

**А.С. КЛИНКОВ, М.В. СОКОЛОВ,
В.Г. ОДНОЛЬКО, П.С. БЕЛЯЕВ**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СМЕСИТЕЛЕЙ
ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ
ПРИ ПОЛУЧЕНИИ КОМПОЗИТОВ
ЗАДАННОГО КАЧЕСТВА
ИЗ ОТХОДОВ ТЕРМОПЛАСТОВ**



Москва, 2012

УДК 621.929.3
ББК Л710.514
П791

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук
профессор кафедры «Гидравлика и теплотехника»
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»

Н.П. Жуков

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник
заместитель директора ОАО «НИИРТМаш»

В.Н. Шашков

П791 Проектирование смесителей периодического действия при получении композитов заданного качества из отходов термопластов / А.С. Клинков, М.В. Соколов, В.Г. Однолько, П.С. Беляев. – М.: Издательский дом «Спектр», 2012. – 196 с.
ISBN 978-5-904270-99-5

Рассмотрены основные технологические и конструктивные аспекты проектирования смесителей периодического действия для получения композитов из отходов термопластов. Особое внимание уделено вопросам моделирования процесса смешения в рабочих зазорах зон деформации перерабатываемого материала в смесителе. Приведена инженерная методика расчета режимных и конструктивных параметров смесителей периодического действия, типа роторных при обеспечении заданного качества получаемых композиционных термопластичных материалов.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и эксплуатацией смесительного оборудования по переработке полимерных материалов, а также аспирантам, магистрантам и студентам старших курсов, специализирующимся в области переработки пластмасс и эластомеров.

УДК 621.929.3
ББК Л710.514

ISBN 978-5-904270-99-5

© Клинков А.С., Соколов М.В., Однолько В.Г.,
Беляев П.С., 2012

ВВЕДЕНИЕ

В наши дни полимерные материалы широко распространены и находят свое применение практически во всех отраслях промышленности любой страны. Соответственно объемам потребления полимеров образуется значительное количество их отходов, создающих серьезную опасность для окружающей среды и человека. Повторная переработка решает проблемы охраны окружающей среды и восполнения дефицита первичного полимерного сырья.

Самыми потребляемыми и востребованными полимерами являются полиолефины. Соответственно, на производство пластиков этой группы уходит большая часть сырья, и они наносят самый большой урон экологии окружающей среды.

Стандартные технологии вторичной переработки не позволяют получить качественное вторсырье. Решением проблемы создания качественных полимерных материалов и изделий из вторичных полиолефинов является его модификация, цель которой – экранирование функциональных групп и активных центров химическими или физико-химическими способами и создание однородного по структуре материала с воспроизводимыми свойствами [1].

Современные тенденции модификации полимерных материалов сводятся к введению малого количества мелкодисперсной фазы модифицирующей добавки. Для успешного протекания таких процессов наполнитель необходимо активировать, т.е. раскрыть его функциональные группы. Существуют следующие способы совмещения полимера с наполнителем: механохимическая активация наполнителей, полимеризационное наполнение, химическое аппретирование (аппретами обрабатывают наполнитель, очень трудоемко и энергоемко).

В настоящее время наиболее распространены полимеризационное наполнение и химическое аппретирование, но они требуют больших трудо- и энергозатрат и в случае модификации вторичного сырья являются невозможными. Поэтому наиболее приемлемой является механохимическая активация.

Традиционным способом механохимической активации является механхимическое смешение расплава или раствора полимера с дисперсными наполнителями на специальном оборудовании [2]. Однако получение наполненного полимерного композиционного материала с хорошими механическими свойствами прямым смешением полимера с наполнителем затруднено из-за неравномерного распределения малых количеств наполнителя в большом объеме высоковязкого полимера, что делает данную задачу еще более актуальной.

Настоящая работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию процесса модифицирования отходов термопластичных полимерных материалов на смесительном оборудовании.

Целью работы являлось исследование процесса модификации вторичного полиэтилена высокого давления (ВПВД) техническим углеродом (ТУ).

В данной работе исследовалось оборудование и процесс модификации вторичного полимерного сырья техническим углеродом с изменением в широком диапазоне технологических и конструктивных параметров.

В соответствие с поставленной целью решались следующие задачи:

- анализ современного состояния в области утилизации и вторичной переработки отходов полимеров;
- обзор существующих методов модификации вторичных полимерных материалов;
- разработка способа модификации вторичных полимеров;
- создание лабораторного стенда для изучения процесса модификации отходов полимеров с изменением в широком диапазоне режимных и конструктивных параметров;
- исследование влияния конструктивных и режимных параметров смесительного оборудования и процесса модификации на показатели качества получаемого композиционного материала (предел прочности и относительное удлинение при разрыве), а также определение значения суммарной величины сдвига, при котором показатели качества композита являются наилучшими;
- разработка методики расчета и программного обеспечения для определения интегрального критерия качества – суммарной величины сдвига, характеризующей влияние различных режимных и конструктивных параметров процесса на физико-механические показатели получаемого композиционного материала;
- создание методики инженерного расчета основных параметров процесса смешения и конструкции смесителя с учетом заданных показателей качества получаемого композита.
- внедрение разработанного способа модификации термопластичных отходов полимеров на двухроторном смесителе.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. ПРОИЗВОДСТВО И ПОТРЕБЛЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Полимерные материалы являются самыми распространенными и универсальными материалами, используемыми практически во всех отраслях промышленности любой страны. Продукцию их переработки можно разделить на следующие виды: изделия производственного назначения, изделия культурно-бытового и хозяйственного назначения, профильно-погонажные изделия (пленки, листы, трубы), тара и упаковка [3, 5].

Основными материалами, служащими сырьем для производства указанных видов изделий являются полиолефины (ПВД, ПНД), поливинилхлорид (ПВХ) с сополимерами винилхлорида, полистирол (ПС) с сополимерами стирола и полиэтилентерефталат (ПЭТ) [3].

Емкость российского рынка пластмассовых изделий с 2000 по 2006 гг. выросла в 2,2 раза и составила 3,6 млн. т; в 2007 г. – по оценке достигла 4,1 млн. т. В структуре внутреннего спроса на продукцию из пластмасс в рассматриваемом периоде тара и упаковка составляет 30...40 %, изделия производственного назначения – 15...18 %, пленки – 16...17 %, профильно-погонажные изделия – 5...18 %, изделия культурно-бытового и хозяйственного назначения – 10...14 %, трубы – 4...9 %, листы – 2...3 % [3].

В 2009 г. расчетное потребление четырех крупнотоннажных полимеров (ПЭ, ПП, ПВХ и ПС) в Российской Федерации сократилось на 15 %. Общий объем внутренних поставок этих полимеров в 2009 г. едва перешагнул отметку 3 млн. т, что соответствует уровню 2006 г. (рис. 1.1) [5].

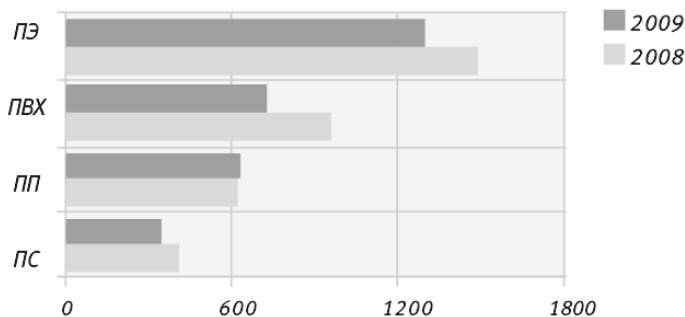


Рис. 1.1. Расчетное потребление полимеров в РФ в 2008 и 2009 гг., тыс. т (источник – «Маркет Репорт»)

По данным TD MarketPublishers.Ltd, до 2010 г. среднегодовой спрос на изделия из пластмассы в России оценивается на уровне 19,6 % [4].

По итогам 2009 г. расчетное потребление полиэтилена всех марок сократилось на 12 % (до 1308 тыс. т). Расчетное потребление ПВД составило 418 тыс. т, что на 30 % ниже показателей предыдущего года. Но объемы российского производства полиэтилена в 2009 г. увеличились на 11 %, до 1,4 млн. т [5].

Рынок полиэтилена низкого давления (ПНД) сократился на 5 % (до 732,5 тыс. т). Общие объемы экспорта в 2009 г. увеличились на 117 %, превысив 433 тыс. т. При этом более 60 % сырья было направлено на рынок Китая – 266 тыс. т, что в 4,5 раза больше поставок 2008 г. Например, экспорт марки 15803-020, выпускаемой «Томск-нефтехимом», увеличился в три раза – до 189 тыс. т.

Больше всего от кризиса 2009 г. пострадал рынок ПВХ, где потребление в минувшем году сократилось на 27 % – до 760 тыс. т (рис. 1.2) [5].

Расчетное потребление полистирола и стирольных пластиков в Российской Федерации на 2009 г. составило около 350 тыс. т, что на 16 % меньше объемов предыдущего года (рис. 1.3). Объемы производства полистирола в 2009 г. сократились на 4 % (до 254,2 тыс. т). Производство УПС/М и ПСС/М снизилось на 3 % [5].

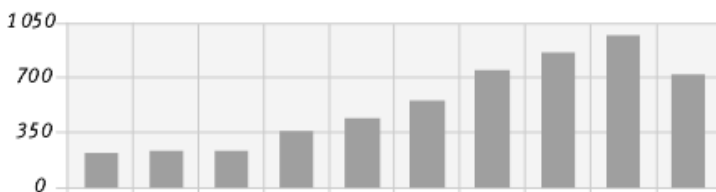


Рис. 1.2. Потребление ПВХ в РФ в 2000 – 2009 гг., тыс. т
(источник – «Маркет Репорт»)

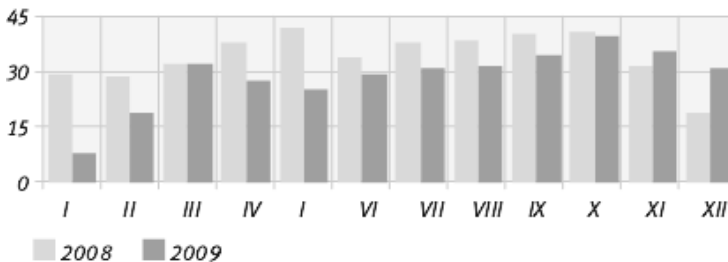


Рис. 1.3. Потребление ПС в РФ в 2008 – 2009 гг., тыс. т
(источник – «Маркет Репорт»)

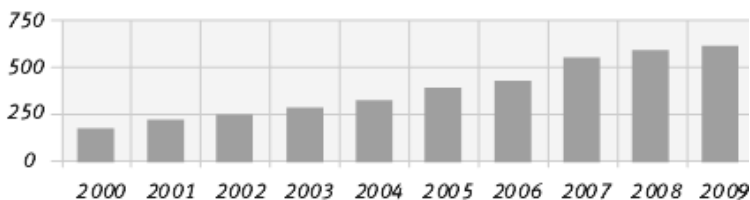


Рис. 1.4. Потребление ПП в РФ в 2000 – 2009 гг., тыс. т
(источник – «Маркет Репорт»)

Расчетное потребление полипропилена в 2009 г. выросло почти на 2 % и достигло 629,7 тыс. т (рис. 1.4). Сегодня российский полипропилен уверенно замещает иностранные марки; импорт полипропилена сократился на 16 %, а внутреннее производство, наоборот, выросло на 20 %. Хорошей новостью является рост объемов экспорта российского ПП более чем в три раза [5].

Снижение спроса внутри страны вернуло российский рынок к модели 2002 – 2005 гг., когда отечественные нефтехимики достаточно много экспортировали. В 2009 г. общие объемы экспорта полимеров выросли более чем в два раза. Особенно сильно выросли поставки в Китай, немного хуже – в Украину и Турцию [5].

Российский рынок пластмассовых изделий в настоящее время на 80,0 % представлен продукцией отечественных производителей. В товарной структуре импорта химической продукции изделия из пластмасс занимают лидирующие позиции, их доля составляет от 21 до 26 % от общего объема импорта. Значительная доля импорта полимерной продукции на российском рынке объясняется неконкурентоспособностью отечественных товаров как по качественным, так и по ценовым параметрам; особенно это относится к листам, полимерным изделиям производственного назначения, профильно-погонажным изделиям [3].

В перспективе до 2015 г. прогнозируется изменение структуры потребления изделий из пластмасс. Удельный вес тары и упаковки, товаров культурно-бытового и хозяйственного назначения сократится, доля труб и листов возрастет, удельные веса прочих сегментов переработки пластмасс практически не изменятся [3].

Самым крупным направлением переработки пластмасс является производство тары и упаковки. Удельный вес этого сегмента в объеме потребления пластмасс сопоставим с показателями в Европе (38 %) и США (29 %). Наибольшим спросом на внутреннем рынке пользуется тара и упаковка из полиэтилена и полиэтилентерефталата. Следом идут упаковочные материалы на основе ПП, ПС и ПВХ. Обеспечение спроса внутреннего рынка на тару и упаковку осуществляется в основном за счет отечественных производителей. У рынка полимерной тары и упаковки есть дальнейшие перспективы развития, обусловленные

как наращиванием объемов производства, так и улучшением качества продукции. Среднегодовые темпы роста внутреннего спроса на тароупаковочные материалы в перспективе до 2015 г. прогнозируются на уровне 4,5 % [3].

Рынок промышленных изделий из пластмасс является быстроразвивающимся, среднегодовые темпы роста потребления изделий производственного назначения составляют 12 %. Основной объем потребляемых в России изделий производственного назначения приходится на изделия из ПП, ПС, ПВД и ПНД, что обусловлено качественными характеристиками и свойствами этих полимеров. В связи с продолжающимся вытеснением традиционных материалов полимерными и в связи с тенденцией значительного увеличения спроса на пластмассовые изделия со стороны различных производств потребление изделий производственного назначения будет расти. При этом значительную роль на российском рынке этих изделий будет играть отечественное производство [3].

Основными видами сырья для производства полимерной пленки являются полиолефины и поливинилхлорид. Удельный вес полиэтиленовых пленок составляет около 45 % российского рынка пленочных материалов, на полипропиленовые и поливинилхлоридные пленки приходится более чем по 20 %. Доля производства в обеспечении спроса внутреннего рынка составляет 70 %. Последние годы наблюдается рост производства более сложных видов пленок: стретч-пленки, многослойной и комбинированной. В странах Западной Европы и США сегодня практически все вводимое в эксплуатацию оборудование по выпуску пленок предназначено для производства многослойных материалов. В России переход с однослойных на многослойные пленки сдерживается дороговизной соответствующего оборудования; тем не менее, в перспективе на российском рынке упаковочных пленок произойдет повышение доли комбинированных, многослойных, ультратонких и высокотехнологичных пленочных материалов [3].

Увеличение объемов строительства (ежегодно более чем на 10 %) вызывает рост спроса на профильно-погонажные и прочие изделия из полимерных материалов. Пластмассы нашли самое широкое применение для изготовления строительных деталей различного назначения: ограждающих конструкций, внутренней отделки зданий, оконных рам и дверей, тепло-, гидро- и звукоизоляции и т.д. Среди полимерных материалов в строительстве доминирует поливинилхлорид, на долю которого на российском рынке приходится около 80 % потребления пластиков. Структура емкости российского рынка профильно-погонажных изделий включает 82...85 % изделий на основе поливинилхлорида, 10...12 % изделий из полистирола, 5...6 % изделий из полиолефинов. Рынок профильно-погонажных изделий в значительной степени импортозависим, однако развивается по пути активного им-

портозамещения. Доля отечественного производства в обеспечении спроса внутреннего рынка с 2000 по 2007 гг. возросла с 30 до 70 %. В перспективе прогнозируется дальнейшее увеличение этого показателя, поскольку практически все предприятия, выпускающие профильно-погонажные изделия, наращивают мощности и расширяют ассортиментный ряд [3].

Такие свойства полимеров, как легкость, термостойкость, экологическая чистота, прочность, хороший товарный вид обеспечивают возможность их использования в широком спектре бытовых товаров. Среднегодовые темпы роста потребления изделий культурно-бытового и хозяйственного назначения составляют 10 %. Внутренний рынок товаров культурно-бытового и хозяйственного назначения на 70...75 % состоит из полиэтиленовых изделий, по 10...15 % приходится на полистирольные и полипропиленовые изделия, незначительную часть составляют изделия из поливинилхлорида, поликарбоната, полиамида и др. полимеров. По оценке специалистов, максимальное потребление пластиковой посуды в мире составляет до 90 кг на человека в год, в то время как в России данный показатель пока не превышает 15 кг [3].

Одним из наиболее быстро развивающихся рынков переработки пластмасс является рынок полимерных труб. Основную долю (примерно две трети) составляют трубы из полиэтилена, 20 % приходится на трубы из полипропилена, 12 % – на трубы из поливинилхлорида. Рынок полипропиленовых и поливинилхлоридных труб является импортозависимым. В перспективе до 2015 г. прогнозируется снижение доли импорта в обеспечении внутреннего спроса, темпы увеличения потребления составят, в среднем, 10...12 % ежегодно. Такие темпы роста потребления трубной продукции будут обеспечены за счет высоких темпов роста строительства, а также замены изношенных трубопроводных систем.

Рынок листовых пластиков в России развивается достаточно динамично благодаря их применению в таких областях, как строительство и рекламный бизнес. Пока российский рынок полимерных листов развивается по пути интенсивного импортозамещения. В перспективе до 2015 г. прогнозируется снижение доли импорта в обеспечении внутреннего спроса до 20...25 % за счет роста отечественного производства. Объемы потребления листовых пластиков возрастут за счет традиционных сфер их применения: строительства, наружной рекламы, производства бытовой техники, спецоборудования.

Анализ современного состояния рынка изделий из пластмасс и прогноз его развития на перспективу позволяет сделать следующие выводы:

1. Спрос на рынке изделий из полимерных материалов характеризуется стабильным ростом, который в 2007 г. относительно 2006 г. составил, по оценке, 114,2 %.

2. На российском рынке сформировались следующие основные сегменты продукции из пластмасс в период с 2000 по 2009 гг.: тара и упаковка с долей 30...40 %, изделия и детали производственного назначения – 15...18 %, пленки – 16...17 %, профильно-погонажные изделия – 5...18 %, изделия культурно-бытового и хозяйственного назначения – 10...14 %, трубы – 4...9 %, листы – 2...3 %.

3. Крупнейшими потребителями изделий из пластмасс являются: строительство – 26 %, производство упаковочных материалов для пищевых продуктов – 25 %, домашние хозяйства – 10 %.

4. Доля импорта в обеспечении внутреннего рынка продукции из пластмасс в настоящее время составляет 20 %. Наиболее импортозависимы следующие сегменты переработки пластмасс: профильно-погонажные изделия, листы, изделия производственного назначения.

5. Среднегодовые темпы роста спроса внутреннего рынка на период до 2015 г. на изделия из пластмасс составят 6,0...10,0 %.

6. Прогнозируются высокие темпы роста спроса на более качественную и высокотехнологичную продукцию: многослойные и комбинированные пленки, трубы из полиэтилена марки ПЭ-100, многослойные, армированные трубы, вспененные листы, многокомпонентные литьевые изделия производственного назначения, георешетки и пр. [3].

Самыми потребляемыми и востребованными полимерами являются полиолефины. Сегодня можно сказать, что эти полимеры «покорили мир» (если не весь, то мир упаковки – уж точно). Велико их значение и в других областях. Так, полиэтилен и полипропилен используют для производства труб, товаров народного потребления, кабелей, различных пленок, волокон и нитей, теплоизоляционных материалов, тары и многих др. Полиолефины настолько «влились» в мировую экономику, что ими уже торгуют на Лондонской бирже металлов! И с каждым днем вливаются все больше, находя новые сферы применения и вытесняя из них другие материалы [6].

1.1.1. Рынок производства и потребления полиэтилена

Полиэтилен по объему производства и применения занимает ведущее место среди прочих полиолефинов. На протяжении последних лет наиболее высокими темпами во всем мире, в том числе и в странах СНГ, растет потребление полиэтилена. Если рассматривать Россию как наиболее емкий рынок из всех стран СНГ, то за период с 2000 по 2007 гг. видимое потребление ПЭ увеличилось в 2,6 раза и достигло показателя 1 млн. 475 тыс. т [7].

Если рассматривать развитие российского рынка по видам ПЭ, то в период с 2000 по 2007 гг. максимальные темпы роста потребления демонстрировал линейный полиэтилен (ЛПЭ) (рынок вырос практиче-

ски в 32 раза). За этот период объемы потребления в России ПНД выросли в 3,3 раза, а ПВД – на 86 %.

По оценкам экспертов, в результате реализации запланированных проектов к 2015 г. в Российской Федерации мощности по выпуску ПНД могут быть увеличены на 1110 тыс. т, до 1 млн. 610 тыс. т в год, а по ЛПЭ – на 900 тыс. т, до 1 млн. 100 тыс. т в год. К 2015 г. в странах СНГ общие производственные мощности компаний по производству ПНД увеличатся на 2 млн. 60 тыс. т, а по ЛПЭ – 1 млн. 100 тыс. т в год соответственно. В результате, суммарные мощности по выпуску ПНД и ЛПЭ в СНГ достигнут 4 млн. 110 тыс. т в год.

Ожидается, что до 2015 г. при условии реализации заявленных проектов мощности по выпуску ПВД в странах СНГ вырастут всего на 400 тыс. т (по 200 тыс. т – в Российской Федерации и Казахстане) до 1 млн. 53 тыс. т в год. Ожидаемый прирост мощностей по производству ПЭ в государствах СНГ приведены в табл. 1.1.

1.1. Прирост мощностей по выпуску ПЭ в странах СНГ, тыс. т в год

Страна	Имеющиеся мощности	Вводимые мощности до 2015 г.	Мощность в 2015 г.
ПВД			
Россия	657	200	853
Казахстан	–	200	200
Азербайджан	156	–	156
Беларусь	120	–	120
<i>Суммарная мощность ПВД</i>	929	400	1053
ПНД			
Россия	500	1110	1610
Украина	100	60	160
Беларусь	–	150	150
Узбекистан	100	360	460
Казахстан	–	380	380
<i>Суммарная мощность ПНД</i>	700	2060	2760
Линейный ПЭ			
Россия	200	900	1100
Казахстан	–	200	200
Узбекистан	50	–	50
<i>Суммарная мощность ЛПЭ</i>	250	1100	1350
<i>Суммарная мощность</i>	1879	3560	5163

Предполагаемое увеличение до 2015 г. производственных мощностей по выпуску ПВД на мировом рынке составляет около 6 млн. т в год, до 20 – 21 млн. т в год (59 % вводимых мощностей приходится на государства Ближнего Востока, 7 % – Азии и 4 % – Европы) [7].

1.1.2. Рынок производства и потребления полипропилена

Если же говорить о рынке полипропилена, то темпы роста потребления этого полимера на мировом рынке также стремительно растут. Емкость российского рынка ПП в 2007 г. по сравнению с 2000-м расширилась в три раза.

Имеющиеся мощности по производству полипропилена на 2007 г. и ожидаемый прирост мощностей в странах СНГ приведены в табл. 1.2.

К 2015 г. при условии реализации заявленных проектов мировые мощности по выпуску полипропилена увеличатся приблизительно на 19 млн. т и достигнут 52 – 53 млн. т в год соответственно. Следует отметить, что 48 % планируемых мощностей приходится на страны Азии, 41 % – Ближнего Востока и 10 % – Европы.

В ближайшие 10 лет производство и потребление полимерных материалов в России будет расти опережающими темпами в сравнении с темпами роста промышленного производства. Это приведет к дальнейшему обострению экологических и экономических проблем, обусловленных ростом количества полимерных отходов [8].

Объем образования пластиковых отходов в России по итогам 2009 г. составил около 3 266,48 тыс. т, из которых около 400 тыс. т (12 – 13 %) подвергаются рециклингу. В связи с тем, что на рынке растет спрос на определенные виды пластиков (в частности, полистирол и

1.2. Прирост мощностей производства полипропилена в странах СНГ, тыс. т в год

Страна	Имеющиеся мощности	Вводимые мощности до 2015 г.	Мощность в 2015 г.
Россия	510	1320	1830
Украина	100	80	180
Беларусь	–	150	150
Казахстан	–	400	400
Азербайджан	–	150	150
Узбекистан	–	80	80
Туркменистан	90	–	90
Суммарная мощность	700	2180	2880

поливинилхлорид) [9], количество отходов также будет расти. Так, к 2025 г. объем образования полимерных отходов, по оценкам экспертов, должен вырасти до 7,2 млн т. В результате все более актуальным становится вопрос технического обеспечения отрасли переработки полимерных отходов [10].

1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ОТХОДОВ ПОЛИМЕРОВ

Отходы полимеров бывают следующего происхождения: твердые промышленные отходы (ТПО), являются более однородными по составу, нежели чем твердые бытовые отходы (ТБО), и для их утилизации не требуется сортировка по группам. Твердые бытовые отходы – представляют собой по своему содержанию смесь множества материалов, перемешанная вдобавок с разлагающейся органикой, пищевыми отходами и т.п., особенности которой складываются из свойств входящих в них компонентов [11].

Фактически полимерные ТБО по своей структуре могут быть разделены на три группы [12]:

1. Вторичное сырье – отходы, которые могут быть переработаны в полезную продукцию с получением прибыли или, как минимум, с компенсацией затрат на переработку за счет реализации получаемой продукции.

2. Биоразлагаемые отходы – отходы, которые могут быть переработаны в полезную продукцию (органическое удобрение), но прибыль от ее реализации не может компенсировать затраты на переработку.

3. Неперерабатываемые отходы ("хвосты") – отходы, которые в настоящее время не могут быть переработаны в полезную продукцию, либо затраты на такую переработку слишком велики. В лучшем случае этот вид мусора можно безопасно "спрятать", подмешивая в качестве наполнителей в различные изделия.

Наибольшие трудности связаны с переработкой и использованием смешанных отходов. Причина этого – в несовместимости термопластов, входящих в состав бытового мусора, что требует их поэтапного выделения. Кроме того, сбор изношенных изделий из полимеров у населения является чрезвычайно сложным мероприятием с организационной точки зрения и пока еще у нас в стране не налажен [13].

Вполне очевидно, что с точки зрения рентабельности переработки коммерчески привлекательной является первая группа ТБО [12].

Основные индикаторы развития мирового рынка переработки ТБО в 2009 г.:

- рост объемов образования ТБО составляет 5 % в год;
- ежегодные объемы захоронения увеличиваются на 2 %;
- уровень переработки ТБО растет в среднем на 17 % в год;

– среднемировой показатель сжигания мусора колеблется в пределах 15...20 %.

Основные индикаторы развития российского рынка переработки ТБО в 2009 г.:

– в расчете на одного жителя страны приходится до 250 кг бытового мусора в год (50 % которого занимают полимеры [14]), что сопоставимо со среднеевропейскими показателями;

– потенциал переработки ТБО во вторичное сырье оценивается в 14 млн. т (45,5 млн. м³) в год;

– захоронению на полигонах/свалках подлежит 90...92 % ТБО;

– сжигается не более 1,8 % ТБО;

– промышленной переработке подвергаются 3...4 % ТБО [13];

– структура рынка: 11 000 полигонов и свалок; 4 действующих мусоросжигательных заводов (расположены в Москве); 5 мусороперерабатывающих заводов; 39 мусоросортировочных комплексов; более 1000 организаций по вывозу твердых бытовых отходов [16].

Рассмотрим три типа классификации отходов [17].

1. По сложности и цене утилизации.

1.1. С хорошими свойствами – чистые отходы производства (литники, обрезки, облой, брак), условно чистые отходы потребления, получаемые в местах, где сбор и сортировка или отлажены или не требуются (медицинские одноразовые изделия и системы, пленка, пластмассовые ящики, ПЭТ-бутылки). Утилизация обеспечивает сравнительно высокую рентабельность их переработки. Процент от общего количества полимерных отходов – 5...12 %. Использование – 70...90 %.

1.2. Со средними свойствами – те же виды отходов производства и потребления, содержащие допустимое количество загрязнений, а также отходы от производств пищевого назначения. Сбор и переработка таких отходов связана с издержками по сортировке, мойке и использованием более сложного оборудования по переработке и производству изделий. Однако их использование может быть рентабельным. Процент от общего количества полимерных отходов – 10...25 %. Использование – 20...30 %.

1.3. Трудно утилизируемые отходы – сильно загрязненные и смешанные отходы производства и потребления, отходы из композиционных материалов, детали бытовой и автомобильной техники. Сбор и переработка трудно утилизируемых отходов, как правило, не может быть рентабельной. Именно поэтому в России данные отходы практически не собираются и не перерабатываются. Для покрытия издержек на утилизацию таких отходов необходимы внешние финансовые ресурсы (налоговые льготы, целевые вложения, субсидии) и внеэкономические меры. Процент от общего количества полимерных отходов – 60...85 %. Утилизация (кроме закапывания) – до 3 %.

2. По видам и типам полимеров отходы можно разбить на две группы [17].

2.1. Отходы крупнотоннажных и дорогих конструкционных пластиков. Эти отходы имеют развитый рынок сбыта вторичных материалов внутри России, частично обеспечены (технологические отходы) оборудованием для переработки во вторичные материалы:

1) полиэтилен низкого и высокого давления (ПНД, ПВД): пленка и кусковые отходы;

2) полипропилен (ПП): кусковые отходы и пленка, отходы производства одноразовой посуды, волокна;

3) стирольные пластики (ПС, АБС): кусковые отходы, листы, отходы производства одноразовой посуды;

4) полиамиды (ПА), поликарбонат (ПК);

5) полиэтилентерефталат (ПЭТФ);

6) ПВХ пластифицированный (отходы первичного производства);

7) ПВХ жесткий (отходы первичного производства).

2.2. Отходы упаковки, мебельного производства, строительства: в настоящее время не имеют развитого рынка сбыта, оборудование для их переработки во вторичные материалы в России и СНГ практически не производится.

1) использованная тара из ПЭТФ;

2) двух- или многослойные пленки для упаковки пищевых продуктов: ПП/ПА, ПП/ПЭТФ, ПЭ/ПЭТФ;

3) вспененные полимерные материал (ПЭНП и ПС вспененные) – одноразовая посуда, упаковочные, теплоизоляционные материалы;

4) смешанные отходы ПС, ПП, ПЭНП, ПЭВП;

5) смешанные отходы ПЭТФ, АБС, ПА, ПК;

6) ПВХ пластифицированный – старая обувь, использованный кабель;

7) ПВХ жесткий – старые рамы, вагонка, сайдинг, трубы, профили;

8) пенополиуретан.

3. По способам утилизации и их экологическому воздействию [17]:

3.1. Переработка отходов полимеров в мономеры и искусственное топливо (пиролизно-сырьевой метод). Деполимеризация с последующим синтезом различных полимерных материалов не находит промышленного применения. Отходы многих полимерных материалов могут быть подвергнуты термическому рециклингу с получением полезных продуктов не полимерной природы. ПЭТФ может быть деполимеризован до исходных компонентов. Аналогичной переработке могут быть подвергнуты отходы полиуретанов. Искусственное жидкое топливо является весьма перспективным направлением их утилизации. Разработанные в последнее время технологии позволяют получать высококачественные марки бензина, керосина, дизельного и котельного

топлива. Однако основным недостатком указанных технологий является высокая стоимость используемого оборудования и, соответственно, высокая стоимость производимого искусственного жидкого топлива. Существуют способы разделения полимеров из смеси собранных отходов: пенная флотация, сепарационное растворение, детекторное с проведением мониторинга, и, наконец, последний, заслуживающий внимания метод обработки смесей несовместимых полимеров ультразвуком, позволяющий получать блок-сополимеры [17].

Значительное место в утилизации вторичного полимерного сырья уделяется тепловому разложению (термолиз) как способу преобразования ВПС в низкомолекулярные соединения. Важное место среди них принадлежит пиролизу. Пиролиз – это тепловое разложение органических веществ с целью получения полезных продуктов. При более низких значениях температуры (до 600 °С) образуются в основном жидкие продукты, а выше 600 °С – газообразные, вплоть до технического углерода. Несмотря на ряд недостатков, пиролиз в отличие от процессов сжигания ТБО дает возможность получения промышленных продуктов, используемых для дальнейшей переработки [18].

Еще одним способом трансформации ВПС является каталитический термолиз, который предусматривает применение более низкой температуры. В некоторых случаях щадящие режимы позволяют получать мономеры (например, при термолизе ПЭТ, ПС и др.) в качестве сырья при проведении процессов полимеризации и поликонденсации. В США из использованных ПЭТ-бутылок получают дефицитные мономеры диметилтерефталат и этиленгликоль, которые вновь используются для синтеза ПЭТ заданной молекулярной массы и структуры, необходимой для производства бутылок.

3.2. Сжигание с целью получения тепловой и электрической энергии (энергетический метод). Получение энергии за счет сжигания полимерных отходов привлекает все большее внимание из-за непрерывного роста цен на органическое топливо. При этом нет необходимости производить сортировку, требуется лишь измельчение отходов до достаточно крупных кусков, чтобы обеспечить их эффективное смешивание с добавками углеродного топлива, чаще всего, каменным углем и необходимый для горения доступ кислорода. Опасность загрязнения окружающей среды супертоксиантами при сжигании полимерных отходов в значительной степени преувеличена и больше относится к старым мусоросжигательным установкам. При температурах 1200...1400 °С, характерных для современных установок, эти вещества необратимо распадаются, а неразложившаяся часть поглощается в адсорбирующих фильтрах. Выбросы диоксинов достигают всего 0,6 мкг на тонну. При сжигании тонны каменного угля выделяется 1...10 мкг диоксида, тонны бензина – 10...2000 мкг [17].

Однако для сжигания требуются дорогостоящие мусоросжигательные установки, которые должны быть снабжены надежными системами фильтров и газоуловителями. В настоящее время по этим причинам наметился резкий отход от мусоросжигательных технологий [19].

3.3. Захоронение на полигонах общего назначения (закапывание). По данным агентства «ИНЭКО», на конец 90-х гг. прошлого века в России только на зарегистрированных городских свалках скопилось более 55 млн. т отходов. Свалки – источники загрязнения атмосферного воздуха, почв и грунтовых вод различными вредными и ядовитыми для человека и среды обитания соединениями: метаном, сернистым газом, диоксинами, солями тяжелых металлов, парами растворителей и др. Они сопровождаются отторжением значительных территорий от полезного использования, приводят к появлению большого количества грызунов и насекомых, что представляет эпидемиологическую угрозу населению. В последние годы санкционированные свалки отодвигаются все дальше и дальше в «зеленые» и пригородные зоны, что приводит к увеличению затрат на транспортировку ТБО [18].

Масса ТБО, выбрасываемая на свалки, имеет следующий среднестатистический состав по упаковочным материалам [17]:

- полиэтилены (ПВД и ПНД) – 35...38 %;
- поливинилхлорид (ПВХ) – до 20 %;
- полистирол (ПС) – до 15 %;
- полипропилен (ПП) – 8...10 %;
- другие пластики, в том числе ПЭТ-бутылки – 12...17 %.

Захоронение отходов обладает существенными недостатками. Полимеры без воздействия кислорода практически не гниют и не разлагаются в почве в течение длительного времени (до 100 лет). Следует учитывать и то, что на свалки вывозится и уничтожается ценнейшее вторичное сырье в виде отходов (макулатура, комбинированные материалы, пластики, стекло и металл), часто малоизношенные, которые еще могут послужить народному хозяйству и принести пользу людям.

Также способом избавления от ТБО стало депонирование и складирование на специально оборудованных полигонах. При этом ущерб, наносимый окружающей среде полигонами, обусловлен теми же факторами, что и ущерб от свалок. Особенно много бед приносит пожары, загрязнение грунтовых вод, вынос мусора за пределы полигонов, которые зачастую не очень хорошо обозначены и оборудованы. Такое положение требует проведения специальных мероприятий по предотвращению негативных воздействий полигонов на окружающую среду. В отличие от компактных МСЗ обустройство полигонов требует значительных территорий, хотя капитальные затраты на их сооружение ниже, чем на строительство и оборудование МСЗ [19].

3.4. На сегодняшний день в большинстве развитых стран мира люди пришли к выводу, что ресурсный потенциал ТБО нужно не уничтожать, а использовать. Нельзя подходить к проблеме ТБО как к борьбе с мусором, ставя задачу любой ценой избавиться от него [20].

Наиболее предпочтительными способами утилизации ВПС с экономической и экологической точек зрения представляются повторное использование и вторичная переработка в новые виды материалов и изделий. Повторное применение предполагает возвращение в производственный цикл использованной упаковки после ее сбора и соответствующей обработки (мойка, сушка и другие операции). Путем вторичной переработки отходов, получившей широкое распространение во многих странах мира, смешанные отходы из полимерных материалов могут перерабатываться в изделия различного назначения (строительные панели, декоративные материалы и т.п.) [18]. Однако лишь до 10 % от всей массы полимерных отходов могут быть повторно использованы. Даже если полимерные отходы тщательно отделены от другого мусора, их практически невозможно переработать в полимерный рециклат с удовлетворительными свойствами из-за присущей полимерам особенности – неспособности смешиваться друг с другом (термодинамической несовместимости). Таким образом, практически для повторной переработки можно направлять только однотипные полимеры, что требует сортировки и, соответственно, больших расходов. Качество и свойства вторичных полимеров оказываются иными, чем у первичных материалов. Это происходит за счет снижения их прочности, термической стабильности, пластичности и других параметров. Для вторичной переработки используется схема, включающая в себя следующие стадии [17]:

- 1) сбор и транспортировка полимерных отходов;
- 2) ручная или механическая сортировка и начальное отделение загрязнений;
- 3) металлодетекция и сепарация;
- 4) измельчение;
- 5) металлосепарация;
- 6) мойка в ваннах и центрифугах;
- 7) флотационная сортировка;
- 8) сушка в сушилках барабанных, трубчатых, контактных;
- 9) воздушная очистка в циклоне;
- 10) штамповка на прессе;
- 11) очистка полимеров фильтрами непрерывного или периодического действия;
- 12) гранулирование с фильтрацией и без нее с помощью водных или воздушных грануляторов;
- 13) производство готовых изделий.

Одно из перспективных направлений в этой области – производство гранулята из отсортированного сырья для переработки в изделия раз-

личными способами. Для повышения качества гранулята используются различные добавки (стабилизаторы, красители, модификаторы и др.) [21].

Переработка полимерных отходов позволяет создавать качественные и недорогие вторичные полимеры, а также изделия из них, в том числе трубы дренажные различных типов. Продукция, произведенная из вторичных полимеров, характеризуется значительно более доступной стоимостью по сравнению с такими же трубами, изготовленными из первичных материалов [22].

1.3. МОДИФИКАЦИЯ ВТОРИЧНОГО ПОЛИМЕРНОГО СЫРЬЯ

Использование вторичных ресурсов зачастую требует меньших затрат, чем получение и применение кондиционного сырья для аналогичных целей. Определенный интерес представляет использование отходов в сочетании с другими материалами в производстве малоответственных изделий, не требующих высоких физико-механических показателей, но отличающихся достаточной устойчивостью к воздействию внешних факторов [23]. Для эффективной переработки полимеров и придания им необходимых свойств их подвергают модификации. Модификация полимеров представляет собой один из путей физико-химических превращений высокомолекулярных соединений, который наряду с полимеризацией и поликонденсацией используется для получения новых полимеров [24]. Химическая модификация полимеров представляет собой процесс, в котором исходный полимер подвергается физическим или химическим воздействиям, в результате чего он превращается в новый полимер иного химического строения [25].

В результате модификации возможно достижение значительного экономического эффекта как за счет удешевления полимерных композиций, так и упрощения технологии изготовления изделий из модифицированных полимеров; возможно восстановление или изменение свойств отработанных изделий, обеспечивающих их повторное использование с соответствующим улучшением окружающей среды, и в связи с ограничением некоторых природных ресурсов [24]. Таким образом, модификация полимеров является весьма универсальным методом, позволяющим в широком диапазоне изменять в желаемом направлении физические и химические свойства полимеров.

1.3.1. Методы модификации вторичного полимерного сырья

Известно [26 – 28], что способы модификации полимеров по методам воздействия условно разделяют на химические и физические.

Все известные способы осуществления модификации полимеров целесообразно классифицировать по основным существенно значимым признакам, систематизирующим накопленный экспериментальный материал, один из вариантов которого представлен на рис. 1.5 [29].

По направленности влияния на свойства

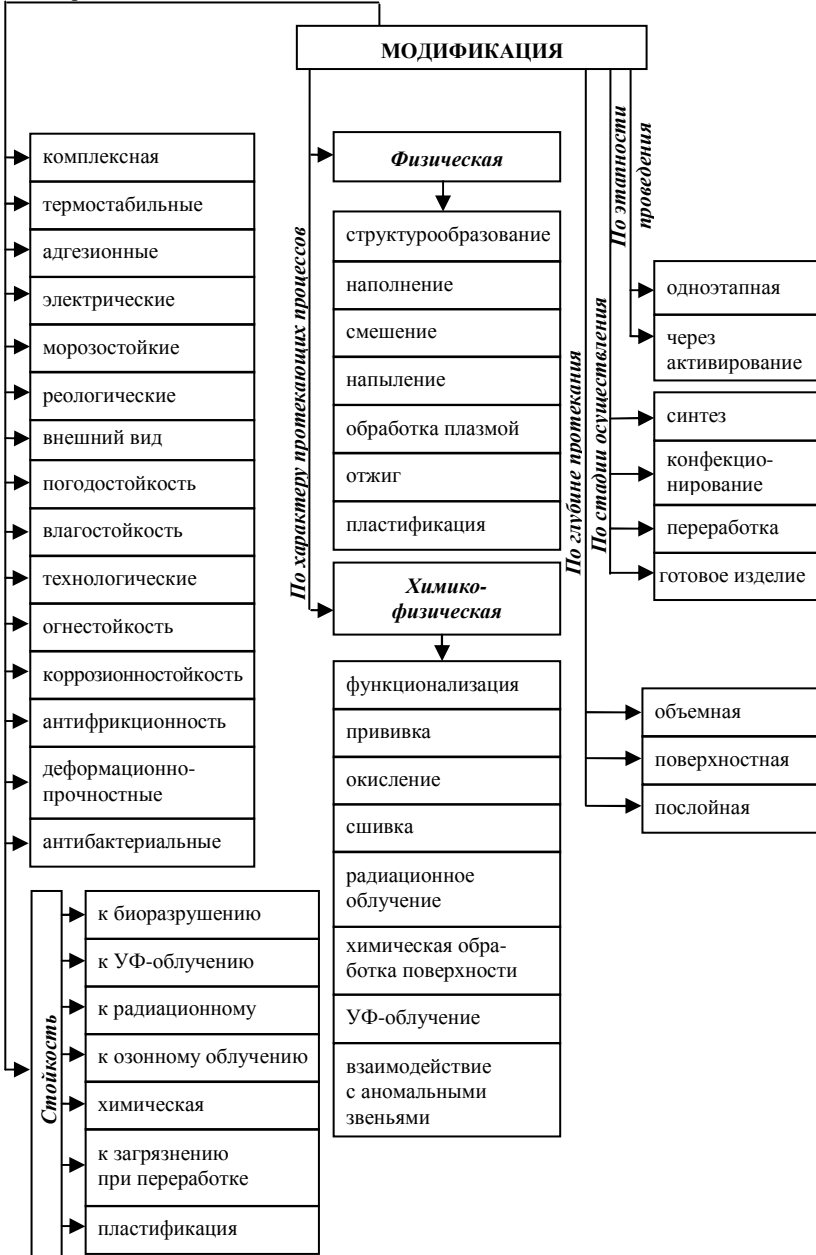


Рис. 1.5. Классификация способов модификации полимеров

Существуют следующие методы модификации ВПС [30, 31]:

1. Химическая модификация полимеров – изменение химического строения путем введения в макромолекулы функциональных групп иной химической природы [32], что может быть достигнуто путем химических превращений уже синтезированных макромолекул [33 – 35]:

1) реакция полимера с низкомолекулярным полимером, не способным к полимеризации или поликонденсации;

2) реакции полимера с мономером, когда в ходе процесса генерируются растущие цепи, взаимодействующие с полимером с образованием разветвленных или пространственно сетчатых структур;

3) взаимодействие полимера с высокомолекулярным модификатором.

2. Структурная модификация (физическая модификация) – направленное изменение физических (прежде всего механических) свойств полимеров, осуществляемое преобразованием их надмолекулярной структуры под влиянием физических воздействий, что сохраняет неизменным строение молекул [33]:

1) модифицирование изменением условий получения твердого тела;

2) модифицирование введением малых количеств веществ иного строения (введение поверхностно-активных веществ, искусственных зародышеобразователей и др.).

Различают следующие физические методы модификации полимерных материалов и изделий [36]:

– термическое воздействие (термообработка, термомеханическая обработка, криогенная обработка);

– облучение (радиационная обработка, радиационно-термическая обработка, обработка СВЧ-, УФ- и ИК-облучением, лазерная обработка);

– вакуумно-компрессионная обработка (обработка давлением, механотермическое упрочнение, взрывное нагружение, обработка вакуумом, модификация при трении);

– периодическое деформирование (УЗ-обработка, вибрационная обработка);

– воздействие электромагнитных полей (электрическая обработка, электротермическая обработка, обработка в магнитных полях).

Во многих случаях физической модификации (наполнении, смешении) образуются композиционные материалы, однозначного определения которым не дано. Наиболее приемлемым можно считать определение, по которому под композиционными понимаются материалы, образованные сочетанием двух или большего числа химически различных компонентов с четкой фазовой границей между ними [28]. В полимерной композиции непрерывная фаза или дисперсионная среда образована полимером, а дисперсная фаза – любым диспергированным веществом.

При структурообразовании, для воздействия на процессы формирования и агрегирования различных элементов надмолекулярной структуры, в полимер водятся малые количества веществ различной химической природы, которые активно влияют на процессы структурообразования, приводят к упрочнению полимерного материала и к улучшению ряда структурно-динамических параметров, способности к переработке и свойств полимеров [24].

3. Комбинированные методы модификации полимерных материалов, когда на них последовательно или одновременно осуществляется воздействие химическим реагентом и физическим полем, оказываются наиболее эффективными. Использование комбинированных физико-химических методов модификации при прочих равных условиях позволяет осуществлять процесс в более мягких условиях для полимера с одновременным совершенствованием технологии обработки – снижением концентрации реагента, температуры, продолжительности модификации [24].

1.3.2. Классификация наполнителей для полимерных материалов

Наполнение полимеров – сочетание полимеров с твердыми, жидкими или газообразными веществами, которые относительно равномерно распределяются в объеме образующейся композиции и имеют четко выраженную границу раздела с непрерывной полимерной фазой [37].

Для эффективной переработки полимеров и придания им необходимых свойств обычно используют различного рода наполнители. Наполнитель оказывает существенное, а часто и определяющее влияние на физико-механические свойства композиционных материалов, в том числе на теплостойкость, прессовочные свойства (текучесть, усадку) и на режимы переработки в изделия [38 – 40].

Наполнитель выбирается так, что бы улучшать показатели технологических свойств полимерных композиционных материалов, которые представляют наибольший интерес. Диапазон свойств наполненных полимеров значительно шире, чем ненаполненных. Введение наполнителя приводит к экономии дорогостоящего полимера, являющейся, как правило, следствием улучшения физико-механических свойств композиционных материалов.

Наполнители для пластиков можно разделить на инертные (простые) и активные наполнители; последние также рассматриваются как функциональные наполнители. Критерием деления наполнителей на активные и инертные является прочность адгезионной связи полимер-наполнитель, которая у активных наполнителей больше, а у инертных меньше когезионной прочности полимерной матрицы [24, 41]. Инертные наполнители в основном используются для уменьшения затрат,

в то время как функциональные наполнители вызывают целенаправленное изменение свойств так, чтобы композиция в значительной степени соответствовала предъявляемым к ней требованиям; однако в действительности нет ни одного наполнителя, который полностью был бы инертным и только уменьшал затраты [42].

При переработке вторичного полимерного сырья его свойства стараются улучшить, поэтому используют функциональные наполнители. Важнейшей характеристикой наполнителей является их морфология и удельная поверхность, от которой зависит эффективность взаимодействия с полимерной матрицей. Это особенно важно в том случае, когда полимерные материалы подвергаются обработке поверхностно активными веществами, модификаторами и другими добавками [43].

При малых содержаниях наполнители проявляют себя в основном как активные добавки, искусственные зародыши структурообразования (ИЗС), при больших оказывают на структуру и свойства полимерных материалов сложное влияние. Следует отметить, что в области небольших концентраций твердой дисперсной добавки, когда частицы последней действуют как ИЗС, имеет место некоторое увеличение деформируемости материала при растяжении, связанное с уменьшением размера сферолитов. Наряду с этим возрастают прочностные свойства наполненного полимера, поскольку в присутствии ИЗС образуются более совершенные структуры, которые устойчивы к разрушению [44, 45]. Например, введение в ПЭВП 2 % диоксида кремния приводит к уменьшению его сферолитов в 1,5 раза при одновременном возрастании степеней кристалличности и размеров кристаллов на 10 %. Увеличение высоты складки кристаллов полимера свидетельствует об образовании более термодинамически равновесной структуры в присутствии добавки [46].

С увеличением количества наполнителя (>10...15 %) деформационно-прочностные свойства материала ухудшаются. Это объясняется тем, что наличие и распределение частиц наполнителя преимущественно в аморфных областях кристаллизующегося полимера уменьшают вероятность перемещения макромолекулярных цепей друг относительно друга при воздействии нагрузки. При этом не только снижается степень упорядоченности надмолекулярных образований [47], но и возрастает дефектность и уменьшается степень кристалличности дисперсно-наполненного полимера.

При высоких степенях наполнения возможно также существенное снижение стойкости полимерного материала. Степень наполнения минеральными наполнителями обычно ограничивается примерно 30 % по массе, поскольку при большем содержании наполнителя материал становится хрупким.

Поскольку частицы дисперсных наполнителей, как правило, накапливаются в аморфных областях [45, 48], то количество наполнителя в них выше, чем в остальном объеме полимера. С увеличением содержания наполнителя в полимерной матрице накапливается значительное количество частиц наполнителя, уже не являющегося структурообразователем, и аморфные области становятся более жесткими [44, 49]. Это обуславливает резкое снижение деформационно-прочностных характеристик полимера с высоким содержанием дисперсных наполнителей и его хрупкое разрушение.

Одним из наиболее доступных и эффективных способов модифицирования полимерных отходов является введение различных добавок (пластификаторов, красителей, антиоксидантов и др.). Наряду с ростом требований к качеству изделий из полимерных материалов, появлением новых областей их использования ассортимент добавок неуклонно растет и повышается их эффективность. При всем разнообразии их назначения и действия они должны отвечать следующим требованиям: способность взаимодействовать с полимерами или диспергировать в них с образованием однородных композиций, стабильность свойств при хранении, переработке и эксплуатации полученных на их основе материалов, совместимость с другими добавками, нетоксичность [50, 51].

В последнее время были разработаны различные методы направленной модификации вторичных полимеров. В основе большинства методов лежит воздействие на процессы изменения химической структуры и формирования активных радикалов, образующихся при старении и переработке. Так как эти радикалы являются центрами повышенной активности в полимерной матрице, их экранируют путем модификации.

В основу методов модификации полимеров малыми добавками легли представления о существенном влиянии надмолекулярной структуры, а также условий протекания релаксационных процессов на свойства полимеров. При этом наблюдается комплексное воздействие добавок на структуру и свойства полимеров [44, 52].

Модификатор, введенный в полимер, оказывает влияние на свойства материала в вязкотекучем состоянии, на процесс структурообразования и на поведение материала в процессе эксплуатации. Введение модификатора способствует существенному изменению скорости зародышеобразования и кинетики кристаллизации полимера. При введении малых количеств модификаторов повышаются физико-механические свойства материала, увеличивается долговечность [53], повышается работоспособность изделий из пластмасс.

Классифицировать наполнители можно по многим параметрам: химическому составу, размерам и форме частиц, удельной поверхности и др. Поскольку действие самых важных промышленных наполни-

телей зависит в основном от их формы, то классифицируем наполнители согласно геометрии их частиц.

Дисперсные наполнители. Перспективным методом модификации полимеров является использование в качестве наполнителей твердых веществ в ультрадисперсном состоянии. Их использование обеспечивает максимальное структурирование полимерной матрицы на различных уровнях структурной организации и получение материалов с уникальными механическими, электрическими, оптическими и другими свойствами, зачастую недостижимыми для традиционных композитов [54, 55].

Группа дисперсных наполнителей является наиболее разнообразной по свойствам. Более или менее эффективно используются практически любые поддающиеся измельчению продукты как неорганического, так и органического происхождения. Известны авторские свидетельства на изобретения композиции с кожурой ореха, шелухой зернобобовых, плодовыми косточками, трепелом, порошковым фторопластом и многие другие.

Из органических дисперсных наполнителей наибольшее распространение получила древесная мука, представляющая собой тонкоизмельченную и высушенную древесину волокнистой структуры.

Порошкообразные синтетические полимеры, например, тонкодисперсный фторопласт Ф-4НТД относятся также к дисперсным наполнителям. Он используется в качестве антифрикционного наполнителя для терморезистивных матриц.

Из неорганических тонко- и среднелдисперсных наполнителей наибольшее распространение получили сажа, мел, каолин и природный диоксид кремния. Сажа используется в качестве эффективного структурирующего наполнителя ПВД, ПВХ, ПНД, ПП, ФФП, ЭС. Введение сажи способствует долговечности изделий, повышает их сопротивление светостарению. Мел в виде тонко- и среднелдисперсных фракций широко применяется для наполнения полиолефинов и поливинилхлоридов. Каолин с размером частиц до 1 мкм используют в качестве структурирующей добавки для светопрозрачных полимеров, а тонкодисперсную фракцию – для наполнения ПВД, ПНД, ЛПВД, ПВХ.

Волокнистые наполнители – по разнообразию ассортимента существенно уступают дисперсным. Наиболее распространенными среди них являются стекловолокна, углеволокна, хлопчатобумажные и синтетические волокна, а также отходы их производства. Можно использовать также моноволокна в виде монокристаллов.

Волокна бывают рублеными (коротко- и длинноволокнистые) и непрерывными в виде войлока или ровницы. Поэтому волокнистые наполнители могут проявлять свойства как близкие к дисперсным материалам, так и усиливающие (армирующие). Использование рублено-

го волокна, особенно коротковолокнистого, позволяет перерабатывать полимерные материалы в изделия методами экструзии или литья под давлением. В зависимости от физико-химических свойств конкретного волокна, прочностные свойства композита могут превышать аналогичные показатели полимерной матрицы в десятки и даже сотни раз. Так, использование «усов» позволяет довести модуль упругости композита на эпоксидном связующем до 100...300 ГПа, при том что модуль самого эпоксиполимера составляет 3...6 ГПа.

Традиционным волокнистым наполнителем являются стекловолокна (СВ). Их стоимость невысока и они доступны для приобретения. Производится достаточно широкая номенклатура стекловолокон, отличающихся по химическому составу, диаметру и прочности. К недостаткам стекловолокон относят их хрупкость и наличие аппретирующих покрытий, снижающих адгезию к полимеру. Стекловолокно используют для усиления термопластов (ПА, ПП, ПФ, ПК, ПНД, ПВХ) и особенно термореактивных пластиков на основе эпоксидных смол, ненасыщенных полиэфиров и фенолформальдегидных олигомеров. В термопласты вводят до 40 %, а в термореактивные связующие – до 80 % стекловолокна.

Углеродное волокно (УВ) эластичнее СВ, имеет более развитую поверхность и в процессе графитизации (карбонизации) приобретает кроме прочности еще и повышенные тепло- и электропроводность, износостойкость и антифрикционность. Естественно, что такой набор ценных характеристик существенно расширяет спектр технологических и эксплуатационных свойств углепластиков, которые в настоящее время являются наиболее перспективными материалами для аэрокосмической отрасли, скоростного транспортного машиностроения и судостроения, для трубопроводов и емкостей для хранения газо- и нефтехимических продуктов.

Тканые наполнители. Тканые наполнители производятся главным образом на основе хлопчатобумажных, стеклянных и углеродных тканей. Их используют для получения высокопрочностных армированных анизотропных материалов. На сегодняшний день армированные такими наполнителями пластики обладают наиболее полным комплексом высоких физико-механических, термодформационных, теплофизических и эксплуатационных свойств. В качестве связующего компонента, как правило, используются эпоксидные олигомеры, полиамиды, ненасыщенные полиэфирсы. Содержание наполнителя в композите может варьироваться в диапазоне 40...85 % [39].

1.3.3. Методы совмещения наполнителя со связующим

Современные тенденции модификации вторичных полимеров сводятся к использованию малого количества ультрамелкодисперсного наполнителя (наноматериалов) заданной структуры и свойств. Для

наилучшего распределения малого количества наполнителя в массе полимера и образования прочных связей между ними, добавки подвергают активированию. Целью активирования является раскрытие и сохранение функциональных групп.

Введение наполнителя может производиться как в процессе синтеза, так и при переработке полимеров. Существуют следующие методы совмещения наполнителя со связующим:

1. Поликонденсационное наполнение заключается в пропитке наполнителя (волокна, дисперсного порошка) не олигомерами (фенолформальдегидными, эпоксидными и другими), а исходными мономерами с соответствующими катализаторами и модифицирующими добавками, последующем синтезе из них полимерного связующего как в структуре наполнителя, так и на его поверхности. В качестве наполнителей можно применять различные по природе и структуре химические волокна, нити, дисперсные вещества [36, 53, 57].

2. Полимеризационное наполнение – метод создания композиционных материалов путем введения наполнителя непосредственно в процессе синтеза полимера [58]. При этом полимеризацию соответствующего мономера проводят на поверхности наполнителя, активированной комплексным катализатором. Каждая частица наполнителя покрывается пленкой полимера, толщину полимерного покрытия можно регулировать в процессе синтеза. Метод полимеризационного наполнения дает возможность получать композиционные материалы с равномерным распределением наполнителя в полимерной матрице. Для получения композиционных материалов со специальными свойствами этот фактор является особенно важным, поскольку обеспечивает воспроизводимость свойств.

В работах [59, 60] исследован процесс полимеризационного и поликонденсационного наполнения, который включает следующие стадии:

а) подготовка наполнителя (сушка, удаление влаги, кислорода воздуха);

б) закрепление катализатора полимеризации на поверхности активированного наполнителя;

в) пропитка мономерами;

г) синтез;

д) сушка;

е) отверждение с одновременной переработкой в изделия.

Преимущества метода полимеризационного наполнения по сравнению с широко распространенным смесевым наполнением заключается в возможности существенного улучшения механических свойств при одновременном сокращении расхода органического сырья. Этот метод позволяет создавать наполненные полимеры с очень высоким содержанием, как правило, неорганической фазы, что позволяет получать принципиально новый тип композиционных материалов [23].

3. Химическое аппретирование представляет собой обработку поверхности наполнителя специальными веществами – аппретами, способными реагировать с функциональными группами на поверхности наполнителя и полимера. В качестве аппретов используют химические соединения с двойной функциональностью [61]. Аппрет осуществляет связь между наполнителем и полимерной матрицей, поэтому при выборе аппрета необходимо учитывать химическую природу поверхности наполнителя и свойства полимера. Многие наполнители имеют на своей поверхности гидроксильные группы, поэтому аппрет должен содержать функциональные группы, способные реагировать с гидроксильными. Одновременно он должен содержать органические радикалы, которые могут хорошо совмещаться с полимерной матрицей [62].

Аппреты играют важную роль в повышении адгезии полимерного материала к наполнителю, но недостатком является то, что универсальных аппретов не существует. Практически для каждой пары полимер–наполнитель подбирают свой [38, 63].

Аппреты применяются в виде растворов, суспензий или паров, ими обрабатывают соответствующие наполнители, а также полимерные связующие. Хотя содержание аппретов в наполнителях обычно не превышает 0,5...3,0 % по массе, однако операции по обработке ими больших масс наполнителей с последующей сушкой трудоемки и энергоемки [38, 64, 65].

Роль аппретирующего вещества сводится не только к образованию химических связей связующего с наполнителем, но и к облегчению физического взаимодействия компонентов. При этом важную роль могут играть водородные связи между поверхностью частиц наполнителя и функциональными группами полимера [47, 66].

4. Механохимическое воздействие способствует не только измельчению материала и созданию при этом развитой внешней поверхности, но и кардинальному изменению микроструктуры вещества, формированию высокой концентрации дефектов и микронапряжений в кристаллической решетке [67, 68].

В основе этого способа лежит явление образования чрезвычайно-активной поверхности при размалывании твердых частиц. Эта активность обусловлена образованием свободных радикалов, ионов и других активных центров, которые могут существовать короткое время, а затем дезактивируются главным образом за счет взаимодействия с влагой в воздухе [37].

Согласно современным представлениям [55, 69], при механических воздействиях за счет энергии упругого деформирования в поверхностных слоях материала возникают активные неравновесные возбужденные состояния, также происходит перемещение атомов относительно друг друга, приводящее к искажению валентных углов в

кристаллической решетке, что сопровождается повышением реакционной способности веществ [55].

Механохимическое воздействие может проявляться в виде [70]:

а) механохимической реакции – изменением состава в процессе обработки (в аппарате, активаторе, мельнице и пр.);

б) механической активации – увеличением реакционной способности (изменение физико-химических свойств) обрабатываемых веществ в последующих процессах и реакциях;

в) механической (механохимическая) модификации веществ и материалов – получением механической обработкой веществ и материалов с наперед заданными свойствами.

В случае модификации вторичного сырья использование поликонденсационного и полимеризационного способов является невозможными, а метод химического аппретирования требует больших экономических затрат, в результате чего является нерентабельным, а также требует использования дополнительных химических реагентов, что делает его неэкологичным. Применение механохимических подходов имеет перспективы, поскольку позволяет осуществлять некоторые процессы доступными и экологически чистыми методами без использования дополнительных химических реагентов и растворителей [71].

1.3.4. Механическая активация наполнителей полимерных материалов

Механическая активация твердых тел заключается в создании долгоживущих нарушений атомной структуры с целью изменения структурно-чувствительных свойств вещества, прежде всего реакционной способности. Чаще всего активируют порошковые материалы; механическая обработка порошков сопровождается накоплением точечных дефектов, дислокаций, аморфных областей, увеличением площади межзеренных границ, образованием новых поверхностей. Энергетические выходы образования структурных дефектов, как правило, не превышают $10^{-3} \dots 10^{-1}$ моль/МДж. В результате механического нарушения атомной структуры повышаются растворимость вещества и скорость растворения, облегчаются реакции с молекулами среды и другими твердыми телами, на десятки и сотни градусов снижаются температуры твердофазного синтеза, термического разложения, спекания. Механически активируют наполнители (графит и др.), фосфатные удобрения, природные и синтетические полимеры и другие материалы [72].

Существует несколько основных способов механической активации, наиболее широко применяемых в полимерной промышленности: ударное воздействие, вибрационное воздействие, силовое воздействие. Также сюда можно отнести способы воздействия на расплав полимера

различного рода полями (электрические поля, магнитные поля), токами высокой частоты, ультразвуком, взрывом.

Механическую активацию также можно разделить на два типа: раздельная механическая активация компонентов смеси и совместная механическая активация компонентов смеси.

Раздельная механическая активация подразумевает под собой применение предварительного активирующего воздействия на компоненты смеси в отдельности с использованием отдельного специализированного оборудования. В данном случае компоненты смеси сначала подвергаются активации, а затем смешиваются между собой. К оборудованию, применяемому при таких процессах, можно отнести шаровые мельницы, вибромельницы, диспергаторы, дезинтеграторы и др.

Процессы такого типа имеют ряд проблем, первой из которых и основной является сохранение повышенной функциональности активированных материалов до момента их совмещения; второй – необходимость использования дополнительного оборудования, связанного с тем, что аппаратное оформление таких процессов также требует дополнительных энергетических и временных затрат, из-за чего производительность падает, а затраты возрастают.

Данные проблемы отсутствуют при использовании совместной механической активации, позволяющей выполнять активирование компонентов смеси непосредственно во время процесса смешения. Этот способ позволяет получить наиболее хорошее распределение, не тратить время на дополнительные операции и не требует дополнительного аппаратного оформления. Недостатком является сложность его осуществления: посредством диспергирующего смешения нередко совместно с каким-либо из перечисленных способов механохимической активации (ультразвук, электрические поля и т.п.).

1.3.5. Процесс смешения наполнителя и полимерного связующего

Смешение как простой способ модификации полимеров с целью улучшения их свойств используется достаточно часто [73]. Смешение – это технологический процесс, применяемый для введения в полимер ряда добавок, целенаправленно изменяющих его свойства [74].

Смешение, происходящее в той или иной мере почти во всех процессах переработки полимеров, является необходимым этапом технологии производства изделий, от которого в значительной степени зависят их эксплуатационные характеристики. Смешение – это сложный физико-химический процесс, протекающий в полимерной массе под действием деформации сдвига, которая сопровождается, как правило, интенсивным тепловыделением.

В технологии переработки полимеров смешиваемые компоненты могут находиться в трех различных исходных состояниях – жидком, сыпучем и вязкотекучем, что определяет вид используемого оборудования и характер протекающих процессов. Наряду с выравниванием концентраций смешиваемых веществ во всем объеме смеси в большинстве случаев смешение сопровождается также измельчением до частиц заданного размера, обеспечивающим гомогенность смеси.

Все происходящие при смешении процессы – результат совместного действия механических и температурных полей.

Поскольку все характеристики материала определяются его составом, изотропность свойств достигается только при высокой степени однородности распределения компонентов по объему полимера. Исходя из этого, смешение можно определить как процесс, целью которого является достижение такого взаимного распределения компонентов в смеси, которое обеспечивало бы однородность физических и химических свойств в любой точке системы. Так как часто один из компонентов вводится в виде более или менее крупных кусков, или агломератов, то процесс смешения сопровождается измельчением (диспергированием) этого компонента. Примерами диспергирующего смешения являются процессы введения наполнителей (например, технического углерода в каучук), красителей и других компонентов в полимер, находящийся в вязкотекучем состоянии.

Процесс смешения состоит из собственно смешения, в ходе которого увеличивается статистический беспорядок распределения компонентов смеси, и диспергирования – разрушения агломератов диспергируемой фазы до частиц меньших размеров (в пределе – до молекулярных размеров) под действием напряжений сдвига, возникающих вследствие относительного движения в системе полимер–частица [74].

Смешение может быть использовано не только для обеспечения простого физического смешения или диспергирования, но и с целью изменения физического состояния смешиваемых компонентов (растворение, кристаллизация, плавление, поглощение), управления химическими реакциями и ускорения их.

Процессы смешения полимеров могут осуществляться с помощью механических сил различной природы, что вызывает многообразие развивающихся механических явлений. Так, механохимические процессы могут инициироваться механическими воздействиями с приложением преимущественно сдвиговых усилий; ультразвуковыми колебаниями и т.д. [69].

В технологии переработки полимеров наиболее распространены процессы смешения, в ходе которых развиваются высокие напряжения сдвига. Если при механическом воздействии на полимеры из-за неравномерного распределения внутренних напряжений на отдельных уча-

стках молекулярной цепи возникают критические напряжения, приводящие к разрыву химических ковалентных связей, то это вызывает образование активных частиц (чаще всего свободных макрорадикалов) [74]. Свободные макрорадикалы всегда “ищут” за что бы зацепиться, также как и активированные частицы вводимого наполнителя. В результате их смешение при определенных режимах приводит к возникновению устойчивых пространственных связей между ними.

1.3.6. Критерии оценки качества процесса получения полимерных композиций

Во время процесса смешения и диспергирования на качественные показатели получаемого модифицированного вторичного термопластичного материала (прочность при разрыве, относительное удлинение при разрыве) определяющее влияние оказывает величина сдвига, возникающая в рабочих пространствах смесителя. Она зависит от различных конструктивных (геометрия фигурной части рабочих органов смесителя) и технологических (частота вращения рабочих органов смесителя, фрикция, температура внутри смесительной камеры, время смешения) параметров процесса смешения.

Анализ литературных источников [76 – 78] подчеркивает значимость величины суммарной деформации сдвига для процессов переработки полимерных материалов. По ее величине и характеру изменения можно судить о ходе процесса и качестве получаемого продукта. Следовательно в основу критерия качества может быть положена суммарная величина сдвига, возникающая в зазорах перерабатывающих машин.

1.4. Постановка задачи исследования

Эффективным решением проблемы получения наполненного полимерного композиционного материала с заданными показателями качества может стать технология, разработанная на кафедре «Технология полиграфического и упаковочного производства» ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Проведенный анализ литературы по данной теме показал, что получение наполненного полимерного композиционного материала с хорошими механическими свойствами прямым смешением полимера с наполнителем затруднено из-за неравномерного распределения малой доли наполнителя в большом объеме высоковязкого полимера, что делает данную работу актуальной.

Целью данной работы является исследование процесса модификации вторичного полиэтилена высокого давления (ВПВД) техническим углеродом (ТУ).

В соответствие с этим решались следующие задачи:

– анализ современного состояния в области утилизации и вторичной переработки отходов полимеров;

- обзор существующих методов модификации вторичных полимерных материалов;
- разработка способа модификации вторичных полимеров;
- создание лабораторного стенда для изучения процесса модификации отходов полимеров с изменением в широком диапазоне режимных и конструктивных параметров;
- исследование влияния конструктивных и режимных параметров смесительного оборудования и процесса модификации на показатели качества получаемого композиционного материала (предел прочности и относительное удлинение при разрыве), а также определение значения суммарной величины сдвига, при котором показатели качества композита являются наилучшими;
- разработка методики расчета и программного обеспечения для определения интегрального критерия качества – суммарной величины сдвига, характеризующей влияние различных режимных и конструктивных параметров процесса на физико-механические показатели получаемого композиционного материала;
- создание методики инженерного расчета основных параметров процесса смешения и конструкции смесителя с учетом заданных показателей качества получаемого композита.
- внедрение разработанного способа модификации термопластичных отходов полимеров на двухроторном смесителе.

В заключение первой главы можно сделать выводы:

1. Существующие методы утилизации отходов полимерных материалов имеют значительные недостатки, в частности, захоронение и сжигание приводят к загрязнению окружающей среды и нерациональному использованию земельных угодий, термические методы и создание био-, фото- и водоразрушаемых полимеров требует больших финансовых затрат и сложны технологически.
2. Существующие технологии по переработке отходов полимеров не позволяют получать качественное вторичное сырье, которое могло бы конкурировать с первичным полимерным сырьем.
3. Применение механохимических подходов при получении композиционных материалов из отходов полимеров имеет перспективы, поскольку позволяет осуществлять процессы модификации доступными и экологически чистыми методами без использования дополнительных химических реагентов и растворителей и является более простым в технологическом оформлении и, соответственно, более экономичным.

2. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА МОДИФИКАЦИИ ОТХОДОВ ТЕРМОПЛАСТОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

2.1. ПРОЦЕСС МОДИФИКАЦИИ ОТХОДОВ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ

В соответствии с поставленной целью и задачами научного исследования было подобрано оборудование и разработан процесс модификации полимерных отходов дисперсным углеродным наполнителем.

Технологический процесс осуществляется следующим образом: промытые и высушенные отходы с содержанием посторонних примесей не более 5 % подвергаются сортировке, в процессе которой из них удаляют случайные инородные и металлические включения и выбирают сильно загрязненные куски.

Делаются навески полимера и наполнителя в соответствии с выбранным технологическим режимом. Камера смесителя нагревается до температуры, необходимой для осуществления выбранного технологического режима.

Подготовленные отходы и наполнитель загружаются в рабочую камеру смесителя одновременно, где вращающиеся на малых оборотах рабочие органы под действием сдвиговых напряжений и сил адгезии затягивают их. Далее закрывают загрузочное отверстие затвором и выводят частоту вращения рабочих органов до значения, соответствующего выбранному технологическому режиму.

Смешение происходит в течение времени, заданного выбранным технологическим режимом. После остановки рабочих органов, производится выгрузка полученной смеси.

2.2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка на основе смесителя Брабендера для реализации процесса введения малого количества активированного технического углерода в расплав полимера позволяет изменять в широком диапазоне режимные и конструктивные параметры.

2.2.1. Описание и характеристики смесителя

Смеситель (рис. 2.1) состоит из камеры смесительной 5, загрузочного устройства, станины с приводом 2, 3, 4 и электрооборудования 1. Смешение компонентов производится в камере, состоящей из собственно камеры смешения и сварного корпуса, на котором она закреплена

двумя специальными гайками. Смесительными органами являются два ротора 6 специального профиля, установленные в корпусе камеры консольно и вращающиеся в противоположные стороны. Опорами ротора являются передний подшипник скольжения и два задних подшипника качения. Вращение роторов производит мотор-редуктор 2, связанный муфтой 3 с валом приводного ротора; второй ротор получает вращение от приводного через зубчатую передачу 4 с передаточным отношением 1,5.

Камера обогревается шестью трубчатыми электронагревателями 3 (рис. 2.2), установленными снизу в вертикальные каналы камеры. Измерение температуры осуществляют два термосопротивления ТСП 4: одно контролирует температуру смеси, другое – температуру корпуса камеры. Задание и поддержание температуры осуществляется от термосопротивления, измеряющего температуру корпуса камеры. Сигналы от этих датчиков поступают на измеритель-регулятор 2ТРМ10-Щ1.У.Р.Р., который позволяет задавать и поддерживать в заданных пределах температуру камеры. Температура камеры измеряется прибором ТРМ1 9. На верхней плоскости камеры имеется отверстие 0,8 мм для установки при необходимости ртутного термометра. Для уменьшения теплоотдачи в окружающее пространство камера обложена пластинами фторопласта и стеклотекстолита 5.

Смесительная камера и мотор-редуктор закреплены на раме. Муфта закрыта кожухом. Приборы управления микросмесителем размещены на щите управления 9.

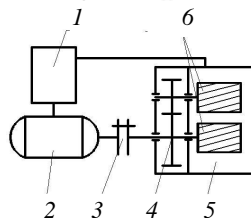


Рис. 2.1. Схема смесителя Брабендера:

- 1 – шкаф управления;
- 2 – электродвигатель;
- 3 – муфта;
- 4 – фрикционные шестерни;
- 5 – смесительная камера;
- 6 – смесительные органы

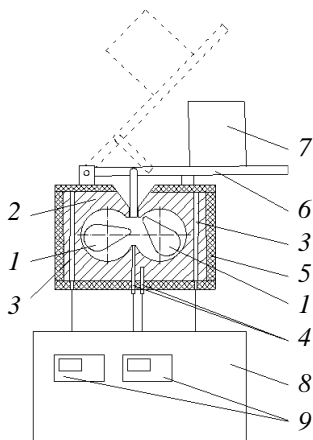


Рис. 2.2. Схема камеры смесителя:

- 1 – роторы; 2 – смесительная камера; 3 – трубчатые электронагреватели;
- 4 – термопары; 5 – пластины теплоизолятора; 6 – рычаг;
- 7 – груз; 8 – щит управления;
- 9 – приборы для измерения и задания температуры

Для предотвращения выдавливания смешиваемых компонентов из камеры наружу служит загрузочное устройство, состоящее из рычага 6, оснащенного аркой, внедряющейся в загрузочное отверстие камеры под действием груза 7.

Щит управления 1 (рис. 2.1) предназначен для управления электроприводом микросмесителя, а также нагревом и поддержанием температуры в рабочей зоне.

Скорость вращения регулируется поворотной ручкой потенциометра.

Не допускается длительная работа смесителя при показаниях вольтметра больше 2 В из-за нагрева редуктора выше допустимого предела.

2.1. Технические характеристики смесителя

Наименование параметра	Значение параметра	Примечание
1. Свободный объем камеры, см ³	200...20	
2. Тип ротора	двухлопастной	
3. Номинальная частота вращения роторов, об/мин на быстроходном валу	30...100	
4. Регулирование скорости	бесступенчатое	
5. Фрикция	1:1,5	
6. Обогрев камеры	электрический	
7. Температура нагрева камеры, max, °C	200	
8. Мощность, кВт: электродвигателя привода нагревателей	1,1 0,8	
9. Ток питающей электросети переменный однофазный с глухозаземленной нейтралью: напряжение, В частота, Гц	220 ± 2 50 ± 1	
10. Габаритные размеры смесителя, мм, не более: длина ширина высота	480 550 450	
11. Габаритные размеры щита управления, мм, не более: длина ширина высота	210 400 600	
12. Масса смесителя, кг, не более	80	
13. Масса щита управления, кг, не более	20	

Не рекомендуется длительная работа на пониженной скорости из-за ухудшения условий охлаждения электродвигателя.

Преобразователь частоты программируется по приложенной инструкции. В процессе работы на выносном цифровом терминале отображается текущая величина нагрузки двигателя.

2.2.2. Принцип работы смесителя

Смесь загружается в загрузочную воронку камеры при вращающихся роторах и поддавливается загрузочным устройством. Смесительные роторы вращаются в корпусе камеры в противоположных направлениях с различной частотой, при этом ведущий ротор вращается с большей частотой, чем ведомый. В результате этого направление сил, действующих на находящуюся между роторами смесь, постоянно меняется, способствуя интенсивному перемешиванию.

В соответствии с технологическим регламентом устанавливается температура нагрева камеры и скорость вращения роторов.

При работе смесителя температура камеры может превысить установленную за счет разогрева смешиваемого материала.

Во избежание перегрева смеси рекомендуется вводить поправку на величину предварительного нагрева камеры. Температура стенок камеры и смеси могут отличаться.

После окончания цикла смешения необходимо снять загрузочное устройство, отвернуть рукоятки крепления, снять камеру и выгрузить смесь.

2.2.3. Разработанные рабочие органы различной конфигурации

С целью интенсификации процесса диспергирования и изучения влияния различных конструктивных параметров на качество получаемого материала разработаны рабочие органы с различной геометрией фигурной части (рис. 2.3 – 2.5): овальные, гладкие, рифленые, винтовые многозаходные. Минимальный зазор при использовании гладких, рифленых или винтовых многозаходных рабочих органов составляет $h_0 = 0,15$ мм, что обеспечивает высокую сдвиговую деформацию.

Конфигурация гладких рабочих органов (рис. 2.3) позволяет достичь максимальной деформации сдвига за короткий промежуток времени благодаря тому, что зона с минимальным зазором составляет 70 % общей траектории, которую проходит материал за один оборот ротора. Но данная конфигурация фигурной части ротора не обеспечивает продольного перемещения материала вдоль оси ротора, что сказывается на неравномерности распределения вводимого наполнителя.

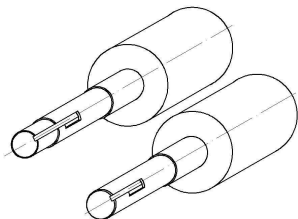


Рис. 2.3. Гладкие рабочие органы

Для обеспечения продольного перемещения материала разработаны рабочие органы с наклонной нарезкой: рифленные (рис. 2.4) и винтовые многозаходные (рис. 2.5). Нарезка на всех роторах сделана в одну сторону, что бы при вращении их навстречу друг другу материал на одном роторе двигался вдоль оси вращения в одном направлении, а на втором роторе – в противоположном. При этом происходит сталкивание потоков, что интенсифицирует процесс смешения и диспергирования.

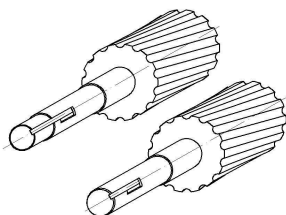


Рис. 2.4. Рифленные рабочие органы

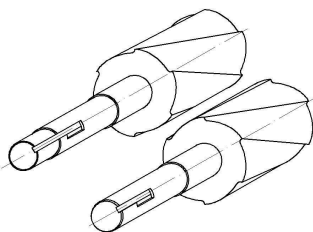


Рис. 2.5. Винтовые многозаходные рабочие органы

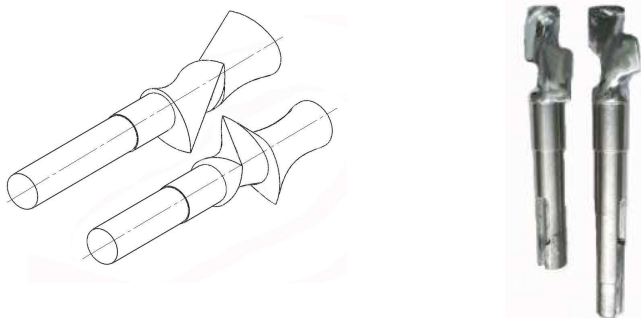


Рис. 2.6. Овальные рабочие органы

Геометрия фигурной части рифленых рабочих органов (рис. 2.4) представляет собой чередование канала прямоугольного сечения и гребня. Данная конфигурация, являясь частным случаем многозаходных червяков экструзионных машин, позволяет исследовать некоторые аспекты часто встречающегося в полимерной промышленности процесса экструзии, а также интенсифицировать процесс диспергирования за счет многозаходности.

Конфигурация винтовых многозаходных рабочих органов (рис. 2.5) представляет собой чередование серповидных зазоров. В однозаходном виде такая геометрия описывается теорией плоского слабосходящегося установившегося течения псевдопластичной жидкости. С подобной формой движения жидкости приходится иметь дело довольно-таки часто: зазор между гребнем лопасти смесителя и его стенкой, течение материала в канале червяка с коническим сердечником и т.д. Многозаходность данной конфигурации и малый минимальный зазор способствуют интенсификации процесса диспергирования вводимого наполнителя.

Геометрия фигурной части овальных рабочих органов (рис. 2.6) представляет собой наиболее распространенную в полимерной промышленности конфигурацию двухлопастных роторов, что позволяет исследовать процесс смешения и диспергирования на оборудовании наиболее приближенном к промышленному.

2.3. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования принят периодический процесс модификации техническим углеродом марки К-354 отходов ПВД производственного и общественного потребления, а также первичного полиэтилена высокого давления марки 15803-020 на ЭУ. Отходы ПВД производственного и общественного потребления выбраны в качестве объекта исследования в связи с тем, что они составляют 38 % от всего объема отходов термопластов.

Свойства первичного ПВД (марка 15803-020, натуральный, сорт – высший) представлены в табл. 2.2, а вторичного – в табл. 2.3.

Технический углерод марки К 354 – канальный, активный, получаемый в диффузионном пламени при термоокислительном разложении природного или попутного газа, с высоким показателем дисперсности и низким показателем структурности. Его свойства представлены в табл. 2.4.

2.2. Свойства первичного ПВД (марка 15803-020)

Наименование показателя	Значение
1. Размер гранул, мм	от 2 до 5
2. Плотность, ρ , г/см ³	0,919 ± 0,01
3. Показатель текучести расплава с доп. в %, I , г/10 мин	1,8 ± 6
4. Предел текучести при растяжении, σ_r , Па (кГс/см ²)	93·10 ⁵ (95)
5. Прочность при разрыве, σ_p , Па (кГс/см ²)	115·10 ⁵ (115)
6. Относительное удлинение при разрыве, ε , %	780,5
7. Реологические свойства при температуре переработки ($t = 130$ °С):	
– индекс течения, n	0,2
– коэффициент консистенции, K , МПа·с	0,2
8. Молекулярная масса, M	18 500

2.3. Требования предъявляемые к перерабатываемым отходам полимерной тары и упаковки

Наименование показателя	Значение
1. Допускаемое загрязнение, %, не более	3...5
2. Количество включений стекла, металла, резины, машинного масла	не допускается
3. Время эксплуатации и пребывания на свалке, лет, не более	3
4. Включения других термопластичных полимерных материалов, %, не более	2...3

**2.4. Свойства технического углерода марки К 354
в соответствии с ГОСТ 7885–86**

Наименование показателя	Норма для марки
1. Удельная геометрическая поверхность, м ² /г	90...100
2. Удельная условная поверхность, м ² /г	–
3. Удельная внешняя поверхность, м ² /г	–
4. Йодное число, г/кг	–
5. Удельная адсорбционная поверхность, м ² /г	не более 150
6. Абсорбционная дибутилфталата, см ² /100 г	–
7. рН водной суспензии	3,7...4,5
8. Массовая доля потерь при 105 °С, %, не более	1,5
9. Зольность, %, не более	0,05
10. Массовая доля остатка, %, не более, после просева через сито с сеткой:	
0045	0,08
05	0,0010
014	0,004
11. Массовая доля общей серы, %, не более	–
12. Сопротивление гранул истиранию, %	–
13. Массовая доля пыли в гранулированном углероде, %, не более	–
14. Насыпная плотность гранулированного углерода, кг/м ³ , в пределах, не менее	–
15. Светопропускание толуольного экстракта, %, не менее	–
16. Прочность отдельных гранул, Н	–
17. Сопротивление гранул технического углерода разрушению на аппарате ГИТ-1, %	–
18. Массовая прочность гранул технического углерода, кг	–
19. Массовая доля пыли в гранулированном углероде на аппарате ГИТ-1, %, не более	–

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВВЕДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ВО ВТОРИЧНЫЙ ПОЛИМЕРНЫЙ МАТЕРИАЛ

Целью экспериментальной работы является исследование влияния различных технологических параметров процессов смешения и диспергирования (частоты вращения рабочих органов, времени протекания процесса, температуры смесительной камеры, концентрации вводимого модификатора), а также конструктивных параметров используемого оборудования (конфигурации рабочих органов) на свойства получаемого композиционного материала с целью выбора параметров управления.

3.1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Делали навески полимера и наполнителя в соответствии с выбранным технологическим режимом. Камера смесителя нагревалась до температуры, необходимой для осуществления выбранного технологического режима ($T = 130, 150, 170$ °С).

Подготовленные отходы и наполнитель загружали в рабочую камеру смесителя одновременно, где вращающиеся на малых оборотах рабочие органы под действием сдвиговых напряжений и сил адгезии затягивали их. Далее закрывали загрузочное отверстие камеры затвором и выводили частоту вращения рабочих органов до значения, соответствующего выбранному технологическому режиму ($n = \{30, 45, 60, 75, 90$ об/мин).

Смешение происходило в течение времени, заданного выбранным технологическим режимом ($t = 1, 5, 10$ мин).

После остановки рабочих органов производили выгрузку полученной смеси.

3.1.1. Определение показателя текучести расплава полученного композиционного материала

Для определения показателя текучести расплава использовали грузовой капиллярный вискозиметр ИИРТ-М, который соответствует ГОСТ 11645–73. В зависимости от вида исследуемого полимера в соответствии с ГОСТ выбрали капилляр диаметром 2 мм, температуру испытания 190 °С, груз массой 2,16 кг. Перед испытаниями вискозиметр прогревали в течение одного часа. После этого заполняли камеру прибора гранулами и вводили в нее поршень с грузом. Через 10 мин (время прогрева термопласта) освобождали груз, под действием ко-

того полимер начинал продавливаться через капилляр. При истечении полимера через капилляр срезали прутки (до 10 шт.) за установленный промежуток времени – 60 с, который засекали по секундомеру. Прутки, которые содержали пузырьки воздуха, – забраковывали. На аналитических весах определяли массу срезанных прутков с точностью до 0,001 г.

Показатель текучести расплава I (г/10 мин) определяли по формуле

$$I = 600m/t, \quad (3.1)$$

где m – масса прутка, г; t – время истечения прутка, с.

За результат испытаний принимали среднее квадратичное всех параллельных определений для каждого эксперимента.

Несмотря на то, что ПТР является условной характеристикой текучести расплавов полимеров, эта величина позволяет оценить поведение материала при переработке.

3.1.2. Определение предела текучести, прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве модифицированного вторичного полиэтилена

Полученный композиционный материал закладывался в пресс-форму, которую устанавливали в пресс. Прессование происходит при температуре 160 °С при давлении 100 кГс/см² в течение 15 мин. Из полученных прессованием пластин вырубались образцы, показанные на рис. 3.1.

Испытания на растяжение проводили согласно ГОСТ 11262–68. Образцы должны иметь гладкую ровную поверхность без вздутий, сколов, трещин, раковин и других дефектов. Образцов для каждого опыта было не менее пяти.

Испытания проводились на разрывной машине ЦМГИ-Ц-250. Скорость раздвижения захватов в испытательной машине 28 мм/мин.

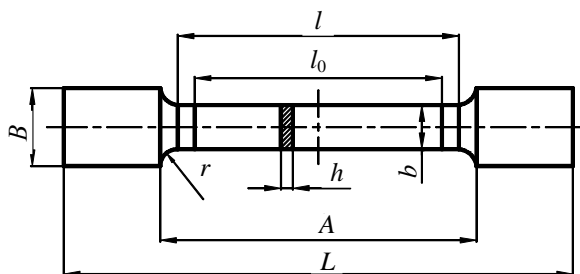


Рис. 3.1. Образец для испытания на растяжение

3.1. Размеры образцов для испытания на растяжение

Название размеров	Обозначение	Величина в мм
Общая длина	L	40
Ширина головки	B	7
Длина рабочей части	l	18
Ширина рабочей части	b	3,5
Размеры закруглений	r	3
Расстояние между метками	A	21
Толщина рабочей части	h	2
Начальная база образца	l_0	16

Перед испытанием измеряли толщину и ширину образцов в их рабочей части с точностью до 0,01 мм не менее чем в трех местах (табл. 3.1). Образцы, у которых результаты измерений толщины и ширины рабочей части различались больше, чем на 0,2 мм, заменялись другими.

Перед испытанием на образец наносили метки, ограничивающие его базу и положение кромок захватов. Нанесение меток не должно приводить к изменению свойств образца и к его разрушению по меткам. Образец закрепляли в захваты разрывной машины по меткам, определяющим положение кромок захватов на образце, так, чтобы исключить его скольжение в процессе испытания; при этом разрушение его не должно происходить в месте закрепления. Продольная ось образца должна совпадать с осью захватов и направлением движения подвижного захвата.

В момент достижения предела текучести и разрушения измеряли нагрузку и удлинение. В расчет принимали результаты, полученные на образцах, разрушившихся в пределах рабочей части.

Предел текучести при растяжении σ_T и прочность при разрыве σ_p вычисляли по формулам

$$\sigma_T = P_T / bh; \quad (3.2)$$

$$\sigma_p = P_p / bh, \quad (3.3)$$

где P_T – нагрузка в момент достижения предела текучести, кГс; P_p – нагрузка, при которой образец разрушился, кГс; b , h – ширина и толщина рабочей части образца, см.

Относительное удлинение при разрыве ϵ вычисляли по формуле

$$\epsilon = \Delta l / l_0 \cdot 100, \quad (3.4)$$

где Δl – приращение образца при разрыве, мм.

За результат испытаний принимали среднее квадратичное всех параллельных (не менее 5 точек) определений для каждого эксперимента.

3.1.3. Оценка однородности полученного композиционного материала

На микротоме санном МС-2 делалось 10 микротомных срезов полученного композиционного материала толщиной 25 мкм. Срез направлялся в оптический микроскоп с 280 кратным увеличением, где посредством цифровой техники делались его цифровые фотографии. Далее фотографии подвергались обработке на ЭВМ в программе PhotoShop CS2 с целью привести полученное изображение в монохромный вид и задать необходимый размер. Таким образом получали изображение с размерами 500×500 пикселей вида, представленного на рис. 3.2. На изображении черные области представляют частички технического углерода, а белые – полимерный материал.

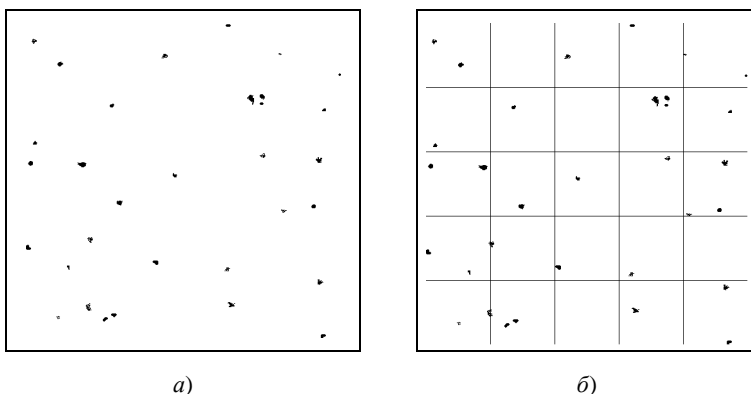


Рис. 3.2 Анализируемое изображение:
а – до работы программы; *б* – после работы программы

Полученное изображение загружалось в специально написанную программу на ЭВМ с использованием программного обеспечения Delphi 4 [79 – 81]. Задавались относительное содержание диспергируемой фазы и количество разбиений загруженного изображения, и программа производила оценку однородности смеси по описанному ниже методу. Блок-схема и реализация программы на Delphi 4 представлены в прил. 1.

Методы количественного описания процесса смешения опираются на статистический анализ, основанный на сравнении генеральной дисперсии с фактическим значением среднеквадратичного отклонения концентраций диспергируемого вещества. Эти методы описаны в работах Р.В. Торнера [77].

Качество смешения оценивается статистической обработкой данных анализа проб, отобранных из готовой смеси, и экспериментально.

Генеральная дисперсия определяется из выражения

$$\sigma^2 = q(1 - q)/N, \quad (3.5)$$

где N – число частиц распределяемой фазы, содержащихся в пробе; q – относительное содержание диспергируемой фазы.

Проверка на гомогенность сводится к сравнению экспериментально определенных значений дисперсии концентраций диспергируемой фазы с характеристиками биномиального распределения.

Величина выборочной дисперсии концентрации диспергируемой фазы в отобранных пробах s^2 определяется по формуле

$$s^2 = \frac{1}{M - 1} \sum_{i=1}^M (x_i - \bar{x})^2, \quad (3.6)$$

где M – число проб; x_i – содержание (концентрация) частиц диспергируемой фазы в каждой пробе; \bar{x} – среднее значение доли частиц диспергируемой фазы в смеси для M проб, равное

$$\bar{x} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i. \quad (3.7)$$

Наиболее распространенные критерии оценки степени однородности смешения основаны на использовании статистических величин. По мере приближения смеси к случайной выборочная дисперсия s^2 приближается к предельному минимальному значению генеральной дисперсии σ^2 .

Для оценки однородности смеси использовался критерий Лейси [77]:

$$I = \frac{\sigma_0^2 - s^2}{\sigma_0^2 - \sigma^2}. \quad (3.8)$$

Здесь σ_0^2 – дисперсия исходной системы, равная

$$\sigma_0^2 = q(1 - q). \quad (3.9)$$

Значение I изменяется в диапазоне от нуля (совершенно несмешанная система) до единицы (идеально смешанная система).

3.2. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВТОРИЧНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО ТЕХНИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ МАРКИ К-354

Проводили эксперименты по определению зависимости показателя текучести расплава, предела текучести при растяжении, предела прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве от

частоты вращения приводного ротора и суммарной величины сдвига при различных величинах температуры смесительной камеры, концентрации вводимого технического углерода, времени процесса смешения, различных способов активации вводимого технического углерода и конфигурациях смесительных органов. Определяли зависимость критерия Лейси от суммарной величины сдвига. Исследовали периодический процесс смешения и диспергирования вторичного и первичного полиэтилена высокого давления марки 15803-020 с техническим углеродом марки К-354 на смесителе типа Брабендер.

По описанной выше методике проводили эксперименты при величинах: температуры смесительной камеры $T = \{130, 150, 170\}$ °С; времени процесса смешения $t = 1, 5, 10$ мин; концентрации вводимого технического углерода $C = \{0; 0,05; 0,5; 1; 1,5\}$ %. Использовались различные способы активации вводимого технического углерода: шаровая мельница, многократное пропускание через минимальный межвалковый зазор, ультразвуковое воздействие.

После обработки экспериментальных данных были получены графические зависимости, показанные на рис. 3.3 – 3.49.

3.2.1. Сравнение деформационного воздействия, оказываемого на композит рабочими органами с различной геометрией фигурной части

С целью интенсификации процесса диспергирования разработаны рабочие органы различной конфигурации (рис. 2.3 – 2.6): овальные, гладкие, рифленые, винтовые многозаходные.

Целью данных экспериментальных исследований является выявление зависимости деформационного воздействия, оказываемого на перерабатываемый материал, от конфигурации рабочих органов, используемых в процессе смешения.

С каждой парой рабочих органов проведен ряд исследований процесса модификации вторичного полиэтилена высокого давления техническим углеродом марки К-354 при равных технологических параметрах ($T = 150$ °С, $t = 5$ мин, $n = \{30, 45, 60, 75, 90\}$ об/мин, $C = 1$ %), в результате чего получены графические зависимости (рис. 3.3 – 3.6), позволяющие оценить воздействие, оказываемое рабочими органами различной конфигурации на получаемый композит.

Анализ графических зависимостей показывает, что физико-механические характеристики композиционного материала в значительной степени зависят от конфигурации рабочих органов. Наилучшие результаты получены при использовании овальных роторов, прочность минимум на 13 % выше, чем при использовании роторов других конфигураций ($\sigma_p = 13,851$ МПа).

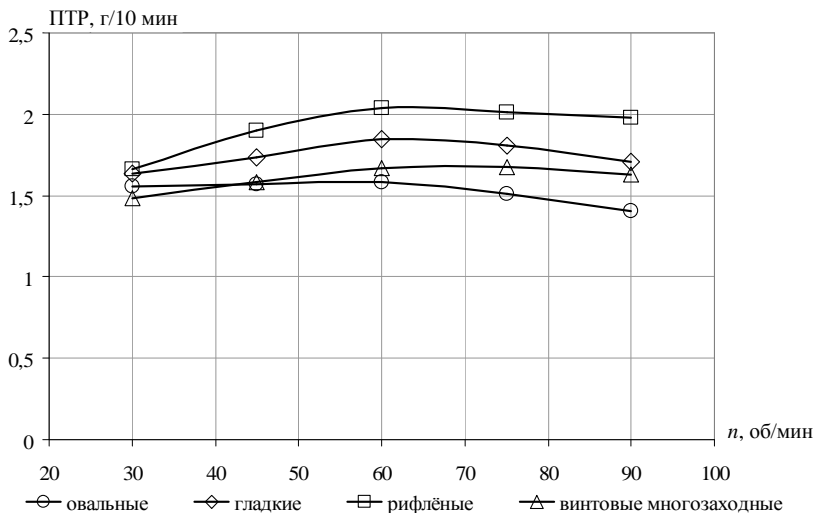


Рис. 3.3. График зависимости ПТР от частоты вращения рабочих органов с различной геометрией фигурной части

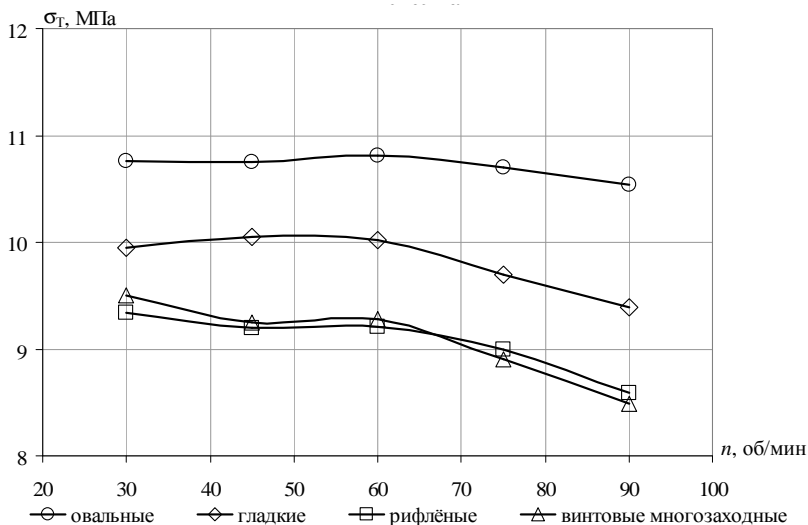


Рис. 3.4. График зависимости предела текучести расплава от частоты вращения рабочих органов с различной геометрией фигурной части

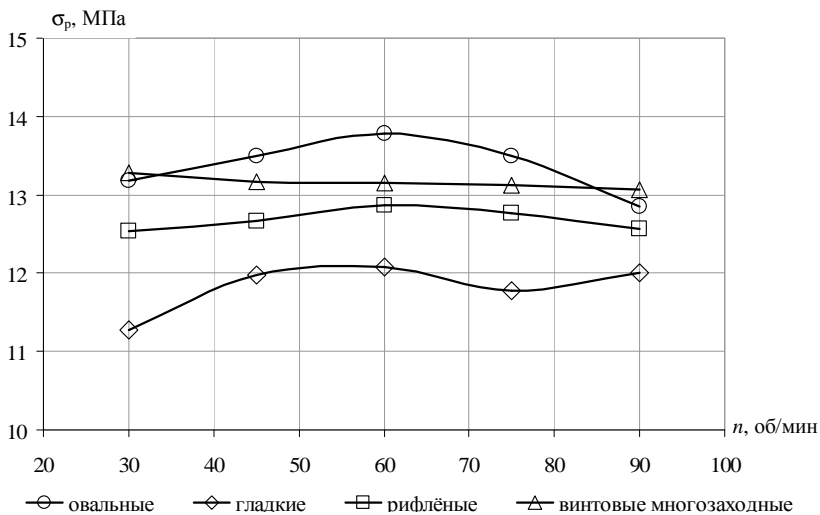


Рис. 3.5. График зависимости прочности при разрыве от частоты вращения рабочих органов с различной геометрией фигурной части

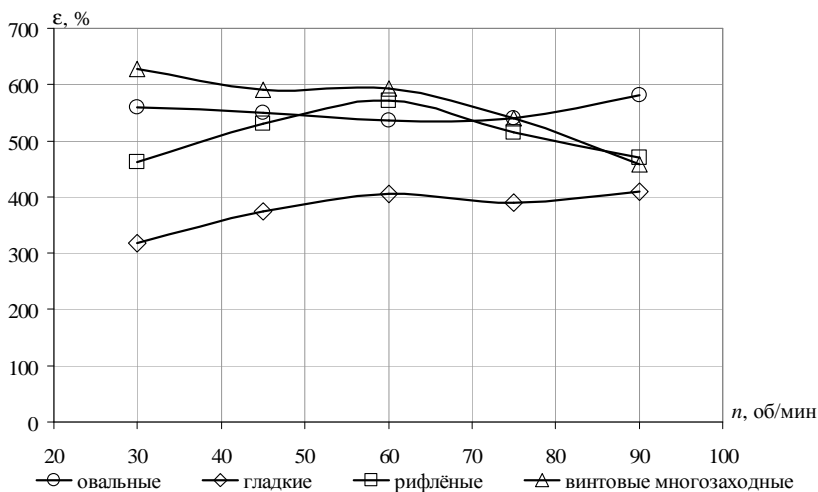


Рис. 3.6. График зависимости относительного удлинения при разрыве от частоты вращения рабочих органов с различной геометрией фигурной части

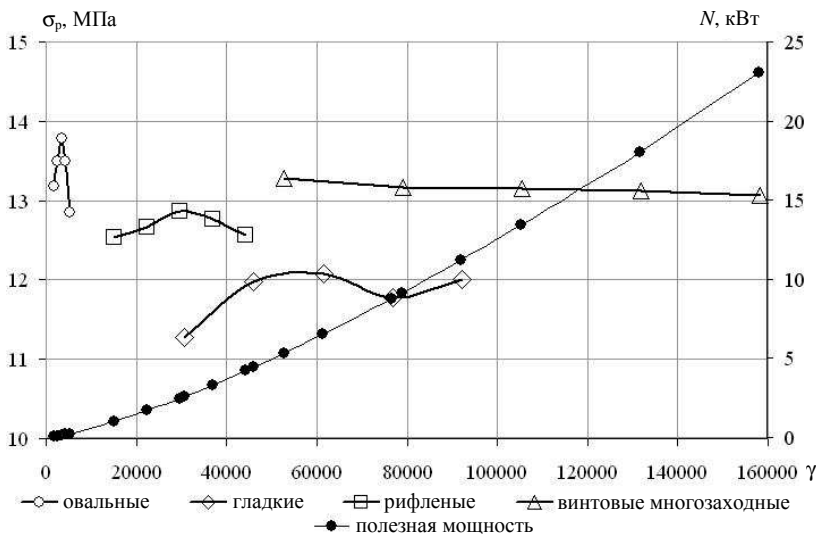
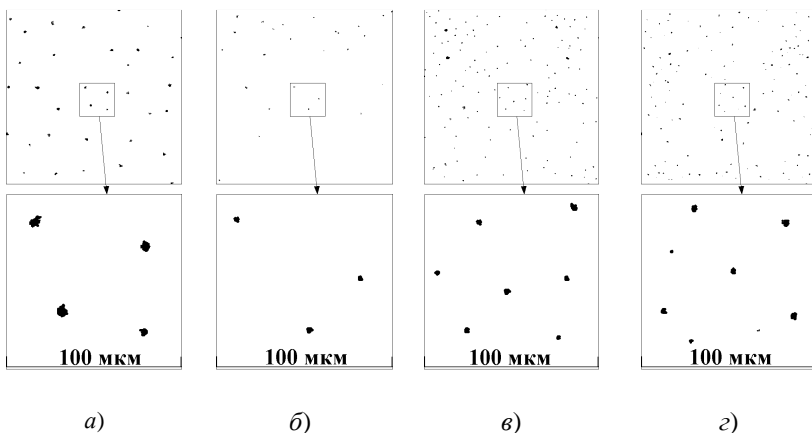


Рис. 3.7. График зависимости прочности при разрыве и полезной мощности от суммарной величины сдвига при использовании рабочих органов с различной геометрией фигурной части

Использование рабочих органов других конструкций не оказывает отрицательного воздействия на перерабатываемый материал, приводя все показатели к значениям, допускаемым ГОСТ 16337–77, за исключением валковых рабочих органов, при использовании которых наблюдается небольшое падение прочности и значительное уменьшение величины относительного удлинения. Это происходит за счет высоких сдвиговых деформаций, приводящих к преобладанию процесса механодеструкции над процессом структурирования, а также за счет неравномерного распределения вводимого наполнителя.

Далее проводилась оценка зависимости прочности при разрыве получаемого композиционного материала и полезной мощности, затрачиваемой на процесс его получения (при использовании рабочих органов с различной геометрией фигурной части), от суммарной величины сдвига, методика определения которой описана в главе 4). Полученная графическая зависимость подтверждает выбор овальных роторов и наглядно показывает экономическую выгоду их использования (за счет минимальной потребляемой мощности) по сравнению с другими исследуемыми конфигурациями.



**Рис. 3.8. Примеры обработанных фотографий
микротомных срезов композита
при использовании рабочих органов различной конфигурации:
а – овалы; б – гладкие; в – рифленые; г – винтовые многозаходные**

На рисунке 3.8 представлены обработанные фотографии микротомных срезов получаемого композиционного материала.

На изображениях видно, что вводимый наполнитель наиболее равномерно распределяется при использовании овальных рабочих органов рис. 3.8, а. Но, как видно из рис. 3.8, при использовании остальных конфигураций рабочих органов увеличивается дисперсность вводимого наполнителя, что происходит за счет высоких сдвиговых деформаций, действующих на частички наполнителя каждый раз при их прохождении через минимальный зазор.

Проведенная оценка однородности полученного композиционного материала и построенная графическая зависимость критерия Лейси от суммарной величины сдвига (рис. 3.9) также подтвердила выбор овальных рабочих органов. Из графика видно, что при использовании овальных роторов так называемый предел насыщения (оптимальное значение суммарной величины сдвига, после которого дальнейшее ее увеличение не влияет на критерий) [74] достигается при значительно меньших величинах сдвига.

Сравнительная диаграмма критерия Лейси при достижении оптимальных значений суммарной величины сдвига на рабочих органах с различной геометрией фигурной части показана на рис. 3.10.

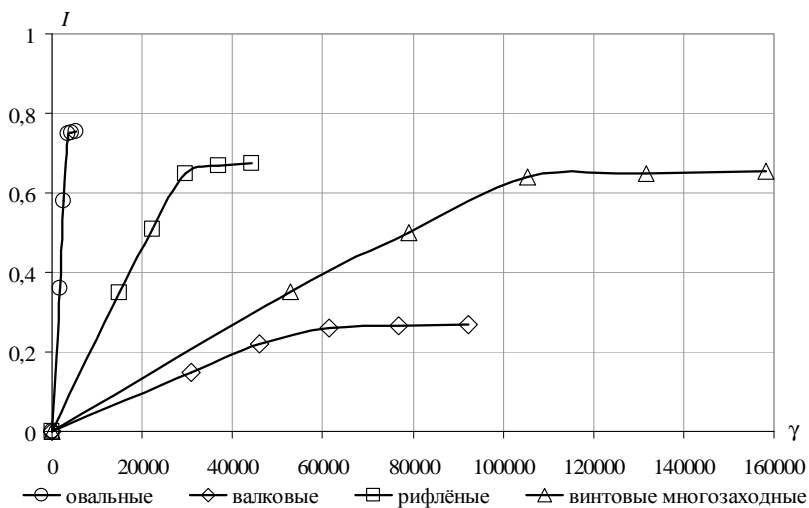


Рис. 3.9. График зависимости критерия Лейси от суммарной величины сдвига при использовании рабочих органов с различной геометрией фигурной части

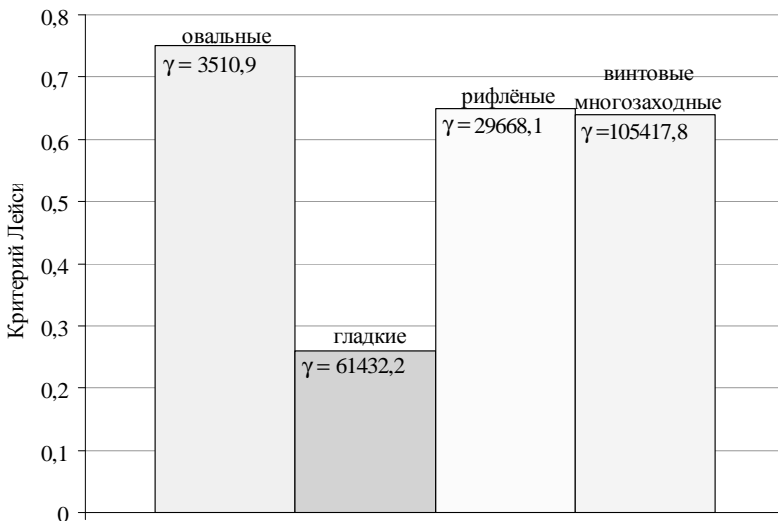


Рис. 3.10. Сравнение критерия Лейси при достижении оптимальных значений суммарной величины сдвига на рабочих органах с различной геометрией фигурной части

3.2.2. Определение оптимального технологического режима процесса получения композиционного материала на основе ВПВД и ТУ с высокими физико-механическими характеристиками

Исследован периодический процесс смешения и диспергирования вторичного и первичного полиэтилена высокого давления марки 15803-020 с техническим углеродом марки К-354 на смесителе типа Брабендер с овальными рабочими органами.

Проведены экспериментальные исследования по выявлению оптимального технологического режима процесса получения композиционного материала на основе вторичного полиэтилена высокого давления и технического углерода.

Проведен эксперимент по выявлению изменения величины полезной мощности, затрачиваемой на процесс во времени при различных частотах вращения рабочих органов смесителя. В результате была получена следующая графическая зависимость (рис. 3.11).

Анализ зависимости показывает, что при любой частоте вращения рабочих органов для полного диспергирования компонентов смеси требуется время в промежутке 5...8 мин. Судя по графику, далее протекает установившийся процесс с едва заметными редкими всплесками, что говорит о равномерном и полном распределении дисперсной фазы в дисперсионной среде. Следовательно, предварительно можно сказать, что время, требующееся на процесс, равно 5...8 мин.

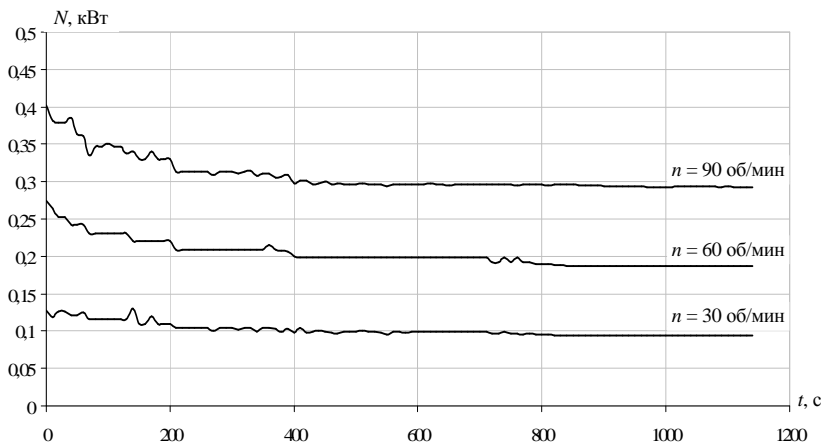


Рис. 3.11. График зависимости величины полезной мощности, затрачиваемой на процесс смешения, от времени процесса при различных частотах вращения рабочих органов

Проведен ряд экспериментальных исследований, в ходе которых технический углерод вводился во вторичный полиэтилен в различных массовых долях вводимого технического углерода ($C = \{0; 0,5; 1; 1,5\}$ %) и при различных технологических параметрах (частота вращения рабочих органов: $n = \{30, 60, 90\}$ об/мин; время процесса смешения: $t = \{1, 5, 10\}$ мин; температура смесительной камеры: $T = \{130, 150, 170\}$ °С. В результате были построены графические зависимости (рис. 3.12 – 3.27).

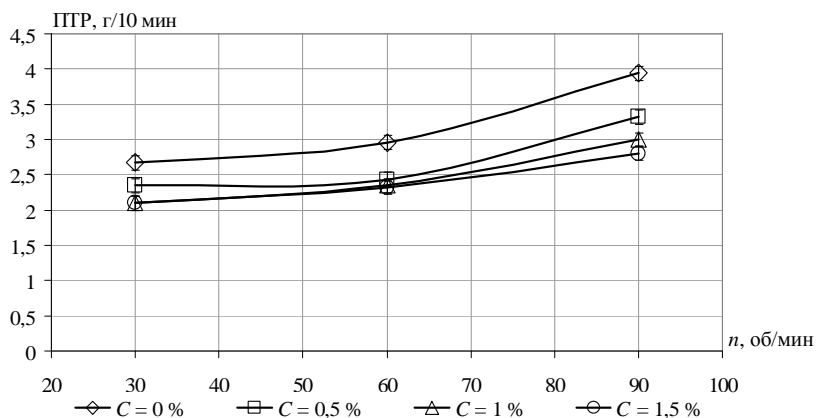


Рис. 3.12. График зависимости ПТР от частоты вращения рабочих органов смесителя при различных концентрациях технического углерода

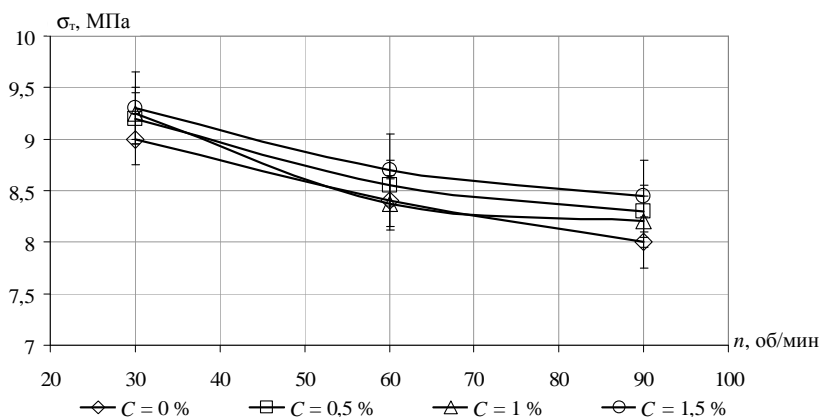


Рис. 3.13. График зависимости предела текучести от частоты вращения рабочих органов смесителя при различных концентрациях технического углерода

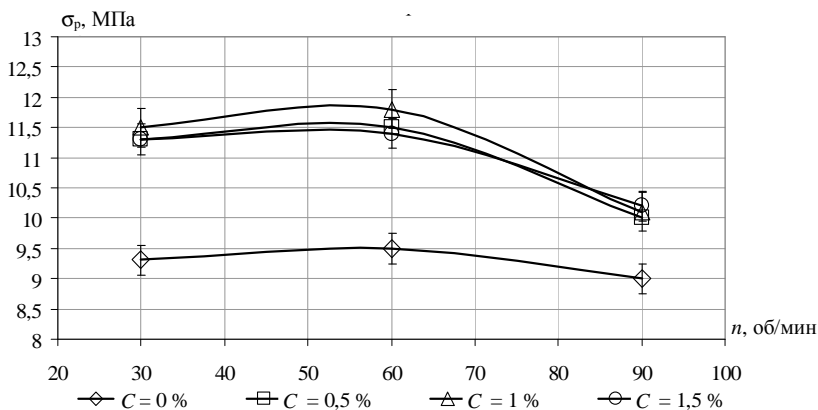


Рис. 3.14. График зависимости прочности при разрыве от частоты вращения рабочих органов смесителя при различных концентрациях технического углерода

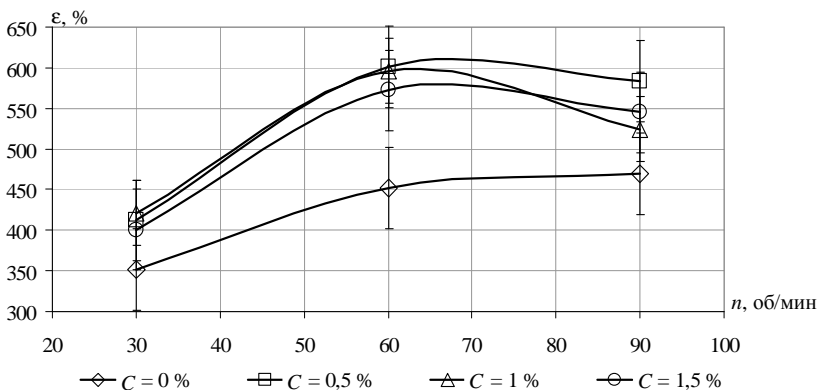


Рис. 3.15. График зависимости относительного удлинения при разрыве от частоты вращения рабочих органов смесителя при различных концентрациях технического углерода

Из графических зависимостей (рис. 3.12 – 3.19, 3.24 – 3.27) видно, что с увеличением частоты вращения от 30 до 60 об/мин показатели получаемого композиционного материала улучшаются, достигая своего максимального значения при $n = 60$ об/мин. Это говорит о том, что частицы наполнителя вступили во взаимодействие со свободными

радикалами полимерной матрицей, что привело к положительным изменениям макроструктуры. Дальнейшее увеличение частоты вращения рабочих органов приводит к падению всех показателей, что происходит из-за накопления сдвиговых деформаций, приводящих к разрыву образовавшихся связей.

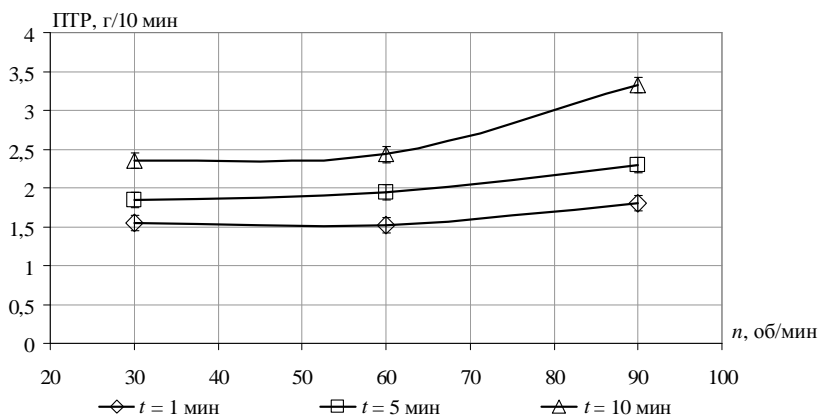


Рис. 3.16. График зависимости ПТР от частоты вращения рабочих органов смесителя при различном времени процесса смешения

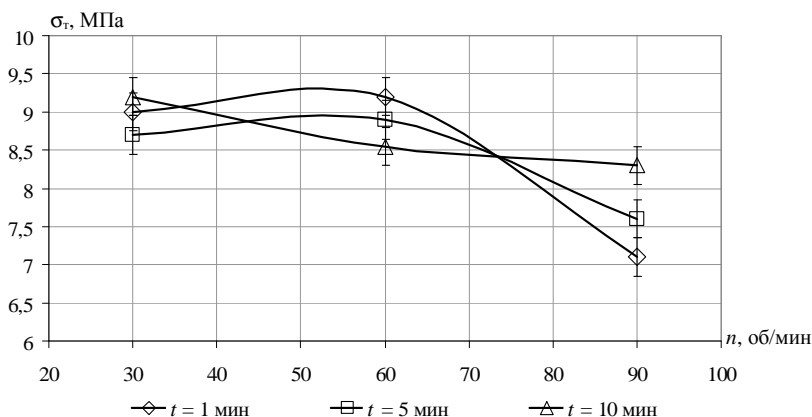


Рис. 3.17. График зависимости предела текучести от частоты вращения рабочих органов смесителя при различном времени процесса смешения

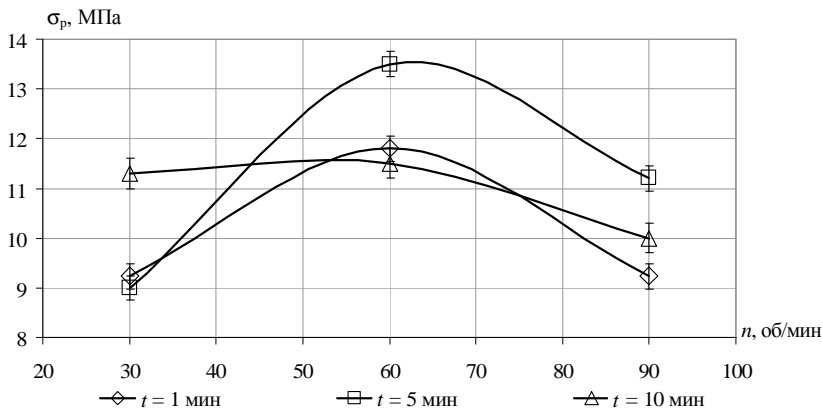


Рис. 3.18. График зависимости прочности при разрыве от частоты вращения рабочих органов смесителя при различном времени процесса смешения

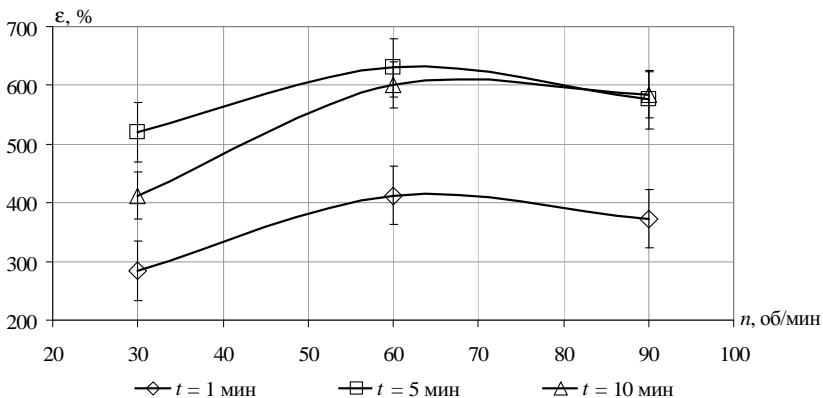


Рис. 3.19. График зависимости относительного удлинения при разрыве от частоты вращения рабочих органов смесителя при различном времени процесса смешения

Как видно из графических зависимостей (рис. 3.16 – 3.23) оптимальное время процесса смешения составляет 5 мин, что подтверждает предварительно выявленные значения из графика зависимости полезной мощности, затрачиваемой на процесс смешения, от времени процесса (рис. 3.11). Уменьшение или увеличение времени процесса способствует значительному ухудшению свойств получаемого композита.

Анализ графических зависимостей позволяет сделать вывод, что увеличение концентрации технического углерода свыше 0,5 % не оказывает существенного влияния на характеристики получаемого материала, даже ухудшая его свойства на 2,2 % (рис. 3.20 – 3.23). Следовательно, оптимальной концентрацией технического углерода является 0,5 %, а дальнейшее ее увеличение не рационально с точки зрения ресурсосбережения.

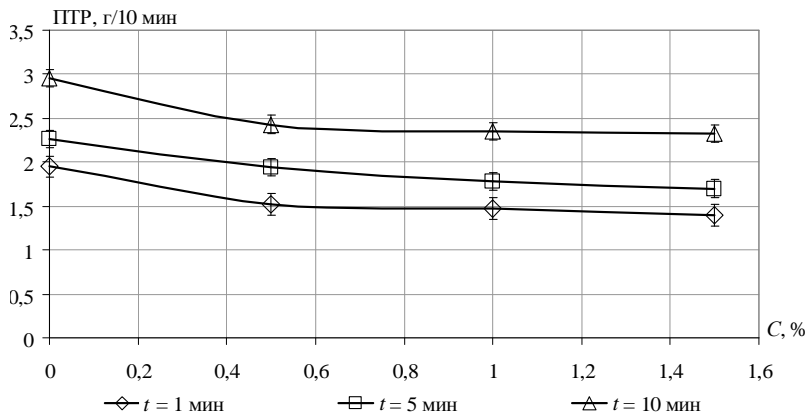


Рис. 3.20. График зависимости ПТР от концентрации технического углерода при различном времени процесса смешения

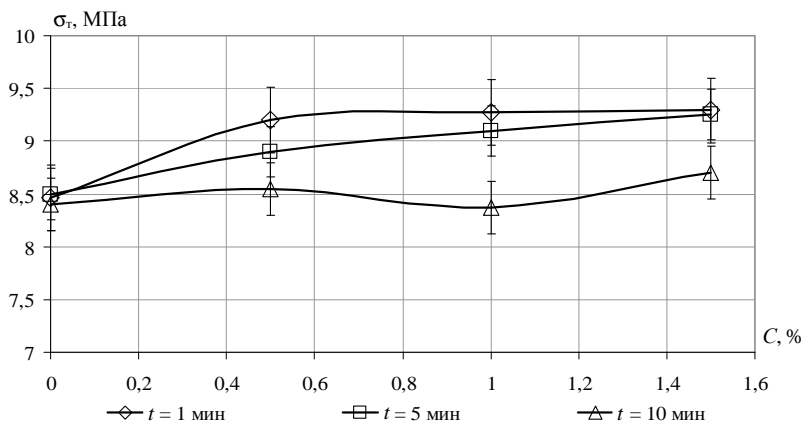


Рис. 3.21. График зависимости предела текучести от концентрации технического углерода при различном времени процесса смешения

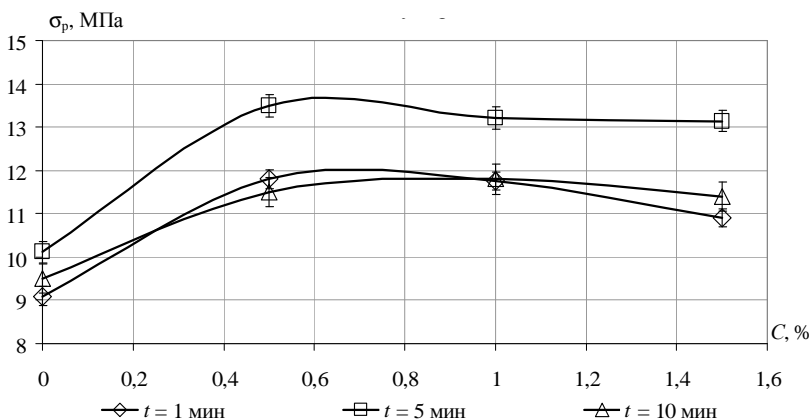


Рис. 3.22. График зависимости прочности при разрыве от концентрации технического углерода при различном времени процесса смешения

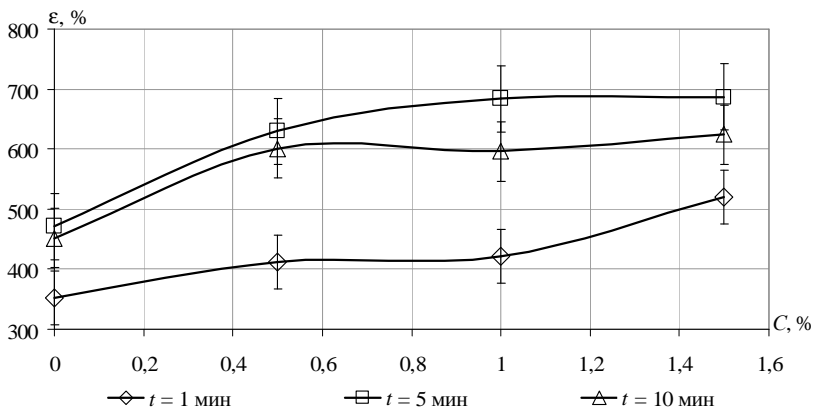


Рис. 3.23. График зависимости относительного удлинения при разрыве от концентрации технического углерода при различном времени процесса смешения

Из графических зависимостей (рис. 3.24 – 3.27) видно, что увеличение температуры до 150 °С способствует улучшению показателей получаемого материала, а дальнейшее увеличение температуры не ведет к улучшению показателей и не рационально с точки зрения экономии энергии.

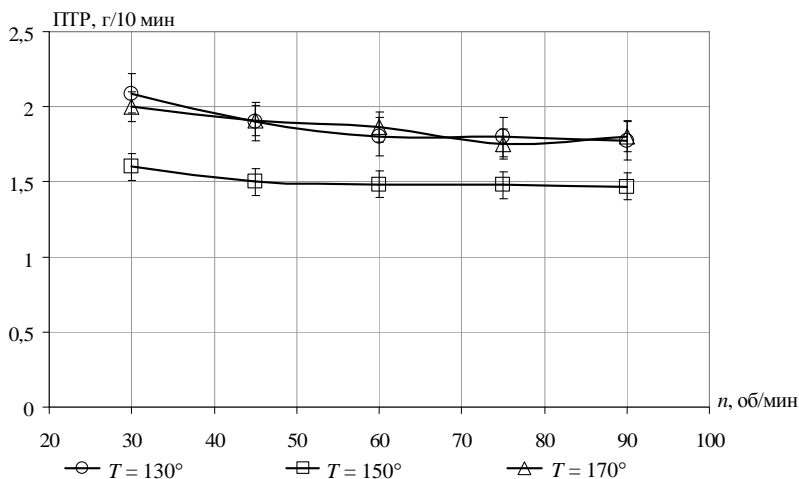


Рис. 3.24. График зависимости ПТР от частоты вращения рабочих органов при различной температуре смеси

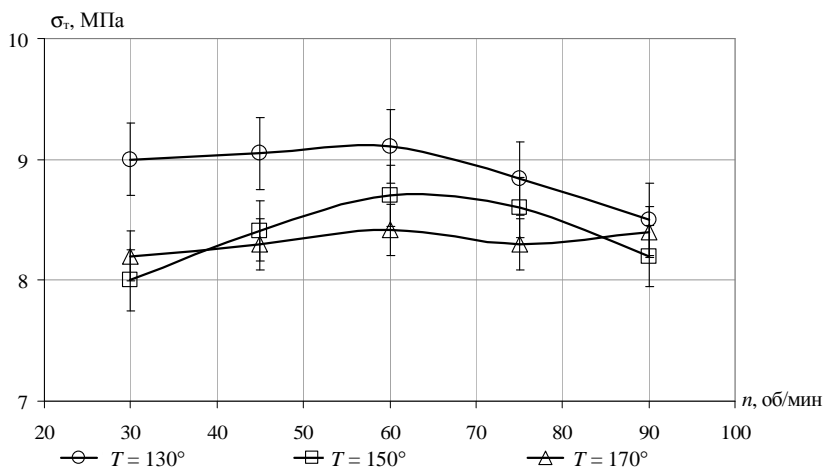


Рис. 3.25. График зависимости предела текучести от частоты вращения рабочих органов при различной температуре смеси

Анализ графических зависимостей позволяет сделать вывод, что рациональный технологический режим, при котором может быть получен качественный композит, достигается при следующих значениях управляющих параметров: $C = 0,5 \%$; $n = 60$ об/мин; $t = 5$ мин; $T = 150$ °С.

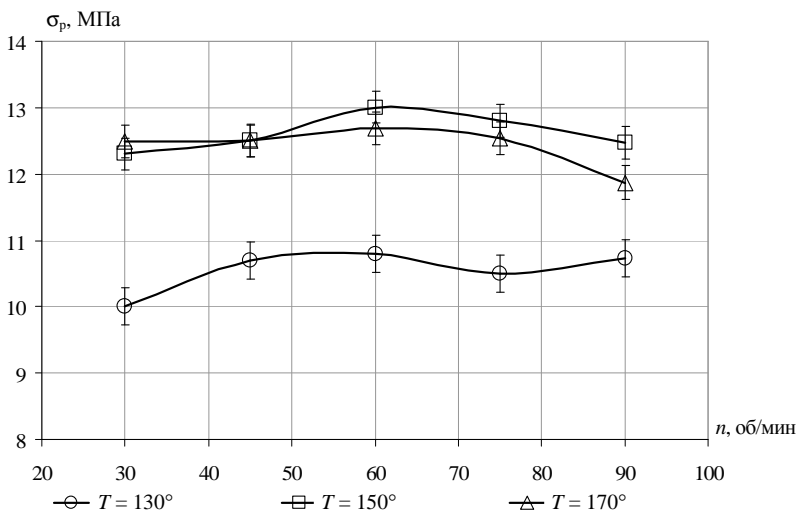


Рис. 3.26. График зависимости прочности при разрыве от частоты вращения рабочих органов при различной температуре смеси

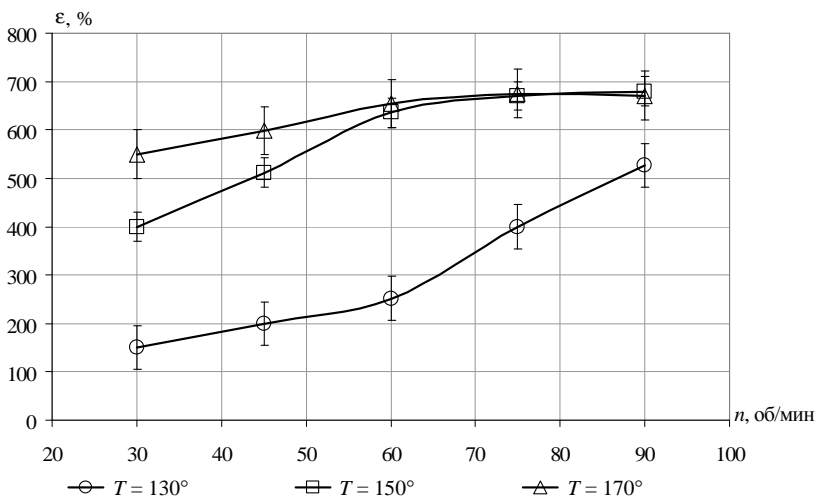


Рис. 3.27. График зависимости относительного удлинения при разрыве от частоты вращения рабочих органов при различной температуре смеси

При данных управляющих параметрах $C = 0,5 \%$; $n = 60$ об/мин; $t = 5$ мин; $T = 150^\circ$ на смесителе типа Брабендер с овальными рабочими органами проведены проверочные экспериментальные исследо-

вания, которые подтвердили его выбор. В результате был получен композиционный материал со следующими показателями качества: ПТР = 1,684 г/10 мин, $\sigma_T = 10,83$ МПа, $\sigma_p = 13,851$ МПа, $\epsilon = 597,6$ %, $I = 0,73$.

Проведена оценка однородности получаемого композиционного материала и построена графическая зависимость (рис. 3.28) критерия Лейси от суммарной величины сдвига при использовании оборудования двух типоразмеров, геометрия рабочих пространств которых одинакова, а различаются они объемом рабочей камеры (100 см³, 200 см³). Как видно из графика, так называемый предел насыщения смеси достигается при величине суммарной деформации сдвига ($\gamma = 3450 \dots 3550$), что соответствует выявленному технологическому режиму процесса, при котором композит обладает наилучшими качествами.

Также из графиков (рис. 3.28) видно, что независимо от типоразмеров оборудования, при одинаковой конфигурации рабочего пространства и реологии перерабатываемого материала предел насыщения достигается при одной и той же оптимальной величине суммарной деформации сдвига ($\gamma = 3450 \dots 3550$). Это говорит о том, что масштабный коэффициент при переходе с оборудования одного типоразмера

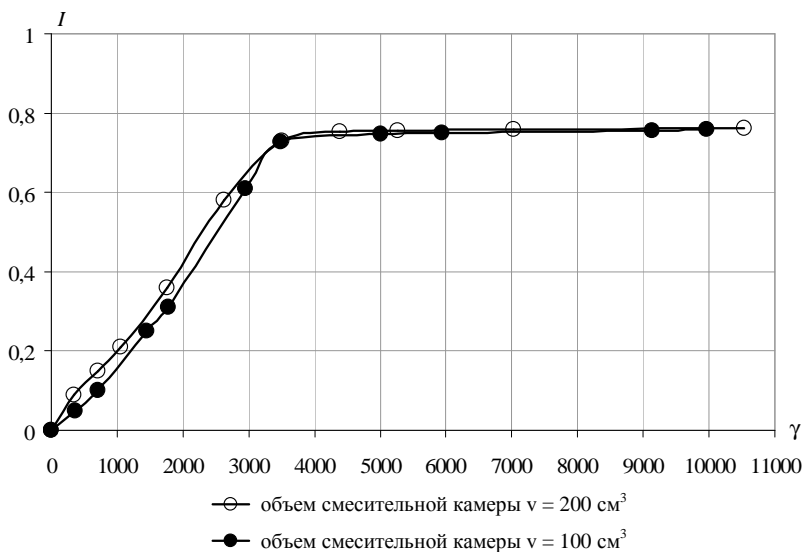


Рис. 3.28. Зависимость прочности при разрыве σ_p от суммарной величины сдвига γ при различном способе активации наполнителя

на другое равен единице. Это позволяет в лабораторных условиях на разработанной установке определять режимные и конструктивные параметры процесса получения композитов на основе отходов полимеров и рекомендовать их для использования в промышленности.

3.2.3 Сравнение физико-механических характеристик модифицированного и немодифицированного вторичного и первичного полиэтилена высокого давления

При проведении ряда экспериментов с целью сравнения физико-механических характеристик модифицированного и немодифицированного первичного и вторичного материалов построены графические зависимости физико-механических характеристик получаемых материалов от частоты вращения рабочих органов смесителя как основного управляющего параметра. Эксперимент проводился при следующих технологических параметрах: $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t = 5\text{ мин}$; $C = 0,5\text{ \%}$; $n = \{30, 45, 60, 75, 90\}$ об/мин.

Анализ графических зависимостей (рис. 3.29 – 3.32) показывает, что композит на основе вторичного полиэтилена высокого давления и технического углерода обладает наилучшими физико-механическими характеристиками, превосходя переработанный по той же технологии модифицированный и немодифицированный первичный материал. А по сравнению со вторичным немодифицированным материалом показатели улучшились на 25...40 % (рис. 3.31), что говорит о возможности использования в качестве модификатора технического углерода.

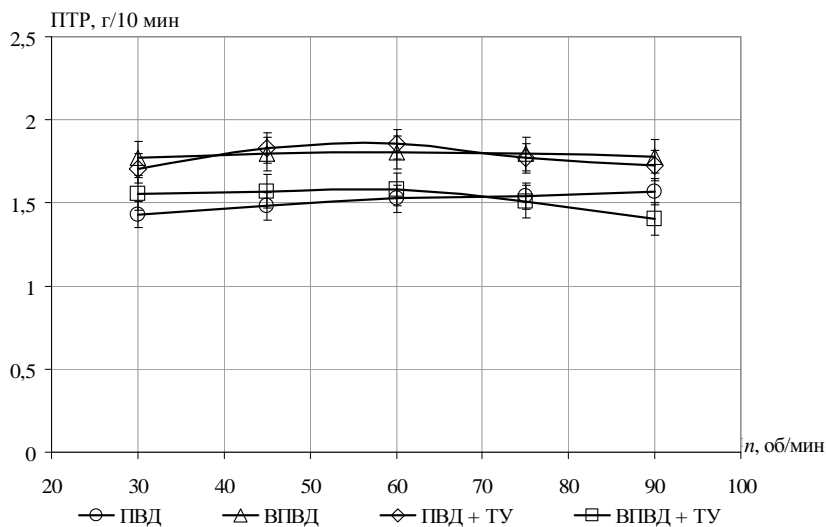


Рис. 3.29. График зависимости ПТР исследуемых материалов от частоты вращения рабочих органов смесителя

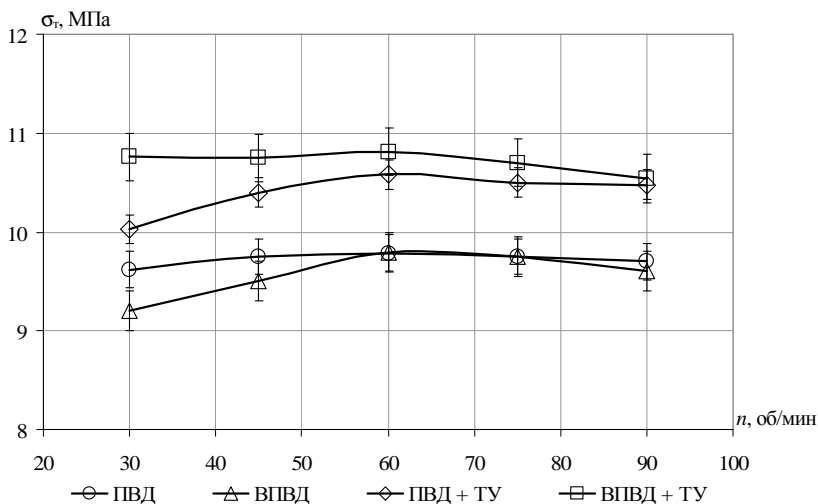


Рис. 3.30. График зависимости предела текучести исследуемых материалов от частоты вращения рабочих органов смесителя

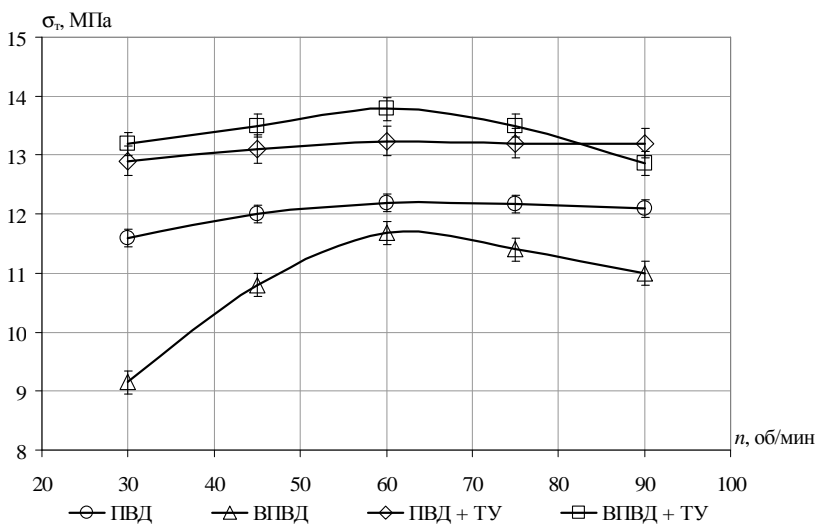


Рис. 3.31. График зависимости прочности при разрыве исследуемых материалов от частоты вращения рабочих органов смесителя

Графические зависимости также подтвердили, что наиболее рациональной частотой вращения рабочих органов для процесса смешения и диспергирования является частота, равная 60 об/мин, при которой получаемый композиционный материал обладает наилучшими свойствами.

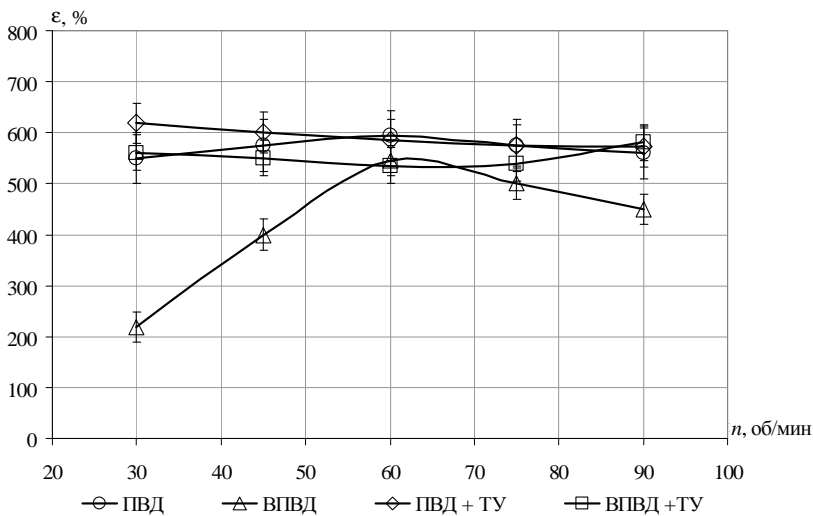


Рис. 3.32. График зависимости относительного удлинения от частоты вращения рабочих органов смесителя

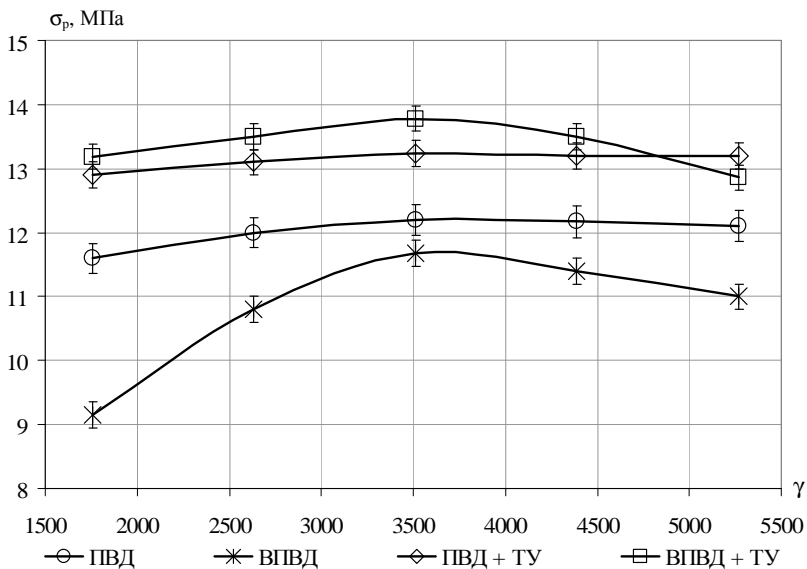


Рис. 3.33. Зависимость прочности при разрыве σ_p от суммарной величины сдвига γ для модифицированного и немодифицированного первичного и вторичного материалов

После расчета суммарной величины сдвига по формулам, приведенным в разделе 4, были получены графические зависимости прочности при разрыве σ_p модифицированного и немодифицированного первичного и вторичного полиэтилена высокого давления от суммарной величины сдвига γ , показанные на рис. 3.33.

Анализ графических зависимостей (рис. 3.33) позволил сделать вывод, что наилучшие физико-механические показатели по прочности полученного композиционного материала на основе вторичного полиэтилена высокого давления и технического углерода марки К-354 наблюдаются при суммарной величине сдвига ($\gamma = 3450 \dots 3550$), которая соответствует определенному ранее технологическому режиму.

3.2.4. Выбор способа активирования вводимого технического углерода

При проведении ряда экспериментальных исследований по выявлению оптимальных режимов воздействия на вводимый модификатор для различных способов предварительного активирования использовались следующие способы предварительного активирования: активирование в шаровой мельнице, воздействие ультразвуком на технический углерод, активирование посредством многократного пропускания технического углерода через минимальный межвалковый зазор вальцов. С каждым способом проводился ряд экспериментов с целью определения параметров процесса активирования, при которых получаемый в последствии композит обладал бы наилучшими физико-механическими свойствами.

В ходе экспериментов предварительно активированный технический углерод вводился в полимерный расплав при отработанном технологическом режиме: $C = 0,5 \%$; $n = 60$ об/мин; $t = 5$ мин; $T = 150$ °С.

В результате эксперимента получены образцы для физико-механических испытаний и по экспериментальным данным построены графические зависимости.

3.2.4.1. Активирование в шаровой мельнице

В шаровой мельнице технический углерод подвергался механическому воздействию, в результате чего его агломераты разбивались на более мелкие частицы и образовывались свободные радикалы.

Использовалась барабанная шаровая мельница: материал барабана – керамика; материал шаров – специальная твердая керамика; рабочее напряжение – 220/380; приводная мощность – 0,4 кВт; число оборотов барабана – 68 об/мин; объем барабана – 5 л; наполнение шаров – 2 кг.

В результате экспериментальных исследований, проводимых при различных частотах вращения барабана шаровой мельницы и различном времени процесса, построены графические зависимости, представленные на рис. 3.34 – 3.37.

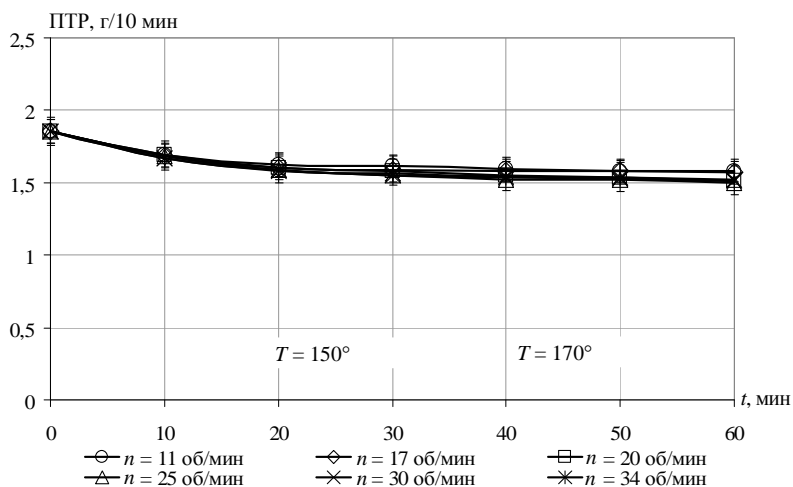


Рис. 3.34. График зависимости ПТР композита от времени активирования в шаровой мельнице при различных частотах ее вращения

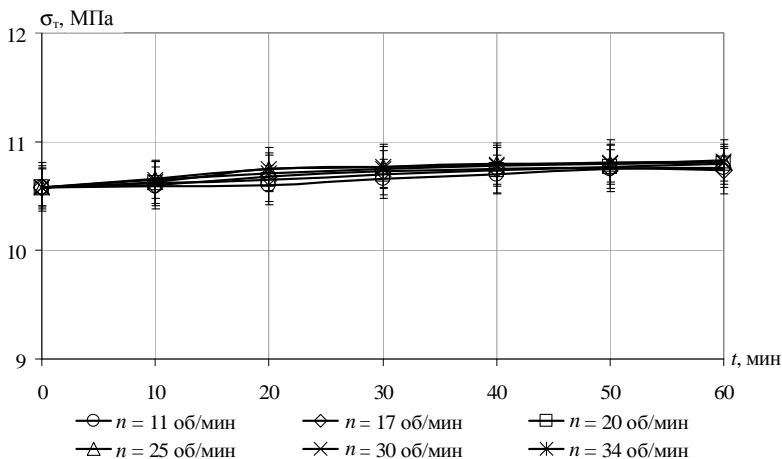


Рис. 3.35. График зависимости предела текучести композита от времени активирования в шаровой мельнице при различных частотах ее вращения

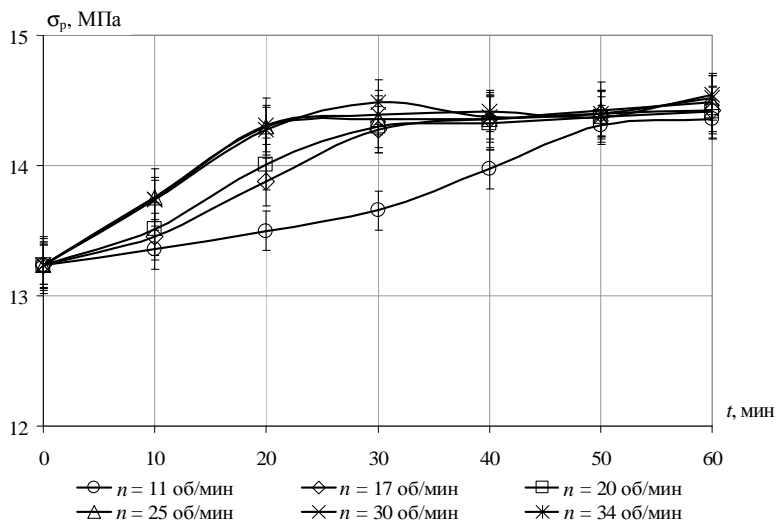


Рис. 3.36. График зависимости прочности при разрыве композита от времени активирования в шаровой мельнице при различных частотах ее вращения

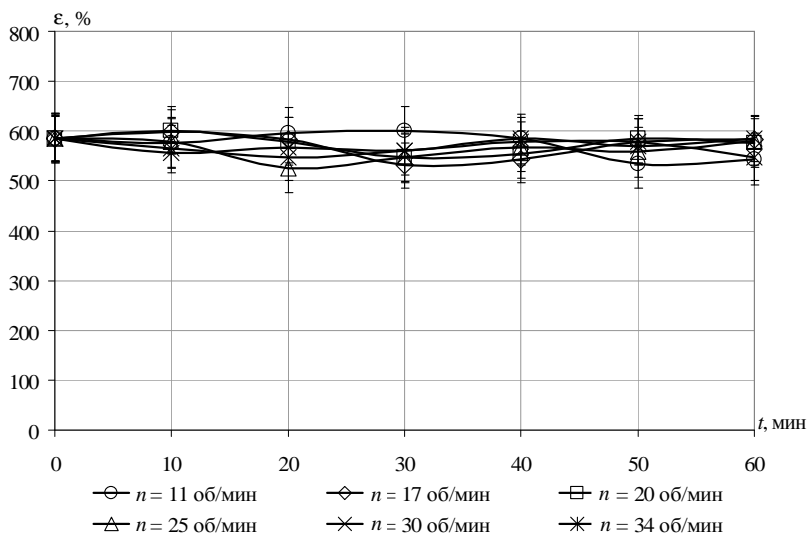


Рис. 3.37. График зависимости относительного удлинения при разрыве композита от времени активирования в шаровой мельнице при различных частотах ее вращения

Анализ графических зависимостей (рис. 3.34 – 3.37) показывает, что композиционный полимерный материал с наилучшими физико-механическими характеристиками получается при добавлении технического углерода, активированного в шаровой мельнице в течение 20 мин при частоте вращения барабана мельницы 25 об/мин.

3.2.4.2. Активирование многократным пропуском через минимальный межвалковый зазор вальцов

При многократном пропуске через минимальный межвалковый зазор вальцов технический углерод испытывает сильное механическое воздействие, что приводит к нарушению атомной структуры и повышению реакционной способности.

Использовались вальцы 160/320, частота вращения – $n = 30$ об/мин; фрикция – $f = 1,2$; межвалковый зазор – $h_0 = 0,01$ мм.

Управляющим параметром выбрано количество пропусков через минимальный межвалковый зазор. В результате эксперимента построены графические зависимости (рис. 3.38 – 3.41), из которых видно, что композиционный материал обладает наилучшими физико-механическими характеристиками при добавлении технического углерода, активированного трехкратным пропуском через минимальный межвалковый зазор вальцов.

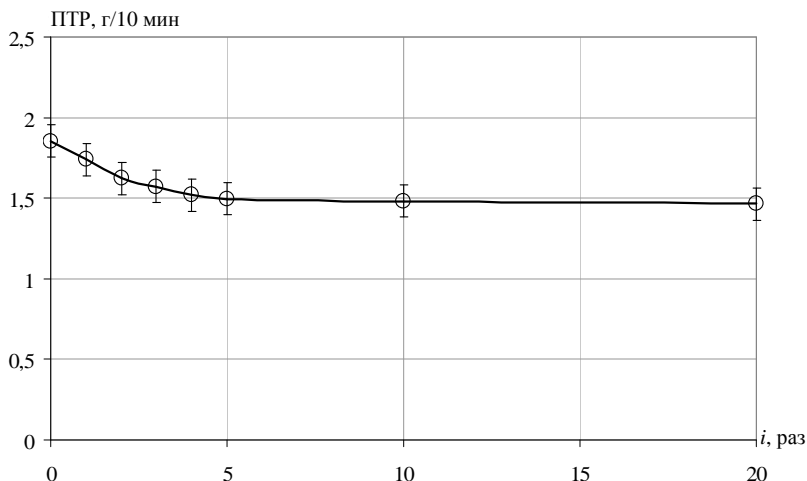


Рис. 3.38. График зависимости ПТР композита от количества пропусков через межвалковый зазор вальцов

Увеличение количества пропусков через минимальный межволковый зазор не ведет к улучшению физико-механических характеристик получаемого материала и увеличивает временные и энергетические затраты.

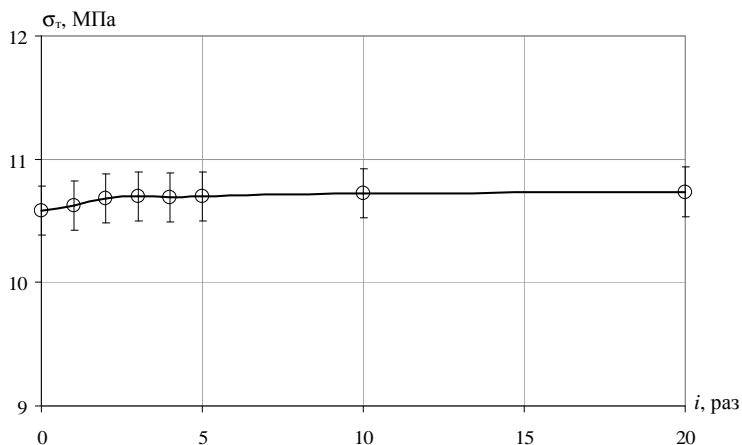


Рис. 3.39. График зависимости предела текучести композита от количества пропусков через межволковый зазор вальцов

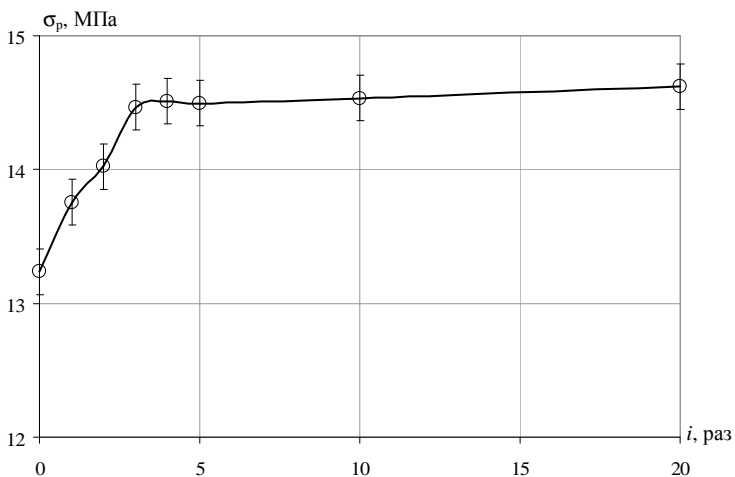


Рис. 3.40. График зависимости прочности при разрыве композита от количества пропусков через межволковый зазор вальцов

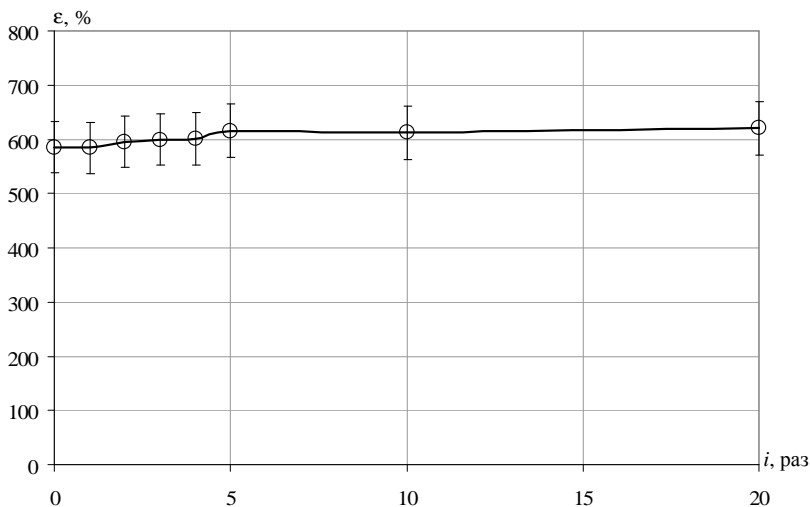


Рис. 3.41. График зависимости относительного удлинения при разрыве композита от количества пропусков через межвалковый зазор вальцов

3.2.4.3 Активирование ультразвуковым воздействием

Использовалась ультразвуковая установка ИЛ100-6, рабочая частота 22 ± 10 % кГц.

Управляющим параметром выбрано время воздействия ультразвука на технический углерод. Частота была принята равной 22 кГц. В результате были получены графические зависимости (рис. 3.42 – 3.45).

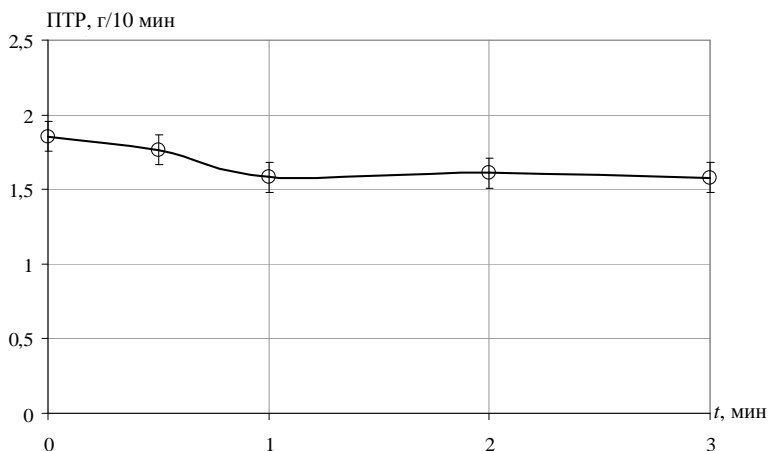


Рис. 3.42. График зависимости ПТР композита от времени ультразвукового воздействия

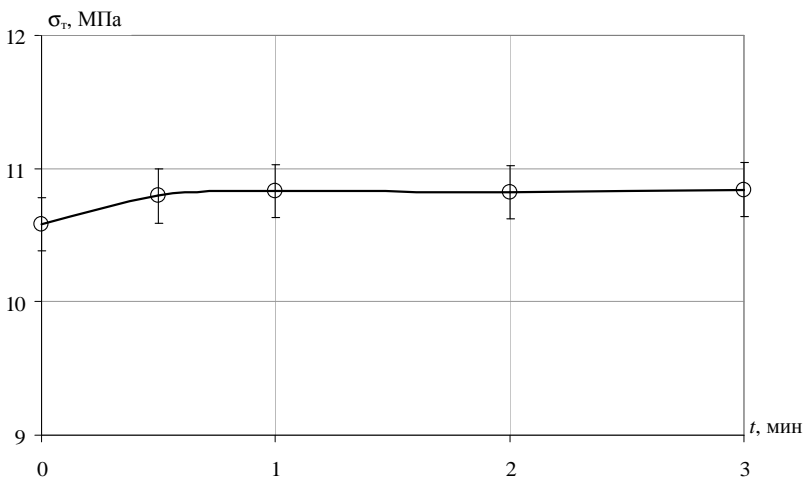


Рис. 3.43. График зависимости предела текучести композита от времени ультразвукового воздействия

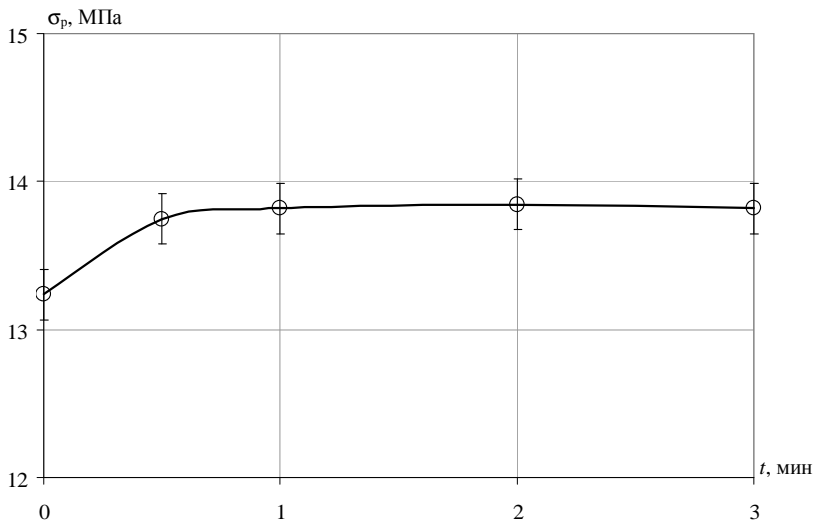


Рис. 3.44. График зависимости прочности при разрыве композита от времени ультразвукового воздействия

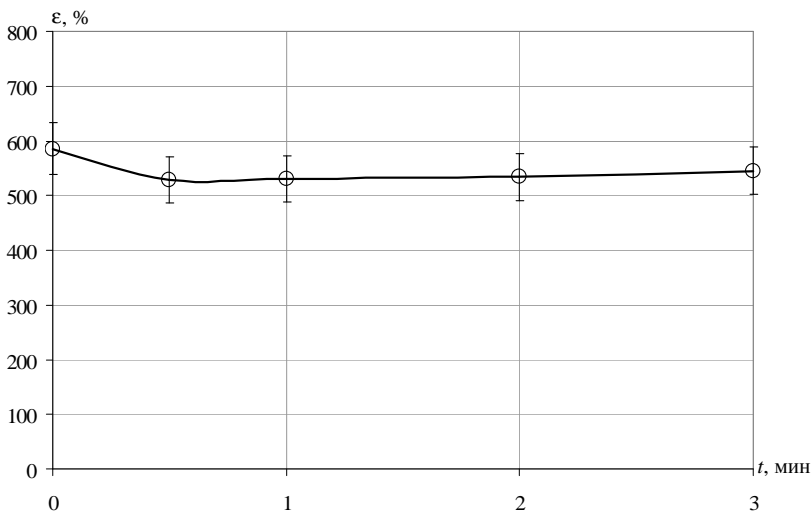


Рис. 3.45. График зависимости относительного удлинения при разрыве композита от времени ультразвукового воздействия

Как видно из графиков (рис. 3.42 – 3.45) при предварительном ультразвуковом воздействии на технический углерод не наблюдается существенных изменений показателей качества получаемого композита, независимо от времени воздействия.

3.2.5. Сравнение физико-механических характеристик ВПВД, модифицированного техническим углеродом, активированным различными способами

Был проведен ряд экспериментальных исследований по сравнению воздействия, оказываемого на получаемый композиционный материал, различными способами предварительного активирования вводимого технического углерода в зависимости от частоты вращения рабочих органов смесителя с целью выявить способ, при котором показатели качества получаемого композиционного материала были бы наилучшими.

Как видно из графиков (рис. 3.46 – 3.49) модифицирование вторичного полиэтилена высокого давления техническим углеродом

позволяет увеличить прочностные характеристики получаемого композиционного материала на 17 %, а введение в полимерную матрицу технического углерода, активированного посредством его трехкратного пропускания через минимальный межвалковый зазор вальцов способствует повышению прочности на 23 % ($\sigma_p = 14,845$ МПа).

Но данный эффект наблюдается не при всех предложенных методах активации технического углерода. Так при предварительном ультразвуковом воздействии на технический углерод не наблюдается существенных изменений.

Наиболее эффективным является способ предварительной активации технического углерода посредством его многократного пропускания через минимальный межвалковый зазор вальцов.

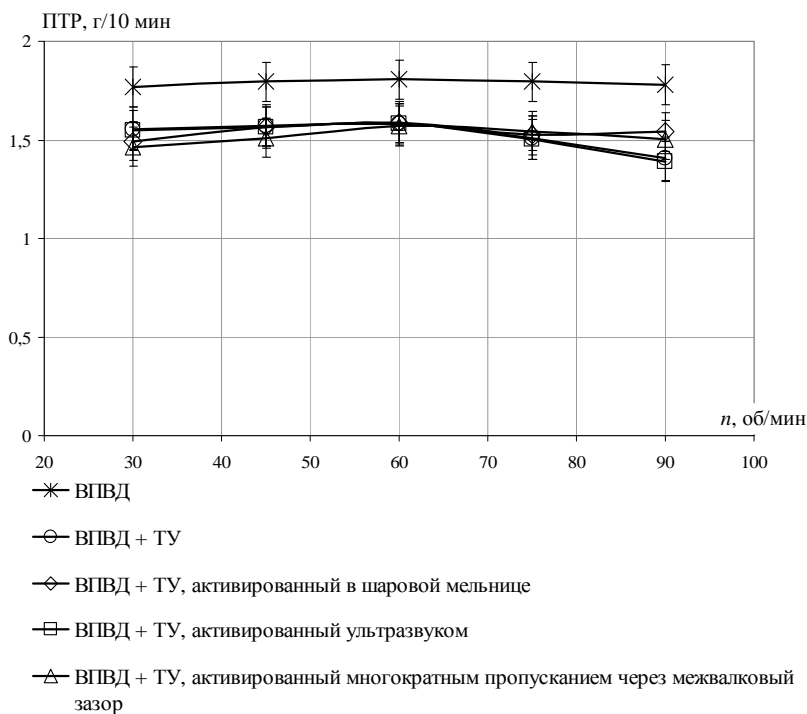
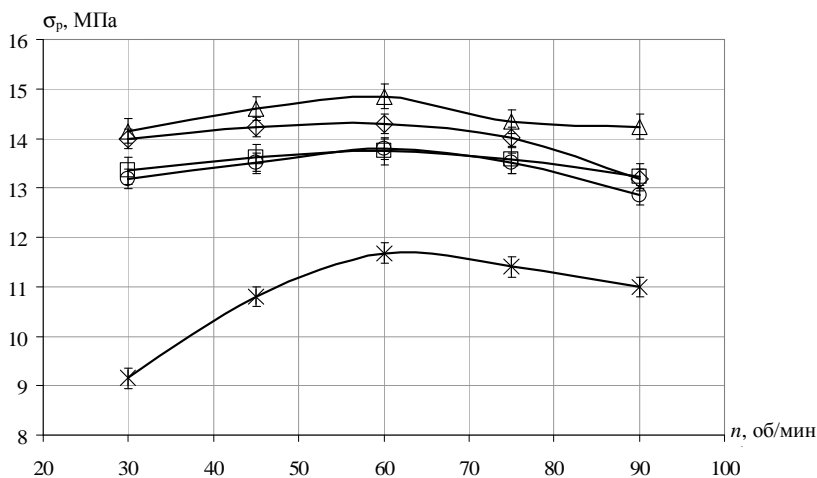
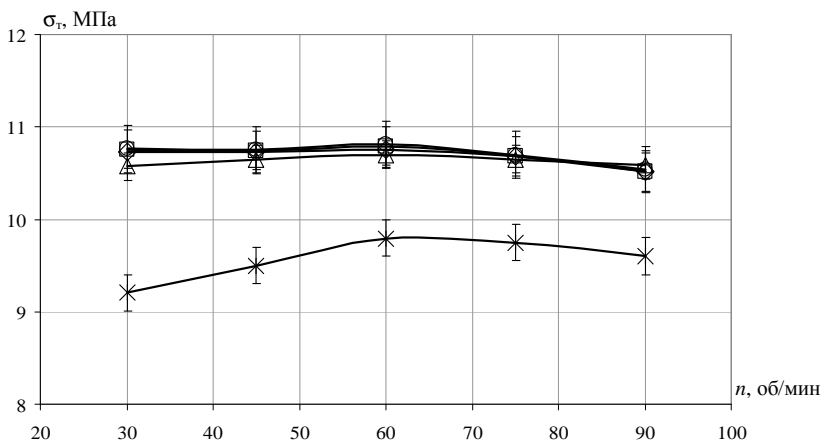


Рис. 3.46. График зависимости ПТР исследуемых материалов от частоты вращения рабочих органов смесителя



- ✱ ВПВД
- ВПВД + ТУ
- ◇ ВПВД + ТУ, активированный в шаровой мельнице
- ▣ ВПВД + ТУ, активированный ультразвуком
- △ ВПВД + ТУ, активированный многократным пропуском через минимальный межвалковый зазор

Рис. 3.47. Графики зависимости предела текучести и прочности при разрыве исследуемых материалов от частоты вращения рабочих органов смесителя

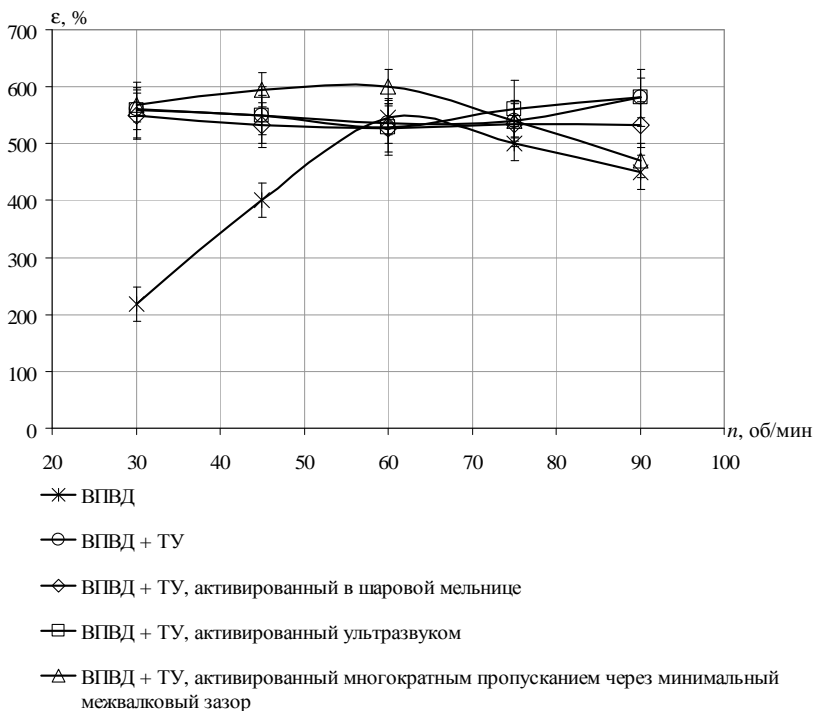


Рис. 3.48. График зависимости относительного удлинения при разрыве исследуемых материалов от частоты вращения рабочих органов смесителя

После расчета суммарной величины сдвига по формулам, приведенным в разделе 4, были построены графические зависимости прочности при разрыве композиционного термопластичного материала σ_p от суммарной величины сдвига γ , показанные на рис. 3.49.

Анализ графических зависимостей (рис. 3.49) позволяет сделать вывод, что наилучшие физико-механические показатели по прочности полученного композиционного материала на основе вторичного полиэтилена высокого давления и активированного любым из предложенных способов технического углерода марки К-354 наблюдаются при суммарной величине сдвига ($\gamma = 3450 \dots 3550$).

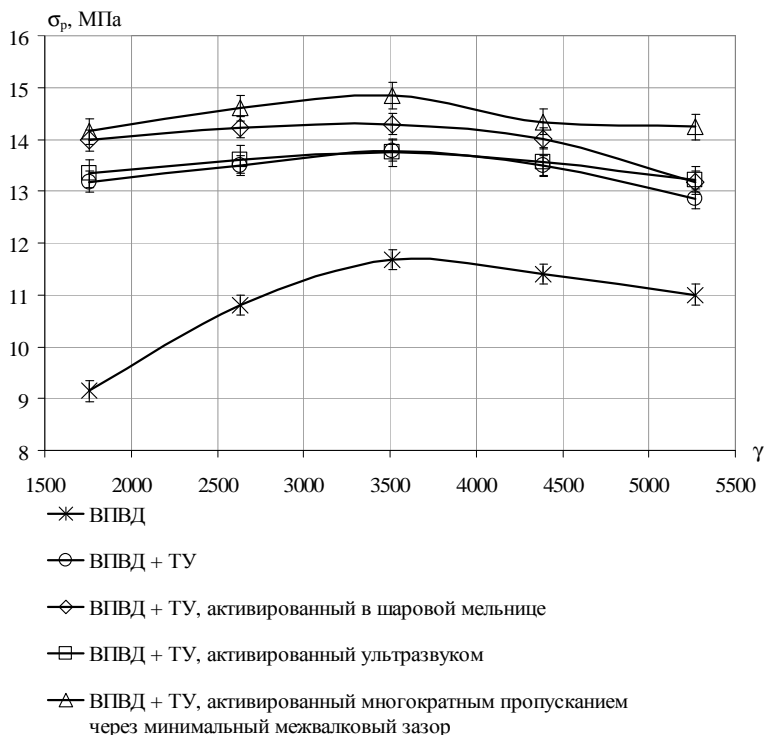


Рис. 3.49. Зависимость прочности при разрыве σ_p от суммарной величины сдвига γ при различных способах активации наполнителя

Таким образом, определение значения суммарной величины сдвига по полученным интегральным уравнениям для конкретных конструкций смесительных органов, создающих соответствующие зоны деформирования перерабатываемого материала, является залогом успеха при прогнозировании показателей качества получаемых композиционных материалов.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ КАЧЕСТВА

Установлено, что на качественные показатели получаемого модифицированного вторичного термопластичного материала (прочность при разрыве, относительное удлинение при разрыве) определяющее влияние оказывает суммарная величина сдвига, возникающая в рабочих зонах смесителя. Она зависит от различных конструктивных (геометрические размеры смесителя) и технологических (частота вращения рабочих органов смесителя, фрикция, температура внутри смесительной камеры) параметров процесса смешения.

Поставлена задача: определить комплексный интегральный критерий переработки материалов, характеризующий качественные показатели модифицированного вторичного термопластичного материала, величина которого может быть положена в основу при расчете конструктивных и технологических параметров смесительных агрегатов.

Анализ литературных источников [75 – 78] показал, что в основу интегрального критерия качества может быть положена суммарная величина сдвига, возникающая в зазорах перерабатывающих машин.

4.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА $\gamma_{\text{сум}}$ В ЗОНАХ ДЕФОРМАЦИИ СМЕСИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ (ОВАЛЬНЫЕ РАБОЧИЕ ОРГАНЫ)

4.1.1. Первый метод

Рассмотрим кинематику движения материала в смесителе с овальными роторами, конструкции которых наиболее широко используются в промышленности переработки полимеров [74, 82]. В камеру смесителя в определенной последовательности загружают ряд компонентов. Роторы смесителя вращаются навстречу друг другу с различными угловыми скоростями. Процесс деформации и смешения компонентов осуществляется под действием соприкасающихся со смесью наружных поверхностей роторов, внутренней поверхности камеры, поверхности верхнего затвора.

Различия в физических свойствах исходных компонентов, широкие вариации их количественного соотношения и порядка введения в камеру приводят к огромному числу возможных положений компонентов в рабочей пространстве машины. Это вызывает сложность аналитического определения энергосиловых параметров процесса, величины смесительного воздействия и т.д.

Увеличение поверхности раздела между компонентами происходит за счет деформации сжатия, сдвига и растяжения в зазорах между роторами и стенкой камеры и в зазоре между роторами, причем и различных частях рабочей камеры смесителя интенсивность деформации смеси различна. В каждой части рабочего объема благодаря сложной конфигурации роторов создаются различные градиенты скорости сдвига, а, следовательно, и различная интенсивность смешения.

По интенсивности сдвиговых деформаций рабочую камеру смесителя можно разбить на три зоны [74, 82]. Наиболее интенсивное воздействие роторов на материал, т.е. наибольшая величина сдвига, происходит в серповидных пространствах (рис. 4.1) – *МКИЛ* между поверхностью гребня ротора и стенкой камеры. Таким образом, наиболее интенсивный сдвиг осуществляется в объемах *ВЕАО₁* и *БМГЛДО₂ – I*.

В зонах деформации *ВО₁Н* и *НО₂Б – II* материал, увлекаемый вращающимися роторами, создает импульсное давление на крышку верхнего затвора, поднимая ее толчками вверх. В зоне *III – НО₁АДО₂* перемещаемые роторами потоки смеси сталкиваются, и здесь происходит смешение потоков – вминание и вдавливание компонентов смеси в полимер. Далее смесь захватывается гребнями роторов, и ударяясь о выступ нижней части смесительной камеры, разделяется на два потока и увлекается в серповидную зону деформации *I*.

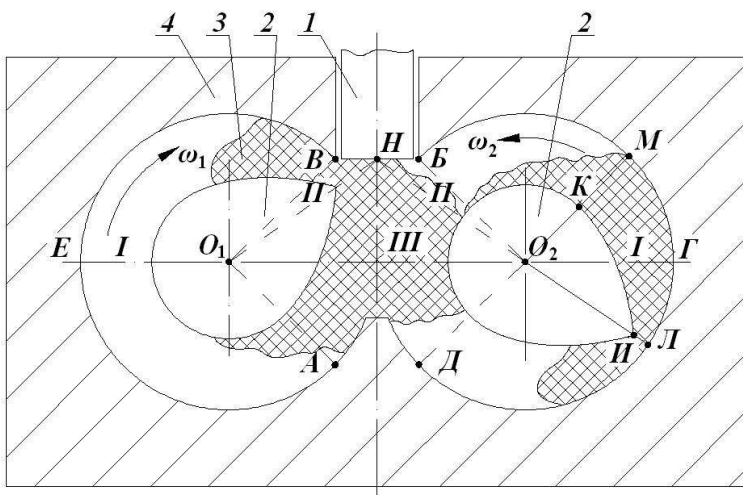


Рис. 4.1. Схема работы смесителя:

1 – верхний затвор, *2* – роторы, *3* – полимерная смесь, *4* – камера;
I, II, III – зоны смешения

Гребни каждого из овальных роторов выполнены в виде прерывистой спирали и представляют собой как бы две винтовые нарезки. В любом поперечном сечении ротора каждый гребень имеет форму сужающегося в одну сторону эллипса. Поверхность каждого из роторов выполняется в виде двух винтообразных лопастей, одна из которых (длинная) имеет угол подъема винтовой линии 30° к образующей эллипса, а другая (короткая) – 45° . Угол закручивания каждой из лопастей 90° . Длина короткой лопасти составляет 0,35 рабочей длины ротора, а длинной – 0,65 рабочей длины. Благодаря такой конфигурации ротора возникает осевое перемещение смеси.

Вследствие того, что длинный гребень одного ротора находится против короткого гребня другого ротора, наблюдается осевое перемещение смеси в виде пространственной восьмерки, и в камере смесителя образуются линии тока компонентов обеспечивающие получение высококачественного смешения. Как отмечалось выше, наибольшая величина сдвига создается в серповидных пространствах между поверхностью гребня ротора и стенкой камеры. Деформацию смеси в этих зонах можно рассматривать как деформацию сдвига в канале с переменным уклоном при большом различии в расстояниях между ограничивающими поверхностями на входе и выходе из канала.

При повороте ротора одновременно с деформацией сдвига в объеме смеси возникает давление, увеличивающееся к узкой части объема. На некотором расстоянии от кромки гребня ротора возникает критическая точка с максимальным давлением. Под влиянием давления ниже критической точки ускоряется течение смеси в зазоре, и над критической точкой возникает противоток по отношению течения смеси в зазоре. Противоток направлен в сторону вращения лопасти и опережает скорость перемещения последней. Вследствие различной скорости течения смеси в объеме происходит неравномерное разрушение структуры. При нормальном зазоре незначительная часть смеси, расположенная у стенки камеры, проходит через зазор между стенкой камеры и гребнем ротора смесителя, основная же часть смеси под влиянием давления составляет противоток в средней части объема, и первоначальное поле скоростей течения резко меняется.

Деформация сдвига в объеме смеси может происходить в том случае, если смесь заключена между относительно перемещаемыми ограничивающими поверхностями и при этом отсутствует скольжение. В пространстве между стенкой камеры и поверхностью лопасти смесь находится под давлением и плотно прилегает к металлическим поверхностям. Объем этой смеси выталкивается длинной лопастью в среднюю часть камеры, где она практически не подвергается деформациям сдвига.

В средней части смесительной камеры расстояния между вращающимися частями роторов большие и пространство не заполнено смесью. Длинные лопасти роторов в средней части камеры могут встречаться в зависимости от соотношения частот вращения роторов через 5 – 7 оборотов. Винтовые линии при встрече длинных лопастей пересекаются, образуя между собой угол 60° . Короткие лопасти в средней части камеры вообще не встречаются. Длинные и короткие лопасти встречаются лишь своими концами под углом 75° . Заполнение свободного объема в средней части камеры в зависимости от положения лопастей роторов по ориентировочным подсчетам колеблется в пределах 30...70 %, поэтому эффект смешения здесь крайне мал.

При разделении потоков смеси ребром нижней части камеры разрывающаяся деформация также незначительна, так как лопасти основную массу смеси отталкивают от себя в полость противоположной полукмеры.

Расчет смесительного воздействия

Строгий гидродинамический анализ процесса смешения полимерных материалов в роторных смесителях с учетом их неньютоновских свойств в настоящее время отсутствует. Рассмотрение кинематических особенностей процесса показывает, что наибольшему смесительному воздействию перерабатываемый материал подвергается в эффективном объеме между стенкой камеры и поверхностью гребня ротора.

В первом приближении смесительное воздействие может быть рассчитано на основании гидродинамической модели движения материала в сходящемся потоке [74, 83]. Примем допущения, являющиеся традиционными при решении подобных задач: процесс изотермический, ламинарный и установившийся, перерабатываемый материал несжимаем и изотропен, выполняется условие прилипания материала к поверхности роторов и стенкам камеры; осевое перемещение материала в камере смесителя не учитывается. Принципиальная схема деформации материала в эффективном объеме смесителя представлена на рис. 4.2.

Вследствие вынужденного движения отдельных элементов материала в эффективном объеме возникают деформации сдвига, растяжения и сжатия. Для анализа поля скоростей и напряжений, возникающих в эффективном объеме, пренебрегаем радиусами кривизны роторов и стенки смесительной камеры. В результате геометрического построения развертки гребней ротора относительно горизонтальной плоскости стенки камеры получим упрощенную модель деформации материала в эффективном объеме в системе наклонная плоскость–плоскость (рис. 4.3). С целью сохранения неподвижности системы

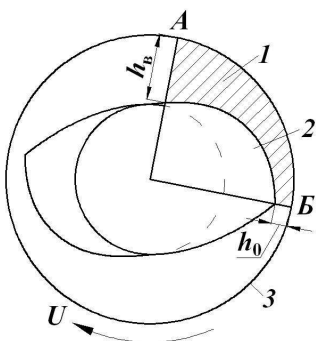


Рис. 4.2. Схема деформации материала в камере смесителя

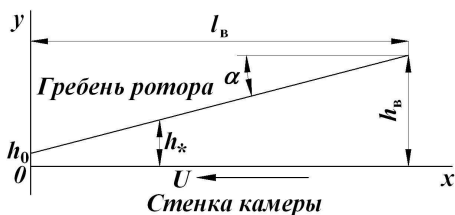


Рис. 4.3. Геометрическая схема деформации эффективного объема материала

координат относительно гребня ротора будем считать гребень неподвижным, а стенку камеры – движущейся со скоростью U (рассматривается обратная задача). При этом ось абсциссов совмещаем с плоскостью стенки камеры смесителя. Считаем, что область между стенкой смесительной камеры и гребнем ротора заполнена материалом, реологическое поведение которого описывается степенным законом.

Известно [74, 77] что расход материала Q в системе наклонная плоскость–плоскость определяется значением высоты слоя смеси на входе h_b и индексом течения m :

$$Q = \frac{U h_b m}{2m + 1}. \quad (4.1)$$

Расход смеси через сечение h_* , отвечающее максимальному давлению, выражается уравнением

$$Q = \frac{U h_*}{2}. \quad (4.2)$$

Из зависимостей (4.1) и (4.2) определяется

$$h_* = \frac{2h_b m}{2m + 1}. \quad (4.3)$$

Подставляя значения h_* и эффективной вязкости $\mu_{\text{эфф}} = \mu \gamma^m$ в известные уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости в системе наклонная плоскость–плоскость [74, 84], получены следующие уравнения для поля скоростей:

– обращенная задача

$$v_x = U \left(1 - \frac{y}{h} \right) - \frac{1}{2\mu_{\text{эфф}}} \frac{dp}{dx} (yh - y^2); \quad (4.4)$$

– реальная задача

$$v'_x = U - U \left(1 - \frac{y}{h} \right) - \frac{1}{2\mu_{\text{эфф}}} \frac{dp}{dx} (yh - y^2), \quad (4.5)$$

где

$$\frac{dp}{dx} = \frac{12\mu_{\text{эфф}}}{h^3} U \left(\frac{h}{2} - \frac{h_b m}{2m+1} \right). \quad (4.6)$$

Как следует из полученных данных, существуют две принципиально различные области течения: поступательное движение (в направлении движения ротора) и противоток. Неоднородное распределение скоростей течения материала связано с тем, что одновременно с деформацией сдвига в эффективном объеме возникает гидродинамическое давление, наибольшее значение которого находится на некотором удалении от минимального зазора h_0 . В связи с поступательным движением материала и наличием градиента давления при деформации материала в эффективном объеме происходит течение слоев материала с разной скоростью. При этом происходит вытягивание слоев деформируемого материала в направлении течения.

С увеличением сечения эффективного объема уменьшается противоток и наблюдается движение слоев материала только в направлении движения ротора. Следует отметить, что слои материала, прилегающие к поверхности ротора, движутся со скоростью, равной скорости ротора. В некотором сечении эффективного объема эпюра скоростей принимает треугольную форму, что свидетельствует о постоянной скорости сдвига. Сечение с треугольной эпюрой скоростей делит эффективный объем на две зоны, отличающиеся по интенсивности смешения и диспергирования. Для сечения входа h_b характерно ускорение потока материала на некотором удалении от поверхности ротора. С уменьшением индекса течения ускорение движения материала в сечении h_b возрастает. При этом слои материала, движущиеся со скоростью, превышающей скорость движения ротора, смещаются ближе к его поверхности. В случае ньютоновской жидкости наблюдается значительное возрастание объема жидкости, участвующей в противотоке. В сечении h_b эпюра скоростей ньютоновской жидкости незначительно отличается от треугольной формы.

Таким образом, форма эпюры скоростей в эффективном объеме определяется реологическими свойствами деформируемого материала и эффективным объемом.

Уравнение для определения скоростей сдвига может быть записано в виде

$$\dot{\gamma} = \frac{U}{h} + \frac{1}{2\mu_{\text{эфф}}} \frac{dp}{dx} (h - 2y). \quad (4.7)$$

Подставляя выражение (4.6) в данное выражение, получим

$$\dot{\gamma} = \frac{U}{h} \left(1 + \frac{6}{h^2} \left(\frac{h}{2} - \frac{h_B m}{2m+1} \right) (h - 2y) \right). \quad (4.8)$$

Для нахождения величины сдвига, который накладывается на материал за все время процесса и приходится на единицу длины, необходимо формулу (4.8) проинтегрировать по h и y и умножить на время процесса t :

$$\gamma = t \int_{h_0}^{h_B} \int_0^h \frac{U}{h} \left(1 + \frac{6}{h^2} \left(\frac{h}{2} - \frac{h_B m}{2m+1} \right) (h - 2y) \right) dy dh. \quad (4.9)$$

Данная формула не зависит от длины дуги захвата, в результате чего дает неточное значение величины деформации сдвига. Чтобы получить необходимый результат, следует выразить h через длину проекции дуги захвата на стенку камеры l_B , и проинтегрировать по длине l (рис. 4.3):

$$h = h_B - l \frac{h_B - h_0}{l_B}. \quad (4.10)$$

Тогда, подставляя выражение (4.10) в выражение (4.8) и интегрируя полученную формулу по l и по y , получается выражение для нахождения величины сдвига γ :

$$\begin{aligned} \gamma = t \int_0^{l_B} \int_0^h \frac{U}{h_B - l \frac{h_B - h_0}{l_B}} & \left(1 + \frac{6}{\left(h_B - l \frac{h_B - h_0}{l_B} \right)^2} \times \right. \\ & \left. \times \left(\frac{1}{2} \left(h_B - l \frac{h_B - h_0}{l_B} \right) - \frac{h_B m}{2m+1} \right) \left(h_B - l \frac{h_B - h_0}{l_B} - 2y \right) \right) dy dl. \quad (4.11) \end{aligned}$$

Данная теория не учитывает действия продольной деформации. Чтобы учесть продольное воздействие, необходимо представить развертку ротора относительно горизонтальной плоскости стенки камеры, для этого следует разорвать его боковую поверхность по линии, проходящей через точки А, Б, В и Г и развернуть полученную поверхность так, чтобы боковая поверхность цилиндра радиусом R_{\min} полностью лежала на плоскости (рис. 4.4) [85].

В результате получена рельефная поверхность, показанная на рис. 4.5.

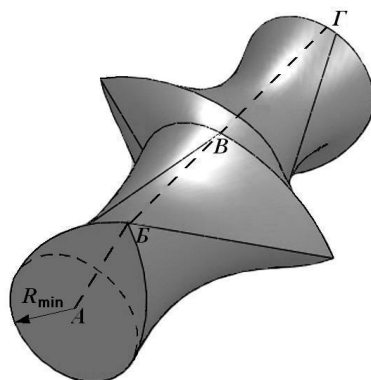


Рис. 4.4. Двухлопастной ротор

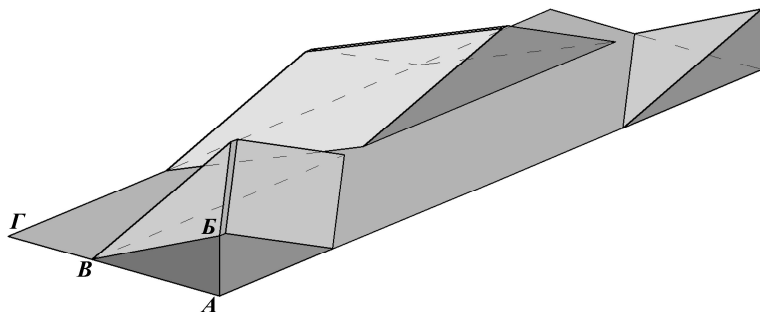


Рис. 4.5. Развертка двухлопастного ротора

Так как на обеих лопастях ротора происходят идентичные процессы, то далее рассмотрели только одну лопасть. Представили развертку лопасти не как изометрическое изображение, а как два вида, отображающие пространство, заключенное между поверхностью лопасти и поверхностью стенки камеры, которая после развертывания будет представлять собой плоскость (рис. 4.6, а). С целью сохранения неподвижности системы координат относительно гребня ротора считали гребень неподвижным, а стенку камеры движущейся со скоростью U (рассматривали обращенной задачей), рис. 4.6, б.

Данную систему можно разбить на три зоны (рис. 4.6, а). В зоне 1 материал испытывает воздействие как в направлении вращения ротора, так и вдоль оси ротора, а профиль зоны в обоих случаях представляет собой развертку серповидного зазора (рис. 4.3). В зоне 2 перерабатываемый

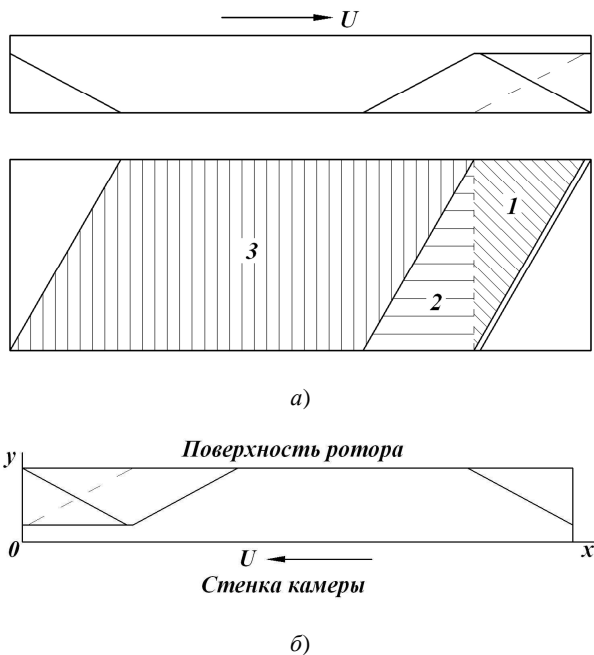


Рис. 4.6. Развертка лопасти ротора:
a – 2 вида (1, 2, 3 – зоны деформирования материала);
б – схема обращенной задачи

материал испытывает воздействие только в направлении вращения ротора, профиль также представляет собой развертку серповидного зазора. Воздействие на материал в зоне 3 описывается теорией изотермического движения жидкости, находящейся в кольцевом зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами. В области, которая находится после гребня лопасти, воздействие является незначительным и им можно пренебречь.

Опишем каждую зону в отдельности. Представим трехмерное изображение первых двух зон, оно представляет собой шестигранник $KLMNN'M'L'K'$ (рис. 4.7). Его грань $LMM'L'$ лежит на плоскости развертки стенки камеры и представляет собой параллелограмм, один из углов которого равен α_z – углу наклона винтовой линии. Противоположная грань $KNN'K'$ также представляет собой параллелограмм и является проекцией параллелограмма $LMM'L'$ на плоскость развертки поверхности гребня лопасти, которая находится под углом α к плоскости развертки стенки камеры. В результате такого построения шестигранник $KLMNN'M'L'K'$ имеет ряд особенностей:

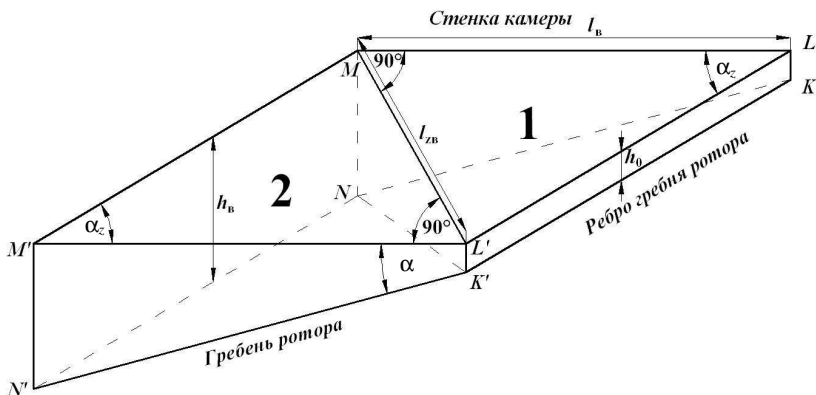


Рис. 4.7. Трехмерное изображение 1 и 2 зоны совместно

- две противоположащие грани $KLMN$ и $N'M'L'K'$ параллельны друг другу и по форме представляют собой равные прямоугольные трапеции;
- две противоположащие грани $MNN'M'$ и $KL L'K'$ параллельны друг другу и по форме представляют собой прямоугольники.

Деление шестигранника $KLMNN'M'L'K'$ на две зоны происходит плоскостью $MNK'L'$, перпендикулярной граням $LM'M'L'$ и $KNN'K'$ и проходящей через соответствующие диагонали данных параллелограммов MN и $K'L'$. Плоскость $MNK'L'$ образует прямые углы с гранями шестигранника, представляющими собой прямоугольные трапеции.

Зона 1: В данном случае направление воздействия на материал перпендикулярно ребру гребня ротора, поэтому для удобства решения данной задачи ее можно разделить на две более простые. В первой задаче стенка камеры будет двигаться вдоль оси x со скоростью U ; во второй – вдоль оси z (вдоль оси вращения ротора) в направлении, перпендикулярном оси x , со скоростью

$$U_z = \frac{U}{\operatorname{tg} \alpha_z} \quad (\text{рис. 4.8}).$$

Следовательно, общее воздействие будет находиться как сумма взаимоперпендикулярных векторов, аналогично нахождению скорости стенки:

$$U_{\text{общ}} = \sqrt{U^2 + U_z^2}. \quad (4.12)$$

Каждая из предложенных задач представляет собой расчет величины сдвига

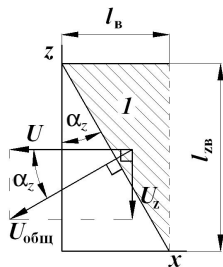


Рис. 4.8. Геометрическая схема зоны 1

описанный ранее. Только в данном случае необходимо учитывать не только изменение высоты h вдоль оси x , но также изменение длины l_B вдоль оси z , из чего следует, что необходимо провести интегрирование выражения (4.8) еще и по l_z .

В результате для направления воздействия вдоль оси x

$$\gamma = t \int_0^{l_{zB}} \int_0^h \int_0^h \left[\frac{U}{h} \left(1 + \frac{6}{h^2} \left(\frac{h}{2} - \frac{l_z (h_B - h_0)}{2m+1} \right) (h - 2y) \right) \right] dy dl dl_z, \quad (4.13)$$

где $h = h_B - \frac{l_z (h_B - h_0)}{l_{zB}} - \frac{l}{(l_{zB} - l_z) \operatorname{tg} \alpha_z} \left(h_B - \frac{l_z (h_B - h_0)}{l_{zB}} - h_0 \right)$; $l_B = l_z \operatorname{tg} \alpha_z$;

l_{zB} – длина лопасти; α_z – угол наклона винтовой линии.

В случае движения стенки камеры вдоль оси z необходимо учитывать изменение высоты h вдоль оси z , изменение длины l_z вдоль оси x , из чего следует, что необходимо провести интегрирование выражения (4.8) по y , l_z и l :

$$\gamma_z = t \int_0^{l_B} \int_0^h \int_0^h \left[\frac{U_z}{h_z} \left(1 + \frac{6}{h_z^2} \left(\frac{h_z}{2} - \frac{h_B - l \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1} m}{2m+1} \right) (h_z - 2y) \right) \right] dy dl dl_z, \quad (4.14)$$

где $h_z = h_B - l \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1} - \frac{l_z \operatorname{tg} \alpha_z \left(h_B - l \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1} - h_0 \right)}{l_B - l}$; $l_{zB} = \frac{l}{\operatorname{tg} \alpha_z}$.

Результирующая суммарная величина сдвига в данной зоне находится по формуле

$$\gamma_{\text{общ}} = \sqrt{\gamma^2 + \gamma_z^2}. \quad (4.15)$$

Чтобы получить среднее значение суммарной величины сдвига, приходящейся на единицу объема, необходимо полученное значение разделить на объем, занимаемый данной зоной. Фигура, объем которой необходимо найти, представляет собой пятигранник (рис. 4.9).

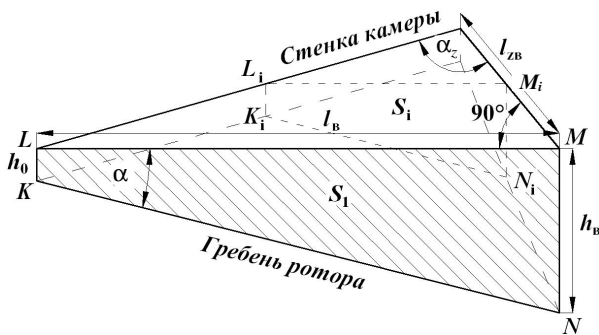


Рис. 4.9. Геометрическое изображение эффективного объема первой зоны деформирования

Как видно из рисунка 4.9, одна из сторон пятигранника представляет собой прямоугольную трапецию $KLMN$, площадь которой легко определить:

$$S_1 = 0,5 ML(KL + MN). \quad (4.16)$$

Для нахождения объема данной фигуры (рис. 4.9) следует проинтегрировать выражение (4.16) по l_{zB} , при этом учитываем, что большее основание трапеции и высота будут меняться, и выразить их через h_B и l_z соответственно. В результате получено выражение для нахождения объема фигуры, ограничивающей первую зону (рис. 4.9):

$$V_1 = \int_0^{l_{zB}} 0,5(l_{zB} - l_z) \operatorname{tg} \alpha_z \left(h_0 + h_B - \frac{l_z(h_B - h_0)}{l_{zB}} \right) dl_z. \quad (4.17)$$

Разделив выражение (4.15) на выражение (4.17), получена окончательная формула для нахождения суммарной величины сдвига в данной зоне:

$$\gamma_1 = \frac{\sqrt{\gamma^2 + \gamma_z^2}}{V_1}. \quad (4.18)$$

Зона 2: В данном случае будет решаться только первая задача из предыдущих двух, так как материал в этой зоне не испытывает продольного воздействия, а подвергается деформированию только в направлении вращения. В результате выводов получено следующее выражение:

$$\gamma_g = t \int_0^{l_{gB}} \int_0^{l_B} \int_0^h \left[\frac{U}{h} \left(1 + \frac{6}{h^2} \left(\frac{h}{2} - \frac{h_B m}{2m+1} \right) (h - 2y) \right) \right] dy dl dl_g, \quad (4.19)$$

где $l_b = (l_{gb} - l_g) \operatorname{tg} \alpha_z$; $h = h_b - \frac{l(h_b - h_0)}{l_b}$.

Геометрическое отличие данной зоны состоит в том, что высота на входе будет постоянной ($h_b = \text{const}$), а минимальный зазор h_0 будет меняться от минимального значения до величины высоты на входе h_b (рис. 4.10).

Из рисунка видно, что одна из сторон пятигранника представляет собой прямоугольную трапецию $K'L'M'N'$, площадь которой вычисляется по формуле

$$S'_1 = 0,5 M'L'(K'L' + M'N') \quad (4.20)$$

Интегрируя выражение (4.20) по l_{gb} для нахождения объема фигуры (рис. 4.10), следует учитывать, что меньшее основание трапеции и высота будут меняться и выразить их через h_b и l_g соответственно. В результате получено выражение для нахождения объема фигуры, ограничивающей вторую зону (рис. 4.10):

$$V_2 = \int_0^{l_{gb}} 0,5(l_{gb} - l_g) \operatorname{tg} \alpha_z \left(2h_b - (l_{gb} - l_g) \operatorname{tg} \alpha_z \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1} \right) dl_g \quad (4.21)$$

Разделив выражение (4.19) на выражение (4.21), получена окончательная формула для нахождения суммарной деформации сдвига в данной зоне:

$$\gamma_2 = \frac{\gamma_g}{V_2} \quad (4.22)$$

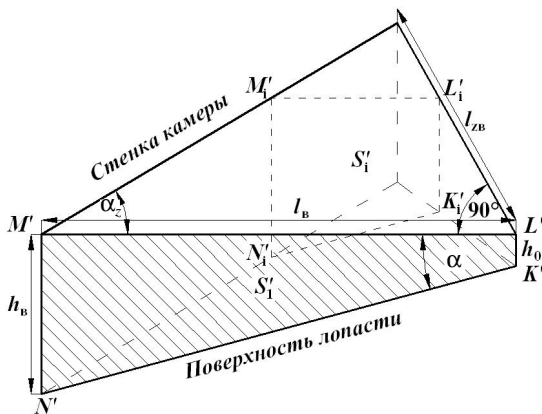


Рис. 4.10. Геометрическое изображение эффективного объема второй зоны деформирования

Зона 3: Воздействие на материал в этой зоне описывается теорией изотермического движения жидкости, находящейся в кольцевом зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами. Данная теория описана в подпункте 4.2.2.

Суммарная величина смесительного воздействия, которому подвергается материал в данной зоне за время t , определяется следующим образом:

$$\gamma_3 = \frac{U}{R} \frac{2}{n \left(1 - \beta^{\frac{2}{n}} \right)} t. \quad (4.23)$$

Суммарная величина сдвига на всей лопасти будет равна алгебраической сумме суммарных величин сдвига в трех рассмотренных зонах:

$$\gamma_{L1} = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3, \quad (4.24)$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – суммарные величины сдвига в зонах лопасти 1, 2 и 3 соответственно.

Для второй лопасти ротора вычисления будут идентичными, изменится только длина лопасти l'_{zB} , угол наклона винтовой линии α'_{z} , в связи с чем изменится скорость движения по оси z и объемы соответствующих зон V'_1 и V'_2 , а следовательно, и значения суммарных величин сдвига в первой и второй зонах – γ'_1 и γ'_2 . Суммарная величина сдвига на всей лопасти будет равна алгебраической сумме суммарных величин сдвига в трех зонах:

$$\gamma'_{L1} = \gamma'_1 + \gamma'_2 + \gamma_3, \quad (4.25)$$

где $\gamma'_1, \gamma'_2, \gamma_3$ – суммарные величины сдвига в зонах лопасти 1, 2 и 3 соответственно.

Чтобы найти суммарную величину сдвига, приходящуюся на всю длину ротора, необходимо учитывать относительный расход материала, приходящийся на каждую лопасть. Для этого следует ввести коэффициенты

$p = \frac{l_{zB}}{l_{r0}}$ и $p' = \frac{l'_{zB}}{l_{r0}}$, где l_{zB} – длина первой лопасти; l'_{zB} – длина второй лопасти; l_{r0} – длина ротора. В результате получено выражение

$$\gamma_{p1} = p\gamma_{L1} + p'\gamma'_{L1}. \quad (4.26)$$

Таким образом, на втором роторе суммарная величина сдвига будет находиться таким же способом, как и на первом, изменится только величина скорости $U_2 = fU$, где f – фрикция. Формула для нахождения суммарной величины сдвига на втором роторе

$$\gamma_{p2} = p\gamma_{L2} + p'\gamma'_{L2}. \quad (4.27)$$

В итоге для нахождения суммарной величины сдвига, действующей на материал во время процесса смешения и диспергирования во всем объеме смесительной камеры, необходимо суммировать суммарные величины сдвига на каждом роторе, используя при этом коэффициент, учитывающий объемный расход, приходящийся на каждый ротор, и перекрытие зон деформации:

$$\gamma_{\text{сум}} = q(\gamma_{p1} + \gamma_{p2}), \quad (4.28)$$

где q – коэффициент, учитывающий объемный расход, приходящийся на каждый ротор, и перекрытие зон деформации.

Для данной методики расчета суммарной величины сдвига в зонах деформации двухроторных смесителей с овальными рабочими органами написана программа на ЭВМ с использованием программного обеспечения Delphi 4 [86]. Задаваясь технологическими и конструктивными параметрами процесса смешения на данном типе оборудования, можно определить суммарную величину сдвига, возникающую в зонах деформации смесительного устройства [79 – 81].

4.1.2. Второй метод

Во втором методе за основу взята модель определения мощности привода смесителя через среднюю скорость сдвига, возникающую в материале между кромкой лопасти и стенкой камеры [77]:

$$N = k \dot{\gamma}^{n+1} V, \quad (4.29)$$

где V – объем перерабатываемой смеси, см^3 ; $\dot{\gamma}$ – средняя скорость сдвига, $1/\text{с}$; n и k – реологические константы.

Также технологическую мощность для закрытого смесителя можно найти по геометрическим параметрам смесителя [74]. В виду сложной кинематики перемешиваемых масс в рабочем объеме двухроторных машин существующие теоретические методы анализа процесса ограничены косвенной оценкой смешения по энергетическим затратам на деформирование материала в зазоре между ротором и стенкой камеры. Используется гипотеза об изотермичности процесса и рассматривается плоское течение вязкой жидкости вдоль этого зазора.

Значение технологической мощности N , необходимой для преодоления сил вязкого сопротивления перерабатываемого материала, определяется формулой

$$N = 2k \left(\frac{\pi n_{\text{ср}}}{60} \right)^{n+1} \left\{ \left[l_1 (0,5^{n+1} + 0,865^{n+1}) + 2l_2 0,705^{n+1} \right] F + \left(\frac{D_{\text{гр}}}{h_0} \right)^{n+1} h_0 \delta (l_1 + l_2) \right\}, \quad (4.30)$$

где n_{cp} – средняя частота вращения заднего и переднего ротора, об/мин; l_1 и l_2 – длина длинного и короткого гребней ротора, см; $D_{гр}$ – диаметр гребня ротора по кромке, см; F – коэффициент; h_0 – зазор между кромкой гребня ротора и камерой, см; δ – ширина кромки, см; n и k – реологические константы.

$$F = \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{D_k}{h_i} - 2 \right)^{n+1} f_i, \quad (4.31)$$

где i – число элементов, на которые разбивается деформируемый объем или ширина зоны деформации материала, в зазоре между ротором и камерой; D_k – внутренний диаметр камеры смесителя, см; h_i – зазор между гребнем ротора и камерой для i -ого элемента, см; f_i – площадь сечения i -ого элемента, см².

Выразив скорость сдвига из формулы (4.29), подставив в полученное выражение вместо мощности N формулу (4.30) и умножив на время процесса t , получили следующую зависимость для нахождения суммарной величины сдвига:

$$\gamma = t \left(\frac{\pi n_{cp}}{60} \right) \times \sqrt[n+1]{2 \left\{ \left[l_1 (0,5^{n+1} + 0,865^{n+1}) + 2l_2 \cdot 0,705^{n+1} \right] F + \left(\frac{D_{гр}}{h_0} \right)^{n+1} h_0 \delta (l_1 + l_2) \right\}}. \quad (4.32)$$

Для данного метода расчета суммарной величины сдвига в зонах деформации двухроторного смесителя с овальными рабочими органами написана программа на ЭВМ с использованием программного обеспечения Delphi 4. Задавая технологическими и конструктивными параметрами процесса смешения на данном типе оборудования, можно определить суммарную величину сдвига, возникающую в зонах деформации смесительного устройства [79 – 81].

4.1.3. Сравнительный анализ двух методов определения суммарной величины сдвига в рабочих пространствах двухроторных смесителей с овальными рабочими органами

На оба метода разработаны программы расчета на ЭВМ [86]. По результатам работы программ построены графические зависимости и проведен сравнительный анализ. Оба метода показали сходимость при изменении соответствующих параметров. Выявлено, что расхождение между методами составляет не более 8 % (рис. 4.11), и изменение в методах какого-либо одного параметра при прочих неизменных не влияет на это расхождение.

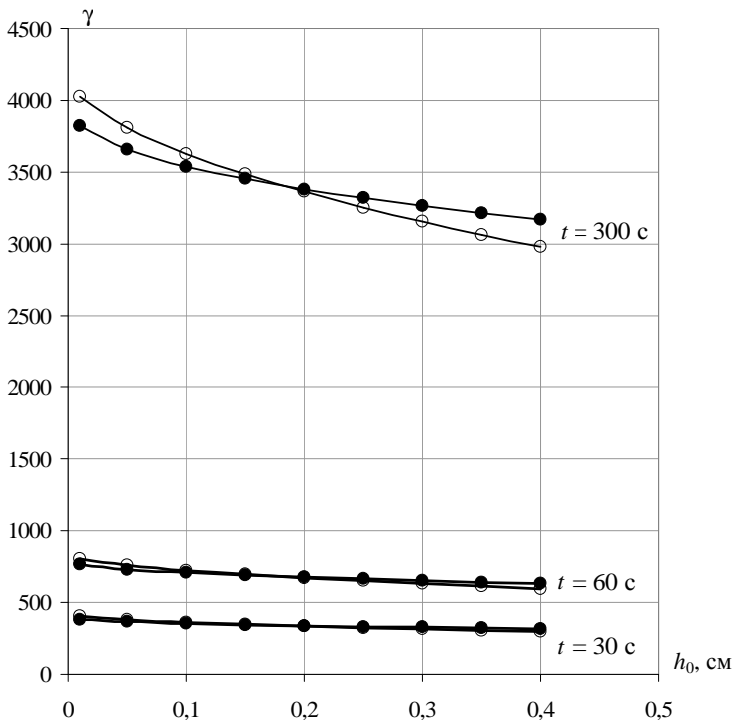


Рис. 4.11. Зависимость суммарной величины сдвига от минимального зазора за время t :
 ● — 1 метод; ○ — 2 метод

4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА $\gamma_{\text{сум}}$ В ЗОНАХ ДЕФОРМАЦИИ СМЕСИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ (ГЛАДКИЕ РАБОЧИЕ ОРГАНЫ)

Суммарная величина сдвига для процесса смешения и модификации отходов термопластов на смесительном оборудовании (валковые рабочие органы) (рис. 4.12) может быть представлена как алгебраическая сумма суммарных величин сдвига для периодического процесса вальцевания (зона I рис. 4.13) и изотермического течения вязкой жидкости между двумя коаксиальными цилиндрами (зоны II и III рис. 4.13) с учетом коэффициента перекрытия зон деформации [87]:

$$\gamma_{\text{сум}} = \gamma_{\text{в}} + k(\gamma_{\text{лц}} + \gamma_{\text{пц}}), \quad (4.33)$$

где $\gamma_{\text{в}}$, $\gamma_{\text{лц}}$, $\gamma_{\text{пц}}$ – суммарная величина сдвига для периодического процесса вальцевания в зазорах между стенкой камеры и вращающимися

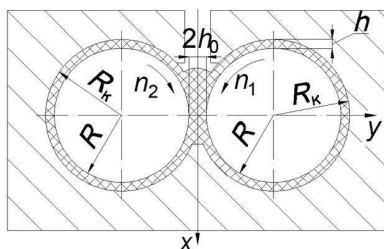


Рис. 4.12. Общая схема процесса смешения
(гладкие рабочие органы)

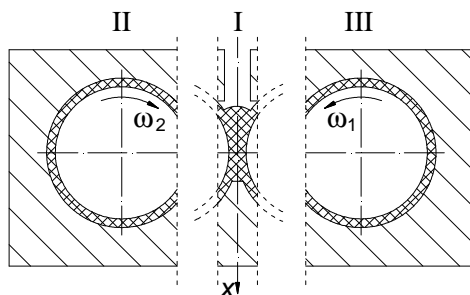


Рис. 4.13. Схема деформирования с использованием гладких рабочих органов
(I, II, III – зоны деформирования материала)

левым и правым валковыми рабочими органами, соответственно; k – коэффициент, учитывающий перекрытие зон деформации и расход материала в различных зонах.

Из нижеприведенных изложений следует, что суммарная величина сдвига для процесса смешения и модификации отходов термопластов на смесительном оборудовании (гладкие рабочие органы) может быть определена следующим образом:

$$\gamma_{\text{сум}} = \frac{3}{4} \left[(1 - X_k^2)(\text{arctg}X_k - \text{arctg}X_H) + \frac{(1 + X_k^2)X_H - X_k^2}{1 + X_H^2} \right] \times$$

$$\times \frac{1 - \lambda}{1 - \lambda^2(1 + X_k^2)} + \frac{\lambda}{4(1 + X_k^2)} \left(\frac{X_k}{1 + X_k^2} - \frac{X_H}{1 + X_H^2} + \text{arctg}X_k - \text{arctg}X_H \right) \times$$

$$\times \frac{U_0 t(1 + X_k^2)}{(X_k - X_H)\sqrt{2Rh_0}} + 0,7 \frac{t \cdot 2(U_1 + U_2)}{Rn \left(1 - \beta^n \right)}. \quad (4.34)$$

4.2.1 Определение суммарной величины сдвига γ_v при периодическом режиме процесса вальцевания термопластов

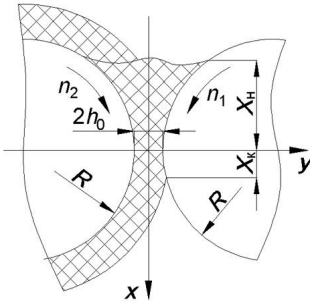


Рис. 4.14. Схема процесса вальцевания

Оценка смесительного эффекта при периодическом режиме процесса вальцевания (рис. 4.14) полимерных материалов была рассмотрена в работах [75 – 78].

Таким образом, в соответствии с основными положениями теории ламинарного смешения, смесительное воздействие при однократном прохождении вальцуемого материала через зазор можно оценить по средней величине сдвига, который при этом реализуется в элементарном объеме вальцуемой массы.

В зоне поступательного течения линии тока располагаются примерно параллельно поверхности валков. Поэтому величина сдвига в пределах этой зоны определится выражением [74, 77]

$$\gamma = \left(\frac{R}{h_0} \right)^{1/2} \frac{U_0}{v_x} \int_{X_H}^{X_K} \frac{3\eta(X^2 - X_H^2) + \lambda(1 + X^2)}{(1 + \lambda^2)^2} dX =$$

$$= \left(\frac{R}{h_0} \right)^{1/2} \frac{U_0}{v_x} \left\{ \frac{3\eta}{4} \left[(1 - X_K^2)(\text{arctg}X_K - \text{arctg}X_H) + \frac{(1 + X_K^2)X_H - X_K}{1 + X_H^2} \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{\lambda}{2} \left(\frac{X_K}{1 + X_K^2} - \frac{X_H}{1 + X_H^2} + \text{arctg}X_K - \text{arctg}X_H \right) \right\}, \quad (4.35)$$

где v_x – скоростной поток в направлении оси X ; $U_0 = (U_1 + U_2)/2$ – средняя величина окружной скорости валков мм/с; U_1, U_2 – величины окружных скоростей, соответственно заднего и переднего валков, мм/с; $\lambda = \frac{U_1 - U_2}{2U_0}$; $\eta = y/h$; R – радиус валков, мм; h_0 – половина межвалкового зазора, мм.

Величина средней деформации сдвига, которой подвергается удельный объем материала при однократном проходе через зазор:

$$\bar{\gamma} = \frac{\int_{-1}^{+1} \gamma d\eta}{Q \frac{x_k x_H}{U_0}}. \quad (4.36)$$

При этом

$$X_k^2 = \frac{Q}{2U_0 h_0} - 1. \quad (4.37)$$

Учитывая выражение (4.36),

$$\bar{\gamma} = \frac{\int_{-1}^{+1} \gamma d\eta}{2h_0(2h_0 R)^{1/2}(1+X_k^2)(X_k - X_H)}. \quad (4.38)$$

Определенный интеграл, входящий в уравнение (4.36):

$$\int_{-1}^{+1} \frac{\eta d\eta}{v_x} \approx \frac{1}{U_0} \frac{1-\lambda}{[1-\lambda^2(1+X_k^2)]}; \quad (4.39)$$

$$\int_{-1}^{+1} \frac{d\eta}{v_x} = \frac{1}{2U_0(1+X_k^2)}. \quad (4.40)$$

Величина средней удельной деформации сдвига, реализуемой за один проход при вальцевании с фрикцией, будет определяться выражением

$$\bar{\gamma} = \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{3}{4} \left[(1-X_k^2)(\arctg X_k - \arctg X_H) + \frac{(1+X_k^2)X_H}{1+X_H^2} - X_k^2 \right] \times \right. \\ & \times \frac{1-\lambda}{1-\lambda^2(1+X_k^2)} + \frac{\lambda}{4(1+X_k^2)} \left(\frac{X_k}{1+X_k^2} - \frac{X_H}{1+X_H^2} + \right. \\ & \left. \left. + \arctg X_k - \arctg X_H \right) \right] \times \end{aligned} \right\} \times \frac{1}{[2\sqrt{2}h_0^2(1+X_k^2)(X_k - X_H)]}. \quad (4.41)$$

Суммарная величина смесительного воздействия, которому подвергается материал за все время вальцевания, равна произведению однократного воздействия на число проходов:

$$\gamma_n = \bar{\gamma} i(t), \quad (4.42)$$

где $i(t) = \frac{U_0 t (1 + X_k^2)}{(X_k - X_n) \sqrt{2Rh_0}}$ – число проходов; t – время процесса, с.

4.2.2. Определение суммарной величины сдвига в зазорах между стенкой смесительной камеры и цилиндрическими рабочими органами $\gamma_{лц}$ и $\gamma_{пц}$

Оценка смесительного воздействия на полимерный материал в случае изотермического движения жидкости, находящейся в кольцевом зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами, из которых наружный – неподвижен, а внутренний вращается с некоторой окружной скоростью (рис. 4.15), была рассмотрена в работах [75, 88]. Для левого и правого рабочих пространств формулы будут идентичными за исключением величин скоростей.

Величина скорости сдвига вычисляется по формуле

$$\dot{\gamma} = \frac{U}{R} \frac{2}{n \left(1 - \beta^{\frac{2}{n}}\right)}, \quad (4.43)$$

где U – окружная скорость внутреннего цилиндра; R – радиус внутреннего цилиндра; $\beta = \frac{R_k}{R}$ –

отношение радиуса внешнего цилиндра к радиусу внутреннего цилиндра; n – индекс течения расплава.

Суммарная величина смесительного воздействия, которому подвергается материал за время t , определяется следующим образом:

$$\gamma = \frac{U}{R} \frac{2}{n \left(1 - \beta^{\frac{2}{n}}\right)} t, \quad (4.44)$$

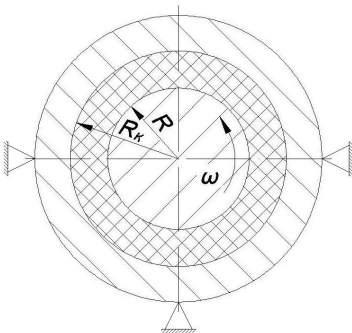


Рис. 4.15. Схема установившегося изотермического течения жидкости между двумя коаксиальными цилиндрами

Для данной методики расчета суммарной величины сдвига в зонах деформации двухроторного смесителя с валковыми рабочими органами написана программа на ЭВМ с использованием программного обеспечения *Delphi 4* [89]. Задавая технологическими и конструктивными параметрами процесса смешения на данном типе оборудования, можно определить суммарную величину сдвига, возникающую в зонах деформации смесительного устройства [79 – 81, 90, 91].

4.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА $\gamma_{\text{сум}}$ В ЗОНАХ ДЕФОРМАЦИИ СМЕСИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ (РИФЛЕННЫЕ РАБОЧИЕ ОРГАНЫ)

Для определения суммарной величины сдвига при использовании рифленых рабочих органов (рис. 2.4) рассмотрим развертку ротора (рис. 4.16). Она представляет собой повторяющееся чередование гребней и каналов одинаковой геометрии. Следовательно, развертку можно разбить на две чередующиеся между собой зоны: в зоне I суммарная величина сдвига будет определяться как воздействие при экструзии, описанное в работах [77], а в зоне II – как течение жидкости между двумя коаксиальными цилиндрами [88].

Суммарная величина сдвига для процесса смешения с использованием рифленых рабочих органов равна алгебраической сумме суммарных величин в первой и второй зонах:

$$\gamma_P = \gamma_1 + \gamma_2 \cdot \quad (4.45)$$

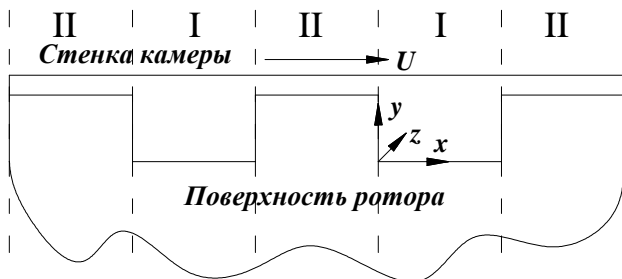


Рис. 4.16. Развертка рифленого ротора (I, II – зоны деформирования материала)

В зоне I суммарная величина сдвига определяется следующим образом: для нахождения суммарной величины сдвига, возникающей в канале червяка за время t , используют формулу

$$\gamma_{\text{ш}} = \sqrt{\gamma_{xy}^2 + \gamma_{zy}^2}, \quad (4.46)$$

где γ_{xy} , γ_{zy} – суммарные величины сдвига, которым подвергается элемент объема в направлении x и z , соответственно.

В отличие от экструзии рассматривается периодический процесс, представляющий систему с закрытым выходом и циркуляцией объема от одного торца смесительной камеры до другого. В результате такого рассмотрения предполагается, что элемент объема, пройдя всю длину канала на одном роторе за время t , перебрасывается в канал другого ротора и продолжает движение по этому каналу в течение времени t' .

Время пребывания элемента потока в канале червяка определяется следующим образом [77]:

$$t = \frac{l_d}{\sin \phi v_z} \quad (4.47)$$

где l_d – длина развернутого винтового канала; v_z – средняя скорость поступательного течения, зависящая от положения элемента потока.

Для второго ротора время пребывания элемента потока в канале находится идентичным образом.

Для периодического процесса время воздействия задается изначально, соответственно для нахождения суммарного воздействия необходимо учитывать временной расход на пребывание элемента потока в каналах двух роторов и при прохождении гребня. Для этого необходимо заданное время процесса t_3 разделить на сумму времени пребывания элемента потока в канале первого ротора t , времени, затрачиваемого на переход через гребень первого ротора t_r , времени пребывания элемента потока в канале второго ротора t' и времени, затрачиваемого на переход через гребень второго ротора t'_r .

В итоге получим формулу для нахождения суммарной величины сдвига в первой зоне за все время процесса:

$$\gamma_1 = \frac{t_3}{t + t_r + t' + t'_r} \gamma_{\text{ш}}. \quad (4.48)$$

Суммарная величина сдвига в зоне II находится по формуле (4.44).

Суммарная величина сдвига во всем деформируемом объеме находится по формуле (4.28).

4.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СДВИГА $\gamma_{\text{сум}}$ В ЗОНАХ ДЕФОРМАЦИИ СМЕСИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ (ВИНТОВЫЕ МНОГОЗАХОДНЫЕ РАБОЧИЕ ОРГАНЫ)

При нахождении суммарной величины сдвига для процесса смешения на смесителе с винтовыми многозаходными рабочими органами используется та же теория, что и для смесителя с овальными рабочими органами. В данном случае исключается зона 3 (рис. 4.6) и увеличивается число заходов (рис. 4.17).

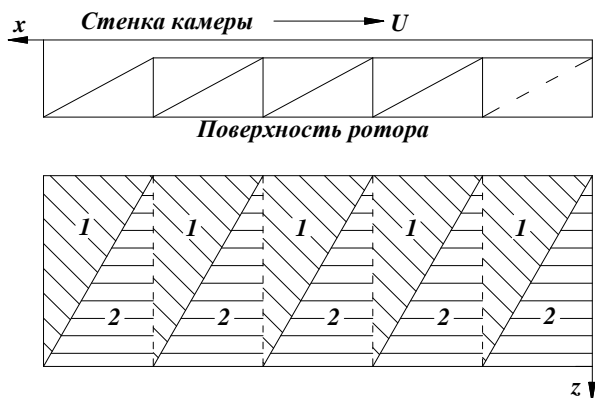


Рис. 4.17. Развертка винтового многозаходного ротора
(1, 2 – зоны деформирования материала)

Тогда формула для нахождения суммарной величины сдвига на всем роторе немного видоизменится:

$$\gamma_p = j(\gamma_1 + \gamma_2), \quad (4.49)$$

где j – количество заходов; γ_1 , γ_2 , – суммарные величины сдвига в зонах ротора 1 и 2 соответственно, которые находятся по формулам (4.18) и (4.22) соответственно.

Суммарная величина сдвига во всем деформируемом объеме находится по формуле (4.28).

5. МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА МОДИФИКАЦИИ ОТХОДОВ ТЕРМОПЛАСТОВ НА СМЕСИТЕЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ

В качестве исходных параметров, необходимых для расчета, принимаются:

1) реологические константы перерабатываемого материала: мера консистенции k и индекс течения n ;

2) плотность перерабатываемого материала ρ , кг/м³;

При расчете основных параметров процесса модификации на смесительном оборудовании решаются два типа задач:

1) при заданных геометрических размерах смесителя необходимо определить производительность G процесса получения композиционного материала с наилучшими физико-механическими показателями;

2) при заданной производительности процесса G необходимо определить основные геометрические размеры смесителя (диаметр и длину роторов).

5.1. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ПО ПЕРВОМУ ВАРИАНТУ (МОДЕРНИЗАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ)

Изначально дополнительно должны быть заданы: величина фрикции и геометрические размеры рабочих органов и камеры смесителя (диаметр рабочего органа, диаметр стенки камеры, длина рабочей части ротора, длины лопастей ротора, углы наклона винтовых линий, минимальный зазор между гребнем ротора и стенкой камеры).

Расчет проводится в следующей последовательности:

1. Исследование на разработанном устройстве с целью определения суммарной величины сдвига, соответствующей наилучшим показателям по качеству для конкретного композиционного материала, в результате чего выбираются технологические параметры, необходимые для дальнейшего расчета (время смешения, частота вращения рабочих органов) [91 – 106].

2. Определение производительности смесителя при непрерывном режиме работы – G по методике, изложенной в [107].

Производительность смесителя определяется по формуле

$$G = 60 \frac{V \varphi \rho \eta}{t}, \quad (5.1)$$

где V – свободный объем смесительной камеры, м³; φ – коэффициент загрузки смесительной камеры ($\varphi = 0,56 \dots 0,76$); ρ – плотность смеси,

кг/м³; η – коэффициент использования машинного времени ($\eta = 0,8 \dots 0,9$); t – время смешения, мин.

3. Расчет силовых и энергетических параметров процесса смешения (технологической мощности N_T , мощности привода смесителя N_D , удельной мощности $N_{уд}$) по общепринятой методике изложенной в [74].

Значение технологической мощности N_T , необходимой для преодоления сил вязкого сопротивления перерабатываемого материала, определяется по формулам (4.29):

$$N_T = k \dot{\gamma}^{n+1} V,$$

4. Расчет на прочность основных деталей и узлов машины (рабочих органов, смесительной камеры и др.) по общепринятой методике.

5. Тепловой расчет процесса смешения с учетом теплофизических свойств перерабатываемых полимерных материалов.

Вся энергия, потребляемая электродвигателем смесителя, за исключением потерь в приводе роторов, в конечном счете, расходуется на деформирование смешиваемых компонентов и выделяется в виде теплоты в смесительной камере, где происходит диссипация механической энергии, переход ее в тепловую. Тепловой баланс выражает равенство между количеством теплоты, подводимой к системе, и количеством теплоты, отводимой от нее. Для смесителя это равенство можно записать так:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3. \quad (5.2)$$

Здесь $Q = AN_{cp}\eta$ – количество теплоты, выделяемой в камере смесителя; A – механический эквивалент тепловой энергии; N_{cp} – средняя потребляемая мощность электродвигателя привода роторов смесителя; η – КПД привода роторов; $Q_1 = Gc_1(t_k - t_n)$ – количество теплоты, необходимой для нагрева смеси; G – производительность смесителя; c_1 – удельная массовая теплоемкость смеси; t_k, t_n – конечная и начальная температура смеси; $Q_2 = (\alpha_k + \alpha_n)F(t_{ст} - t_b)$ – количество теплоты, теряемой боковой поверхностью смесительной камеры в окружающую среду за счет лучеиспускания и конвекции; α_k – коэффициент теплоотдачи от стенки в окружающую среду за счет конвекции; α_n – коэффициент теплоотдачи от стенки в окружающую среду за счет лучеиспускания; F – поверхность боковых стенок смесительной камеры; $t_{ст}$ – температура стенки; t_b – температура окружающего воздуха; $Q_3 = Wc_2(t_2 - t_1) = KF\Delta t_{ст}$ – количество теплоты, уносимой охлаждающей водой; W – расход охлаждающей воды; c_2 – удельная массовая теплоемкость охлаждающей воды; t_2, t_1 – температура охлаждающей

воды на входе в смеситель и на выходе из него, соответственно;

$$K = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \text{коэффициент теплопередачи; } \alpha_1 - \text{коэффициент}$$

теплоотдачи от смеси к стенке камеры; α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки камеры к охлаждающей воде; δ – толщина стенки камеры; λ – коэффициент теплопроводности материала, из которого сделана стенка камеры.

Для нахождения мощности, затрачиваемой на весь процесс N , следует сделать расчет удельной мощности, приходящейся на килограмм продукта:

$$N_{\text{уд}} = \frac{N}{G}. \quad (5.3)$$

6. Составить техническую характеристику смесителя, в которую входят все заданные и рассчитанные параметры.

Пример расчета пластосмесителя СП-45

Исходные данные.

Материал – Вторичный полиэтилен высокого давления, плотность – $\rho = 919 \text{ кг/м}^3$; реологические константы – $m = 0,3$; $k = 0,3311 \text{ кгс/см}^2$.

5.1. Характеристики пластосмесителя СП-45

Наименование параметров	Значения
Рабочий объем V_p , л	45
Свободный объем V_c , л	70
Диаметр ротора D , мм	365
Длина ротора L , мм	607
Диаметр камеры D_k , мм	368
Длина короткой лопасти L_1 , мм	146
Длина длинной лопасти L_2 , мм	255,5
Величина минимального зазора между гребнем ротора и стенкой камеры h_0 , мм	1,5
Частота вращения переднего ротора n , об/мин	29,7
Частота вращения заднего ротора n_3 , об/мин	33,9
Фрикция f	1,143

1. Для данного материала на разработанном устройстве определяем суммарную величину сдвига, при которой качественные показатели композиционного материала являются наилучшими $\gamma = 3600$. При данных заданных параметрах этой величине соответствует время смешения, равное $t = 19$ мин.

2. Определяем производительность смесителя по формуле (5.1):

$$G = 60 \cdot \frac{0,07 \cdot 0,65 \cdot 0,85 \cdot 919}{19} = 112,23 \text{ кг/ч.}$$

3. Находим значение технологической мощности по формуле (4.29):

$$N_T = 0,3311 \cdot 3600^{1,3} \cdot 45000 = 67,89 \text{ кВт.}$$

4. Проводим поверочный прочностной расчет основных деталей и узлов машины по общепринятой методике.

5. Проводим тепловой расчет процесса смешения. $A = 1$; $\eta = 0,6$; $c_1 = 1700 \text{ Дж/кг}\cdot\text{°C}$; $t_k = 150 \text{ °C}$, $t_n = 30 \text{ °C}$; $\alpha_k = 0,37 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{°C}$; $\alpha_{л1} = 5,95 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{°C}$; $F = 0,817 \text{ м}^2$; $t_{ст} = 150 \text{ °C}$; $t_b = 25 \text{ °C}$; $Q_3 = 0 \text{ Вт}$.

$$Q_1 = 112,23 \cdot 1700 \cdot (150 - 30) = 6,36 \text{ кВт};$$

$$Q_2 = (0,37 + 5,95) \cdot 0,817 \cdot (150 - 25) = 0,64 \text{ кВт};$$

$$Q = 6,36 + 0,64 + 0 = 7 \text{ кВт.}$$

С учетом КПД привода мощность, расходуемая на нагрев смеси и потери тепла, будет равна

$$N_{cp} = 7/0,6 = 11,66 \text{ кВт.}$$

Тогда мощность, затрачиваемая на процесс, будет равна

$$N = 67,89 + 11,66 = 79,55 \text{ кВт.}$$

Проводим расчет удельной мощности приходящейся на килограмм продукта по формуле (5.3):

$$N_{уд} = \frac{79,55}{112,23} = 0,71 \text{ кВт/кг.}$$

6. Составляем техническую характеристику.

5.2. Техническая характеристика пластосмесителя СП-45 для переработки ВПВД

Наименование параметров	Значения
Рабочий объем V_p , л	45
Свободный объем V_c , л	70
Диаметр ротора D , мм	365

Наименование параметров	Значения
Длина ротора L , мм	607
Диаметр камеры D_k , мм	368
Длина короткой лопасти L_1 , мм	146
Длина длинной лопасти L_2 , мм	255,5
Величина минимального зазора между гребнем ротора и стенкой камеры h_0 , мм	1,5
Частота вращения переднего ротора n , об/мин	29,7
Частота вращения переднего ротора n_3 , об/мин	33,9
Фрикция f	1,143
Перерабатываемый материал	ВПВД
Производительность G , кг/ч	112,23
Технологическая мощность N_t , кВт	67,894
Удельная мощность $N_{уд}$, кВт/кг	0,605

5.2. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ПО ВТОРОМУ ВАРИАНТУ (ПРОЕКТИРОВАНИЕ НОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ)

1. Первоначально определяется объем единовременной загрузки материала в смеситель V по методике изложенной в [108]:

$$V = \frac{Gt}{60\varphi\rho\eta}, \quad (5.4)$$

где G – заданная производительность, кг/ч; φ – коэффициент загрузки смесительной камеры ($\varphi = 0,56 \dots 0,76$); ρ – плотность смеси, кг/м³; η – коэффициент использования машинного времени ($\eta = 0,8 \dots 0,9$); t – время смешения, мин.

2. По ГОСТ 11996–79 выбираем наиболее близкий в большую сторону по величине объема смеситель со всеми необходимыми для дальнейшего расчета геометрическими параметрами.

3. После этого определяем суммарную величину сдвига; силовые и энергетические параметры процесса смешения; проводим прочностной расчет основных деталей и узлов смесительного оборудования и тепловой расчет процесса смешения по методике как для первого варианта расчета основных параметров процесса и оборудования.

4. Составляем техническую характеристику спроектированного смесителя, в которую входят все заданные и полученные в ходе расчета параметры.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработан способ модификации отходов термопластичных материалов и предложены режимы для трех способов предварительной механоактивации вводимого ТУ (активирование в шаровой мельнице, воздействие ультразвуком на ТУ, активирование посредством многократного пропускания ТУ через минимальный межвалковый зазор вальцов), при которых показатели качества композиционного материала на основе ВПВД и активированного ТУ являются наилучшими.

2. Обоснованно использование суммарной величины сдвига как интегрального критерия качества, позволяющего прогнозировать показатели качества композиционного материала, разработаны методики его расчета, реализуемые в программном обеспечении, на которое получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

3. Спроектирована и изготовлена экспериментальная установка для исследования процесса модификации отходов термопластичных материалов, как устройство, позволяющее оценивать и прогнозировать показатели качества получаемого композита.

4. Разработаны рабочие органы различной конфигурации для экспериментальной установки с целью изучения влияния различных конструктивных параметров на показатели качества получаемого композита.

5. Исследовано влияние конструктивных и режимных параметров оборудования и процесса модификации на показатели качества получаемого композиционного материала, а также определены рациональные значения суммарной величины сдвига ($\gamma = 3450 \dots 3550$), при которых показатели качества композита являются наилучшими ($\text{ПТР} = 1,684 \text{ г/10 мин}$, $\sigma_T = 10,83 \text{ МПа}$, $\sigma_p = 13,851 \text{ МПа}$, $\varepsilon = 597,6 \%$, $I = 0,73$).

6. Создана методика инженерного расчета конструктивных и режимных параметров процесса смешения и смесительного оборудования при условии заданного рационального значения суммарной величины сдвига, соответствующего наилучшим показателям качества получаемого композита.

7. Разработанные методика инженерного расчета параметров процесса получения композитов с заданными показателями качества и программное обеспечение приняты к использованию на ОАО «НИИРТмаш» (г. Тамбов) при проектировании промышленных смесителей для модификации отходов термопластов и резиновых смесей, расчетный экономический эффект от внедрения агрегата составляет 186 тыс. р.

Полученный на разработанном устройстве композиционный материал на основе вторичного полиэтилена высокого давления и активированного технического углерода используется на НПП ООО «Эласт» (г. Тамбов) в производстве полиэтиленовых труб методом экструзии.

8. Программное обеспечение на ЭВМ для расчета основных параметров процесса смешения и конструкции применяемого смесительного оборудования используется в учебном процессе при подготовке инженеров по специальностям 240801, 261201 в дисциплинах «Оборудование для производства полимерной тары и упаковки», «Оборудование для переработки полимерных материалов», «Утилизация упаковки» и магистров по программе 150400.26 в дисциплинах «Утилизация и вторичная переработка полимерных материалов», «Оптимизация режимных и конструктивных параметров технологического оборудования».

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

U_0 – средняя величина окружной скорости валков;
 h_0 – половина межвалкового зазора;
 X_n, X_k – безразмерные координаты сечений входа и выхода;
 i – число проходов;
 R – радиус;
 t – время процесса;
 n – индекс течения расплава;
 l – длина;
 α – угол;
 δ – ширина кромки;
 V – объем;
 D – диаметр;
 h – зазор между гребнем ротора и камерой;
 f – площадь сечения;
 σ_t – предел текучести при растяжении;
 σ_p – предел прочности при разрыве;
 ε – относительное удлинение при разрыве;
 γ – величина суммарной деформации сдвига.

Индексы

н – начальное;
к – конечное;
в – периодический процесс вальцевания;
лц – левый цилиндр;
пц – правый цилиндр;
сум – суммарная;
гр – гребень ротора;
ср – средняя;
к – камера;

Аббревиатуры

ПТР – показатель текучести расплава; ПЭ – полиэтилен; ПВХ – поливинилхлорид; ПП – полипропилен; ПС – полистирол; ПЭТФ – полиэтилентерефталат; ПО – полиолефины; ПНД и ПВД – полиэтилен высокой и низкой плотности; ВПВД – вторичный полиэтилен низкой плотности; ТУ – технический углерод (сажа); АТУ – активированный технический углерод; УЗ – ультразвук; ЭУ – экспериментальная установка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллаев Р.А. Модификация вторичных полимеров для изготовления изделий различного функционального назначения: Дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2007.
2. Ким В.С., Скачков В.В. Диспергирование и смешение в процессе производства и переработки пластмасс. М.: Химия, 1988. 240 с.
3. <http://www.plastinfo.ru/information/articles/69/>
4. <http://marketpublishers.ru/lists/2804/news.html>
5. www.plastics.ru
6. http://www.polymer.ru/blog.php?id_company=63&category=item
7. <http://www.quadrantplastics.ru/article/9/>
8. http://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=1266
9. http://www.mrcplast.ru/news-news_open-14934.html
10. http://www.cleandex.ru/opinion/2010/06/10/plastic_waste_recycling_equipment_market
11. <http://www.landman.ru/vyvoz-musora-tbo.php>
12. http://www.cleandex.ru/articles/2010/06/25/municipal_solid_waste_market_2009
13. Клинков А.С., Беляев П.С., Соколов М.В. Утилизация и вторичная переработка полимерных материалов: Учебное пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 80 с.
14. <http://www.polytecural.ru/>
15. http://www.cleandex.ru/articles/2010/03/19/municipal_waste_recycling_market
16. http://www.cleandex.ru/articles/2010/05/28/municipal_waste_recycling_market_in_Russia
17. http://articles.pakker mash.ru/show_art.php?art=215
18. Непрерывное экологическое образование и экологические проблемы: Материалы межрег. науч.-практ. конф. студентов и учащихся. Апр. 2009 г. Красноярск: СибГТУ, 2009.
19. http://www.kursiv.ru/kursivnew/paket_magazine/archive/34/8.php
20. <http://recyclers.ru/modules/section/item.php?itemid=172>
21. <http://www.otlivka.ru/articles/ecology/3.html>
22. <http://www.kondor-plastik.ru/truby-drenazhnye.html>
23. Андреев Р.А. Получение саженатолненных каучуков и резин с использованием отходов производств эластомеров: Дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2005.

24. Назаров В.Г. Поверхностная модификация полимеров: Монография. М.: МГУП. 2008. 474 с.
25. Коршак В.В. Синтез полимеров методами модификации // Успехи химии. 1980. Т. 49, № 12. С. 2286.
26. Сирота А.Г. Модификация структуры и свойств полиолефинов. Л.: Химия. 1974. 175 с.
27. Кестельман, В.Н. Физические методы модификации полимерных материалов. М.: Химия, 1980. 224 с.
28. Полимерные пленочные материалы / Под ред. В.Е. Гуля. М.: Химия. 1979. 130 с.
29. Кочнев А.М., Галибеев С.С. Известия высших учебных заведений // Химия и химическая технология. 2004. Т. 46 (4). С. 4.
30. Наполнители для полимерных композиционных материалов / пер. с англ.; под ред. Г.С. Каца и Д.В. Милевски. М.: Химия. 1981. С. 587.
31. Современные тенденции в работах по модификации полимеров (итоги конференции) // Пластические массы. 2000. № 8. С. 3–4.
32. <http://www.cooksmeal.ru/techno/upakovka/068.html>
33. <http://landwirt.ru/2009-12-12-16-07-50/455-unichtozhenie-i-utilizaciya-othodov>
34. Окисление отходов волокнистых и пленочных материалов из полиэтилена и полипропилена / М.В. Базунова, Р.И. Хакимзянов, М.С. Бабаев, С.В. Колесов // Вестник Башкирского университета. 2008. Т. 13. № 3. С. 501.
35. Кабанов В.А. Энциклопедия полимеров. 1974. Т. 2. 516 с.
36. Сущенко Н.В. Технология и свойства полимеров и композитов функционального назначения на основе фенолформальдегидной и полиамидной матриц: Дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2009.
37. Коршак В.В., Козырева Н.М. Успехи синтетической химии высокомолекулярных соединений // Успехи химии. 1979. Т. 48, № 5. С. 22.
38. Левыкин Е.Н. Технология композитов на основе вторичного полиэтилена и растительного сырья: Дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2004.
39. Леонович А.А., Царев Г.И. Современные способы изготовления древесноволокнистых плит специальных видов: Обзор. информ. М.: ВНИПИЭИЛеспром, 1975. 36 с.
40. Забара М.Я., Кондратьева В.В., Слитенко Н.Я. Производство и переработка пластмасс и синтетических смол. М.: НИИТЭ-химНИИПМ, 1975. Вып. 1. С. 35 – 58.

41. Мачюлис А.Н., Торнау Э.Э. Диффузионная стабилизация полимеров. Вильнюс: МИНТИС. 1974. 256 с.
42. Цвайфель Х., Маер Р.Д., Шиллер М. Добавки к полимерам: Справочник / Пер. англ. 6-го изд.; под ред. В.Б. Узденского, А.О. Григорова. СПб.: ЦОП «Профессия», 2010. 1144 с.
43. <http://www.polikonta.com/articles/fillforpolymers.html>
44. Носков Д.В. Модификация рецикловых полимеров: Дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2004.
45. Соломко В.П. Наполненные и кристаллизующиеся полимеры. Киев: Наукова думка, 1980. 246 с.
46. Дмитриев Ю.А., Гордиенко В.П. Структура и свойства при растяжении наполненного полиэтилена в процессе УФ-облучения // Пластические массы. 1995. № 5. С. 20 – 22.
47. Липатов Ю.С. Физическая химия наполненных полимеров. М.: Химия, 1977. 304 с.
48. Соломко В.П. О явлении межструктурного наполнения и его влиянии на свойства полимеров // Механика полимеров. 1976. № 1. С. 162 – 166.
49. Гордиенко В.П., Соломко В.П. Деформация и разрушение наполненного полиформальдегида при одноосном растяжении // ФХММ. 1971. № 6. С. 37.
50. Мурзин В.С. Технология композиционных материалов и изделий: Учебное пособие. Воронеж: ВГЛТА, 1999. 106 с.
51. Горбунова И.Ю., Кербер М.Л. Модификация кристаллизующихся полимеров // Пластические массы. 2000. № 9. С. 7 – 11.
52. Айзенштейн Э.М. Физическое и химическое модифицирование полиэфирных волокон и нитей с целью улучшения потребительских свойств готовых изделий // Химические волокна. 2005. № 6. С. 37 – 42.
53. Физико-химические основы альтернативной технологии магнитоластов и рациональные области их применения / С.Е. Артеменко, С.Г. Кононенко, А.А. Артеменко и др. // Химические волокна. 1998. № 3. С. 45 – 50.
54. Охлопкова А.А., Адрианова О.А., Попов С.Н. Модификация полимеров ультрадисперсными соединениями. Якутск: ЯФ Изд-во СО РАН, 2003. 224 с.
55. Стручкова Т.С. Разработка и исследование полимерных композиционных материалов на основе активации политетрафторэтилена

и углеродных наполнителей: Дис. ... канд. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре, 2008.

56. Артеменко С.Е. Научно-технологическая полимерная композиция композиционных материалов, армированных базальтом, углеродными и стеклянными нитями // Пластические массы. 2003. № 5. С. 5 – 7.

57. Технологические особенности поликонденсационного наполнения ПКМ на основе профилированных полипропиленовых нитей / Е.И. Титоренко, С.Е. Артеменко, Т.П. Устинова и др. // Пластические массы. 2000. № 12. С. 29 – 31.

58. Галашина Н.М. Полимеризационное наполнение как метод получения новых композиционных материалов // Высокомолекулярные соединения. 1994. Т. 36. С. 640 – 650.

59. Берлин А.А., Вольфсон С.А., Омиян В.Г. Принципы создания композиционных полимерных материалов. М.: Химия, 1990. 240 с.

60. ПКМ: структура, свойства, технология: Учебное пособие / под ред. А.А. Берлина. СПб.: Профессия, 2007. 560 с.

61. <http://p-km.ru/osnovy-napolneniya-polimerov-voлокнами/vliyanie-razlichnyx-faktorov-na-svojstva-polimerov-s-voлокнистым-napolnitelem.html>

62. <http://www.korsil.ru/content/files/catalog1/org2.pdf>

63. Сагалаев Г.В. Общие технические требования к наполнителям // Наполнители полимерных материалов: материалы семинара. М.: Московский дом пропаганды им. Ф.Э. Дзержинского, 1983. С. 57 – 63.

64. Щербаков А.С., Тамбова И.А., Мельникова Л.В. Технология композиционных древесных материалов. М.: Экология, 1992. 192 с.

65. Левыкин, Е.Н. Определение степени совместимости древесных и полимерных компонентов при получении композиционных материалов / Е.Н. Левыкин. Химическая промышленность. 2004. № 9. С. 37 – 40.

66. <http://www.y-su.ru/users/itc/sitim//e-books/metod/ximia/smi/3-5.pdf>

67. Клямкин С.Н. Металлогидридные композиции на основе магния как материалы для аккумуляторов водорода // Российский химический журнал. 2006. Т. 1, № 6. С. 49 – 55.

68. <http://www.chem.msu.su/rus/jvho/2006-6/49.pdf>

69. Барамбойм Н.К. Механохимия высокомолекулярных соединений. М.: Химия, 1978. 384 с.

70. http://fen.nsu.ru/posob/htt/mech_react.pdf

71. Изменение состава и свойств водорастворимых компонентов торфа при механохимической обработке / О.И. Ломовский, А.А. Иванов, О.А. Рожанская и др. // Химия в интересах устойчивого развития. 2004. № 3. С. 355 – 361.

72. <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2606.html>

73. Friederich I., Gande I., Pahl M., Acta Polymerica, 1981. Bd 29. № 2. S. 71.

74. Смешение полимеров / В.В. Богданов, Р.В. Горнер, В.Н. Краковский, Э.О. Регер. Л.: Химия, 1979. 192 с.

75. Мак-Келви Д.М. Переработка полимеров. М.: Химия, 1965. 442 с.

76. Бернхардт Э. Переработка термопластичных материалов. М.: Изд-во Химия, 1965. 747 с.

77. Горнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов). М.: Химия, 1977. 464 с.

78. Ким В.С. Теория и практика экструзии полимеров. М.: Химия, КолосС, 2005. 568 с.

79. Сван Т. Delphi 4. Библия разработчика / Пер. с англ. СПб.: Диалектика, 1998. 672 с.

80. Озеров В. Delphi. Советы программистов. СПб.: Символ-Плюс, 2003. 976 с.

81. Осипов, Д. Delphi. Профессиональное программирование. СПб.: Символ-Плюс, 2006. 1056 с.

82. Бекин Н.Г. Машины и агрегаты заводов резиновой промышленности. Ярославль, 1976. Ч. II. 128 с.

83. Богданов В.В., Метелкин В.И., Саватеев С.Г. Основы технологии смешения полимеров. Л.: Изд-во ленинградского университета, 1984. 192 с.

84. Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М.: Гостехиздат, 1955. 519 с.

85. Определение интегрального критерия качества в рабочих зонах двухроторных смесителей / С.С. Гуреев, А.С. Клинков, В.Г. Однолько // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2011. Т. 17, № 2. С. 417 – 423.

86. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010617845 Расчет интегрального критерия качества в зонах деформации смесительных устройств / С.С. Гуреев, П.В. Макеев, М.В. Соколов, А.С. Клинков, П.С. Беляев; Тамб. гос. техн. ун-т. № 2010616018 заявл. 01.10.2010. Зарегистрировано 26.11.2010.

87. Гуреев С.С., Клинков А.С. Методика определения интегрального критерия качества в зонах деформации смесительных устройств // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2010. Т. 16, № 4. С. 905 – 909.

88. Оборудование для переработки пластмасс: Справочное пособие / Под ред. В.К. Завгороднего. М., «Машиностроение», 1976. 407 с.

89. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2011612497. Расчет интегрального критерия качества в зонах деформации двухроторных смесителей / С.С. Гуреев, П.В. Макеев, Д.Л. Полушкин, А.С. Клинков, М.В. Соколов; Тамб. гос. техн. ун-т. № 2011610879 заявл. 14.02.2011. Зарегистрировано 25.03.2011.

90. Применение интегральных критериев качества при переработке полимерных материалов валково-шнековым методом / А.С. Клинков, М.В. Соколов, Д.Л. Полушкин и др. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2008. Т. 14, № 4. С. 870 – 881.

91. Разработка конструкции валково-шнекового агрегата и смещенного технологического процесса утилизации полимерной тары и упаковки / Д.Л. Полушкин, А.С. Клинков, П.В. Макеев, С.С. Гуреев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2010. Т. 16, № 3. С. 578 – 587.

92. Прогнозирование качества вторичного гранулята при утилизации пленочных термопластов / Д.Л. Полушкин, А.С. Клинков, М.В. Соколов и др. // Прогрессивные технологии развития: Сб. материалов Международ. науч.-практ. конф. 10–11 декабря 2005 г. Тамбов: Першина, 2005. С. 170–171.

93. Непрерывная валково-шнековая технология утилизации отходов термопластов / Д.Л. Полушкин, С.С. Гуреев, А.С. Клинков, М.В. Соколов // Наука на рубеже тысячелетий «Progressive technologies of Development»: 3-я Междунар. науч.-практ. конф. 24–25 ноября 2006 г. Тамбов, 2006. С. 123–124.

94. Гуреев С.С., Макеев П.В., Шашков И.В. Разработка полимерных композиционных материалов на основе вторичного сырья и технического углерода // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент: Материалы Всерос. научно-инновационной конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. 27 – 29 октября 2009 г. Тамбов, 2009. С. 248 – 250.

95. Макеев П.В., Гуреев С.С., Шашков И.В. Разработка технологии и оборудования для переработки полимерной тары и упаковки // Современные твердофазные технологии: теория, практика и иннова-

ционный менеджмент: Материалы Всерос. научно-инновационной конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. 27 – 29 октября 2009 г. Тамбов, 2009. С. 294–295.

96. Макеев П.В., Гуреев С.С. Разработка технологии и оборудования для переработки отходов полимерной тары и упаковки // Экология России и сопредельных территорий: Материалы XIV Междунар. экологической студ. конф. Новосибирск, 2009. С. 155–156.

97. Гуреев С.С. Разработка полимерных композиционных материалов на основе вторичного сырья и технического углерода // Проведение научных исследований в области индустрии наносистем и материалов: Материалы Всерос. конф. с элементами научной школы для молодежи. 16 – 20 ноября 2009 г. Белгород, 2009. С. 223 – 226.

98. Гуреев С.С. Исследование композитов на основе вторичного полимерного сырья и технического углерода // Аспекты ноосферной безопасности в приоритетных направлениях деятельности человека: Материалы I Междунар. науч.-практ. конф. 5 февраля 2010 г. Тамбов, 2010. С. 30 – 32.

99. Исследование процесса получения композитов на основе вторичного полимерного сырья и технического углерода / С.С. Гуреев, П.В. Макеев, А.С. Клинков, С.П. Хрущев // Труды Тамбовского государственного технического университета: Сб. науч. ст. Тамбов, 2010. Вып. 23. С. 160 – 163.

100. Влияние параметров процесса вторичной переработки отходов полимерной тары и упаковки на качественные показатели получаемого вторматериала / П.В. Макеев, С.С. Гуреев, А.С. Клинков, Д.Л. Полушкин // Труды Тамбовского государственного технического университета: Сб. науч. ст. Тамбов, 2010. Вып. 23. С. 163 – 166.

101. Гуреев С.С., Клинков А.С., Макеев П.В. Получение композиционных полимерных материалов заданного качества // Молодой ученый: Ежемесячный научный журнал. Чита, 2011. № 1(24). С. 22 – 24.

102. Гуреев С.С., Ремизов Д.М. Разработка технологии получения саженаполненного композиционного материала // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития: Сб. науч. ст. молодых ученых, аспирантов и студентов. Тамбов, 2011. Вып. II. С. 155 – 158.

103. Макеев П.В., Гуреев С.С., Шашков И.В. Инновационная технология рециклинга отходов термопластов // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития: Сб. науч. ст. молодых ученых, аспирантов и студентов. Тамбов, 2011. Вып. II. С. 158 – 161.

104. Гуреев С.С., Клинков А.С., Макеев П.В. Сравнительный анализ двух методов определения суммарной деформации сдвига в рабочих пространствах двухроторных смесителей с овальными рабочими органами // Молодой ученый: Ежемесячный научный журнал. Чита, 2011. № 6(29). С. 32 – 37.

105. Гуреев С.С., Клинков А.С., Макеев П.В. Технологический процесс получения композита на основе ВПВД и активированного технического углерода // Молодой ученый: Ежемесячный научный журнал. Чита, 2011. № 6(29). С. 37 – 41.

106. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008613114. Расчет интегрального критерия качества суммарной величины сдвига для непрерывного вальцевания / С.С. Гуреев, Д.Л. Полушкин, М.В. Соколов, А.С. Клинков, П.С. Беляев; Тамбовский государственный технический университет. № 2008612201; заявл. 19.05.2008; зарегистрировано 27.06.2008.

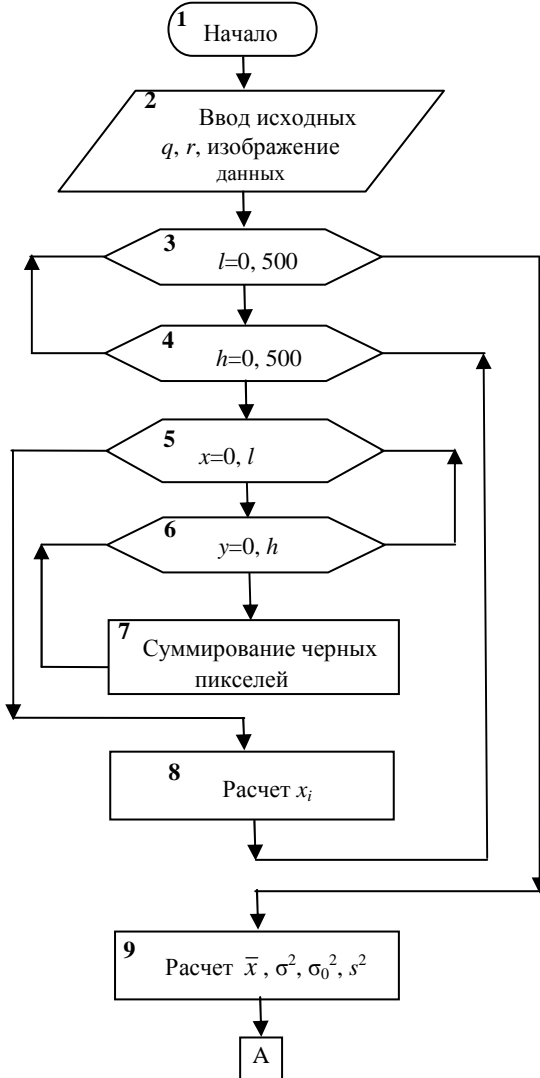
107. Автоматизированное проектирование валковых машин для переработки полимерных материалов: Монография / А.С. Клинков, М.В. Соколов, В.И. Кочетов, П.С. Беляев, В.Г. Однолько. М.: Машиностроение-1, 2005. 320 с.

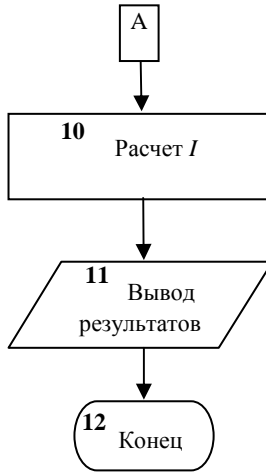
108. Оборудование и основы проектирования заводов резиновой промышленности: учеб. пособие для вузов / Н.Г. Бекин, Н.Д. Захаров, Г.К. Пеунков и др.; под общ. ред. Н.Д. Захарова. Л.: Химия, 1985. 504 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА КРИТЕРИЯ ЛЕЙСИ (ИНДЕКСА СМЕШЕНИЯ) (Блок-схема)





Блок 1. Начало.

Блок 2. Осуществляется ввод исходных данных и загрузка изображения.

Блок 3. Задается счетчик по длине изображения от $l = 0$ до 500.

Блок 4. Задается счетчик по ширине изображения от $h = 0$ до 500.

Блок 5. Задается счетчик по длине участка от $x = 0$ до l .

Блок 6. Задается счетчик по ширине участка от $y = 0$ до h .

Блок 7. Суммируются черные пиксели.

Блок 8. Рассчитывается содержание (концентрация) частиц диспергируемой фазы в каждой пробе x_i .

Блок 9. Рассчитываются:

– среднее значение доли частиц диспергируемой фазы в смеси для M проб

$$\bar{x} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i;$$

– генеральная дисперсия определяется из выражения

$$\sigma^2 = q(1 - q)/N;$$

– дисперсия исходной системы, равная

$$\sigma_0^2 = q(1 - q);$$

– величина выборочной дисперсии концентрации диспергируемой фазы в отобранных пробах

$$s^2 = \frac{1}{M - 1} \sum_{i=1}^M (x_i - \bar{x})^2.$$

Блок 10. Рассчитывается критерий Лейси

$$I = \frac{\sigma_0^2 - s^2}{\sigma_0^2 - \sigma^2}$$

Блок 11. Выводятся результаты работы программы.

Блок 12. Конец.

Текст программы «Определение критерия оценки степени однородности смеси»

```
unit Unit1;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls,
  Forms, Dialogs, StdCtrls, ExtDlgs, ExtCtrls, jpeg, math;
type
  Tgetcol = class(TForm)
  Pnl: TPanel;
  Img: TImage;
  Btnrun: TButton;
  SaveDialog1: TSaveDialog;
  OPD: TOpenPictureDialog;
  Btnload: TButton;
  Mm: TMemo;
  Label1: TLabel;
  Edtrr: TEdit;
  Lblb: TLabel;
  Lblw: TLabel;
  Edtc0: TEdit;
  Label2: TLabel;
  CBr: TComboBox;
  procedure BtnloadClick(Sender: TObject);
  procedure BtnrunClick(Sender: TObject);
  procedure FormCreate(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;
var
  getcol: Tgetcol;
implementation
  {$R *.dfm}
  procedure Tgetcol.FormCreate(Sender: TObject);
  begin
    cbr.ItemIndex:=3;
    edtc0.text:='0,005';
    edtrr.text:='0';
```



```

end;
procedure Tgetcol.BtnloadClick(Sender: TObject);
var
  FName: string;
begin
  btnrun.Enabled:=true;
  Mm.Clear;
  img.canvas.pen.Color:=clwhite;
  img.Canvas.Rectangle(0,0,500,500);
  OPD.Execute;
  Img.Picture.LoadFromFile(OPD.FileName);
end;
procedure Tgetcol.BtnrunClick(Sender: TObject);
var
  t: tcolor;
  p: word;
  l,h,x,y,r,i,rr1: integer;
  rr,b,w,bw,subm,sumw: single;
  ism,sig2,sig0,s2,n,xsr,sumx,summ: single;
  z,k1,k,ci,c0,c2,c22,sum,ni: single;
  label m1;
begin
  z:=0;
  xsr:=0;
  m1:
  r:=StrToInt(cbr.text);
  c0:=StrToFloat(edtc0.text);
  subm:=0;
  sumx:=0;
  summ:=0;
  c2:=0;
  l:=r;
  while l<501 do
  begin
    h:=r;
    while h<501 do
    begin
      b:=0;
      w:=0;
      if l=r then begin x:=0 end else begin x:=l-r; end;
      while x<l do
      begin
        if h=r then begin y:=0 end else begin y:=h-r; end;
        while y<h do
        begin
          t:=img.canvas.pixels[x,y];
          if t = 0 then

```

```

begin
b:=b+1;
end
else
begin
w:=w+1;
end;
y:=y+1;
end;
x:=x+1;
end;
ci:=b*100/sqr(r);
sumx:=sumx+ci;
if z=1 then begin summ:=summ+sqr(ci-xsr); end;
c2:=sqr(ci-c0);
c2:=c2+sqr(ci-c0);
sumb:=sumb+b;
h:=h+r;
end;
l:=l+r;
end;
n:=sumb/250000;
mm.Lines.Add('n = '+FloatToStr(n));
rr:=500/r;
Edtrr.Text:=FloatToStr(rr);
rr1:=StrToInt(Edtrr.Text);
sig0:=c0*(1-c0);
sig2:=c0*(1-c0)/sumb;
z:=z+1;
if z=1 then
begin
xsr:=(1/sqr(rr1))*sumx;
goto m1;
end;
s2:=(1/(sqr(rr1)-1))*summ;
ism:=(sig0-s2)/(sig0-sig2);
mm.Lines.Add('ism = '+FloatToStr(ism));
with img.Canvas do
begin
pen.Color:=clred;
for i:=1 to rr1 do begin moveto(0,r*i); lineto (img.Width,r*i); end;
for i:=1 to rr1 do begin moveto(r*i,0); lineto (r*i,img.height); end;
end;
if img.canvas.pen.Color=clred then btnrun.Enabled:=false;
end;
end.

```

ТАБЛИЦЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сводная таблица экспериментов (к разделу 3)

**Периодический процесс получения композита
на основе вторичного полиэтилена высокого давления и
технического углерода марки К-354
с использованием рабочих органов различной конфигурации**

2.1. Определение показателя текучести расплава

(температура в цилиндре ИИРТа $T = 190$ °С; вес груза $P = 2,16$ кг;
время между отбором образцов $\tau = 60$ с)

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
<i>Овальные рабочие органы</i>					
Частота вращения переднего ротора $n = 30$ об/мин					
1	0,1588	1,588	6	0,1638	1,638
2	0,1564	1,564	7	0,1645	1,645
3	0,152	1,52	8	0,1548	1,548
4	0,16	1,6	9	0,1428	1,428
5	0,1478	1,478	10	0,1536	1,536
Среднее значение I	1,554				
$n = 45$ об/мин					
1	1,654	1,654	6	0,1574	1,574
2	1,336	1,336	7	0,1752	1,752
3	1,562	1,562	8	0,1638	1,638
4	1,56	1,56	9	0,154	1,54
5	1,57	1,57	10	0,152	1,52
Среднее значение I	1,57				
$n = 60$ об/мин					
1	0,1568	1,568	6	0,1626	1,626
2	0,152	1,52	7	0,1664	1,664
3	0,1628	1,628	8	0,1526	1,526
4	0,1571	1,571	9	0,1646	1,646
5	0,1569	1,569	10	0,1506	1,506
Среднее значение I	1,582				

Продолжение табл. 2.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$n = 75$ об/мин					
1	0,1718	1,718	6	0,1468	1,468
2	0,1692	1,692	7	0,1466	1,466
3	0,1474	1,474	8	0,1532	1,532
4	0,1406	1,406	9	0,1668	1,668
5	0,1426	1,426	10	0,1348	1,348
Среднее значение I	1,519				
$n = 90$ об/мин					
1	0,1366	1,366	6	0,1367	1,367
2	0,1544	1,544	7	0,1252	1,252
3	0,138	1,38	8	0,1458	1,458
4	0,152	1,52	9	0,1442	1,442
5	0,1591	1,591	10	0,1416	1,416
Среднее значение I	1,433				
<i>Гладкие рабочие органы</i>					
Частота вращения переднего ротора					
$n = 30$ об/мин					
1	0,1892	1,892	6	0,1549	1,549
2	0,1662	1,662	7	0,1552	1,552
3	0,1715	1,715	8	0,1605	1,605
4	0,1689	1,689	9	0,1569	1,569
5	0,1722	1,722	10	0,1569	1,569
Среднее значение I	1,652				
$n = 45$ об/мин					
1	0,1714	1,714	6	0,1722	1,722
2	0,1711	1,711	7	0,175	1,75
3	0,1782	1,782	8	0,1769	1,769
4	0,1741	1,741	9	0,1714	1,714
5	0,1743	1,743	10	0,1662	1,662
Среднее значение I	1,730				

Продолжение табл. 2.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$n = 60$ об/мин					
1	0,1858	1,858	6	0,1784	1,784
2	0,1926	1,926	7	0,1858	1,858
3	0,1738	1,738	8	0,1834	1,834
4	0,1898	1,898	9	0,1772	1,772
5	0,196	1,96	10	0,1892	1,892
Среднее значение I	1,85				
$n = 75$ об/мин					
1	0,1918	1,918	6	0,1766	1,766
2	0,1812	1,812	7	0,1956	1,956
3	0,1818	1,818	8	0,1768	1,768
4	0,1743	1,743	9	0,1762	1,762
5	0,1843	1,843	10	0,1665	1,665
Среднее значение I	1,805				
$n = 90$ об/мин					
1	0,1884	1,884	6	0,1708	1,708
2	0,1824	1,824	7	0,182	1,82
3	0,1676	1,676	8	0,1766	1,766
4	0,1658	1,658	9	0,1826	1,826
5	0,1184	1,184	10	0,174	1,74
Среднее значение I	1,707				
<i>Рифленые рабочие органы</i>					
Частота вращения переднего ротора					
$n = 30$ об/мин					
1	0,1638	1,638	6	0,1838	1,838
2	0,1714	1,714	7	0,1718	1,718
3	0,1932	1,932	8	0,1709	1,709
4	0,1818	1,818	9	0,1438	1,438
5	0,1672	1,672	10	0,1172	1,172
Среднее значение I	1,664				

Продолжение табл. 2.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$n = 45$ об/мин					
1	0,1664	1,664	6	0,1942	1,942
2	0,1874	1,874	7	0,1865	1,865
3	0,193	1,93	8	0,1822	1,822
4	0,1946	1,946	9	0,1964	1,964
5	0,1962	1,962	10	0,1968	1,968
Среднее значение I	1,893				
$n = 60$ об/мин					
1	0,207	2,07	6	0,1878	1,878
2	0,2192	2,192	7	0,2078	2,078
3	0,2084	2,084	8	0,1928	1,928
4	0,2028	2,028	9	0,1968	1,968
5	0,2158	2,158	10	0,2112	2,112
Среднее значение I	2,049				
$n = 75$ об/мин					
1	0,2085	2,085	6	0,2161	2,161
2	0,2326	2,326	7	0,2272	2,272
3	0,2182	2,182	8	0,2132	2,132
4	0,2064	2,064	9	0,1837	1,837
5	0,212	2,12	10	0,1719	1,719
Среднее значение I	2,089				
$n = 90$ об/мин					
1	0,1343	1,343	6	0,1922	1,922
2	0,2331	2,331	7	0,2274	2,274
3	0,2016	2,016	8	0,1888	1,888
4	0,1752	1,752	9	0,2176	2,176
5	0,2058	2,058	10	0,214	2,14
Среднее значение I	1,990				

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
<i>Винтовые многозаходные рабочие органы</i>					
Частота вращения переднего ротора $n = 30$ об/мин					
1	0,1214	1,214	6	0,1482	1,482
2	0,1462	1,462	7	0,1481	1,481
3	0,1642	1,642	8	0,1364	1,364
4	0,1655	1,655	9	0,1566	1,566
5	0,1432	1,432	10	0,1552	1,552
Среднее значение I	1,485				
$n = 45$ об/мин					
1	0,1087	1,087	6	0,0944	0,944
2	0,1254	1,254	7	0,134	1,34
3	0,134	1,34	8	0,1156	1,156
4	0,1166	1,166	9	0,108	1,08
5	0,1155	1,155	10	0,1172	1,172
Среднее значение I	1,158				
$n = 60$ об/мин					
1	0,1638	1,638	6	0,1838	1,838
2	0,1714	1,714	7	0,1718	1,718
3	0,1932	1,932	8	0,1709	1,709
4	0,1818	1,818	9	0,1438	1,438
5	0,1672	1,672	10	0,1172	1,172
Среднее значение I	1,659				
$n = 75$ об/мин					
1	0,1724	1,724	6	0,1528	1,528
2	0,1829	1,829	7	0,1628	1,628
3	0,1728	1,728	8	0,1814	1,814
4	0,1552	1,552	9	0,1194	1,194
5	0,1689	1,689	10	0,16	1,6
Среднее значение I	1,628				

Продолжение табл. 2.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$n = 90$ об/мин					
1	0,1554	1,554	6	0,1632	1,632
2	0,1645	1,645	7	0,1588	1,588
3	0,1558	1,558	8	0,157	1,57
4	0,164	1,64	9	0,1596	1,596
5	0,1604	1,604	10	0,166	1,66
Среднее значение I	1,604				

2.2. Определение предела текучести при растяжении, прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве
(ширина рабочей части – $b = 3,5$ мм; толщина рабочей части – $h = 2$ мм; начальная база образца – $l_0 = 16$ мм)

Номера образцов	P_T , кгс	σ_T , МПа	P_p , кгс	σ_p , МПа	Δl , мм	ε , %
<i>Овальные рабочие органы</i>						
Частота вращения переднего ротора $n = 30$ об/мин						
1	13,3	10,85	9,73	12,97	88	551
2	13	10,92	10,05	13,4	91	569
3	13	10,92	9,33	12,44	80	500
4	12,5	10,82	10,23	13,65	92	580
5	13,3	10,85	10,15	13,43	98	613
Среднее значение		10,87		13,187		564
$n = 45$ об/мин						
1	5,8	11,04	9,96	13,28	86	541
2	6,1	10,89	10,28	13,71	89	558
3	6	10,71	9,55	12,73	78	491
4	6,6	10,03	10,48	13,97	91	569
5	6,15	10,9	10,39	13,86	96	601
Среднее значение		10,88		13,5		550

Продолжение табл. 2.2

Номера образцов	P_T , кгс	σ_T , МПа	P_p , кгс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
<i>n</i> = 60 об/мин						
1	7,97	10,63	10,17	13,56	84	526
2	8,23	10,98	10,5	14	87	544
3	7,64	10,19	9,75	13	76	478
4	8,39	11,19	10,7	14,24	88	554
5	8,32	11,09	10,61	14,14	93	585
Среднее значение		10,81		13,782		535
<i>n</i> = 75 об/мин						
1	7,89	10,53	9,97	13,29	85	531
2	8,45	10,87	10,29	13,72	87	548
3	7,5	10,09	9,55	12,74	77	482
4	8,3	11,07	10,48	13,98	89	559
5	8,2	10,98	10,4	13,84	94	590
Среднее значение		10,7		13,51		540
<i>n</i> = 90 об/мин						
1	7,78	10,37	9,49	12,65	91	572
2	8,03	10,71	9,79	13,06	94	590
3	7,45	9,94	9,09	12,12	83	518
4	8,18	10,91	9,98	13,3	96	601
5	8,11	10,82	9,9	13,2	101	635
Среднее значение		9,17		12,857		581
<i>Гладкие рабочие органы</i>						
Частота вращения переднего ротора						
<i>n</i> = 30 об/мин						
1	7,34	9,79	8,32	11,09	50	313
2	7,58	10,11	8,59	11,45	51	323
3	7,04	9,39	7,97	10,63	45	284
4	7,72	10,3	8,75	11,66	52	329
5	7,66	10,21	8,67	11,57	55	348
Среднее значение		9,954		11,271		318

Продолжение табл. 2.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
<i>n</i> = 45 об/мин						
1	7,41	9,89	8,83	11,78	59	369
2	7,66	10,21	9,12	12,16	60	381
3	4,11	9,48	8,47	11,29	53	334
4	7,8	10,4	9,29	12,39	62	388
5	7,73	10,31	9,21	12,29	65	410
Среднее значение		10,05		11,971		375
<i>n</i> = 60 об/мин						
1	7,39	9,86	8,91	11,88	63	399
2	7,63	10,18	9,2	12,26	66	412
3	7,08	9,45	8,54	11,38	58	362
4	7,77	10,37	9,37	12,49	67	420
5	7,71	10,28	9,29	12,39	71	444
Среднее значение		10,02		12,071		406
<i>n</i> = 75 об/мин						
1	7,16	9,54	8,68	11,58	61	383
2	7,39	9,85	8,97	11,96	63	396
3	6,86	9,15	8,32	11,1	55	348
4	7,53	10,04	9,13	12,18	64	403
5	7,46	9,95	9,06	12,08	68	426
Среднее значение		9,7		11,771		390
<i>n</i> = 90 об/мин						
1	6,93	9,24	8,86	11,81	64	403
2	7,15	9,54	9,15	12,20	66	416
3	6,64	8,85	8,49	11,32	58	365
4	7,28	9,71	9,32	12,43	67	424
5	7,22	9,63	9,24	12,32	71	448
Среднее значение		9,389		12,00		409

Номера образцов	P_T , кгс	σ_T , МПа	P_p , кгс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
<i>Рифленные рабочие органы</i>						
Частота вращения переднего ротора $n = 30$ об/мин						
1	6,89	9,19	9,25	12,33	72	455
2	7,11	9,49	9,55	12,73	75	470
3	6,6	8,81	8,86	11,82	66	413
4	7,25	9,66	9,73	12,97	76	479
5	7,19	9,5	9,65	12,86	81	506
Среднее значение		9,3409		12,533		462
$n = 45$ об/мин						
1	6,79	9,05	9,35	12,47	83	521
2	7,01	9,34	9,65	12,87	86	538
3	6,5	8,67	8,96	11,95	75	473
4	7,14	9,52	9,83	13,11	87	548
5	7,08	9,44	9,75	13	92	579
Среднее значение		9,2		12,671		530
$n = 60$ об/мин						
1	6,8	9,06	9,49	12,66	89	561
2	7,02	9,36	9,8	13,07	92	579
3	6,51	8,69	9,1	12,14	81	509
4	7,15	9,53	9,99	13,32	94	590
5	7,09	9,45	9,9	13,21	99	624
Среднее значение		9,21		12,868		570
$n = 75$ об/мин						
1	6,64	8,85	9,42	12,57	81	506
2	6,85	9,14	9,73	12,97	83	523
3	6,36	8,49	9,03	12,04	73	459

Продолжение табл. 2.2

Номера образцов	P_T , кгс	σ_T , МПа	P_p , кгс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
4	6,98	9,31	9,91	13,22	85	533
5	6,93	9,24	9,83	13,11	90	563
Среднее значение		9		12,771		515

 $n = 90$ об/мин

1	6,33	8,45	9,27	12,37	73	461
2	6,54	8,72	9,58	12,77	76	476
3	6,07	8,1	8,89	11,85	67	418
4	6,66	8,88	9,76	13,01	77	485
5	6,61	8,81	9,67	12,90	82	513
Среднее значение		8,587		12,571		469

*Винтовые многозаходные рабочие органы*Частота вращения переднего ротора
 $n = 30$ об/мин

1	7,01	9,35	9,8	13,07	98	617
2	7,24	9,65	10,12	13,49	102	637
3	6,72	8,96	9,39	12,52	89	560
4	7,37	9,83	10,31	13,74	103	649
5	7,31	9,75	10,22	13,63	109	686
Среднее значение		9,505		13,281		627

 $n = 45$ об/мин

1	6,82	9,1	9,72	12,96	92	580
2	7,05	9,4	10,03	13,38	95	599
3	6,54	8,72	9,31	12,42	84	526
4	7,18	9,57	10,22	13,63	97	610
5	7,12	9,49	10,14	13,52	103	645
Среднее значение		9,25		13,171		590

Продолжение табл. 2.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
<i>n</i> = 60 об/мин						
1	6,85	9,13	9,71	12,94	93	583
2	7,07	9,43	10,02	13,36	96	602
3	6,56	8,75	9,3	12,4	84	529
4	7,2	9,6	10,21	13,61	98	614
5	7,14	9,52	10,12	13,5	103	649
Среднее значение		9,2802		13,154		593
<i>n</i> = 75 об/мин						
1	6,56	8,75	9,68	12,91	85	531
2	6,78	9,04	10	13,33	87	548
3	6,29	8,39	9,28	12,37	77	482
4	6,9	9,21	10,18	13,58	89	559
5	6,85	9,13	10,10	13,47	94	590
Среднее значение		8,9		13,121		540
<i>n</i> = 90 об/мин						
1	6,26	8,35	9,64	12,86	72	450
2	6,46	8,62	9,96	13,28	74	465
3	6	8	9,24	12,33	65	408
4	6,58	8,78	10,14	13,53	75	473
5	6,53	8,71	10,06	13,42	80	500
Среднее значение		8,487		13,071		457

ТАБЛИЦЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сводная таблица экспериментов (к разделу 3)

Определение оптимального технологического режима процесса получения композиционного материала на основе ВПВД и ТУ с высокими физико-механическими характеристиками

3.1. Определение показателя текучести расплава

(температура в цилиндре ИИРТа $T = 190$ °С; вес груза $P = 2,16$ кг; время между отбором образцов $\tau = 60$ с)

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
<i>Концентрация ТУ $C = 0,5$ %</i>					
Частота вращения переднего ротора $n = 30$ об/мин					
1	0,2303	2,303	6	0,2491	2,491
2	0,2397	2,397	7	0,2091	2,091
3	0,1974	1,974	8	0,2605	2,608
4	0,2726	2,726	9	0,2279	2,279
5	0,2209	2,209	10	0,2420	2,42
Среднее значение I	2,350				
$n = 60$ об/мин					
1	0,2381	2,381	6	0,2575	2,575
2	0,2478	2,478	7	0,2162	2,162
3	0,2041	2,041	8	0,2697	2,697
4	0,2818	2,818	9	0,2357	2,357
5	0,2284	2,284	10	0,2502	2,502
Среднее значение I	2,430				
$n = 90$ об/мин					
1	0,3253	3,253	6	0,3519	3,519
2	0,3386	3,386	7	0,2954	2,954
3	0,2788	2,788	8	0,3685	3,685
4	0,3851	3,851	9	0,322	3,22
5	0,3120	3,12	10	0,3419	3,419
Среднее значение I	3,320				

Продолжение табл. 3.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
<i>Концентрация ТУ С = 1 %</i>					
Частота вращения переднего ротора $n = 30$ об/мин					
1	0,2058	2,058	6	0,2226	2,226
2	0,2142	2,142	7	0,1869	1,869
3	0,1764	1,764	8	0,2331	2,331
4	0,2436	2,436	9	0,2037	2,037
5	0,1974	1,974	10	0,2163	2,163
Среднее значение I	2,100				
$n = 60$ об/мин					
1	0,2303	2,303	6	0,2491	2,491
2	0,2397	2,397	7	0,20915	2,0915
3	0,1974	1,974	8	0,26085	2,6085
4	0,2726	2,726	9	0,22795	2,2795
5	0,2209	2,209	10	0,24205	2,4205
Среднее значение I	2,350				
$n = 90$ об/мин					
1	0,294	2,94	6	0,318	3,18
2	0,306	3,06	7	0,267	2,67
3	0,252	2,52	8	0,333	3,33
4	0,348	3,48	9	0,291	2,91
5	0,282	2,82	10	0,309	3,09
Среднее значение I	3,000				
<i>Концентрация ТУ С = 1,5 %</i>					
Частота вращения переднего ротора $n = 30$ об/мин					
1	0,2058	2,058	6	0,2226	2,226
2	0,2142	2,142	7	0,1869	1,869
3	0,1764	1,764	8	0,2331	2,331
4	0,2436	2,436	9	0,2037	2,037
5	0,1974	1,974	10	0,2163	2,163
Среднее значение I	2,100				

Продолжение табл. 3.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$n = 60$ об/мин					
1	0,2273	2,273	6	0,2459	2,459
2	0,2366	2,366	7	0,2064	2,064
3	0,1948	1,948	8	0,2575	2,575
4	0,2691	2,691	9	0,225	2,25
5	0,2180	2,18	10	0,2389	2,389
Среднее значение I	2,321				
$n = 90$ об/мин					
1	0,2744	2,744	6	0,2968	2,968
2	0,2856	2,856	7	0,2492	2,492
3	0,2352	2,352	8	0,3108	3,108
4	0,3248	3,248	9	0,2716	2,716
5	0,2632	2,632	10	0,2884	2,884
Среднее значение I	2,802				
<i>Время смешения $t = 1$ мин</i>					
Частота вращения переднего ротора					
$n = 30$ об/мин					
1	0,1519	1,519	6	0,1643	1,643
2	0,1581	1,581	7	0,1379	1,379
3	0,1302	1,302	8	0,172	1,72
4	0,1798	1,798	9	0,1503	1,503
5	0,1457	1,457	10	0,1596	1,596
Среднее значение I	1,551				
$n = 60$ об/мин					
1	0,1489	1,489	6	0,1611	1,611
2	0,155	1,55	7	0,1352	1,352
3	0,1276	1,276	8	0,1687	1,687
4	0,1763	1,763	9	0,1474	1,474
5	0,1428	1,428	10	0,1565	1,565
Среднее значение I	1,523				

Продолжение табл. 3.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$n = 90$ об/мин					
1	0,1764	1,764	6	0,1908	1,908
2	0,1836	1,836	7	0,1602	1,602
3	0,1512	1,512	8	0,1998	1,998
4	0,2088	2,088	9	0,1746	1,746
5	0,1692	1,692	10	0,1854	1,854
Среднее значение I	1,810				
<i>Время смешения $t = 5$ мин</i>					
Частота вращения переднего ротора					
$n = 30$ об/мин					
1	0,1803	1,803	6	0,195	1,95
2	0,1876	1,876	7	0,1637	1,637
3	0,1545	1,545	8	0,2042	2,042
4	0,2134	2,134	9	0,1784	1,784
5	0,1729	1,729	10	0,1895	1,895
Среднее значение I	1,840				
$n = 60$ об/мин					
1	0,1901	1,901	6	0,2056	2,056
2	0,1978	1,978	7	0,1726	1,726
3	0,1629	1,629	8	0,2153	2,153
4	0,225	2,25	9	0,1881	1,881
5	0,1823	1,823	10	0,1998	1,998
Среднее значение I	1,940				
$n = 90$ об/мин					
1	0,2254	2,254	6	0,2438	2,438
2	0,2346	2,346	7	0,2047	2,047
3	0,1932	1,932	8	0,2553	2,553
4	0,2668	2,668	9	0,2231	2,231
5	0,2162	2,162	10	0,2369	2,369
Среднее значение I	2,301				

Продолжение табл. 3.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
<i>Время смешения $t = 10$ мин</i>					
Частота вращения переднего ротора $n = 30$ об/мин					
1	0,2303	2,303	6	0,2491	2,491
2	0,2397	2,397	7	0,20915	2,0915
3	0,1974	1,974	8	0,26085	2,6085
4	0,2726	2,726	9	0,22795	2,2795
5	0,2209	2,209	10	0,24205	2,4205
Среднее значение I	2,353				
$n = 60$ об/мин					
1	0,2381	2,381	6	0,2575	2,575
2	0,2478	2,478	7	0,2162	2,162
3	0,2041	2,041	8	0,2697	2,697
4	0,2818	2,818	9	0,2357	2,357
5	0,2284	2,284	10	0,2502	2,502
Среднее значение I	2,434				
$n = 90$ об/мин					
1	0,3253	3,253	6	0,3519	3,519
2	0,3386	3,386	7	0,2954	2,954
3	0,2788	2,788	8	0,3685	3,685
4	0,3851	3,851	9	0,322	3,22
5	0,312	3,12	10	0,3419	3,419
Среднее значение I	3,322				
<i>Температура смеси $T = 130$ °C</i>					
Частота вращения переднего ротора $n = 30$ об/мин					
1	0,2048	2,048	6	0,2215	2,215
2	0,2131	2,131	7	0,186	1,86
3	0,1755	1,755	8	0,2319	2,319
4	0,2424	2,424	9	0,2027	2,027
5	0,1964	1,964	10	0,2152	2,152
Среднее значение I	2,091				

Продолжение табл. 3.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$n = 45$ об/мин					
1	0,1862	1,862	6	0,2014	2,014
2	0,1938	1,938	7	0,1691	1,691
3	0,1596	1,596	8	0,2109	2,109
4	0,2204	2,204	9	0,1843	1,843
5	0,1786	1,786	10	0,1957	1,957
Среднее значение I	1,905				
$n = 60$ об/мин					
1	0,1766	1,765	6	0,191	1,91
2	0,1838	1,838	7	0,1603	1,603
3	0,1513	1,513	8	0,2	2
4	0,209	2,09	9	0,1747	1,747
5	0,1693	1,693	10	0,1856	1,856
Среднее значение I	1,802				
$n = 75$ об/мин					
1	0,1764	1,764	6	0,1908	1,908
2	0,1836	1,836	7	0,1602	1,602
3	0,1512	1,512	8	0,1998	1,998
4	0,2088	2,088	9	0,1746	1,746
5	0,1692	1,692	10	0,1854	1,854
Среднее значение I	1,800				
$n = 90$ об/мин					
1	0,174	1,74	6	0,1882	1,882
2	0,1811	1,811	7	0,158	1,58
3	0,1491	1,491	8	0,1971	1,971
4	0,206	2,06	9	0,1722	1,722
5	0,1669	1,669	10	0,1829	1,829
Среднее значение I	1,776				

Продолжение табл. 3.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
<i>Температура смеси $T = 150$ °С</i>					
Частота вращения переднего ротора $n = 30$ об/мин					
1	0,1568	1,568	6	0,1696	1,696
2	0,1632	1,632	7	0,1424	1,424
3	0,1344	1,344	8	0,1776	1,776
4	0,1856	1,856	9	0,1552	1,552
5	0,1504	1,504	10	0,1648	1,648
Среднее значение I	1,600				
$n = 45$ об/мин					
1	0,147	1,47	6	0,159	1,59
2	0,153	1,53	7	0,1335	1,335
3	0,126	1,26	8	0,1665	1,665
4	0,174	1,74	9	0,1455	1,455
5	0,141	1,41	10	0,1545	1,545
Среднее значение I	1,502				
$n = 60$ об/мин					
1	0,1455	1,455	6	0,1574	1,574
2	0,1514	1,514	7	0,1321	1,321
3	0,1247	1,247	8	0,1648	1,648
4	0,1722	1,722	9	0,144	1,44
5	0,1395	1,395	10	0,1529	1,529
Среднее значение I	1,485				
$n = 75$ об/мин					
1	0,1448	1,448	6	0,1566	1,566
2	0,1507	1,507	7	0,1315	1,315
3	0,1241	1,241	8	0,164	1,64
4	0,1714	1,714	9	0,1433	1,433
5	0,1389	1,389	10	0,1522	1,522
Среднее значение I	1,478				

Продолжение табл. 3.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$n = 90$ об/мин					
1	0,144	1,44	6	0,1558	1,558
2	0,1499	1,499	7	0,1308	1,308
3	0,1234	1,234	8	0,1631	1,631
4	0,1705	1,705	9	0,1425	1,425
5	0,1381	1,381	10	0,1514	1,514
Среднее значение I	1,470				
<i>Температура смеси $T = 170$ °C</i>					
Частота вращения переднего ротора					
$n = 30$ об/мин					
1	0,196	1,96	6	0,212	2,12
2	0,204	2,04	7	0,178	1,78
3	0,168	1,68	8	0,222	2,22
4	0,232	2,32	9	0,194	1,94
5	0,188	1,88	10	0,206	2,06
Среднее значение I	2,001				
$n = 45$ об/мин					
1	0,1871	1,871	6	0,2024	2,024
2	0,1948	1,948	7	0,1699	1,699
3	0,1604	1,604	8	0,212	2,12
4	0,2215	2,215	9	0,1852	1,852
5	0,1795	1,795	10	0,1967	1,967
Среднее значение I	1,910				
$n = 60$ об/мин					
1	0,1831	1,831	6	0,1981	1,981
2	0,1906	1,906	7	0,1663	1,663
3	0,157	1,57	8	0,2074	2,074
4	0,2168	2,168	9	0,1813	1,813
5	0,1757	1,757	10	0,1925	1,925
Среднее значение I	1,869				

Продолжение табл. 3.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$n = 75$ об/мин					
1	0,1715	1,715	6	0,1855	1,855
2	0,1785	1,785	7	0,1557	1,557
3	0,147	1,47	8	0,1942	1,942
4	0,203	2,03	9	0,1697	1,697
5	0,1645	1,645	10	0,1802	1,802
Среднее значение I	1,750				
$n = 90$ об/мин					
1	0,1764	1,764	6	0,1908	1,908
2	0,1836	1,836	7	0,1602	1,602
3	0,1512	1,512	8	0,1998	1,998
4	0,2088	2,088	9	0,1746	1,746
5	0,1692	1,692	10	0,1854	1,854
Среднее значение I	1,801				

3.2. Определение предела текучести при растяжении, прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве
 (ширина рабочей части – $b = 3,5$ мм; толщина рабочей части – $h = 2$ мм;
 начальная база образца – $l_0 = 16$ мм)

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ε , %
<i>Концентрация ТУ $C = 0,5$ %</i>						
Частота вращения переднего ротора $n = 30$ об/мин						
1	6,79	9,05	8,34	11,12	64	405
2	7,01	9,34	8,61	11,48	66	418
3	6,5	8,67	7,99	10,66	58	367
4	7,14	9,52	8,77	11,68	68	426
5	7,08	9,44	8,7	11,6	72	450
Среднее значение		9,2		11,3		412

Продолжение табл. 3.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
<i>n</i> = 60 об/мин						
1	6,31	8,41	8,48	11,31	94	591
2	6,51	8,68	8,76	11,68	97	610
3	6,04	8,06	8,13	10,84	85	536
4	6,63	8,85	8,92	11,9	99	622
5	6,58	8,77	8,85	11,8	105	657
Среднее значение		8,55		11,5		601
<i>n</i> = 90 об/мин						
1	6,12	8,16	7,38	9,84	91	574
2	6,32	8,43	7,62	10,16	94	593
3	5,87	7,83	7,07	9,43	83	521
4	6,44	8,59	7,76	10,35	96	604
5	6,39	8,52	7,7	10,26	102	638
Среднее значение		8,3		10		584
<i>Концентрация ТУС</i> = 1 %						
Частота вращения переднего ротора						
<i>n</i> = 30 об/мин						
1	6,82	9,10	8,48	11,31	66	414
2	7,05	9,4	8,76	11,68	68	427
3	6,54	8,72	8,13	10,84	60	375
4	7,18	9,57	8,92	11,9	69	435
5	7,12	9,49	8,85	11,8	73	460
Среднее значение		9,25		11,5		421
<i>n</i> = 60 об/мин						
1	6,17	8,23	8,71	11,61	93	586
2	6,37	8,5	8,99	11,99	96	605
3	5,92	7,89	8,34	11,13	85	532
4	6,49	8,66	9,16	12,21	98	616
5	6,44	8,59	9,08	12,11	104	652
Среднее значение		8,37		11,8		596

Продолжение табл. 3.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ε , %
<i>n</i> = 90 об/мин						
1	6,05	8,07	7,45	9,94	82	515
2	6,25	8,33	7,69	10,26	85	532
3	5,8	7,73	7,14	9,52	74	467
4	6,36	8,48	7,84	10,45	86	542
5	6,31	8,41	7,77	10,37	91	573
Среднее значение		8,2		10,1		524
<i>Концентрация ТУ С = 1,5 %</i>						
Частота вращения переднего ротора <i>n</i> = 30 об/мин						
1	6,86	9,15	8,34	11,12	63	394
2	7,08	9,45	8,61	11,48	65	407
3	6,58	8,77	7,99	10,66	57	358
4	7,22	9,62	8,77	11,69	66	415
5	7,16	9,54	8,7	11,6	70	438
Среднее значение		9,3		11,3		401
<i>n</i> = 60 об/мин						
1	6,42	8,56	8,41	11,22	90	562
2	6,63	8,84	8,68	11,58	93	581
3	6,15	8,2	8,06	10,75	81	510
4	6,75	9	8,85	11,8	94	592
4	6,75	9	8,85	11,8	94	592
5	6,69	8,93	8,77	11,7	100	625
Среднее значение		8,7		11,4		572
<i>n</i> = 90 об/мин						
1	6,23	8,31	7,52	10,03	85	536
2	6,44	8,58	7,77	10,36	88	553
3	5,97	7,97	7,21	9,622	77	486
4	6,56	8,74	7,91	10,55	90	564
5	6,5	8,67	7,85	10,47	95	596
Среднее значение		8,45		10,2		545

Продолжение табл. 3.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
<i>Время смешения $t = 1$ мин</i>						
Частота вращения переднего ротора $n = 30$ об/мин						
1	6,64	8,85	6,81	9,08	44	279
2	6,85	9,14	7,03	9,38	46	288
3	6,36	8,49	6,53	8,7	40	253
4	6,98	9,31	7,16	9,55	47	294
5	6,93	9,24	7,1	9,47	49	310
Среднее значение		9		9,23		284
$n = 60$ об/мин						
1	6,79	9,05	8,71	11,61	64	405
2	7,01	9,34	8,99	11,99	66	418
3	6,5	8,67	8,34	11,13	58	367
4	7,14	9,52	9,16	12,21	68	426
5	7,08	9,44	9,08	12,11	72	450
Среднее значение		9,2		11,8		412
$n = 90$ об/мин						
1	5,24	6,98	6,81	9,08	58	367
2	5,41	7,21	7,03	9,38	60	379
3	5,02	6,69	6,53	8,7	53	333
4	5,51	7,34	7,16	9,55	61	386
5	5,46	7,28	7,1	9,47	65	408
Среднее значение		7,1		9,23		373
<i>Время смешения $t = 5$ мин</i>						
Частота вращения переднего ротора $n = 30$ об/мин						
1	6,42	8,56	6,64	8,85	81	511
2	6,63	8,84	6,85	9,14	84	528
3	6,15	8,2	6,36	8,49	74	464
4	6,75	9	6,98	9,31	86	538
5	6,69	8,93	6,93	9,24	91	568
Среднее значение		8,7		9,0		520

Продолжение табл. 3.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
<i>n</i> = 60 об/мин						
1	6,56	8,75	9,96	13,28	99	620
2	6,78	9,04	10,29	13,72	102	640
3	6,29	8,39	9,55	12,73	90	562
4	6,9	9,21	10,48	13,97	104	652
5	6,85	9,13	10,39	13,86	110	689
Среднее значение		8,9		13,5		630
<i>n</i> = 90 об/мин						
1	5,61	7,48	8,26	11,02	90	566
2	5,79	7,72	8,53	11,38	93	585
3	5,37	7,16	7,92	10,56	82	514
4	5,9	7,86	8,69	11,59	95	596
5	5,85	7,8	8,62	11,49	100	630
Среднее значение		7,6		11,2		576
<i>Время смещения t</i> = 10 мин						
Частота вращения переднего ротора						
<i>n</i> = 30 об/мин						
1	6,79	9,05	8,34	11,12	64	405
2	7,01	9,34	8,61	11,48	66	418
3	6,5	8,67	7,99	10,66	58	367
4	7,14	9,52	8,77	11,69	68	426
5	7,08	9,44	8,7	11,6	72	450
Среднее значение		9,2		11,3		412
<i>n</i> = 60 об/мин						
1	6,31	8,41	8,48	11,31	94	591
2	6,51	8,68	8,76	11,68	97	610
3	6,04	8,06	8,13	10,84	85	536
4	6,63	8,85	8,92	11,9	99	622
5	6,58	8,77	8,85	11,8	105	657
Среднее значение		8,55		11,5		601

Продолжение табл. 3.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
<i>n = 90 об/мин</i>						
1	6,12	8,16	7,38	9,84	91	574
2	6,32	8,43	7,62	10,16	94	593
3	5,87	7,83	7,07	9,43	83	521
4	6,44	8,59	7,76	10,35	96	604
5	6,39	8,52	7,7	10,26	102	638
Среднее значение		8,3		10		584
<i>Температура смеси T = 130 °C</i>						
Частота вращения переднего ротора						
<i>n = 30 об/мин</i>						
1	6,64	8,85	7,38	9,84	23	147
2	6,85	9,14	7,62	10,16	24	152
3	6,36	8,49	7,07	9,43	21	133
4	6,98	9,31	7,76	10,35	24	155
5	6,93	9,24	7,7	10,26	26	164
Среднее значение		9		10		150
<i>n = 45 об/мин</i>						
1	6,68	8,9	7,89	10,53	31	196
2	6,89	9,19	8,15	10,87	32	203
3	6,4	8,53	7,57	10,09	28	178
4	7,02	9,36	8,3	11,07	33	207
5	6,96	9,29	8,23	10,98	35	218
Среднее значение		9,05		10,7		200
<i>n = 60 об/мин</i>						
1	6,71	8,95	7,97	10,63	39	248
2	6,93	9,24	8,23	10,97	40	256
3	6,43	8,58	7,64	10,18	36	225
4	7,06	9,42	8,38	11,18	41	260
5	7	9,34	8,31	11,08	44	275
Среднее значение		9,1		10,8		252

Продолжение табл. 3.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
<i>n</i> = 75 об/мин						
1	6,52	8,7	7,75	10,33	63	393
2	6,73	8,98	8	10,67	65	406
3	6,25	8,33	7,42	9,9	57	357
4	6,86	9,15	8,15	10,87	66	414
5	6,8	9,07	8,08	10,78	70	437
Среднее значение		8,84		10,5		400
<i>n</i> = 90 об/мин						
1	6,27	8,36	7,92	10,56	83	518
2	6,47	8,63	8,18	10,91	85	535
3	6,01	8,01	7,59	10,12	75	470
4	6,59	8,79	8,33	11,11	87	545
5	6,54	8,72	8,26	11,02	92	576
Среднее значение		8,5		10,736		527
<i>Температура смеси T</i> = 150 °C						
Частота вращения переднего ротора						
<i>n</i> = 30 об/мин						
1	5,9	7,87	9,07	12,1	63	395
2	6,09	8,13	9,37	12,5	65	408
3	5,66	7,54	8,7	11,6	57	358
4	6,21	8,28	9,54	12,73	66	416
5	6,16	8,21	9,47	12,62	70	439
Среднее значение		8,0		12,3		402
<i>n</i> = 45 об/мин						
1	6,2	8,27	9,22	12,3	80	503
2	6,41	8,54	9,52	12,7	83	520
3	5,95	7,93	8,84	11,79	73	457
4	6,52	8,7	9,7	12,94	84	530
5	6,47	8,63	9,62	12,83	89	560
Среднее значение		8,41		12,5		512

Продолжение табл. 3.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
<i>N = 60 об/мин</i>						
1	6,41	8,55	9,59	12,79	100	625
2	6,62	8,83	9,9	13,21	103	645
3	6,14	8,19	9,19	12,26	90	567
4	6,74	8,99	10,09	13,45	105	657
5	6,69	8,92	10,01	13,34	111	695
Среднее значение		8,69		13		635
<i>n = 75 об/мин</i>						
1	6,34	8,46	9,44	12,59	105	659
2	6,55	8,73	9,75	13	109	681
3	6,08	8,11	9,05	12,07	95	598
4	6,67	8,9	9,93	13,25	111	693
5	6,62	8,82	9,85	13,14	117	733
Среднее значение		8,6		12,8		670
<i>n = 90 об/мин</i>						
1	6,05	8,07	9,2	12,27	107	669
2	6,25	8,33	9,5	12,67	110	691
3	5,8	7,73	8,82	11,76	97	607
4	6,36	8,48	9,68	12,9	112	704
5	6,31	8,41	9,6	12,8	119	744
Среднее значение		8,2		12,47		680
<i>Температура смеси T = 170 °C</i>						
Частота вращения переднего ротора						
<i>n = 30 об/мин</i>						
1	6,05	8,07	9,21	12,28	86	541
2	6,25	8,33	9,51	12,68	89	559
3	5,8	7,73	8,83	11,77	78	491
4	6,36	8,48	9,69	12,92	91	569
5	6,31	8,41	9,61	12,81	96	601
Среднее значение		8,2		12,485		550

Продолжение табл. 3.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
$n = 45$ об/мин						
1	6,12	8,16	9,22	12,3	94	588
2	6,32	8,43	9,52	12,7	97	608
3	5,87	7,83	8,84	11,79	85	534
4	6,44	8,59	9,7	12,94	99	619
5	6,39	8,52	9,62	12,83	104	654
Среднее значение		8,3		12,5		598
$n = 60$ об/мин						
1	6,21	8,28	9,36	12,48	103	643
2	6,41	8,55	9,66	12,89	106	664
3	5,95	7,94	8,97	11,96	93	584
4	6,53	8,71	9,84	13,13	108	677
5	6,48	8,64	9,76	13,02	114	715
Среднее значение		8,419		12,685		654
$n = 75$ об/мин						
1	6,12	8,16	9,25	12,34	106	664
2	6,32	8,43	9,55	12,74	109	686
3	5,87	7,83	8,87	11,83	96	602
4	6,44	8,59	9,73	12,98	111	698
5	6,39	8,52	9,65	12,87	118	738
Среднее значение		8,3		12,54		675
$n = 90$ об/мин						
1	6,2	8,26	8,76	11,68	105	660
2	6,4	8,53	9,04	12,06	109	682
3	5,94	7,92	8,39	11,19	95	599
4	6,52	8,69	9,21	12,28	111	694
5	6,46	8,62	9,14	12,18	117	734
Среднее значение		8,4		11,87		671

ТАБЛИЦЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сводная таблица экспериментов (к разделу 3)

**Сравнение физико-механических характеристик
модифицированного и немодифицированного
вторичного и первичного полиэтилена высокого давления**

4.1. Определение показателя текучести расплава

(температура в цилиндре ИИРТа $T = 190\text{ }^{\circ}\text{C}$; вес груза $P = 2,16\text{ кг}$;
время между отбором образцов $\tau = 60\text{ с}$)

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
<i>ПВД марки 15803-020</i>					
Частота вращения переднего ротора $n = 30\text{ об/мин}$					
1	0,1401	1,401	6	0,1658	1,658
2	0,1458	1,458	7	0,1344	1,344
3	0,1201	1,201	8	0,1587	1,587
4	0,1515	1,515	9	0,1387	1,387
5	0,1272	1,272	10	0,1472	1,472
Среднее значение I	1,430				
$n = 45\text{ об/мин}$					
1	0,145	1,45	6	0,1568	1,568
2	0,1509	1,509	7	0,1317	1,317
3	0,1243	1,243	8	0,1642	1,642
4	0,1716	1,716	9	0,1435	1,435
5	0,1391	1,391	10	0,1524	1,524
Среднее значение I	1,480				
$n = 60\text{ об/мин}$					
1	0,1617	1,617	6	0,1495	1,495
2	0,1357	1,357	7	0,1556	1,556
3	0,1693	1,693	8	0,1281	1,281
4	0,1479	1,479	9	0,1769	1,769
5	0,1571	1,571	10	0,1434	1,434
Среднее значение I	1,525				

Продолжение табл. 4.1

Номера образцов	Масса <i>m</i> , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин <i>I</i>	Номера образцов	Масса <i>m</i> , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин <i>I</i>
<i>n</i> = 75 об/мин					
1	0,1786	1,786	6	0,1509	1,509
2	0,1447	1,447	7	0,157	1,57
3	0,1709	1,709	8	0,1293	1,293
4	0,1493	1,493	9	0,1632	1,632
5	0,1586	1,586	10	0,137	1,37
Среднее значение <i>I</i>	1,540				
<i>n</i> = 90 об/мин					
1	0,1538	1,538	6	0,1664	1,664
2	0,1601	1,601	7	0,1397	1,397
3	0,1318	1,318	8	0,1742	1,742
4	0,1821	1,821	9	0,1522	1,522
5	0,1475	1,475	10	0,1617	1,617
Среднее значение <i>I</i>	1,570				
<i>ВПВД</i>					
Частота вращения переднего ротора					
<i>n</i> = 30 об/мин					
1	0,1734	1,734	6	0,1875	1,875
2	0,1804	1,804	7	0,1574	1,574
3	0,1486	1,486	8	0,1964	1,964
4	0,2052	2,052	9	0,1716	1,716
5	0,1663	1,663	10	0,1822	1,822
Среднее значение <i>I</i>	1,769				
<i>n</i> = 45 об/мин					
1	0,1902	1,902	6	0,1758	1,758
2	0,1597	1,597	7	0,183	1,83
3	0,1992	1,992	8	0,1507	1,507
4	0,1741	1,741	9	0,2082	2,081
5	0,1848	1,848	10	0,1687	1,687
Среднее значение <i>I</i>	1,794				

Продолжение табл. 4.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$n = 60$ об/мин					
1	0,1769	1,769	6	0,1913	1,913
2	0,1841	1,841	7	0,1606	1,606
3	0,1516	1,516	8	0,2003	2,003
4	0,2093	2,093	9	0,175	1,75
5	0,1696	1,696	10	0,1859	1,859
Среднее значение I	1,805				
$n = 75$ об/мин					
1	0,1902	1,902	6	0,1849	1,849
2	0,1597	1,597	7	0,1831	1,831
3	0,1992	1,992	8	0,1508	1,507
4	0,1741	1,741	9	0,2082	2,082
5	0,1759	1,759	10	0,1687	1,687
Среднее значение I	1,795				
$n = 90$ об/мин					
1	0,1886	1,886	6	0,1744	1,744
2	0,1584	1,584	7	0,1815	1,815
3	0,1975	1,975	8	0,1495	1,495
4	0,1726	1,726	9	0,2064	2,064
5	0,1833	1,833	10	0,1673	1,673
Среднее значение I	1,780				
<i>ПВД марки 15803-020 + ТУ марки К-354</i>					
Частота вращения переднего ротора					
$n = 30$ об/мин					
1	0,1674	1,674	6	0,1982	1,981
2	0,1742	1,742	7	0,1606	1,606
3	0,1435	1,435	8	0,1811	1,811
4	0,1657	1,657	9	0,152	1,52
5	0,1759	1,759	10	0,1896	1,896
Среднее значение I	1,708				

Продолжение табл. 4.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$n = 45$ об/мин					
1	0,1793	1,793	6	0,194	1,94
2	0,1867	1,867	7	0,1629	1,629
3	0,1537	1,537	8	0,2031	2,031
4	0,2123	2,123	9	0,1775	1,775
5	0,172	1,72	10	0,1885	1,885
Среднее значение I	1,831				
$n = 60$ об/мин					
1	0,1966	1,965	6	0,1817	1,817
2	0,165	1,65	7	0,1891	1,891
3	0,2058	2,058	8	0,1557	1,557
4	0,1799	1,799	9	0,2151	2,151
5	0,191	1,91	10	0,1743	1,743
Среднее значение I	1,855				
$n = 75$ об/мин					
1	0,1877	1,877	6	0,1966	1,966
2	0,1576	1,576	7	0,1718	1,718
3	0,1735	1,735	8	0,1824	1,824
4	0,1806	1,806	9	0,2054	2,054
5	0,1487	1,487	10	0,1664	1,664
Среднее значение I	1,771				
$n = 90$ об/мин					
1	0,1691	1,691	6	0,1829	1,829
2	0,176	1,76	7	0,1536	1,536
3	0,1449	1,449	8	0,1915	1,915
4	0,2002	2,002	9	0,1674	1,674
5	0,1622	1,622	10	0,1777	1,777
Среднее значение I	1,726				

Продолжение табл. 4.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
<i>ВПВД + ТУ марки К-354</i>					
Частота вращения переднего ротора $n = 30$ об/мин					
1	0,1523	1,523	6	0,1601	1,601
2	0,1383	1,383	7	0,1803	1,803
3	0,1305	1,305	8	0,1725	1,725
4	0,1507	1,507	9	0,1585	1,585
5	0,1461	1,461	10	0,1647	1,647
Среднее значение I	1,554				
$n = 45$ об/мин					
1	0,1541	1,541	6	0,166	1,667
2	0,1604	1,604	7	0,14	1,4
3	0,1321	1,321	8	0,174	1,746
4	0,1824	1,824	9	0,152	1,525
5	0,1478	1,478	10	0,162	1,62
Среднее значение I	1,573				
$n = 60$ об/мин					
1	0,1677	1,677	6	0,155	1,55
2	0,1408	1,408	7	0,1614	1,614
3	0,1756	1,756	8	0,1329	1,329
4	0,1534	1,534	9	0,1835	1,835
5	0,1629	1,629	10	0,1487	1,487
Среднее значение I	1,582				
$n = 75$ об/мин					
1	0,148	1,48	6	0,1752	1,752
2	0,154	1,54	7	0,1419	1,419
3	0,1268	1,268	8	0,1601	1,601
4	0,1465	1,465	9	0,1344	1,344
5	0,1555	1,555	10	0,1676	1,676
Среднее значение I	1,510				

Продолжение табл. 4.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$n = 90$ об/мин					
1	0,1376	1,376	6	0,1488	1,488
2	0,1432	1,432	7	0,125	1,25
3	0,1179	1,179	8	0,1559	1,559
4	0,1629	1,629	9	0,1362	1,362
5	0,132	1,32	10	0,1446	1,446
Среднее значение I	1,404				

4.2. Определение предела текучести при растяжении, прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве

(ширина рабочей части – $b = 3,5$ мм; толщина рабочей части – $h = 2$ мм; начальная база образца – $l_0 = 16$ мм)

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
<i>ПВД марки 15803-020</i>						
Частота вращения переднего ротора $n = 30$ об/мин						
1	7,1	9,46	8,56	11,41	86	541
2	7,33	9,77	8,84	11,78	89	558
3	6,8	9,07	8,2	10,94	78	491
4	7,46	9,95	9	12	91	569
5	7,4	9,87	8,93	11,91	96	601
Среднее значение		9,62		11,6		550
$n = 45$ об/мин						
1	6,89	9,19	8,49	11,32	82	513
2	7,56	10,09	9,31	12,42	95	595
3	7,5	10,01	9,24	12,32	100	629
4	7,19	9,59	8,85	11,81	90	565
5	7,43	9,9	9,14	12,19	93	584
Среднее значение		9,75		12		575

Продолжение табл. 4.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
<i>n</i> = 60 об/мин						
1	7,22	9,63	9	12	93	584
2	7,46	9,94	9,29	12,39	96	603
3	6,92	9,23	8,62	11,50	84	530
4	7,59	10,13	9,46	12,62	98	614
5	7,53	10,04	9,38	12,51	103	649
Среднее значение		9,788		12,193		593
<i>n</i> = 75 об/мин						
1	7,19	9,59	8,98	11,97	90	565
2	7,42	9,9	9,27	12,36	93	584
3	6,89	9,19	8,61	11,48	82	513
4	7,56	10,09	9,44	12,59	95	595
5	7,5	10	9,37	12,49	100	629
Среднее значение		9,748		12,17		575
<i>n</i> = 90 об/мин						
1	7,16	9,54	8,93	11,9	88	551
2	7,39	9,85	9,22	12,29	91	569
3	6,86	9,15	8,56	11,41	80	500
4	7,53	10,04	9,39	12,52	92	579
5	7,46	9,95	9,31	12,42	98	612
Среднее значение		9,7		12,1		560
<i>ВПВД</i>						
Частота вращения переднего ротора						
<i>n</i> = 30 об/мин						
1	6,79	9,05	6,75	9	34	214
2	7,01	9,34	6,97	9,29	35	221
3	6,5	8,67	6,47	8,631	31	194
4	7,14	9,52	7,1	9,47	36	225
5	7,08	9,44	7,04	9,39	38	238
Среднее значение		9,2		9,149		218

Продолжение табл. 4.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
$n = 45$ об/мин						
1	6,72	8,96	7,64	10,18	57	357
2	7,37	9,83	8,38	11,18	66	414
3	7,31	9,75	8,31	11,08	70	437
4	7,01	9,35	7,97	10,63	62	393
5	7,24	9,65	8,23	10,97	65	406
Среднее значение		9,5		10,8		400
$n = 60$ об/мин						
1	7,23	9,64	8,62	11,49	85	536
2	7,6	10,14	9,06	12,09	90	564
3	6,93	9,24	8,26	11,01	77	486
4	7,46	9,95	8,9	11,87	88	553
5	7,54	10,06	8,99	11,99	95	596
Среднее значение		9,798		11,68		545
$n = 75$ об/мин						
1	7,19	9,59	8,41	11,22	78	492
2	7,5	10,01	8,77	11,7	87	547
3	6,89	9,19	8,06	10,75	71	446
4	7,56	10,09	8,85	11,8	82	517
5	7,43	9,9	8,68	11,58	81	508
Среднее значение		9,75		11,4		500
$n = 90$ об/мин						
1	7,08	9,44	8,12	10,82	71	443
2	7,31	9,75	8,38	11,17	73	458
3	6,79	9,05	7,78	10,37	64	402
4	7,45	9,93	8,54	11,38	74	466
5	7,39	9,85	8,47	11,29	78	493
Среднее значение		9,6		11,0		451

Продолжение табл. 4.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
<i>ПВД марки 15803-020 + ТУ марки К-354</i>						
Частота вращения переднего ротора $n = 30$ об/мин						
1	7,72	10,29	9,93	13,24	108	676
2	7,64	10,19	9,83	13,11	100	628
3	7,09	9,46	9,12	12,17	88	551
4	7,78	10,38	10,01	13,35	102	639
5	7,4	9,87	9,52	12,69	97	608
Среднее значение		10,03		12,9		618
$n = 45$ об/мин						
1	8,07	10,76	10,17	13,56	99	621
2	8	10,67	10,08	13,45	105	656
3	7,35	9,811	9,26	12,35	85	535
4	7,67	10,23	9,67	12,89	94	590
5	7,92	10,56	9,98	13,31	97	609
Среднее значение		10,4		13,1		600
$n = 60$ об/мин						
1	7,81	10,41	9,77	13,03	91	574
2	8,06	10,75	10,09	13,45	94	593
3	7,48	9,98	9,36	12,49	83	521
4	8,21	10,95	10,28	13,7	96	604
5	8,14	10,86	10,19	13,59	102	638
Среднее значение		10,58		13,24		584
$n = 75$ об/мин						
1	7,42	9,9	9,33	12,45	82	514
2	8	10,67	10,06	13,41	93	585
3	7,75	10,33	9,74	12,99	90	566
4	8,15	10,87	10,24	13,66	95	596
5	8,08	10,78	10,16	13,55	100	630
Среднее значение		10,5		13,2		576

Продолжение табл. 4.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
<i>n</i> = 90 об/мин						
1	7,73	10,31	9,73	12,98	94	593
2	7,98	10,65	10,05	13,4	100	626
3	7,41	9,88	9,33	12,44	81	511
4	8,13	10,84	10,24	13,65	90	563
5	8,06	10,76	10,15	13,54	93	582
Среднее значение		10,48		13,19		573
<i>ВПВД + ТУ марки К-354</i>						
Частота вращения переднего ротора						
<i>n</i> = 30 об/мин						
1	7,94	10,59	9,72	12,97	88	551
2	8,2	10,93	10,04	13,39	91	569
3	8,28	11,04	10,14	13,53	98	612
4	8,35	11,13	10,23	13,64	92	579
5	7,61	10,15	9,32	12,43	80	500
Среднее значение		10,76		13,18		560
<i>n</i> = 45 об/мин						
1	7,93	10,58	9,96	13,28	86	543
2	8,19	10,92	10,29	13,72	89	560
3	7,6	10,14	9,55	12,73	78	492
4	8,34	11,12	10,48	13,97	91	571
5	8,27	11,03	10,39	13,86	96	603
Среднее значение		10,75		13,5		552
<i>n</i> = 60 об/мин						
1	7,97	10,64	10,17	13,56	84	527
2	8,39	11,19	10,69	14,26	88	554
3	8,32	11,09	10,61	14,14	93	586
4	8,23	10,98	10,5	14	87	544
5	7,64	10,19	9,75	13	76	478
Среднее значение		10,81		13,78		536

Продолжение табл. 4.2

Номера образцов	P_t , кГс	σ_t , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
<i>n</i> = 75 об/мин						
1	7,89	10,53	9,98	13,31	85	531
2	8,15	10,87	10,31	13,75	87	548
3	7,57	10,09	9,57	12,76	77	482
4	8,3	11,07	10,5	14	89	559
5	8,23	10,98	10,41	13,89	94	590
Среднее значение		10,7		13,53		540
<i>n</i> = 90 об/мин						
1	7,78	10,37	9,5	12,67	91	571
2	8,18	10,91	9,91	13,22	101	635
3	8,11	10,82	9,11	12,15	94	590
4	8,03	10,71	10	13,33	83	518
5	7,45	9,94	9,811	13,08	96	601
Среднее значение		10,54		12,88		581

ТАБЛИЦЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сводная таблица экспериментов (к разделу 3)

**Физико-механические характеристики композита
модифицированного техническим углеродом марки К-354,
активированным различными способами**

5.1. Определение показателя текучести расплава

(температура в цилиндре ИИРТа $T = 190$ °С; вес груза $P = 2,16$ кг;
время между отбором образцов $\tau = 60$ с)

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
<i>Определение режимных параметров воздействия в шаровой мельнице</i>					
<i>Частота вращения барабана $n = 11$ об/мин</i>					
Время воздействия $t = 10$ мин					
1	0,1659	1,659	6	0,1794	1,794
2	0,1727	1,727	7	0,1506	1,506
3	0,1422	1,422	8	0,1879	1,879
4	0,1964	1,964	9	0,1642	1,642
5	0,1591	1,591	10	0,1744	1,744
Среднее значение I	1,693				
$t = 20$ мин					
1	0,1591	1,591	6	0,1721	1,721
2	0,1656	1,656	7	0,1445	1,445
3	0,1364	1,364	8	0,1802	1,802
4	0,1883	1,883	9	0,1575	1,575
5	0,1526	1,526	10	0,1672	1,672
Среднее значение I	1,623				
$t = 30$ мин					
1	0,1581	1,581	6	0,1711	1,711
2	0,1646	1,646	7	0,1436	1,436
3	0,1356	1,356	8	0,1791	1,791
4	0,1872	1,872	9	0,1565	1,565
5	0,1517	1,517	10	0,1662	1,662
Среднее значение I	1,614				

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$t = 40$ мин					
1	0,1565	1,565	6	0,1693	1,693
2	0,1629	1,629	7	0,1421	1,421
3	0,1341	1,341	8	0,1773	1,773
4	0,1852	1,852	9	0,1549	1,549
5	0,1501	1,501	10	0,1645	1,645
Среднее значение I	1,597				
$n = 50$ об/мин					
1	0,1552	1,552	6	0,1679	1,679
2	0,1616	1,616	7	0,1410	1,410
3	0,1331	1,331	8	0,1758	1,758
4	0,1837	1,837	9	0,1536	1,536
5	0,1489	1,489	10	0,1632	1,632
Среднее значение I	1,584				
$n = 60$ об/мин					
1	0,1550	1,550	6	0,1677	1,677
2	0,1614	1,614	7	0,1408	1,408
3	0,1329	1,329	8	0,1756	1,756
4	0,1835	1,835	9	0,1535	1,535
5	0,1487	1,487	10	0,1629	1,629
Среднее значение I	1,582				
<i>Частота вращения барабана $n = 17$ об/мин</i>					
Время воздействия $t = 10$ мин					
1	0,1649	1,649	6	0,1784	1,784
2	0,1717	1,717	7	0,1498	1,498
3	0,1414	1,414	8	0,1868	1,868
4	0,1952	1,952	9	0,1633	1,633
5	0,1582	1,582	10	0,1733	1,733
Среднее значение I	1,683				

Продолжение табл. 5.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$t = 20$ мин					
1	0,1570	1,570	6	0,1698	1,698
2	0,1634	1,634	7	0,1426	1,426
3	0,1346	1,346	8	0,1778	1,778
4	0,1858	1,858	9	0,1554	1,554
5	0,1506	1,506	10	0,1650	1,650
Среднее значение I	1,602				
$t = 30$ мин					
1	0,1552	1,552	6	0,1679	1,679
2	0,1616	1,616	7	0,1410	1,410
3	0,1331	1,331	8	0,1758	1,758
4	0,1837	1,837	9	0,1536	1,536
5	0,1489	1,489	10	0,1632	1,632
Среднее значение I	1,584				
$t = 40$ мин					
1	0,1551	1,551	6	0,1678	1,678
2	0,1615	1,615	7	0,1409	1,409
3	0,1330	1,330	8	0,1757	1,757
4	0,1836	1,836	9	0,1536	1,536
5	0,1488	1,488	10	0,1630	1,630
Среднее значение I	1,583				
$n = 50$ об/мин					
1	0,1545	1,545	6	0,1672	1,672
2	0,1609	1,609	7	0,1404	1,404
3	0,1325	1,325	8	0,1750	1,750
4	0,1829	1,829	9	0,1530	1,530
5	0,1482	1,482	10	0,1624	1,624
Среднее значение I	1,577				

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$n = 60$ об/мин					
1	0,1539	1,539	6	0,1664	1,664
2	0,1601	1,601	7	0,1397	1,397
3	0,1319	1,319	8	0,1743	1,743
4	0,1821	1,821	9	0,1523	1,523
5	0,1476	1,476	10	0,1617	1,617
Среднее значение I	1,570				
<i>Частота вращения барабана $n = 20$ об/мин</i>					
Время воздействия $t = 10$ мин					
1	0,1657	1,657	6	0,1792	1,792
2	0,1725	1,725	7	0,1505	1,505
3	0,1420	1,420	8	0,1877	1,877
4	0,1962	1,962	9	0,1640	1,640
5	0,1590	1,590	10	0,1742	1,742
Среднее значение I	1,691				
$t = 20$ мин					
1	0,1567	1,567	6	0,1695	1,695
2	0,1631	1,631	7	0,1423	1,423
3	0,1343	1,343	8	0,1775	1,775
4	0,1855	1,855	9	0,1551	1,551
5	0,1503	1,503	10	0,1647	1,647
Среднее значение I	1,599				
$t = 30$ мин					
1	0,1551	1,551	6	0,1678	1,678
2	0,1615	1,615	7	0,1409	1,409
3	0,1330	1,330	8	0,1757	1,757
4	0,1836	1,836	9	0,1536	1,536
5	0,1488	1,488	10	0,1630	1,630
Среднее значение I	1,583				

Продолжение табл. 5.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$t = 40$ мин					
1	0,1519	1,519	6	0,1643	1,643
2	0,1581	1,581	7	0,1380	1,380
3	0,1302	1,302	8	0,1721	1,721
4	0,1798	1,798	9	0,1504	1,504
5	0,1457	1,457	10	0,1597	1,597
Среднее значение I	1,550				
$n = 50$ об/мин					
1	0,1506	1,506	6	0,1629	1,629
2	0,1568	1,568	7	0,1368	1,368
3	0,1291	1,291	8	0,1706	1,706
4	0,1783	1,783	9	0,1491	1,491
5	0,1445	1,445	10	0,1583	1,583
Среднее значение I	1,537				
$n = 60$ об/мин					
1	0,1484	1,484	6	0,1605	1,605
2	0,1544	1,544	7	0,1347	1,347
3	0,1272	1,272	8	0,1681	1,681
4	0,1756	1,756	9	0,1469	1,469
5	0,1423	1,423	10	0,1559	1,559
Среднее значение I	1,514				
<i>Частота вращения барабана $n = 25$ об/мин</i>					
Время воздействия $t = 10$ мин					
1	0,1651	1,651	6	0,1786	1,786
2	0,1719	1,719	7	0,1500	1,500
3	0,1415	1,415	8	0,1870	1,870
4	0,1955	1,955	9	0,1634	1,634
5	0,1584	1,584	10	0,1736	1,736
Среднее значение I	1,685				

Продолжение табл. 5.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$t = 20$ мин					
1	0,1553	1,553	6	0,1680	1,680
2	0,1617	1,617	7	0,1411	1,411
3	0,1331	1,331	8	0,1759	1,759
4	0,1839	1,839	9	0,1537	1,537
5	0,1490	1,490	10	0,1633	1,633
Среднее значение I	1,585				
$t = 30$ мин					
1	0,1517	1,517	6	0,1641	1,641
2	0,1579	1,579	7	0,1378	1,378
3	0,1300	1,300	8	0,1718	1,718
4	0,1796	1,796	9	0,1502	1,502
5	0,1455	1,455	10	0,1594	1,594
Среднее значение I	1,548				
$t = 40$ мин					
1	0,1494	1,494	6	0,1615	1,615
2	0,1554	1,554	7	0,1356	1,356
3	0,1280	1,280	8	0,1692	1,692
4	0,1768	1,768	9	0,1478	1,478
5	0,1433	1,433	10	0,1570	1,570
Среднее значение I	1,524				
$n = 50$ об/мин					
1	0,1491	1,491	6	0,1612	1,612
2	0,1551	1,551	7	0,1354	1,354
3	0,1278	1,278	8	0,1688	1,688
4	0,1764	1,764	9	0,1475	1,475
5	0,1430	1,430	10	0,1567	1,567
Среднее значение I	1,521				

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$n = 60$ об/мин					
1	0,1470	1,470	6	0,1590	1,590
2	0,1530	1,530	7	0,1335	1,335
3	0,1260	1,260	8	0,1665	1,665
4	0,1740	1,740	9	0,1455	1,455
5	0,1410	1,410	10	0,1545	1,545
Среднее значение I	1,500				
<i>Частота вращения барабана $n = 30$ об/мин</i>					
Время воздействия $t = 10$ мин					
1	0,1637	1,637	6	0,1770	1,770
2	0,1703	1,703	7	0,1486	1,486
3	0,1403	1,403	8	0,1854	1,854
4	0,1937	1,937	9	0,1620	1,620
5	0,1570	1,570	10	0,1720	1,720
Среднее значение I	1,670				
$t = 20$ мин					
1	0,1551	1,551	6	0,1678	1,678
2	0,1615	1,615	7	0,1409	1,409
3	0,1330	1,330	8	0,1757	1,757
4	0,1836	1,836	9	0,1536	1,536
5	0,1488	1,488	10	0,1630	1,630
Среднее значение I	1,583				
$t = 30$ мин					
1	0,1537	1,537	6	0,1662	1,662
2	0,1599	1,599	7	0,1396	1,396
3	0,1317	1,317	8	0,1740	1,740
4	0,1819	1,819	9	0,1521	1,521
5	0,1474	1,474	10	0,1615	1,615
Среднее значение I	1,568				

Продолжение табл. 5.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$t = 40$ мин					
1	0,1511	1,511	6	0,1635	1,635
2	0,1573	1,573	7	0,1372	1,372
3	0,1295	1,295	8	0,1712	1,712
4	0,1789	1,789	9	0,1496	1,496
5	0,1449	1,449	10	0,1588	1,588
Среднее значение I	1,542				
$n = 50$ об/мин					
1	0,1505	1,505	6	0,1628	1,628
2	0,1567	1,567	7	0,1367	1,367
3	0,1290	1,290	8	0,1705	1,705
4	0,1782	1,782	9	0,1490	1,490
5	0,1444	1,444	10	0,1582	1,582
Среднее значение I	1,536				
$n = 60$ об/мин					
1	0,1491	1,491	6	0,1612	1,612
2	0,1551	1,551	7	0,1354	1,354
3	0,1278	1,278	8	0,1688	1,688
4	0,1764	1,764	9	0,1475	1,475
5	0,1430	1,430	10	0,1567	1,567
Среднее значение I	1,521				
<i>Частота вращения барабана $n = 34$ об/мин</i>					
Время воздействия $t = 10$ мин					
1	0,1639	1,639	6	0,1772	1,772
2	0,1705	1,705	7	0,1488	1,488
3	0,1404	1,404	8	0,1856	1,856
4	0,1940	1,940	9	0,1622	1,622
5	0,1572	1,572	10	0,1722	1,722
Среднее значение I	1,672				

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$t = 20$ мин					
1	0,1552	1,552	6	0,1679	1,679
2	0,1616	1,616	7	0,1410	1,410
3	0,1331	1,331	8	0,1758	1,758
4	0,1837	1,837	9	0,1536	1,536
5	0,1489	1,489	10	0,1632	1,632
Среднее значение I	1,584				
$t = 30$ мин					
1	0,1523	1,523	6	0,1647	1,647
2	0,1585	1,585	7	0,1383	1,383
3	0,1305	1,305	8	0,1725	1,725
4	0,1803	1,803	9	0,1507	1,507
5	0,1461	1,461	10	0,1601	1,601
Среднее значение I	1,554				
$t = 40$ мин					
1	0,1504	1,504	6	0,1627	1,627
2	0,1566	1,566	7	0,1366	1,366
3	0,1289	1,289	8	0,1704	1,704
4	0,1781	1,781	9	0,1489	1,489
5	0,1443	1,443	10	0,1581	1,581
Среднее значение I	1,535				
$n = 50$ об/мин					
1	0,1496	1,496	6	0,1619	1,619
2	0,1558	1,558	7	0,1359	1,359
3	0,1283	1,283	8	0,1695	1,695
4	0,1771	1,771	9	0,1481	1,481
5	0,1435	1,435	10	0,1573	1,573
Среднее значение I	1,527				

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$n = 60$ об/мин					
1	0,1483	1,483	6	0,1604	1,604
2	0,1543	1,543	7	0,1347	1,347
3	0,1271	1,271	8	0,1679	1,679
4	0,1755	1,755	9	0,1468	1,468
5	0,1422	1,422	10	0,1558	1,558
Среднее значение I	1,513				
<i>Определение количества пропусков через минимальный межвалковый зазор вальцов</i>					
Количество пропусков					
$i = 1$					
1	0,1707	1,707	6	0,1847	1,847
2	0,1777	1,777	7	0,1550	1,550
3	0,1463	1,463	8	0,1934	1,934
4	0,2021	2,021	9	0,1690	1,690
5	0,1637	1,637	10	0,1794	1,794
Среднее значение I	1,742				
$i = 2$					
1	0,1592	1,592	6	0,1721	1,721
2	0,1656	1,656	7	0,1445	1,445
3	0,1364	1,364	8	0,1803	1,803
4	0,1884	1,884	9	0,1575	1,575
5	0,1527	1,527	10	0,1673	1,673
Среднее значение I	1,624				
$i = 3$					
1	0,1540	1,540	6	0,1665	1,665
2	0,1602	1,602	7	0,1398	1,398
3	0,1320	1,320	8	0,1744	1,744
4	0,1822	1,822	9	0,1524	1,524
5	0,1477	1,477	10	0,1618	1,618
Среднее значение I	1,571				

Продолжение табл. 5.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$i = 4$					
1	0,1490	1,490	6	0,1611	1,611
2	0,1550	1,550	7	0,1353	1,353
3	0,1277	1,277	8	0,1687	1,687
4	0,1763	1,763	9	0,1474	1,474
5	0,1429	1,429	10	0,1566	1,566
Среднее значение I	1,520				
$i = 5$					
1	0,1466	1,466	6	0,1586	1,586
2	0,1526	1,526	7	0,1331	1,331
3	0,1257	1,257	8	0,1661	1,661
4	0,1735	1,735	9	0,1451	1,451
5	0,1406	1,406	10	0,1541	1,541
Среднее значение I	1,496				
$i = 10$					
1	0,1452	1,452	6	0,1571	1,571
2	0,1512	1,512	7	0,1319	1,319
3	0,1245	1,245	8	0,1645	1,645
4	0,1719	1,719	9	0,1438	1,438
5	0,1393	1,393	10	0,1526	1,526
Среднее значение I	1,482				
$i = 20$					
1	0,1437	1,437	6	0,1554	1,554
2	0,1495	1,495	7	0,1305	1,305
3	0,1231	1,231	8	0,1627	1,627
4	0,1701	1,701	9	0,1422	1,422
5	0,1378	1,378	10	0,1510	1,510
Среднее значение I	1,466				

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
<i>Определение времени воздействия ультразвуком</i>					
Время воздействия ультразвуком $t = 0,5$ мин					
1	0,1730	1,730	6	0,1871	1,871
2	0,1800	1,800	7	0,1571	1,571
3	0,1483	1,483	8	0,2047	2,047
4	0,1959	1,959	9	0,1659	1,659
5	0,1712	1,712	10	0,1818	1,818
Среднее значение I	1,765				
$t = 1$ мин					
1	0,1410	1,410	6	0,1679	1,679
2	0,1758	1,758	7	0,1552	1,552
3	0,1536	1,536	8	0,1616	1,616
4	0,1837	1,837	9	0,1331	1,331
5	0,1489	1,489	10	0,1632	1,632
Среднее значение I	1,584				
$t = 2$ мин					
1	0,1578	1,578	6	0,1707	1,707
2	0,1642	1,642	7	0,1433	1,433
3	0,1352	1,352	8	0,1787	1,787
4	0,1868	1,868	9	0,1562	1,562
5	0,1513	1,513	10	0,1658	1,658
Среднее значение I	1,610				
$t = 3$ мин					
1	0,1546	1,546	6	0,1673	1,673
2	0,1610	1,610	7	0,1404	1,404
3	0,1326	1,326	8	0,1752	1,752
4	0,1830	1,830	9	0,1531	1,531
5	0,1483	1,483	10	0,1625	1,625
Среднее значение I	1,578				

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
-----------------	---------------	---	-----------------	---------------	---

Определение режимных параметров смешения при активировании ТУ в шаровой мельнице

Частота вращения приводного ротора
 $n = 30$ об/мин

1	0,1464	1,464	6	0,1584	1,584
2	0,1524	1,524	7	0,1330	1,330
3	0,1255	1,255	8	0,1658	1,658
4	0,1315	1,315	9	0,1449	1,449
5	0,1673	1,673	10	0,1539	1,539
Среднее значение I	1,494				

$n = 45$ об/мин

1	0,1537	1,537	6	0,1662	1,662
2	0,1599	1,599	7	0,1396	1,396
3	0,1317	1,317	8	0,1740	1,740
4	0,1380	1,380	9	0,1521	1,521
5	0,1756	1,756	10	0,1615	1,615
Среднее значение I	1,568				

$n = 60$ об/мин

1	0,1553	1,553	6	0,1680	1,680
2	0,1617	1,617	7	0,1411	1,411
3	0,1331	1,331	8	0,1759	1,759
4	0,1395	1,395	9	0,1537	1,537
5	0,1775	1,775	10	0,1633	1,633
Среднее значение I	1,585				

Продолжение табл. 5.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$n = 75$ об/мин					
1	0,1493	1,493	6	0,1614	1,614
2	0,1553	1,553	7	0,1355	1,355
3	0,1279	1,279	8	0,1691	1,691
4	0,1340	1,340	9	0,1477	1,477
5	0,1706	1,706	10	0,1569	1,569
Среднее значение I	1,523				
$n = 90$ об/мин					
1	0,1509	1,509	6	0,1632	1,632
2	0,1571	1,571	7	0,1371	1,371
3	0,1294	1,294	8	0,1709	1,709
4	0,1355	1,355	9	0,1494	1,494
5	0,1725	1,725	10	0,1586	1,586
Среднее значение I	1,540				
<i>Определение режимных параметров смешения при активировании ТУ ультразвуком</i>					
Частота вращения приводного ротора					
$n = 30$ об/мин					
1	0,1518	1,518	6	0,1642	1,642
2	0,1580	1,580	7	0,1379	1,379
3	0,1301	1,301	8	0,1719	1,719
4	0,1363	1,363	9	0,1503	1,503
5	0,1735	1,735	10	0,1595	1,595
Среднее значение I	1,549				
$n = 45$ об/мин					
1	0,1599	1,599	6	0,1662	1,662
2	0,1740	1,740	7	0,1396	1,396
3	0,1521	1,521	8	0,1537	1,537
4	0,1615	1,615	9	0,1317	1,317
5	0,1756	1,756	10	0,1380	1,380
Среднее значение I	1,568				

Продолжение табл. 5.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$n = 60$ об/мин					
1	0,1552	1,552	6	0,1679	1,679
2	0,1616	1,616	7	0,1410	1,410
3	0,1331	1,331	8	0,1758	1,758
4	0,1394	1,394	9	0,1536	1,536
5	0,1774	1,774	10	0,1632	1,632
Среднее значение I	1,584				
$n = 75$ об/мин					
1	0,1473	1,473	6	0,1593	1,593
2	0,1533	1,533	7	0,1338	1,338
3	0,1263	1,263	8	0,1668	1,668
4	0,1323	1,323	9	0,1458	1,458
5	0,1683	1,683	10	0,1548	1,548
Среднее значение I	1,503				
$n = 90$ об/мин					
1	0,1363	1,363	6	0,1474	1,474
2	0,1419	1,419	7	0,1238	1,238
3	0,1168	1,168	8	0,1544	1,544
4	0,1224	1,224	9	0,1349	1,349
5	0,1558	1,558	10	0,1433	1,433
Среднее значение I	1,391				
<i>Определение режимных параметров смешения при активировании ТУ посредством трехкратного пропускания через межвалковый зазор вальцов</i>					
Частота вращения приводного ротора					
$n = 30$ об/мин					
1	0,1437	1,437	6	0,1554	1,554
2	0,1495	1,495	7	0,1305	1,305
3	0,1231	1,231	8	0,1627	1,627
4	0,1290	1,290	9	0,1422	1,422
5	0,1642	1,642	10	0,1510	1,510
Среднее значение I	1,466				

Продолжение табл. 5.1

Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I	Номера образцов	Масса m , г	Показатель текучести расплава, г/10 мин I
$n = 45$ об/мин					
1	0,1480	1,480	6	0,1601	1,601
2	0,1540	1,540	7	0,1344	1,344
3	0,1268	1,268	8	0,1676	1,676
4	0,1329	1,329	9	0,1465	1,465
5	0,1691	1,691	10	0,1555	1,555
Среднее значение I	1,510				
$n = 60$ об/мин					
1	0,1540	1,540	6	0,1665	1,665
2	0,1602	1,602	7	0,1398	1,398
3	0,1320	1,320	8	0,1744	1,744
4	0,1382	1,382	9	0,1524	1,524
5	0,1760	1,760	10	0,1618	1,618
Среднее значение I	1,571				
$n = 75$ об/мин					
1	0,1514	1,514	6	0,1638	1,638
2	0,1576	1,576	7	0,1375	1,375
3	0,1298	1,298	8	0,1715	1,715
4	0,1360	1,360	9	0,1499	1,499
5	0,1730	1,730	10	0,1591	1,591
Среднее значение I	1,545				
$n = 90$ об/мин					
1	0,1470	1,470	6	0,1590	1,590
2	0,1530	1,530	7	0,1335	1,335
3	0,1260	1,260	8	0,1665	1,665
4	0,1320	1,320	9	0,1455	1,455
5	0,1680	1,680	10	0,1545	1,545
Среднее значение I	1,500				

5.2 Определение предела текучести при растяжении, прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве
 (ширина рабочей части – $b = 3,5$ мм; толщина рабочей части – $h = 2$ мм;
 начальная база образца – $l_0 = 16$ мм)

Номера образцов	P_T , кгс	σ_T , МПа	P_p , кгс	σ_p , МПа	Δl , мм	ε , %
<i>Определение режимных параметров воздействия в шаровой мельнице</i>						
<i>Частота вращения барабана $n = 11$ об/мин</i>						
Время воздействия						
$t = 10$ мин						
1	7,82	10,43	9,86	13,15	90,55	566
2	8,07	10,77	10,18	13,57	93,50	584
3	7,50	9,99	9,45	12,60	82,14	513
4	8,22	10,97	10,37	13,83	95,24	595
5	8,16	10,88	10,29	13,71	100,66	629
Среднее значение		10,593		13,357		575
$t = 20$ мин						
1	7,83	10,44	9,96	13,29	93,86	587
2	8,08	10,78	10,29	13,72	96,91	606
3	7,50	10,00	9,55	12,73	85,14	532
4	8,23	10,98	10,48	13,97	98,72	617
5	8,16	10,89	10,39	13,86	104,33	652
Среднее значение		10,603		13,498		596
$t = 30$ мин						
1	7,87	10,49	10,08	13,44	94,51	591
2	8,12	10,83	10,41	13,88	97,58	610
3	7,54	10,05	9,66	12,88	85,73	536
4	8,27	11,03	10,60	14,14	99,40	621
5	8,21	10,94	10,52	14,02	105,05	657
Среднее значение		10,657		13,657		600
$t = 40$ мин						
1	7,90	10,53	10,32	13,75	91,97	575
2	8,16	10,88	10,65	14,20	94,96	593
3	7,57	10,10	9,89	13,18	83,43	521
4	8,31	11,08	10,85	14,47	96,73	605

Продолжение табл. 5.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
5	8,24	10,99	10,76	14,35	102,23	639
Среднее значение		10,701		13,974		584

 $t = 50$ мин

1	7,93	10,58	10,56	14,09	84,15	526
2	8,19	10,92	10,91	14,54	86,89	543
3	7,60	10,14	10,13	13,50	76,34	477
4	8,34	11,13	11,11	14,82	88,51	553
5	8,28	11,03	11,02	14,69	93,54	585
Среднее значение		10,747		14,312		534

 $t = 60$ мин

1	7,94	10,59	10,56	14,09	85,35	533
2	8,20	10,93	10,91	14,54	88,13	551
3	7,61	10,15	10,13	13,50	77,43	484
4	8,35	11,13	11,11	14,82	89,77	561
5	8,28	11,04	11,02	14,69	94,88	593
Среднее значение		10,756		14,312		542

Частота вращения барабана $n = 17$ об/мин

Время воздействия

 $t = 10$ мин

1	7,83	10,44	9,93	13,25	94,17	589
2	8,08	10,77	10,26	13,68	97,24	608
3	7,50	10,00	9,52	12,70	85,43	534
4	8,23	10,98	10,45	13,93	99,05	619
5	8,16	10,89	10,36	13,82	104,68	654
Среднее значение		10,602		13,457		598

 $t = 20$ мин

1	7,88	10,51	10,24	13,66	91,65	573
2	8,14	10,85	10,58	14,10	94,63	591
3	7,55	10,07	9,82	13,09	83,14	520
4	8,29	11,05	10,77	14,36	96,40	602

Продолжение табл. 5.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
5	8,22	10,96	10,68	14,25	101,88	637
Среднее значение		10,674		13,875		582
$t = 30$ мин						
1	7,92	10,56	10,54	14,05	83,62	523
2	8,18	10,91	10,88	14,51	86,34	540
3	7,59	10,12	10,10	13,47	75,86	474
4	8,33	11,11	11,09	14,78	87,95	550
5	8,26	11,02	10,99	14,66	92,95	581
Среднее значение		10,732		14,278		531
$t = 40$ мин						
1	7,93	10,58	10,60	14,13	85,35	533
2	8,19	10,92	10,94	14,59	88,13	551
3	7,60	10,14	10,16	13,54	77,43	484
4	8,34	11,12	11,15	14,86	89,77	561
5	8,27	11,03	11,06	14,74	94,88	593
Среднее значение		10,745		14,357		542
$t = 50$ мин						
1	7,94	10,59	10,63	14,17	91,18	570
2	8,20	10,93	10,97	14,63	94,15	588
3	7,61	10,15	10,19	13,58	82,71	517
4	8,35	11,13	11,18	14,90	95,90	599
5	8,28	11,04	11,09	14,78	101,36	633
Среднее значение		10,756		14,397		579
$t = 60$ мин						
1	7,93	10,57	10,65	14,20	91,81	574
2	8,18	10,91	10,99	14,66	94,80	592
3	7,60	10,13	10,20	13,61	83,29	521
4	8,34	11,11	11,20	14,93	96,56	604
5	8,27	11,02	11,11	14,81	102,06	638
Среднее значение		10,737		14,423		583

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
<i>Частота вращения барабана $n = 20$ об/мин</i>						
Время воздействия $t = 10$ мин						
1	7,84	10,46	9,97	13,30	94,65	592
2	8,10	10,80	10,30	13,73	97,72	611
3	7,52	10,02	9,56	12,75	85,86	537
4	8,25	11,00	10,49	13,99	99,54	622
5	8,18	10,91	10,40	13,87	105,21	658
Среднее значение		10,623		13,512		601
$t = 20$ мин						
1	7,86	10,49	10,34	13,79	91,18	570
2	8,12	10,83	10,68	14,24	94,15	588
3	7,54	10,05	9,91	13,22	82,71	517
4	8,27	11,03	10,88	14,51	95,90	599
5	8,20	10,94	10,79	14,39	101,36	633
Среднее значение		10,653		14,012		579
$t = 30$ мин						
1	7,90	10,53	10,56	14,08	86,04	538
2	8,16	10,88	10,90	14,53	88,84	555
3	7,57	10,10	10,12	13,49	78,05	488
4	8,31	11,08	11,10	14,80	90,49	566
5	8,24	10,99	11,01	14,68	95,64	598
Среднее значение		10,703		14,301		546
$t = 40$ мин						
1	7,92	10,56	10,58	14,10	87,16	545
2	8,18	10,91	10,92	14,56	90,00	562
3	7,59	10,13	10,14	13,52	79,07	494
4	8,33	11,11	11,12	14,83	91,67	573
5	8,27	11,02	11,03	14,71	96,89	606
Среднее значение		10,734		14,326		553

Продолжение табл. 5.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
<i>t</i> = 50 мин						
1	7,95	10,60	10,61	14,15	91,97	575
2	8,21	10,94	10,96	14,61	94,96	593
3	7,62	10,16	10,17	13,56	83,43	521
4	8,36	11,15	11,16	14,88	96,73	605
5	8,29	11,06	11,07	14,76	102,23	639
Среднее значение		10,768		14,378		584
<i>t</i> = 60 мин						
1	7,97	10,63	10,64	14,19	90,71	567
2	8,23	10,98	10,99	14,65	93,66	585
3	7,64	10,19	10,20	13,60	82,29	514
4	8,39	11,18	11,19	14,92	95,40	596
5	8,32	11,09	11,10	14,80	100,83	630
Среднее значение		10,801		14,413		576
<i>Частота вращения барабана n</i> = 25 об/мин						
Время воздействия						
<i>t</i> = 10 мин						
1	7,87	10,49	10,15	13,54	91,02	569
2	8,12	10,83	10,48	13,98	93,98	587
3	7,54	10,06	9,73	12,98	82,57	516
4	8,28	11,03	10,68	14,24	95,73	598
5	8,21	10,94	10,59	14,12	101,18	632
Среднее значение		10,659		13,756		578
<i>t</i> = 20 мин						
1	7,94	10,58	10,55	14,07	82,83	518
2	8,20	10,93	10,90	14,53	85,53	535
3	7,61	10,14	10,12	13,49	75,14	470
4	8,35	11,13	11,10	14,80	87,12	545
5	8,28	11,04	11,01	14,68	92,08	575
Среднее значение		10,753		14,298		526

Продолжение табл. 5.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
$t = 30$ мин						
1	7,95	10,60	10,60	14,13	85,98	537
2	8,21	10,94	10,94	14,59	88,78	555
3	7,62	10,16	10,16	13,55	78,00	488
4	8,36	11,15	11,15	14,86	90,43	565
5	8,29	11,06	11,06	14,74	95,58	597
Среднее значение		10,768		14,358		546
$t = 40$ мин						
1	7,97	10,63	10,60	14,13	89,45	559
2	8,23	10,97	10,94	14,59	92,36	577
3	7,64	10,19	10,16	13,54	81,14	507
4	8,38	11,18	11,15	14,86	94,08	588
5	8,31	11,09	11,06	14,74	99,43	621
Среднее значение		10,798		14,357		568
$t = 50$ мин						
1	7,97	10,63	10,65	14,20	87,87	549
2	8,23	10,98	11,00	14,66	90,73	567
3	7,64	10,19	10,21	13,61	79,71	498
4	8,39	11,18	11,20	14,93	92,42	578
5	8,32	11,09	11,11	14,81	97,68	611
Среднее значение		10,802		14,426		558
$t = 60$ мин						
1	8,00	10,66	10,69	14,26	91,50	572
2	8,26	11,01	11,04	14,72	94,47	590
3	7,66	10,22	10,25	13,66	83,00	519
4	8,41	11,21	11,25	14,99	96,23	601
5	8,34	11,12	11,15	14,87	101,71	636
Среднее значение		10,832		14,484		581

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
<i>Частота вращения барабана $n = 30$ об/мин</i>						
Время воздействия						
$t = 10$ мин						
1	7,85	10,46	10,14	13,52	88,82	555
2	8,10	10,80	10,47	13,96	91,71	573
3	7,52	10,03	9,72	12,96	80,57	504
4	8,25	11,01	10,67	14,22	93,42	584
5	8,19	10,92	10,58	14,10	98,73	617
Среднее значение		10,632		13,737		564
$t = 20$ мин						
1	7,93	10,58	10,56	14,09	86,30	539
2	8,19	10,92	10,91	14,54	89,11	557
3	7,60	10,14	10,13	13,50	78,29	489
4	8,34	11,13	11,11	14,82	90,77	567
5	8,28	11,03	11,02	14,69	95,93	600
Среднее значение		10,747		14,312		548
$t = 30$ мин						
1	7,95	10,60	10,62	14,16	88,03	550
2	8,21	10,95	10,97	14,62	90,89	568
3	7,62	10,16	10,18	13,57	79,86	499
4	8,36	11,15	11,17	14,90	92,59	579
5	8,30	11,06	11,08	14,77	97,86	612
Среднее значение		10,773		14,389		559
$t = 40$ мин						
1	7,96	10,62	10,64	14,19	91,18	570
2	8,22	10,96	10,99	14,65	94,15	588
3	7,63	10,17	10,20	13,60	82,71	517
4	8,37	11,16	11,19	14,92	95,90	599
5	8,30	11,07	11,10	14,80	101,36	633
Среднее значение		10,785		14,413		579

Продолжение табл. 5.2

Номера образцов	P_T , кгс	σ_T , МПа	P_p , кгс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
$t = 50$ мин						
1	7,98	10,64	10,61	14,15	91,02	569
2	8,24	10,99	10,96	14,61	93,98	587
3	7,65	10,20	10,17	13,56	82,57	516
4	8,39	11,19	11,16	14,88	95,73	598
5	8,33	11,10	11,07	14,76	101,18	632
Среднее значение		10,812		14,378		578
$t = 60$ мин						
1	7,98	10,64	10,74	14,31	86,30	539
2	8,24	10,99	11,08	14,78	89,11	557
3	7,65	10,20	10,29	13,72	78,29	489
4	8,40	11,19	11,29	15,05	90,77	567
5	8,33	11,10	11,20	14,93	95,93	600
Среднее значение		10,814		14,543		548
<i>Частота вращения барабана $n = 34$ об/мин</i>						
Время воздействия						
$t = 10$ мин						
1	7,86	10,48	10,14	13,52	87,56	547
2	8,12	10,82	10,47	13,96	90,41	565
3	7,53	10,04	9,72	12,96	79,43	496
4	8,27	11,02	10,67	14,22	92,09	576
5	8,20	10,93	10,58	14,11	97,33	608
Среднее значение		10,647		13,741		556
$t = 20$ мин						
1	7,91	10,54	10,54	14,05	89,29	558
2	8,16	10,89	10,88	14,51	92,20	576
3	7,58	10,11	10,10	13,47	81,00	506
4	8,32	11,09	11,08	14,78	93,91	587
5	8,25	11,00	10,99	14,66	99,26	620
Среднее значение		10,712		14,275		567

Продолжение табл. 5.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
$t = 30$ мин						
1	7,93	10,58	10,70	14,26	88,19	551
2	8,19	10,92	11,04	14,72	91,06	569
3	7,60	10,14	10,25	13,67	80,00	500
4	8,34	11,12	11,25	15,00	92,75	580
5	8,27	11,03	11,16	14,88	98,03	613
Среднее значение		10,745		14,489		560
$t = 40$ мин						
1	7,95	10,61	10,61	14,15	91,97	575
2	8,21	10,95	10,96	14,61	94,96	593
3	7,62	10,17	10,17	13,56	83,43	521
4	8,37	11,16	11,16	14,88	96,73	605
5	8,30	11,06	11,07	14,76	102,23	639
Среднее значение		10,776		14,375		584
$t = 50$ мин						
1	7,97	10,63	10,63	14,17	89,76	561
2	8,23	10,97	10,97	14,63	92,68	579
3	7,64	10,19	10,19	13,58	81,43	509
4	8,38	11,18	11,18	14,90	94,41	590
5	8,32	11,09	11,09	14,78	99,78	624
Среднее значение		10,799		14,398		570
$t = 60$ мин						
1	7,98	10,64	10,72	14,29	91,97	575
2	8,24	10,98	11,07	14,76	94,96	593
3	7,65	10,20	10,28	13,70	83,43	521
4	8,39	11,19	11,28	15,03	96,73	605
5	8,32	11,10	11,18	14,91	102,23	639
Среднее значение		10,809		14,523		584

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
<i>Определение количества пропусков через минимальный межвалковый зазор вальцов</i>						
Количество пропусков $i = 1$						
1	7,84	10,46	10,15	13,54	91,97	575
2	8,10	10,80	10,48	13,98	94,96	593
3	7,52	10,02	9,73	12,98	83,43	521
4	8,25	11,00	10,68	14,24	96,73	605
5	8,18	10,91	10,59	14,12	102,23	639
Среднее значение		10,623		13,756		584
$i = 2$						
1	7,89	10,52	10,35	13,80	93,86	587
2	8,14	10,86	10,69	14,25	96,91	606
3	7,56	10,08	9,92	13,23	85,14	532
4	8,30	11,06	10,89	14,52	98,72	617
5	8,23	10,97	10,80	14,40	104,33	652
Среднее значение		10,684		14,023		596
$i = 3$						
1	7,90	10,53	10,68	14,24	94,49	591
2	8,16	10,87	11,02	14,70	97,56	610
3	7,57	10,09	10,23	13,65	85,71	536
4	8,31	11,08	11,23	14,97	99,38	621
5	8,24	10,99	11,14	14,85	105,03	656
Среднее значение		10,700		14,464		600
$i = 4$						
1	7,89	10,52	10,71	14,28	94,65	592
2	8,15	10,86	11,06	14,75	97,72	611
3	7,56	10,08	10,27	13,69	85,86	537
4	8,30	11,07	11,27	15,02	99,54	622
5	8,23	10,97	11,17	14,90	105,21	658
Среднее значение		10,689		14,512		601

Продолжение табл. 5.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
$i = 5$						
1	7,90	10,53	10,70	14,27	96,92	606
2	8,16	10,88	11,05	14,73	100,07	625
3	7,57	10,10	10,26	13,68	87,92	550
4	8,31	11,08	11,25	15,01	101,94	637
5	8,24	10,99	11,16	14,88	107,74	673
Среднее значение		10,701		14,496		615
$i = 10$						
1	7,92	10,56	10,73	14,30	96,54	603
2	8,17	10,90	11,08	14,77	99,67	623
3	7,59	10,12	10,28	13,71	87,57	547
4	8,33	11,10	11,28	15,04	101,53	635
5	8,26	11,01	11,19	14,92	107,31	671
Среднее значение		10,725		14,532		613
$i = 20$						
1	7,93	10,57	10,79	14,39	97,80	611
2	8,18	10,91	11,14	14,86	100,98	631
3	7,60	10,13	10,35	13,79	88,71	554
4	8,34	11,11	11,35	15,14	102,86	643
5	8,27	11,02	11,26	15,01	108,71	679
Среднее значение		10,736		14,621		621
<i>Определение времени воздействия ультразвуком</i>						
Время воздействия ультразвуком						
$t = 0,5$ мин						
1	7,97	10,63	10,15	13,53	83,31	521
2	8,23	10,97	10,48	13,97	86,02	538
3	7,64	10,18	9,73	12,97	75,57	472
4	8,38	11,17	10,67	14,23	87,62	548
5	8,31	11,08	10,58	14,11	92,60	579
Среднее значение		10,795		13,746		529

Продолжение табл. 5.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
$t = 1$ мин						
1	7,99	10,66	10,20	13,60	83,46	522
2	8,25	11,01	10,53	14,05	86,18	539
3	7,66	10,22	9,78	13,04	75,71	473
4	8,41	11,21	10,73	14,31	87,78	549
5	8,34	11,12	10,64	14,19	92,78	580
Среднее значение		10,83		13,821		530
$t = 2$ мин						
1	7,99	10,65	10,22	13,63	84,09	526
2	8,25	11,00	10,55	14,07	86,83	543
3	7,66	10,21	9,80	13,06	76,29	477
4	8,40	11,20	10,75	14,33	88,45	553
5	8,33	11,11	10,66	14,21	93,48	584
Среднее значение		10,821		13,845		534
$t = 3$ мин						
1	8,00	10,67	10,20	13,60	85,83	536
2	8,26	11,02	10,53	14,04	88,62	554
3	7,67	10,23	9,78	13,04	77,86	487
4	8,42	11,22	10,73	14,31	90,27	564
5	8,35	11,13	10,64	14,19	95,40	596
Среднее значение		10,843		13,82		545
<i>Определение режимных параметров смещения при активировании ТУ в шаровой мельнице</i>						
Частота вращения приводного ротора $n = 30$ об/мин						
1	7,92	10,56	10,32	13,76	86,46	540
2	8,18	10,90	10,66	14,21	89,27	558
3	7,59	10,12	9,90	13,19	78,43	490
4	8,33	11,11	10,86	14,48	90,93	568
5	8,26	11,01	10,77	14,36	96,11	601
Среднее значение		10,728		13,985		549

Продолжение табл. 5.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
$n = 45$ об/мин						
1	7,92	10,56	10,51	14,01	83,78	524
2	8,18	10,91	10,85	14,46	86,50	541
3	7,59	10,12	10,07	13,43	76,00	475
4	8,33	11,11	11,05	14,73	88,12	551
5	8,26	11,02	10,96	14,61	93,13	582
Среднее значение		10,732		14,231		532
$n = 60$ об/мин						
1	7,94	10,58	10,55	14,07	82,83	518
2	8,20	10,93	10,90	14,53	85,53	535
3	7,61	10,14	10,12	13,49	75,14	470
4	8,35	11,13	11,10	14,80	87,12	545
5	8,28	11,04	11,01	14,68	92,08	575
Среднее значение		10,753		14,298		526
$n = 75$ об/мин						
1	7,88	10,51	10,35	13,80	84,25	527
2	8,14	10,85	10,69	14,25	86,99	544
3	7,56	10,08	9,92	13,23	76,43	478
4	8,29	11,06	10,89	14,51	88,61	554
5	8,22	10,97	10,80	14,40	93,65	585
Среднее значение		10,68		14,021		535
$n = 90$ об/мин						
1	7,76	10,35	9,73	12,98	83,94	525
2	8,01	10,68	10,05	13,40	86,67	542
3	7,44	9,92	9,33	12,44	76,14	476
4	8,16	10,88	10,24	13,65	88,28	552
5	8,09	10,79	10,15	13,54	93,30	583
Среднее значение		10,512		13,187		533

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
<i>Определение режимных параметров смещения при активировании ТУ ультразвуком</i>						
Частота вращения приводного ротора $n = 30$ об/мин						
1	7,94	10,59	9,85	13,13	87,87	549
2	8,20	10,93	10,17	13,56	90,73	567
3	7,61	10,15	9,44	12,59	79,71	498
4	8,35	11,14	10,36	13,81	92,42	578
5	8,28	11,04	10,28	13,70	97,68	611
Среднее значение		10,757		13,345		558
$n = 45$ об/мин						
1	7,93	10,58	10,05	13,40	86,61	541
2	8,19	10,92	10,37	13,83	89,43	559
3	7,60	10,14	9,63	12,84	78,57	491
4	8,34	11,12	10,57	14,09	91,10	569
5	8,27	11,03	10,48	13,97	96,28	602
Среднее значение		10,746		13,61		550
$n = 60$ об/мин						
1	7,97	10,63	10,15	13,53	83,31	521
2	8,23	10,97	10,48	13,97	86,02	538
3	7,64	10,18	9,73	12,97	75,57	472
4	8,38	11,17	10,67	14,23	87,62	548
5	8,31	11,08	10,58	14,11	92,60	579
Среднее значение		10,795		13,746		529
$n = 75$ об/мин						
1	7,89	10,51	10,01	13,35	88,35	552
2	8,14	10,86	10,34	13,78	91,22	570
3	7,56	10,08	9,60	12,80	80,14	501

Продолжение табл. 5.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
4	8,29	11,06	10,53	14,04	92,92	581
5	8,23	10,97	10,44	13,93	98,21	614
Среднее значение		10,683		13,564		561

$n = 90$ об/мин

1	7,76	10,35	9,76	13,01	91,50	572
2	8,01	10,68	10,07	13,43	94,47	590
3	7,44	9,92	9,35	12,47	83,00	519
4	8,16	10,88	10,26	13,68	96,23	601
5	8,10	10,79	10,18	13,57	101,71	636
Среднее значение		10,513		13,215		581

Определение режимных параметров смещения при активировании ТУ посредством трехкратного пропускания через межвалковый зазор валцов

Частота вращения приводного ротора

$n = 30$ об/мин

1	7,81	10,41	10,45	13,93	89,61	560
2	8,06	10,75	10,79	14,38	92,52	578
3	7,48	9,98	10,01	13,35	81,29	508
4	8,21	10,95	10,99	14,65	94,24	589
5	8,14	10,86	10,90	14,53	99,61	623
Среднее значение		10,574		14,15		569

$n = 45$ об/мин

1	7,86	10,48	10,78	14,37	93,70	586
2	8,12	10,82	11,13	14,84	96,75	605
3	7,53	10,05	10,33	13,77	85,00	531
4	8,27	11,02	11,34	15,11	98,55	616
5	8,20	10,93	11,24	14,99	104,16	651
Среднее значение		10,648		14,6		595

Продолжение табл. 5.2

Номера образцов	P_T , кГс	σ_T , МПа	P_p , кГс	σ_p , МПа	Δl , мм	ϵ , %
$n = 60$ об/мин						
1	7,90	10,53	10,96	14,61	94,49	591
2	8,16	10,87	11,31	15,09	97,56	610
3	7,57	10,09	10,50	14,00	85,71	536
4	8,31	11,08	11,53	15,37	99,38	621
5	8,24	10,99	11,43	15,24	105,03	656
Среднее значение		10,7		14,845		600
$n = 75$ об/мин						
1	7,86	10,48	10,59	14,11	85,04	531
2	8,12	10,82	10,93	14,57	87,80	549
3	7,54	10,05	10,15	13,53	77,14	482
4	8,27	11,02	11,13	14,84	89,44	559
5	8,20	10,93	11,04	14,72	94,53	591
Среднее значение		10,65		14,34		540
$n = 90$ об/мин						
1	7,82	10,42	10,51	14,02	74,17	464
2	8,07	10,76	10,85	14,47	76,59	479
3	7,49	9,99	10,08	13,43	67,29	421
4	8,22	10,96	11,06	14,74	78,01	488
5	8,15	10,87	10,97	14,62	82,45	515
Среднее значение		10,587		14,24		471

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	3
1.1. Производство и потребление полимерных материалов	3
1.1.1. Рынок производства и потребления полиэтилена	10
1.1.2. Рынок производства и потребления полипропилена	12
1.2. Классификация отходов полимеров	13
1.3. Модификация вторичного полимерного сырья	19
1.3.1. Методы модификации вторичного полимерного сырья	19
1.3.2. Классификация наполнителей для полимерных материалов	22
1.3.3. Методы совмещения наполнителя со связующим	26
1.3.4. Механическая активация наполнителей полимерных материалов	29
1.3.5. Процесс смешения наполнителя и полимерного связующего	30
1.3.6. Критерии оценки качества процесса получения полимерных композиций	32
1.4. Постановка задачи исследования	32
2. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА МОДИФИКАЦИИ ОТХОДОВ ТЕРМОПЛАСТОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ	34
2.1. Процесс модификации отходов полиэтилена высокого давления техническим углеродом	34
2.2. Описание экспериментальной установки	34
2.2.1. Описание и характеристики смесителя	34
2.2.2. Принцип работы смесителя	37
2.2.3. Разработанные рабочие органы различной конфигурации	37
2.3. Объект исследования	39
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВВЕДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ВО ВТОРИЧНЫЙ ПОЛИМЕРНЫЙ МАТЕРИАЛ	42
3.1. Методика проведения эксперимента	42
3.1.1. Определение показателя текучести расплава полученного композиционного материала	42
3.1.2. Определение предела текучести, прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве модифицированного вторичного полиэтилена	43
3.1.3. Оценка однородности полученного композиционного материала ...	45
3.2. Исследование свойств вторичного полиэтилена высокого давления, модифицированного техническим углеродом марки К-354	46
3.2.1. Сравнение деформационного воздействия, оказываемого на композит рабочими органами с различной геометрией фигурной части	47

3.2.2. Определение оптимального технологического режима процесса получения композиционного материала на основе ВПВД и ТУ с высокими физико-механическими характеристиками	53
3.2.3. Сравнение физико-механических характеристик модифицированного и немодифицированного вторичного и первичного полиэтилена высокого давления	63
3.2.4. Выбор способа активирования вводимого технического углерода	66
3.2.5. Сравнение физико-механических характеристик ВПВД, модифицированного техническим углеродом, активированным различными способами	73
4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ КАЧЕСТВА	78
4.1. Определение суммарной величины сдвига $\gamma_{\text{сум}}$ в зонах деформации смесительных устройств (овальные рабочие органы)	78
4.1.1. Первый метод	78
4.1.2. Второй метод	92
4.1.3. Сравнительный анализ двух методов определения суммарной величины сдвига в рабочих пространствах двухроторных смесителей с овальными рабочими органами	93
4.2. Определение суммарной величины сдвига $\gamma_{\text{сум}}$ в зонах деформации смесительных устройств (гладкие рабочие органы)	94
4.2.1. Определение суммарной величины сдвига $\gamma_{\text{в}}$ при периодическом режиме процесса вальцевания термопластов	96
4.2.2. Определение суммарной величины сдвига в зазорах между стенкой смесительной камеры и цилиндрическими рабочими органами $\gamma_{\text{лц}}$ и $\gamma_{\text{пц}}$	98
4.3. Определение суммарной величины сдвига $\gamma_{\text{сум}}$ в зонах деформации смесительных устройств (рифленные рабочие органы)	99
4.4. Определение суммарной величины сдвига $\gamma_{\text{сум}}$ в зонах деформации смесительных устройств (винтовые многозаходные рабочие органы)	101
5. МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА МОДИФИКАЦИИ ОТХОДОВ ТЕРМОПЛАСТОВ НА СМЕСИТЕЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ	102
5.1. Расчет основных параметров процесса и оборудования по первому варианту (модернизация оборудования)	102
5.2. Расчет основных параметров процесса и оборудования по второму варианту (проектирование нового оборудования)	106
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	107
ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	109
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	110
ПРИЛОЖЕНИЯ	118

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**КЛИНКОВ Алексей Степанович,
СОКОЛОВ Михаил Владимирович,
ОДНОЛЬКО Валерий Григорьевич,
БЕЛЯЕВ Павел Серафимович**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СМЕСИТЕЛЕЙ
ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ
ПРИ ПОЛУЧЕНИИ КОМПОЗИТОВ ЗАДАННОГО
КАЧЕСТВА ИЗ ОТХОДОВ ТЕРМОПЛАСТОВ**

Редактор З.Г. Чернова
Инженер по компьютерному макетированию И.В. Евсеева

Сдано в набор 10.02.2012 г.

Подписано в печать 20.03.2012 г. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,39. Уч.-изд. л. 10,3

Тираж 400 экз. Заказ № 111

ООО «Издательский дом «Спектр»,
119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1

[Http://www.idspektr.ru](http://www.idspektr.ru). E-mail: idspektr@rambler.ru

Подготовлено к печати и отпечатано в Издательско-
полиграфическом центре ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14

По вопросам приобретения книги обращаться
по телефону 8(4752)638108

E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru

ISBN 978-5-904270-99-5



9 785904 270995