажненных дисперсных материалов / А.П. Ворошилов, А.Р. Якуба, А.В. Васильев и др. // Совершенствование техники, технологии сушки сельскохозяйственных и пищевых продуктов : Всесоюзн. науч.-техн. конф. – М., 1984. – С. 102 – 104.
20. Ворошилов, А.П. Сушка дисперсных химических реактивов в виброаэрооживленном слое : дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / А.П. Ворошилов – М. : ВНИИ химических реактивов и особо чистых химических веществ, 1987. – 225 с.
21. Гельперин, Н.И. Основы техники сушки / Н.И. Гельперин, В.Г. Айнштейн, В.Б. Кваша. – М. : Химия, 1967. – 664 с.
22. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М. : Высшая школа, 2005. – 479 с.
23. Голубев, Л.Г. Сушка в химико-фармацевтической промышленности / Л.Г. Голубев, Б.С. Сажин, Е.Р. Валашев. – М. : Медицина, 1978. – 272 с.
24. Грандберг, И.И. Органическая химия / И.И. Грандберг. – М. : Дрофа, 2001. – 672 с.
25. Грибкова, Л.В. О локальных амплитудах колебаний частиц сыпучей массы в процессе вибрационной обработки / Л.В. Грибкова, А.И. Сарахов, Т.Т. Грибняк // ТОХТ. – 1972. – Т. 6, № 1. – С. 94 – 97.
26. Грибов, В.Д. Квантовая химия : учебник для студентов химических и биологических специальностей высших учебных заведений / В.Д. Грибов, С.П. Муштахова. – М. : Гардарики, 1999. – 387 с.
27. Исследование яблочной кислоты методом ДСК и ДТА / В.Н. Данилин, Л.В. Боровская, Л.Ф. Пышная, Л.С. Смирнова // Физико-химический анализ свойств многокомпонентных систем [Электронный научный журнал]. – 2007. – Вып. V.

28. Дэвидсон, И. Новое в теории и практике псевдооживления / И. Дэвидсон, Д. Кейрнз. – М. : Мир, 1980. – 192 с.
29. Дэвидсон, И. Псевдооживление / И. Дэвидсон, Д. Харрис. – М. : Химия, 1974. – 760 с.
30. Дэвидсон, И. Псевдооживление твёрдых частиц / И. Дэвидсон, Д. Харрис. – М. : Химия, 1965. – 184 с.
31. Зайцев, Е.Д. Гидродинамика и межфазный теплообмен в виброаэрокипящем слое / Е.Д. Зайцев // Химическая промышленность. – 1990. – № 1. – С. 42 – 44.
32. Земскова, В.Т. Математическое описание процесса сушки дисперсных материалов в сушилке виброкипящего слоя с направленным перемещением материала / В.Т. Земскова, Н.Н. Барабанов, В.Ф. Фролов // Изв. Вузов.: Химия и химическая технология. – 1984. – Т. 27 – Вып. 1. – С. 104 – 108.
33. Исследование гидродинамики вибропсевдооживленного слоя сложных эфиров целлюлозы с использованием математико-статистических методов планирования эксперимента / Г.Л. Ижорин, В.И. Муштаев, В.А. Чевиленко и др. // Сушка и грануляция продуктов микробиологического и тонкого химического синтеза. : Тез. докл. респ. науч. конф. – Тамбов. – 1981. – С. 179–180.
34. Ингольд, К. Теоретические основы органической химии / К. Ингольд. – М. : Мир, 1973. – 1054 с.
35. Перемешивание во взвешенных слоях / Г.Д. Кавецкий, Л.В. Никонов, В.Н. Картечин и др. // Химическая технология топлив и масел. – 1976 – Т. 10. – С. 6 – 14.
36. Кавецкий, Г.Д. Аэродинамика виброаэропсевдооживленного слоя / Г.Д. Кавецкий, Л.В. Никонов, Н.Г. Крохин // ТОХТ. – 1976. – Т. 10, № 6. – С. 935 – 937.
37. Каганович, Ю.Я. Промышленные установки для сушки в кипящем слое / Ю.Я. Каганович, А.Г. Злобинский. – Л. : Химия, 1970. – 176 с.
38. Калиткин, Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. – М. : Наука, 1978. – 512 с.
39. Капустин, Е.А. Динамические характеристики виброкипящего слоя / Е.А. Капустин, В.Н. Просвирнин, И.В. Буторина // ТОХТ. – 1980. – Т. 14, № 5. – С. 720 – 727.
40. Карамзин, В.Д. Техника и применение вибрирующего слоя / В.Д. Карамзин. – Киев : Наукова думка, 1977. – 174 с.
41. Кафаров, В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов. – М. : Высшая школа, 1991. – 400 с.

42. Кафаров, В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В.В. Кафаров. – М. : Химия, 1971. – 496 с.
43. Кафаров, В.В. Программирование и вычислительные методы в химии и химической технологии / В.В. Кафаров, В.Н. Ветохин, А.И. Бояринов. – М. : Наука, 1972. – 487 с.
44. Кобзев, Г.И. Применение неэмпирических и полуэмпирических методов в квантово-химических расчётах : учебное пособие / Г.И. Кобзев. – Оренбург : ГОУ ОГУ, 2004. – 150 с.
45. Колосов, И.В. Контактные взаимодействия в процессе образования виброкипящего слоя в высокодисперсных порошках / И.В. Колосов, В.Е. Черномаз, Н.Б. Урьев // ТОХТ. – 1982. – Т. 16, № 2. – С. 46 – 48.
46. Колосов, И.В. К теории виброожижения структурированной дисперсной системы в плоском канале / И.В. Колосов, Н.Б. Урьев // ТОХТ. – 1986. – Т. 20, № 3. – С. 414 – 416.
47. Кошляков, Н.С. Уравнения в частных производных математической физики / Н.С. Кошляков, Э.Б. Глинер, М.М. Смирнов. – М. : Высшая школа, 1970. – 712 с.
48. Кубасов, А.А. Химическая кинетика и катализ. Часть 2. Теоретические основы химической кинетики / А.А. Кубасов. – М., 2005. – 158 с.
49. Влияние чистоты Р-соли на интенсивность процесса сушки / А.И. Леонтьева, Н.П. Утробин, К.В. Брянкин и др. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1997. – Т. 3, № 1–2. – С. 100 – 104.
50. Исследование кинетики процесса сушки полупродуктов красителей (Р-соли) на одиночной частице / А.И. Леонтьева, Н.П. Утробин, К.В. Брянкин и др. // Вестник Тамбовского государственного университета им. Г.Р. Державина. – Тамбов, 1996. – Т. 1 – Вып. 2. – С. 163 – 165.
51. Леонтьева, А.И. Кинетика, технология и комплексное аппаратно-технологическое совершенствование заключительных стадий производства полупродуктов органических красителей (выделение, фильтрование, удаление примесей, сушка) : дис. ... док-ра техн. наук: 05.17.08, 05.17.04 / А.И. Леонтьева. – Тамбов, 2005. – 402 с.
52. Сравнительный анализ кинетических характеристик процессов сушки полупродуктов органических красителей / А.И. Леонтьева, Н.П. Утробин, П.А. Фефелов // Проблемы химии и химической технологии : тез. докл. 3-й регион. науч.-техн. конф. – Воронеж, 1995. – С. 133–134.
53. Лупи, А. Солевые эффекты в органической и металлоорганической химии / А. Лупи, Б. Чубар. – М. : Мир, 1991. – 376 с.

54. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – 2-е изд. – М. : Энергия, 1968. – 471 с.
55. Лыков, М.В. Сушка в химической промышленности / М.В. Лыков. – М. : Химия. 1970. – 432 с.
56. Марковский, В.М. Исследование распределения давления в виброкипящем слое / В.М. Марковский, Н.И. Сыромятников // ТОХТ. – 1972. – Т. 6, № 6. – С. 932–933.
57. Марковский, В.М. Об аналогии между виброкипящим слоем и жидкостью / В.М. Марковский, Б.Г. Сапожников, Н.И. Сыромятников // ТОХТ. – 1974. – Т. 8, № 4. – С. 636 – 638.
58. Матье, Ж. Курс теоретических основ органической химии / Ж. Матье, Р. Панико – М. : Мир, 1975. – 556 с.
59. Курс общей химии / Э.И. Мингулина, Г.Н. Масленникова, Н.В. Коровин, Э.Л. Филиппов. – М. : Высшая школа, 1990. – 446 с.
60. Исследование гидродинамики при сушке полимерных материалов в виброкипящем слое / В.И. Муштаев, Б.М. Коротков, В.А. Чевиленко и др. // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1973. – № 12. – С. 13–14.
61. Муштаев, В.И. Физическая модель псевдооживления в условиях вибрации и определение скорости начала вибропсевдооживления / В.И. Муштаев, В.А. Чевиленко, А.Н. Плановский // Расчёт и конструирование массообменных аппаратов. : Тр. МИХМа. – 1974. – С. 74 – 79.
62. Накорчевский, А.И. Математическая модель динамики агломерации в аэровиброкипящем слое / А.И. Накорчевский // ТОХТ. – 1995. – Т. 29, № 5. – С. 500 – 503.
63. Никитин, В.С. Конструктивные особенности аппаратов с вращающимся слоем для сушки гранулированных и тонкодисперсных материалов / В.С. Никитин, Г.Ф. Пучков, О.Г. Мартынов // Сушка и грануляция продуктов микробиологического и тонкого химического синтеза. : Тез. докл. респ. науч. конф. – Тамбов, 1981. – С. 100.
64. Измерение запасённой энергии в сульфиде цинка калориметрическим методом / А.П. Оконечников, Ф.Ф. Гаврилов, А.П. Зырянов, И.Т. Путиев // Теплофизика. Вып. 1. : Тр. отдела физико-технических проблем энергетики. – Свердловск, 1971. – С. 71 – 75.
65. Осипов, А.В. Химические реакторы с виброперемешиванием / А.В. Осипов, В.И. Лосик, Б.Л. Бабинцева // Химреактор-6 : Тез. Всесоюз. конф. – Дзержинск. – 1977. – С. 239–240.
66. Осинский, В.П. Вибрационные сушильные установки для сыпучих материалов / В.П. Осинский // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1994. – № 8. – С. 8 – 10.
67. Основные направления в создании оборудования для сушки пищевых продуктов / Оборудование для пищевой промышленности.

Обзорная информация. – М. : ЦНИИТЭИлегпищемаш, 1984. – Вып. 1. – 68 с.

68. Павлов, А.С. Оценка режима движения дисперсной фазы в проточном аппарате с виброожиженным слоем / А.С. Павлов, В.Е. Бабенко // Химическая промышленность. – 1982. – № 10. – С. 45–46.

69. Пальм, В.А. Основы количественной теории органических реакций / В.А. Пальм. – Л. : Химия, 1977. – 360 с.

70. Пат. 2286520 Российская Федерация, МПК F 26 В 3/08. Способ сушки термолабильных дисперсных материалов / Ю.И. Шишацкий, С.М. Замаев; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Воронежская государственная технологическая академия. – № 2005113779/06; заявл. 05.05.05; опубл. 27.10.06, Бюл. № 30. – 6 с.

71. Петров, И.Б. Лекции по вычислительной математике / И.Б. Петров, А.И. Лобанов. – М. : Бинوم, 2006. – 529 с.

72. Пискунов, Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисление: в 2 т. / Н.С. Пискунов. – М. : Интеграл-Пресс, 2001. – 416 с.

73. Плановский, А.Н. Сушка дисперсных материалов в химической промышленности / А.Н. Плановский, В.И. Муштаев, В.М. Ульянов. – М. : Химия, 1979. – 286 с.

74. Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии / А.Н. Плановский, П.И. Николаев. – М. : Химия, 1972. – 496 с.

75. Потанин, А.А. О текучести виброожиженных систем / А.А. Потанин, Н.Б. Урьев // ТОХТ. – 1989. – Т. 23, № 2. – С. 229 – 234.

76. Путилов, К.А. Термодинамика / К.А. Путилов. – М. : Наука, 1971. – 376 с.

77. Рашковская, Н.Б. Сушка в химической промышленности / Н.Б. Рашковская. – Л. : Химия, 1977. – 80 с.

78. Реусов, А.В. О расширении псевдоожиженного слоя в коническо-цилиндрическом аппарате с вибрирующей решёткой / А.В. Реусов, А.В. Михневич, И.Н. Таганов // ТОХТ. – 1985. – Т. 19, № 1. – С. 69 – 73.

79. Романков, П.Г. Сушка во взвешенном состоянии / П.Г. Романков, Н.Б. Рашковская. – Л. : Химия, 1979. – 272 с.

80. Теория и практика компьютерного моделирования нанообъектов : справочное пособие / Т.А. Романова, П.О. Краснов, С.В. Качин, П.В. Аврамов. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2002. – 223 с.

81. Рыжков, А.Ф. Влияние размеров аппарата на отрыв сыпучего материала от днища при виброкипении / А.Ф. Рыжков, А.П. Баскаков // ТОХТ. – 1974. – Т. 8, № 6. – С. 934 – 936.

82. Рыжков, А.Ф. Вывод уравнения движения засыпки в вибрирующем аппарате / А.Ф. Рыжков, А.П. Баскаков // ИФЖ. – 1974. – Т. 27, № 1. – С. 15 – 22.

83. Рыжков, А.Ф. О выборе оптимальной высоты виброожиженного слоя / А.Ф. Рыжков, Е.М. Толмачев // ТОХТ. – 1983. – Т. 17, № 3. – С. 206 – 213.

84. Сажин, Б.С. Выбор и расчёт сушильных установок на основе комплексного анализа влажных материалов как объектов сушки / Б.С. Сажин, Н.Е. Шадрина. – М. : Изд-во МТИ, 1979. – 93 с.

85. Сажин, Б.С. Научные основы техники сушки / Б.С. Сажин, В.Б. Сажин. – М. : Наука, 1997. – 448 с.

86. Сажин, Б.С. Типовые сушилки со взвешенным слоем материала / Б.С. Сажин, Е.А. Чувпило. – М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1975. – 47 с.

87. Самарский, А.А. Введение в численные методы / А.А. Самарский. – М. : Наука, 1982. – 273 с.

88. Самуилов, Я.Д. Реакционная способность органических соединений : учебное пособие / Я.Д. Самуилов, Е.Н. Черезова. – Казань : Казан. гос. технол. ун-т, 2003. – 419 с.

89. Степанов, Н.Ф. Квантовая механика и квантовая химия / Н.Ф. Степанов. – М. : Мир, 2001. – 519 с.

90. Стромберг, А.Г. Физическая химия / А.Г. Стромберг, Д.П. Семченко. – М. : Высшая школа, 2001. – 527 с.

91. Струмилло, Ч. Проектирование сушилок с кипящим и виброкипящим слоем с использованием ЭВМ / Ч. Струмилло, З. Паковский, Р. Жылла // ЖПХ. – 1986. – № 9. – С. 2108 – 2114.

92. Урьев, Н.Б. Физико-химическая механика в технологии дисперсных систем / Н.Б. Урьев. – М. : Знание, 1975. – 66 с.

93. Фарлоу, С. Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров / С. Фарлоу. – М. : Мир, 1985. – 384 с.

94. Фёдоров, А.С. Моделирование свойств, электронной структуры ряда углеродных и неуглеродных нанокластеров и их взаимодействия с лёгкими элементами [Электронный ресурс] / А.С. Фёдоров, П.Б. Сорокин, П.В. Аврамов, С.Г. Овчинников – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2006.

95. Исследование процесса сушки угля в виброкипящем слое / В.А. Филиппов, П.А. Шишов, В.Н. Лихвацкая и др. // Обогащение и брикетирование угля. – М., 1970. – № 7–8. – С. 25 – 31.

96. Фларри, Р. Квантовая химия. Введение / Р. Фларри. – М. : Мир, 1985. – 472 с.

97. Фрегер, Ю.Л. Об интенсификации процесса конвективной сушки зерна в слое за счёт вибрации / Ю.Л. Фрегер // Техника сушки во взвешенном слое, вып. 5. – М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1966.

98. Фролов, В.Ф. Лекции по курсу ПАХТ / В.Ф. Фролов. – СПб. : Химиздат, 2003. – 608 с.

99. Фролов, В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов / В.Ф. Фролов. – Л. : Химия, 1987. – 208 с.
100. Харин, В.М. Кинетика сушки во взвешенном слое / В.М. Харин, Ю.И. Шишацкий // ТОХТ. – 1995. – Т. 29, № 2. – С. 179 – 186.
101. Хеммингер, В. Калориметрия. Теория и практика / В. Хеммингер, Г. Хене. – М. : Химия, 1990. – 176 с.
102. Хурсан, С.Л. Квантовая механика и квантовая химия : конспекты лекций / С.Л. Хурсан. – Уфа : ЧП Раянов, 2005. – 164 с.
103. Царева, З.М. Основы теории химических реакторов (компьютерный курс) / З.М. Царева, Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, Е.И. Орлова. – Харьков : ХГПУ, 1997. – 624 с.
104. Цирельсон, В.Г. Конспект лекций по квантовой химии [Электронный ресурс] / В.Г. Цирельсон. – РХТУ им. Д.И. Менделеева.
105. Членов, В.А. Виброкипящий слой / В.А. Членов, Н.В. Михайлов. – М. : Наука, 1972. – 344с.
106. Чупрунов, С.Ю. Кинетика и аппаратурное оформление процесса сушки сыпучих полупродуктов органических красителей в виброаэрокипящем слое [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 : защищена 1999 : утв. 2000 / С.Ю. Чупрунов. – Тамбов, 1999. – 203 с.
107. Яковенко, М.М. Установка для сушки термолабильных адгезионных химических реактивов в виброаэрокипящем слое / М.М. Яковенко, И.С. Глух, А.В. Успенский // Химическая промышленность. – 1991. – № 8 – С. 54 – 57.
108. Якуба, А.Р. Исследование процесса сушки дисперсных материалов и разработка новых конструкций сушилок : дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / А.Р. Якуба. – Рубежное. : НИОПИК, 1972. – 162 с.
109. Якуба, А.Р. Критическая скорость псевдооживления увлажнённых материалов / А.Р. Якуба, А.П. Ворошилов, И.Ф. Кузьмин // ЖПХ. – 1985. – № 8. – С. 1936 – 1939.
110. Akiyama, T. Bistability of particle bed surface levels in single tubes immersed in vibrating particle beds / T. Akiyama, K.M. Aoki, Y. Tsuruta // in CD-ROM: World Congress on Particle Technology 3, Brighton, UK, 1998. – Article № 346. – P. 1 – 8.
111. Borde, I. Heat and mass transfer in moving vibrofluidized granular bed / I. Borde, M. Dukhovny, T. Elperin // The 2nd. Israel conference for Conveying and Handling of Particulate Solids. – Jerusalem, Israel, 1997. – P. 1239 – 1245.
112. Borde, I. Heat and mass transfer in vibrofluidized bed / I. Borde, M. Dukhovny, T. Elperin // Drying-98. 11th International Drying Symposium (IDS`98). – Halkidiki, Greece, 1998. – Vol. A. – P. 110 – 117.
113. Keey, B. Drying: principles and practice / B. Keey. – Pergamon Press (Oxford, New York), 1975. – 376 p.

114. Krischer, O. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik / O. Krischer. – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1997. – 489 p.
115. Kudra, T. Thermal processing of bio materials. Series: Topics in Chemical Engineering / T. Kudra, Cz. Strumillo // Gordon & Breach science publishers. – Switzerland, 1986. – 669 p.
116. Leach, A. Molecular modelling. Principles and application / A. Leach. – Pearson education limited, 2001. – 773 p.
117. Perry's chemical engineers' handbook. 7<sup>th</sup> ed / H.C Van Ness., M.M. Abbott – McGraw-Hill Co, 1997. – 2624 p.
118. Strumillo, Cz. Drying of granular product in vibrofluidized beds / Cz. Strumillo, Z. Pakowski. – Washington e. a., 1980. – Drying 80, Vol. 1. – P. 211 – 216.



## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВИБРОАЭРОКИПЯЩЕМ СЛОЕ .....	5
1.1. Специфика физико-химических свойств термолабильных полупродуктов органических красителей .....	5
1.2. Кинетика процесса разложения термолабильных полупродуктов органических красителей .....	6
1.3. Факторы, определяющие термическую стойкость термолабильных материалов .....	7
1.4. Движение дисперсного материала при знакопеременных нагрузках .....	9
1.5. Тепло-массообмен при сушке дисперсных материалов в виброаэрокипящем слое .....	10
1.6. Способы создания виброаэрокипящего слоя дисперсных материалов .....	12
1.7. Перемешивание и перемещение дисперсного материала на плоскости, совершающей возвратно-поступательное движение .....	15
1.8. Математическое моделирование процесса сушки дисперсных термолабильных материалов в виброаэрокипящем слое .....	17
1.9. Моделирование термодеструкции целевого вещества полупродуктов органических красителей .....	19
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ ПРОЦЕССА СУШКИ В ВИБРОАЭРОКИПЯЩЕМ СЛОЕ, ОСЛОЖНЁННОГО ТЕРМОДЕСТРУКЦИЕЙ .....	22
2.1. Расчётная схема процесса сушки в виброаэрокипящем слое .....	22
2.2. Допущения, принятые при математическом описании процесса сушки, осложнённого термодеструкцией, в виброаэрокипящем слое .....	23

2.3.	Выход по целевому веществу в высушиваемом материале .....	24
2.4.	Описание физических свойств высушиваемого материала .....	24
2.5.	Деструкция целевого вещества при термическом воздействии на материал .....	26
2.6.	Описание динамики движения дисперсного материала	27
2.7.	Кинетика удаления влаги при сушке дисперсного материала .....	29
2.8.	Материальный баланс процесса сушки .....	32
	2.8.1. Материальный баланс по влаге дисперсного материала .....	32
	2.8.2. Материальный баланс по влаге сушильного агента .....	33
2.9.	Тепловой баланс процесса сушки .....	35
	2.9.1. Тепловой баланс по дисперсному материалу ...	35
	2.9.2. Тепловой баланс сушильного агента .....	36
2.10.	Определение граничных условий для уравнений теплового и материального балансов процесса сушки дисперсного материала .....	38
2.11.	Расчёт влагосодержания материала на выходе из аппарата .....	42
2.12.	Расчёт количества целевого вещества, подвергшегося термодеструкции .....	42
3.	<b>ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПРОЦЕССА СУШКИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НАЛИЧИИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ЦЕЛЕВОГО ВЕЩЕСТВА .....</b>	<b>44</b>
	3.1. Численная схема расчёта математической модели процесса сушки термолабильных материалов .....	44
	3.2. Адекватность математической модели процесса сушки термолабильных материалов .....	54

3.3.	Исследование процесса сушки термолабильных материалов с использованием математической модели .....	56
3.4.	Оценка выхода целевого вещества термолабильных продуктов после термообработки (сушки) .....	62
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....		66
ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ .....		67
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....		68