

**В. В. Пятов
А. Н. Голубев**

ЭКСТРУЗИЯ ПЛАСТИЧНО-ВЯЗКОЙ СРЕДЫ

Монография

Витебск
2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

В. В. Пятов
А. Н. Голубев

ЭКСТРУЗИЯ ПЛАСТИЧНО-ВЯЗКОЙ СРЕДЫ

Монография

Витебск
2018

УДК 621.762.4

ББК 34.39

П 76

Рецензенты:

член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук
Рубаник В.В.;

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Технология текстильных материалов» учреждения образования
«Витебский государственный технологический университет»
Рыклин Д.Б.

Рекомендовано к изданию Советом УО «ВГТУ»,
протокол № 2 от 23.10.2018.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом
УО «ВГТУ», протокол № 8 от 05.11.2018.

Пятов, В. В.

П 76 Экструзия пластично-вязкой среды : монография / В. В. Пятов,
А. Н. Голубев. – Витебск: УО «ВГТУ», 2018. – 212 с.

ISBN 978-985-481-580-0

В монографии обобщены многолетние научные исследования, позволившие разработать систему автоматизированного проектирования силовых шнековых машин для формования пластичных материалов. Описаны теоретические и экспериментальные исследования процесса деформации необратимо сжимаемых сред и методики измерения физических и технологических характеристик таких материалов.

Для научных сотрудников и инженерно-технических работников, занимающихся расчетом и проектированием шнековых машин.

Может быть полезной для студентов в качестве учебного материала при изучении курсов по автоматизированному проектированию изделий, технологической оснастки и оборудования.

УДК 621.762.4
ББК 34.39

ISBN 978-985-481-580-0

© УО «ВГТУ», 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. Состояние теории и технологии шнековой экструзии.....	7
1.1 Физические модели деформируемой среды	8
1.2 Уплотнение пластично-вязкой среды шнеком	11
1.3 Деформация материала формующим инструментом	13
1.4 Технология экструзии пластично-вязких сред.....	14
1.5 Технологические свойства формуемых материалов	24
Глава 2. Теоретическое исследование процесса экструзии	28
2.1 Анализ процесса уплотнения среды в канале шнека.....	29
2.2 Распределение напряжений в поперечном сечении канала	31
2.3 Экструзия уплотненной среды.....	33
2.4 Экструзия композиционных материалов	37
2.5 Термодинамика шнековой экструзии.....	41
Глава 3. Основы расчета шнековых машин	54
3.1 Расчет шнека	54
3.2 Энергосиловые расчеты.....	65
3.3 Теплотехнические расчеты.....	70
3.4 Расчет допустимых скоростей вращения шнека	76
3.5 Расчет контейнера	78
Глава 4. Технологические свойства формуемых сред.....	80
4.1 Триботехнические свойства	81
4.2 Реологические свойства	98
4.3 Уплотняемость среды	104
Глава 5. Экспериментальное исследование шнековой экструзии...110	
5.1 Скоростной режим формования	110
5.2 Окружное проскальзывание среды в шнековой машине ...	116
5.3 Экструзия полимерных композиций	119
Глава 6. Основы проектирования техпроцессов и оборудования ...124	
6.1 Проектирование формующего инструмента	125
6.2 Проектирование привода и опорных узлов	129

6.3	Основы проектирования технологических процессов	130
6.4	Основы проектирования шнековых машин.....	136
Глава 7. Перспективы развития экструзионного формования.....		140
7.1	Производство фасонных длинномерных изделий	141
7.2	Изготовление высокопористых материалов.....	149
7.3	Создание новых композиционных материалов.....	151
7.4	Нанесение покрытий	162
7.5	Экструзия проволоки и шнуров	166
7.6	Комбинированные методы формования	171
7.7	Модернизация формующего инструмента	179
7.8	Автоматизация процесса экструзии	187
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....		188
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ		190

ВВЕДЕНИЕ

Экструзия – традиционный метод формования вязких жидкостей. Горячая масса пуансоном или шнеком продавливается через фильеру, затем материал охлаждается и застывает. Технология хорошо освоена химической [1–2] и электротехнической [3] промышленностью.

Экструзия твердых измельченных материалов изучена хуже. Выдавливанием пластифицированных керамических и металлических порошков формуют длинномерные изделия разного профиля – фильтры, теплообменники, шнуры и проволоку для нанесения покрытий [4]. Освоены технологии шнековой переработки отходов гальванических [5] и обувных [6–10] производств.

В промышленности существует устойчивый спрос на разнообразные шнековые машины. Разработкой экструзионных технологий и оборудования занимаются ученые Витебского государственного технологического университета, которыми за последние 30 лет спроектировано, изготовлено и поставлено заказчикам около 30 уникальных шнековых машин [11–41] различного назначения.

Проектирование экструзионных технологий и шнекового оборудования до недавнего времени осуществлялось на основе накопленного разработчиками опыта, так как научно обоснованные методики выполнения конструкторских расчетов отсутствовали. Процесс разработки нового оборудования был весьма затратным из-за необходимости трудоемких технологических испытаний с последующими многократными доработками несовершенной изначально конструкции. Кроме того, накопленный учеными и конструкторами опыт постепенно уходит вместе с ними. Его, в отличие от знаний, очень трудно передать новым поколениям.

В связи с этим перед нами была поставлена задача [41] – разработать систему автоматизированного проектирования силовых шнековых машин, способную обеспечить удовлетворительный результат даже в руках неопытного в вопросах конструирования пользователя. На входе системы будут эксплуатационные и геометрические свойства изделия (требования заказчика), а также физические и технологические свойства формуемой среды (главным образом реологические и трибологические характеристики). На выходе система должна выдавать готовую конструкторскую и технологическую документацию (расчеты и чертежи), необходимую для создания нового технологического процесса и оборудования.

В представленной монографии обобщены многолетние научные исследования, позволившие создать систему автоматизированного проектирования силовых шнековых машин, формирующих измельченные пластичные материалы. Описаны теоретические и экспериментальные

исследования процесса деформации необратимо сжимаемых сред и методики измерения необходимых характеристик формуемого материала.

Витебский государственный технологический университет

Глава 1. Состояние теории и технологии шнековой экструзии

Исторически сложилось так, что теория и технология шнековой экструзии независимо развивалась в разных отраслях народного хозяйства. Большой вклад в разработку шнековых устройств был сделан в пищевой промышленности, где они традиционно используются для транспортировки, измельчения и отжима разнообразных продуктов (например, набивки колбас).

Значительная часть исследований по шнековому формованию была выполнена учеными, работающими в химической промышленности, где червячные прессы [42], снабженные экструзионным инструментом [43], успешно используют для формования расплавленных или измельченных термопластичных полимеров. Аналогичное оборудование применяют энергетики и связисты при нанесении пластмассовой или резиновой изоляции на провод и кабель.

Экструзию давно используют в строительной промышленности для формования керамических дренажных [44] и канализационных [45] труб, глиняного кирпича [46] и многих других стройматериалов. Изделия из более тонкой технической керамики тоже получают шнековой экструзией [47]. В порошковой металлургии экструзией формуют твердые сплавы [48], тугоплавкие металлы и жаропрочные соединения [49]. Мундштучным выдавливанием получают изделия из жестких ферритовых и мягких металлических [50] порошков. Таким образом, области применения экструзии весьма разнообразны.

Научные публикации, посвященные научным и технологическим проблемам экструзии, начали появляться в первой половине прошлого века и были обобщены в фундаментальном труде [51]. Использование спеченных твердых сплавов для изготовления режущего инструмента произвело тогда революцию в металлообработке [52]. Применение пластификаторов позволило разработать технологию экструзии жестких керамических порошков [53]. Заметной вехой в теории и технологии твердых сплавов стала монография [54], обобщающая достижения в этой области.

Успехи твердосплавной промышленности стимулировали применение холодной экструзии для формования и других сыпучих сред. Так, был разработан процесс прессования жестких ферритовых порошков [55], заключающийся в экструзии порошка, пластифицированного поливиниловым спиртом или парафином [56].

Все упомянутые выше порошки в чистом виде очень плохо прессуются и использование при их формовании связующе-пластифицирующих добавок представляется естественным. Однако и

при экструзии сравнительно мягких металлических порошков тоже часто прибегают к пластификации [57]. Освоены технологии формования титановых сварочных электродов [58], алюминиевых [59-60] и бронзовых [61] изделий, фильтров из нержавеющей стали [62] и разнообразных псевдосплавов [63]. Можно утверждать [64], что правильная пластификация позволяет прессовать любые порошковые среды.

1.1 Физические модели деформируемой среды

Формуемые экструзией высоконаполненные пластичные композиции состоят из трех радикально различающихся по составу и свойствам фаз: твердых частиц основной фазы, мягкого или вязкого жидкого пластификатора и газовой фазы. В научных публикациях встречаются следующие способы описания процесса деформации таких многофазных пористых сред.

1. Пластичная измельченная среда ассоциируется с вязкой жидкостью. Так как это неньютоновская жидкость [65], то рассматривают различные реологические модели: от простого тела Бингама-Шведова до весьма сложных комбинаций [66–67]. Наиболее простую классификацию вязких жидкостных систем предложил Додж [68]. По этой классификации жидкости бывают вязкими, с нестационарными реологическими характеристиками и упруго-вязкими. К первой группе относятся ньютоновские жидкости с линейной кривой течения, бингамовские вязко-пластичные среды и аномально-вязкие реологические системы с нелинейной кривой течения. Пластифицированные порошки по своим реологическим свойствам ближе всего к аномально-вязким средам.

Различают псевдопластичные и дилатантные аномально-вязкие системы. Псевдопластичностью обладают суспензии с асимметричными частицами; дилатансия характерна для паст и суспензий с большим содержанием твердой фазы. Для аномально-вязких псевдопластичных систем предложено большое количество реологических моделей, но наибольшее распространение получила степенная модель Оствальда-Рейнера [69], принципиальным недостатком которой является зависимость коэффициентов, определяющих течение среды, от ее температуры [70]. Принцип температурной инвариантности основных реологических характеристик среды сначала был предложен А. Александровым и Ю. Лазуркиным [71], а затем и более подробно исследован Г. Виноградовым, А. Малкиным [72] и В. Каргиным [73].

Пластифицированные порошковые среды также подвергались реологическим исследованиям. Установлено, что такие материалы

являются пластично-вязкими телами. Измерены их вязкость и предел текучести, изучено поведение в условиях сдвига и определены основные закономерности экструзии. Хорошее совпадение результатов теоретических и экспериментальных исследований получено лишь для материалов, содержащих жидкие растворы неорганических пластификаторов, например, бентонитовой глины с водой. Изучение таких смесей представляет чисто теоретический интерес, так как мягкие прессовки не сохраняют форму и деформируются под собственным весом. Сделан вывод о неприменимости гидродинамической аналогии при описании деформации пластифицированных металлических и керамических порошков [74].

Была предпринята попытка построить математическую модель, адекватно описывающую деформацию необратимо уплотняемых сред. Металлические порошки в этой модели считают вязко-пластичными телами, лишенными упругих свойств. Состояние таких сред определяется температурой, пористостью и параметрами упрочнения. Однако влияние пластификатора на реологию смеси в этом исследовании осталось неизученным [75].

Корректно построенная модель процесса экструзии пластичной среды должна оперировать коэффициентами, инвариантными к напряжениям и скоростям деформации материала; в этом случае возможно проведение аналитических преобразований. Для жидкостей таким коэффициентом, в известных пределах, является вязкость. В гидродинамической же модели аналог вязкости зависит от многих параметров процесса течения, в том числе и от давления.

Математический аппарат гидродинамики хорошо развит для несжимаемых жидкостей, а вязко-пластичные среды, формируемые экструзией, способны к необратимому уплотнению, продолжающемуся до тех пор, пока пластификатор не займет все свободное пространство и газовая фаза полностью не исчезнет. Поэтому гидродинамическая аналогия для описания процесса деформации таких материалов, вообще говоря, неприменима.

2. Известны попытки применения уравнений механики деформируемого твердого тела для описания течения сжимаемых сред. Основанием для этого является наличие у таких материалов небольшой прочности, возрастающей при уплотнении, что объясняется связующими свойствами пластификатора. Модель среды в этом случае строится с использованием таких ее характеристик, как предел текучести, предел упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент трения. Эти параметры, оставаясь постоянными в известных пределах для литых металлов, являются сложными функциями напряженного состояния для необратимо сжимаемых порошков, из-за чего проведение аналитических преобразований, вообще говоря, оказывается невозможным [76].

Следует выделить случай, когда материал, подвергаемый экструзии, уплотнен до компактного состояния (сжат так, что газовая фаза полностью исчезла и пластификатор занял все свободное пространство). Свойства среды в таком состоянии стабилизируются, предел текучести перестает зависеть от напряжений, связь между нормальными и касательными напряжениями на поверхности трения близка к линейной. Отмечается, что для уплотненной до такой степени композиции применимы уравнения деформации неупрочняемого литого металла, но со специфическими граничными условиями [77].

В теории обработки металлов давлением касательные напряжения на поверхности деформации часто считают не зависящими от нормальных напряжений или зависящими линейно. И в том, и в другом случае используемые для описания деформации характеристики среды считаются инвариантными к напряжениям в широком интервале давлений, что уводит от реальности, но позволяет решать уравнения течения. Иногда даже удается получить хорошее совпадение результатов теоретических и экспериментальных исследований, вовсе пренебрегая внешним трением. Это объясняется тем, что при прессовании литых металлов большая часть энергии деформации затрачивается на изменение формы, на внутреннее трение. Поэтому закон внешнего трения для таких прочных сред не особенно и важен.

Пластифицированный порошок, даже спрессованный до несжимаемого состояния, имеет пределы текучести и прочности на два-три порядка меньше, чем литой металл. Это приводит к перераспределению энергозатрат между внутренним и внешним трением при деформации среды в пользу последнего. Поэтому неточность в задании граничных условий при формовании сыпучих сред приводит к потере адекватности моделью, построенной по аналогии с литым металлом. Можно сделать вывод: для измельченных сред, подвергаемых экструзии, очень важно правильно задать закон внешнего трения.

3. Общая теория уплотнения порошковых сред пока не создана. В ее основе должна лежать зависимость плотности среды от напряженного состояния [78], опирающаяся на инвариантные к напряжениям параметры. Разнообразие порошков делает построение общей теории чрезвычайно сложной задачей [79].

Предприняты попытки решения более простой задачи по отысканию связи между плотностью среды и давлением в ней при равномерном всестороннем сжатии [80]. Получены многочисленные уравнения прессования [81–82], имеющие ограниченные области применения. Универсальной зависимости даже для простого случая равномерного всестороннего сжатия не обнаружено.

М. Ю. Бальшин, Г. М. Жданович и О. В. Роман приняли в качестве модели дискретную среду, представляя ее в виде шероховатых

шаров, материал которых подчинен только закону Гука [83]. Основные задачи пластичности и контактной прочности из-за математических трудностей были только сформулированы и в общем случае не решены. Даже для таких упрощенных моделей при выводе уравнений прессования часто не учитываются столь важные факторы, как скорость деформации среды и трение на ее поверхности.

В порошковой металлургии обычно используют такие характеристики среды, как коэффициенты внешнего и межчастичного трения, коэффициент бокового давления. У пластифицированных порошков они не только сильно зависят от напряжений, но и зависят нелинейно [84]. Для построения теории деформации таких сред необходимо найти инвариантные к напряжениям характеристики.

Таким образом, пластифицированный порошок по своим физическим и технологическим свойствам существенно отличается от вязких жидкостей, литых металлов и чистых классических порошковых сред. Теория деформации таких сред пока не построена. Внешнее трение пластифицированного порошка не может быть описано с помощью линейного закона Кулона-Амонтона из-за сильной зависимости коэффициентов трения и бокового давления от вида напряженного состояния и величины действующих напряжений.

1.2 Уплотнение пластично-вязкой среды шнеком

Наиболее полно теория уплотнения материала, проходящего по каналу шнека, изложена в монографии [85]. Однако в этом исследовании, в связи с большими математическими трудностями, возникающими при общем анализе процесса уплотнения необратимо сжимаемой среды, постановка задач сделана с такими сильными допущениями, которые вообще ставят под сомнение адекватность полученных результатов. Сделанные допущения позволили на основе уравнений термодинамики математически описать процессы выдавливания, отжима, смешивания и транспортировки вязких полужидких материалов (например, мясного фарша) шнеком.

Исследована кинематика и энергетика изотермического и адиабатического процессов экструзии в условиях простого и сложного сдвига материала. Однако процесс разогрева деформируемой среды и формирующего инструмента в условиях конвективного теплообмена с окружающей средой не рассмотрен. Полученные соотношения сложны и насыщены коэффициентами, физический смысл и методика измерения которых не описаны. Из-за этого полученные результаты вряд ли могут быть использованы на практике, хотя для теории они и представляют определенный интерес.

Целесообразно рассматривать процесс уплотнения материала в канале шнека как изменение фазового соотношения композиции на макроскопическом уровне, характеризуя его массовыми или объемными долями. При этом необходимо учитывать возможность образования скелета твердой фазы в процессе сжатия [86], резко изменяющего технологические свойства среды и останавливающего ее дальнейшее движение.

Уравнение ламинарного течения сжимаемого материала получено при таких допущениях: винтовой канал заменен призматическим, а поверхность цилиндра – плоскостью; поверхность цилиндра движется под углом к направлению оси канала; материал движется под действием напряжений сдвига, которые возникают при относительном перемещении цилиндра и канала; концевые эффекты и наличие вертикальной компоненты скорости не учитываются. Такие допущения сводят задачу к одномерной [87].

Однако даже при столь сильных упрощениях в результате преобразований получено уравнение, аналитическое решение которого оказалось невозможно. Для продолжения анализа сделано еще одно допущение чисто математического характера о независимости функции от некоторых аргументов, причем физический смысл допущения не выяснен. Вряд ли после такого приема можно рассчитывать на адекватность полученных результатов. Однако с методической точки зрения, особенно в части постановки задачи, этот анализ интересен.

Обычно, анализируя деформацию материала в канале шнека, ограничиваются рассмотрением процессов его уплотнения и выдавливания. Однако некоторые исследователи отмечают, что не менее важны процессы загрузки материала в шнек и начало транспортировки в его первых витках. Давление в зоне загрузки очень мало по сравнению с давлением прессования, но им нельзя пренебрегать: ведь этот параметр задают в качестве граничного условия при исследовании напряженно-деформированного состояния в канале шнека [88]. Свободная транспортировка сыпучего материала в канале шнека – сложный процесс. Описанию движения материальной частицы по винтовой линии посвящены труды теоретиков [89–90] и технологов [91–92]. Основным недостатком таких физических моделей является отсутствие учета стесненного движения частиц в пространстве канала, их взаимодействия и противодействия. Это порождает путаницу между коэффициентами заполнения канала и производительности, которые совпадают лишь при отсутствии противодействия [93].

Процесс заполнения шнекового канала существенным образом зависит от вида применяемого в формующем устройстве дозирования. Различают весовое и объемное дозирование; первое точнее, а второе проще и поэтому применяется чаще [94]. При объемном дозировании продукт подается из загрузочного бункера в приемную зону шнека

лишь под действием собственного веса. Продолжительность операции заполнения канала зависит от подвижности сыпучего материала и геометрических особенностей зоны загрузки шнека. Последний фактор формализуется особенно трудно.

Усилие червячного пресса, необходимое для формирования пластично-вязких сред, может быть рассчитано при следующих допущениях [95]: напряжения сдвига в материале по всему сечению канала превышают предел текучести композиции; вязкость среды не зависит от давления и, следовательно, постоянна по всей длине канала (авторы делают оговорку, что такое упрощение допустимо только для зоны дозировки под бункером, а затем применяют его и для всего шнека); уплотнение материала осуществляется в изотермических условиях; материал полностью прилипает к поверхностям цилиндра и канала шнека (это справедливо только для жидкостей). Такие допущения сводят задачу решения уравнения неизотермического движения неньютоновской жидкости

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \eta \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial V_z}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (1)$$

к решению более простого уравнения

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \eta \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2}. \quad (2)$$

Мощность, потребляемая при работе экструдера вращающимся шнеком, может быть определена как сумма мощностей тепловыделения и потенциальной энергии потока [96]. Для вязкоупругой среды функция диссипации усложняется, что приводит к громоздким выражениям. Отмечено, что главным недостатком шнекового формования является высокая энергоемкость, которая поддается, при наличии хорошей математической модели процесса, некоторой оптимизации.

1.3 Деформация материала формирующим инструментом

Процесс экструзии порошковых сред независимо исследован Ю. Г. Дорофеевым [97–98] и М. С. Ковальченко [99]. Отмечается, что при анализе энергетических затрат процесс горячей экструзии целесообразно разбить на четыре этапа [100]: свободная подача сыпучего или выдавливание пластичного материала из контейнера, его уплотнение пуансоном, этап установившейся экструзии и перемещение порошка относительно стенок контейнера. Сделан вывод: на начальном этапе прессования работа в основном затрачивается на уплотнение

порошковой среды, а после завершения этого процесса – на ее экструзию.

Процесс мундштучного выдавливания пористой среды через сужающуюся коническую матрицу исследован методом конечных элементов. Решены задачи для неустановившейся [101] и установившейся [102–103] экструзии. Кроме того, приближенное решение задачи для установившегося процесса экструзии получено также методом тонких сечений [104]. Однако эти расчеты основаны на теории пластичности сплошных беспористых твердых сред [105–106], не учитывающей особенностей уплотнения порошковых материалов.

Альтернативный подход к решению этой же задачи основан на концепции поверхности нагружения и ассоциированном законе течения. Теоретический расчет был проверен экспериментально, совпадение результатов признано удовлетворительным. Однако такой подход вряд ли допустим при исследовании процессов деформации пластифицированных порошков и других несвязных высокопластичных сред – слишком сильно они отличаются по своим физическим свойствам от уже спеченных пористых материалов [107].

Экструзия пластичной среды через пространство цилиндр – конфузор – цилиндр исследована в работе [108]. Теоретически найдена зависимость между расходом и перепадом давления в направлении экструзии. В предположении полной несжимаемости материала решена стационарная задача о выдавливании труб [109–110]. Попыток решения задачи об уплотнении сжимаемой среды и нестационарной задачи не предпринималось. Осталась не исследованной и термодинамика процесса экструзии.

Таким образом, общая теория экструзии сжимаемых несвязных сред пока не создана. В разных отраслях промышленности, использующих экструзию для формования изделий, решены некоторые сильно упрощенные частные задачи.

Основная проблема, затрудняющая теоретическое исследование процесса экструзии пластичных сжимаемых сред, – отсутствие адекватных физических и математических моделей, описывающих поведение материала в процессе его деформации шнеком и формующим инструментом. Важными составляющими этих моделей представляются триботехническая и реологическая модели среды, необходимые для задания граничных условий при решении краевых задач теории упругости, пластичности и теплопроводности.

1.4 Технология экструзии пластично-вязких сред

Экструзией формуют самые разные материалы: керамику,

тугоплавкие металлы, нержавеющие и инструментальные стали, железоникелевые сплавы, карбид вольфрама. Формованием пластифицированных порошков получают изделия сложной формы с хорошими механическими свойствами: корпуса часов, детали вычислительной и медицинской техники. Несмотря на большую усадку, возможно получение точных размеров и высокой плотности [111–112].

К пластификатору предъявляются жесткие требования. Кроме связующих, пластифицирующих и смазывающих свойств он должен быть дешевым и недефицитным, хорошо перемешиваться с порошком и легко извлекаться из прессовок, не препятствовать процессу спекания и не загрязнять готовых изделий. Применяют неорганические и органические пластификаторы.

Неорганические пластификаторы используют при формовании тугоплавких соединений. Освоен процесс мундштучного прессования порошка дисилицида молибдена, пластифицированного бентонитовой глиной [113]. Такая глина состоит из 65 % SiO_2 , 20 % Al_2O_3 и 15 % H_2O ; ее концентрация в материале составляет 4–10 %. Недостатком неорганических пластификаторов является невозможность их удаления из прессовки. Они сильно загрязняют изделие, что ограничивает область применения таких добавок. К тому же надо считаться с химической активностью некоторых неорганических веществ. Неорганические пластификаторы в порошковой металлургии не применяют.

Значительно удобнее работать с органическими веществами. Изучены и описаны разные органические пластификаторы: воск, парафин, поливиниловый спирт, раствор синтетического каучука в бензине, полиэтилен и его оксид, растворы поливинилацетата в ацетоне и метакрилата в трихлорэтаноле, полиэтиленгликоль, раствор диатанагаминоэтилового эфира, алкилен янтарной кислоты, крахмальный клейстер, тефлон и стеарат, этиленстеарамид, поливинилбутирол, сульфитно-спиртовая барда, меласса, препарированная каменноугольная смола и другие вещества [114–115].

Выбор основы для шликера или пластификатора чрезвычайно важен, поскольку эти вещества могут сильно загрязнить материал газами и углеродом при спекании. Исследовано влияние трех распространенных пластификаторов на газосодержание никелевых сплавов. Установлено, что поливиниловый спирт и полиизобутилен в меньшей степени загрязняют материал, чем камфара, которая, однако, позволяет получать более прочные заготовки [116].

Другие исследователи отмечают, что поливиниловый спирт не приводит к увеличению содержания кислорода в никелевых сплавах при спекании в вакууме и лишь незначительно загрязняет сплав углеродом [117]. При выборе пластификатора следует соблюдать ряд условий. Он не должен реагировать с керамической и металлической фазами при

спекании, должен легко удаляться из прессовки, не вносить примесей и способствовать получению более плотных изделий. Поэтому исключается применение универсального пластификатора, пригодного для всех материалов.

Составы некоторых термопластичных пластификаторов, используемых при формовании металлических порошков, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Составы термопластичных связок (массовая доля, %)

Парафин	Олеиновая кислота	Пчелиный воск	Стеариновая кислота
95	5	0	0
97	0	0	3
94	0	6	0

Хорошо зарекомендовали себя касторовое масло, олеиновая и стеариновая кислоты, а также воск. Добавка воска обеспечивает снижение вязкости шликера и улучшает литейные свойства [118].

Свойства шликера существенно влияют на упаковку частиц в прессовке. Влияние количества и состава пластификатора на величину коэффициента упаковки частиц порошка с размером частиц менее 1 мкм показано в таблице 2.

Таблица 2 – Значения объемной доли пластификатора в шликере и коэффициента упаковки керамических частиц в заготовках

Пластификатор	Объемная доля пластификатора, %	K_y
Парафин – канифоль	48	0,26
Парафин	44	0,28
Парафин – олеиновая кислота	43	0,29
Парафин – касторовое масло	40	0,30
Парафин – воск	34	0,39

Долгое время при мундштучном прессовании в качестве пластификатора использовался крахмал. Сейчас ему найдена замена – полиакриламид. Раствор этого вещества по свойствам близок к крахмальному клейстеру, а по цене – вдвое дешевле. Применять полиакриламид можно не для всех порошков. Он окисляет порошки на основе железа, а протекающая при этом химическая реакция лишает его пластифицирующей способности. Перспективно также применение поливинилового спирта и сульфата целлюлозы [119–120].

Из органических пластификаторов наиболее универсальным является парафин. Он не дефицитен и обладает хорошей связующей способностью. Парафин давно используют в твердосплавной промышленности. Формовать с парафином можно любые материалы,

так как он химически инертен [84]. Эффективность парафина увеличивают применением поверхностно-активных веществ. Исследовано влияние олеиновой, пальмитиновой и стеариновой кислот. Отмечается, что добавка 1 % любой из этих кислот на каждые 5 % парафина снижает давление прессования на 10 МПа. Другими словами, 1 % поверхностно-активных веществ заменяет 2–3 % пластификатора [121]. Количество ПАВ, необходимое для плакирования всех частиц порошка мономолекулярным слоем, найдено в работе [122].

Пластификация порошка – важная операция, влияющая на качество заготовок, получаемых экструзией. Технологические свойства материала зависят не только от состава пластификатора и его концентрации в порошке, но также от способа введения этой добавки. Количество пластификатора в порошке может достигать по объему 50 %, на качестве изделий это практически не отражается [123].

При производстве твердосплавных спиральных изделий (сверл, фрез и разверток) методом мундштучного прессования порошок пластифицируют следующим образом. В него добавляют 6–15 % мас. парафина в виде мелкой стружки, затем массу нагревают до температуры 80–120 °С и перемешивают. После этого ее продавливают через мундштук или многоканальную фильеру для гомогенизации и спрессовывают в цилиндрические брикеты. Пресс-форму нагревают до температуры 35–40 °С, а экструзию осуществляют со степенью обжата 94–99 %. При использовании в качестве пластификатора парафина давление истечения оказалось минимальным [124].

Пластификация тугоплавких соединений исследована на порошке карбида циркония. Пластификатор состоял (по массе) из 40 % парафина, 40 % воска и 20 % олеиновой кислоты. Его содержание варьировалось в пределах 34–45 % (по объему). При меньшем содержании пластификатора экструзия не идет, а при большем возникают проблемы с его удалением. После введения пластификатора и гомогенизации смеси получался материал, пригодный для экструзии [125].

Способ пластификации порошков предложен и белорусскими учеными. Железный порошок ПЖ2М4 с размером частиц 100 мкм смешивали со стеаратом цинка в процессе размолла. Качество пластификации было выше, чем при введении наполнителя в предварительно размолотый порошок [126].

Для получения проницаемых пористых изделий в порошок или прессовку иногда вводят специальный наполнитель. Так, при изготовлении стальных фильтров, осуществляют пропитку материала синтетическим церезином в вакууме. Возможна пропитка материала и легкоплавким металлом [127].

Как метод переработки полимерных материалов экструзия впервые была применена в середине позапрошлого столетия для покрытия медных проводов изоляцией из гуттаперчи. Для этой цели

использовали плунжерные экструдеры циклического действия: в цилиндр экструдера загружали порцию разогретой гуттаперчи и выдавливали через фильеру, сквозь которую пропускали медный провод. Периодичность действия машин ограничивала их производительность.

Мундштучное прессование – самый простой способ реализации экструзии, не требующий сложного оборудования и давно освоенный промышленностью. Мундштучным прессованием формуют керамику, ферриты, твердые сплавы и другие жесткие порошки, технологические свойства которых улучшают введением связующе-пластифицирующих добавок. При всех достоинствах мундштучное прессование имеет существенный недостаток – получаемые этим методом изделия имеют ограниченную длину.

Возможность формования бесконечных труб и проблемы, возникающие при этом, рассмотрены в работе [128]. Отмечается, что технически организовать циклическую подачу порошка при непрерывном его выдавливании несложно [129–130]. Труднее избавиться от неравномерного распределения плотности, возникающего из-за цикличности подачи материала. Частично решить эту задачу можно тремя способами: добавить в порошок пластификатор, подвергнуть непластифицированный порошковый материал горячей экструзии [131] или соединять порошковые брикеты в холодном состоянии [132].

Мундштучное прессование целесообразно применять в единичном и мелкосерийном производстве. Это очень трудоемкий и низкопроизводительный способ формования, плохо поддающийся автоматизации.

Шнековое формование применяют в разных отраслях промышленности: пищевой [85], химической [133–134], легкой [135] и строительной [136]. С помощью шнековых экструдеров и в наши дни покрывают изоляцией кабель и провод. Применяют прямоточные экструдеры и прессы с косоугольными головками. Встречаются устройства с одним и двумя шнеками. В последнем случае оси шнеков параллельны, а винтовые нарезки сцеплены между собой – эффективное решение, предотвращающее проворот материала [137].

Для формования пластмасс используют шнековые прессы, снабженные специальным экструзионным инструментом [138]. Сегодня это основной способ получения труб различного профиля из термопластов. Для пластмасс создано разнообразное формующее оборудование, которое после модернизации обычно можно использовать и для прессования пластифицированных порошков [139].

Керамические трубы сложной формы также формуют на шнековых прессах. ГОСТ 8411-74 предусматривает изготовление цилиндрических, шести- и восьмигранных дренажных труб. По ТУ

выпускают трубы с десятигранной поверхностью, а также с одной и двумя опорными поверхностями.

Разработаны технологии получения керамических труб с рифленой внешней поверхностью, с водоприемными прорезями конической формы и с пористыми стенками. Последние получают введением в глиняную массу отошающих и выгорающих добавок. Распространение шнековых прессов в производстве строительной керамики обусловлено хорошей текучестью и формуемостью полужидких глиняных материалов.

Типична технология изготовления высокотемпературных нагревателей из тугоплавких соединений экструзией порошков на шнековом прессе [118]. Порошок смешивают с пластификатором, в качестве которого используют бентонитовую глину. Массу высушивают в вакуумной сушилке и подвергают вальцеванию. После этого материал загружают в бункер и с помощью специального транспортера подают через сетку в вакуумную камеру для откачки газов, способных вызвать проблемы при формовании. Затем смесь шнеком проталкивают в головку шприц-машины, на выходе из которой он приобретает форму готового изделия. В процессе формования в камере поддерживают вакуум. Полученные нагреватели имеют форму труб и стержней круглого сечения. Отмечается, что разработанный процесс отличается большей производительностью, чем выдавливание на прессах. Аналогичным образом получены многослойные изделия из тугоплавких соединений [140].

На вакуумном червячном экструдере возможно прессование материалов с различной плотностью и удельной поверхностью. Разработана технология формования оксида алюминия и смеси, состоящей из порошков вольфрама, нитрида титана и оксида алюминия. В качестве пластификатора использовался крахмальный клейстер. Смесь длительно перемешивали на каландрах с целью гомогенизации, протирали через сито с ячейкой 2 мм, еще раз перемешивали для усреднения содержания пластификатора, затем высушивали в вакуумном сушильном шкафу. Полученные прессовки отличались хорошим качеством поверхности и высокой прочностью [141].

На шнековых прессах формуют и металлические порошки. Разработаны технологии получения труб [142] и стержней [143] сложного профиля. Получены многослойные [144] и пористые [145] изделия. Типовая технология изготовления изделий из металлических порошков включает пластификацию, гомогенизацию смеси, формование заготовок, удаление пластификатора и спекание изделий. К экструзии пластифицированных металлических порошков целесообразно прибегать в тех случаях, когда получение изделия другим методом невозможно: порошок жесткий и не прессуется без связки, изделие имеет сложную форму или большую длину, необходима

высокая пористость.

Прогрессивным направлением является использование двухчервячных машин. Прессы с параллельными шнеками бывают с не зацепляющимися и зацепляющимися червяками, а последние – с однонаправленным и встречным вращением шнеков. Последовательное расположение шнеков позволяет получить мощный пресс с высокой производительностью и стабильностью работы. Первый шнек обычно подающий, а второй – прессующий [146]. Шнековые прессы порошковой металлургии должны развивать большие усилия, чем экструдеры для формования термопластов. Обычно это достигается использованием дополнительных формующих элементов (например, различных наконечников к шнекам или специальных матриц), а также придания им какого-либо движения (вращательного, поступательного или более сложного). Шнековое формование является наиболее эффективным способом экструзии пластифицированных порошков. Легкость автоматизации, непрерывность и высокая производительность процесса являются основными достоинствами этого метода формования.

Инжекция материала – это высокопроизводительный метод формования, который применяют для получения длинномерных изделий малого поперечного сечения, в основном порошковых шнуров и проволоки. Он также основан на экструзии и реализуется на дисковых прессах [147].

Дисковые прессы проще и дешевле червячных машин. Время пребывания и нагрев материала в таких устройствах меньше, что важно при переработке термочувствительных и быстроокисляющихся веществ. Недостатками дисковых прессов являются пульсации скорости и невысокие давления в формующей головке, что ограничивает их применение при работе с жесткими порошками. Используют их в основном для переработки термопластов. Такой пресс [148] состоит из диска, на боковой поверхности которого имеется канал. Диск прижат к неподвижному башмаку с мундштуком на выходе. При его вращении порошок из бункера попадает в канал и уплотняется под действием сил трения. Уплотненный материал, проходя через мундштук, приобретает форму шнура. Главным достоинством такой конструкции является отсутствие материальной пробки в зоне формования, так как геометрические параметры канала соответствуют поперечным размерам изделия и радиальное обжатие мало. Отсутствие конической пробки позволяет снизить рабочее усилие прессования.

Метод ротационного прессования представляет собой формование на дисковом экструдере, усиленном специальными лопастями. Большие усилия, развиваемые таким устройством, часто достаточны для прессования чистых непластифицированных порошков. Возможности этого способа формования изучены недостаточно [149]. Дисковые

экструдеры не нашли пока широкого применения в порошковой металлургии. Возможно, причиной этого является отсутствие теории деформации смеси в таких устройствах, и, соответственно, технологии их проектирования.

Анализ и обобщение научных публикаций по исследуемой проблеме позволили разработать классификацию способов формования, основанных на экструзии вязко-пластичных сред. Предлагается классифицировать их по температуре, состоянию формуемой среды, степени стационарности процесса выдавливания и техническим особенностям его реализации.

В зависимости от температуры материала, который может находиться в компактном, измельченном и жидком состояниях, различают горячую и холодную экструзию. В зависимости от степени стационарности процесса различают дискретную, циклическую и непрерывную экструзию. Выдавливание пластичного материала может быть осуществлено мундштучным прессованием, шнековым формованием или инъекцией на дисковых прессах. Такая классификация удобна при проведении теоретических исследований.

Горячая и холодная экструзия. Горячей экструзией обычно называют деформацию металла, нагретого выше температуры рекристаллизации. Разделение на горячую и холодную деформацию удобно, так как указывает на процессы, протекающие в металле: холодная экструзия сопровождается его упрочнением, а горячая – нет. Соответственно различаются и способы математического описания процессов холодной и горячей экструзии.

Использование температуры рекристаллизации в качестве ориентира целесообразно использовать только для сплошных литых металлов. Для пластифицированных порошков, даже металлических, эта формулировка неудобна. Уплотнение таких материалов сопровождается относительно свободным перемещением частиц, из которых состоит сыпучая среда. В то же время пластическая деформация самих частиц обычно отсутствует. Механика процесса деформации пластифицированного порошка зависит, главным образом, от концентрации пластификатора в порошке и его состава, а не от наличия процессов упрочнения и рекристаллизации в металлических частицах. Поэтому в настоящей работе холодной экструзией назван процесс деформации, осуществляемый без дополнительного нагрева материала. Соответственно, горячую экструзию осуществляют с дополнительным подводом тепла к пластически деформируемой среде. Такие формулировки просты и удобны при теоретических исследованиях, так как указывают на вид граничных и начальных условий при постановке разнообразных краевых задач.

Структура и состояние формуемой среды. В зависимости от структуры и состояния материала различают экструзию литых

металлов, измельченных (гранулированных) материалов и вязких жидкостей (расплавов и растворов).

Экструзия литых металлов является перспективным методом обработки, позволяющим наиболее полно использовать явление сверхпластичности [150]. Этот метод не нашел широкого применения из-за необходимости использования очень мощного прессового оборудования. Обычно для экструзии компактных металлов применяют жидкость высокого давления, из-за чего процесс называют гидроэкструзией [151–152]. Литые металлы подвергают горячей экструзии для увеличения пластичности и уменьшения усилия выдавливания. Гидроэкструзией обычно обрабатывают тугоплавкие металлы [153–154].

Экструзия вязких жидкостей – наиболее изученный процесс. Выдавливание расплава через фильеру является основным способом формования длинномерных изделий из термопластичных полимеров и материалов на их основе. Это технологически очень развитая область промышленности. Горячей экструзией получают листы, трубы, пленки, прокладки, поручни для лестниц и другие профили. Формование гранулированных пластмасс, моноволокон и сеток также основано на экструзии расплавов [155]. Вязкие жидкости – наиболее подходящая среда для переработки на шнековых устройствах [156–157].

Степень стационарности процесса. Материалы формуют дискретными и непрерывными способами. При дискретном формовании число циклов подачи шихты в пресс-форму соответствует числу циклов прессования [158] и размеры изделий ограничены в трех измерениях. В непрерывных способах подача шихты в зону формования осуществляется независимо от числа циклов прессования и размеры изделий ограничены только в двух измерениях.

Непрерывным методом формования называют процесс, позволяющий изготовить изделие неограниченной длины без периодических остановок и перезагрузок. Соответственно, дискретными методами получают изделия конечной длины. Непрерывная экструзия реализуется с помощью шнековых и дисковых прессов. Мундштучное прессование при такой классификации находится где-то посередине – изделие бесконечной длины этим методом не получить, хотя, выбрав контейнер достаточной емкости, практические нужды удовлетворить удастся. Одни авторы считают этот метод формования непрерывным, другие – дискретным. Иногда встречаются такие названия, как дискретно-непрерывный, поступательный или циклический методы [159].

Мы непрерывным называем метод формования, имеющий достаточную для получения изделия продолжительность стационарной фазы. Формулировка удобна при теоретических построениях, так как указывает на отсутствие времени в уравнениях деформации.

Мундштучное прессование является непрерывным методом, хотя и не позволяет получать бесконечное изделие.

Удаление органических наполнителей обычно совмещают со спеканием изделий. Режим спекания при этом несколько усложняется за счет добавления изотермических выдержек и ограничения скорости нагрева на начальном этапе термической обработки [160–161]. В процессе спекания пластификаторы могут выгорать, коксоваться, возгоняться либо оставаться без изменений. Содержание золы и кокса в органических пластификаторах приведено в таблице 3.

Степень загрязнения изделий углеродом зависит не только от пластификатора, но и от режима спекания. Минимальное загрязнение наблюдалось при нагреве изделий до 400–450 °С на воздухе – пластификатор просто выгорал. Если прессовки сразу нагревали в защитной атмосфере, то количество вносимого углерода было равно содержанию кокса в сухом пластификаторе [162].

Таблица 3 – Содержание золы и кокса в органических пластификаторах

Пластификатор	Массовая доля, %		Отношение растворителя к растворенному веществу
	Зола	Кокс	
Крахмальный клейстер	2,45	6,7	4:1
Раствор ПВ спирта в воде	0,58	1,1	4:1
Парафин	0	0	—
Раствор парафина в бензине	0	0	2:1
Раствор парафина в бензоле	0	0	2:1
Раствор каучука в бензине	0,94	1,5	10:1
Раствор бакелита в спирте	...	50	10:1

Синтетический каучук удаляют так. Изделия помещают в графитовую лодочку и засыпают графитовой крупкой. Садка в печь производится при температуре 500–600 °С и дается тридцатиминутная выдержка. За это время пластификатор полностью выгорает. Затем печь продувают инертным газом, дальнейшее спекание производят в атмосфере водорода. Спеченные по такой технологии изделия имеют пористость 20–25 % [163–164].

Термообработка прессовок из тугоплавких соединений, пластифицированных смесью воска с парафином, проходит в два этапа. Сначала удаляют пластификатор в вакуумной печи, которую нагревают до 350 °С и делают двухчасовую выдержку. Затем спекают изделие в печи с графитовым нагревателем в среде аргона [125]. Современные печи для отгонки парафина снабжены вакуумноцерезиновым насосом и графитовым нагревателем [165]. При исследовании процесса удаления

пластификатора контролируют массу образцов [166], что неудобно. Термопластичные пластификаторы при нагреве разжижаются, прессовка теряет прочность и ее трудно взвешивать. Кроме того, эта методика не позволяет изучить процесс миграции жидкого пластификатора.

Разработана методика контроля за процессом удаления пластификатора по изменению электропроводности материала. Использовался пластификатор, состоящий из парафина с добавкой полиэтилена (5–7 %). В железный порошок вводили 15–20 % такого пластификатора и прессовали брикеты. При нагреве брикетов до 50–55 °С наблюдалось уменьшение металлических контактов, а при 55–130 °С происходило удаление жидкого пластификатора в засыпку из оксида алюминия. При нагреве до 150 °С в течение двух часов удалялось 70 % органики. Затем заготовки нагревали со скоростью 200 °С в час до температуры спекания (1000–1100 °С). Усадка составила всего 1 %, а пористость изделий – 50–60 %. Пластификатор удаляется в адсорбент в жидком состоянии [167–168].

Влияние органических пластификаторов – крахмала и полиакриламида – на процесс спекания железных и стальных порошков описано в работе [119]. Установлено, что крахмал не оказывает заметного влияния на процесс спекания железа и сталей. Полиакриламид увеличивает усадку и прочность изделий. Наиболее распространенный органический пластификатор – парафин – также легко удаляется при спекании [169]. Спекание крупногабаритных прессовок с термопластичной связкой затруднено уменьшением прочности изделия при нагреве. Это приводит к изменению формы заготовки и ее разрушению. Если порошок ферромагнитен, деформация может быть уменьшена использованием поддерживающего магнитного поля [170].

1.5 Технологические свойства формуемых материалов

На процесс экструзии большое влияние оказывают триботехнические и реологические характеристики среды, а также ее способность к уплотнению. Свойства пластичных сред, подвергаемых экструзии, сильно отличаются от свойств классических порошков. Это материалы с совсем другой реологией и трибологией; стандартные методики, применяемые в порошковой металлургии для исследования технологических характеристик среды, для них непригодны.

Под триботехническими характеристиками понимают коэффициенты, используемые при описании процессов, связанных с трением. К ним относят коэффициент сцепления, коэффициенты

внутреннего и внешнего трения (скольжения и покоя), а также коэффициенты, используемые в нелинейных законах трения. Рассчитать теоретически коэффициенты трения порошкового материала довольно сложно. Связано это с сильной их зависимостью от удельного давления. Для коэффициента внешнего трения получено [171–172] расчетное соотношение

$$\mu = \frac{\tau_0 \xi}{p} + \beta + tg\theta, \quad (3)$$

где τ_0 – прочность на срез молекулярных связей; p – удельное давление прессования; ξ – относительная площадь контактов порошка с поверхностью; β – коэффициент, отражающий увеличение прочности молекулярных связей с ростом давления; θ – параметр, характеризующий геометрические особенности поверхности трения. Расчеты, произведенные по этой формуле, хорошо совпали с экспериментальными результатами [173]. Для пластифицированных порошков и других композиционных составов исследований не проводилось.

Триботехнические характеристики порошков обычно измеряют на трибометрах с цилиндрическим пуансоном [174]. Порошок сжимают в пресс-форме, один из пуансонов которой может вращаться. Измеряя вращающий момент, необходимый для начала поворота пуансона, вычисляют коэффициенты внешнего и внутреннего трения. Недостатком трибометра с цилиндрическим пуансоном является неравномерность распределения скоростей скольжения в радиальном направлении. При вычислении коэффициентов трения проводят интегрирование по радиусу пуансона, что ведет к усреднению скоростей скольжения. Такой прием дает методическую погрешность измерения, особенно заметную при исследовании трения покоя, когда скорость вращения очень мала.

Частично избавиться от этого недостатка можно с помощью кольцевого трибометра. В нем рабочая зона представляет собой кольцо, что позволяет исключить влияние центральной части пуансона. Неравномерность скоростей значительно уменьшается [175–176]. Коэффициенты сцепления, требующие измерений при очень малых скоростях и давлениях, удобнее исследовать на приборе с параллельными пластинами, одна из которых подвижна [177].

Как известно, порошковый материал передает приложенное к нему давление в разных направлениях по-разному. Количественно это явление характеризует коэффициент бокового давления. Он широко используется в технических расчетах на прочность и износостойкость формирующего инструмента. Коэффициент бокового давления растет с

увеличением плотности прессовки, но для разных материалов по-разному: чем пластичнее металл, тем в большей степени его величина связана с давлением прессования [178].

Попытки вычислить коэффициент бокового давления, исходя из физических свойств порошка и технологических параметров процесса уплотнения, представляют чисто теоретический интерес, так как сводят проблему измерения одного параметра к ряду других [179].

Измеряют коэффициент бокового давления с использованием тензометрии [82]. Такой подход имеет существенные недостатки, главные из которых – низкая точность измерения и плохая воспроизводимость результатов. Связано это со сложностью тарирования датчика и юстировки передающего усилия штифта.

Механические свойства зависят не только от состава, но и от структуры материала. Структура сыпучего материала зависит от размера и формы его частиц, а также от добавок, вводимых в порошок. Стандартные методики исследования прочности и пластичности применимы лишь для спеченных материалов, и то с некоторыми оговорками. Разработаны также нестандартные устройства и методики исследования механических свойств спеченных материалов, учитывающие особенности таких тел [180].

Структурные характеристики сыпуче-пластичных материалов изучает физико-химическая механика [181–182]. Появилась эта наука задолго до порошковой металлургии, однако ее методы хорошо подходят и для характеристики порошковых структур, в том числе и пластифицированных. Наиболее полезной характеристикой оказалась пластическая прочность структуры, впервые введенная в употребление академиком П. А. Ребиндером [183]. Пластическая прочность структуры представляет собой максимальное из возможных касательных напряжений в диспергированном материале. Для пластифицированных порошков она зависит от состава пластификатора и его концентрации в смеси, способа пластификации порошка и его влажности [123]. Измеряют ее погружением конуса в материал на коническом пластомере [184]

$$\tau_m = k_\alpha \frac{P}{H^2}, \quad (4)$$

где P – нагрузка, приложенная к конусу; H – глубина погружения конуса; α – угол при вершине конуса; k_α – постоянная конуса.

Пластическая прочность структуры – важная технологическая характеристика пластифицированного порошка. Она измерена для многих материалов, как со скелетной фазой (порошки с пластичными добавками), так и без нее [185]. Некоторые исследователи отмечают, что пластическая прочность структуры равна сопротивлению материала пластической деформации [123].

Исследованы водные растворы крахмала и поливинилового спирта, бензиновые растворы каучука и полиакриламида. Реологические свойства таких сред лучше всего описывают модели Максвелла-Шведова и Кельвина [186].

Реологические характеристики пластификаторов могут быть найдены и расчетным путем. Например, получены соотношения для расчета эластичности, пластичности по Воляровичу и периода истинной релаксации [187].

Реология смеси, состоящей из порошка дисилицида молибдена (90–96 %) и бентонитовой глины исследована с помощью капиллярного вискозиметра. Отмечается [113], что смесь хорошо подчиняется закону Бингама-Шведова

$$p = p_0 + \eta \frac{\partial V}{\partial r} = 4 \frac{l}{d} p_k + \eta \frac{\partial V}{\partial r}, \quad (5)$$

где p и p_0 – действующее и предельное давление, при котором возникает движение смеси; η – пластическая вязкость; $\partial V / \partial r$ – градиент скорости в капилляре длиной l и диаметром d ; p_k – динамический предел текучести.

Результаты измерения реологических характеристик порошка дисилицида молибдена, пластифицированного бентонитовой глиной, приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Вязкость и предел текучести порошка дисилицида молибдена, пластифицированного бентонитовой глиной

MoSi ₂ , %	96	94	92	90
Глина, %	4	6	8	10
η , кНс/м ²	9	26	30	32
p_k , кН/м ²	110	440	2000	3800

В этом же исследовании установлено, что при содержании крахмала 2,65 % и влажности смеси 0,8 % течение материала через цилиндрический капилляр хорошо описывается уравнением Бингама-Шведова, интегральная форма которого в данном случае имеет вид

$$\eta = \frac{\pi r^4}{8 l q} \left(p - \frac{4}{3} p_0 + \frac{p_0^4}{3 p^3} \right), \quad (6)$$

где r и l – радиус и длина капилляра; q – секундный расход; p и p_0 – действующее и предельное напряжения соответственно [141].

При больших давлениях третьим членом в правой части можно пренебречь, тогда предел текучести определяется из соотношения

$$\tau_0 = \frac{p_0 r}{2 l}. \quad (7)$$

Глава 2. Теоретическое исследование процесса экструзии

Процесс деформации пластичной среды в экструдере можно разделить на два этапа: предварительное ее уплотнение в канале шнека и выдавливание уплотненного материала через коническую матрицу. Поэтому и теоретический анализ был проведен в два этапа. Теоретические исследования, основанные на изучении физических моделей, возможны лишь с упрощающими допущениями, формализующими реальные процессы. При формулировке таких допущений использованы результаты анализа научных публикаций и практический опыт авторов в области экструзии.

Обобщая этот опыт, можно утверждать, что формировать экструзией можно лишь материалы, способные к уплотнению до беспористого компактного состояния без пластической деформации содержащихся в них частиц основной фазы. Другими словами, пластификатора в порошке должно быть столько, чтобы при уплотнении он занял все межчастичное пространство, полностью вытеснив газ. Деформация среды осуществляется за счет течения пластификатора, мелкие твердые частицы скелетной фазы при рабочих напряжениях пластически не деформируются. Пластификатор, заполняющий все свободное пространство, препятствует возникновению динамического свода при экструзии материала.

Как было показано выше, если пластическая деформация сопровождается уплотнением материала, то связь касательных и нормальных напряжений на поверхности трения задается соотношением

$$\tau = a + b\sigma - c\sigma^2, \quad (8)$$

а если деформируется уже уплотненный материал, то закон трения упрощается:

$$\tau = f\sigma. \quad (9)$$

Коэффициенты a , b , c и f не зависят в известных пределах от напряжений, что позволяет провести необходимые при построении математических моделей процесса экструзии аналитические преобразования, вынося их за знаки дифференцирования и интегрирования. Соотношения (8–9) подтверждены экспериментально для многих порошков, пластифицированных органическими веществами; исключений не обнаружено [4].

Инерционные силы, действующие на материал в канале шнека, пренебрежимо малы по сравнению с усилием прессования. Такое допущение позволяет анализировать плоские модели, получающиеся разверткой некоторых сложных поверхностей (например, поверхностей

винтового канала шнека) на плоскость. Его надо применять с большой осторожностью в зоне загрузки материала, где инерционные силы и сила тяжести создают условия, принимаемые в качестве граничных при решении краевых задач и возрастающих экспоненциально по мере дальнейшего продвижения уплотняемой среды по каналу шнека.

2.1 Анализ процесса уплотнения среды в канале шнека

Все устройства для непрерывной экструзии имеют канал, соединяющий зону загрузки материала с зоной его формования. В пресс-формах для мундштучного формования порошков этот канал представляет собой цилиндрическую полость, а в шнеках он свернут по винтовой линии.

На подвижных поверхностях канала действуют активные силы трения, способствующие перемещению материала вперед, а неподвижные поверхности тормозят его, создавая необходимый для уплотнения среды подпор. Так как деформация материала в канале шнека сопровождается его уплотнением, закон трения на подвижных и неподвижных поверхностях шнека имеет вид (8). Схема процесса уплотнения материала в канале шнека изображена на рисунке 1.

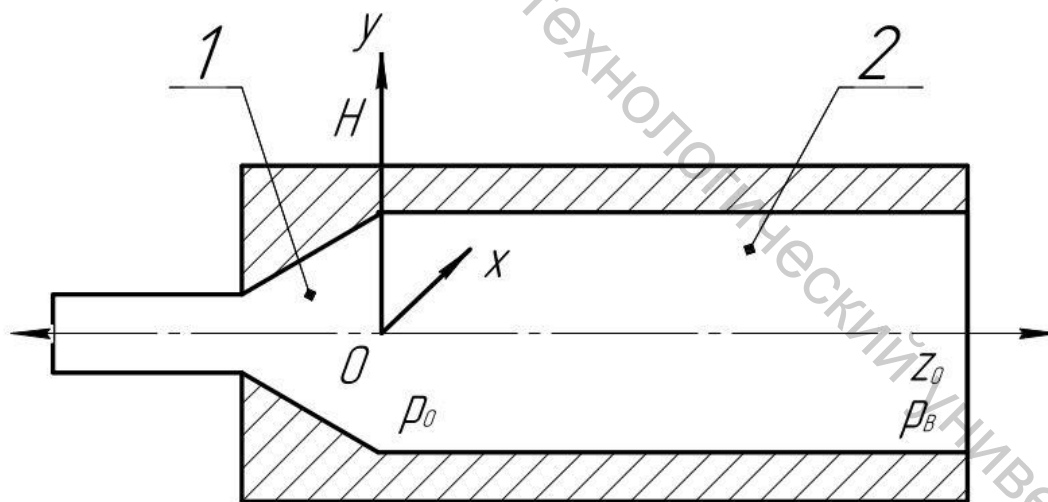


Рисунок 1 – Схема уплотнения материала в канале шнека

Материал перемещается по каналу шнека от загрузочного бункера ($z = z_0$) к конической матрице ($z = 0$). Движущая сила возникает из-за трения среды о подвижную поверхность шнека и начального давления $p(z_0) = p_v$ на входе в канал. Ось z направлена против движения материала от выхода канала к его входу (от матрицы к бункеру). Начало отсчета совпадает с границей раздела между каналом и матрицей, давление в этой точке $p(0) = p_0$. Как будет показано, это давление

определяется только свойствами среды и геометрией матрицы.

Оси x и y направлены по ширине и глубине канала. В процессе продвижения материала плотность его возрастает, поэтому касательные напряжения, действующие на границах канала, определяются нелинейным законом трения

$$\tau_1 = a_1 + b_1 p + c_1 p^2, \quad \tau_0 = a_0 + b_0 p + c_0 p^2, \quad (10)$$

где τ_1 и τ_0 – касательные напряжения на подвижной и неподвижной поверхностях шнека; p – давление среды на стенки канала, являющееся функцией координаты z ; $a_1, b_1, c_1, a_0, b_0, c_0$ – инвариантные к напряжениям коэффициенты, характеризующие трение материала о подвижные и неподвижные поверхности канала.

Приращение элементарной силы трения $dF_{\text{тр}}$ среды о поверхности канала при увеличении координаты z на величину dz связано с приращением давления dp следующим образом:

$$dF_{\text{тр}} = -2Sdp = 2(\tau_1 l_1 - \tau_0 l_0)dz, \quad (11)$$

где $2S$ – площадь поперечного сечения канала; $2l_1$ и $2l_0$ – части профиля, принадлежащие подвижной и неподвижной поверхностям соответственно.

Задача нахождения распределения давления вдоль канала шнека сводится к решению обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка с разделяющимися переменными

$$dp = (a + bp + cp^2)dz, \quad (12)$$

где коэффициенты a , b и c определяются только трением и геометрией канала:

$$a = \frac{1}{S}(a_0 l_0 - a_1 l_1), \quad b = \frac{1}{S}(b_0 l_0 - b_1 l_1), \quad c = \frac{1}{S}(c_0 l_0 - c_1 l_1). \quad (13)$$

Решение уравнения (12) имеет вид

$$z = d \ln \frac{p - e}{f - p} + A, \quad d = \frac{1}{2c} \sqrt{\frac{b^2}{4c^2} - \frac{a}{c}}, \quad (14)$$

где e и f – корни квадратного уравнения $a + bp + cp^2 = 0$:

$$e = -\sqrt{\frac{b^2}{4c^2} - \frac{a}{c}} - \frac{b}{2c}, \quad f = \sqrt{\frac{b^2}{4c^2} - \frac{a}{c}} - \frac{b}{2c}. \quad (15)$$

Постоянная интегрирования A находится из граничного условия

$$p(0) = p_0:$$

$$A = d \ln \frac{p_0 - e}{f - p_0}. \quad (16)$$

Таким образом, распределение давления по длине канала имеет вид

$$Z = d \ln \frac{(p_0 - e)(f - p)}{(f - p_0)(p - e)}. \quad (17)$$

Отсюда можно найти длину канала z_0 , необходимую для создания в зоне формования давления p_0 . Она находится подстановкой в (17) граничного условия $p(z_0) = p_v$, где p_v – давление на выходе из канала. Это давление создается только силой тяжести $p_v = \rho g H$, где ρ – насыпная плотность материала; g – ускорение свободного падения; H – глубина канала.

$$z_0 = \ln \frac{(p_0 - e)(f - \rho g H)}{(f - p_0)(\rho g H - e)}. \quad (18)$$

Соотношение (17) прошло хорошую экспериментальную проверку [188–189].

2.2 Распределение напряжений в поперечном сечении канала

Распределение напряжений в поперечном сечении канала интересно тем, что оно определяет распределение плотностей в формуемой среде, которое затем в той или иной степени наследуется изделием. Например, если надо получить изделие с равномерной плотностью, об этом необходимо позаботиться уже на этапе проектирования профиля канала шнека.

На рисунке 2 схематически изображена половина поперечного сечения канала.

Винтовой канал глубиной H образован подвижной поверхностью шнека HAx_0 и неподвижной поверхностью цилиндра $0x_0$. На неподвижной поверхности касательные напряжения обозначены τ_0 , а на подвижной – τ_1 . На подвижной поверхности канала произвольно выбрана точка $A(x, y)$ с координатами x и y . Касательные напряжения, действующие на площадке, параллельной неподвижной поверхности и проходящей через точку $A(x, y)$, обозначены $\tau(y)$.

Со стороны неподвижной поверхности канала на элементарный объем проходящего по нему материала толщиной dz действует сила трения, тормозящая его движение:

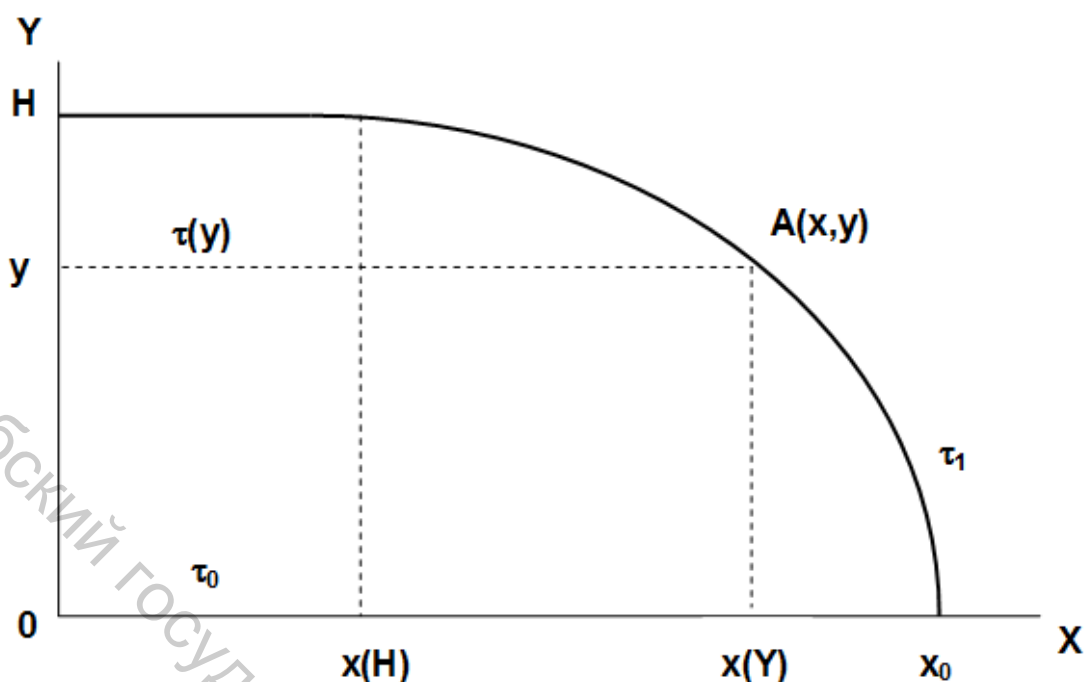


Рисунок 2 – Схема расчета профиля канала

$$dF_{\text{тр}0} = \tau_0 x_0 dz . \quad (19)$$

В противоположном направлении на этот же элементарный объем действует сила трения о подвижную поверхность, способствующая его продвижению:

$$dF_{\text{тр}1} = -\tau_1 l dz , \quad (20)$$

где l – длина подвижной половины профиля канала HAx_0 .

Уравнение равновесия сечения имеет вид

$$\tau_0 x_0 = \tau_1 l . \quad (21)$$

Для нахождения распределения напряжений по глубине канала $\tau(y)$ составлено уравнение равновесия части элементарного объема, расположенной ниже линии yA . На эту часть, ограниченную кривой $0yAx_0$, действуют три силы: сверху в направлении движения $\tau(y)x(y)dz$, справа в том же направлении $\tau_1 l(y)dz$ и снизу в противоположном направлении сила $\tau_0 x_0 dz$. Часть профиля подвижной поверхности Ax_0 обозначена как $l(y)$.

Из условия равновесия сечения следует

$$\tau_0 x_0 = \tau(y)x(y) + \tau_1 l(y) . \quad (22)$$

С учетом (21) уравнение (22) приобретает вид

$$\tau_0 x_0 = \tau(y)x(y) + \tau_0 x_0 \frac{l(y)}{l}; \quad l(y) = \int_0^y \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dy}\right)^2} dy; \quad (23)$$

$$l = \int_0^H \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dy}\right)^2} dy + x(H).$$

Таким образом, задача сведена к решению интегро-дифференциального уравнения относительно неизвестной функции $x(y)$ в зависимости от заданного распределения напряжений по глубине канала $\tau(y)$.

Ниже уравнение (23) будет решено численно, однако для некоторых простых распределений $\tau(y)$ удастся найти и аналитическое решение. Так, важным для практики является частный случай, когда касательные напряжения остаются постоянными по глубине канала:

$$\tau(y) = \tau_0. \quad (24)$$

Такое распределение напряжений интересно тем, что позволяет получать изделия с равномерной плотностью по сечению. В этом случае уравнение (23) приобретает простой вид

$$x_0 = x(y) + x_0 \frac{l(y)}{l}. \quad (25)$$

Решением этого уравнения является функция

$$x(y) = x_0 \left(1 + \frac{y}{H}\right). \quad (26)$$

График зависимости $x(y)$ представляет собой прямую линию, проходящую через точки $(0, H)$ и $(x_0, 0)$. Действительно, в этом случае

$$\frac{dx}{dy} = -\frac{x_0}{H}; \quad x(H) = 0; \quad l(y) = \sqrt{1 + \frac{x_0^2}{H^2}} y, \quad l = \sqrt{1 + \frac{x_0^2}{H^2}} H, \quad (27)$$

и подстановка (26) и (27) в (25) приводит к тождеству.

2.3 Экструзия уплотненной среды

Как было показано выше, экструзии подвергают предварительно уплотненные до компактного беспористого состояния материалы.

Технологические свойства такой среды, не содержащей газовой фазы, зависят в основном от свойств и количества пластификатора. Закон трения в этом случае линейный (9). Зона деформации материала инструментом схематически изображена на рисунке 3.

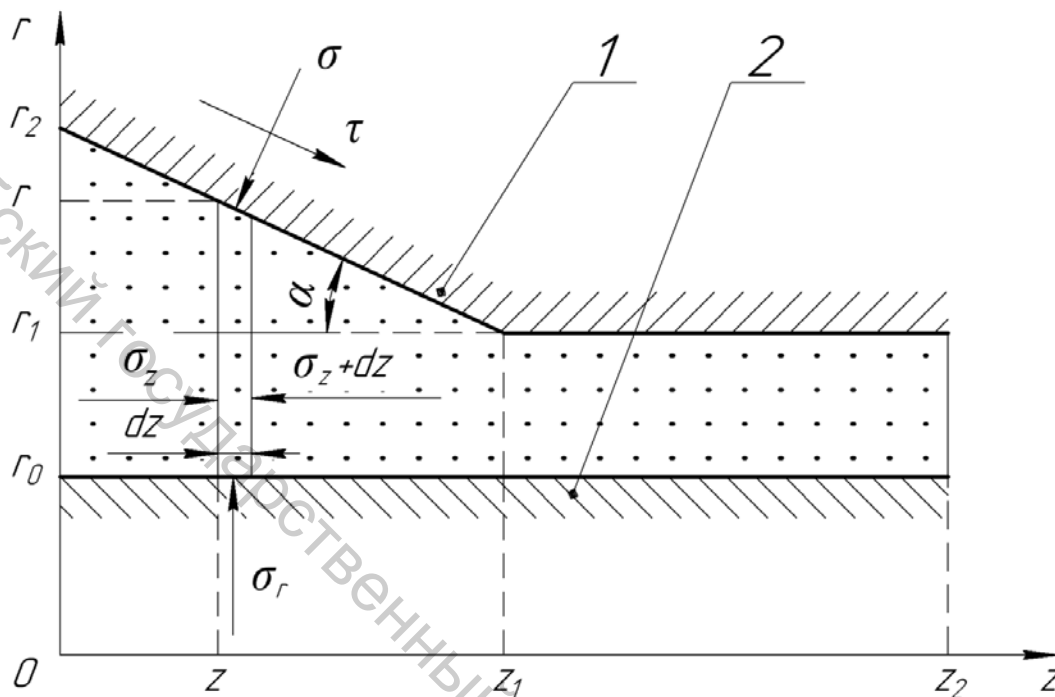


Рисунок 3 – Схема зоны деформации материала

Материал выдавливается через зазор, образованный внутренней поверхностью матрицы 1 и наружной поверхностью дорна 2. Матрица имеет коническую часть длиной z_1 и цилиндрическую часть длиной $z_2 - z_1$. Радиусы входного и выходного сечений матрицы обозначены соответственно r_2 и r_1 , а угол наклона образующей конической части обозначен α .

Дорн представляет собой цилиндрический стержень радиусом r_0 . Он не закреплен и перемещается в процессе экструзии вместе с материалом, что позволяет формировать трубы и наружные покрытия. При формировании сплошных изделий (стержней) дорна нет ($r_0 = 0$).

На материал действует усилие выдавливания, вызывающее в нем осевые напряжения σ_z , которые предполагаются распределенными в поперечных сечениях матрицы однородно (не зависят от r). На внутренней поверхности матрицы нормальные и касательные напряжения обозначены σ и τ . На поверхности дорна нормальные напряжения σ_r , а касательные отсутствуют, так как он движется вместе с материалом. Направления главных нормальных напряжений совпадают с координатными направлениями [190–191].

В цилиндрической части матрицы материал находится в

состоянии упругой разгрузки с элементами пластического течения [192]. Для нее справедливо соотношение

$$\sigma_r > \sigma_z. \quad (28)$$

Условие пластичности для всей зоны формования имеет вид

$$\sigma_r - \sigma_z = \sigma_s. \quad (29)$$

Уравнение равновесия сил, действующих на кольцевой элемент толщиной dz

$$\begin{aligned} \sigma_z(r^2 - r_0^2) - (\sigma_z + d\sigma_z)[(r - \operatorname{tg}\alpha \, dz)^2 - r_0^2] + \\ + (\tau - \sigma \operatorname{tg}\alpha)(2r - \operatorname{tg}\alpha \, dz)dz = 0, \end{aligned} \quad (30)$$

или, после удаления бесконечно малых величин высших порядков

$$(r_0^2 - r^2) \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + 2r\sigma_z \operatorname{tg}\alpha - 2r(\sigma \operatorname{tg}\alpha + \tau) = 0. \quad (31)$$

Подстановка в это выражение закона трения (9) дает

$$\begin{aligned} \frac{r_0^2 - r^2}{2r} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \sigma_z \operatorname{tg}\alpha - \sigma(\operatorname{tg}\alpha + f) = 0; \\ \sigma_r = \frac{\cos\alpha - \tau \sin\alpha}{\cos\alpha} = \sigma(1 - f \operatorname{tg}\alpha). \end{aligned} \quad (32)$$

С учетом условия пластичности (29) получается

$$\begin{aligned} \frac{r_0^2 - r^2}{2r} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + (\operatorname{tg}\alpha - k)\sigma_z - k\sigma_s = 0, \\ k = \frac{f + \operatorname{tg}\alpha}{1 - f \operatorname{tg}\alpha}. \end{aligned} \quad (33)$$

После разделения переменных и подстановки $r = r_2 - z \operatorname{tg}\alpha$ получено уравнение

$$\frac{d\sigma_z}{(k - \operatorname{tg}\alpha)\sigma_z + k\sigma_s} = \frac{2(r_2 - z \operatorname{tg}\alpha)}{r_0^2 - (r_2 - z \operatorname{tg}\alpha)^2} dz, \quad (34)$$

интегрирование которого дает

$$\begin{aligned}
& -\ln|(k - \operatorname{tg}\alpha)\sigma_z + k\sigma_s| = \\
& = (1 - k\operatorname{ctg}\alpha)\ln|(r_2 - z\operatorname{tg}\alpha)^2 - r_0^2| + A.
\end{aligned} \tag{35}$$

Постоянная интегрирования A определяется из граничного условия

$$\sigma_z(z_1) = \sigma_1, \tag{36}$$

где σ_1 – осевое напряжение в выходном сечении конической части матрицы.

Решение (35) можно упростить:

$$\begin{aligned}
(k - \operatorname{tg}\alpha)\sigma_z + k\sigma_s &= e^A[(r_2 - z\operatorname{tg}\alpha)^2 - r_0^2]^n, \\
n &= k\operatorname{ctg}\alpha - 1 = \frac{f}{\operatorname{tg}\alpha} \frac{1 + \operatorname{tg}^2\alpha}{1 - f\operatorname{tg}\alpha}.
\end{aligned} \tag{37}$$

Подстановка в решение (37) граничного условия (36) позволяет найти постоянную интегрирования A :

$$e^A = [(k - \operatorname{tg}\alpha)\sigma_1 + k\sigma_s][(r_2 - z_1\operatorname{tg}\alpha)^2 - r_0^2]^n. \tag{38}$$

После преобразований распределение напряжений вдоль конической части матрицы принимает вид

$$\sigma_z = (\sigma_1 + m\sigma_s) \left(\frac{F}{F_1}\right)^n - m\sigma_s, \tag{39}$$

где F и F_1 – площади текущего и выходного сечений конуса, а

$$m = \frac{k}{k - \operatorname{tg}\alpha} \frac{f + \operatorname{tg}\alpha}{f + \operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\alpha(1 - f\operatorname{tg}\alpha)} = \frac{1}{f} \frac{f + \operatorname{tg}\alpha}{1 + \operatorname{tg}^2\alpha}. \tag{40}$$

Напряжения вдоль цилиндрической части матрицы находятся подстановкой в уравнение (32) значений $\alpha = 0$ и $r = r_1$:

$$\frac{r_1^2 - r_0^2}{2r_1} \frac{d\sigma_z}{dz} + f\sigma = 0. \tag{41}$$

Подстановка в это выражение $\sigma_r = \sigma$ с учетом условия пластичности (29) приводят к обыкновенному дифференциальному уравнению первого порядка с разделяющимися переменными

$$\frac{d\sigma_z}{\sigma_z + \sigma_s} = \frac{2fr_1 dz}{r_1^2 - r_0^2}, \tag{42}$$

решение которого при граничном условии $\sigma_z(z_2) = 0$ имеет вид

$$\sigma_z = \sigma_s [e^{p(z_2 - z)} - 1], \quad (43)$$

где $p = \frac{2fr_1}{r_1^2 - r_0^2}$.

Осевое напряжение в материале на выходе конической части матрицы ($z = z_1$)

$$\sigma_z = \sigma_s [e^{p(z_2 - z)} - 1]. \quad (44)$$

При отсутствии трения ($f = 0$) выражением (43) воспользоваться невозможно. Однако предел, к которому стремится напряжение при $f \rightarrow 0$, может быть легко определен:

$$\sigma_z = \sigma_s \ln \frac{F}{F_1}. \quad (45)$$

Получилось известное в теории обработки металлов давлением выражение. Этот частный случай можно рассматривать как проверку, подтверждающую правильность решения поставленной задачи.

2.4 Экструзия композиционных материалов

Экструзия композитных материалов, армированных дискретными волокнами, отличается рядом особенностей, не отраженных в предыдущей части. Цель этого анализа – исследование кинематики движения удлиненной частицы в процессе экструзии пластичной среды.

Расчетная схема процесса изображена на рисунке 4.

На схеме и в расчетах приняты следующие обозначения: $2l$ – длина волокна; r_1 и r_2 – внутренний и наружный радиусы шнека; r_3 и r_4 – наружный и внутренний радиусы трубчатого изделия; L – длина конической части матрицы; α и ρ – половина угла конусности матрицы и наконечника шнека; θ – угол наклона линии тока материала к направлению выдавливания; r_{c0} и r_{cL} – расстояние от центра волокна до оси на входе и выходе из конической части матрицы; r_c – текущий радиус (расстояние от оси) центра волокна; φ_0 – угол между проекцией волокна на плоскость чертежа и линией тока, проходящей через центр волокна, на входе в коническую часть матрицы; φ – текущий угол наклона волокна; x – координата центра волокна, отсчитанная от входа в конус.

Задача нахождения зависимости угла наклона волокна φ от геометрии зоны формования решена при следующих допущениях:

материал выдавливается в полость матрицы одновременно по всему кольцевому зазору (задача осесимметрична); через каждое сечение за одинаковые промежутки времени проходят одинаковые объемы материала (среда неразрывна); материал движется таким образом, что выполняется гипотеза о плоских сечениях (проекции скоростей частиц, находящихся в одном поперечном сечении, на ось x , равны); линии тока представляют собой прямые линии, делящие в одинаковой пропорции входное и выходное сечения:

$$\frac{r_{c0} - r_1}{r_2 - r_1} = \frac{r_{cL} - r_4}{r_3 - r_4}. \quad (46)$$

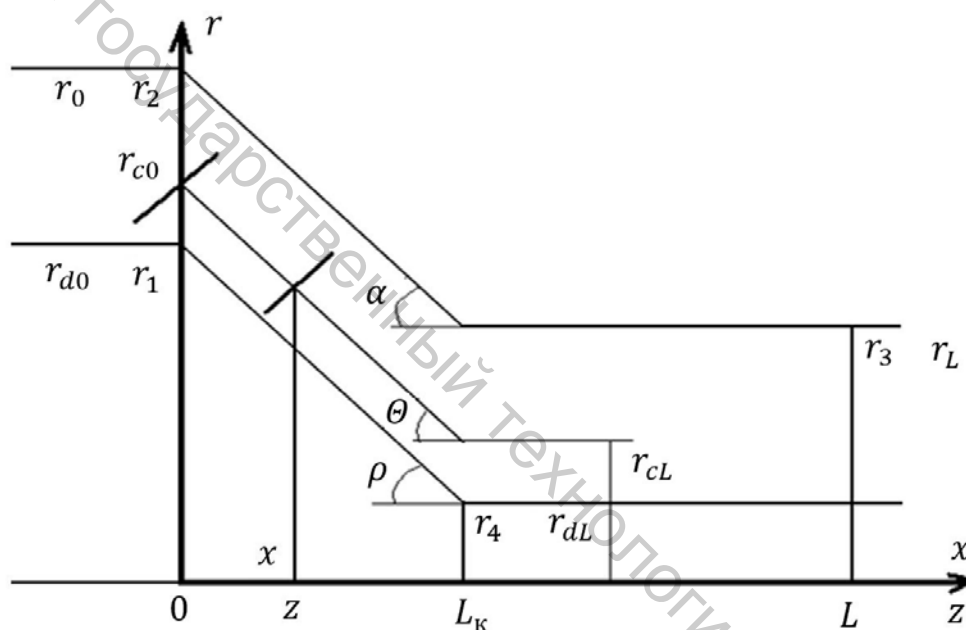


Рисунок 4 – Схема движения короткого волокна

Движение волокон представляет собой поступательное перемещение вместе с центром масс и вращение относительно этого

центра; скорость центра волокна совпадает по величине и направлению со скоростями близлежащих частиц; проекции скоростей концов волокна на перпендикулярное ему направление равны проекциям скоростей соответствующих частиц на это же направление:

$$\begin{aligned} V_{\text{НВ}} &= V_{\text{Х НП}}^{\sin(\varphi-\theta)} + V_{\text{r НП}}^{\cos(\varphi-\theta)}; \\ V_{\text{КВ}} &= V_{\text{Х КП}}^{\sin(\varphi-\theta)} + V_{\text{r КП}}^{\cos(\varphi-\theta)}, \end{aligned} \quad (47)$$

где $V_{\text{НВ}}$ и $V_{\text{КВ}}$ – скорости начала и конца волокна в его вращении; $V_{\text{Х НП}}$, $V_{\text{r НП}}$, $V_{\text{Х КП}}$ и $V_{\text{r КП}}$ – проекции скоростей частиц, совпадающих с началом и концом волокна, на соответствующие оси.

Поперечные размеры волокна много меньше его длины, а длина много меньше толщины стенки изделия. Это требование позволяет заменить соответствующие разности дифференциалами и получить аналитическое решение уравнения движения волокна. Учитывая выражение (47)

$$\begin{aligned} \text{и то, что } \operatorname{tg} \theta &= \frac{r_{c0} - r_{cL}}{L}, \\ \operatorname{tg} \theta &= \frac{\operatorname{tg} \rho - (r_2 - r_{c0}) + \operatorname{tg} \alpha (r_{c0} - r_1)}{r_2 - r_1}. \end{aligned} \quad (48)$$

Уравнение траектории движения центра масс волокна

$$r_c = r_{c0} - x \operatorname{tg} \theta. \quad (49)$$

Условие несжимаемости среды позволяет записать

$$V_x S_x = V_{x0} S_0, \quad (50)$$

где V_{x0} и V_x – проекции на ось x скоростей частиц порошка; S_0 и S_x – площадь кольцевого зазора на входе и в сечении с координатой x . Подстановка этих площадей в (50) дает

$$V_x = V_{x0} \frac{r_2^2 - r_1^2}{(r_2 - x \operatorname{tg} \alpha)^2 - (r_1 - x \operatorname{tg} \rho)^2}, \quad (51)$$

$$V_r = V_x \operatorname{tg} \theta. \quad (52)$$

При перемещении центра волокна на элементарную величину δx проекции скорости составят $V_x + \delta V_x$ и $V_r + \delta V_r$, где

$$\delta V_x = \frac{V_{x0} S_0}{S_x^2} \frac{\delta S_x}{\delta x} \delta x, \quad (53)$$

$$\delta V_r = \operatorname{tg} \theta \delta V_x + V_x \delta \operatorname{tg} \theta. \quad (54)$$

Дифференцирование дает

$$\delta V_x = \frac{2V_{x0}S_0[(r_2 - x \operatorname{tg} \alpha) \operatorname{tg} \alpha - (r_1 - x \operatorname{tg} \rho) \operatorname{tg} \rho]}{\pi[(r_2 - x \operatorname{tg} \alpha)^2 - (r_1 - x \operatorname{tg} \rho)^2]^2}, \quad (55)$$

$$\delta \operatorname{tg} \theta = \frac{1}{L} \left(1 - \frac{r_3 - r_4}{r_2 - r_1} \right) \delta r_{c0}. \quad (56)$$

Но δr_{c0} функционально зависит от r :

$$r_{c0} = r + x \operatorname{tg} \theta, \quad (57)$$

поэтому

$$\delta r_{c0} = \frac{\delta r + \delta x \operatorname{tg} \theta}{1 - A x}, \quad \text{где} \quad A = \frac{1}{L} \left(1 - \frac{r_3 - r_4}{r_2 - r_1} \right). \quad (58)$$

Подстановка этих выражений в (44) приводит к

$$\delta V_r = \operatorname{tg} \theta \delta V_x + A V_x \frac{\delta r + \operatorname{tg} \theta \delta x}{1 - A x}. \quad (59)$$

Приращение скорости конца волокна в его вращении вокруг центра масс

$$\delta V_B = \delta V_x^{\sin(\varphi - \theta)} + \delta V_r^{\cos(\varphi - \theta)}. \quad (60)$$

Приравниваем два различных выражения для угловой скорости волокна

$$V_x \frac{d\varphi}{dx} = \frac{\delta V_B}{l}. \quad (61)$$

Так как $\delta x = l \cos(\varphi - \theta)$ и $\delta r = l \sin(\varphi - \theta)$, после преобразований и разделения переменных получается дифференциальное уравнение

$$\frac{2d\varphi}{\sin^2(\varphi - \theta) + [\cos^2(\varphi - \theta) + 1] \operatorname{tg} \theta} = \left[\frac{\delta V_x}{V_x \delta x} + \frac{A}{1 - A x} \right] dx. \quad (62)$$

Решение этого уравнения при граничном условии

$$\varphi(0) = \varphi_0 \quad (63)$$

$$\varphi = \arctg \left[\left| \frac{C}{D} [\operatorname{tg}(\varphi_0 - \theta) + \operatorname{tg}\theta] (x^2 - 2\frac{B}{C}x + \frac{D}{C})(Ax - 1) \right| - |\operatorname{tg}\theta| \right] + \theta, \quad (64)$$

где $B = r_2 \operatorname{tg}\alpha - r_1 \operatorname{tg}\rho$; $C = \operatorname{tg}^2\alpha - \operatorname{tg}^2\rho$; $D = r_2^2 - r_1^2$.

Таким образом, получена зависимость угла ориентации волокна от его начального положения (φ_0 и r_{c0}) и геометрии зоны формования.

Это соотношение позволяет оптимизировать форму матрицы для получения изделий с заданным направлением преимущественной ориентации волокон. Так, можно увеличить осевую прочность стержней и труб, добившись максимальной ориентации волокон в осевом направлении. Или, если труба работает под давлением, увеличить ее радиальную прочность, минимизировав число волокон, ориентированных в осевом направлении и соответственно увеличив количество аксиально и радиально ориентированных волокон.

2.5 Термодинамика шнековой экструзии

Работа силовых шнековых устройств сопровождается интенсивным трением и тепловыделением, приводящим к нагреву материала и инструмента. Изменение температуры среды сильно отражается на ее технологических свойствах, так как большинство наполнителей термопластичны. Величину тепловыделения можно регулировать, изменяя скорость вращения и геометрию шнека, а также выбирая материал с необходимыми теплотехническими характеристиками. Ниже будет показано, как, используя особенности термопластов, уменьшить энергопотребление и увеличить эффективность шнекового формования.

Работа шнекового пресса тем эффективнее, чем больше различие в коэффициентах трения материала о шнек и цилиндр, в котором он установлен. Трение материала о поверхность цилиндра в окружном направлении обычно стремятся увеличить как конструкторскими (специальный рельеф), так и технологическими приемами. К последним относятся методы изменения триботехнических свойств формируемой среды, например, целенаправленным изменением ее температуры на разных участках шнека. Увеличение силы трения материала о шнековый цилиндр действенная, но вынужденная мера. Энергосбережению этот прием явно не способствует.

Предпочтительнее достигать необходимого эффекта уменьшением трения материала о шнек. На этом пути не так много

возможностей: повышение чистоты поверхности шнека, применение антифрикционных материалов при его изготовлении и выбор оптимальных режимов прессования.

Формование термопластичных сред, к которым относят и пластифицированные порошки, предоставляет интересную возможность уменьшения трения на шнеке. Как известно, наиболее эффективным приемом, снижающим трение, является смазка. По техническим причинам, однако, сложно организовать смазку труднодоступной поверхности шнека; к тому же смазывающее вещество будет уноситься материалом и загрязнять его. Большинство распространенных термопластичных пластификаторов (парафин, поливиниловый спирт) плохо смазывают металлические поверхности. Но даже если удастся подобрать наполнитель, обладающий хорошими пластифицирующими и смазывающими свойствами одновременно, эффект от его применения будет незначительным: надо уменьшать трение только на шнеке, а не на всех трущихся поверхностях.

Решение этой проблемы существует – для необходимого изменения соотношения коэффициентов трения достаточно обеспечить такой режим формования, при котором трение материала о шнек будет жидкостным, а о корпус – сухим. Для большинства термопластов такой режим удастся найти расчетным путем, а для некоторых и реализовать практически.

Изменить характер трения с сухого на жидкостное проще всего изменением температуры трущейся поверхности. Если наружная поверхность шнека нагрета выше температуры плавления пластификатора, а внутренняя поверхность корпуса — нет, то необходимый режим формования будет обеспечен. Это достаточное условие. Дополнительно надо следить, чтобы пластификатор не расплавился по всему объему материала и не закипел на поверхности шнека.

Таким образом, температурный режим, обеспечивающий эффективное формование термопластичных материалов шнеком, имеет вид

$$T_{\text{к}} < T_{\text{пл}} < T_{\text{ш}} < T_{\text{кип}}, \quad (65)$$

где $T_{\text{к}}$ и $T_{\text{ш}}$ – температуры трущихся о материал поверхностей корпуса и шнека; $T_{\text{пл}}$ и $T_{\text{кип}}$ – температуры плавления и кипения пластификатора соответственно.

Проще всего обеспечить нужный тепловой режим, принудительно нагревая шнек и охлаждая корпус. Однако это решение усложняет конструкцию пресса.

В то же время опыт авторов позволяет утверждать, что иногда удастся подобрать такое сочетание свойств материала, геометрии

инструмента и технологических параметров процесса формования, при котором требуемый температурный режим достигается только за счет естественной джоулевой теплоты, без принудительного теплообмена. Однако практический поиск этого сочетания требует проведения большого количества экспериментов и часто не дает ожидаемых результатов. Необходима теория, которая позволит по известным триботехническим и теплофизическим свойствам среды рассчитать оптимальные параметры режима прессования и геометрию инструмента или сделать заключение о невозможности формования исследуемой композиции.

Теоретический поиск нужного температурного режима начат с анализа стационарных тепловых потоков в элементах шнекового пресса. Расчетная схема изображена на рисунке 5.

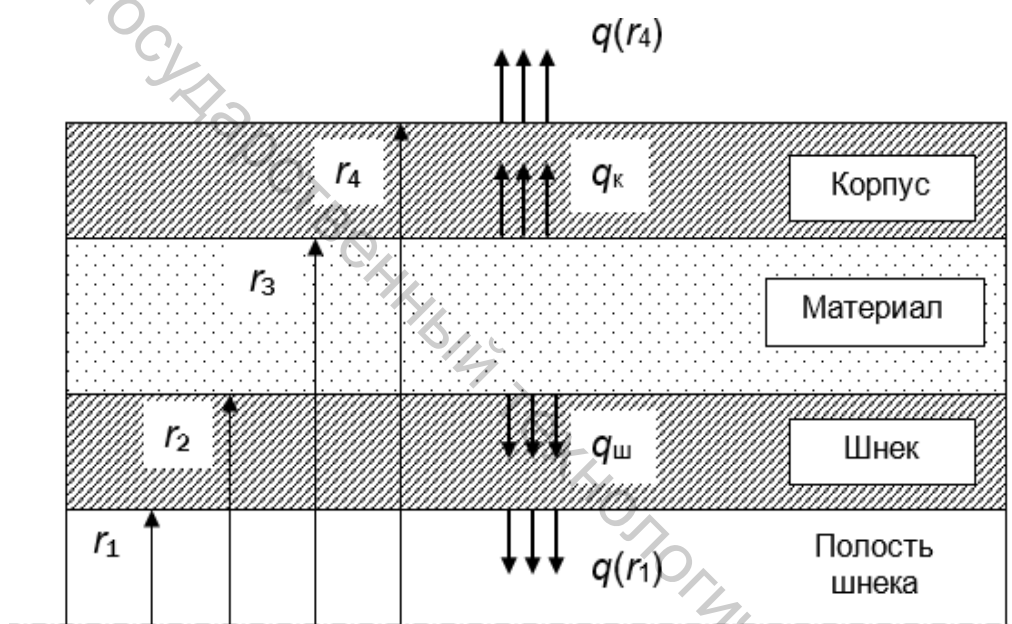


Рисунок 5 – Схема тепловых потоков при шнековом формовании

Шнек, вращаясь, приводит в движение материал, в котором из-за внутреннего и внешнего трения выделяется теплота. Тепло уходит через шнек $q_{ш}$ в его полость $q(r_1)$ и через корпус q_k в окружающую среду $q(r_4)$. Корпус пресса имеет форму трубы с наружным радиусом r_4 и внутренним радиусом r_3 . Шнек имеет форму полого цилиндра с наружным радиусом r_2 и внутренним радиусом r_1 .

Анализ проводится при следующих допущениях: влияние винтового канала на тепловые потоки пренебрежимо мало; наружная поверхность корпуса и внутренняя поверхность шнека находятся в состоянии конвективного теплообмена со средой или имеют постоянную температуру; тепловые потоки равномерно распределены по поверхностям; теплота отводится только через корпус и шнек;

теплофизические характеристики материалов не зависят от температуры; задача осесимметрична.

Для нахождения температурного поля в корпусе T_k надо решить уравнение теплопроводности, которое в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_k}{\partial r} - \frac{\partial T_k}{\partial \tau} = 0, \quad \tau = \frac{k_k}{c_k \rho_k} t, \quad (66)$$

где k_k , c_k и ρ_k – коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность материала корпуса соответственно; t – время, прошедшее с момента включения пресса. Уравнение решается при следующих граничных условиях:

$$T_k \Big|_{\tau=0} = T_{0k}; \quad \frac{\partial T_k}{\partial r} \Big|_{r=r_3} = -\frac{q_k}{k_k}; \quad (67)$$

$$\frac{\partial T_k}{\partial r} \Big|_{r=r_4} + h_k(T_k - T_{0k}) \Big|_{r=r_4} = 0,$$

где $h_k = \alpha_k / k_k$; α_k – коэффициент теплоотдачи корпуса в окружающую среду.

Замена переменной $T = T_k - T_{0k}$ сводит задачу к решению уравнения

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0 \quad (68)$$

с краевыми условиями

$$T \Big|_{\tau=0} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_3} = -\frac{q_k}{k_k}; \quad (69)$$

$$\frac{\partial T_k}{\partial r} \Big|_{r=r_4} + h_k(T_k - T_{0k}) \Big|_{r=r_4} = 0.$$

Граничное условие при $r = r_3$ неоднородно, поэтому для решения уравнения (68) выбран метод конечных интегральных преобразований. Решение ищется в виде разложения в ряд по собственным функциям $R_n(r)$ соответствующей однородной задачи Штурма-Лиувилля:

$$T = \sum_{n=1}^{\infty} C_n(\tau) R_n(r). \quad (70)$$

Задача Штурма-Лиувилля представляет собой уравнение

$$(rR')' + \lambda rR = 0 \quad (71)$$

с однородными граничными условиями (штрих означает производную по координате r)

$$R'(r_3) = 0; \quad R'(r_4) + h_k R(r_4) = 0. \quad (72)$$

Уравнение (71) является уравнением Бесселя нулевого порядка с переменной $\sqrt{\lambda}r$. Общее решение этого уравнения имеет вид

$$R = AI_0(\sqrt{\lambda}r) + BY_0(\sqrt{\lambda}r), \quad (73)$$

где I_0 и Y_0 – цилиндрические функции нулевого порядка первого и второго рода соответственно; A и B – коэффициенты, выбираемые таким образом, чтобы удовлетворить граничные условия (72).

Производная от общего решения (73) имеет вид

$$R' = -A\sqrt{\lambda}I_1(\sqrt{\lambda}r) - B\sqrt{\lambda}Y_1(\sqrt{\lambda}r), \quad (74)$$

где I_1 и Y_1 – цилиндрические функции первого порядка первого и второго рода.

Для нахождения собственных значений λ_n выражения (73) и (74) подставлены в граничные условия (72). Получается система двух уравнений

$$AI_1(\sqrt{\lambda}r_3) + BY_1(\sqrt{\lambda}r_3) = 0, \quad (75)$$

$$A[h_k I_0(\sqrt{\lambda}r_4) - \sqrt{\lambda}I_1(\sqrt{\lambda}r_4)] + B[h_k Y_0(\sqrt{\lambda}r_4) - \sqrt{\lambda}Y_1(\sqrt{\lambda}r_4)] = 0.$$

Эта система имеет решение, если ее определитель равен нулю:

$$I_1\left(\gamma \frac{r_3}{r_4}\right)[h_k r_4 Y_0(\gamma) - \gamma Y_1(\gamma)] - Y_1\left(\gamma \frac{r_3}{r_4}\right)[h_k r_4 I_0(\gamma) - \gamma I_1(\gamma)] = 0; \quad (76)$$

$$\gamma = \sqrt{\lambda}r_4.$$

Характеристическое уравнение (76) имеет бесконечное множество дискретных вещественных положительных корней

$$\gamma_n = \sqrt{\lambda_n}r_4, \quad \text{где } n = 1, 2, 3 \dots \quad (77)$$

При $\gamma = \gamma_n$ система (75) разрешима относительно коэффициентов A и B . Так как уравнения системы линейно зависимы, один из них выбран произвольно:

$$A = Y_0(\sqrt{\lambda}r_4) - \frac{\sqrt{\lambda}}{h_k} Y_1(\sqrt{\lambda}r_4), \quad (78)$$

тогда

$$B = -I_0(\sqrt{\lambda}r_4) + \frac{\sqrt{\lambda}}{h_k}I_1(\sqrt{\lambda}r_4). \quad (79)$$

Общее решение (73) при подстановке этих значений приобретает вид

$$R(r) = \left[Y_0(\gamma) - \frac{\gamma}{h_k r_4} Y_1(\gamma) \right] I_0\left(\gamma \frac{r}{r_4}\right) - \left[I_0(\gamma) - \frac{\gamma}{h_k r_4} I_1(\gamma) \right] Y_0\left(\gamma \frac{r}{r_4}\right). \quad (80)$$

Характеристическое уравнение (76) теперь можно записать более компактно:

$$R'(r_4) + h_k R(r_4) = 0. \quad (81)$$

Собственные функции задачи Штурма-Лиувилля находятся из общего решения (80) подстановкой $\gamma = \gamma_n$:

$$R_n(r) = \left[Y_0(\gamma_n) - \frac{\gamma_n}{h_k r_4} Y_1(\gamma_n) \right] I_0\left(\gamma_n \frac{r}{r_4}\right) - \left[I_0(\gamma_n) - \frac{\gamma_n}{h_k r_4} I_1(\gamma_n) \right] Y_0\left(\gamma_n \frac{r}{r_4}\right). \quad (82)$$

Собственные функции ортогональны с весом r :

$$\int_{r_3}^{r_4} r R_m R_n dr = \begin{cases} 0, & m \neq n \\ N\{R_n\}, & m = n \end{cases}. \quad (83)$$

Теперь можно найти коэффициенты ряда (70)

$$C_n(\tau) = \frac{1}{N\{R_n\}} \int_{r_3}^{r_4} T r R_n dr = \frac{T_n(\tau)}{N\{R_n\}}. \quad (84)$$

Умножение уравнения (68) на $r R_n$ и интегрирование от r_3 до r_4 дает

$$\int_{r_3}^{r_4} R_n \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T}{\partial r} dr - \int_{r_3}^{r_4} \left(r R_n \frac{\partial T}{\partial \tau} \right) dr = 0, \quad (85)$$

$$\int_{r_3}^{r_4} R_n \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T}{\partial r} dr = \left[r R_n \frac{\partial T}{\partial r} - r R'_n T \right]_{r=r_3}^{r=r_4} + \int_{r_3}^{r_4} (r R'_n) T dr. \quad (86)$$

Далее вводится обозначение G_n , которое преобразуется с использованием граничных условий (69) и (72) к виду

$$G_n = r \left[R_n \frac{\partial T}{\partial r} - R'_n T \right]_{r=r_3}^{r=r_4} = r_3 \frac{q_k}{k_k} R_n(r_3). \quad (87)$$

Подстановка (86) и (87) в (85) дает

$$\int_{r_3}^{r_4} (r R'_n)' T dr - \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{r_3}^{r_4} r R_n T dr = -G_n, \quad (88)$$

так как

$$(r R'_n)' + \frac{\gamma_n^2}{r_4^2} r R_n = 0, \quad (89)$$

то

$$\int_{r_3}^{r_4} (r R'_n)' T dr = -\frac{\gamma_n^2}{r_4^2} \int_{r_3}^{r_4} r R_n T dr = -\frac{\gamma_n^2}{r_4^2} T_n(\tau). \quad (90)$$

После подстановки (90) в (88) получается дифференциальное уравнение первого порядка

$$T'_n(\tau) + \frac{\gamma_n^2}{r_4^2} T_n(\tau) = G_n \quad (91)$$

с начальным условием

$$T_n(0) = 0. \quad (92)$$

Решение этого уравнения

$$T_n(\tau) = P_n \exp \left\{ -\frac{\gamma_n^2}{r_4^2} \tau \right\} + \frac{r_4^2}{\gamma_n^2} G_n. \quad (93)$$

Подстановка (92) в (93) позволяет найти постоянную интегрирования

$$P_n = -\frac{r_4^2}{\gamma_n^2} G_n, \quad (94)$$

тогда

$$T_n(\tau) = \frac{r_4^2}{\gamma_n^2} G_n \left(1 - \exp \left\{ -\frac{\gamma_n^2}{r_4^2} \tau \right\} \right). \quad (95)$$

Подстановка (95) в (84) дает

$$C_n(\tau) = \frac{r_4^2}{\gamma_n^2} \frac{G_n}{N\{R_n\}} \left(1 - \exp \left\{ -\frac{\gamma_n^2}{r_4^2} \tau \right\} \right). \quad (96)$$

Ряд (70) с учетом (96) принимает вид

$$T = r_4^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G_n R_n(r)}{\gamma_n^2 N\{R_n\}} \left(1 - \exp \left\{ -\frac{\gamma_n^2}{r_4^2} \tau \right\} \right). \quad (97)$$

Для вычисления нормы $N\{R_n\}$ (89) умножено на $2rR'_n$ и проинтегрировано:

$$(rR'_n)^2 \Big|_{r=r_3}^{r=r_4} + \frac{\gamma_n^2}{r_4^2} \int_{r_3}^{r_4} r^2 \frac{d}{dr} R_n^2 dr = 0, \quad (98)$$

так как

$$\int_{r_3}^{r_4} r^2 \frac{d}{dr} R_n^2 dr = r^2 R_n^2 \Big|_{r=r_3}^{r=r_4} - 2 \int_{r_3}^{r_4} r \frac{d}{dr} R_n^2 dr, \quad (99)$$

то

$$\begin{aligned} N\{R_n\} = \int_{r_3}^{r_4} r R_n^2 dr &= \frac{r_4^2}{2\gamma_n^2} [r_4^2 R_n'^2(r_4) - r_3^2 R_n'^2(r_3)] + \\ &+ \frac{1}{2} [r_4^2 R_n^2(r_4) - r_3^2 R_n^2(r_3)]. \end{aligned} \quad (100)$$

Подстановка граничных условий (72) дает

$$N\{R_n\} = \frac{r_4^2}{2} \left(\frac{r_4^2 h_K^2}{\gamma_n^2} + 1 \right) R_n^2(r_4) - \frac{r_3^2}{2} R_n^2(r_3). \quad (101)$$

Как известно [179, с. 728]

$$I_V(x) Y_{V+1}(x) - I_{V+1}(x) Y_V(x) = -\frac{2}{\pi x}, \quad (102)$$

поэтому

$$R_n(r_4) = -\frac{\gamma_n}{h_k r_4} [I_0(\gamma_n) Y_1(\gamma_n) - I_1(\gamma_n) Y_0(\gamma_n)] = \frac{2}{\pi h_k r_4}, \quad (103)$$

$$\begin{aligned} R_n(r_3) &= \frac{Y_0(\gamma_n) - \frac{\gamma_n}{h_k r_4} Y_1(\gamma_n)}{Y_1\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right)} I_0\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right) Y_1\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right) - \\ &\quad - \frac{I_0(\gamma_n) - \frac{\gamma_n}{h_k r_4} I_1(\gamma_n)}{I_1\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right)} I_1\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right) Y_0\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right) = \\ &= \frac{2}{\pi h_k r_3 \gamma_n} \frac{\gamma_n I_1(\gamma_n) - h_k r_4 I_0(\gamma_n)}{I_1\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right)}. \end{aligned} \quad (104)$$

В преобразовании использовано характеристическое уравнение (76) в форме

$$\frac{h_k r_4 Y_0(\gamma_n) - \gamma_n Y_1(\gamma_n)}{Y_1\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right)} = \frac{h_k r_4 I_0(\gamma_n) - \gamma_n I_1(\gamma_n)}{I_1\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right)}. \quad (105)$$

Подстановка (104) в (87) дает

$$G_n = \frac{2q_k}{\pi k_k h_k \gamma_n} \frac{\gamma_n I_1(\gamma_n) - h_k r_4 I_0(\gamma_n)}{I_1\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right)}, \quad (106)$$

а подстановка (103) и (104) в (101) позволяет вычислить норму

$$N\{R_n\} = \frac{2}{\pi^2} \left[\frac{1}{h_k^2} + \frac{r_4^2}{\gamma_n^2} - \left(\frac{\gamma_n I_1(\gamma_n) - h_k r_4 I_0(\gamma_n)}{h_k \gamma_n I_1\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right)} \right)^2 \right]. \quad (107)$$

Ряд (97) можно представить в виде

$$T = R_4^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G_n R_n(r)}{\gamma_n^2 N\{R_n\}} - r_4^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G_n R_n(r)}{\gamma_n^2 N\{R_n\}} \exp\left\{-\frac{\gamma_n^2}{r_4^2} \tau\right\}. \quad (108)$$

Первое слагаемое, представляющее собой разложение стационарной температуры, можно просуммировать. Для этого необходимо функцию

$$f(r) = r_3 \frac{q_k}{k_k} \left(\ln \frac{r_4}{r} + \frac{1}{h_k r_4} \right) \quad (109)$$

разложить в ряд по собственным функциям задачи Штурма-Лиувилля

$$f(r) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n R_n(r). \quad (110)$$

Собственные функции ортогональны, поэтому коэффициенты разложения имеют вид

$$A_n = \frac{1}{N\{R_n\}} \int_{r_3}^{r_4} f(r) R_n(r) r dr. \quad (111)$$

Далее вычисляется интеграл

$$\begin{aligned} \int_{r_3}^{r_4} f(r) R_n(r) r dr &= r_3 \frac{q_k}{k_k} \left[Y_0(\gamma_n) - \frac{\gamma_n}{h_k r_4} Y_1(\gamma_n) \right] \times \\ &\times \int_{r_3}^{r_4} \left(\ln \frac{r_4}{r} + \frac{1}{h_k r_4} \right) I_0 \left(\gamma_n \frac{r}{r_4} \right) r dr - r_3 \frac{q_k}{k_k} \left[I_0(\gamma_n) - \frac{\gamma_n}{h_k r_4} I_1(\gamma_n) \right] \times \\ &\times \int_{r_4}^{r_3} \left(\ln \frac{r_4}{r} + \frac{1}{h_k r_4} \right) Y_0 \left(\gamma_n \frac{r}{r_4} \right) r dr. \end{aligned} \quad (112)$$

$$\begin{aligned} \int_{r_3}^{r_4} \left(\ln \frac{r_4}{r} + \frac{1}{h_k r_4} \right) I_0 \left(\gamma_n \frac{r}{r_4} \right) r dr &= \\ &= \frac{r_4}{\gamma_n h_k} I(\gamma_n) - \frac{r_3 r_4}{\gamma_n} \left(\ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{h_k r_4} \right) I_1 \left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4} \right) - \\ &- \frac{r_4^2}{\gamma_n^2} \left(I_0(\gamma_n) - I_0 \left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4} \right) \right). \end{aligned} \quad (113)$$

$$\begin{aligned} \int_{r_3}^{r_4} \left(\ln \frac{r_4}{r} + \frac{1}{h_k r_4} \right) Y_0 \left(\gamma_n \frac{r}{r_4} \right) r dr &= \\ &= \frac{r_4}{\gamma_n h_k} Y_1(\gamma_n) - \frac{r_3 r_4}{\gamma_n} \left(\ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{h_k r_4} \right) Y_1 \left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4} \right) - \\ &- \frac{r_4^2}{\gamma_n^2} \left(Y_0(\gamma_n) - Y_0 \left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4} \right) \right). \end{aligned} \quad (114)$$

Подстановка интегралов (113) и (114) в (112) после преобразований дает

$$\int_{r_3}^{r_4} f(r) R_n(r) r dr = -\frac{2 q_k r_4^3}{\pi k_k \gamma_n^3} \frac{I_0(\gamma_n) - \frac{\gamma_n}{h_k r_4} I_1(\gamma_n)}{I_1\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right)}. \quad (115)$$

Подстановка выражений (115) и (111) в (110), с учетом (106), дает

$$r_4^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G_n R_n(r)}{\gamma_n^2 N\{R_n\}} = r_3 \frac{q_k}{k_k} \left(\ln \frac{r_4}{r} + \frac{1}{h_k r_4} \right). \quad (116)$$

Подстановка выражения (116) в (108) и возврат к переменным T_k и t позволяет записать выражение для температурного поля корпуса шнекового прессы при его конвективном теплообмене с окружающей средой

$$T_k = T_{0k} + r_3 \frac{q_k}{k_k} \left(\ln \frac{r_4}{r} + \frac{1}{h_k r_4} \right) - r_4^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G_n R_n(r)}{\gamma_n^2 N\{R_n\}} \exp \left\{ -\frac{\gamma_n^2 k_k}{r_4^2 c_k \rho_k} t \right\}. \quad (117)$$

При постоянной температуре T_{0k} наружной поверхности корпуса (например, при интенсивном принудительном охлаждении) температурное поле может быть найдено из выражений (76), (82), (106), (107) и (117) при подстановке в них значения h_k , стремящегося к бесконечности:

$$T_k = T_{0k} + r_3 \frac{q_k}{k_k} \times \left(\ln \frac{r_4}{r} - \pi \frac{r_4}{r_3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_0(\gamma_n) I_1\left(\gamma_n \frac{r_4}{r_3}\right) R_n(r)}{\gamma_n \left[I_0^2(\gamma_n) - I_1^2\left(\gamma_n \frac{r_4}{r_3}\right) \right]} \exp \left\{ -\frac{\gamma_n^2 k_k}{r_4^2 c_k \rho_k} t \right\} \right), \quad (118)$$

где

$$R_n(r) = Y_0(\gamma_n) I_0\left(\gamma_n \frac{r}{r_4}\right) - I_0(\gamma_n) Y_0\left(\gamma_n \frac{r}{r_4}\right), \quad (119)$$

а γ_n – последовательные корни уравнения

$$I_0(\gamma) Y_1\left(\gamma \frac{r_3}{r_4}\right) - I_1\left(\gamma \frac{r_3}{r_4}\right) Y_0(\gamma) = 0. \quad (120)$$

Задача о нахождении температурного поля в шнеке отличается от решенной лишь граничными условиями. Поэтому, не повторяя преобразований, приводим сразу конечный результат (индекс «ш» соответствует шнеку, как ранее «к» – корпусу). Температурное поле шнека при его конвективном теплообмене со средой (шнек полый, теплоотвод по внутренней поверхности) имеет вид

$$T_{\text{ш}} = T_{0\text{ш}} + r_2 \frac{q_{\text{ш}}}{k_{\text{ш}}} \left(\ln \frac{r}{r_1} + \frac{1}{h_{\text{ш}} r_1} \right) -$$

$$- r_1^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G_n R_n(r)}{\gamma_n^2 N\{R_n\}} \exp \left\{ - \frac{\gamma_n^2}{r_1^2} \frac{k_{\text{ш}}}{c_{\text{ш}} \rho_{\text{ш}}} t \right\}, \quad (121)$$

где

$$R_n(r) = \left[Y_0(\gamma_n) - \frac{\gamma_n}{h_{\text{ш}} r_1} Y_1(\gamma_n) \right] I_0 \left(\gamma_n \frac{r}{r_1} \right) -$$

$$- \left[I_0(\gamma_n) - \frac{\gamma_n}{h_{\text{ш}} r_1} I_1(\gamma_n) \right] Y_0 \left(\gamma_n \frac{r}{r_1} \right), \quad (122)$$

$$G_n = -r_2 \frac{q_{\text{ш}}}{k_{\text{ш}}} R_n(r_2), \quad (123)$$

$$N\{R_n\} = \frac{r_2^2}{2} R_n^2(r_2) - \frac{r_1^2}{2} \left(\frac{r_1^2 h_{\text{ш}}^2}{\gamma_n^2} + 1 \right) R_n^2(r_1), \quad (124)$$

а γ_n – последовательные корни уравнения

$$R'(r_1) + h_{\text{ш}} R(r_1) = 0. \quad (125)$$

При постоянной температуре $T_{0\text{ш}}$ внутри шнека (принудительное охлаждение по осевому отверстию) искомое температурное поле находится подстановкой в выражения (121)–(125) значения $h_{\text{ш}}$, стремящегося к бесконечности:

$$T_{\text{ш}} = T_{0\text{ш}} + r_2 \frac{q_{\text{ш}}}{k_{\text{ш}}} \times$$

$$\times \left(\ln \frac{r}{r_1} - \pi \frac{r_1}{r_2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_0(\gamma_n) I_1 \left(\gamma_n \frac{r_2}{r_1} \right) R_n(r)}{\gamma_n \left[I_0^2(\gamma_n) - I_1^2 \left(\gamma_n \frac{r_2}{r_1} \right) \right]} \exp \left\{ - \frac{\gamma_n^2}{r_1^2} \frac{k_{\text{ш}}}{c_{\text{ш}} \rho_{\text{ш}}} t \right\} \right), \quad (126)$$

$$R_n(r) = Y_0(\gamma_n) I_0 \left(\gamma_n \frac{r}{r_1} \right) - I_0(\gamma_n) Y_0 \left(\gamma_n \frac{r}{r_1} \right), \quad (127)$$

а γ_n – последовательные корни уравнения

$$I_0(\gamma) Y_1 \left(\gamma \frac{r_2}{r_1} \right) - I_1 \left(\gamma \frac{r_2}{r_1} \right) Y_0(\gamma) = 0. \quad (128)$$

Таким образом, найдены стационарные температурные поля, возникающие в элементах шнековой машины при формовании

сжимаемых пластичных сред. Решены задачи теории теплопроводности как для шнекового цилиндра (корпуса пресса), так и для полого или сплошного цилиндрического шнека.

Рассмотрены разные варианты теплообмена элементов пресса с окружающей средой: от простого конвективного по всем свободным поверхностям до фиксации температуры посредством принудительного охлаждения наружной поверхности корпуса пресса или внутренней поверхности полого шнека. Полученные решения справедливы лишь для установившегося (стационарного) процесса формования.

Витебский государственный технологический университет

Глава 3. Основы расчета шнековых машин

Проведенный теоретический анализ процесса экструзии сжимаемой пластичной среды позволил получить ряд простых соотношений, составивших основу системы конструкторских расчетов силовых шнековых машин.

3.1 Расчет шнека

Необходимую длину канала шнека определяют по формуле (18). Профиль канала рассчитывают путем решения уравнения (23). Для этого глубина канала H разбивается на N равных частей и осуществляется переход к безразмерным переменным путем деления всех размеров на x_0 и всех напряжений на τ_0 :

$$x = \frac{x}{x_0}; \quad y = \frac{y}{x_0}; \quad l = \frac{l(y)}{x_0}; \quad L = \frac{l}{x_0}; \quad H = \frac{H}{x_0};$$
(129)

$$\tau = \frac{\tau}{\tau_0}; \quad x_0 = \frac{x_0}{x_0} = 1; \quad \tau_0 = \frac{\tau_0}{\tau_0} = 1.$$

Для удобства записи безразмерные переменные далее обозначены так же, как и соответствующие размерные величины; недоразумений это не вызывает.

Записав уравнение (23) в двух соседних узлах

$$\tau_i x_i + \frac{l_i}{L} = 1; \quad \tau_{i-1} x_{i-1} + \frac{l_{i-1}}{L} = 1$$
(130)

и вычтя одно из другого, получаем систему уравнений

$$\tau_{i-1} x_{i-1} - \tau_i x_i = \frac{l_i - l_{i-1}}{L}, \quad \text{где } i = 1, 2, \dots, N,$$
(131)

$$\begin{aligned} (l_i - l_{i-1})^2 &= (x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 = \\ &= (x_i - x_{i-1})^2 = \frac{H^2}{N^2}, \end{aligned}$$
(132)

$$L = l_N + x_N = \sum_{i=1}^N (l_i - l_{i-1}) + x_N. \quad (133)$$

Так как правые части выражений (131) положительны, можно записать

$$\frac{\tau_{i-1}}{\tau_i} > \frac{x_i}{x_{i-1}}. \quad (134)$$

Решение уравнения (131) относительно x_i дает

$$x_i = \frac{1}{A_i} \left(B_i \pm \sqrt{B_i^2 - A_i C_i} \right), \quad (135)$$

$$\begin{aligned} A_i &= L^2 \tau_i^2 - 1; & B_i &= x_{i-1} (L^2 \tau_i \tau_{i-1} - 1); \\ C_i &= x_{i-1}^2 (L^2 \tau_{i-1}^2 - 1) - \frac{H^2}{N^2}. \end{aligned} \quad (136)$$

Легко убедиться, что знак «+» в выражении (135) не удовлетворяет условию (134). Действительно, при $\tau_i = \tau_{i-1} = 1$ из (134) следует $x_{i-1} > x_i$, а из (136)

$$A_i = L^2 - 1; \quad B_i = A_i x_{i-1}; \quad C_i = A_i x_{i-1}^2 - \frac{H^2}{N^2}. \quad (137)$$

Подстановка этих выражений в (135) дает

$$\frac{x_i}{x_{i-1}} = 1 \pm \frac{H}{A_i N x_{i-1}}. \quad (138)$$

Так как $\frac{H}{A_i N x_{i-1}} > 0$, то решение уравнения (131) имеет вид

$$x_i = \frac{1}{A_i} \left(B_i - \sqrt{B_i^2 - A_i C_i} \right). \quad (139)$$

Задача расчета профиля канала по заданному распределению напряжений и триботехническим свойствам материала сведена к решению системы i нелинейных уравнений (135) с $i + 1$ неизвестными

величинами.

Система замыкается уравнением

$$L = x_N + \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + \frac{H^2}{N^2}}. \quad (140)$$

Решается эта система так. Сначала задают начальное приближение длины подвижного контура L_0 и предельно допустимую погрешность длины ε . Затем по формуле (139) последовательно рассчитывают все x_i , а по формуле (140) – L . Если требуемая точность не достигнута, то есть если $(L - L_0) > \varepsilon$, то переменной L_1 присваивают значение $\frac{1}{2}(L_0 + L)$ и вычисления повторяют. Расчет заканчивают при достижении требуемой точности.

Алгоритм вычислений представлен на рисунке 6. Для расчетов выбрано параболическое распределение касательных напряжений по глубине канала: $\tau = 1 + ay + by^2$. Такое распределение определяется всего двумя независимыми параметрами: a и b . В расчетах линейные размеры и напряжения являются безразмерными величинами в соответствии с соотношениями (129).

Расчеты проведены при следующих значениях: $\varepsilon = 0,01$, $N = 20$, $H = 1$. По заданному распределению напряжений $\tau(y)$ рассчитан профиль $x(y)$; шаг по оси y выбран равным 0,05.

Расчеты профилей для распределения $\tau = 1 + by^2$ представлены в таблице 5, а для распределения $\tau = 1 + ay$ – в таблице 6. Таблица 7 содержит результаты расчетов некоторых более сложных профилей.

Графически результаты расчетов изображены на рисунках 7–17.

Рисунок 7 подтверждает соотношение (26): для равномерного распределения напряжений по глубине необходим канал треугольного профиля. Угол наклона образующей профиля (отношение ширины канала к его глубине) определяется необходимой величиной касательных напряжений. Это простая и важная для практики форма канала. Можно сделать вывод: наиболее распространенный прямоугольный канал неравномерно уплотняет материал. Лучший профиль канала шнека – треугольный.

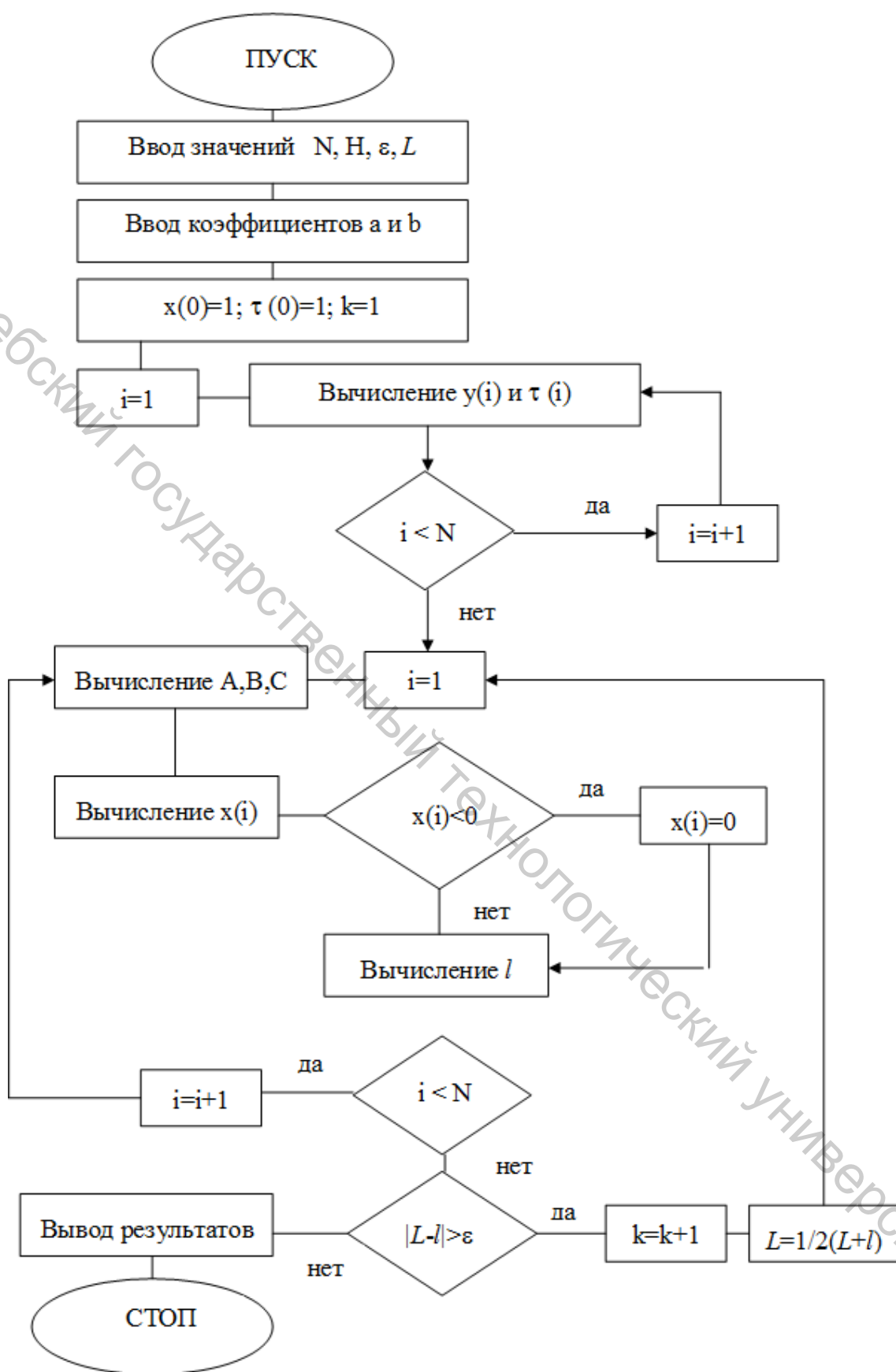


Рисунок 6 – Алгоритм расчета профиля канала шнека

Таблица 5 – Результаты расчетов профилей каналов ($a = 0$)

	$b = 0$		$b = -0,5$		$b = 0,5$		$b = 1$	
Y	X	τ	X	τ	X	τ	X	τ
0,05	0,95	1,00	0,97	1,00	0,95	1,00	0,95	1,00
0,10	0,90	1,00	0,95	1,00	0,89	1,01	0,89	1,01
0,15	0,85	1,00	0,93	0,99	0,84	1,01	0,82	1,02
0,20	0,80	1,00	0,91	0,98	0,77	1,02	0,75	1,04
0,25	0,75	1,00	0,89	0,97	0,71	1,03	0,67	1,06
0,30	0,71	1,00	0,88	0,96	0,65	1,05	0,60	1,09
0,35	0,66	1,00	0,86	0,94	0,59	1,06	0,53	1,12
0,40	0,61	1,00	0,85	0,92	0,52	1,08	0,46	1,16
0,45	0,56	1,00	0,84	0,90	0,47	1,10	0,40	1,20
0,50	0,51	1,00	0,84	0,88	0,41	1,13	0,34	1,25
0,55	0,46	1,00	0,83	0,85	0,35	1,15	0,29	1,30
0,60	0,41	1,00	0,83	0,82	0,30	1,18	0,24	1,36
0,65	0,36	1,00	0,83	0,79	0,26	1,21	0,20	1,42
0,70	0,31	1,00	0,84	0,75	0,21	1,25	0,16	1,49
0,75	0,26	1,00	0,84	0,72	0,17	1,28	0,13	1,56
0,80	0,22	1,00	0,85	0,68	0,13	1,32	0,10	1,64
0,85	0,17	1,00	0,87	0,64	0,10	1,36	0,07	1,72
0,90	0,12	1,00	0,89	0,59	0,06	1,41	0,05	1,81
0,95	0,07	1,00	0,91	0,55	0,03	1,45	0,02	1,90
1,00	0,02	1,00	0,94	0,50	0,01	1,50	0,00	2,00
	$L = 1,42$		$L = 1,99$		$L = 1,43$		$L = 1,44$	

Таблица 6 – Результаты расчетов профилей каналов ($b = 0$)

	$a = 0$		$a = -0,5$		$a = 0,5$		$a = -0,6$	
Y	X	τ	X	τ	X	τ	X	τ
0,05	0,95	1,00	1,00	0,98	0,90	1,03	1,01	0,97
0,10	0,90	1,00	1,00	0,95	0,81	1,05	1,02	0,94
0,15	0,85	1,00	1,00	0,93	0,74	1,08	1,03	0,91
0,20	0,80	1,00	1,00	0,90	0,66	1,10	1,04	0,88
0,25	0,75	1,00	1,00	0,88	0,60	1,13	1,06	0,85
0,30	0,71	1,00	1,00	0,85	0,54	1,15	1,07	0,82
0,35	0,66	1,00	1,00	0,83	0,48	1,17	1,08	0,79
0,40	0,61	1,00	1,00	0,80	0,43	1,20	1,10	0,76
0,45	0,56	1,00	1,00	0,78	0,39	1,23	1,12	0,73
0,50	0,51	1,00	1,00	0,75	0,34	1,25	1,13	0,70
0,55	0,46	1,00	1,00	0,73	0,30	1,28	1,15	0,67
0,60	0,41	1,00	1,00	0,70	0,26	1,30	1,17	0,64
0,65	0,36	1,00	1,00	0,68	0,22	1,33	1,20	0,61
0,70	0,31	1,00	1,00	0,65	0,19	1,35	1,22	0,58
0,75	0,26	1,00	0,99	0,63	0,15	1,38	1,25	0,55
0,80	0,22	1,00	0,99	0,60	0,12	1,40	1,27	0,52
0,85	0,17	1,00	0,99	0,57	0,09	1,43	1,30	0,49
0,90	0,12	1,00	0,99	0,55	0,06	1,45	1,34	0,46
0,95	0,07	1,00	0,99	0,52	0,03	1,48	1,37	0,43
1,00	0,02	1,00	0,99	0,50	0,01	1,50	1,41	0,40
	$L = 1,42$		$L = 1,99$		$L = 1,44$		$L = 2,51$	

Таблица 7 – Результаты расчетов более сложных профилей

	$a = -2,0$ $b = 5,0$		$a = -1,0$ $b = 1,0$		$a = -1,0$ $b = 3,0$		$a = -0,5$ $b = 0,2$	
Y	X	τ	X	τ	X	τ	X	τ
0,05	1,05	0,91	1,02	0,95	1,01	0,96	0,99	0,98
0,10	1,08	0,85	1,03	0,91	1,00	0,93	0,98	0,95
0,15	1,10	0,81	1,03	0,87	0,98	0,92	0,97	0,93
0,20	1,07	0,80	1,04	0,84	0,92	0,92	0,95	0,91
0,25	0,98	0,81	1,03	0,81	0,83	0,94	0,94	0,89
0,30	0,82	0,85	1,02	0,79	0,72	0,97	0,92	0,87
0,35	0,64	0,91	1,00	0,77	0,61	1,02	0,94	0,85
0,40	0,49	1,00	0,97	0,76	0,50	1,08	0,87	0,83
0,45	0,38	1,11	0,92	0,75	0,41	1,16	0,84	0,82
0,50	0,29	1,25	0,85	0,75	0,33	1,25	0,81	0,80
0,55	0,22	1,41	0,76	0,75	0,26	1,36	0,78	0,79
0,60	0,16	1,60	0,66	0,76	0,21	1,48	0,73	0,77
0,65	0,12	1,81	0,55	0,77	0,16	1,62	0,69	0,76
0,70	0,09	2,05	0,44	0,79	0,13	1,77	0,64	0,75
0,75	0,07	2,31	0,34	0,81	0,09	1,94	0,58	0,74
0,80	0,05	2,60	0,26	0,84	0,07	2,12	0,51	0,73
0,85	0,03	2,91	0,18	0,87	0,05	2,32	0,43	0,72
0,90	0,02	3,25	0,12	0,91	0,03	2,53	0,34	0,71
0,95	0,01	3,61	0,06	0,95	0,01	2,76	0,24	0,71
1,00	0,00	4,00	0,02	1,00	0,00	3,00	0,13	0,70
	$L = 1,68$		$L = 1,57$		$L = 1,51$		$L = 1,53$	

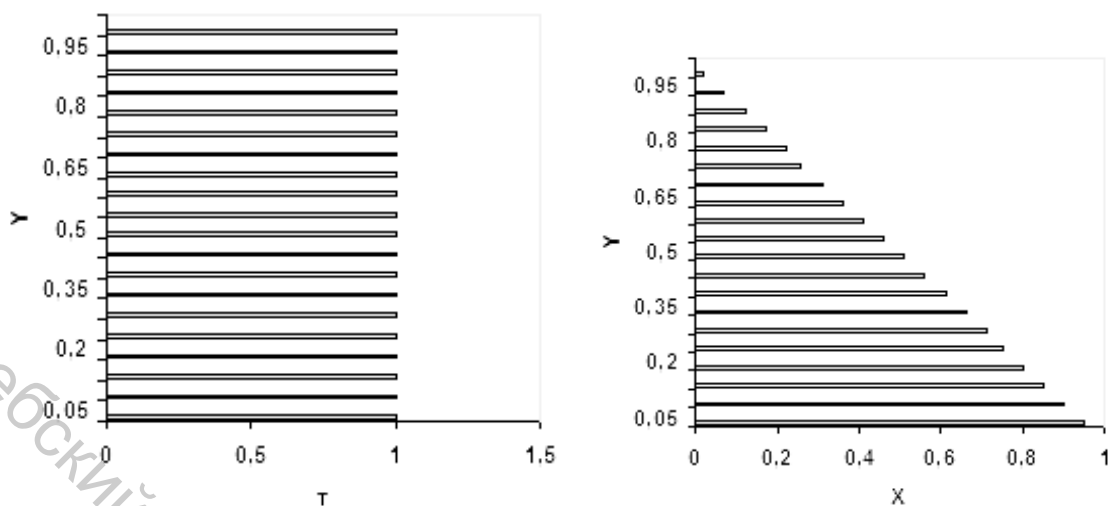


Рисунок 7 – Равномерное распределение напряжений и соответствующий ему профиль канала ($a = 0, b = 0$)

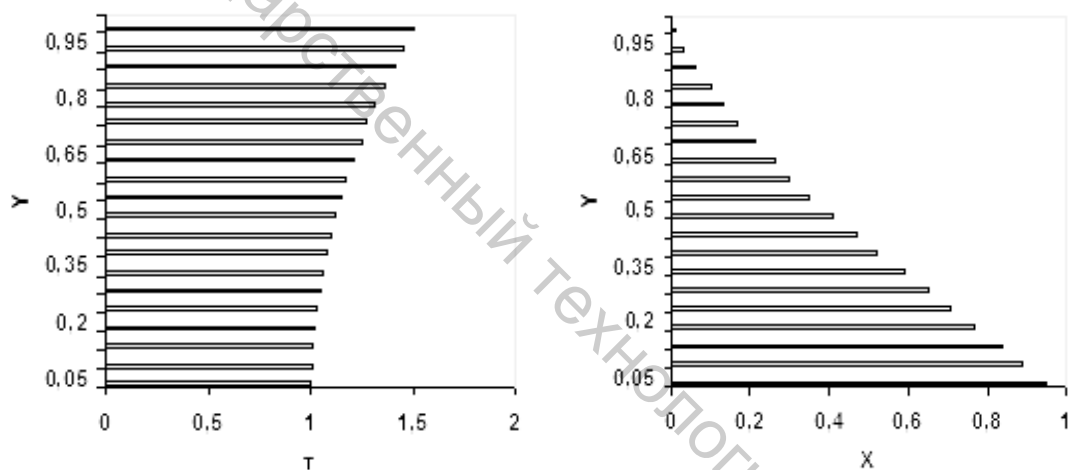


Рисунок 8 – Распределение касательных напряжений и соответствующий профиль канала ($a = 0, b = 0,5$)

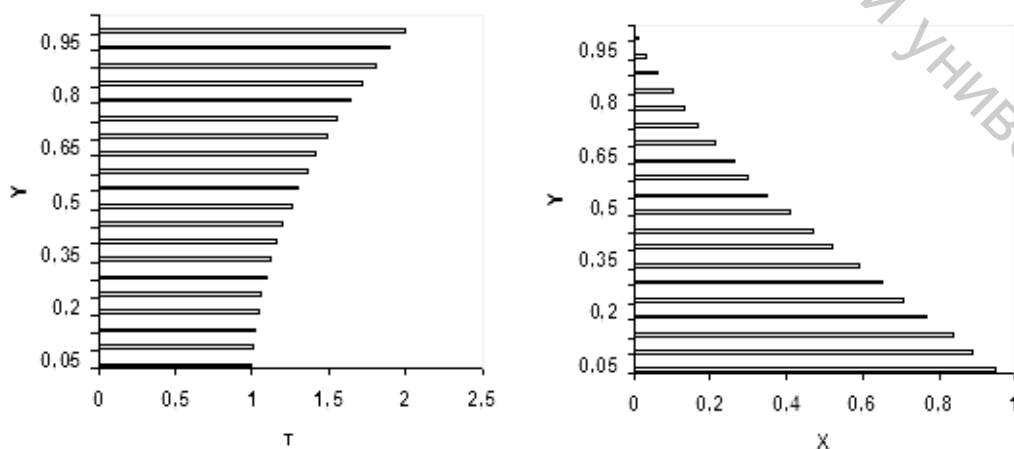


Рисунок 9 – Распределение касательных напряжений и соответствующий профиль канала ($a = 0, b = 1$)

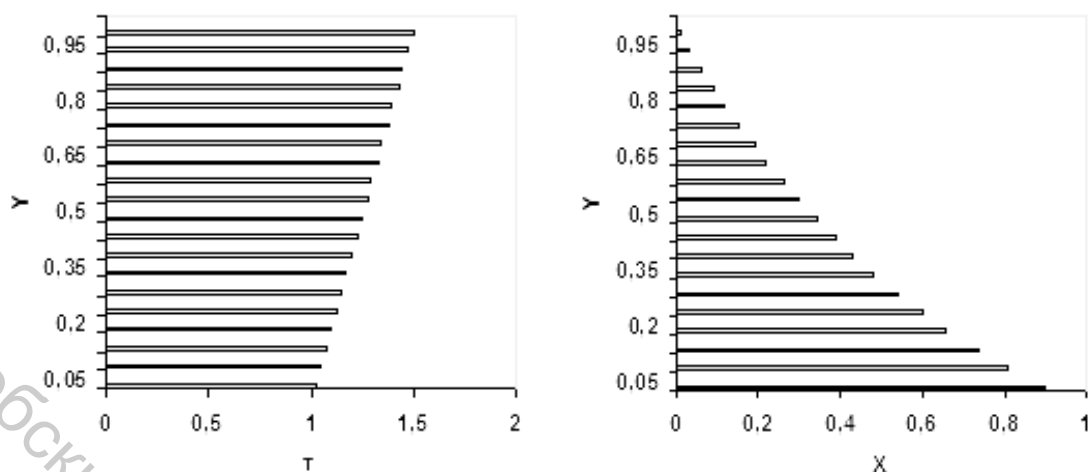


Рисунок 10 – Распределение касательных напряжений и соответствующий профиль канала ($a = 0,5$, $b = 0$)

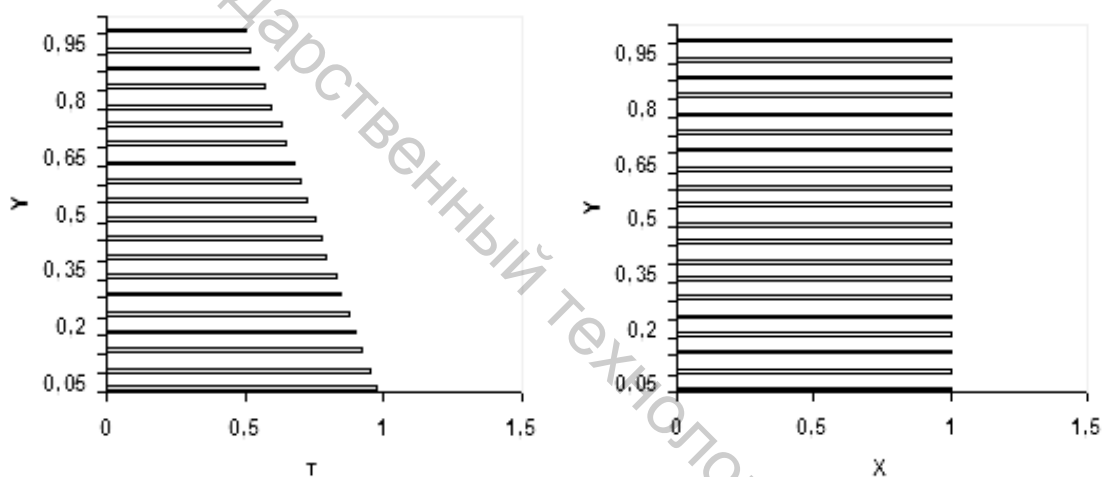


Рисунок 11 – Распределение касательных напряжений в канале прямоугольного профиля ($a = -0,5$, $b = 0$)

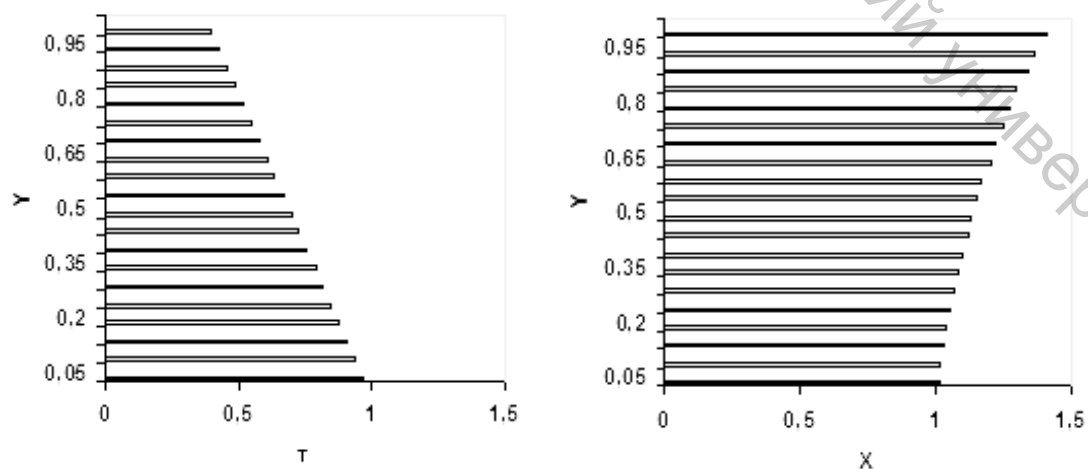


Рисунок 12 – Распределение касательных напряжений и соответствующий ему профиль канала ($a = -0,6$, $b = 0$)

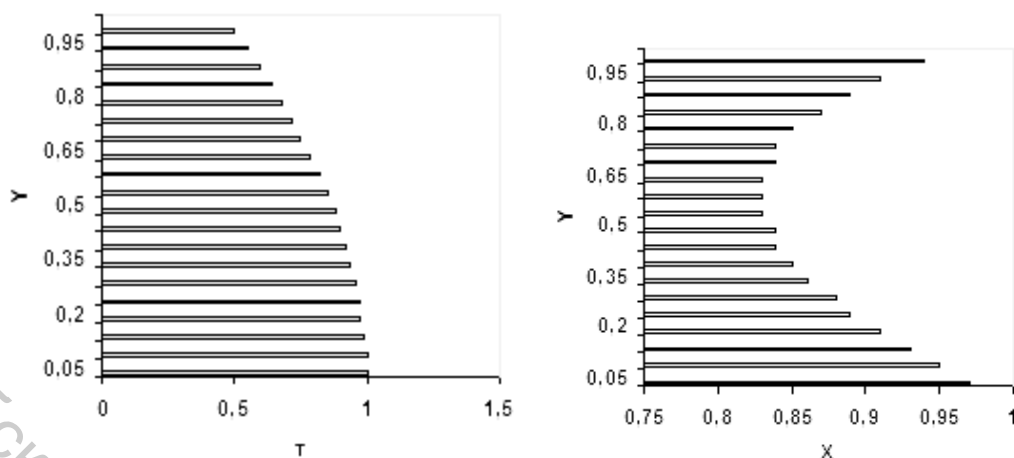


Рисунок 13 – Распределение касательных напряжений и соответствующий профиль канала ($a = 0, b = -0,5$)

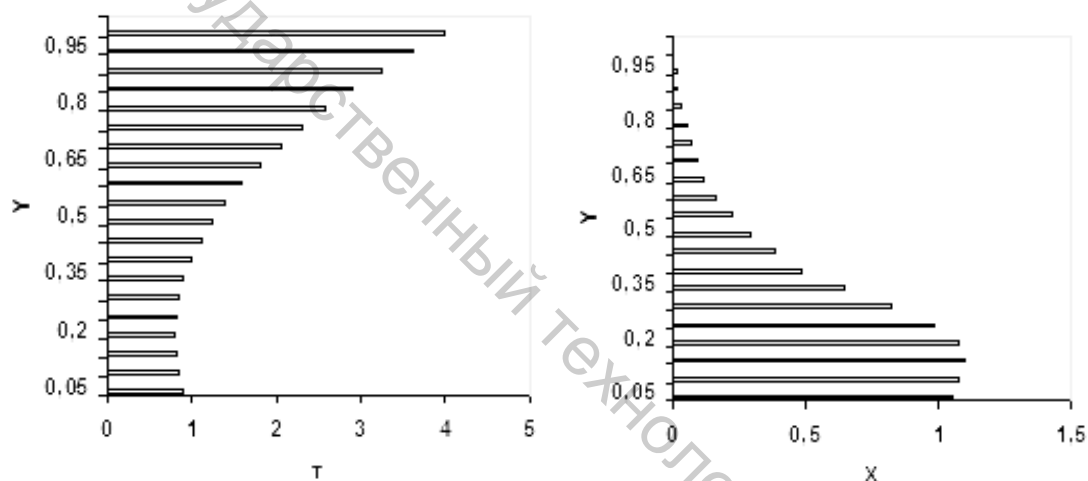


Рисунок 14 – Распределение касательных напряжений и соответствующий профиль канала ($a = -2, b = 5$)

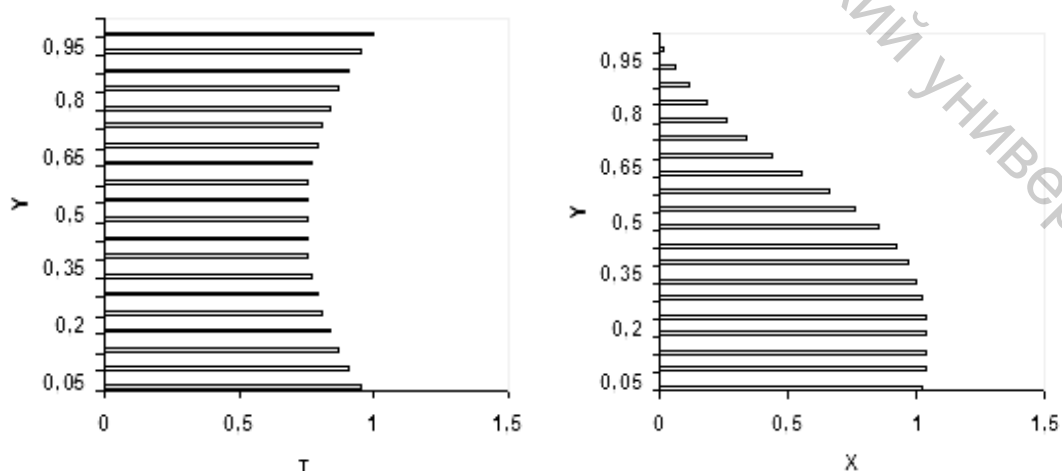


Рисунок 15 – Распределение касательных напряжений и соответствующий профиль канала ($a = -1, b = 1$)

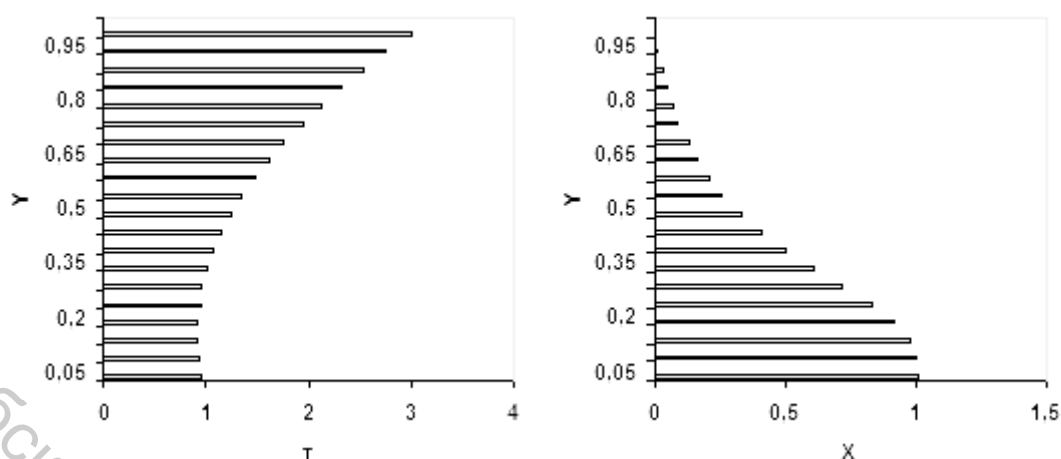


Рисунок 16 – Распределение касательных напряжений и соответствующий профиль канала ($a = -1, b = 3$)

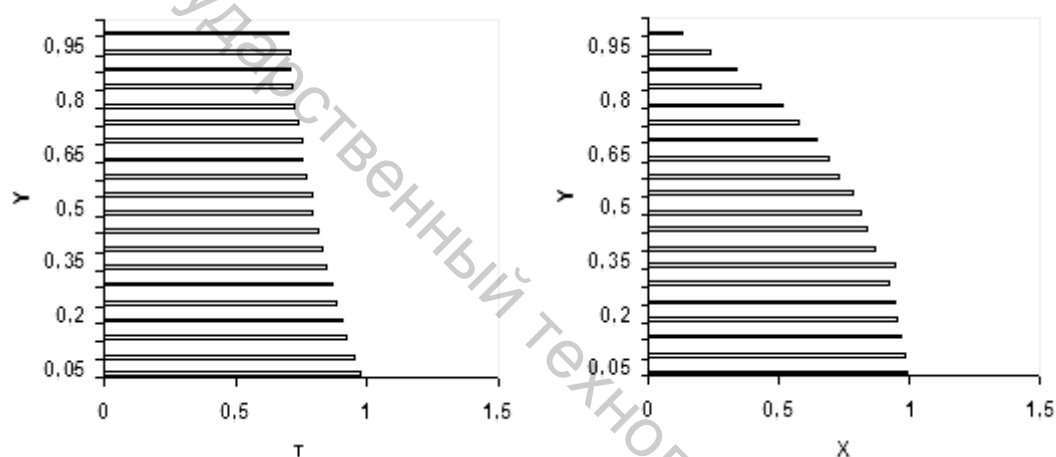


Рисунок 17 – Распределение касательных напряжений и соответствующий профиль канала ($a = -0,5, b = 0,2$)

Рисунки 8–9 показывают, как незначительные, едва заметные отклонения профиля канала от прямолинейного приводят к значительной неравномерности распределения напряжений (а значит и плотностей) в материале. Профиль, изображенный на рисунке 9, весьма близок к треугольному, а касательные напряжения по глубине канала изменяются почти вдвое. Это говорит о том, как важна точность при изготовлении шнека. Устоявшаяся практика изготовления шнеков методом литья, восходящая к технологии производства винтов для мясорубок, порочна. Нужны более точные методы обработки.

Рисунки 7–10 показывают, что существуют каналы, позволяющие получать изделия с преимущественной пропрессовкой внутренних слоев. Несмотря на кажущуюся простоту этого заключения, его трудно сделать без теоретического анализа. Дополнительное уплотнение внутренних слоев среды, находящейся в канале, имеет практическое значение. Экструзия сопровождается большим уплотнением наружных

слоев изделия из-за трения о поверхность инструмента. Компенсировать это можно, предварительно уплотнив материал изнутри.

На рисунке 11 изображен наиболее распространенный канал прямоугольного профиля. Главное его преимущество – простота изготовления на станках. Кроме того, такой канал не имеет узких мест и хорошо самоочищается при формовании. Недостатком же является неоднородность касательных напряжений в материале – на противоположных поверхностях канала они различаются примерно вдвое, что может приводить к получению дефектных прессовок. Изделия, сформованные на шнеках с прямоугольным каналом, часто изгибаются или даже разрушаются при спекании.

Практически такое же распределение напряжений, как и в прямоугольном канале, обеспечивает профиль, изображенный на рисунке 12. Это решение наглядно показывает, что одному и тому же напряженному состоянию может соответствовать несколько различных профилей канала. При проектировании шнека необходимо выбрать наилучший по каким-либо параметрам профиль.

Рисунки 13–17 дают представление о некоторых более сложных каналах и их возможностях. В качестве меры, уменьшающей неравномерное распределение плотности в изделии, можно рекомендовать увеличение степени радиального обжатия материала. Однако больший эффект дает приведение параметров канала шнека в соответствие с расчетными величинами.

3.2 Энергосиловые расчеты

При проектировании шнековых устройств необходимо решить ряд задач, связанных с энергетикой процесса формования. Обычно требуется ответить на следующие вопросы: какие усилия действуют на различные элементы пресса, каковы вращающие моменты на шнеке, какой мощности должен быть привод пресса, какова энергоемкость процесса формования и можно ли ее уменьшить. Схема разложения полной скорости материала на осевые составляющие и силы, действующие на элементы шнекового пресса, изображены на рисунке 18.

Рассматривается развертка винтового канала на плоскость, силы инерции считаются пренебрежимо малыми по сравнению с силами трения. Как и раньше, ось z направлена вдоль канала от его выхода ко входу (от матрицы к бункеру). Ось x – ось шнека; она совпадает с направлением экструзии. Угол подъема винтового канала φ для наглядности преувеличен. Неподвижный на самом деле корпус (цилиндр в котором установлен шнек) в выбранной системе координат

движется со скоростью V_K , а материал по каналу – со скоростью V_M . Скорость материала относительно корпуса обозначена V_{KM} .

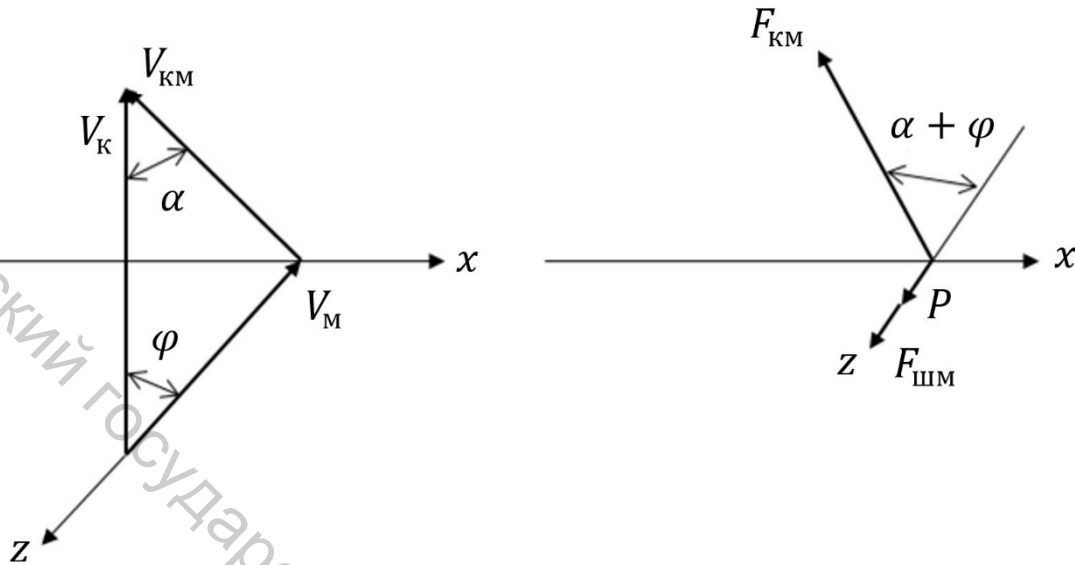


Рисунок 18 – Силы, действующие на материал и элементы шнекового пресса

На элемент материала dz действуют три силы: сила трения о корпус F_{KM} , сила трения о шнек $F_{шм}$, и усилие P , возникающее из-за перепада давления вдоль канала. Направления силы F_{KM} и скорости V_{KM} могут не совпадать. Материал движется вдоль канала, вообще говоря, с проскальзыванием, мерой которого является угол между скоростями V_K и V_{KM} , обозначенный на схеме буквой α ($0 < \alpha < \pi/2$). При $\alpha = 0$ имеет место полное окружное проскальзывание материала относительно корпуса: он вращается со шнеком как одно целое и вперед не перемещается. При $\alpha = \pi/2$ окружного проскальзывания нет и среда перемещается вперед с максимально возможной скоростью. Из треугольника скоростей видно, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{V_M \sin \varphi}{V_K - V_M \cos \varphi}. \quad (141)$$

Тангенс является более удобной характеристикой окружного проскальзывания среды, чем угол α . Он используется наравне с традиционным коэффициентом окружного проскальзывания $\eta = V_M/V_K$; связь между ними следующая:

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{1}{\eta} - \operatorname{ctg} \varphi. \quad (142)$$

Уравнение равновесия проекций сил на ось z имеет вид

$$F_{\text{шм}} + P = F_{\text{км}} \cos(\alpha + \varphi). \quad (143)$$

Чтобы равновесие не нарушалось, необходимо выполнение условия

$$\alpha + \varphi < \frac{\pi}{2}. \quad (144)$$

Так как угол подъема φ винтовой нарезки шнека всегда больше нуля, то можно сделать вывод: если трение материала о корпус изотропно (коэффициенты трения равны по всем направлениям), то *шнековое формование без окружного проскальзывания среды невозможно.*

Силы трения материала о корпус и шнек равны соответственно

$$F_{\text{км}} = \xi f_{\text{к}} p l_{\text{к}} dz; \quad F_{\text{шм}} = \xi f_{\text{ш}} p l_{\text{ш}} dz, \quad (145)$$

где $f_{\text{к}}$ и $f_{\text{ш}}$ – коэффициенты трения материала о корпус и шнек; ξ – коэффициент бокового давления; $l_{\text{к}}$ и $l_{\text{ш}}$ – части профиля, принадлежащие корпусу и шнеку.

Сила, действующая на материал вдоль канала

$$P = S dp, \quad (146)$$

где S – площадь поперечного сечения канала; dp – перепад давления на dz .

Подстановка сил (145)–(146) в уравнение (143) приводит к обыкновенному дифференциальному уравнению с разделяющимися переменными

$$dp = -A p dz; \quad A = \frac{\xi}{S} [f_{\text{ш}} l_{\text{ш}} - f_{\text{к}} l_{\text{к}} \cos(\alpha + \varphi)]. \quad (147)$$

Если трение материала о цилиндр анизотропно (например, у него рифленая поверхность), то надо задать зависимость $f_{\text{к}} = f_{\text{к}}(\alpha)$.

Решение уравнения (147) при граничном условии $p(0) = p_0$

$$z = \frac{1}{A} \ln \frac{p_0}{p}. \quad (148)$$

Коэффициент A зависит от свойств материала (коэффициентов

трения и бокового давления), геометрии канала и величины окружного проскальзывания, но не зависит от давления, что позволяет аналитически решить уравнение (147).

При свободной подаче измельченного материала из бункера давление на входе в канал определяется лишь гравитацией:

$$p(L) = \rho gh, \quad (149)$$

где ρ – насыпная плотность материала; g – ускорение свободного падения; h – глубина канала. Длина рабочей части канала находится из (148)

$$L = \frac{1}{A} \ln \frac{p_0}{\rho gh}. \quad (150)$$

Канал такой длины необходим для создания давления прессования p_0 . Это давление является основной силовой характеристикой шнекового пресса. Из приведенного выше анализа видно, что оно зависит от конструкции шнека, геометрии матрицы и физических свойств среды. Именно эту величину необходимо задать первой при проектировании новой машины.

Давление p_0 является общим при расчете шнека и матрицы. Шнек должен быть сконструирован так, чтобы при закрытой матрице (наиболее тяжелый режим работы) он развивал на выходе давление p_0 . С другой стороны, матрица также должна обеспечивать поддержание этого давления. Несколько упрощая реальную ситуацию, можно сказать, что давление p_0 – это давление истечения среды через правильно подобранную для нее матрицу.

Таким образом, шнек и матрица в грамотно сконструированном устройстве должны соответствовать друг другу, и расчетным критерием этого соответствия является давление p_0 . Например, если нарушить баланс и установить матрицу, рассчитанную на большее рабочее давление, то шнек не сможет его обеспечить и процесс экструзии остановится (материал начнет проворачиваться вместе со шнеком). С другой стороны, если установить шнек, рассчитанный на большее давление прессования, чем необходимо для данной матрицы, то его потенциал не будет полностью реализован и это неоправданно увеличит энергозатраты (на вращение слишком длинного шнека надо больше энергии).

В экспериментальной части будет показано, что давление p_0 является важной характеристикой пластически сжимаемой среды. При его достижении материал уплотняется до беспористого компактного состояния и становится практически несжимаемым. Также будет показано, что если материал не может быть уплотнен до такого состояния без деформации частиц основной фазы, то его экструзия

невозможна из-за образования динамического свода, состоящего из частиц этой скелетной фазы. Примером такой непригодной для экструзии среды может служить непластифицированный металлический или керамический порошок – его никаким шнеком через матрицу не продавить.

При сделанных допущениях неважно, где и как канал расположен – на наружной, внутренней или конической поверхности шнека. На данном этапе расчетов не имеет значения и профиль канала. Момент, необходимый для вращения шнека, складывается из двух составляющих:

$$M = M_1 + M_2, \quad (151)$$

где M_1 и M_2 – моменты, необходимые для преодоления трения материала о боковую и торцевую поверхности шнека соответственно:

$$\begin{aligned} M_1 &= R \cos \alpha \int_0^L F_{\text{км}} dz = \xi f_{\text{к}} l_{\text{к}} R \cos \alpha \int_0^L p dz = \\ &= \frac{1}{A} \xi f_{\text{к}} l_{\text{к}} R \cos \alpha p_0 (1 - e^{-AL}), \end{aligned} \quad (152)$$

$$M_2 = 2\pi p_0 f_{\text{ш}} \int_0^R r^2 dr = \frac{2}{3} \pi p_0 f_{\text{ш}} R^3, \quad (153)$$

где R – наружный радиус винтовой нарезки шнека.

На шнек, кроме крутящего момента, действует осевое усилие

$$P = P_1 + P_2, \quad (154)$$

где P_1 и P_2 – усилия, действующие на боковую и торцевую поверхности шнека:

$$P_1 = \sin \alpha \int_0^L F_{\text{км}} dz = \frac{1}{A} \xi f_{\text{к}} l_{\text{к}} p_0 (1 - e^{-AL}); \quad P_2 = \pi R^2 p_0. \quad (155)$$

Теперь можно определить мощность, необходимую для вращения шнека

$$N = \frac{MV_{\text{к}}}{R}. \quad (156)$$

3.3 Теплотехнические расчеты

Плотности тепловых потоков на поверхностях контакта материала с элементами пресса задаются соотношениями

$$q_k = f_k p_k V_{kp} c_k; \quad q_{ш} = f_{ш} p_{ш} V_{шп} c_{ш}, \quad (157)$$

где f_k и $f_{ш}$ – коэффициенты трения материала о корпус и шнек; p_k и $p_{ш}$ – давление материала на поверхности корпуса и шнека; c_k и $c_{ш}$ – коэффициенты, учитывающие влияние канала на тепловые потоки; V_{kp} и $V_{шп}$ – скорости скольжения материала относительно корпуса и шнека.

Неравномерность распределения теплового потока, связанная с наличием канала, не учитывается, а уменьшение плотности потока при равномерном распределении его на внутреннюю поверхность корпуса корректируется коэффициентом

$$c_k = \frac{S_{kp}}{S_k} = 1 - \frac{\delta}{2\pi r_3 \sin \varphi}, \quad (158)$$

где S_{kp} – площадь контакта внутренней поверхности корпуса с материалом; S_k – площадь внутренней поверхности корпуса; δ и φ – толщина гребня и угол подъема винтовой нарезки соответственно.

Изменение площади контакта материала со шнеком, связанное с наличием канала, корректируется коэффициентом

$$c_{ш} = \frac{S_{шп}}{S_{ш}} = 1 + \frac{r_3 - r_2 - \delta}{2\pi r_2 \sin \varphi}, \quad (159)$$

где $S_{шп}$ – площадь контакта шнека с материалом; $S_{ш}$ – площадь боковой поверхности цилиндра радиуса r_2 .

Скорости скольжения материала

$$V_{kp} = \frac{1}{2} (r_2 + r_3) \sqrt{\omega_{п}^2 + (\omega - \omega_{п})^2 \operatorname{tg}^2 \varphi}; \quad (160)$$

$$V_{шп} = \frac{1}{2 \cos \varphi} (\omega - \omega_{п}) (r_2 + r_3),$$

где ω и $\omega_{п}$ – угловые скорости шнека и материала соответственно; $\frac{1}{2}(r_2 + r_3)$ – средний радиус нарезки шнека.

Плотности тепловых потоков:

$$q_k = \frac{1}{2} f_k p_k (r_2 + r_3) \sqrt{\omega_n^2 + (\omega - \omega_n)^2 \operatorname{tg}^2 \varphi} \times$$

$$\times \left(1 - \frac{\delta}{2\pi r_3 \sin \varphi} \right), \quad (161)$$

$$q_{ш} = \frac{f_{ш} p_{ш}}{2 \cos \varphi} (r_2 + r_3) (\omega - \omega_n) \left(1 + \frac{r_3 - r_2 - \delta}{2\pi r_2 \sin \varphi} \right). \quad (162)$$

Для расчета температур выбран типичный режим формования медного порошка ПМС-1, пластифицированного пятнадцатью массовыми процентами парафина (таблица 8). Результаты расчетов приведены на рисунках 19–29.

Таблица 8 – Режим формования пластифицированного медного порошка

Название параметра	Обозначение	Размерность	Значение
Давление прессования	p	МПа	10
Коэффициент окружного проскальзывания	h	—	0,2
Коэффициент трения материала о корпус	f_k	—	0,3
Коэффициент трения материала о шнек	$f_{ш}$	—	0,05
Угловая скорость шнека	ω	c^{-1}	0,105
Коэффициент теплоотдачи корпуса и шнека	$a_k; a_{ш}$	Вт/м ² К	20
Коэффициент теплопроводности корпуса и шнека	$k_k; k_{ш}$	Вт/мК	45,5
Удельная теплоемкость материалов	$c_k; c_{ш}$	Дж/кгК	500
Плотность материала корпуса и шнека	$r_k; r_{ш}$	кг/м ³	7800
Угол подъема винтового канала шнека	φ	градус	13
Толщина винтового гребня	d	мм	3
Радиус отверстия шнека	r_1	мм	6
Радиус шнека	r_2	мм	14,4
Радиус отверстия корпуса	r_3	мм	18
Наружный радиус корпуса	r_4	мм	45
Температура внутренней поверхности корпуса	T_k	°С	45
Температура наружной поверхности шнека	$T_{ш}$	°С	106

Проведенные расчеты позволяют утверждать, что температурный режим формования сложным образом зависит от многих параметров процесса, которые могут быть разделены на энергосиловые, триботехнические, теплотехнические, геометрические и кинематические.

Влияет на свойства материала также время, прошедшее с момента включения пресса. Рисунок 29 показывает, что при свободном конвективном теплообмене с окружающей средой процесс экструзии становится стационарным (при выбранных параметрах) лишь через 5 часов.

Можно сделать вывод, что при формовании термопластичных материалов в промышленных условиях шнековый пресс лучше не выключать вообще; в противном случае первые несколько часов экструзия будет нестабильной, а ее качество непредсказуемым.

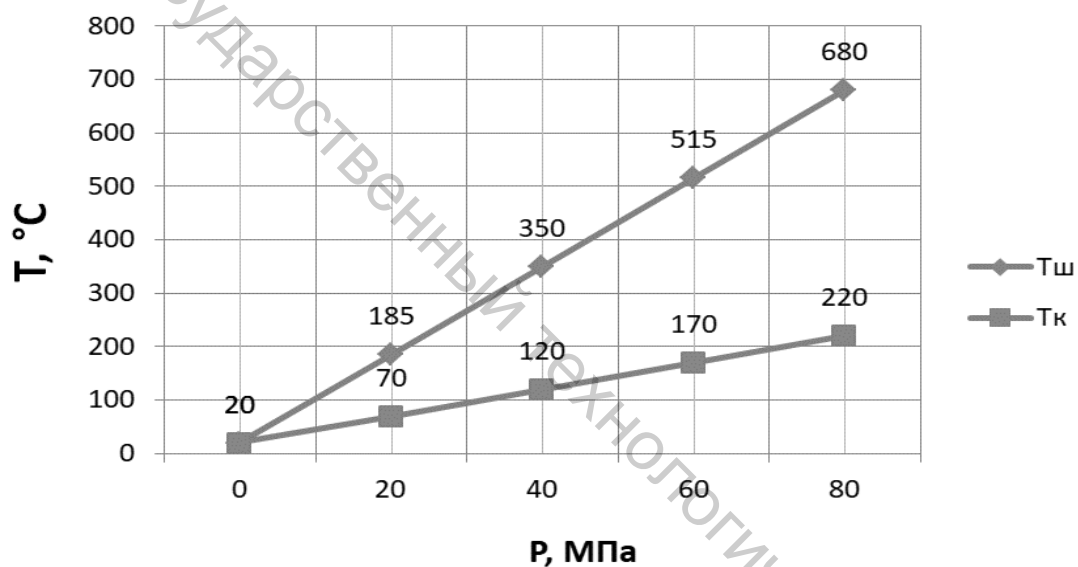


Рисунок 19 – Зависимость температур от давления прессования

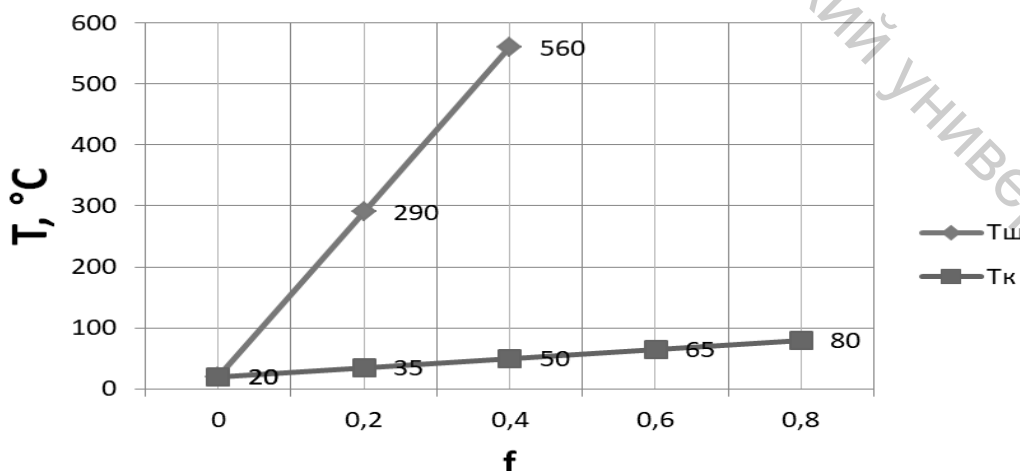


Рисунок 20 – Зависимость температур от коэффициента трения

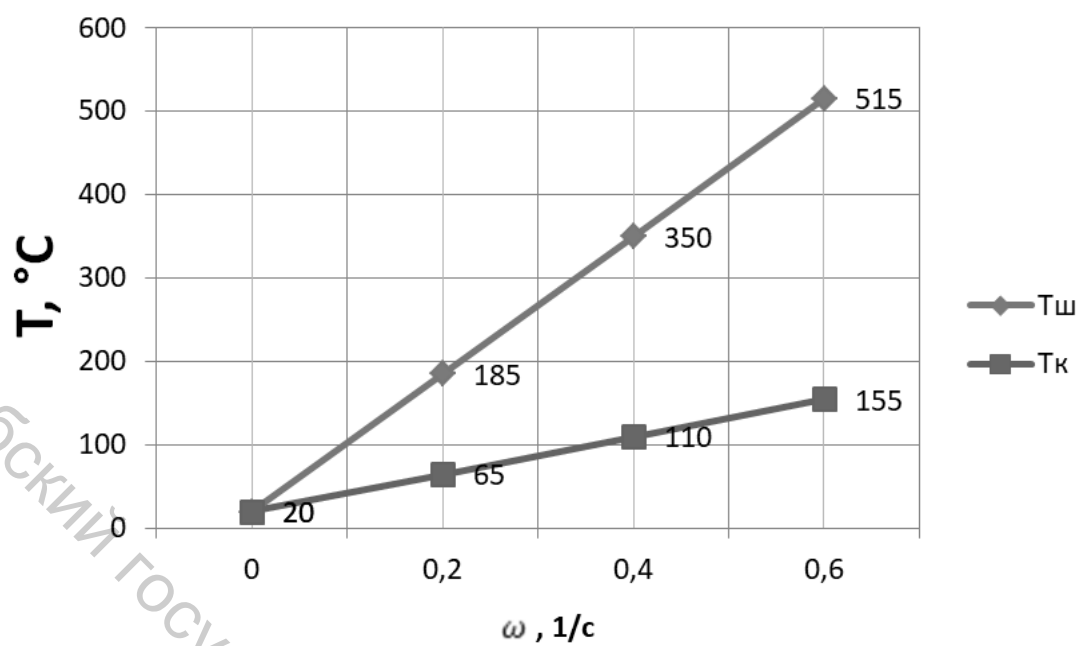


Рисунок 21 – Зависимость температур от угловой скорости шнека

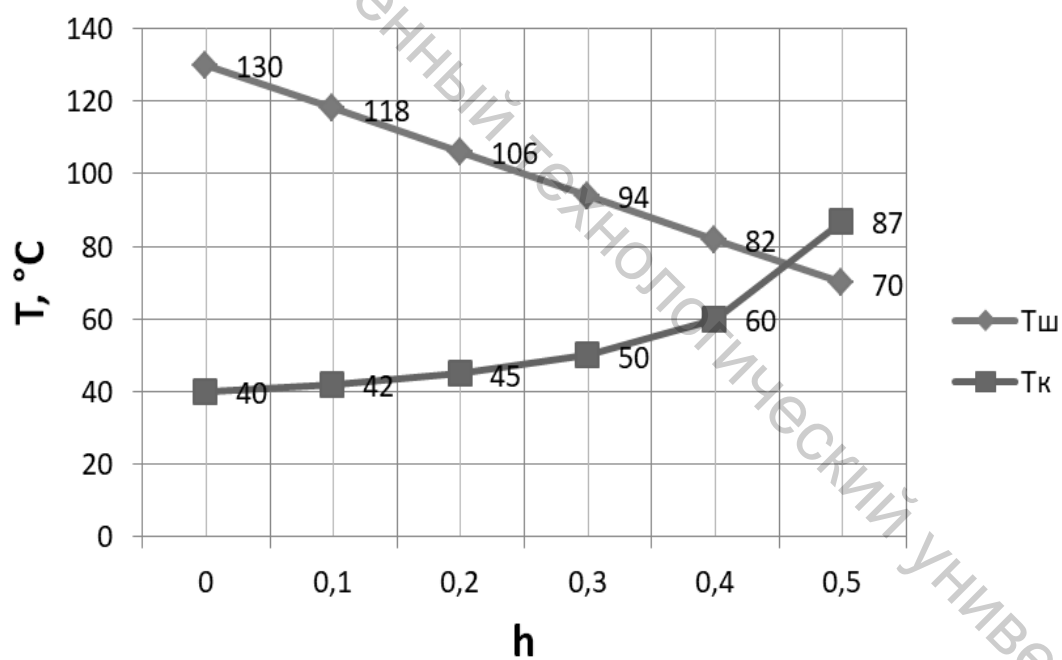


Рисунок 22 – Зависимость температур от коэффициента проскальзывания

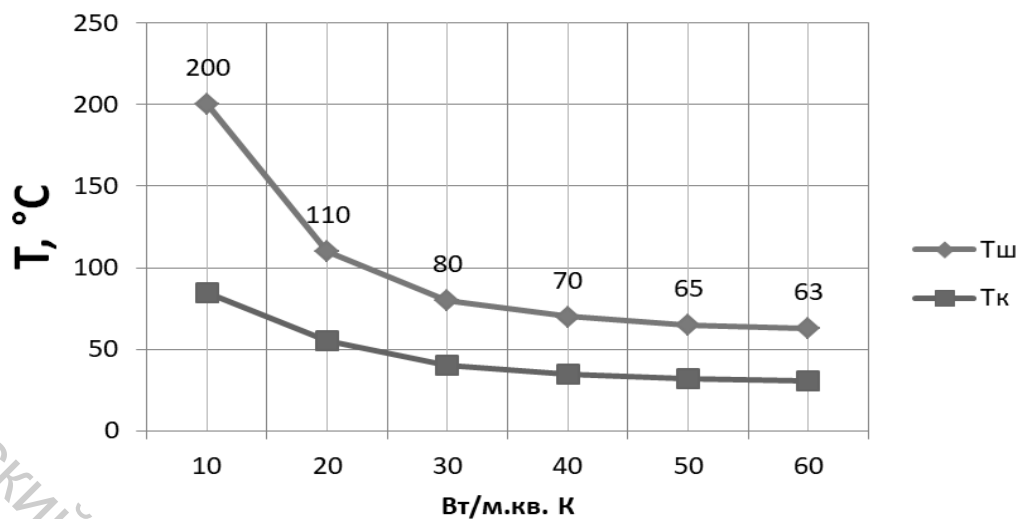


Рисунок 23 – Зависимость температур от коэффициента теплоотдачи

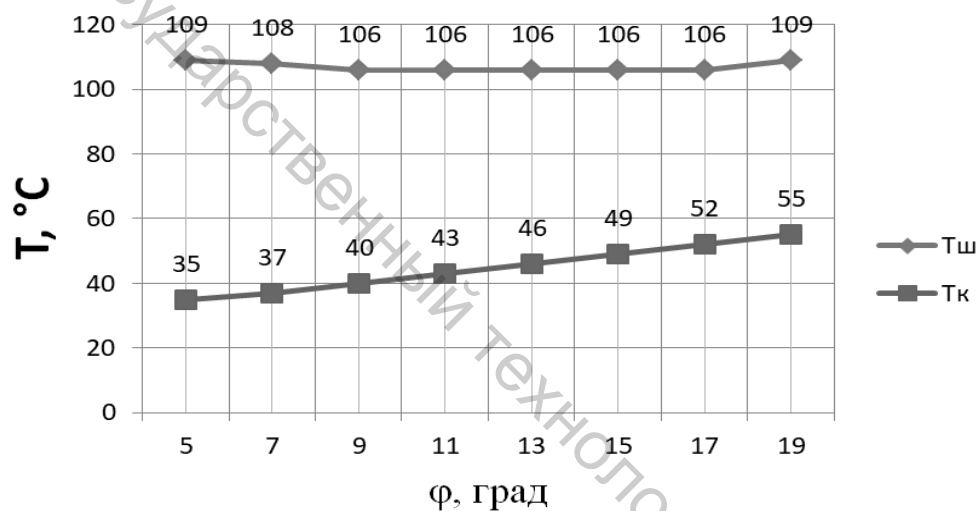


Рисунок 24 – Зависимость температур от угла подъема канала шнека

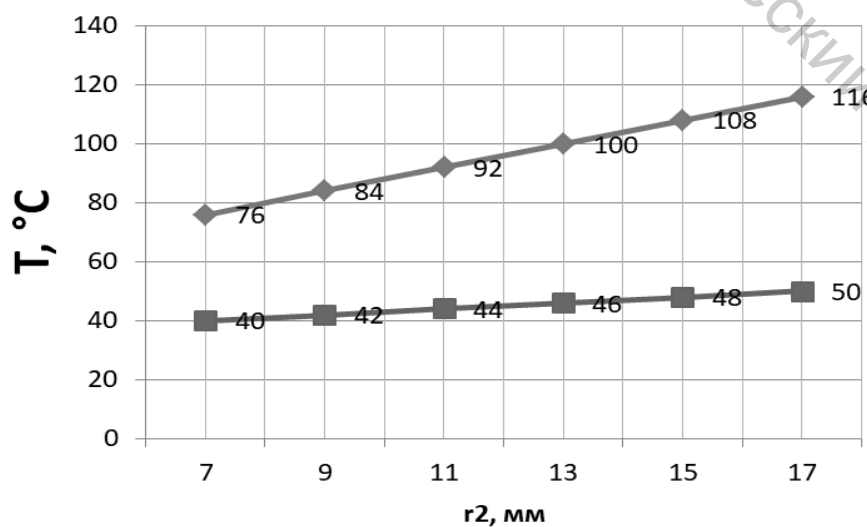


Рисунок 25 – Зависимость температур от глубины канала

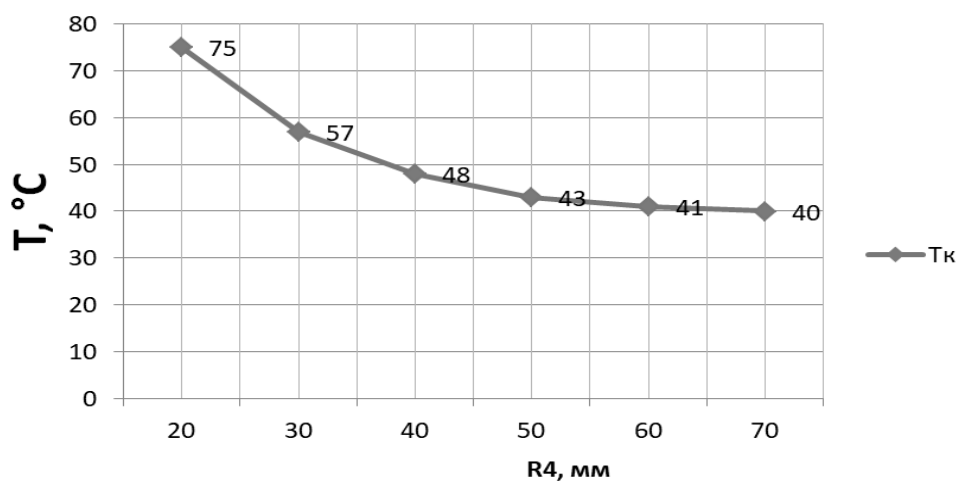


Рисунок 26 – Зависимость температуры от радиуса поверхности корпуса

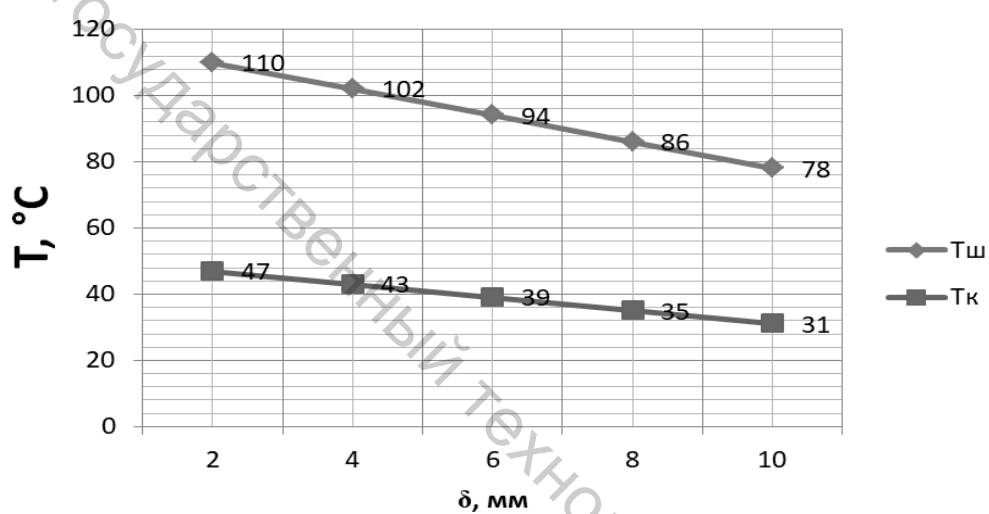


Рисунок 27 – Зависимость температур от толщины гребня винтового канала

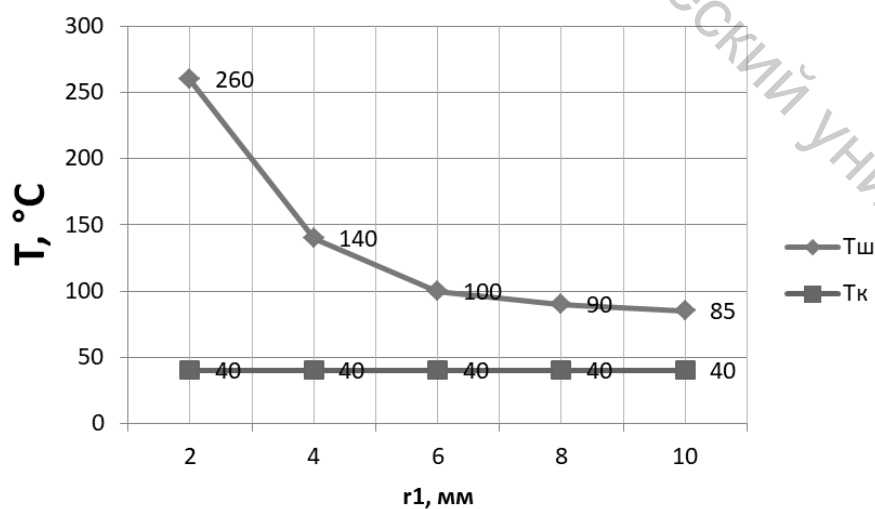


Рисунок 28 – Зависимость температур от радиуса осевого отверстия шнека

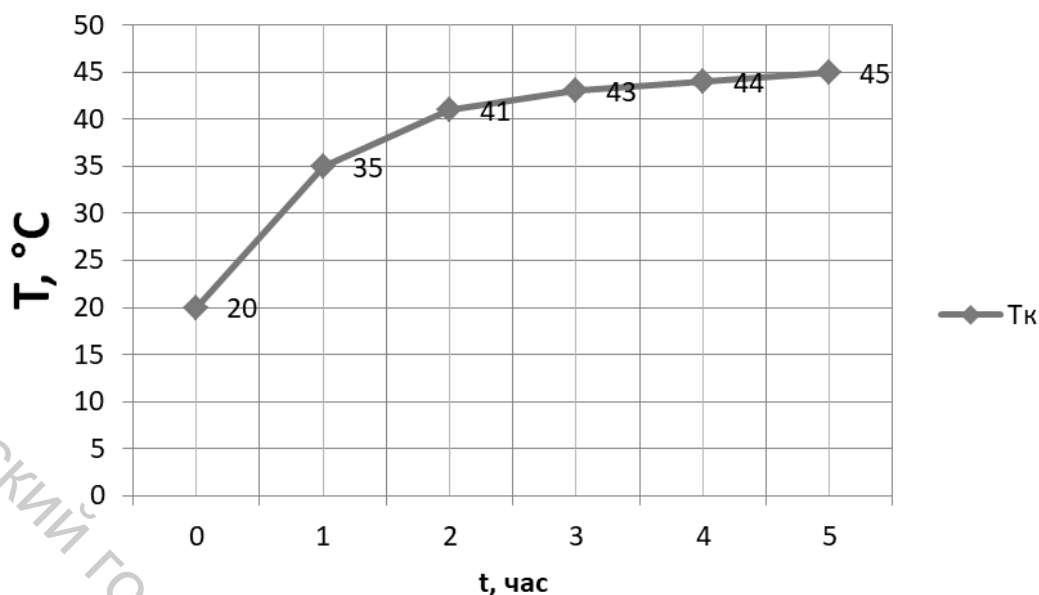


Рисунок 29 – Зависимость температуры корпуса от времени работы пресса

Большинство параметров, заметно влияющих на протекающие при экструзии термопластичной среды процессы, непригодны для оперативного управления работой шнековой машины. Действительно, геометрические, триботехнические, реологические и некоторые другие характеристики, полученные расчетным путем, выбираются до включения пресса и остаются более-менее постоянными до его выключения.

Исключением является угловая скорость шнека, которую можно легко изменять в известных пределах непосредственно в процессе формования. Ниже будет показано, какие интересные возможности управления процессом экструзии термопластов это предоставляет.

3.4 Расчет допустимых скоростей вращения шнека

Выше было показано, что при экструзии термопластов необходимо соблюдать определенный температурный режим (65). Такой режим иногда может быть достигнут всего лишь правильным выбором скорости вращения шнека, без принудительного нагрева или охлаждения элементов пресса.

Расчет диапазона скоростей вращения шнека, обеспечивающего необходимый режим работы экструдера, схематически представлен на рисунке 30.

Рабочий диапазон скоростей шнека ($\omega_{\text{раб}}$) находят по точкам пересечения линий, соответствующих температурам $T_{\text{ш}}$ и T_k с

температурой плавления $T_{пл}$ среды. Если угловая скорость лежит внутри этого диапазона, температурный режим (65) будет обеспечен лишь за счет джоулевой теплоты.

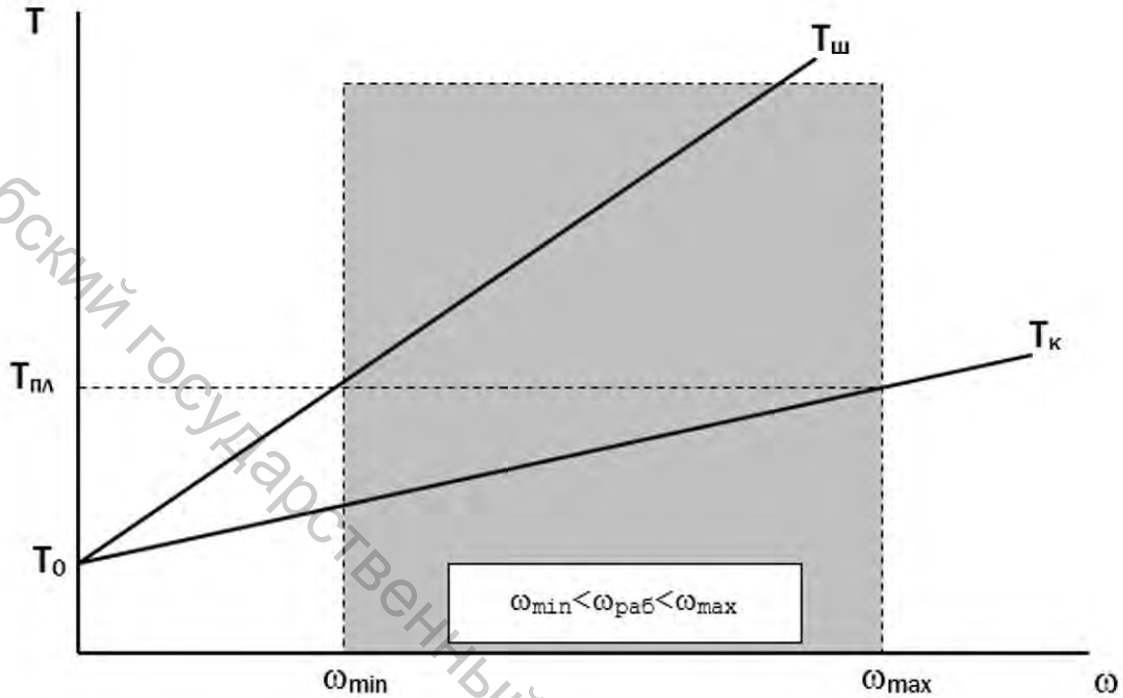


Рисунок 30 – Графическое определение диапазона рабочих скоростей шнека

Границы диапазона допустимых скоростей вращения шнека можно рассчитать, подставив в неравенство (65) выражения (118) и (126) при $r = r_3$ и $r = r_2$ соответственно ($t \rightarrow \infty$). Тогда, с учетом соотношений (161) и (162)

$$\omega_{\min} = \frac{A_{\text{ш}}}{f_{\text{ш}} p_{\text{ш}}} (T_{\text{пл}} - T_{0\text{ш}}); \quad (163)$$

$$\omega_{\max} = \min \left[\frac{A_{\text{ш}}}{f_{\text{ш}} p_{\text{ш}}} (T_{\text{кип}} - T_{0\text{ш}}); \quad \frac{A_{\text{к}}}{f_{\text{к}} p_{\text{к}}} (T_{\text{пл}} - T_{0\text{к}}); \right]$$

$$A_{\text{ш}} = \frac{2k_{\text{ш}} \cos \varphi}{r_2(r_2 + r_3) \left(1 + \frac{r_3 - r_2 - \delta}{2\pi r_2 \sin \varphi} \right) \left(\ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{h_{\text{ш}} r_1} \right)}; \quad (164)$$

$$A_{\text{к}} = \frac{2k_{\text{к}}}{r_3(r_2 + r_3) \operatorname{tg} \varphi \left(1 - \frac{\delta}{2\pi r_3 \sin \varphi} \right) \left(\ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{h_{\text{к}} r_4} \right)}.$$

3.5 Расчет контейнера

Построенные модели процесса экструзии пластически сжимаемой среды позволяют создавать расчетные методики проектирования не только шнековых машин, но и некоторых других экструзионных устройств. Например, можно рассчитать и спроектировать пресс-форму для мундштучного формования пластифицированных порошковых материалов.

Такая пресс-форма состоит из цилиндрического контейнера с пуансоном и экструзионной конической матрицы (мундштука). Измельченный материал уплотняется пуансоном в контейнере и затем продавливается через мундштук.

Процесс деформации уплотненной среды в мундштуке не отличается от рассмотренного выше процесса выдавливания материала через коническую матрицу, остается только спроектировать контейнер.

Для расчета контейнера необходимо знать давление под пуансоном и распределение напряжений по его высоте. Контейнер представляет собой цилиндрическую пресс-форму диаметром $2R$ и длиной L . Активные силы трения, действующие между материалом и поверхностью канала, отсутствуют, так как контейнер неподвижен. Поэтому в выражение (11) можно подставить

$$l_2 = 0; \quad l_1 = \pi R; \quad 2S = \pi R^2. \quad (165)$$

Тогда соотношения (13) примут вид

$$a = \frac{2a_0 l_0}{\pi R^2}; \quad b = \frac{2b_0 l_0}{\pi R^2}; \quad c = \frac{2c_0 l_0}{\pi R^2}, \quad (166)$$

а коэффициенты (14) – (15) превратятся в

$$d = \frac{\pi R^2}{4c_0 l_0} \sqrt{\frac{b_0^2}{4c_0^2} - \frac{a_0}{c_0}}; \quad e = -\sqrt{\frac{b_0^2}{4c_0^2} - \frac{a_0}{c_0}} - \frac{b_0}{2c_0}; \quad (167)$$

$$f = \sqrt{\frac{b_0^2}{4c_0^2} - \frac{a_0}{c_0}} - \frac{b_0}{2c_0}.$$

Граничное условие, определяющее постоянную интегрирования (16), остается тем же: $p(0) = p_0$; соответственно сохраняется и характер распределения давления (17) по высоте контейнера. Давление истечения материала через очко матрицы p_0 зависит только от геометрии инструмента и свойств среды.

Выражение (17) позволяет определить усилие, которое

необходимо приложить к пуансону, чтобы обеспечить выдавливание материала (экструзия начинается, когда давление в матрице достигает величины p_0). Для этого надо подставить в него вместо z высоту L_0 , занимаемую материалом в контейнере и решить полученное уравнение относительно давления под пуансоном p .

Решение имеет вид

$$p = \frac{f + ke}{1 + k}; \quad k = \frac{f - p_0}{p_0 - e} \exp\left\{\frac{L_0}{d}\right\}. \quad (168)$$

Глава 4. Технологические свойства формуемых сред

Для того чтобы воспользоваться предложенными расчетными методиками, необходимо экспериментально изучить физические и технологические свойства формуемой среды. Надо выяснить физическую сущность и измерить величины всех коэффициентов, встречающихся в полученных выше соотношениях.

Технологические свойства исследованы для порошков: медного ПМС-1 (ГОСТ 4960-2009), железного ПЖ4МЗ (ГОСТ 9849-86), бронзового БрОФ-10-1 (ТУ 26-130-76), вольфрамового ПВН (ТУ 563-62) и твердосплавного ВК8 (ГОСТ 3882-74). Пластификатор – парафин технический (ГОСТ 23683-89).

Сравнивать результаты удобнее, если содержание пластификатора в порошке выражено в объемных процентах. Однако при пластификации материалов расчеты проводят обычно в массовых процентах, так как массу легче измерять. Связь между объемной и массовой концентрацией пластификатора имеет вид

$$\frac{1}{\beta} = 1 + \frac{\rho_1}{\rho_2} \left(\frac{1}{\gamma} - 1 \right), \quad (169)$$

где ρ_1 и ρ_2 – соответственно плотность пластификатора и пикнометрическая плотность порошка; β и γ – объемная и массовая концентрации пластификатора в материале:

$$\beta = \frac{V_1}{V_1 + V_2}; \quad \gamma = \frac{m_1}{m_1 + m_2}, \quad (170)$$

где V_1 и V_2 – объем пластификатора и суммарный объем всех частиц; m_1 и m_2 – масса пластификатора и масса порошка в смеси соответственно.

Насыпная и пикнометрическая плотности некоторых исследованных порошков представлены в таблице 9. Связь между объемной и массовой концентрацией парафина в порошках представлена в таблице 10.

Таблица 9 – Плотность исследуемых материалов, т/м³

	ПМС-1	ПЖ4МЗ	ПХ-30	БрОФ-10-1	ВК8	ПВН	Парафин
Насыпная	1700	2500	2000	2800	3700	4400	900*
Пикнометрическая	8700	7650	7600	8600	10500	17300	1100**

Примечание: * – литой парафин, ** – уплотненный парафин.

Таблица 10 – Связь между объемной и массовой концентрацией парафина

Объемная концентрация, %	Массовая концентрация, %					
	ПМС-1	ПЖ4МЗ	ПХ-30	БрОФ-10-1	ВК8	ПВН
10	1,4	1,6	1,6	1,4	1,2	0,7
20	3,1	3,5	3,5	3,1	2,6	1,6
30	5,1	5,8	5,8	5,2	4,3	2,7
40	7,8	8,7	8,8	7,9	6,5	4,1
50	11,2	12,6	12,6	11,3	9,5	6,0

4.1 Триботехнические свойства

Триботехнические свойства описывают внутреннее и внешнее трение среды. Это коэффициенты трения из закона Кулона-Амонтона (9) и константы из более сложных нелинейных законов трения (8).

Устройство использованного трибометра основано на изобретении [194] и изображено на рисунке 31. Порошковый трибометр предназначен для измерения коэффициентов трения сыпучих сред, а также исследования зависимости этих коэффициентов от напряженного состояния [195–196].

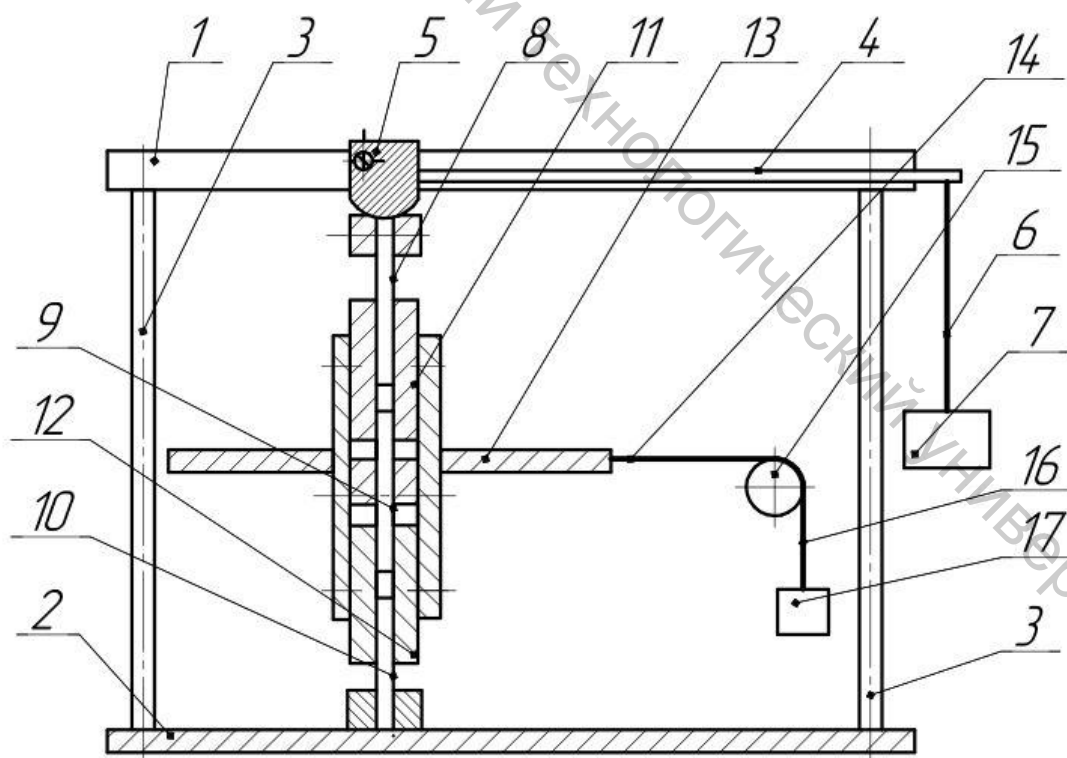


Рисунок 31– Схема трибометра

Прибор содержит станину, механизм нагружения, измерительный узел и механизм вращения подвижных деталей. Станина состоит из

верхней 1 и нижней 2 плит, соединенных между собой стойками 3. На верхней плите закреплен механизм нагружения, а на нижней установлен измерительный узел.

Механизм нагружения выполнен в виде рычага 4, на котором шарнирно закреплен боек 5, передающий усилие на измерительный узел своей сферической опорной поверхностью. Усилие к рычагу прикладывается с помощью подвески 6 с гирями 7. Передаточное отношение рычага может изменяться в пределах от 1:50 до 1:10 с интервалом 1/50 (то есть можно выбрать одно из пяти передаточных отношений: 1:50, 1:25, 3:50, 2:25 и 1:10). Для этого предусмотрена возможность дискретного перемещения бойка вдоль рычага с интервалом 10 мм (измерительный узел при этом перемещается на такое же расстояние по нижней плите).

Измерительный узел состоит из трех пуансонов (верхнего 8, среднего 9 и нижнего 10) и двух матриц (верхней 11 и нижней 12). Средний пуансон выполнен двусторонним и сопрягается одновременно с двумя матрицами. Такая конструкция позволяет исключить необходимость использования опорного подшипника и за счет этого увеличить точность измерений. Все пуансоны и матрицы изготовлены имеют одинаковую шероховатость; это обеспечивает схожие условия трения на всех контактных поверхностях, что необходимо при некоторых измерениях. Прибор снабжен двумя комплектами пуансонов: с гладкими и рифлеными торцами (для исследования внешнего и внутреннего трения соответственно).

Механизм вращения подвижных элементов состоит из диска 13, тросика 14, блока 15 и подвески 16 с грузами 17. Ступица диска может закрепляться на любом из пяти подвижных элементов с помощью штифта. Блок установлен с возможностью поворота, что облегчает переналадку прибора при изменении передаточного отношения нагружающего рычага.

Исследование внешнего трения проводят с помощью гладких пуансонов. Порции материала помещают в верхнюю и нижнюю матрицы. С помощью рычажного пресса прибор нагружают осевым усилием P_z , создающим в материале нормальные напряжения $\sigma = P_z / \pi r^2$ (r – радиус пуансонов). К среднему пуансону через диск прикладывают усилие F , создающее вращающий момент FR (R – радиус диска), достаточный для поворота пуансона. Этот момент уравнивается силой трения материала о торцы пуансона:

$$FR = 4\pi\tau \int_0^r r^2 dr. \quad (171)$$

Касательные напряжения на поверхности трения

$$\tau = \frac{3FR}{4\pi r^3}. \quad (172)$$

Тогда коэффициент внешнего трения

$$f = \frac{\tau}{\sigma} = \frac{3FR}{4P_z r}. \quad (173)$$

Трение на боковой поверхности прессовки исследуют с помощью рифленых пуансонов, что исключает нежелательный в этом случае проворот материала.

Средний пуансон и нижняя матрица при проведении таких измерений могут отсутствовать, тогда верхняя матрица сопрягается непосредственно с нижним пуансоном. При сведенных пуансонах устанавливают нуль на индикаторе часового типа, регистрирующем высоту прессовки (на схеме не показан). Затем снимают верхний пуансон и в матрицу засыпают порцию порошка. После этого прикладывают необходимое давление и делают выдержку для выхода газов. Через тросик к диску прикладывают силу, необходимую для поворота матрицы.

Момент этой силы уравнивает трение материала о боковую поверхность:

$$FR = 2\pi r^2 h \tau, \quad (174)$$

где h – высота прессовки в момент измерения. Отсюда находят касательные напряжения, действующие на боковой поверхности прессовки. Внутреннее трение исследуют также, но с использованием рифленых пуансонов.

Известно, что для необратимо сжимаемых сред связь между касательными и нормальными напряжениями не может быть выражена многочленом первой степени с постоянными коэффициентами (для таких материалов в законе трения Кулона-Амонтона коэффициент трения зависит от давления, то есть из константы превращается в функцию). Для сжимаемых сред надо использовать более сложный закон трения [4].

Для нахождения коэффициентов в соотношении (8) разработана следующая методика. Сначала последовательно проводят три измерения касательных напряжений при разных нагрузках:

$$\tau_i = a + b\sigma_i + c\sigma_i^2; \quad i = 1, 2, 3. \quad (175)$$

Затем эту систему уравнений решают относительно коэффициентов a , b и c .

Зависимость коэффициентов внешнего трения от давления прессования и степени пластификации порошка представлена в

таблицах 11–16, а зависимость коэффициентов внутреннего трения – в таблицах 17–22.

Таблица 11 – Коэффициенты внешнего трения медного порошка ПМС-1

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,35	0,28	0,23	0,19	0,15	0,13
100	0,33	0,26	0,21	0,17	0,14	0,11
150	0,32	0,25	0,20	0,16	0,13	0,11
200	0,31	0,24	0,19	0,15	0,13	0,11
250	0,30	0,23	0,18	0,15	0,13	0,11
300	0,30	0,23	0,18	0,15	0,13	0,11

Таблица 12 – Коэффициенты внешнего трения железного порошка ПЖ4МЗ

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,32	0,25	0,20	0,16	0,13	0,12
100	0,31	0,24	0,19	0,15	0,12	0,11
150	0,30	0,23	0,18	0,14	0,12	0,11
200	0,29	0,22	0,17	0,13	0,12	0,11
250	0,28	0,21	0,17	0,13	0,12	0,11
300	0,28	0,21	0,16	0,13	0,12	0,11

Таблица 13 – Коэффициенты внешнего трения порошка нержавеющей стали ПХ-30

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,40	0,32	0,25	0,20	0,16	0,14
100	0,39	0,31	0,24	0,19	0,15	0,13
150	0,38	0,30	0,23	0,18	0,14	0,12
200	0,37	0,29	0,22	0,17	0,13	0,12
250	0,36	0,28	0,22	0,16	0,13	0,12
300	0,36	0,28	0,21	0,16	0,13	0,11

Таблица 14 – Коэффициенты внешнего трения бронзового порошка БрОФ-10-1

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,28	0,22	0,18	0,15	0,13	0,12
100	0,27	0,21	0,17	0,14	0,12	0,11
150	0,26	0,20	0,16	0,13	0,12	0,11
200	0,25	0,19	0,15	0,13	0,12	0,11
250	0,24	0,18	0,15	0,13	0,12	0,11
300	0,24	0,18	0,15	0,13	0,12	0,11

Таблица 15 – Коэффициенты внешнего трения порошка твердого сплава ВК8

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,44	0,35	0,27	0,20	0,16	0,14
100	0,43	0,34	0,26	0,19	0,14	0,13
150	0,42	0,33	0,25	0,18	0,13	0,12
200	0,41	0,32	0,24	0,17	0,13	0,12
250	0,40	0,31	0,23	0,17	0,12	0,12
300	0,40	0,31	0,23	0,16	0,12	0,12

Таблица 16 – Коэффициенты внешнего трения вольфрамового порошка ПВН

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,48	0,38	0,30	0,23	0,17	0,15
100	0,47	0,37	0,29	0,22	0,16	0,14
150	0,46	0,36	0,28	0,21	0,15	0,13
200	0,45	0,35	0,27	0,20	0,14	0,13
250	0,44	0,34	0,27	0,19	0,14	0,12
300	0,44	0,34	0,26	0,19	0,13	0,12

Таблица 17 – Коэффициенты внутреннего трения медного порошка ПМС-1

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,41	0,33	0,28	0,24	0,21	0,20
100	0,40	0,32	0,27	0,23	0,20	0,18
150	0,39	0,31	0,26	0,22	0,19	0,18
200	0,38	0,30	0,25	0,21	0,19	0,18
250	0,37	0,29	0,24	0,21	0,19	0,17
300	0,37	0,28	0,24	0,21	0,18	0,17

Таблица 18 – Коэффициенты внутреннего трения железного порошка ПЖ4М3

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,44	0,36	0,30	0,26	0,22	0,20
100	0,43	0,35	0,29	0,25	0,21	0,19
150	0,42	0,34	0,28	0,24	0,20	0,19
200	0,41	0,33	0,27	0,23	0,20	0,19
250	0,40	0,32	0,26	0,23	0,20	0,19
300	0,40	0,32	0,26	0,23	0,20	0,18

Таблица 19 – Коэффициенты внутреннего трения порошка нержавеющей стали ПХ-30

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,45	0,37	0,31	0,27	0,24	0,22
100	0,44	0,36	0,30	0,26	0,23	0,21
150	0,43	0,35	0,29	0,25	0,22	0,20
200	0,43	0,34	0,28	0,24	0,22	0,20
250	0,42	0,33	0,27	0,24	0,22	0,20
300	0,42	0,33	0,27	0,24	0,22	0,19

Таблица 20 – Коэффициенты внутреннего трения бронзового порошка БрОФ-10-1

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,36	0,29	0,24	0,21	0,19	0,18
100	0,35	0,28	0,23	0,20	0,18	0,17
150	0,34	0,27	0,22	0,19	0,17	0,16
200	0,33	0,26	0,21	0,18	0,17	0,16
250	0,32	0,25	0,20	0,18	0,17	0,16
300	0,32	0,25	0,20	0,18	0,17	0,16

Таблица 21 – Коэффициенты внутреннего трения порошка твердого сплава ВК8

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,50	0,41	0,34	0,28	0,24	0,22
100	0,49	0,40	0,33	0,27	0,23	0,21
150	0,48	0,39	0,32	0,26	0,22	0,20
200	0,47	0,38	0,31	0,25	0,21	0,19
250	0,46	0,37	0,30	0,24	0,20	0,19
300	0,45	0,36	0,30	0,24	0,20	0,19

Таблица 22 – Коэффициенты внутреннего трения вольфрамового порошка ПВН

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,53	0,42	0,35	0,30	0,26	0,24
100	0,52	0,41	0,34	0,29	0,25	0,23
150	0,51	0,40	0,33	0,28	0,24	0,22
200	0,50	0,39	0,32	0,27	0,23	0,21
250	0,49	0,38	0,31	0,26	0,23	0,20
300	0,48	0,37	0,31	0,26	0,23	0,20

Видно, что пластификация порошка сильно снижает как внешнее, так и внутреннее трение. Коэффициенты внешнего трения могут уменьшаться до очень малых (0,11–0,12) величин. Это происходит

потому, что легкоплавкий парафин (температура плавления 42 °С) плавится на поверхности инструмента из-за тепловыделения, сопутствующего трению, и смазывает ее. Внутри среды при сравнительно малых скоростях деформации такого явления не наблюдается и трение падает не так сильно.

С увеличением содержания пластификатора в исследуемом материале различие в коэффициентах трения между разными порошками уменьшается. При достаточно сильной пластификации (около об. 40 %) разница в коэффициентах трения практически исчезает. Именно из-за этого экструзией можно формовать любые пластифицированные порошки – их поведение определяется составом и количеством пластификатора, а не самим порошком.

Рост давления в материале приводит к уменьшению коэффициентов трения, их больше нельзя считать константами при математических преобразованиях. Для задания граничных условий используем инвариантные к напряжениям коэффициенты из нелинейного закона трения (8).

Для вычисления этих триботехнических характеристик материала снята зависимость касательных напряжений от нормальных на поверхности трения (таблицы 23–28) и внутри среды (таблицы 29–34). Затем из каждого столбца выбраны три значения и решена система уравнений (175). Константы b и c приведены в таблицах 35–38.

Таблица 23 – Касательные напряжения на поверхности медного порошка ПМС-1, МПа

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	3	6	9	12	15	18
15	7,65	4,05	2,70	2,25	2,10	1,80	1,65
30	13,50	6,30	3,30	2,70	2,40	2,40	2,10
45	19,35	8,55	4,50	4,05	3,60	3,15	2,70
60	24,60	10,80	5,40	4,80	4,20	3,60	3,00
75	30,00	12,75	6,00	5,25	4,50	3,75	3,75
90	35,10	14,40	6,30	5,40	4,50	4,50	4,50

Таблица 24 – Касательные напряжения на поверхности порошка ПЖЗМЗ, МПа

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	3	6	9	12	15	18
15	6,30	4,50	3,15	2,25	1,80	1,35	1,20
30	11,40	7,20	5,10	3,60	2,40	1,80	1,50
45	16,20	9,90	6,75	4,50	3,15	2,25	1,80
60	21,00	12,60	8,40	5,40	3,60	3,00	2,40
75	25,50	15,00	10,50	6,00	4,50	3,00	2,25
90	30,60	18,00	12,60	7,20	4,50	3,60	2,70

Таблица 25 – Касательные напряжения на поверхности порошка ПХ-30, МПа

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	3	6	9	12	15	18
15	5,40	4,05	3,15	2,40	1,80	1,35	1,20
30	10,20	7,80	5,70	4,50	3,30	2,10	1,80
45	14,85	11,25	8,10	6,30	4,50	2,70	2,25
60	19,20	15,00	10,20	7,80	5,40	3,00	3,00
75	24,00	18,00	12,75	9,75	6,00	3,75	3,00
90	28,80	21,60	14,40	10,80	6,30	3,60	3,60

Таблица 26 – Касательные напряжения на поверхности бронзового порошка БрОФ10-1

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	2	4	6	8	10	12
15	6,75	5,40	4,95	4,50	3,60	1,80	1,20
30	11,40	9,60	8,70	6,90	5,40	3,30	2,10
45	15,75	13,50	12,15	9,45	7,20	4,50	2,70
60	20,40	17,40	15,60	12,00	9,00	6,00	3,00
75	24,75	21,75	18,75	15,00	10,50	6,75	3,00
90	28,80	25,20	21,60	17,10	12,60	7,20	3,60

Таблица 27 – Касательные напряжения на поверхности твердосплавного порошка ВН-8, МПа

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	1	2	3	4	5	6
15	10,35	10,05	9,45	9,00	7,35	5,25	3,75
30	18,90	18,30	17,70	16,80	13,20	8,70	6,30
45	27,90	27,00	25,20	24,30	18,45	11,25	7,65
60	37,20	36,00	33,00	31,80	23,40	13,80	8,40
75	45,75	44,25	41,25	39,75	27,75	16,50	9,00
90	54,00	52,20	48,60	45,90	30,60	18,00	9,90

Таблица 28 – Касательные напряжения на поверхности порошка тяжелого сплава ВНЖ-90, МПа

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	1	2	3	4	5	6
15	8,10	7,65	7,20	5,40	4,35	3,45	3,00
30	15,30	14,70	13,80	10,20	8,10	6,60	5,40
45	26,10	21,15	19,80	14,40	11,25	8,55	7,20
60	32,40	25,20	24,60	18,00	13,80	10,20	8,40
75	39,75	30,75	30,00	21,75	16,50	12,00	9,75
90	47,70	36,90	35,10	25,20	19,80	13,50	10,80

Таблица 29 – Касательные напряжения внутри медного порошка ПМС-1, МПа

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	3	6	9	12	15	18
15	13,80	12,90	12,00	10,80	9,00	7,20	6,00
30	27,00	24,60	22,20	19,20	15,90	13,20	11,40
45	39,60	35,10	30,60	26,10	21,60	18,00	16,20
60	51,60	44,40	38,40	32,40	25,20	22,80	21,00
75	63,75	54,00	46,50	39,00	30,00	27,00	25,50
90	76,50	63,90	54,90	45,90	36,00	31,50	30,60

Таблица 30 – Касательные напряжения внутри железного порошка ПЖЗМЗ, МПа

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	3	6	9	12	15	18
15	13,50	12,15	10,80	9,30	8,10	6,90	5,70
30	26,40	23,10	20,40	17,40	15,00	12,30	10,80
45	38,70	33,30	28,80	24,30	20,70	17,10	15,75
60	50,40	43,20	37,20	30,60	24,60	21,60	20,40
75	62,25	52,50	45,00	36,75	28,50	26,25	24,75
90	73,80	62,10	53,10	43,20	33,30	30,60	29,70

Таблица 31 – Касательные напряжения внутри стального порошка ПХ-30, МПа

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	3	6	9	12	15	18
15	13,20	11,85	10,50	9,00	7,80	6,45	6,00
30	25,80	23,10	19,80	16,80	15,00	12,30	11,40
45	37,80	32,40	27,90	23,85	20,70	17,55	16,20
60	49,20	42,00	36,00	30,60	25,80	22,20	21,00
75	60,75	51,75	44,25	36,75	30,75	27,00	26,25
90	72,00	61,20	52,20	43,20	35,10	31,50	30,60

Таблица 32 – Касательные напряжения внутри бронзового порошка БрОФ10-1, МПа

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	2	4	6	8	10	12
15	13,50	12,30	11,10	9,90	8,40	6,90	5,70
30	26,10	24,00	21,30	18,90	16,20	13,20	10,80
45	37,80	35,10	31,05	27,45	23,40	18,90	15,30
60	49,20	45,60	40,20	36,00	30,00	24,00	19,20
75	60,75	55,50	49,50	44,25	36,00	29,25	23,25
90	72,00	65,70	58,50	52,20	42,30	34,20	27,00

Таблица 33 – Касательные напряжения внутри порошка твердого сплава ВН-8, МПа

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	1	2	3	4	5	6
15	14,40	12,90	11,55	10,20	9,00	8,10	7,50
30	28,20	25,20	22,50	19,80	17,40	15,60	14,40
45	41,40	36,90	32,85	28,80	25,20	22,50	20,70
60	54,00	48,00	42,60	37,20	32,40	28,80	26,40
75	66,00	58,50	52,50	45,75	39,00	35,25	31,50
90	78,30	69,30	62,10	54,00	45,90	41,40	36,90

Таблица 34 – Касательные напряжения внутри порошка тяжелого сплава ВНЖ-90, МПа

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	1	2	3	4	5	6
15	13,20	11,70	10,35	9,00	8,10	7,05	5,70
30	25,80	22,80	20,10	17,70	15,60	13,50	10,80
45	37,80	33,30	28,80	25,65	22,50	19,35	14,85
60	49,20	43,20	37,20	33,00	28,80	24,60	18,60
75	60,75	53,25	45,75	39,75	35,25	29,25	21,75
90	72,00	63,90	54,00	46,80	41,40	33,30	26,10

Таблица 35 – Зависимость коэффициента b от материала (внешнее трение)

Порошок	Содержание парафина, мас. %					
	0	3	6	9	12	15
ПМС-1	0,45	0,22	0,13	0,12	0,11	0,10
ПЖЗМЗ	0,39	0,25	0,14	0,13	0,09	0,06
ПХ-30	0,32	0,29	0,17	0,13	0,12	0,05
БрОФ10-1	0,38	0,30	0,23	0,16	0,10	–
ВН-8	0,66	0,53	0,22	–	–	–
ВНЖ-90	0,68	0,34	0,18	–	–	–

Таблица 36 – Зависимость коэффициента b от материала (внутреннее трение)

Порошок	Содержание парафина, мас. %					
	0	3	6	9	12	15
ПМС-1	0,90	0,82	0,72	0,62	0,50	0,46
ПЖЗМЗ	0,88	0,80	0,70	0,59	0,53	0,40
ПХ-30	0,86	0,74	0,64	0,59	0,51	0,41
БрОФ10-1	0,86	0,73	0,64	0,48	0,36	–
ВН-8	0,98	0,66	0,52	–	–	–
ВНЖ-90	0,86	0,63	0,39	–	–	–

Таблица 37 – Коэффициент $c \cdot 10^4$, МПа⁻¹ (внешнее трение)

Порошок	Содержание парафина, мас. %					
	0	3	6	9	12	15
ПМС-1	-1,42	-2,33	-3,30	-4,36	-5,40	-6,67
ПЖЗМЗ	-1,45	-2,44	-3,50	-4,54	-5,60	-6,70
ПХ-30	-1,45	-2,37	-3,46	-4,48	-5,51	-6,69
БрОФ10-1	-1,47	-2,35	-3,34	-4,38	-5,42	-6,65
ВН-8	-1,49	-2,47	-3,55	–	–	–
ВНЖ-90	-1,48	-2,49	-3,57	–	–	–

Таблица 38 – Коэффициент $c \cdot 10^4$, МПа⁻¹ (внутреннее трение)

Порошок	Содержание парафина, мас. %					
	0	3	6	9	12	15
ПМС-1	-2,43	-3,36	-5,30	-7,36	-9,40	-11,7
ПЖЗМЗ	-2,44	-3,46	-5,50	-7,54	-9,60	-11,8
ПХ-30	-2,45	-3,38	-5,46	-7,48	-9,51	-11,7
БрОФ10-1	-2,47	-3,36	-5,34	-7,38	-9,42	-11,8
ВН-8	-2,49	-3,44	-5,55	–	–	–
ВНЖ-90	-2,50	-3,49	-5,57	–	–	–

Коэффициент сцепления a оказался достаточно малым (около 0,0001 МПа) для всех исследованных материалов; на процесс экструзии он влияния не оказывает. Безразмерный параметр b является аналогом коэффициента трения в законе Кулона, но численно с ним не совпадает. Параметр c характеризует степень нелинейности закона трения; он тем больше, чем больше в материале пластификатора. Можно заключить, что отклонение от линейного закона трения тем больше, чем сильнее пластифицирован материал; однако и для чистого порошка коэффициент c нулю не равен.

Влияние температуры материала на коэффициенты внешнего (таблицы 39–41) и внутреннего (таблицы 42–44) трения неодинаково. Видно, что использование пластификатора делает материал чрезвычайно чувствительным к температуре.

Таблица 39 – Зависимость коэффициентов внешнего трения медного порошка ПМС-1 от температуры

Температура материала, °С	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
20	0,35	0,28	0,23	0,19	0,15	0,13
30	0,34	0,27	0,22	0,18	0,14	0,13
40	0,34	0,26	0,21	0,17	0,13	0,12
50	0,34	0,21	0,14	0,10	0,07	0,06
60	0,34	0,20	0,13	0,09	0,06	0,05
70	0,34	0,20	0,13	0,09	0,06	0,05

Таблица 40 – Зависимость коэффициентов внешнего трения железного порошка ПЖ4МЗ от температуры

Температура материала, °С	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
20	0,32	0,25	0,20	0,16	0,13	0,12
30	0,32	0,24	0,19	0,16	0,13	0,11
40	0,32	0,24	0,18	0,15	0,12	0,11
50	0,31	0,19	0,11	0,09	0,07	0,06
60	0,31	0,18	0,10	0,08	0,06	0,05
70	0,31	0,18	0,10	0,08	0,06	0,05

Таблица 41 – Зависимость коэффициентов внешнего трения стального порошка ПХ-30 от температуры

Температура материала, °С	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
20	0,40	0,32	0,25	0,20	0,16	0,14
30	0,39	0,31	0,25	0,20	0,16	0,14
40	0,39	0,30	0,24	0,20	0,15	0,13
50	0,39	0,25	0,18	0,13	0,09	0,07
60	0,39	0,24	0,17	0,12	0,08	0,06
70	0,39	0,24	0,17	0,12	0,08	0,06

Таблица 42 – Зависимость коэффициентов внутреннего трения медного порошка ПМС-1 от температуры

Температура материала, °С	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
20	0,41	0,33	0,28	0,24	0,21	0,20
30	0,40	0,32	0,28	0,23	0,21	0,20
40	0,40	0,31	0,27	0,23	0,20	0,19
50	0,40	0,36	0,35	0,35	0,30	0,25
60	0,40	0,38	0,36	0,35	0,35	0,29
70	0,40	0,36	0,34	0,34	0,34	0,32

Таблица 43 – Зависимость коэффициентов внутреннего трения железного порошка ПЖ4МЗ от температуры

Температура материала, °С	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
20	0,44	0,36	0,30	0,26	0,22	0,20
30	0,44	0,36	0,30	0,25	0,22	0,20
40	0,44	0,35	0,30	0,25	0,21	0,20
50	0,44	0,40	0,38	0,33	0,29	0,29
60	0,43	0,42	0,40	0,35	0,31	0,29
70	0,43	0,44	0,39	0,35	0,32	0,31

Таблица 44 – Зависимость коэффициентов внутреннего трения стального порошка ПХ-30 от температуры

Температура материала, °С	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
20	0,45	0,37	0,31	0,27	0,24	0,22
30	0,45	0,37	0,31	0,27	0,24	0,22
40	0,45	0,37	0,30	0,27	0,24	0,22
50	0,45	0,43	0,39	0,36	0,33	0,30
60	0,45	0,44	0,40	0,38	0,33	0,32
70	0,45	0,45	0,42	0,38	0,35	0,31

Коэффициенты внешнего трения уменьшаются с увеличением температуры неравномерно: для всех сред зафиксировано резкое их падение в интервале температур 40–50 °С. Связано это с переходом через температуру плавления парафина (42 °С). Коэффициенты внутреннего трения, наоборот, увеличиваются при переходе через эту температуру и становятся нестабильными. Поэтому материал следует формировать, не доводя пластификатор до плавления по объему.

При исследовании процесса экструзии важно изучить трение, действующее непосредственно на поверхности формирующего инструмента, а не в направлении выдавливания среды. В порошковой металлургии уменьшение давления в поперечном направлении характеризуют коэффициентом бокового давления. Как уже отмечалось, традиционные методы измерения коэффициентов бокового давления, основанные на использовании тензометрии, обладают недостатками. Поэтому был разработан способ измерения коэффициента бокового давления, не использующий тензометрию и лишенный указанных недостатков [199–200]. Рисунок 32 поясняет разработанную методику.

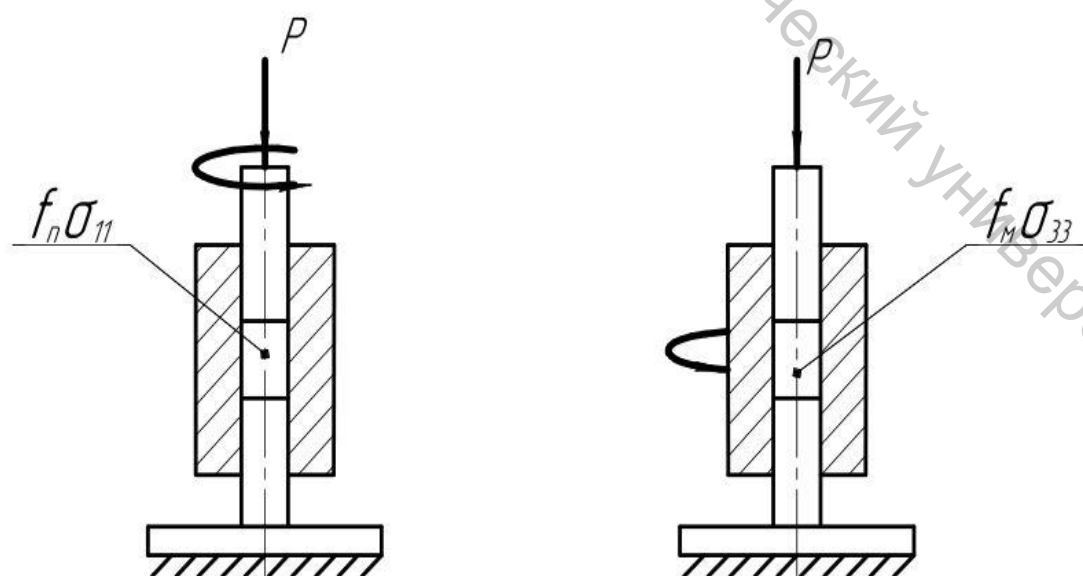


Рисунок 32 – Схема измерения коэффициента бокового давления

Измерение проводят в два этапа. Сначала снимают зависимость произведения $f_{\pi} \sigma_{11}$ от давления прессования σ_{11} :

$$f_{\pi} \sigma_{11} = F(\sigma_{11}), \quad (176)$$

где f_{π} – коэффициент трения материала о пуансон. Функцию F находят аппроксимацией. На этом этапе важно обеспечить неподвижность среды, для чего используют пуансон с рифленным торцом. Затем измеряют сопротивление вращению матрицы при тех же нагрузках и вычисляют произведение

$$f_m \sigma_{33} = \frac{M}{2V}, \quad (177)$$

где f_m – коэффициент трения материала о матрицу; σ_{33} – давление среды на поверхность матрицы; M – момент, необходимый для начала вращения матрицы; V – объем, занимаемый материалом в момент измерения. Выражение (177) получено из условия равновесия

$$M = \tau r S_6 = 2 f_m \sigma_{33} V, \quad (178)$$

где $\tau = f_m \sigma_{33}$ – касательные напряжения на поверхности матрицы; $S_6 = 2\pi r h$ – площадь этой поверхности; r – радиус пуансонов; h – высота прессовки.

Важным условием точного измерения является равенство коэффициентов трения порошка о матрицу и пуансон во всем диапазоне исследуемых давлений. Эти детали должны быть изготовлены из одного и того же материала и иметь одинаковую шероховатость поверхностей. Если это условие соблюдается, зависимости $f_{\pi} \sigma_{11} = F(\sigma_{11})$ и $f_m \sigma_{33} = F(\sigma_{33})$ будут идентичны, то есть функция F и в том, и в другом случае одна и та же. Тогда можно упростить обозначения:

$$f\sigma = f_{\pi} \sigma_{11} = f_m \sigma_{33} = F(\sigma), \quad (179)$$

где произведение $f\sigma$ характеризует воздействие материала на произвольную поверхность, имеющую те же характеристики, что и поверхности деталей прибора. Зависимость $f\sigma = F(\sigma)$ изображена на рисунке 33.

Этот график позволяет определить давление материала на любую поверхность, на которой известно произведение $f\sigma$. Например, можно определить боковое давление σ_{33} и соответствующий ему коэффициент бокового давления. Если для функции F подобрана аппроксимация, то задача нахождения коэффициента бокового давления может быть решена аналитически.

Коэффициенты бокового давления пластифицированных порошков, измеренные по описанной выше методике, представлены в

таблицах 45–50.

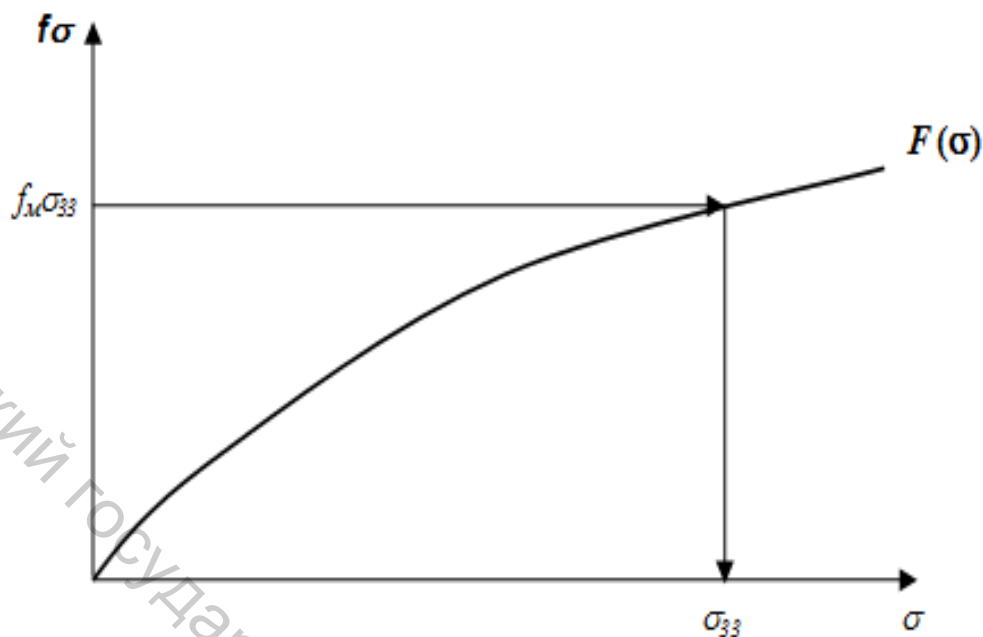


Рисунок 33 – Зависимость произведения $f\sigma$ на поверхности трения от давления

Таблица 45 – Коэффициенты бокового давления медного порошка ПМС-1

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,36	0,45	0,53	0,60	0,66	0,71
100	0,37	0,46	0,55	0,62	0,68	0,74
150	0,38	0,47	0,56	0,63	0,70	0,76
200	0,39	0,48	0,57	0,64	0,71	0,77
250	0,40	0,49	0,58	0,65	0,72	0,78
300	0,40	0,49	0,58	0,65	0,72	0,78

Таблица 46 – Коэффициенты бокового давления железного порошка ПЖ4М3

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,32	0,42	0,51	0,59	0,66	0,70
100	0,33	0,43	0,52	0,60	0,67	0,72
150	0,34	0,44	0,53	0,61	0,68	0,73
200	0,35	0,45	0,54	0,62	0,69	0,74
250	0,36	0,46	0,55	0,63	0,70	0,75
300	0,36	0,46	0,55	0,63	0,70	0,75

Таблица 47 – Коэффициенты бокового давления порошка нержавеющей стали ПХ-30

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,28	0,38	0,47	0,55	0,62	0,67
100	0,29	0,39	0,48	0,56	0,63	0,69
150	0,30	0,40	0,49	0,57	0,64	0,70
200	0,31	0,41	0,50	0,58	0,65	0,71
250	0,32	0,42	0,51	0,59	0,66	0,71
300	0,32	0,42	0,51	0,59	0,66	0,71

Таблица 48 – Коэффициенты бокового давления бронзового порошка БрОФ-10-1

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,34	0,43	0,51	0,58	0,64	0,69
100	0,35	0,44	0,52	0,59	0,66	0,71
150	0,36	0,45	0,53	0,60	0,67	0,72
200	0,37	0,46	0,54	0,61	0,68	0,73
250	0,38	0,47	0,55	0,62	0,69	0,74
300	0,38	0,47	0,55	0,62	0,69	0,75

Таблица 49 – Коэффициенты бокового давления порошка твердого сплава ВК8

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,22	0,32	0,41	0,49	0,56	0,62
100	0,23	0,33	0,42	0,50	0,58	0,64
150	0,24	0,34	0,43	0,51	0,60	0,66
200	0,25	0,35	0,44	0,52	0,61	0,68
250	0,26	0,36	0,45	0,53	0,62	0,70
300	0,26	0,36	0,45	0,53	0,62	0,70

Таблица 50 – Коэффициенты бокового давления вольфрамового порошка ПВН

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,20	0,30	0,39	0,47	0,54	0,60
100	0,21	0,31	0,40	0,48	0,56	0,63
150	0,22	0,32	0,41	0,49	0,58	0,65
200	0,23	0,33	0,42	0,50	0,59	0,67
250	0,24	0,34	0,43	0,60	0,60	0,68
300	0,24	0,35	0,44	0,61	0,60	0,68

Коэффициенты бокового давления растут с увеличением давления. У чистых порошков они (при 75 МПа) отличаются почти в

два раза (0,33 у меди и бронзы; 0,18 – у твердого сплава). У высокопластифицированных порошков различие не превышает 10 %. Можно сделать тот же вывод, что и при исследовании трения: если концентрация пластификатора в порошке достаточно велика, различие в поведении между материалами исчезает. Свойства в этом случае определяются составом и концентрацией пластификатора, а не свойствами порошка.

В расчетах часто встречается произведение коэффициентов трения и бокового давления. Обычно отмечают, что для порошков оно слабо зависит от давления прессования. Это утверждение справедливо и для пластифицированных сред. Результаты таких исследований приведены в таблицах 51–56.

Таблица 51 – Произведение коэффициентов трения и бокового давления для медного порошка ПМС-1

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,13	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09
100	0,12	0,12	0,12	0,11	0,10	0,08
150	0,12	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08
200	0,12	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08
250	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09
300	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09

Таблица 52 – Произведение коэффициентов трения и бокового давления для железного порошка ПЖ4МЗ

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,10	0,11	0,10	0,09	0,09	0,08
100	0,10	0,10	0,10	0,09	0,08	0,08
150	0,10	0,10	0,10	0,09	0,08	0,08
200	0,10	0,10	0,09	0,08	0,08	0,08
250	0,10	0,10	0,09	0,08	0,08	0,08
300	0,10	0,10	0,09	0,08	0,08	0,08

Таблица 53 – Произведение коэффициентов трения и бокового давления для стального порошка ПХ-30

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,11	0,12	0,12	0,11	0,10	0,09
100	0,11	0,12	0,12	0,11	0,09	0,09
150	0,11	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08
200	0,11	0,12	0,11	0,10	0,08	0,09
250	0,12	0,12	0,11	0,09	0,09	0,09
300	0,12	0,12	0,11	0,09	0,09	0,08

Таблица 54 – Производство коэффициентов трения и бокового давления для бронзового порошка БрОФ-10-1

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,10	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08
100	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08
150	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08
200	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08
250	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
300	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

Таблица 55 – Производство коэффициентов трения и бокового давления для порошка твердого сплава ВК8

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,10	0,11	0,11	0,10	0,09	0,09
100	0,10	0,11	0,11	0,10	0,08	0,08
150	0,10	0,11	0,11	0,09	0,08	0,08
200	0,10	0,11	0,11	0,09	0,08	0,08
250	0,10	0,11	0,10	0,09	0,07	0,08
300	0,10	0,11	0,10	0,08	0,07	0,08

Таблица 56 – Производство коэффициентов трения и бокового давления для порошка тяжелого сплава ПВН

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0,10	0,11	0,12	0,11	0,09	0,09
100	0,10	0,11	0,12	0,11	0,09	0,09
150	0,10	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08
200	0,10	0,12	0,11	0,10	0,08	0,09
250	0,11	0,12	0,12	0,11	0,08	0,08
300	0,11	0,12	0,11	0,12	0,08	0,08

4.2 Реологические свойства

Комплексным показателем реологических свойств среды является давление истечения материала через капилляр вискозиметра. Капиллярный вискозиметр представляет собой миниатюрную пресс-форму для мундштучного формования с комплектом сменных мундштуков. Каждый мундштук имеет калиброванное цилиндрическое отверстие и коническую часть с заданным углом. При измерениях материал продавливают через мундштук, регистрируя усилие выдавливания и скорость истечения среды. Такие устройства

традиционно используют для проведения реологических исследований вязких сред.

Давление истечения материалов через цилиндрический капилляр исследовано в зависимости от содержания пластификатора (рис. 34), степени радиального обжата материала (рис. 35) и его температуры (рис. 36).

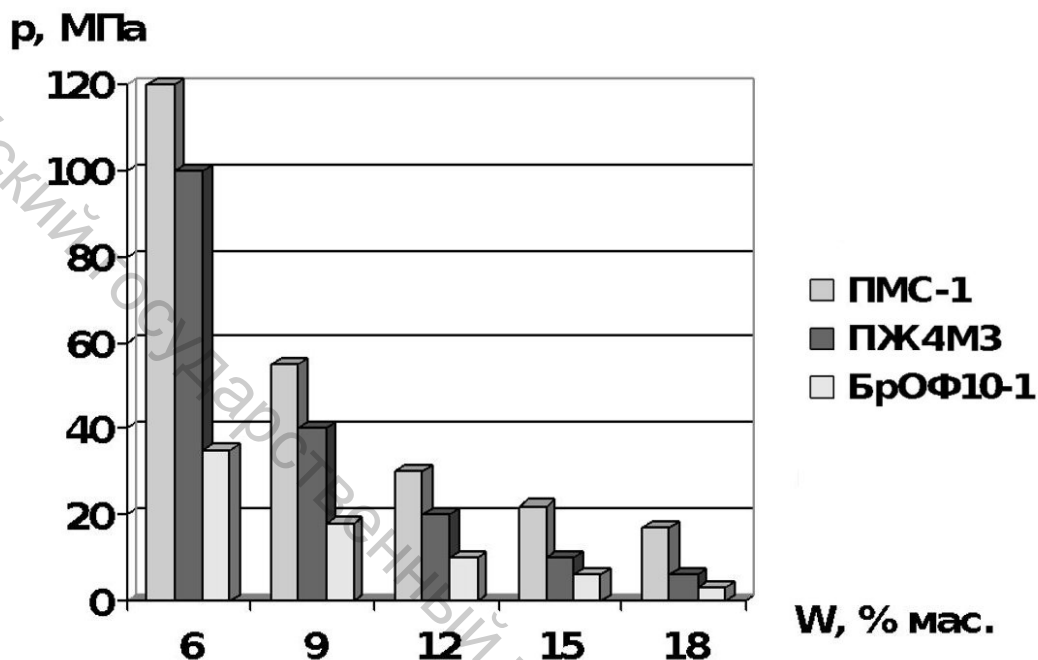


Рисунок 34 – Зависимость давления истечения от содержания парафина ($T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $K = 90\%$)

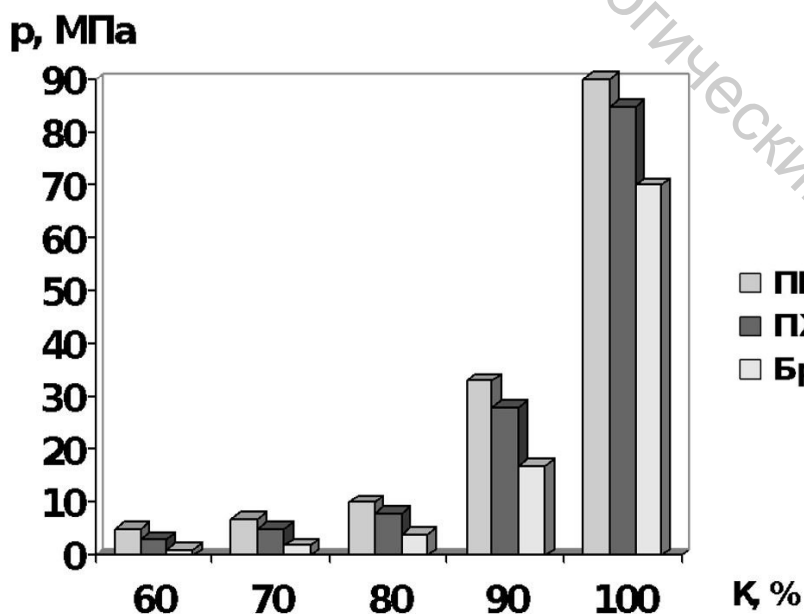


Рисунок 35 – Зависимость давления истечения от степени обжата ($T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W = 15\%$)

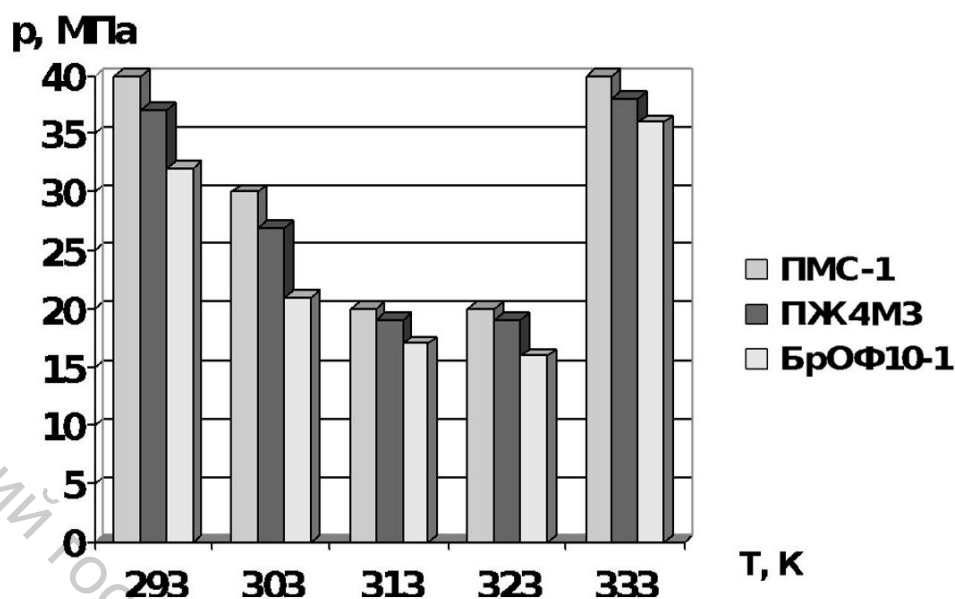


Рисунок 36 – Зависимость давления истечения среды от температуры ($K = 90 \%$, $W = 15 \%$)

Видно, что давление истечения резко возрастает при уменьшении концентрации пластификатора ниже 6 % мас. При температуре плавления парафина давление истечения минимально, однако даже небольшой перегрев материала выше этой температуры резко затрудняет экструзию. Можно утверждать, что экструзия материала с расплавленным по всему объему парафином невозможна.

Возможности вискозиметра не исчерпываются исследованием реологических свойств среды. Разработана оригинальная методика измерения коэффициентов трения, а также предела текучести материала непосредственно в процессе его экструзии. Пластичный материал последовательно трижды продавливают через мундштуки с разными углами конуса γ_1 , γ_2 и γ_3 . Размер отверстия, материал и чистота поверхности у мундштуков должны быть одинаковы. При этом каждый раз регистрируют усилия P_1 , P_2 и P_3 , при которых начинается истечение среды через очко мундштука. Первые два измерения проводят с мундштуками, имеющими углы наклона образующей конической части меньшими угла естественного течения γ_T материала: $\gamma_1 < \gamma_2 < \gamma_T$. Для определенности, с достаточной для практики точностью, можно считать, что $\gamma_T = 45^\circ$. В результате получается система двух уравнений

$$P_i = \sigma_s S \left(\frac{f_B}{\sin \gamma_i} + \frac{2}{1 + \cos \gamma_i} \right) \ln \frac{S}{s}; \quad i = 1, 2, \quad (180)$$

где S и s – площади поперечного сечения отверстия мундштука на его входе и выходе; σ_s – предел текучести материала на срез; f_B – коэффициент трения материала о поверхность мундштука (коэффициент внешнего трения).

Полученная система двух линейно независимых уравнений может быть решена относительно σ_s и f_b . Третье измерение проводят с мундштуком, имеющим угол подъема образующей конической части $\gamma_3 > \gamma_T$. При этом выдавливание сопровождается трением по поверхности, находящейся внутри материала и соответствующей углу естественного течения γ_T , а в уравнении (180) появляется коэффициент межчастичного трения f_m :

$$P_i = \sigma_s S \left(\frac{f_m}{\sin \gamma_T} + \frac{2}{1 + \cos \gamma_T} \right) \ln \frac{S}{s}. \quad (181)$$

Так можно определить коэффициенты внешнего и внутреннего трения, действующие непосредственно в процессе экструзии, а не измеренные в лабораторных условиях на трибометре.

Пластические свойства среды лучше всего отражает такая интегральная характеристика, как структурно-пластическая прочность, представляющая собой наибольшее касательное напряжение, которое структура выдерживает без разрушения. Схема ее измерения изображена на рисунке 37.

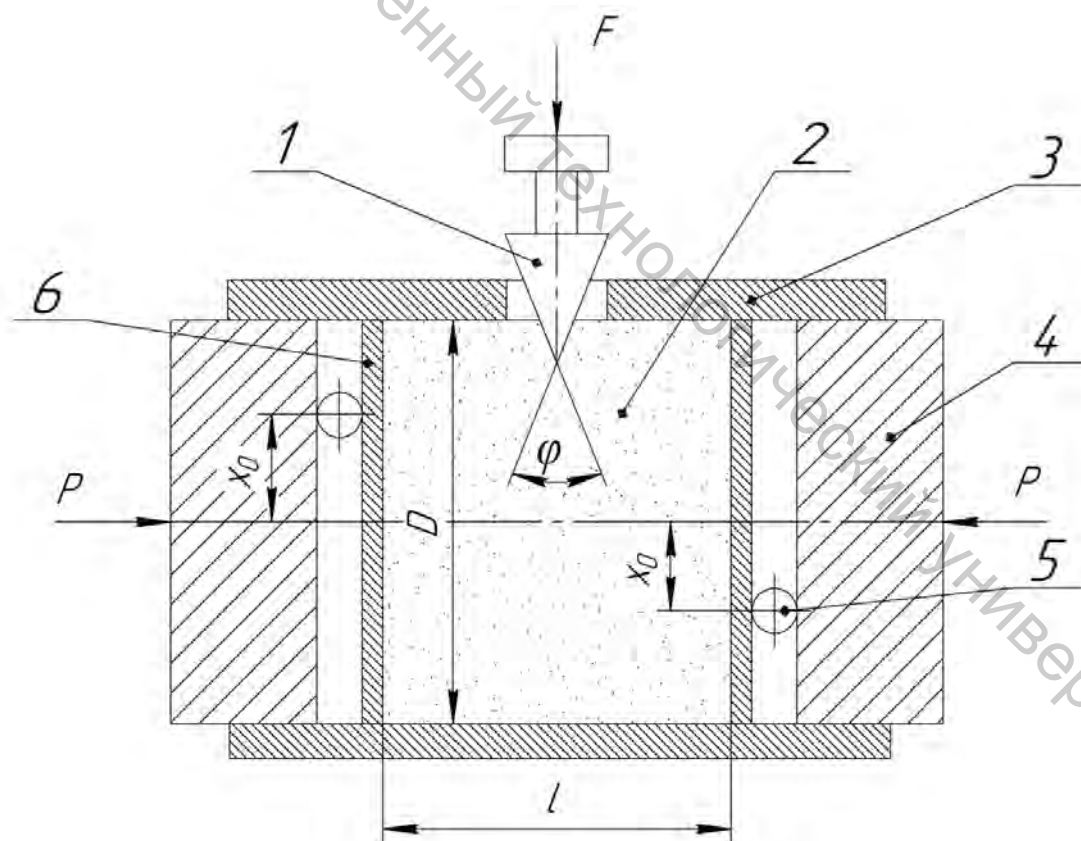


Рисунок 37 – Схема измерения структурной прочности среды

Конический индентор 1 внедряют с усилием F в образец 2, находящийся в матрице 3. Образец сжимают усилием P пуансонами 4 через сферические опоры 5 и тонкие пластины 6. Затем измеряют

диаметр d отпечатка и вычисляют глубину погружения конуса:

$$h = \frac{d}{2} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}, \quad (182)$$

где φ – угол при вершине конуса.

Прочность структуры определяют из выражения

$$\tau_m = \frac{\cos^2 \frac{\varphi}{2}}{\pi \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} \frac{F}{h^2}. \quad (183)$$

Нормальные и касательные напряжения в месте внедрения конуса

$$\sigma = \frac{4P}{\pi D^2}; \quad \tau = \frac{32 x_0 P}{3 l D^2} \left[1 - \left(1 - \frac{2h}{D} \right)^2 \right], \quad (184)$$

где D и l – диаметр и длина образца соответственно; x_0 – радиальное смещение сферических элементов. Конструкция прибора запатентована [201].

Результаты измерения структурной прочности некоторых сред, подвергаемых экструзии, представлены на рисунках 38–40.

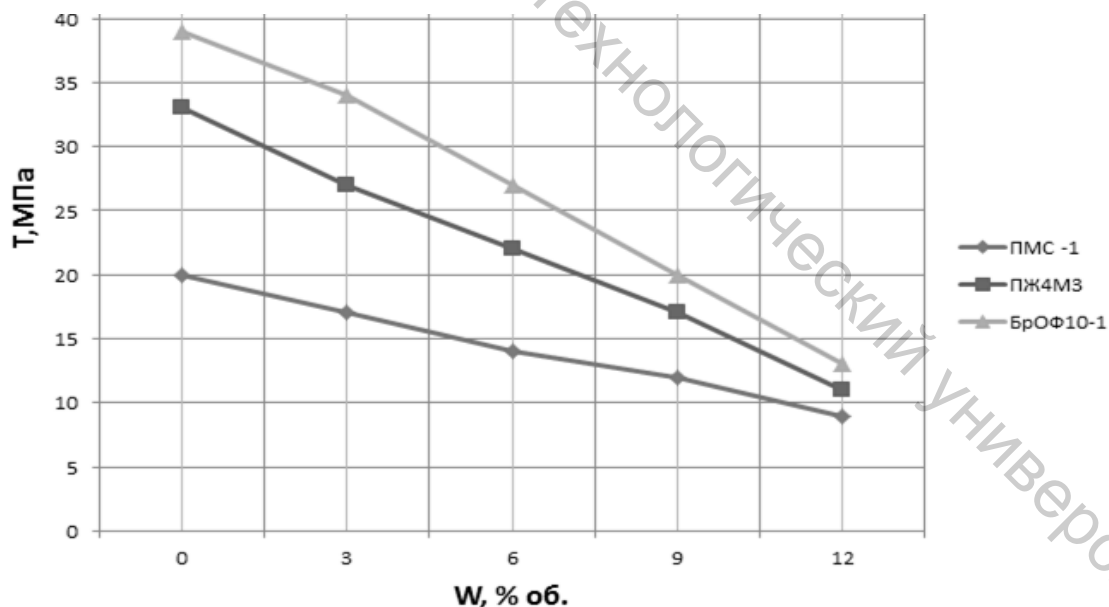


Рисунок 38 – Структурная прочность материалов при давлении 30 МПа

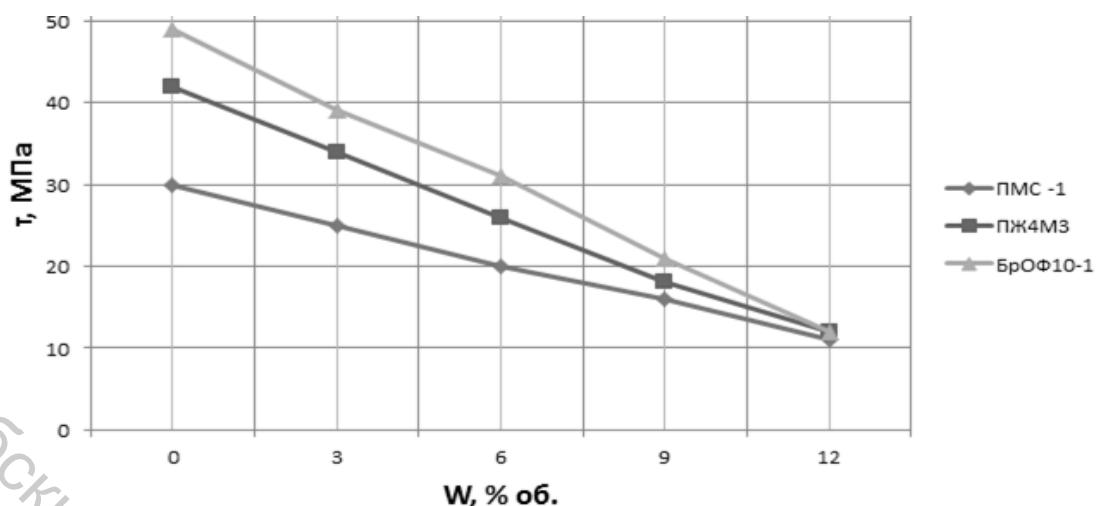


Рисунок 39 – Структурная прочность материалов при давлении 60 МПа

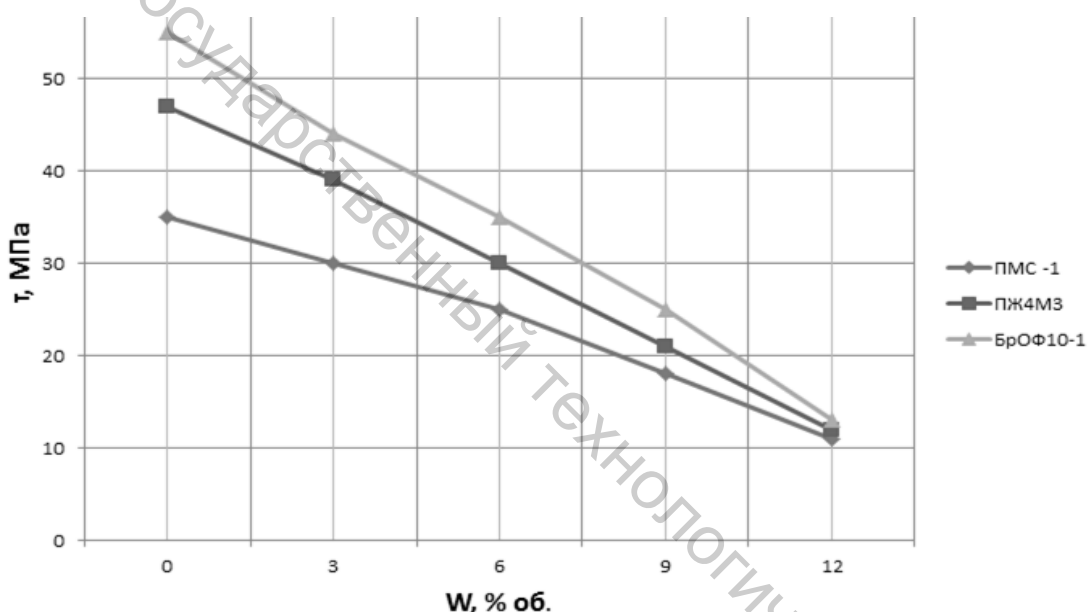


Рисунок 40 – Структурная прочность материалов при давлении 90 МПа

Из проведенных экспериментов видно, что структурно-пластическая прочность пластифицированных парафином порошков возрастает с увеличением давления прессования и уменьшается с увеличением концентрации пластификатора, причем обе зависимости близки к линейной. С ростом содержания парафина различия между материалами уменьшаются и практически исчезают при его концентрации более 12 % мас. У высокопластифицированных порошков структурно-пластическая прочность, как и другие технологические свойства, определяется в основном химическим составом и количеством пластификатора в материале, а не порошком основной фазы.

4.3 Уплотняемость среды

Важной формой пластического течения среды является ее необратимое сжатие (уплотняемость) в процессе деформации. Под уплотняемостью понимают зависимость плотности среды от напряженного состояния в ней. Исследование уплотняемости проводят, сжимая среду в закрытой пресс-форме.

Формуемая среда состоит из жестких частиц основной фазы, твердого или жидкого пластификатора и газовой фазы. Газы могут находиться в порах основной фазы и в пластификаторе. Способность среды к необратимому уплотнению определяется возможностью выдавливания из нее газовой фазы, а это зависит не только от материала, но и от конструктивных особенностей экструдера. Деформация твердых частиц скелетной фазы и жидкой фазы при экструзии мала. Жидкие пластификаторы почти не содержат газов и поэтому практически несжимаемы. Твердые пластификаторы, как правило, содержат много газовой фазы и их уплотняемостью пренебрегать нельзя. Так, наиболее распространенный пластификатор – парафин – в твердом состоянии уплотняется почти на четверть, в то время как жидкий парафин почти не содержит газов и практически несжимаем.

Исследование уплотняемости среды традиционно проводят с использованием сложного оборудования, оснащенного встроенными микропроцессорами [197]. Попутно измеряют усилие выталкивания, коэффициенты трения и бокового давления, работу прессования и некоторые другие характеристики материала. Изучение уплотнения среды при сложном напряженном состоянии проводят на приборе для трехосного сжатия образца [198].

Для исследования уплотняемости среды была использована оригинальная методика, позволяющая изучать ее поведение как при одноосном нагружении, так и при более сложном напряженном состоянии.

Плотность среды удобно выражать в процентах от плотности ρ_k компактной беспористой прессовки, рассчитанной по формуле

$$\rho_k = \left(\frac{w_{пл}}{\rho_{пл}} + \frac{w_ч}{\rho_ч} \right)^{-1}, \quad (185)$$

где $w_{пл}$ и $w_ч$ – массовый % пластификатора и порошковых частиц в материале соответственно; $\rho_{пл}$ и $\rho_ч$ – плотность пластификатора и частиц порошка.

Уплотняемость материалов исследовалась с помощью прибора,

схема которого изображена на рисунке 31. Методика исследования следующая.

Сначала определялась зависимость плотности среды от приложенного давления прессования при простом одноосном сжатии. Для этого две засыпки уплотняли последовательно нарастающим усилием, периодически регистрируя это усилие и соответствующую ему высоту образца. Нагружение прекращали, когда все газы выдавливались и высота образца переставала изменяться.

Затем, по известной массе засыпок и их высоте, для каждого измерения вычисляли плотность среды и строили кривую уплотнения, представляющую собой зависимость плотности от приложенного давления. Использование двух одинаковых засыпок позволяет повысить надежность и точность эксперимента: возникновение внештатной ситуации (перекося одного из пуансонов, попадание посторонних предметов в материал и т. д.) приводит к получению сильно различающихся по высоте прессовок и легко регистрируется визуально.

После этого напряженное состояние в образце усложняли. К среднему пуансону дополнительно прикладывали вращающий момент с помощью диска 13, тросика 14, блока 15 и подвески 16 с грузами 17. Описанную выше последовательность действий повторяли для разных по величине касательных напряжений, получая зависимость плотности материала от вида напряженного состояния в нем и интенсивности созданных напряжений.

Результаты исследования уплотняемости чистых непластифицированных и в разной степени пластифицированных парафином порошков при одноосном сжатии представлены в таблицах 57–62.

Таблица 57 – Относительная плотность непластифицированных порошков, %

Марка порошка	Давление прессования, МПа						
	0	100	200	300	400	500	600
ПМС-1	20	42	58	69	77	84	88
ПЖ4МЗ	33	50	59	65	70	74	77
ПХ-30	26	45	57	63	68	72	74
Броф-10-1	33	51	61	70	77	82	86
ВК8	35	42	48	53	57	60	62
ПВН	25	35	41	46	50	53	55
Парафин	82	100	100	100	100	100	100

Таблица 58 – Относительная плотность материалов, содержащих 10 % парафина

Марка порошка	Давление прессования, МПа						
	50	100	150	200	250	300	350
ПМС-1	52	67	78	86	92	96	98
ПЖ4МЗ	60	67	73	78	82	85	87
ПХ-30	55	64	70	75	79	82	84
Броф-10-1	61	72	80	86	91	94	96
ВК8	50	57	62	66	69	71	72
ПВН	43	50	55	59	62	64	65

Таблица 59 – Относительная плотность материалов, содержащих 20 % парафина

Марка порошка	Давление прессования, МПа						
	50	100	150	200	250	300	350
ПМС-1	64	77	88	96	100	100	100
ПЖ4МЗ	72	80	84	88	92	95	97
ПХ-30	67	75	81	85	89	92	94
Броф-10-1	73	83	91	96	100	100	100
ВК8	62	68	72	76	79	81	82
ПВН	55	62	67	69	72	74	75

Таблица 60 – Относительная плотность материалов, содержащих 30 % парафина

Марка порошка	Давление прессования, МПа						
	50	100	150	200	250	300	350
ПМС-1	76	88	97	100	100	100	100
ПЖ4МЗ	84	90	95	98	100	100	100
ПХ-30	77	85	91	95	79	82	84
Броф-10-1	83	93	100	100	100	100	100
ВК8	72	78	82	86	89	91	92
ПВН	65	72	77	79	82	84	85

Таблица 61 – Относительная плотность материалов, содержащих 40 % парафина

Марка порошка	Давление прессования, МПа						
	50	100	150	200	250	300	350
ПМС-1	82	97	100	100	100	100	100
ПЖ4МЗ	90	97	100	100	100	100	100
ПХ-30	85	94	99	100	100	100	100
Броф-10-1	91	100	100	100	100	100	100
ВК8	80	87	92	96	99	100	100
ПВН	73	80	85	89	92	94	95

Таблица 62 – Относительная плотность материалов, содержащих 50 % парафина

Марка порошка	Давление прессования, МПа						
	50	100	150	200	250	300	350
ПМС-1	91	100	100	100	100	100	100
ПЖ4МЗ	99	100	100	100	100	100	100
ПХ-30	95	100	100	100	100	100	100
Броф-10-1	99	100	100	100	100	100	100
ВК8	90	97	100	100	100	100	100
ПВН	83	90	95	99	100	100	100

Уплотняемость пластифицированных порошков, формуемых экструзией (содержащих парафина около 40 % об.), сильно отличается от уплотняемости непластифицированных порошков, применяемых в порошковой металлургии. При сравнительно невысоких давлениях (100–150 МПа) пластифицированный порошок уже достигает беспористого компактного состояния и теряет способность к дальнейшему уплотнению. Рисунок 41 иллюстрирует влияние содержания пластификатора в медном порошке на уплотняемость. Видно, что наличие парафина радикально меняет форму кривой уплотнения. Ни одно из уравнений прессования не отражает этой особенности.

Уплотняемость среды зависит не только от величины напряжений, но и от вида напряженно-деформированного состояния в материале. Описанные выше исследования проведены при простом одноосном сжатии образца. Однако в процессе экструзии возникает сложное напряженное состояние с большими касательными напряжениями на

поверхности контакта среды и формующего инструмента. Как отмечалось в первой главе, многие исследователи процесса экструзии указывают на заметное увеличение плотности материала даже при сравнительно небольших давлениях и связывают это с очень высокой эффективностью касательных напряжений, возникающих на поверхности трения. Однако степень влияния разных по интенсивности касательных напряжений на плотность среды до сих пор осталась неизученной. Результаты исследования уплотняемости медного порошка ПМС-1, находящегося в сложнапряженном состоянии, представлены в таблицах 63–66.

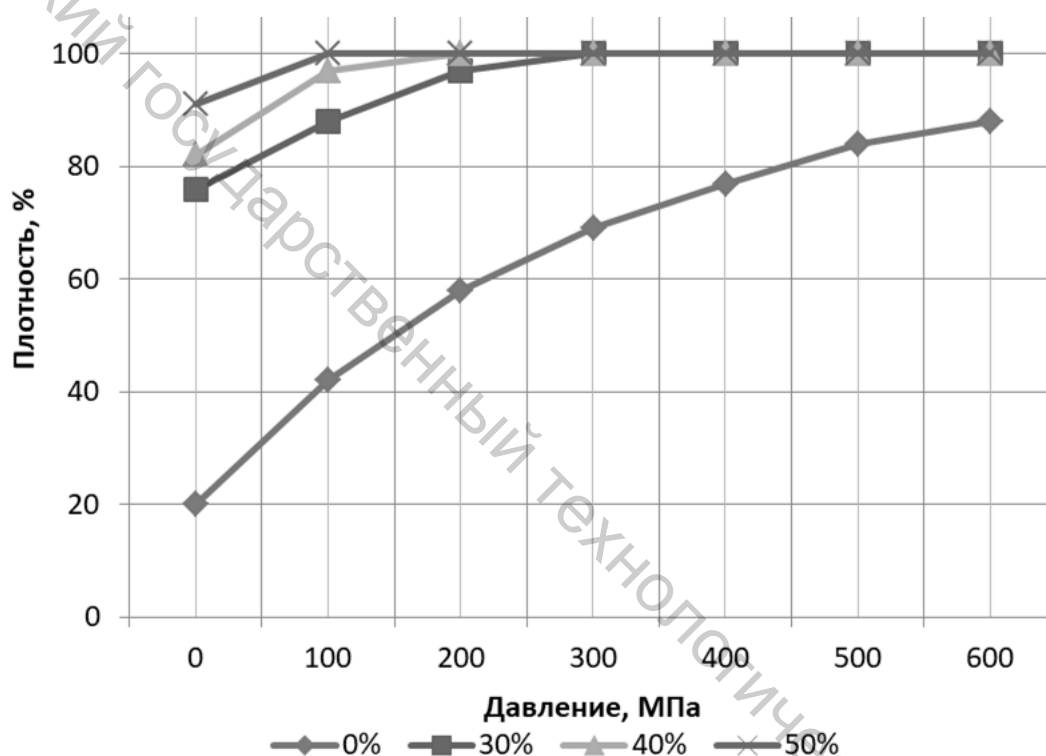


Рисунок 41 – Влияние концентрации парафина на уплотняемость медного порошка ПМС-1

Таблица 63 – Относительная плотность медного порошка, % ($\tau = 0$)

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	30	52	64	76	82	91
100	42	67	77	88	97	100
150	51	78	88	97	100	100
200	58	86	96	100	100	100
250	64	92	100	100	100	100
300	69	96	100	100	100	100

Таблица 64 – Относительная плотность медного порошка, %
($\tau = 20$ МПа)

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	40	64	74	83	90	94
100	48	75	85	92	98	100
150	55	82	92	99	100	100
200	61	89	97	100	100	100
250	67	94	99	100	100	100
300	72	98	100	100	100	100

Таблица 65 – Относительная плотность медного порошка, %
($\tau = 40$ МПа)

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	43	68	78	89	98	100
100	52	79	89	98	100	100
150	59	87	97	100	100	100
200	65	93	100	100	100	100
250	70	97	100	100	100	100
300	74	99	100	100	100	100

Таблица 66 – Относительная плотность медного порошка, %
($\tau = 60$ МПа)

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
100	56	83	93	99	100	100
150	62	90	98	100	100	100
200	68	95	100	100	100	100
250	72	98	100	100	100	100
300	75	99	100	100	100	100

Видно, что касательные напряжения в плоскости, перпендикулярной направлению прессования, значительно увеличивают плотность материала. Так, медный порошок, содержащий 10 % об. парафина, уплотняется с 67 % до 83 % при приложении дополнительных касательных напряжений величиной 60 МПа.

Глава 5. Экспериментальное исследование шнековой экструзии

5.1 Скоростной режим формования

Интегральным показателем, позволяющим наиболее полно сравнить результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований процесса шнековой экструзии, является диапазон допустимых скоростей вращения шнека. Если угловая скорость шнека выходит за границы этого диапазона, процесс экструзии прекращается и материал начинает вращаться вместе со шнеком. Построенная теория предсказывает наличие такого диапазона и позволяет рассчитать его верхнюю и нижнюю границы (163–164).

Экспериментально исследована зависимость возможных скоростей вращения шнека от давления прессования, коэффициентов трения материала о шнек и цилиндр, геометрии формирующего инструмента (экструзионной матрицы). В качестве термопластичного пластификатора использован парафин технический очищенный, список исследованных порошковых сред достаточно объемен (пятнадцать марок разных порошков).

Технические характеристики использованной для проведения экспериментов шнековой машины представлены в таблице 67.

Таблица 67 – Технические характеристики экспериментальной установки

Усилие выдавливания, кН	200
Усилие протягивания, кН	250
Частота вращения шнека, с ⁻¹	0,015–0,6
Скорость протягивания, м/с	0,0005–0,1
Максимальный диаметр шнека, мм	60
Мощность электродвигателей, кВт	2,0

Методика проведения экспериментов следующая. Скорость вращения шнека плавно увеличивалась от нуля до наступления т. н. «срыва» (полного проворота материала вместе со шнеком). Нижняя и верхняя границы рабочего диапазона фиксировались визуально, по получению прессовок приемлемого качества. Давление прессования регулировалось изменением диаметра очка матрицы (матрицы предварительно тарировались на давление истечения для разных

материалов). Коэффициент внешнего трения варьировался путем изменения концентрации парафина в порошке.

Результаты исследования зависимости границ диапазона рабочих скоростей шнека от давления прессования представлены на рисунках 42–43.

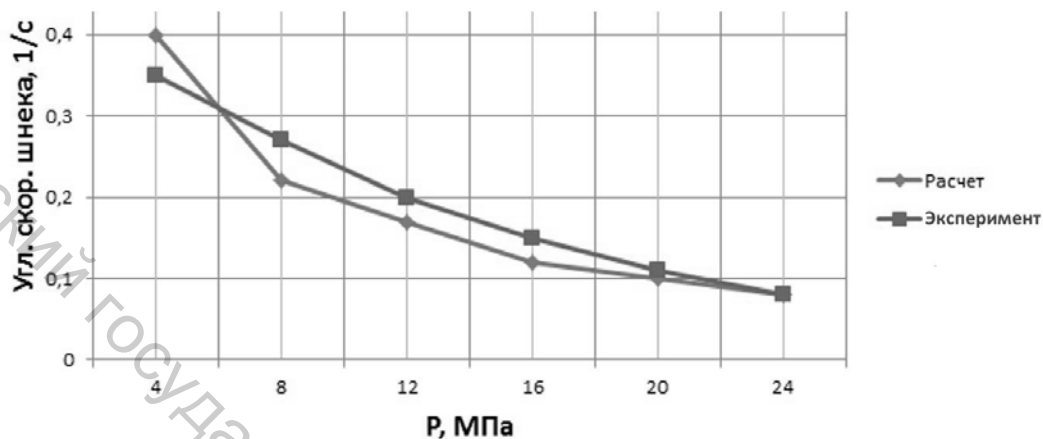


Рисунок 42 – Зависимость максимально возможной скорости шнека от давления

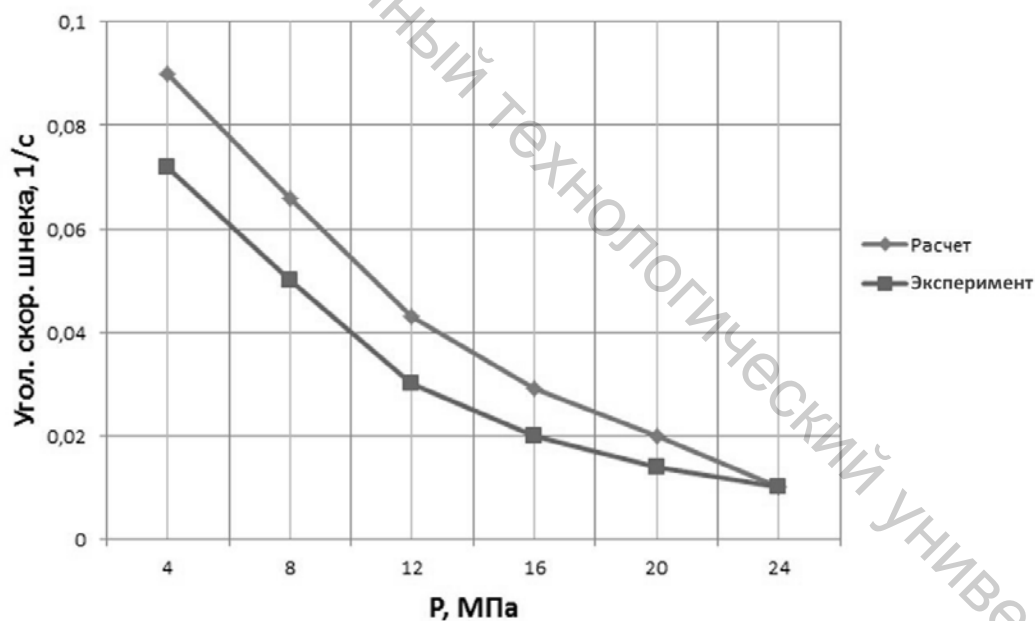


Рисунок 43 – Зависимость минимально возможной скорости шнека от давления

Увеличение трения ведет к росту тепловыделения и разогреву поверхности корпуса, температура которой, в соответствии с построенной теорией, не должна превышать температуру плавления парафина. Минимально допустимая скорость вращения шнека при таком же перепаде давлений тоже уменьшается, но это практического значения не имеет, так как столь малые обороты обычно не используют.

Эксперимент выявил недостаток парафина как пластификатора – он слишком легкоплавок. Использование более тугоплавкого вещества позволило бы увеличить производительность процесса формования. Другой выход из этого положения – принудительное охлаждение корпуса пресса.

Экспериментально удалось зафиксировать наличие нижней и верхней границ допустимого диапазона скоростей вращения шнека. Максимальная ширина этого диапазона лежит в интервале давлений 4–8 МПа и составляет $0,25 \text{ с}^{-1}$. С ростом давления прессования ширина диапазона убывает.

Теоретически рассчитанный диапазон допустимых скоростей вращения шнека лежит внутри экспериментально найденного, что позволяет пользоваться расчетными формулами без дополнительной их корректировки. При этом обеспечивается некоторый запас как по нижней, так и по верхней границам диапазона. Максимальная относительная погрешность для верхней границы наблюдается при давлении 12 МПа и составляет 20 %.

На рисунке 44 изображена зависимость максимально допустимой скорости вращения шнека (верхней границы рабочего диапазона) от угла подъема канала.

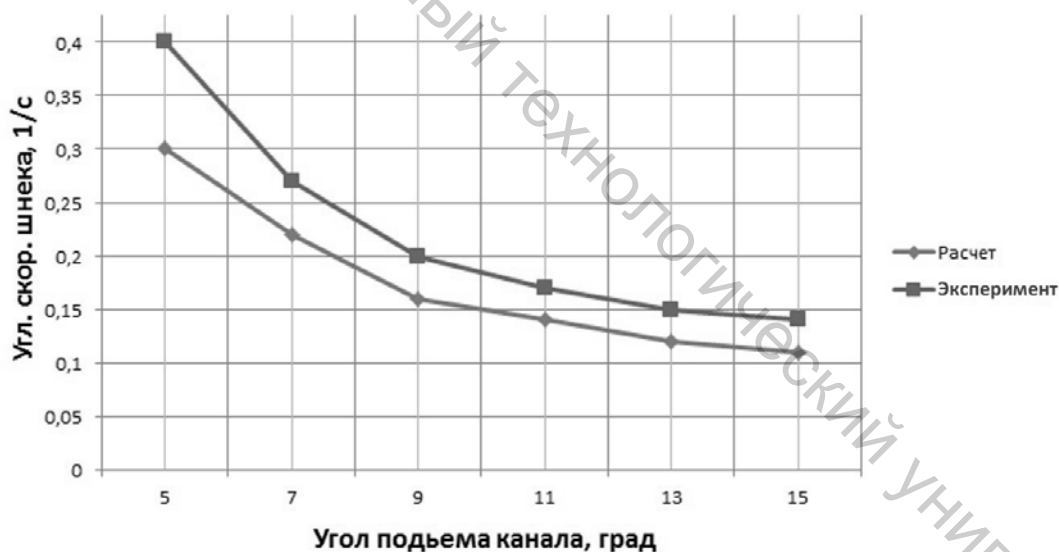


Рисунок 44 – Зависимость допустимой скорости вращения шнека от угла подъема канала

Видно, что с ростом угла подъема винтового канала максимально допустимая скорость вращения шнека падает. По форме экспериментальная и расчетная кривые совпадают, а по величине экспериментальные значения на 10–30 % больше расчетных.

Этот эксперимент не позволил зафиксировать наличие нижней границы диапазона рабочих скоростей шнека из-за ограничений, накладываемых кинематическими возможностями привода пресса в

области малых скоростей вращения. Теория предсказывает существование не зависящей от угла подъема канала нижней границы рабочего диапазона на уровне $0,01 \text{ с}^{-1}$, а привод позволяет вращать шнек с минимальной скоростью $0,015 \text{ с}^{-1}$. В любом случае, такое медленное вращение практического интереса не представляет.

На рисунке 45 изображена зависимость допустимой скорости вращения шнека от радиуса внутренней поверхности (дна) его винтового канала.

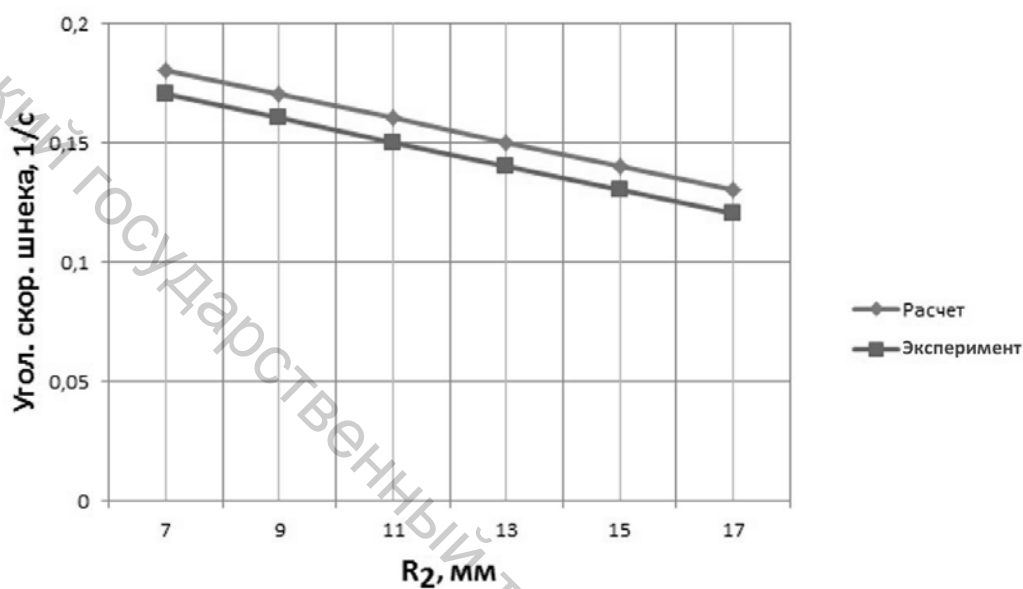


Рисунок 45 – Зависимость допустимой скорости вращения шнека от радиуса дна канала

Видно, что чем глубже канал шнека, тем меньше допустимая скорость его вращения. Связано это с увеличением площади контакта материала со шнеком и, соответственно, увеличением силы сцепления с ним. Расчетная кривая убывает несколько круче экспериментальной и расположена выше, однако совпадение результатов теоретического и экспериментального исследования можно признать удовлетворительным.

Теория предсказывает также существование и нижней границы диапазона допустимых скоростей вращения шнека. Это ниспадающая прямая линия, начинающаяся от значения $0,03 \text{ с}^{-1}$ при $r_2 = 7 \text{ мм}$ и заканчивающаяся значением $0,01 \text{ с}^{-1}$ при $r_2 = 17 \text{ мм}$. Достоверно наличие нижней границы зафиксировать не удалось по той же причине, что и в предыдущем эксперименте. Однако практического значения наличие или отсутствие минимально допустимой скорости шнека при столь малых его оборотах не имеет.

На рисунке 46 представлена зависимость верхней границы рабочего диапазона скоростей вращения шнека от толщины гребня его винтовой нарезки.

В этом случае расчетная и экспериментальная кривые по форме различаются. Экспериментальная кривая близка к прямой линии, а кривая, полученная расчетным путем, заметно изогнута. Совпадение результатов теоретического и экспериментального исследований в диапазоне аргумента 2–5 мм можно признать удовлетворительным, а в диапазоне 5–12 мм – хорошим.

Трактовать результаты этого эксперимента можно следующим образом. Шнек с толстым гребнем допустимо вращать немного быстрее, чем с тонким. Это довольно неочевидное заключение связано с процессами теплообмена, влияющими на свойства пластификатора.

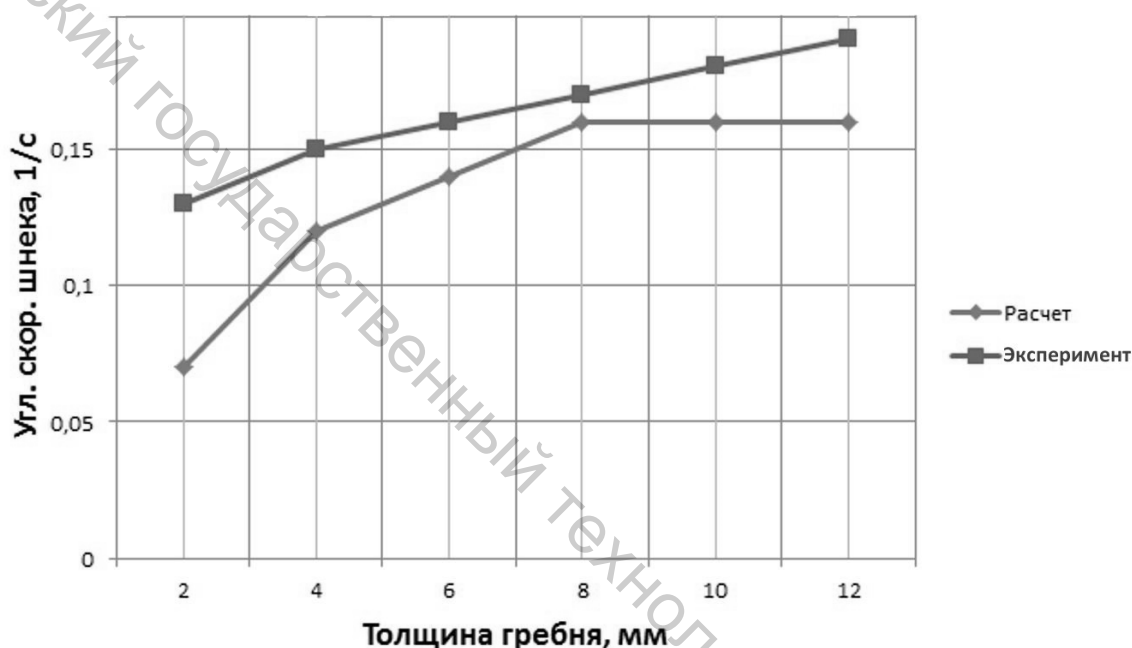


Рисунок 46 – Зависимость верхней границы рабочего диапазона скоростей шнека от толщины гребня его винтовой нарезки

Зависимость предельно допустимых скоростей вращения шнека от радиуса наружной поверхности цилиндра изображена на рисунке 47.

Как видно, размер цилиндра сильно влияет на допустимую скорость вращения шнека. Так, при увеличении его радиуса с 20 мм до 70 мм верхняя граница рабочего диапазона скоростей увеличивается почти в пять раз. Это связано с улучшением теплоотвода при увеличении площади контакта цилиндра с окружающей средой. И теоретическая, и экспериментальная зависимости представляют собой прямые линии; расчет дает несколько меньшие значения, чем эксперимент, однако максимальное расхождение результатов не более 20 %.

Теория предсказывает также существование и нижней границы диапазона рабочих скоростей вращения шнека на уровне $0,03 \text{ с}^{-1}$, причем эта величина не зависит от радиуса наружной поверхности

цилиндра. Экспериментально существование этой границы также подтверждено, однако эти результаты нельзя назвать достоверными из-за близости указанного значения к предельным скоростным возможностям привода прессы.

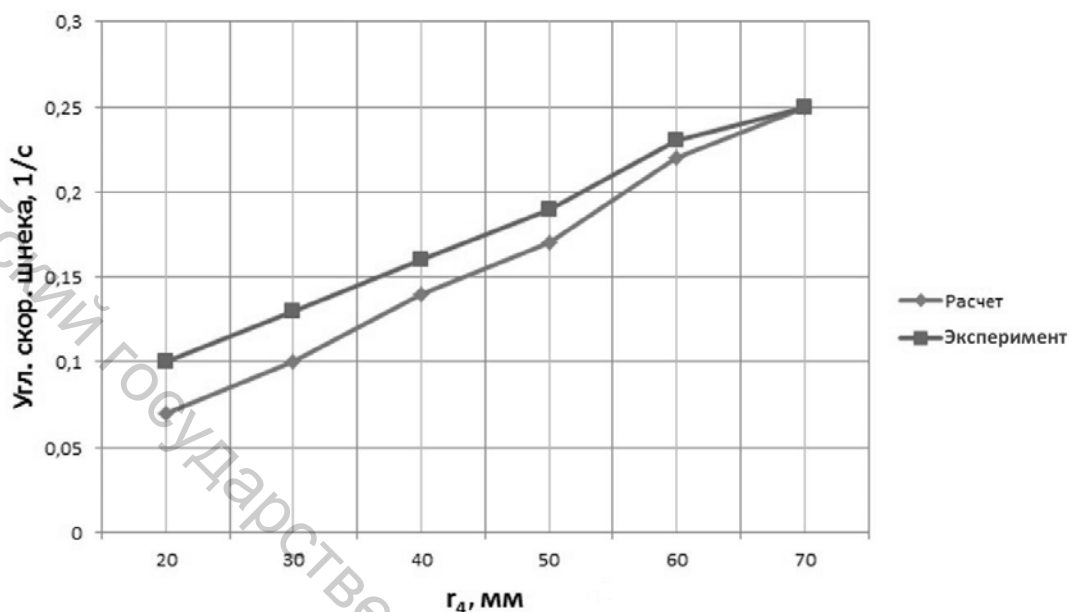


Рисунок 47 – Зависимость верхней границы рабочего диапазона скоростей вращения шнека от радиуса наружной поверхности цилиндра

На рисунке 48 изображена зависимость предельных скоростей вращения шнека от коэффициента трения материала о цилиндр.

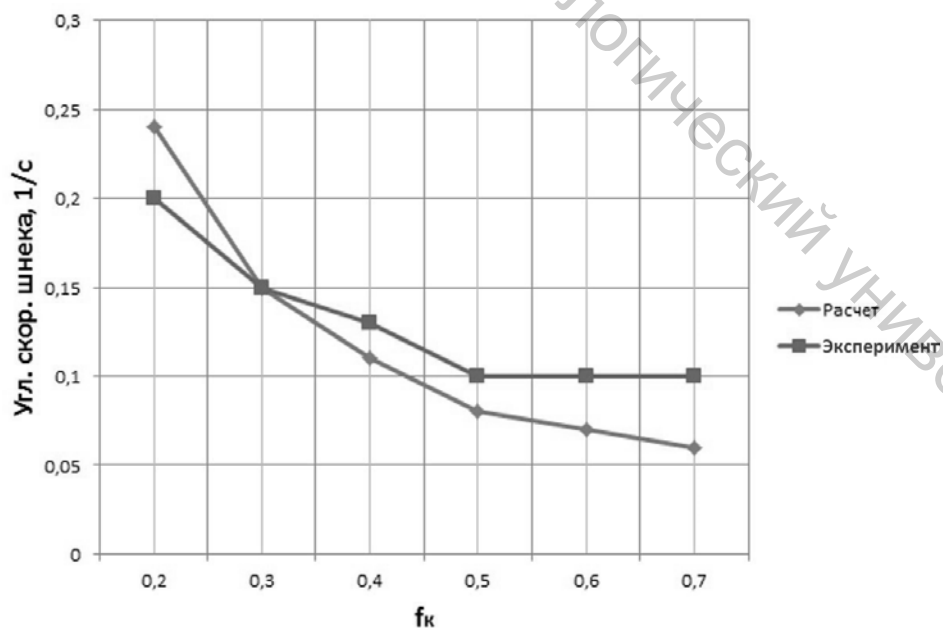


Рисунок 48 – Зависимость верхней границы рабочего диапазона скоростей вращения шнека от коэффициента трения материала о цилиндр

Экспериментально измеренные значения хорошо совпадают с теоретически рассчитанными величинами — погрешность не превышает 20 % в широком интервале коэффициентов трения. Обе кривые убывают с увеличением коэффициента трения, что связано с возрастанием тепловыделения. Необходимость выдерживать определенный температурный режим заставляет снижать обороты шнека и терять производительность процесса формования.

5.2 Окружное проскальзывание среды в шнековой машине

Выше было показано, что материал, перемещаемый шнеком, всегда движется по винтовой линии, а не прямолинейно. Теория утверждает, что при гладком цилиндре избежать проворота материала невозможно. Практика показывает, что и при наличии продольных рифлений на внутренней поверхности цилиндра окружное проскальзывание все равно присутствует, хотя и в меньшей степени. Это негативное явление снижает производительность шнекового формования и приводит к проблемам, связанным со скручиванием изделия.

Численно проворот материала в шнековой машине характеризует коэффициент окружного проскальзывания, под которым понимают отношение угловых скоростей формируемой среды и шнека. В идеале это отношение должно стремиться к нулю, то есть порошок должен двигаться вперед без проворота. Коэффициент окружного проскальзывания зависит, главным образом, от соотношения коэффициентов трения материала о цилиндр пресса и шнек.

Коэффициенты трения порошка с термопластичным наполнителем зависят от температуры, а последняя имеет тенденцию изменяться в зависимости от режима формования и, прежде всего, от скорости вращения шнека. Управляя угловой скоростью шнека, можно стабилизировать процесс формования. Схема устройства [202–203] для исследования окружного проскальзывания среды в винтовом канале шнека изображена на рисунке 49.

Устройство состоит из штока 1 с указателем 2 направления движения среды. Круговая шкала 3 установлена непосредственно на корпусе 4 пресса. В сквозном радиальном отверстии корпуса находится опорная гайка 5 с упругим элементом 6. Шток установлен в центральном отверстии опорной гайки с возможностью поворота и осевого перемещения. Его направляющая часть 7 прижимается упругим элементом к материалу 8, находящемуся между витками шнека 9. Скорость перемещения среды шнеком складывается из продольной и окружной составляющих

$$\vec{V} = \vec{V}_{\text{пр}} + \vec{V}_{\text{окр}}, \quad (186)$$

в результате чего он движется по винтовой линии.

Направляющая часть штока, представляющая собой тонкое закругленное ребро, всегда ориентируется вдоль направления движения материала. Это направление и показывает указатель 2. Упругий элемент и округлая форма направляющей части предохраняют шток от срезания гребнем винта – при набегании гребня он отжимается вверх.

Указатель отклоняется при измерении на угол α – угол между направлением полной скорости материала и ее продольной составляющей. Шкала устройства проградуирована непосредственно в значениях коэффициента окружного проскальзывания, причем пересчет произведен из следующих соображений.

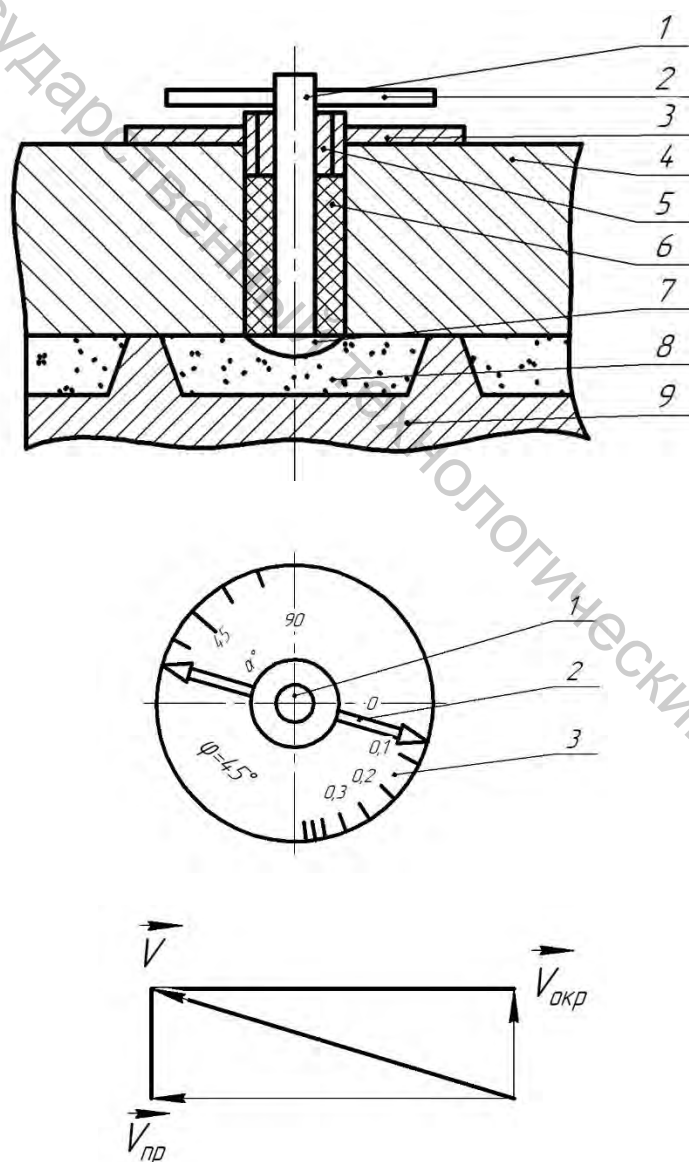


Рисунок 49 – Схема измерения коэффициента окружного проскальзывания среды в канале шнека

Составляющие скорости движения материала определяются выражениями

$$V_{\text{пр}} = R(\omega - \omega_{\text{м}}) \operatorname{tg} \varphi; \quad V_{\text{окр}} = \omega_{\text{м}} R, \quad (187)$$

где R – расстояние от оси шнека до места измерения; ω и $\omega_{\text{м}}$ – угловые скорости шнека и материала соответственно; φ — угол подъема канала шнека.

Так как

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{\omega - \omega_{\text{м}}}{\omega_{\text{м}}} \operatorname{tg} \varphi = \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \operatorname{tg} \varphi; \quad \eta = \frac{\omega_{\text{м}}}{\omega}, \quad (188)$$

то коэффициент окружного проскальзывания равен

$$\eta = \frac{1}{1 + \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{ctg} \varphi}. \quad (189)$$

Полученная шкала нелинейна. Коэффициенты окружного проскальзывания для ее градуировки приведены в таблице 68.

Таблица 68 – Коэффициенты окружного проскальзывания для градуировки

$\alpha^\circ \setminus \varphi^\circ$	5	10	15	20	25
0	0	0	0	0	0
15	0,02	0,05	0,07	0,09	0,11
30	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21
45	0,08	0,15	0,21	0,27	0,32
60	0,13	0,23	0,32	0,39	0,45
75	0,25	0,40	0,50	0,58	0,64
90	1	1	1	1	1

Исследование коэффициентов окружного проскальзывания в зависимости от параметров процесса экструзии проведено на порошках, пластифицированных парафином и поливиниловым спиртом. Ниже приведены результаты измерений для медного порошка ПМС-1, пластифицированного парафином. Зависимость коэффициента окружного проскальзывания среды от скорости вращения шнека и угла подъема его винтовой нарезки при концентрации парафина 12 % мас. и температуре $T = 25^\circ \text{C}$ представлена в таблице 69.

Таблица 69 – Зависимость коэффициента окружного проскальзывания материала от угловой скорости шнека и угла подъема винтовой нарезки канала

$\varphi, ^\circ \setminus \omega, \text{с}^{-1}$	0,1	0,2	0,3	0,4
3	0,20	0,20	0,30	0,60
6	0,20	0,25	0,40	0,80
9	0,30	0,40	0,50	1,00
12	0,40	0,50	0,60	1,00

Зависимость коэффициента окружного проскальзывания материала от состава и температуры материала (при $\varphi = 6^\circ$; $\omega = 0,2 \text{ с}^{-1}$) представлена в таблице 70.

Таблица 70 – Зависимость коэффициента окружного проскальзывания среды от содержания парафина и температуры

$T, ^\circ\text{C} \setminus k, \% \text{ мас.}$	6	9	12	15
20	0,60	0,35	0,30	0,45
25	0,60	0,35	0,25	0,40
30	0,55	0,30	0,20	0,35
35	0,55	0,30	0,15	0,30

Коэффициент проскальзывания увеличивается с ростом скорости вращения шнека и угла подъема его канала. Хорошие результаты получаются при $\varphi = 6^\circ$ и $\omega = 0,3 \text{ с}^{-1}$. Увеличение указанных параметров сверх этих величин приводит к росту проскальзывания и уменьшению стабильности экструзии вплоть до полного срыва ($\eta = 1$), возникающего обычно при $\omega = 0,5 \text{ с}^{-1}$. Для увеличения производительности материал желательно подогреть до температуры 30–35°C.

5.3 Экструзия полимерных композиций

Для многих предприятий актуальна проблема переработки полимерсодержащих отходов, условия вывоза и захоронения которых непрерывно ужесточаются. Перспективна экструзионная технология переработки отходов, основанная на термомеханическом рециклинге

полимерных материалов [211–212]. Этот метод позволяет перерабатывать реактопласты, разрушая поперечные связи между макромолекулами механическим и тепловым воздействием. Шнековые машины для переработки таких отходов обладают рядом особенностей [213].

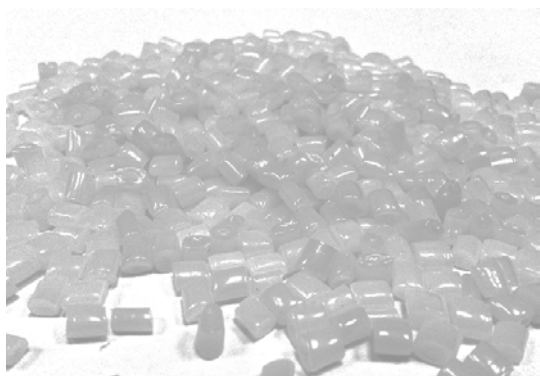
Изучение переработки полимерсодержащих отходов термомеханическим рециклингом было проведено в технопарке Витебского государственного технологического университета. Исследования выполнены на шнековом экструдере ЭШ-80Н4 производства технопарка (таблица 71).

Таблица 71 – Основные технические характеристики экструдера ЭШ-80Н4

<i>Параметр, единица измерения</i>	<i>Значение</i>
Мощность привода силового шнека, кВт	7,5
Длина нарезки шнека, мм	990
Диаметр шнека, мм	80
Количество зон нагрева шнека	3
Количество зон нагрева матрицы	2
Тип и размеры установленной матрицы	профильная, сечение 80х12 мм

Исследованы возможности переработки и формования следующих материалов:

- гранулированный вторичный ПЭНД белый, гранулы цилиндрической формы, средний размер 3–4 мм (рис. 50 а);
- кабельный гранулированный пластикат ПВХ серый, средний размер гранул 4–5 мм (рис. 50 б);
- полупрозрачный гранулированный каплен (гомополимер полипропилена), средний размер гранул 4–5 мм (рис. 50 в);
- дробленый вторичный АБС-пластик, смесь дробленки белого и черного цветов, нерегулярной формы размером от 1–2 до 8–10 мм (рис. 50 г);
- порошкообразный полисульфон с добавками полиуретана (рис. 50 д);
- дробленые отходы целанекса (полибутилентерефталата) белого цвета нерегулярной формы, размером до 5–10 мм (рис. 50 е);
- гранулированный обувной пластикат ПВХ желто-прозрачного цвета, гранулы диаметром 2,5 мм и средней длиной 3–4 мм (рис. 50 ж);
- дробленые отходы поликарбоната нерегулярной формы (рис. 50 з);



а



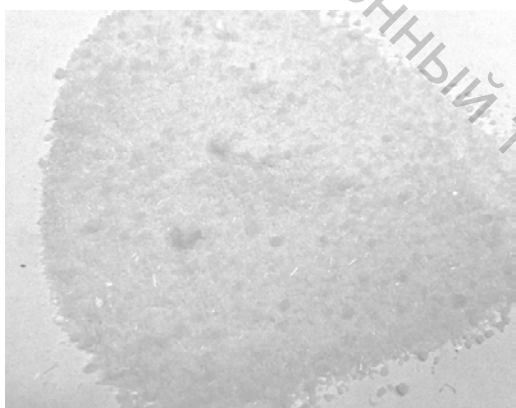
б



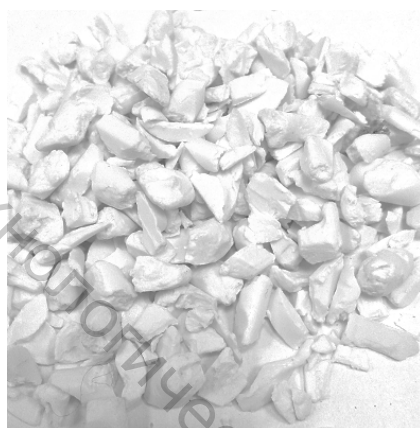
в



г



д



е



ж



з

Рисунок 50 – Полимерсодержащие материалы для отработки технологии

- отходы подошвенного мягкого пластифицированного термоэластопласта, дробленка нерегулярной формы от 3 до 10 мм (рис. 51 а);
- отходы жесткого непластифицированного ТЭП, гранулы черного цвета диаметром 3 и длиной около 5 мм (рис. 51 б);
- отходы латексной нити;
- отходы искусственных кож с добавками (картон, ватин, мех, опилки и т. п.).

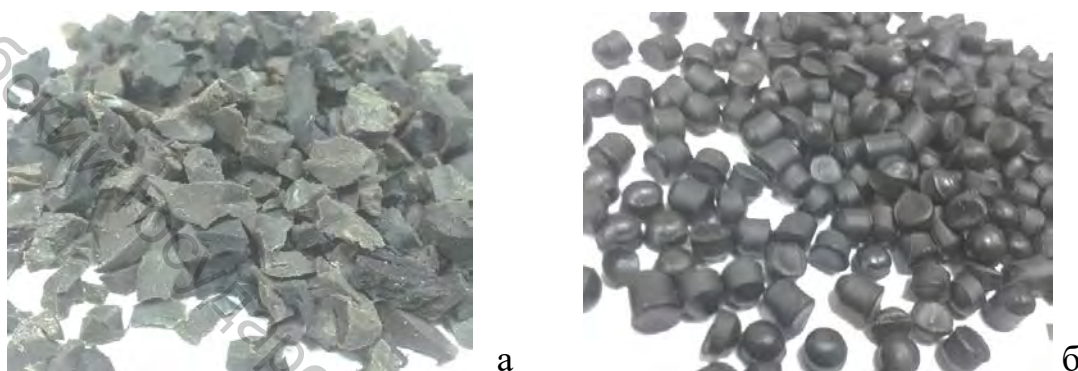


Рисунок 51 – Полимерсодержащие материалы для отработки технологии

В ходе эксперимента подбирались температурные режимы и частота вращения шнека, позволяющие получать профиль приемлемого качества. Для ряда материалов дополнительно проводилось изучение влияния частоты вращения шнека на скорость экструзии и качество продукта (рис. 52).

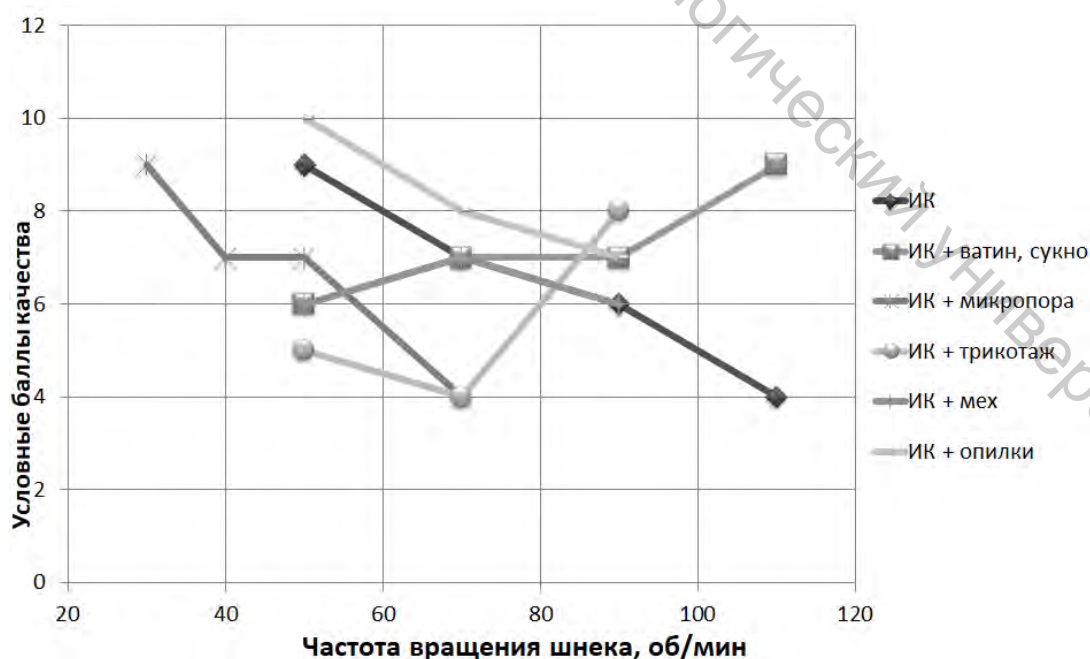


Рисунок 52 – Влияние частоты вращения шнека на качество изделий из отходов искусственной кожи с различными наполнителями

Можно сделать следующие выводы. Для каждого исследованного материала удалось найти силовые, скоростные и температурные режимы переработки, обеспечивающие получение профиля приемлемого качества. По своим технологическим свойствам изученные материалы находятся между вязкими полимерами и пластичными средами. Это означает, что построенная выше теория на них распространяется, но граничные условия и, в первую очередь, закон трения, необходимо будет уточнить.

Витебский государственный технологический университет

Глава 6. Основы проектирования техпроцессов и оборудования

В этой главе на примере реально решенной технической задачи схематически описаны основные этапы проектирования нового технологического процесса.

Исходные данные для проектирования техпроцесса и оборудования могут быть получены посредством прямого указания, являться результатом выбора, рассчитаны теоретически или измерены экспериментально. Прямым указанием задаются размеры, форма, материал, свойства изделий. Затем выбирают состав пластификатора и определяют его концентрацию, способы введения в порошок и удаления из прессовки. После этого измеряют нужные для выполнения проектных расчетов технологические характеристики формуемой среды.

Задание на проектирование. Разработать технологию и оборудование для изготовления бронзовых фильтрующих элементов, имеющих форму трубок с наружным диаметром 30 мм, внутренним диаметром 20 мм и длиной 100 мм. Тонкость фильтрации – 15–30 мкм. Рабочий перепад давлений – 0,03 МПа.

В качестве материала для фильтров выбран бронзовый сферический порошок БрОФ-10-1 (ТУ 26-130-76), пластификатор – парафин технический очищенный (ГОСТ 23683-89). Для спекания фильтров необходимы также окись алюминия (ТУ 6-09-426-75), водород (ГОСТ 3022-80) и азот (ГОСТ 9293-74).

Концентрация парафина рассчитывается из соображения, чтобы он занимал все межчастичное пространство в порошке, находящемся в состоянии утряски

$$V = V_{\Pi} + V_{\text{м}}, \quad (190)$$

где V – полный объем пластифицированного порошка; V_{Π} и $V_{\text{м}}$ – части этого объема, занимаемые пластификатором и порошком соответственно:

$$V = \frac{m_{\text{м}}}{\rho_{\text{у}}}; \quad V_{\Pi} = \frac{m_{\Pi}}{\rho_{\Pi}}; \quad V_{\text{м}} = \frac{m_{\text{м}}}{\rho_{\text{м}}}; \quad (191)$$

$$m_{\Pi} = m_{\Pi} \rho_{\Pi} \left(\frac{1}{\rho_{\text{у}}} - \frac{1}{\rho_{\text{м}}} \right), \quad (192)$$

где m_{Π} – масса парафина, нужная для пластификации порошка массой $m_{\text{м}}$; $\rho_{\text{у}}$, $\rho_{\text{м}}$ и ρ_{Π} – плотность утряски, пикнометрическая плотность

порошка и плотность парафина. Подстановка $m_m = 1$ кг, $\rho_{\Pi} = 0,9$ кг/м³, $\rho_y = 5,1$ кг/м³, $\rho_m = 8,8$ кг/м³ дает $m_{\Pi} = 0,074$ кг. На каждый килограмм порошка необходимо 74 грамма парафина.

Жидкий парафин заливают в порошок и перемешивают. Наилучших результатов удастся добиться, применяя специальные методы пластификации [204]. С целью гомогенизации смеси ее продавливают через мунштук со степенью обжатия 80 %. Затем материал измельчают (размер гранул около 5 мм).

Для обеспечения нужной степени фильтрации выбрана фракция порошка с размером частиц -200 +160 мкм. Ее отделяют виброситом с сетками № 016 и № 020 ГОСТ 6613-86. Коэффициенты трения и другие характеристики материалов измеряют с помощью методик и устройств, описанных в четвертой главе.

6.1 Проектирование формующего инструмента

Расчетная схема для проектирования матрицы изображена на рисунке 3. Параметры калибрующей части определяются геометрией изделия: $r_1 = 15$ мм, $r_0 = 10$ мм, $z_2 - z_1 = 20$ мм. Угол наклона образующей конуса $\alpha = 30^\circ$. Большее значение этого параметра ведет к ухудшению качества прессовок, а меньшее — к неоправданному увеличению энергоемкости процесса формования.

Давление p_0 на входе в коническую часть матрицы равно давлению, при котором материал теряет газовую фазу и становится несжимаемым. Оно определено по результатам исследования уплотняемости пластифицированных порошков, приведенным в четвертой главе: $p_0 = 60$ МПа. Предел текучести и коэффициент внешнего трения при этом давлении для выбранного материала равны соответственно $\sigma_s = 12$ МПа и $f = 0,13$. Радиус входной части конуса матрицы рассчитан по формуле, полученной из соотношения (39) после подстановки в него соответствующих значений:

$$r_2 = \left[\left(\frac{\sigma_0 + m\sigma_s}{\sigma_1 + m\sigma_s} \right)^{\frac{1}{n}} (r_1^2 - r_0^2) + r_0^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (193)$$

Алгоритм расчетов по проектированию матрицы представлен в таблице 72, а таблица 73 содержит фрагмент расчетов в Excel.

Таблица 72 – Последовательность расчетов параметров матрицы

Источник	Обозначение параметра	Название параметра	Размерность	Формула	Значение
Заданные параметры	r_0	Внутренний радиус изделия	м	—	0,01
	r_1	Наружный радиус изделия	м	—	0,015
Произвольно выбранные значения	$z_2 - z_1$	Длина калибрующей части	м	—	0,02
	α	Угол подъема образующей	радиан	$\pi/6$	0,52
Измеренные величины	σ_s	Предел текучести	МПа	—	12
	f	Коэфф. трения	—	—	0,13
	p_0	Критич. давление	МПа	—	60
Результаты вычислений	p	Коэффициент	1/м	(43)	30
	σ_1	Напряжение на выходе конуса	МПа	(44)	10,40
	k	Коэффициент	—	(32)	0,76
	n	Коэффициент	—	(37)	0,32
	m	Коэффициент	—	(40)	4,08
	r_2	Радиус основания конуса	м	(193)	0,030

Таблица 73 – Фрагмент расчетов матрицы в Excel

Обозначение	Размерность	Исходные данные и расчетные формулы
r_0	мм	10
r_1	мм	15
$z_2 - z_1$	мм	20
α	рад	0.523333333
σ_s	МПа	12
f	-	0.13
σ_0	МПа	60
p	1/мм	$=2*E7*E3/(E3^2-E2^2)$
σ_1	МПа	$=E6*(EXP(E9*E4)-1)$
k	-	$=E7/TAN(E5)/(1-E7*TAN(E5))$
n	-	$=E11/TAN(E5)-1$
m	-	$=1+TAN(E5)/E7/(1+(TAN(E5))^2)$
r_2	мм	$=((((E8+E13*E6)/(E10+E13*E6))^(1/E12)))*(E3^2-E2^2)+E2^2)^{0.5}$

Результаты расчетов представлены на рисунке 53.

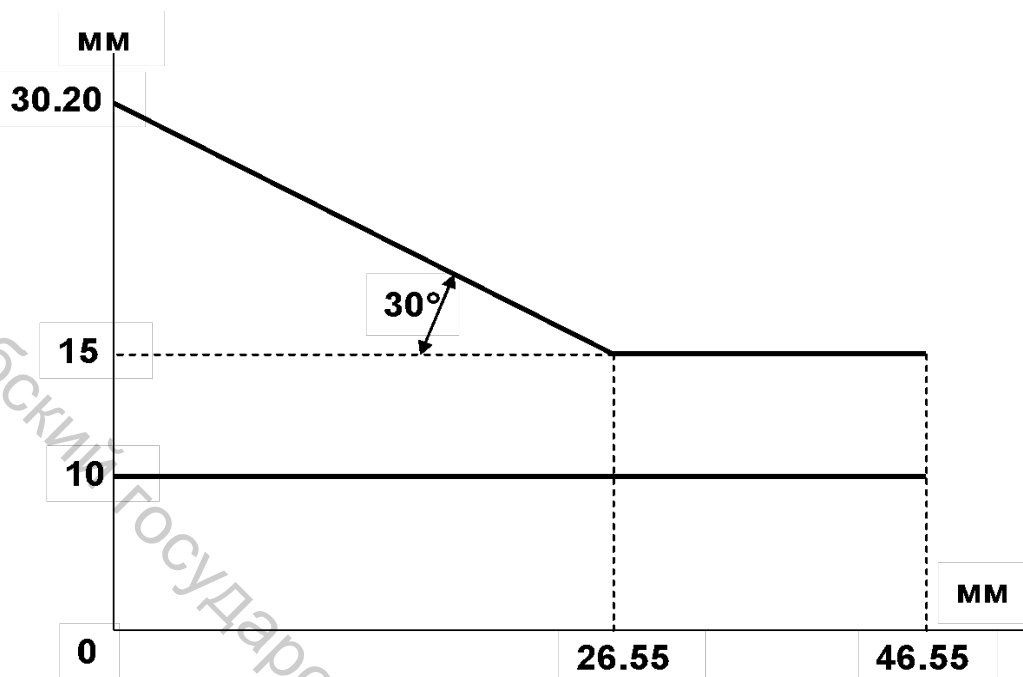


Рисунок 53 – Результаты расчета матрицы

Проектирование шнека целесообразно начинать с выбора профиля винтового канала. Так как используемый для фильтров сферический бронзовый порошок, пластифицированный парафином, обладает высокой пластичностью, выбран простой квадратный профиль со стороной 5 мм. Распределение касательных напряжений по глубине такого канала изображено на рисунке 11.

Радиус шнека r_2 и давление на выходе из канала p_0 уже были определены при расчете матрицы. Угол подъема канала γ можно выбрать произвольно (лучше из интервала 10–20 °).

Длина прессующей части шнека рассчитана по формуле

$$L = z_0 \sin \gamma, \quad (194)$$

а соответствующее ей число витков канала равно

$$n = \frac{z_0 \cos \gamma}{2\pi r_2}. \quad (195)$$

Надо предусмотреть транспортирующую часть нарезки, расположенную под бункером пресса и необходимую для захвата материала. Для этого достаточно добавить еще два витка. Из энергосиловых расчетов шнекового пресса эту часть канала, однако, следует исключить и пользоваться соотношениями (194–195). Последовательность и некоторые промежуточные результаты расчетов шнека представлены в таблице 74, а в таблице 75 – фрагмент расчетов в Excel.

Таблица 74 – Расчет параметров канала шнека

Источник	Обозначение параметра	Название параметра	Размерность	Формула	Значение
Заданные параметры	r_2	Радиус шнека	м	—	0,03
	p_0	Давление на выходе	МПа	—	60
	g	Ускорение	м/с ²	—	9,81
Выбранные значения	H	Глубина канала	м	—	0,005
	φ	Угол подъема	радиан	—	0,4
Измеренные величины	ρ	Плотность	кг/м ³	—	2000
	a_0	Коэффициент	МПа	—	0,07
	b_0	Коэффициент	—	—	0,66
	c_0	Коэффициент	1/МПа	—	-0,005
	a_1	Коэффициент	МПа	—	0,02
	b_1	Коэффициент	—	—	0,20
	c_1	Коэффициент	1/МПа	—	-0,006
Результаты вычислений	a	Коэффициент	—	(13)	0,001
	b	Коэффициент	—	(13)	0,006
	c	Коэффициент	—	(13)	0,001
	d	Коэффициент	—	(14)	821
	e	Коэффициент	—	(15)	-4,44
	f	Коэффициент	—	(15)	-0,173
	p_v	Давление на входе	Па	$p_v = \rho g H$	98,1
	z_0	Длина канала	м	(18)	2,607
	n	Число витков	—	(195)	13
	L	Длина шнека	м	(194)	0,997

Таблица 75 – Фрагмент расчетов параметров шнека в Excel

Обозначение	Размерность	Исходные данные и расчетные формулы
r_2	мм	30.19512618
p_0	МПа	60
b_0	мм	2.5
l_1	мм	7.5
H	мм	5
φ	рад.	0.3925
a_0	МПа	0.07
b_0	-	0.66
c_0	1/МПа	-0.005
a_1	МПа	0.02
b_1	-	0.2
g	мм/с ²	9810
c_1	1/МПа	-0.006
ρ	г/мм ³	0.002
a	-	=C8*C4-C11*C5)/C6^2
b	-	=C9*C4-C12*C5)/C6^2
c	-	=C10*C4-C14*C5)/C6^2
d	-	=((C17^2/(4*(C18^2)-C16/C18)^0.5)/(2*C18)
e	-	=2*C18*C19-C17/(2*C18)
f	-	=2*C18*C19-C17/(2*C18)
p_v	Па	=C15*C13*C6
z_0	мм	=C19*LN((C3-C20)*(C21-(10^-6))*C22))/((C21-C3)*((10^-6))*C22-C20)))
n	-	=C23*COS(C7))/(2*3.14*C2)
L	мм	=C23*SIN(C7)

6.2 Проектирование привода и опорных узлов

Для проектирования привода пресса сначала надо определить вращающий момент на шнеке. Подшипниковые опоры рассчитывают по осевому усилию, действующему на шнек со стороны материала.

Расчетная схема изображена на рисунке 18, момент вычисляют с помощью соотношений (151–153), а усилия определяют по формулам (154–155). После адаптации расчетных формул к формованию трубчатых изделий и перехода к текущим обозначениям, можно записать

$$M_1 = \frac{1}{A} \xi f_k l_k r_2 (1 - e^{-Az_0}) \cos \alpha p_0; \quad (196)$$

$$M_2 = \frac{2}{3} \pi p_0 f_{\text{ш}} [(r_2 - l_k)^3 - r_0^3];$$

$$P_1 = \frac{1}{A} \xi f_k l_k p_0 (1 - e^{-Az_0}); \quad (197)$$

$$P_2 = \pi p_0 [(r_2 - l_k)^2 - r_0^2].$$

Последовательность выполнения расчетов, их конечные и промежуточные результаты представлены в таблице 76, а фрагмент расчетов в среде Excel – в таблице 77.

Методики выполнения прочностных расчетов деталей пресса, проектирования привода и выбора опорных подшипников стандартизованы и здесь не приводятся. Надо отметить, что на шнек действует очень большое осевое усилие – около 10 тонн – поэтому опоры понадобятся прочные.

Таблица 76 – Расчет моментов и усилий на шнеке

Источник	Обозначение	Название параметра	Размерность	Формула	Значение
1	2	3	4	5	6
Заданные параметры	r_2	Радиус шнека	м	—	0,030
	p_0	Давление на выходе	МПа	—	60
	ρ	Плотность материала	кг/м ³	—	2000
	l_k	Ширина канала	м	—	0,005
	$l_{\text{ш}}$	Профиль канала	м	$3l_k$	0,015
	z_0	Длина канала	м	—	2,607
	φ	Угол подъема	радиан	$\pi/8$	0,4
	α	Угол проскальзывания	рад.	$\pi/3$	1,047
	g	Ускорение	м/с ²	—	9,81

Окончание таблицы 76

1	2	3	4	5	6
Измеренные величины	f_k	Коэффициент трения о корпус	—	—	0,3
	$f_{ш}$	Коэффициент трения о шнек	—	—	0,2
	ξ	Коэффициент бокового давления	—	—	0,8
Результаты вычислений	A	Коэффициент	1/м		90
	M_1	Момент на боковой поверхности	кН·м		12,1
	M_2	Момент на торце	кН·м		37,7
	M	Момент на шнеке	кН·м		49,8
	P_1	Усилие на боковой поверхности	кН		8,1
	P_2	Усилие на торце	кН		101
	P	Усилие на шнеке	кН		109

Таблица 77 – Фрагмент силовых расчетов шнекового пресса в Excel

Обозначение	Размерность	Исходные данные и расчетные формулы
r_2	мм	30.19512618
p_0	МПа	60
l_k	мм	5
$l_{ш}$	мм	15
φ	рад.	0.3925
α	рад.	1.046666667
f_k	-	0.3
$f_{ш}$	-	0.2
ξ	-	0.8
q	мм/с ²	9810
z_0	мм	2607
ρ	г/мм ³	0.002
A	1/мм	$= (D10/25) * (D9 * D5 - D8 * D4 * \cos(D7 + D6))$
M_1	Н·м	$= (10^{-3}) * (D10 * D8 * D4 * D2 * (\cos(D7)) * D3 * (1 - \exp(-D14 * D12))) / D14$
M_2	Н·м	$= (10^{-3}) * (2/3) * 3.14 * C3 * C9 * ((C2 - C4)^3 - 10^3)$
M	Н·м	$= C15 + C16$
P_1	Н	$= (C10 * C8 * C4 * C3 * (1 - \exp(-C14 * C12))) / C14$
P_2	Н	$= 3.14 * C3 * ((C2 - C4)^2 - 10^2)$
P	Н	$= C18 + C19$

6.3 Основы проектирования технологических процессов

Теория предсказывает, а практика подтверждает, что допустимый диапазон скоростей вращения шнека, при формовании термопластичных материалов, всегда ограничен сверху и, иногда, снизу. Поэтому технологические расчеты процесса формования термопластов необходимо начинать с определения диапазона допустимых скоростей шнека, нижняя и верхняя границы которого получаются подстановкой в формулы (163) текущих значений:

$$\omega_{\min} = \frac{A_{\text{ш}}}{f_{\text{ш}} p_0} (T_{\text{пл}} - T); \quad \omega_{\max} = \frac{A_{\text{к}}}{f_{\text{к}} p_0} (T_{\text{пл}} - T_0), \quad (198)$$

где T_0 – температура окружающей среды; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления парафина; $A_{\text{ш}}$ и $A_{\text{к}}$ – коэффициенты, зависящие от геометрии шнека и корпуса, а также теплофизических свойств материалов, из которых они изготовлены:

$$A_{\text{ш}} = \frac{2k_{\text{ш}} \cos \varphi}{(r_2 - l_{\text{к}})(2r_2 - l_{\text{к}}) \left(1 + \frac{l_{\text{к}} - \delta}{2\pi(r_2 - l_{\text{к}}) \sin \varphi}\right) \left(\ln \frac{r_2 - l_{\text{к}}}{r_1} + \frac{1}{h_{\text{ш}} r_1}\right)}, \quad (199)$$

$$A_{\text{к}} = \frac{2k_{\text{к}}}{r_2(2r_2 - l_{\text{к}}) \operatorname{tg} \varphi \left(1 - \frac{\delta}{2\pi r_2 \sin \varphi}\right) \left(\ln \frac{r_4}{r_2} + \frac{1}{h_{\text{к}} r_4}\right)}. \quad (200)$$

Последовательность расчетов диапазона допустимых скоростей вращения шнека представлена в таблице 78, а программа вычислений – в таблице 79.

Таблица 78 – Расчет диапазона допустимых скоростей вращения шнека

Источник	Обозначение параметра	Название параметра	Размерность	Формула	Значение
Заданные параметры	r_2	Радиус шнека	м	—	0,03
	r_1	Радиус отверстия	м	—	0,01
	r_4	Радиус корпуса	м	—	0,04
	p_0	Давление на выходе	МПа	—	60
	δ	Толщина гребня	м	—	0,003
	$l_{\text{к}}$	Ширина и глубина канала	м	—	0,005
	φ	Угол подъема	радиан	$\pi/8$	0,4
	$T_{\text{пл}}$	Температура плавления парафина	К	—	323
	T_0	Начальная температура	К	—	293
	$k_{\text{ш}}, k_{\text{к}}$	Коэффициент теплопроводности	Вт/мК	—	45,5
	$\alpha_{\text{ш}}, \alpha_{\text{к}}$	Коэффициент теплоотдачи	Вт/м ² К	—	20
Измеренные величины	$f_{\text{к}}$	Коэффициент трения о корпус	—	—	0,3
	$f_{\text{ш}}$	Коэффициент трения о шнек	—	—	0,2
	ξ	Коэффициент бокового давления	—	—	0,8
Результаты вычислений	$h_{\text{ш}}, h_{\text{к}}$	Коэффициенты	1/м	α/k	0,44
	$A_{\text{ш}}$	Коэффициент	Н/м ² сК		25908
	$A_{\text{к}}$	Коэффициент	Н/м ² сК		243182
	$\omega_{\min}$	Минимальная скорость	рад/с		0,065
	$\omega_{\max}$	Максимальная скорость	рад/с		0,405

Таблица 79 – Фрагмент расчета диапазона рабочих скоростей шнека

Обозначение	Размерность	Исходные данные и расчетные формулы
r^2	м	0.03
r^1	м	0.01
r^4	м	0.04
p^0	МПа	60
δ	м	0.003
k	м	0.005
φ	рад	$\approx 3.14/8$
$T_{пл}$	К	323
$K_{ш}, K_c$	Вт/мК	45,5
$\alpha_{ш}, \alpha_c$	Вт/Км ²	20
f_c	-	0.3
$f_{ш}$	-	0.2
ξ	-	0.8
T^0	К	293
$h_{ш}, h_c$	1/м	$= C11/C10$
$A_{ш}$	Н/м ² сК	$= (2 \cdot C10 \cdot \cos(C8)) / ((C2 \cdot C7) \cdot (2 \cdot C2 \cdot C7) \cdot (1 + (C7 \cdot C6) / (2 \cdot 3.14 \cdot (C2 \cdot C7) \cdot \sin(C8))) \cdot (\ln((C2 \cdot C7) / C3) + 1 / (C16 \cdot C3)))$
A_c	Н/м ² сК	$= (2 \cdot C10) / (C2 \cdot (2 \cdot C2 \cdot C7) \cdot \tan(C8) \cdot (1 - (C6 / (2 \cdot 3.14 \cdot C2 \cdot \sin(C8))) \cdot (\ln(C4 / C2) + 1 / (C16 \cdot C4))))$
ω_{min}	рад/с	$= (C17 \cdot (C9 \cdot C15)) / (C13 \cdot C5 \cdot 10^6)$
ω_{max}	рад/с	$= (C18 \cdot (C9 \cdot C15)) / (C12 \cdot C5 \cdot 10^6)$

Минимальная допустимая частота вращения шнека, полученная в результате расчетов, составляет около 0,5 об/мин, а максимальная – около 4 об/мин. Узкий диапазон рабочих скоростей шнека связан с низкой температурой плавления парафина. Увеличить производительность без дополнительного охлаждения шнека позволит использование более тугоплавкого пластификатора.

Мощность на шнеке рассчитывают по формуле

$$N = M \omega_{max}. \quad (201)$$

Подстановка найденных значений дает

$$N = 49,8 \cdot 0,405 = 20,17 \text{ кВт}. \quad (202)$$

Дальнейшее проектирование технологического процесса и оборудования для его реализации проводится по стандартным методикам.

Проведенные исследования позволили разработать типовую технологическую инструкцию изготовления изделий из пластично-вязких сред на шнековом экструдере. Она включает операции пластификации порошка, подготовки смеси к формованию, экструзии материала, удаления пластификатора из прессовки и спекании изделия.

Необходимую концентрацию пластификатора в смеси находят из расчета, чтобы он занимал все свободное пространство в измельченном материале

$$c_n = \frac{\rho_{пл}(\rho_p - \rho)}{\rho_{пл}(\rho_p - \rho) + \rho_p \rho}, \quad (203)$$

где $\rho_{пл}$, ρ_p и ρ – плотность пластификатора, пикнометрическая и

насыпная плотности материала соответственно.

Свойства среды зависят не только от количества и состава пластификатора, но и от способа его введения. Пластичность пластифицированного порошка будет максимальна, если каждая частица покрыта тонкой пленкой пластификатора. Для получения такого материала разработан способ пластификации порошка, заключающийся в покрытии его частиц пленкой термопласта. Плакирование осуществляют в камере, наполненной парами нагретого пластификатора. Холодные частицы порошка, попадая в такую камеру, конденсируют на себе содержащееся в ней вещество и падают в поддон, где и охлаждаются [204].

С целью гомогенизации среды ее несколько раз последовательно продавливают через мундштук. Это увеличивает ее пластичность, уменьшает давление истечения и коэффициенты трения. Количество продавливаний определяют по стабилизации давления прессования. Обычно достаточно трех проходов при пятидесятипроцентном радиальном обжатии смеси.

Иногда удобнее иметь дело не с порошковым, а с гранулированным материалом. Он легче транспортируется шнеком, лучше поступает из бункера, стабильнее при хранении. Для гранулирования пластичных сред изготовлено устройство, содержащее сферический шнек и неподвижный нож-сетку. Размер получаемых гранул регулируют выбором необходимой сетки. Работа устройства напоминает работу мясорубки, лишенной подвижного ножа; материал нарезают за счет движения шнека [205].

Перед формованием пластифицированный порошок нагревают до температуры, при которой он приобретает максимальную пластичность. Если в качестве пластификатора используется парафин, эта температура составляет 35–40 °С. Нагрев деталей шнекового пресса, контактирующих с материалом (шнек, цилиндр, матрица), сокращает время достижения стационарной фазы экструзии.

Затем измеряют триботехнические характеристики среды, ее структурную прочность и давление истечения через цилиндрический капилляр; методики измерений и приборы описаны выше. Последнее измерение целесообразно проводить при гомогенизации смеси, на последнем проходе.

После этого рассчитывают диапазон допустимых скоростей вращения шнека и время достижения процессом экструзии стационарной фазы; соответствующие расчетные методики описаны в третьей главе. До того, как экструзия войдет в стационарный режим, прессовку возвращают на дробление, так как ее свойства и качество в этот период будут нестабильны. При шнековом формовании, наиболее подходящем для получения изделий сложного профиля, необходимо постоянно контролировать коэффициент окружного проскальзывания

среды.

Частичное удаление пластификатора возможно уже на завершающем этапе формования. Так, при изготовлении фильтрующих элементов, удаление пластификатора из периферийных слоев заготовки совмещено с процессом формования; этот способ признан изобретением [206]. Отгонка идет по наружной поверхности тонкостенного изделия и удаётся удалить большую часть пластификатора. В каком-то смысле это идеальный процесс формования пластифицированных порошков: после прессования пластификатор тут же удаляется и на выходе оказывается заготовка без посторонних добавок.

Удаление пластификатора иногда совмещают с процессом спекания изделий [207]. Для этого прессовку медленно нагревают на воздухе до температуры 450 °С, парафин при этом разлагается и удаляется в виде газов. Воздушная атмосфера способствует выгоранию углерода. Если заготовки сразу нагревать в защитной атмосфере, то количество углерода в изделиях будет максимально и равно содержанию кокса в сухом пластификаторе. График спекания прессовок, содержащих парафин, изображен на рисунке 54.

Первая сорокаминутная выдержка сделана при 120 °С. За это время большая часть жидкого парафина под действием капиллярных сил перешла в засыпку из мелкодисперсного порошка окиси алюминия. Во время второй сорокаминутной выдержки, осуществляемой при температуре 450 °С, парафин разлагается на летучие углеводороды и удаляется из прессовки. Затем печь продувают азотом и дальнейшее спекание проводят в восстановительной атмосфере.

Спекание пластифицированных прессовок следует проводить с осторожностью. Скорость нагрева между выдержками, когда прессовка имеет минимальную прочность, не должна превышать определенной величины, зависящей от спекаемого материала. Так, для медного порошка, содержащего 15 % мас. парафина, она не должна превышать 300 °С/час. Быстрый нагрев приводит к бурному закипанию пластификатора внутри прессовки и ее разрушению.

Этот простой способ удаления парафина имеет ряд существенных недостатков. Разложившийся пластификатор нельзя вернуть в производство; при нагреве на воздухе до температуры 450 °С некоторые материалы окисляются; процесс спекания усложняется и затягивается; выгорающий парафин загрязняет печь. Поэтому был разработан более эффективный способ удаления пластификатора, признанный изобретением [208]. Пластифицированную парафином заготовку обрабатывают высокочастотным электрическим полем, нагревающим только пластификатор, находящийся в поверхностных слоях. Парафин мгновенно испаряется с поверхности и его место занимает пластификатор, поступающий под действием капиллярных сил из глубины прессовки.

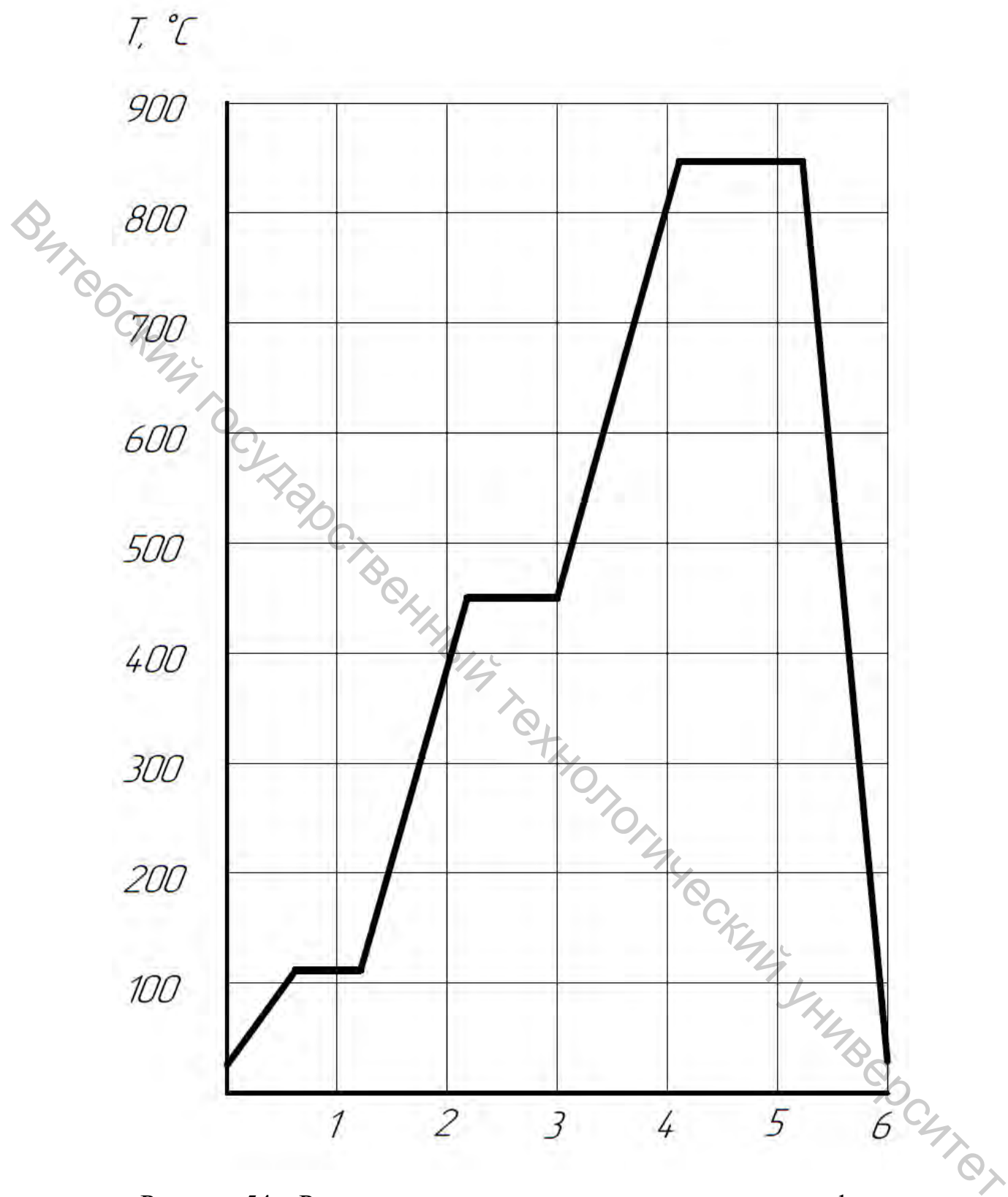


Рисунок 54 – Режим спекания прессовок, содержащих парафин

6.4 Основы проектирования шнековых машин

Сейчас при проектировании машин для выполнения расчетов и разработки конструкторской документации широко применяют трехмерные САД-системы, например, САПР КОМПАС-3D [209]. Имеющийся базовый функционал таких систем позволяет автоматизировать множество операций, непосредственно связанных с геометрическим моделированием [210] и получением на основе построенных моделей ассоциативных чертежей. Однако шнековые экструдеры – специализированное оборудование и для их проектирования необходимо самостоятельно разрабатывать прикладные библиотеки, расширяющие базовый функционал существующих САД-систем.

С целью автоматизации конструкторских расчетов и построения чертежей формирующего инструмента и силовых шнеков выполнена экспериментальная разработка специализированной прикладной системы автоматизированного проектирования [211]. Приложение интегрировано в САПР КОМПАС-3D через использование программного кода интерфейса прикладного программирования. Такая интеграция позволяет использовать для трехмерных построений геометрическое ядро системы КОМПАС-3D и на выходе получать готовые трехмерные модели с оптимальными геометрическими характеристиками. Пример работы приложения в среде КОМПАС-3D показан на рисунке 55.

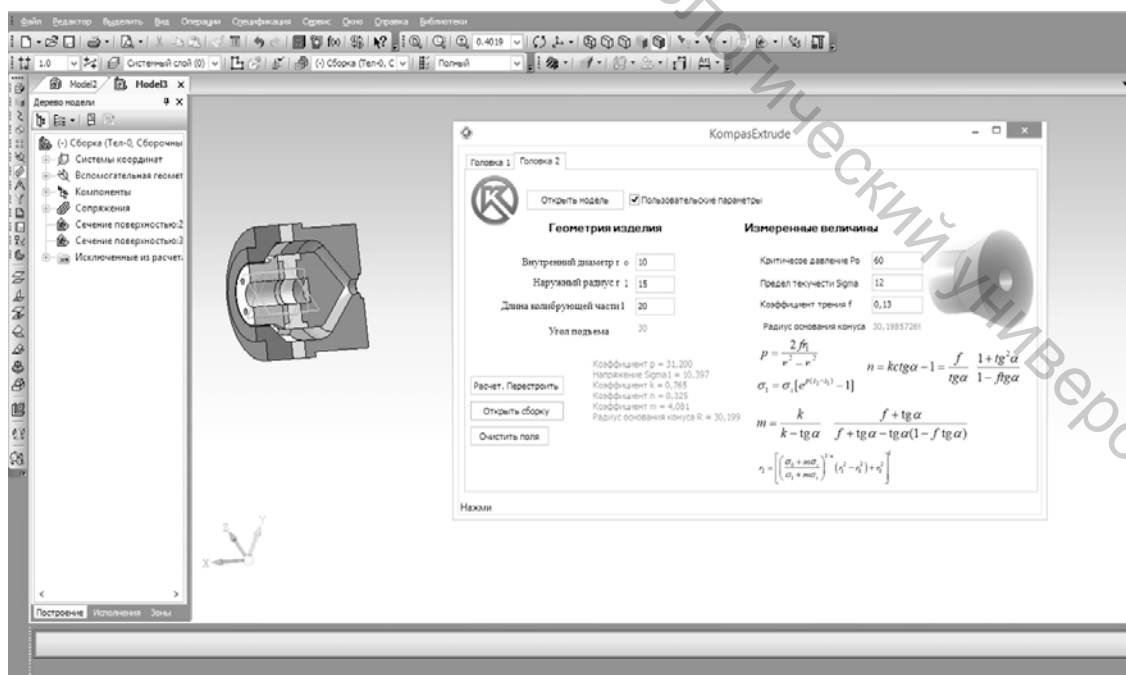


Рисунок 55 – Прикладная САПР, запущенная в среде КОМПАС-3D

Приложение содержит базу данных материалов и позволяет выполнять расчет и построение 3D-модели формующей головки (рис. 56), геометрический и силовой расчет шнека, расчет допустимых скоростей его вращения. Реализация методик проектирования шнека и формующей головки в виде прикладной САПР уменьшает время подготовки конструкторской документации.

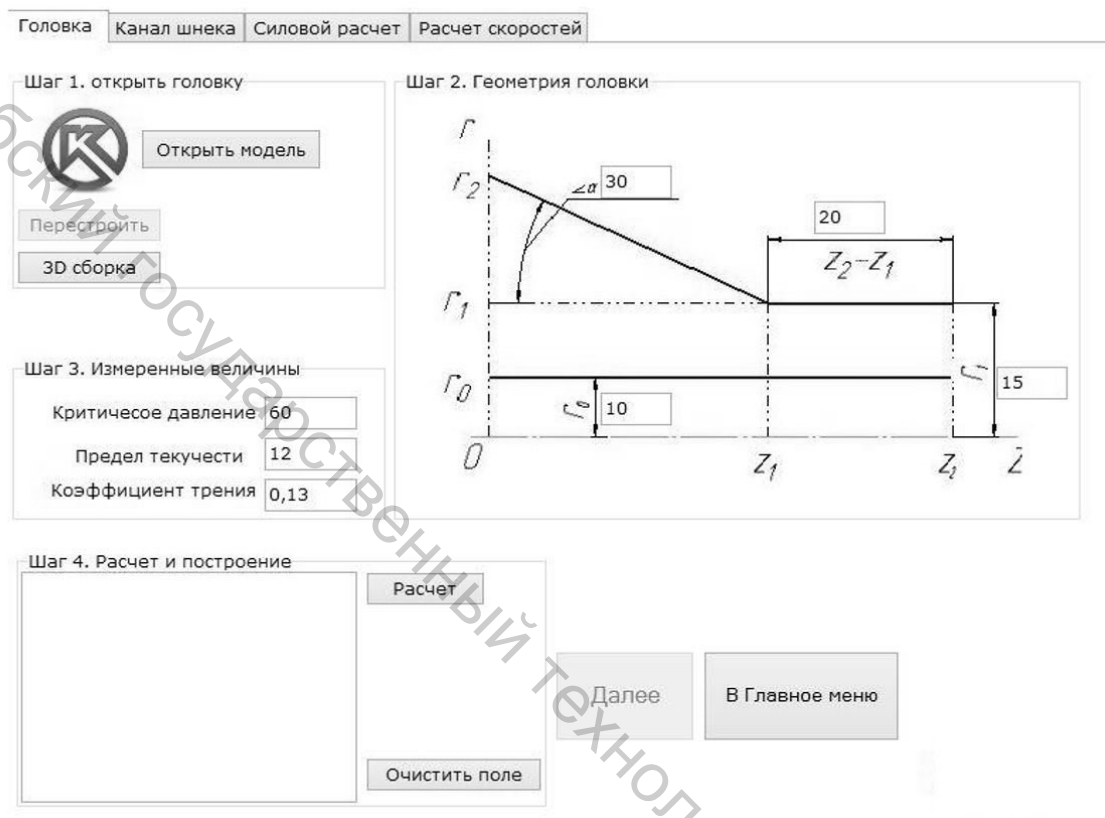


Рисунок 56 – Вкладки расчетов прикладной САПР

Типовые узлы экструдера, такие как подшипниковые узлы, муфты, приводы, станины не требуют разработки специализированных библиотек, их можно проектировать с применением базового функционала трехмерных САПР.

Сборочными единицами экструдера, определяющими качество изделий, являются формующая матрица и шнек. Геометрические параметры этих деталей определяются свойствами формующей среды, а также формой и размерами изделия. Расчет и проектирование экструдера выполнены с применением разработанной прикладной САПР. В качестве исходных данных взята бронзовая труба диаметром 30 на 20 мм. Общий вид экструдера показан на рисунке 57.

Экструдер включает станину 1, материальный цилиндр 2 с размещенным внутри шнеком, узел формующей головки 3, подшипниковый узел шнека 4, бункер для загрузки формуемого материала 5, привод 6 в виде цилиндрического соосного редуктора,

соединяемого с подшипниковым узлом посредством муфты 8 и шкаф управления 7. Технические характеристики экструдера: диаметр шнека 60 мм, длина рабочей части шнека 990 мм, мощность привода 20 кВт.

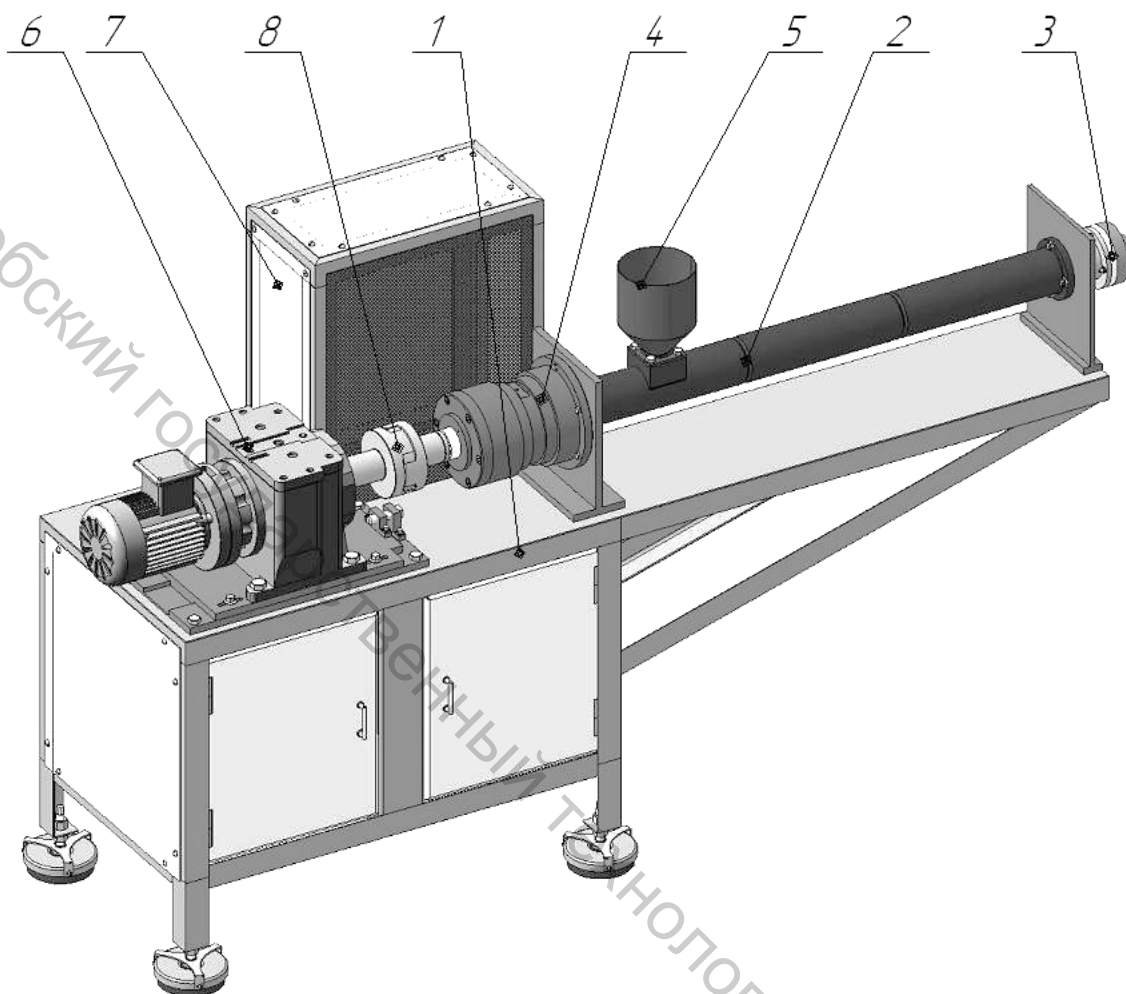


Рисунок 57 – Общий вид шнекового экструдера

Разработана сборка экструдера в САПР КОМПАС-3D, составлен комплект конструкторской документации. Конструктивные особенности экструдера могут быть использованы при проектировании как экспериментального, так и промышленного оборудования. Следует отметить, что для эффективного применения данной конструкции экструдера для переработки других материалов необходимо выполнить перерасчет геометрии матрицы и шнека в соответствии с разработанными методиками и перепроектировать эти детали.

Конструкция шнека и формующей головки представлена на рисунках 58–59.

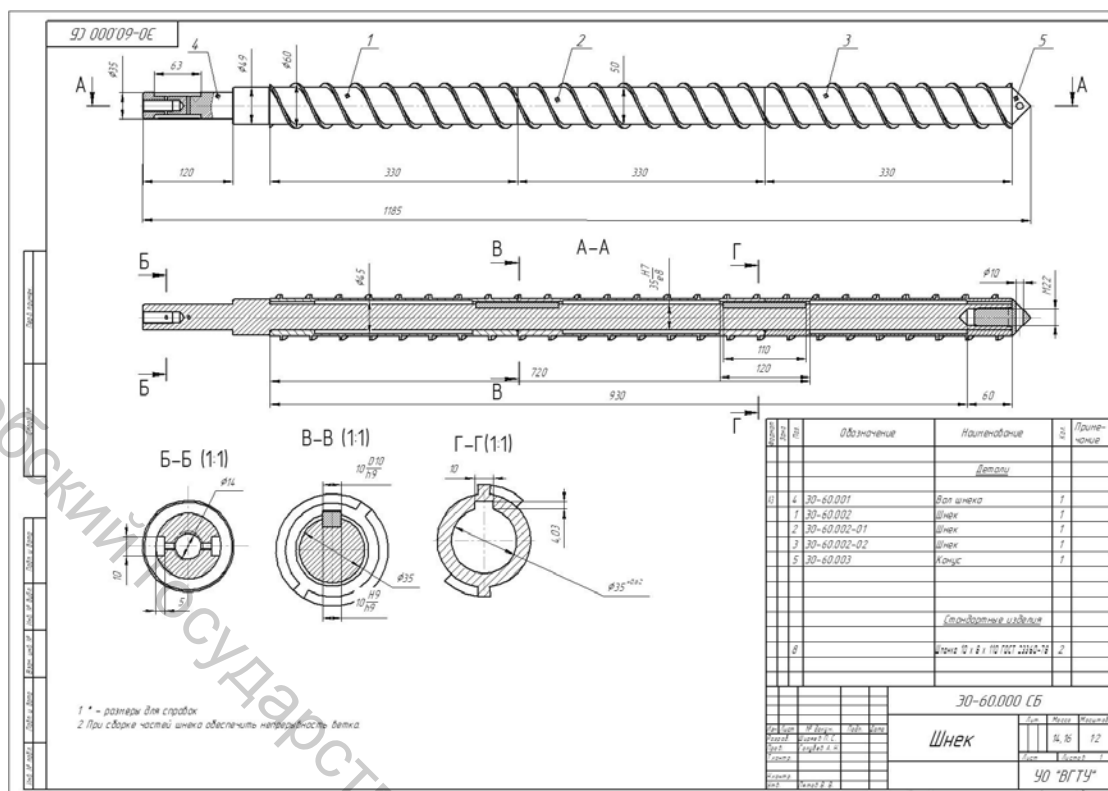


Рисунок 58 – Конструкция силового шнека

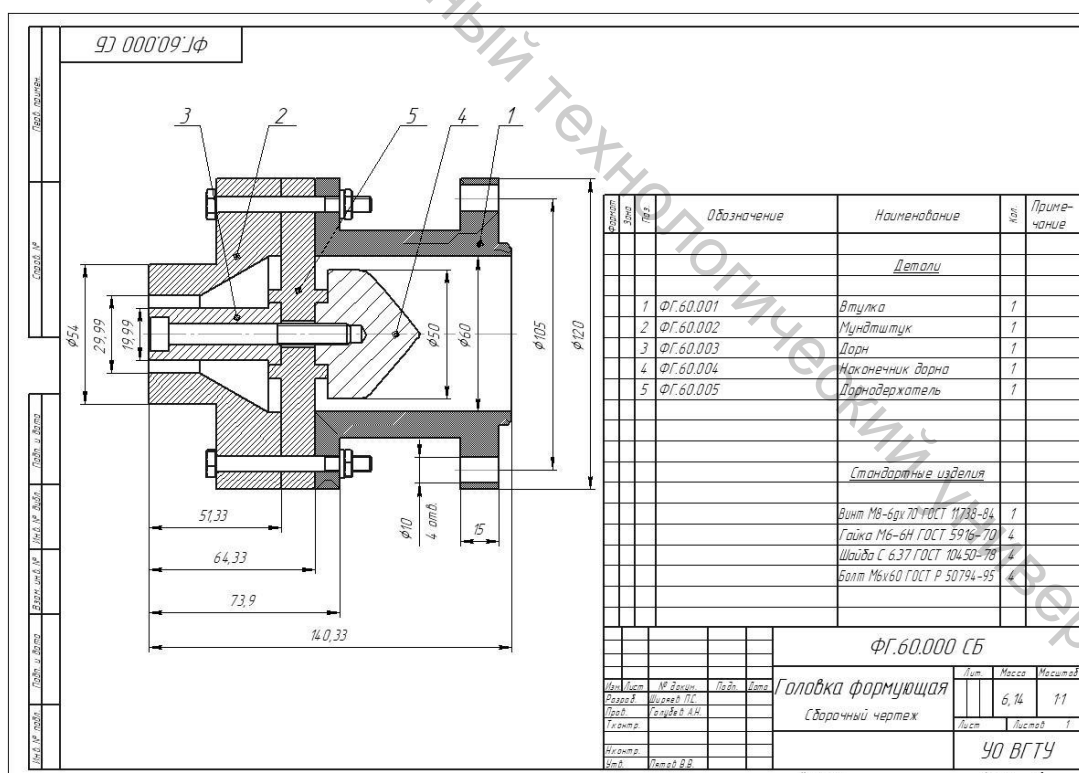


Рисунок 59 – Конструкция формирующей головки

Глава 7. Перспективы развития экструзионного формования

Метод экструзионного формования перспективен в пищевой и химической промышленности, в электротехнике, строительстве и металлургии (рис. 60).



Рисунок 60 – Перспективные области экструзионного формования

Наиболее перспективными направлениями дальнейшего развития экструзии пластично-вязких сред представляются формование фасонных длинномерных изделий, изготовление пористых и композиционных материалов, нанесение гладких и фасонных покрытий на наружные и внутренние поверхности труб, формование порошковой проволоки и наполненных шнуров (рис. 61).



Рисунок 61 – Перспективные направления экструзии пластично-вязких сред

7.1 Производство фасонных длинномерных изделий

Во многих областях техники используют трубы с развитой поверхностью. Они нужны, прежде всего, в теплообменных устройствах и фильтрах [214]. Известно, что наилучший теплообмен обеспечивает труба с винтовыми ребрами [215]. Более простые, но менее эффективные кольцевые ребра обычно получают накаткой [216]. Длинномерные изделия сложного профиля все еще изготавливают такими малопродуктивными и трудоемкими методами, как сварка [217–218] и пайка [219]. До сих пор самым распространенным методом изготовления порошковых изделий сложной формы является обработка резанием [220]. Резание пористых заготовок имеет ряд особенностей, связанных с их низкой прочностью и закрытием пор при обработке [221–222]. Порошковые изделия относят к труднообрабатываемым, причем чем выше пористость, тем труднее их резать [223–224]. Более эффективным методом формования фасонных изделий является шликерное литье [225]. Если его осуществляют под давлением, то

различия между шликерным литьем и экструзией порошков практически исчезают [226].

Наиболее прогрессивным методом формования фасонных длинномерных изделий является экструзия пластифицированных порошков. Технические возможности этого метода весьма широки: экструзией можно получить трубы и стержни любого профиля и длины, формовать внешнее и внутреннее винтовое оребрение, изготавливать изделия переменного по длине профиля. Схема формования труб с винтовыми ребрами [227] изображена на рисунке 62.

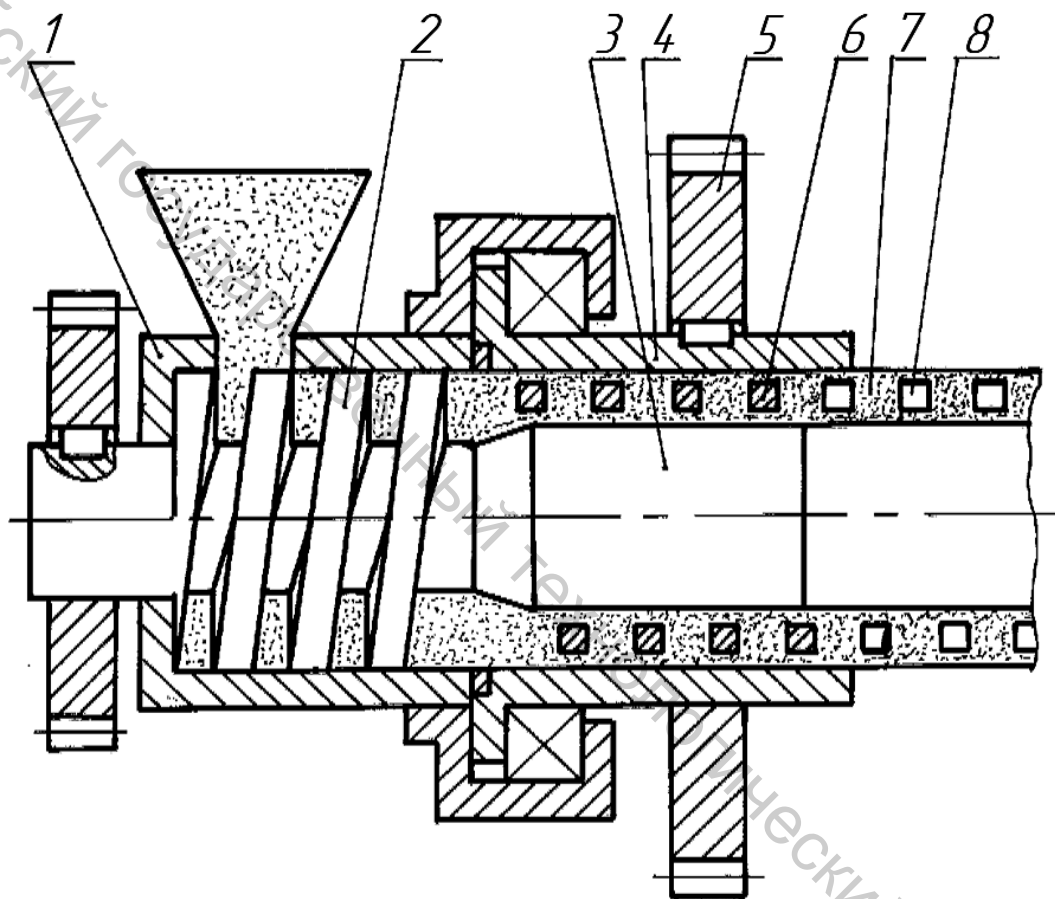


Рисунок 62 – Схема формования труб с винтовыми ребрами

Внутри корпуса 1 установлен прессующий шнек 2 с хвостовиком 3. Матрица 4 получает вращение от отдельного привода через зубчатое колесо 5. Внутри матрицы расположен гибкий шнек 6, прикрепленный к ней одним концом.

В процессе формования прессующий шнек продавливает среду через кольцевой зазор между хвостовиком и матрицей, в результате чего образуется труба 7. Гибкий шнек, вращающийся вместе с матрицей, образует в прессовке винтовой канал 8, профиль которого определяется формой поперечного сечения гибкого шнека. Применяя гибкие шнеки разных размеров, можно получить трубы с наружным или внутренним оребрением. Возможно также формование труб с закрытой

винтовой полостью (по которой может прокачиваться теплоноситель).

Длинномерные изделия разного профиля можно формировать на двухшнековом прессе [228], схема которого изображена на рисунке 63.

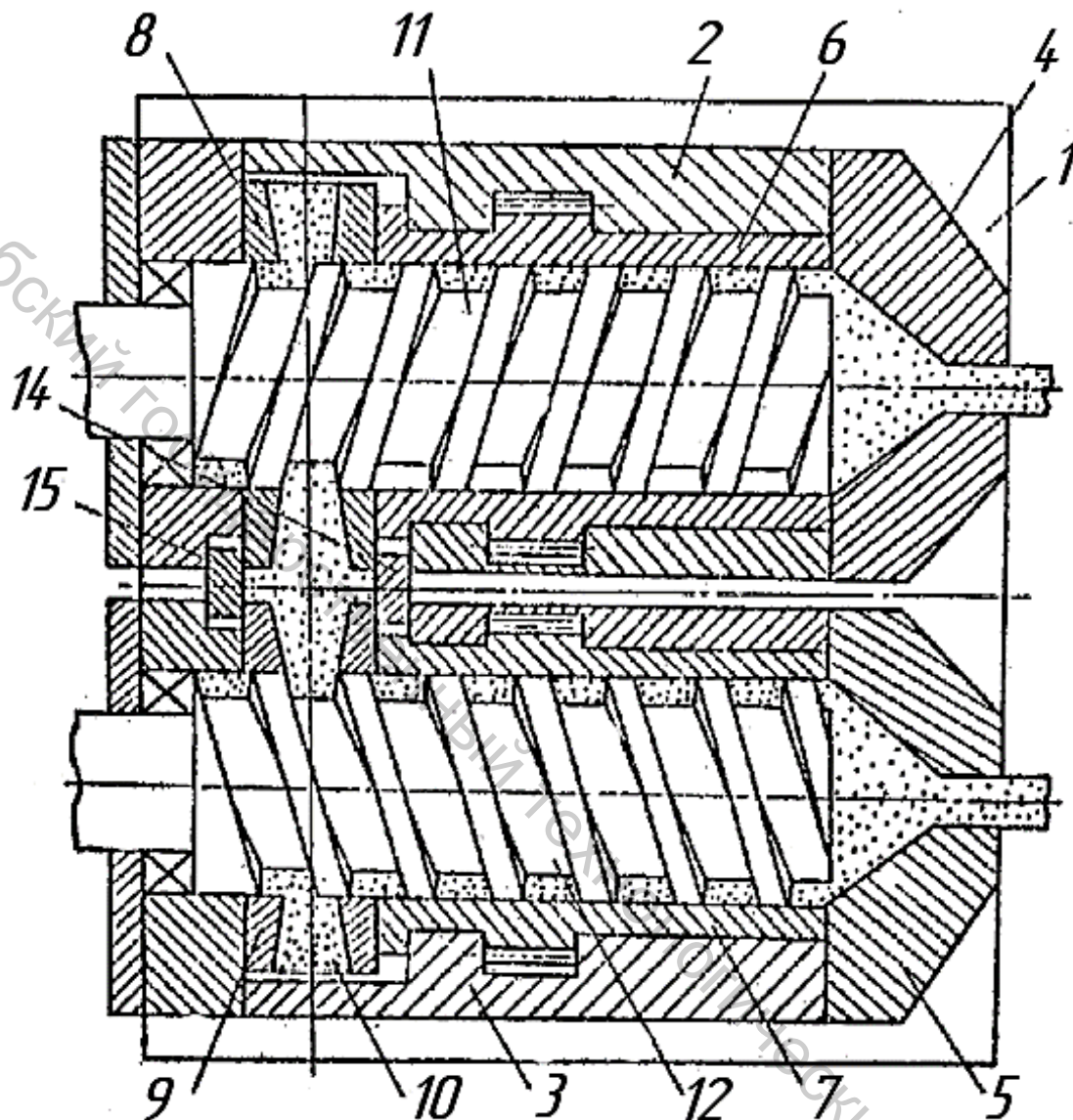


Рисунок 63 – Схема формирования фасонных профилей на двухшнековом прессе

На станине 1 установлены с возможностью относительного перемещения два корпуса 2 и 3, снабженные матрицами 4 и 5 и полыми цилиндрами 6 и 7 соответственно. К полым цилиндрам снаружи жестко прикреплены кольца 8 и 9 с радиальными отверстиями 10, а внутри них установлены шнеки 11 и 12. Оба шнека запитываются от общего бункера 13. Соосно бункеру расположена матрица, состоящая из двух подвижных формующих элементов 14 и 15. Пластифицированный порошок из бункера затягивается вращающимися кольцами 8 и 9 в радиальное отверстие 10. Вращение передается от привода на кольца через полые цилиндры 6 и 7. Из отверстия 10 материал поступает к

шнекам 11 и 12 и транспортируется ими в зону формования. Необходимый профиль изделия задается формующим инструментом, а его поперечный размер – относительным расположением корпусов 2 и 3.

Решена также сложная задача формования проницаемых гофрированных труб. Конструкция такого устройства [229] изображена на рисунке 64.

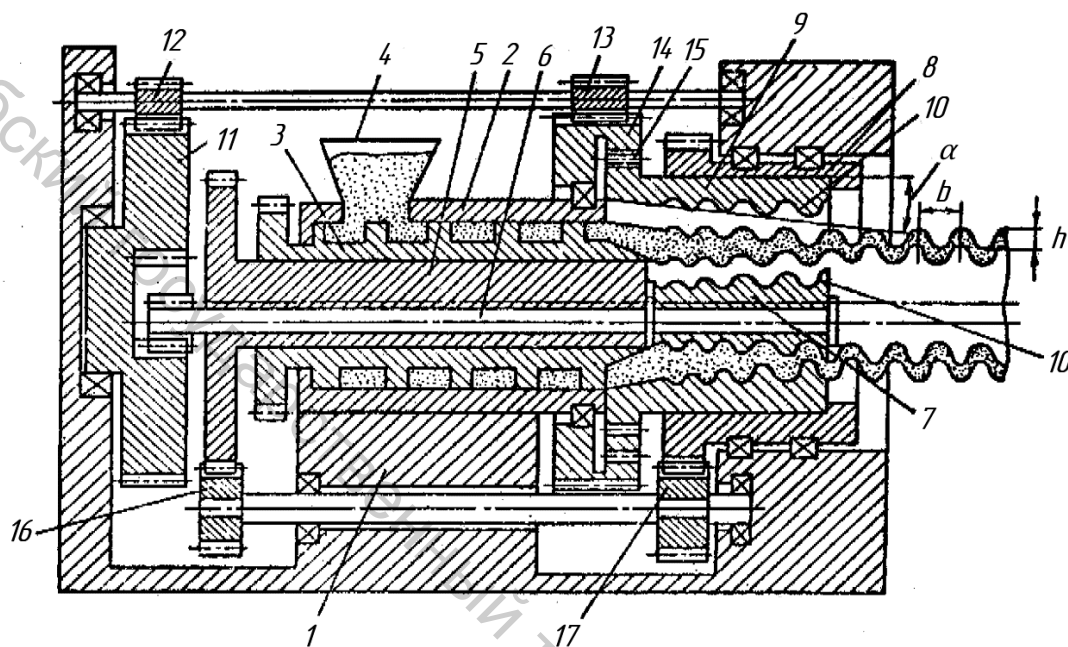


Рисунок 64 – Устройство для формования гофрированных труб

На основании 1 установлен корпус 2 пресса, внутри которого расположен шнек 3, а снаружи – бункер 4. В осевом отверстии шнека находится оправка 5, в полости которой на оси 6 эксцентрично закреплен конический ролик 7. На основании установлено зубчатое колесо 8 со сложно устроенной матрицей 9. На наружной поверхности роликов и внутренней поверхности матрицы имеются кольцевые пазы 10. Ось и матрица связаны кинематически зубчатыми передачами 11–16 таким образом, чтобы скорости их вращения были равны. Также равны скорости вращения оправки и зубчатого колеса 8. В загрузочный бункер засыпают пластифицированный порошок и формируют из него трубу, которая обкатывается по наружной поверхности матрицей, а по внутренней – коническим роликом. Количество обкатов, необходимое для получения качественной поверхности, зависит от пластичности материала.

Сложной задачей является формование изделий переменного по длине профиля. Решается она обычно использованием матрицы, состоящей из нескольких синхронно перемещаемых кулачков. Схематически это техническое решение [230] изображено на рисунке 65.

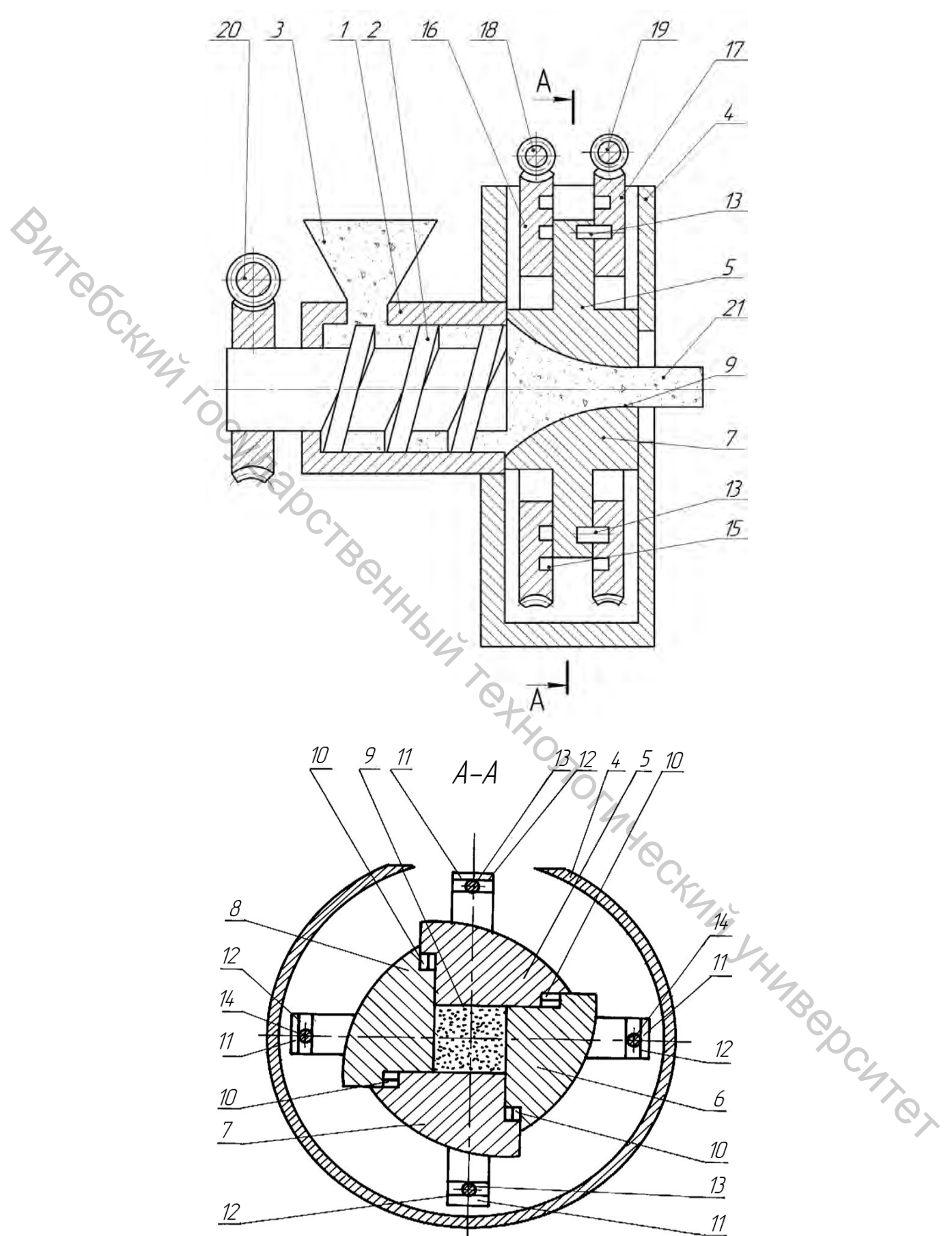


Рисунок 65 – Формование изделий переменного профиля кулачками

Внутри корпуса 1 находится шнек 2, а снаружи на нем закреплен бункер 3 и обойма 4. В обойму помещена матрица, состоящая из четырех подвижных кулачков 5–8. Внутренние поверхности 9 кулачков соединены таким образом, чтобы очко матрицы в сечении имело форму прямоугольника, размеры которого плавно уменьшаются в направлении экструзии.

Кулачки соединены между собой с возможностью синхронного перемещения по направляющим 10. На кулачках имеются элементы 11 с прямолинейными пазами 12 и пальцами 13 и 14. Пальцы входят в углубления спиральной нарезки 15, выполненной на торцовых поверхностях червячных колес 16 и 17. Колеса находятся в зацеплении с червяками 18 и 19, а шнек получает вращение через червячную пару 20. В процессе экструзии кулачки движутся в соответствии с заданной программой, образуя изделие переменного профиля.

Вместо кулачков могут быть использованы ролики, что позволяет улучшить качество изделий. Такое решение [231] схематически изображено на рисунке 66.

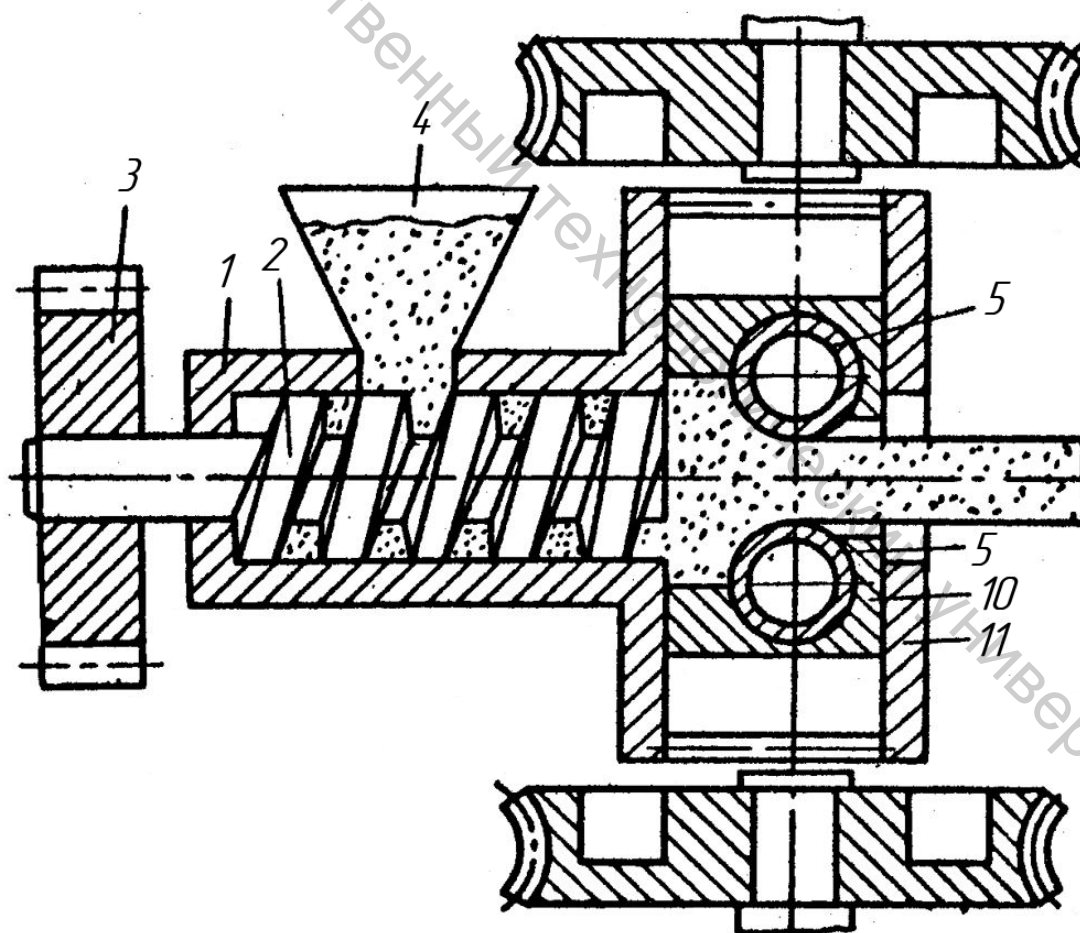


Рисунок 66 – Формование изделий переменного профиля роликами

Матрица закреплена на корпусе 1 пресса, шнек 2 которого получает вращение через зубчатое колесо 3; пластифицированный порошок подается в пресс из бункера 4. Матрица состоит из четырех цилиндрических роликов 5, каждый из которых прижат одним торцом к поверхности другого. Ролики установлены с возможностью перемещения вдоль своих осей и прижимаются друг к другу пружинами. Уплотняющие элементы 10, также установленные с возможностью перемещения под прижимной крышкой 11, фиксируют ролики на своих местах и герметизируют матрицу. Механизм перемещения роликов содержит четыре червячных пары, колеса которых имеют на торцовых поверхностях спиральную нарезку. В процессе экструзии ролики вращаются под действием сил трения о формуемый материал и создают значительно меньшее сопротивление его продавливанию, чем неподвижные кулачки. В результате улучшается качество получаемых изделий, особенно их поверхностей.

Еще более широкие возможности дает использование роликов для обкатки профиля. Схематически это техническое решение [232], изображено на рисунке 67.

На основании 1 расположен корпус 2 шнекового пресса с бункером 3 снаружи и шнеком 4 внутри. В основании имеется стакан 5, соединенный с приводом через червячное колесо 6. Внутри стакана с эксцентриситетом установлены формообразующие ролики 7 и 8, закрепленные с возможностью вращения на валах 9 и 10. Через зацепление 11 и 12 ролики связаны с червячными колесами 13 и 14, а те, в свою очередь, получают вращение от зубчатых колес 15 и 16.

Шнек, продавливая пластифицированный порошок через матрицу, формирует цилиндрическую заготовку. Ролики, совершая сложное движением, обкатывают поверхность этой заготовки, придавая ей необходимый профиль. Роликам сообщают одновременно два движения: вокруг оси изделия и вокруг осей валов с разными угловыми скоростями. В результате сложения этих вращений возникает их планетарное движение. Получаемый профиль определяется соотношением упомянутых скоростей вращения и эксцентриситетом роликов.

Некоторые проблемы, связанные со скручиванием изделия в процессе обкатки его поверхности, устранены в устройстве [233], конструкция которого также признана изобретением.

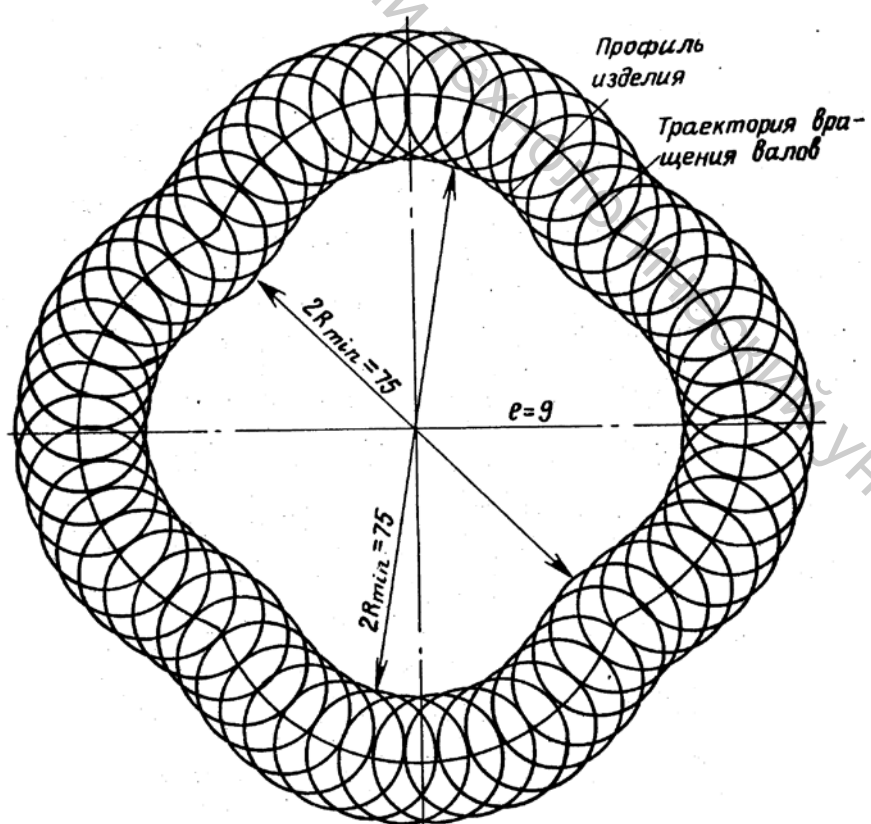
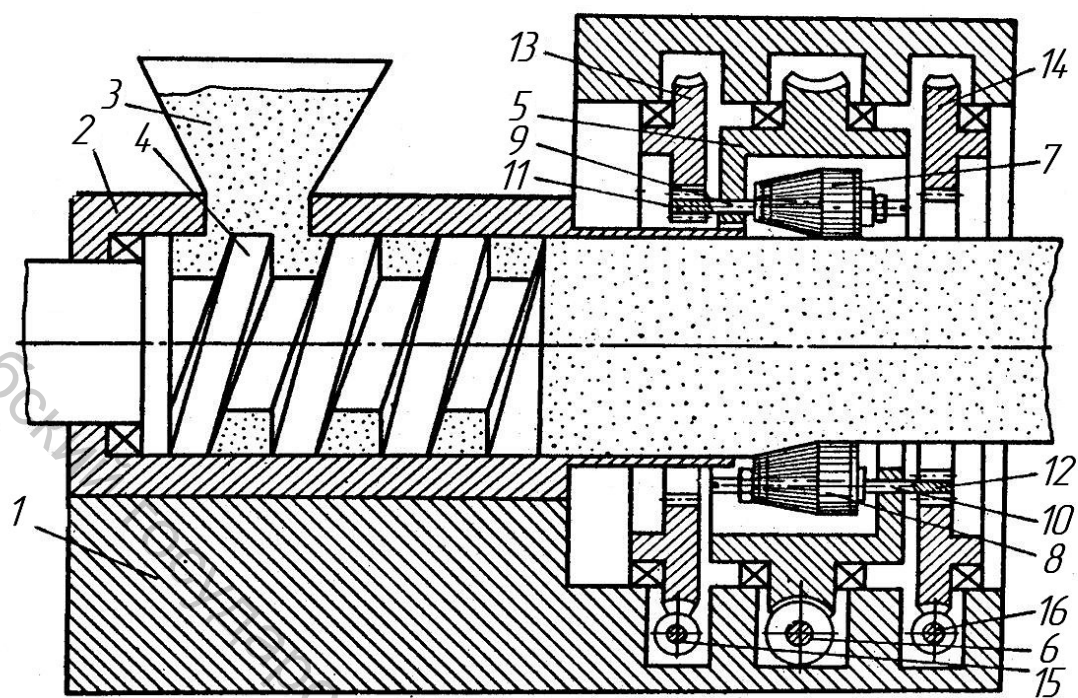


Рисунок 67 – Формование сложного профиля обкаткой

7.2 Изготовление высокопористых материалов

В современной технике постоянно растет потребность в пористых проницаемых материалах [234–235]. Из них делают фильтрующие элементы с развитой поверхностью [236–237] и повышенной прочностью [238–239], детали теплообменных устройств [240–241], фитили тепловых труб [242], смесители и загустители [243], пламепреградители [244]. Применение пористых покрытий в теплообменных устройствах позволяет повысить коэффициент теплопередачи до 35 % [245] и тепловой поток до $1,12 \text{ МВт/м}^2$ [246].

Метод формования материалов с органическими добавками идеально подходит для получения высокопористых изделий. После отгонки пластификатора-порообразователя в материале остается проницаемая капиллярно-пористая структура, которую обычно удается сохранить при спекании.

Для получения проницаемых изделий сложной формы иногда применяют следующий прием [124]. В порошок вводят повышенное количество парафина для увеличения прочности заготовок. После экструзии их обрабатывают резанием, а затем удаляют парафин и спекают. Такая технология позволяет получать изделия практически любой формы, поверхностные поры при резании не закрываются (этому препятствует пластификатор), практически отсутствуют отходы и износ инструмента. Однако такая технология трудоемка, мало производительна и плохо поддается автоматизации.

Как известно, наибольшей грязеемкостью обладают фильтрующие элементы с неравномерно распределенной по сечению пористостью. Для изготовления таких изделий предложен способ [206], реализацию которого поясняет рисунок 68.

Корпус 1 устройства неподвижно закреплен на основании 2. Внутри корпуса находится полый шнек 3 с оправкой 4 из проницаемого материала, снабженной заглушкой 5. На корпусе закреплены бункер 6, нагреватель 7 и обойма 8. Внутри обоймы находится матрица 9, также изготовленная из проницаемого материала. Вращение шнеку сообщается через зубчатое колесо 10. Для откачки газов используется вакуумный насос 11, соединенный патрубками 12 и 13 с матрицей и оправкой соответственно.

Работает устройство так. В бункер засыпают пластифицированный порошок, который в процессе экструзии нагревают немного выше температуры плавления пластификатора. В зоне формования жидкий пластификатор частично удаляется из материала под действием капиллярных сил и пониженного давления, создаваемого мощным форвакуумным насосом. Отгонка пластификатора осуществляется преимущественно из периферийных

слоев заготовки, которые под действием интенсивных касательных напряжений затем дополнительно уплотняются (ранее этому препятствовал пластификатор). В результате сформованный фильтрующий элемент имеет неравномерно распределенную по сечению плотность и увеличенную грязеемкость. Проведенные эксперименты показали, что неравномерностью распределения пор можно управлять.

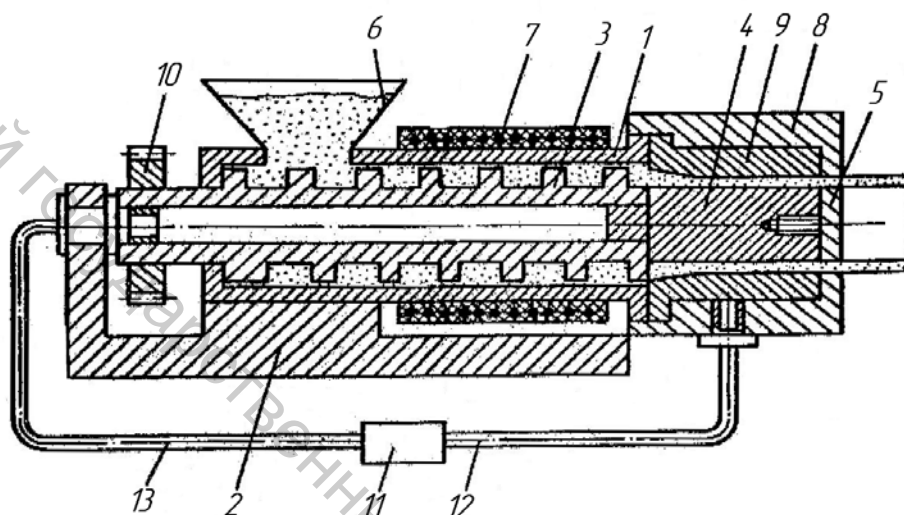


Рисунок 68 – Устройство для формования фильтрующих элементов с переменной пористостью

Возможно и другое решение этой задачи [247], изображенное на рисунке 69.

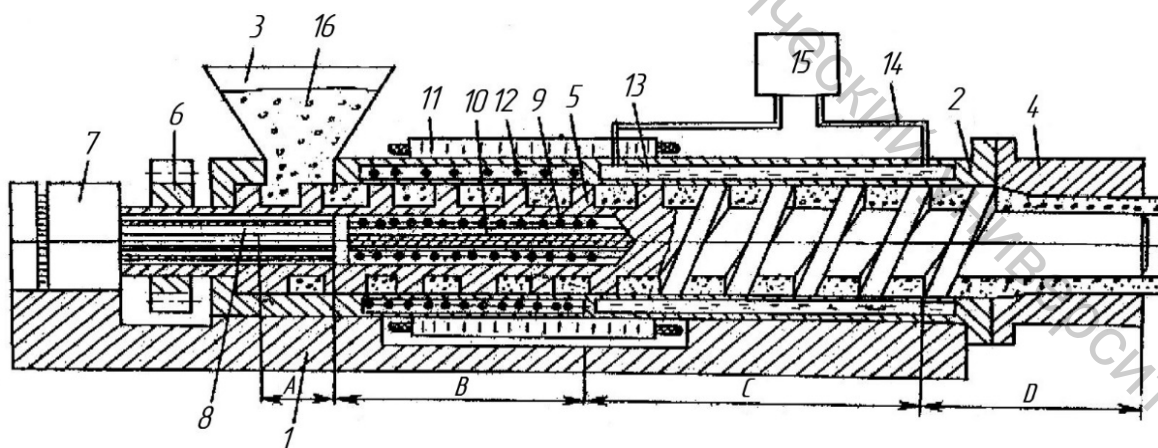


Рисунок 69 – Формование фильтрующих элементов с переменной пористостью

На основании 1 установлен корпус 2 пресса с бункером 3 и матрицей 4. Внутри корпуса размещен шнек 5, на хвостовике которого

имеется зубчатое колесо 6, соединенное с приводом. Кроме того, хвостовик соединен с вибратором 7. Внутри шнека находятся нагреватель 9 и электромагнит 10; на корпусе также имеются электромагнит 11 и нагреватель 12. В корпусе, недалеко от выхода шнека, находится полость 13 для принудительного охлаждения, соединенная напорной линией 14 с гидростанцией 15.

В бункер засыпают пластифицированный ферромагнитный порошок 16, который в процессе формования нагревают выше температуры плавления пластификатора. Шнек при работе вибрирует с частотой 20–45 Гц и амплитудой 80–150 мкм. Расслоение порошка на фракции происходит при одновременном воздействии колебаний и магнитного поля, в результате образуется труба с неравномерной пористостью по сечению.

Весьма сложные проницаемые изделия с большим количеством сквозных отверстий, необходимых для стока конденсата (например, в фитилях тепловых труб), можно получить методом центробежного формования [248].

7.3 Создание новых композиционных материалов

На шнековых прессах формуют композиционные материалы, армированные как непрерывными, так и дискретными волокнами. Непрерывные волокна пропускают обычно через осевое отверстие шнека, в процессе экструзии они затягиваются формируемым материалом, упрочняя его. Дискретные волокна могут быть дополнительно ориентированы магнитным полем, подобно тому, как это делают при производстве постоянных магнитов с большой коэрцитивной силой. Естественно, волокна должны быть ферромагнитными; желательно также, чтобы они обладали магнитной анизотропией. Схематически устройство для формования таких композитов [249] изображено на рисунке 70.

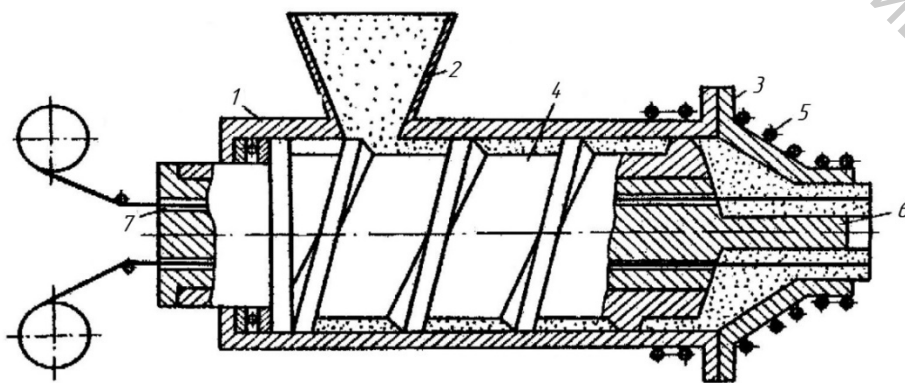


Рисунок 70 – Схема формования композиционных материалов

Устройство состоит из корпуса 1, бункера 2, матрицы 3, шнека 4, электромагнита 5 и стержня 6 с продольными отверстиями 7. Электромагнит охватывает матрицу и конец шнека, его мощное магнитное поле разворачивает ферромагнитные волокна в нужном направлении.

Трубчатые изделия с винтовой арматурой можно формовать на двухшнековом прессе [250], схема которого изображена на рисунке 71.

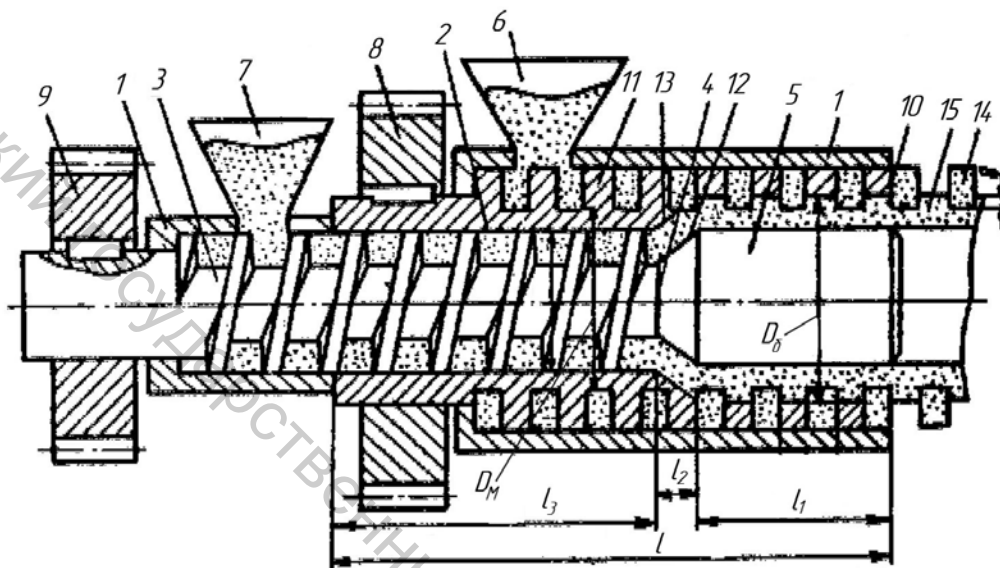


Рисунок 71 – Формование труб с винтовой арматурой

В корпусе 1 пресса установлен полый шнек 2, в осевом отверстии которого находится внутренний шнек 3. На торце 4 внутреннего шнека закреплен дорн 5. На корпусе пресса расположены два загрузочных бункера 6 и 7, питающие порошками наружный и внутренний шнеки соответственно. Наружный шнек получает вращение через зубчатое колесо 8, а внутренний – через колесо 9.

Сквозное осевое отверстие наружного шнека имеет длину l и состоит из трех частей: ступени большего диаметра D_6 , переходной части и ступени меньшего диаметра D_m . Длины этих частей на схеме обозначены l_1 , l_2 и l_3 соответственно. Ступень большего диаметра выходит на прессующий торец 10 наружного шнека. Внутренний шнек расположен таким образом, чтобы дорн был погружен в отверстие наружного шнека на глубину, равную длине ступени большего диаметра l_1 . Тогда переходная поверхность l_2 дорна будет эквидистантна переходной поверхности l_3 осевого отверстия. Вращающиеся шнеки перемещают пластифицированные порошки из бункеров в зону формования. Наружный шнек формирует винтовое ребро 14, а внутренний – трубу 15. Профиль армирующего ребра определяется профилем канала наружного шнека. Таким образом, устройство позволяет получать армированные трубы, причем арматура в них

ориентирована по винтовой линии.

Особую группу композитов представляют многослойные изделия. Экструзией можно формовать многослойные трубы неограниченной длины. Перспективно использование ступенчатого шнека [251]. Каждая ступень загружается своим порошком, а матрица экструдера изготовлена таким образом, чтобы не нарушать сформированную на шнеке многослойную структуру (рис.72).

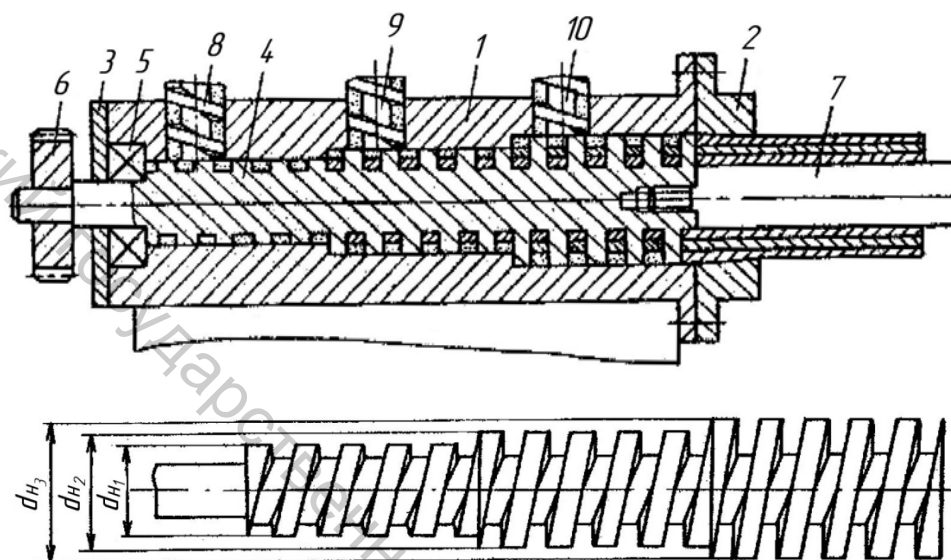


Рисунок 72 – Трехступенчатый шнек позволит формовать многослойные трубы

На торцах корпуса 1 с одной стороны закреплена матрица 2, а с другой – крышка 3 опорного подшипника 5. Шнек 4 состоит из трех ступеней; через зубчатое колесо 6 он получает вращение от привода. На торце шнека установлена цилиндрическая оправка 7. Каждая ступень шнека имеет свой винтовой канал и запитывается отдельно различными порошками с помощью подающих шнеков 8–10. На выходе все три слоя соединяются в трубу.

Идея использования многозаходного шнека с отдельной загрузкой витков разными порошками может быть реализована и другим образом. Так, в устройстве для формования многослойных материалов [252] специальная форма винтовой нарезки на выходе шнека обеспечивает надежное соединение слоев в биметаллическое изделие (рис. 73).

Устройство состоит из корпуса 1, внутри которого размещен двухзаходный шнек 2, последние витки винтовых каналов которого изогнуты. На хвостовике шнека закреплено зубчатое колесо 3 с полостями, количество которых соответствует числу заходов нарезки шнека (на рисунке изображено формование двухслойных изделий). Над полостями расположены загрузочные бункеры 6 и 7 с различными порошками. Устройство установлено на основании 8. В процессе

формования каждый из двух каналов 9 и 10 нарезки шнека работает самостоятельно, а на выходе шнека оба слоя соединяются в биметаллическое изделие за счет изгиба последних витков этих каналов.

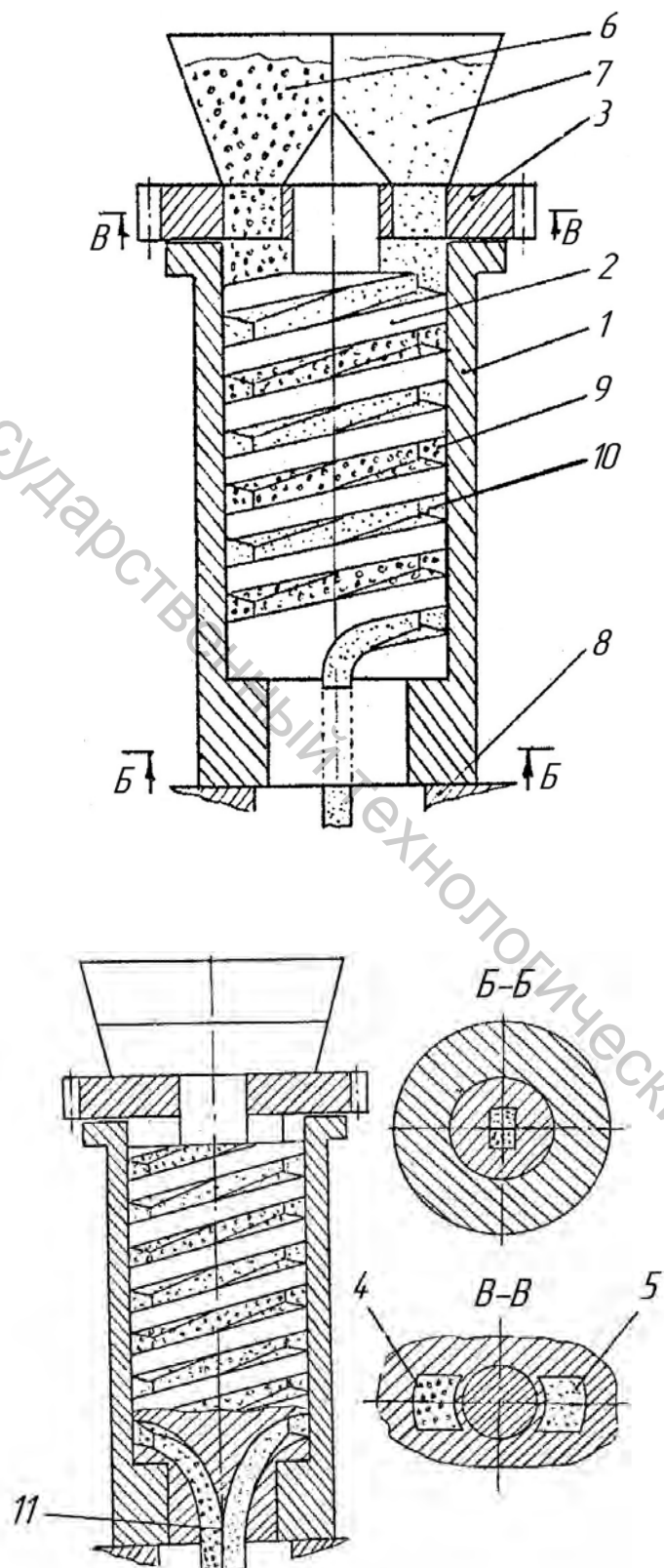


Рисунок 73 – Устройство для формования биметаллических изделий

Перспективным направлением использования экструзии является изготовление металлополимерных композитов [253].

Шнековая экструзия нашла также широкое применение в технологии термомеханического рециклинга полимерсодержащих отходов предприятий легкой промышленности [6]. Технология позволяет получать различные композиционные материалы на основе пенополиуретанов, натуральных и искусственных кож и других материалов, образующихся в виде листовых или кусковых отходов в обувном и кожгалантерейном производстве.

Основным этапом изготовления композиционного материала по технологии термомеханического рециклинга является переработка предварительно измельченных компонентов на шнековом экструдере с получением длинномерного изделия определенного профиля [16, 20, 23]. На основании накопленного практического опыта разработан ряд технических решений, позволяющих оптимизировать конструктивные особенности шнековых экструдеров с целью более эффективной переработки полимерсодержащих композиционных материалов.

При переработке на шнековом экструдере композиционного материала, включающего в своем составе измельченные отходы кожи, возникает ряд трудностей, обусловленных свойствами материала. При нагреве в замкнутом пространстве начинается выделение из кожевенных отходов продуктов дубления: кислот, дубильных веществ, содержащейся в них влаги, которые совместно с композицией перемещаются по шнеку к формирующей фильере. В зоне дозирования происходит паробразование, которое нарушает стабильное течение процесса экструзии, снижает производительность, создает опасность травматизма ввиду «выстреливания» пара из фильеры. Совокупность конструктивных признаков экструдера для переработки кожевенных материалов [254] позволяет устранить указанные трудности.

Экструдер (рис. 74) состоит из станины 1, верхняя часть которой накрыта плитой 2, на которой установлен редуктор 3. Внутри станины размещен двигатель постоянного тока 4, связанный с быстроходным валом редуктора посредством клиноременной передачи 5. Тихоходный вал редуктора через муфту 6 взаимодействует с хвостовиком шнека 7, который установлен в подшипниковом узле 8, состыкованном с корпусом шнека 9. Корпус шнека заканчивается фланцем, к которому крепится формообразующая фильера 13. На корпусе шнека и фильере установлены нагреватели 14, закрытые кожухом 15.

Экструдер имеет следующие конструктивные особенности. Между подшипниковым узлом и загрузочным бункером 10 (в котором установлен ворошитель 11) в корпусе шнека выполнено отверстие 12 диаметром d_o . Корпус шнека установлен таким образом, что ось вращения шнека составляет с горизонталью угол, равный $1...3^\circ$. Общая длина шнека равна $12d_{ш}$, зона питания равна $7d_{ш}$, зона сжатия равна $1d_{ш}$, а

зона дозирования равна $4d_{ш}$, где $d_{ш}$ – наружный диаметр шнека; при этом отношение глубины канавки шнека в зоне питания к глубине канавки в зоне дозирования равно 3.

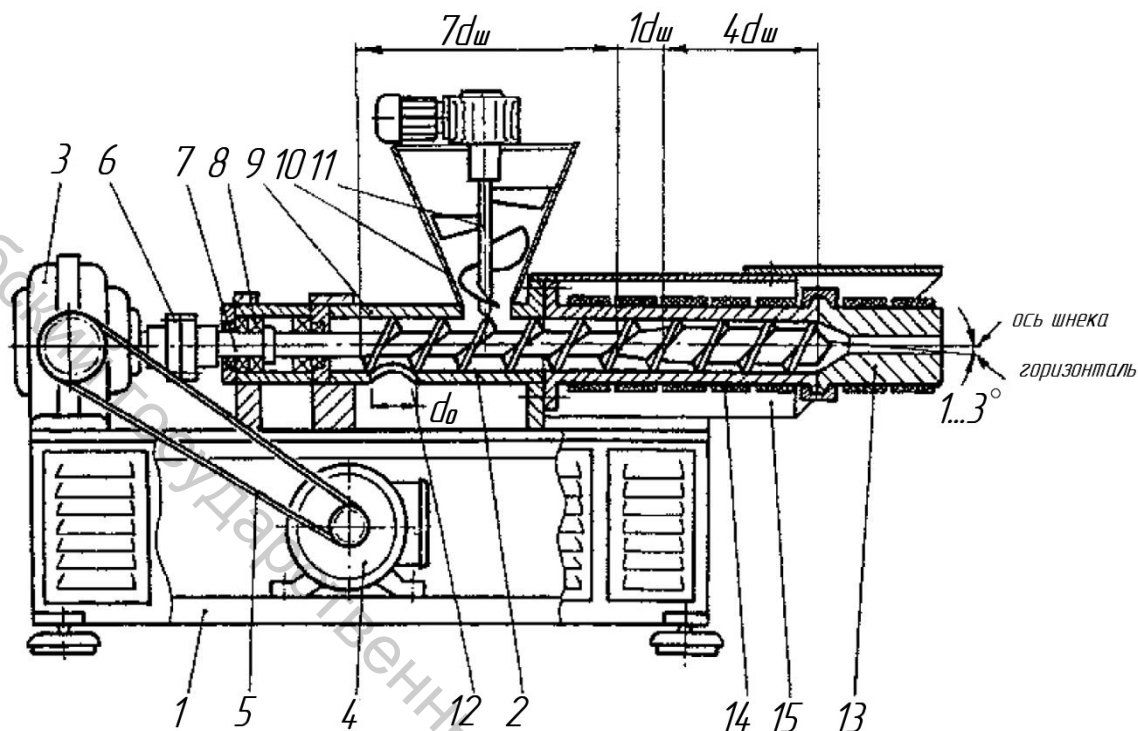


Рисунок 74 – Конструктивные особенности экструдера для переработки отходов кожевенных материалов

Перечисленные конструктивные особенности экструдера позволяют обеспечивать высокую степень сжатия материала, что приводит к ускоренному выдавливанию жидкости, содержащейся в коже и пенополиуретане. Наклон оси вращения шнека относительно горизонтали обеспечивает отток этой жидкости в сторону загрузочного бункера и ее последующее удаление через отверстие. Отсутствие избытков влаги обеспечивает термостабильность процесса экструзии, в результате повышается качество получаемого из кожевенных отходов композиционного материала.

Эффективную переработку отходов кожевенных материалов можно осуществлять с применением экструдера [255]. Экструдер (рис. 75) состоит из станины-гидробака 1 с вертикальной стойкой-плитой 2, с одной стороны которой закреплен подшипниковый узел 3, одноступенчатый цилиндрический редуктор 4 и гидромотор 5, а с другой – соосно закреплен корпус 6 с нагревателями 7, которые закрыты защитным кожухом 8. К корпусу через фланец крепится загрузочный бункер 9, на котором установлен червячный редуктор 10, быстроходный вал которого связан с гидромотором 11, а тихоходный вал – с ворошителем 12. К выходному концу корпуса посредством зажима 13 крепится фильера 14. На гидробаке закреплены гидронасос с электродвигателем 15, распреде-

лительная плита с гидроаппаратурой 16, система охлаждения 17 и, на стойке, с возможностью вращения установлен шкаф управления 18, с пускорегулирующей электроаппаратурой.

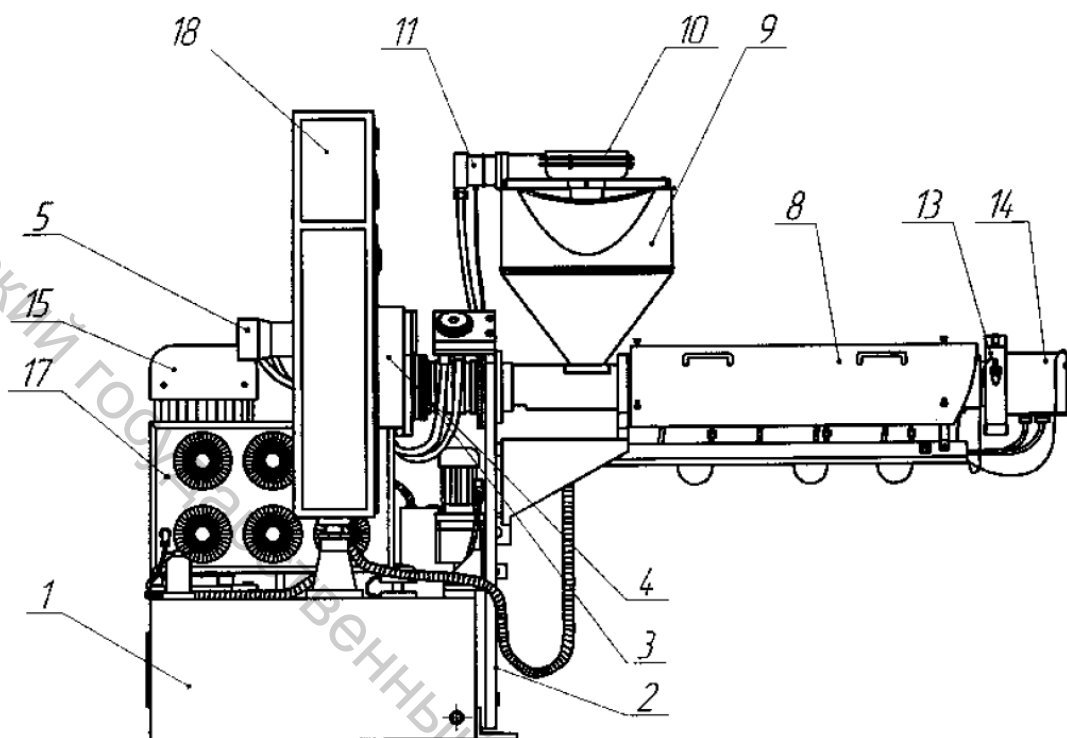


Рисунок 75 – Общий вид экструдера для рециклинга отходов кожевенных материалов

Шнек 19, расположенный в корпусе экструдера, выполнен сборным и состоит из пяти секций, при этом длина каждой секции равна трем диаметрам шнека, а глубина винтовой канавки каждой последующей секции, начиная от зоны загрузки, определяется исходя из соотношения $h_i = 0,85 h_{i-1}$, где h_i и h_{i-1} – глубина последующей и предыдущей секций шнека.

Циклически уменьшающаяся глубина винтовой нарезки канавки шнека способствует тому, что материал полностью заполняет межвитковое пространство шнека в зоне дозирования. Специальный монтаж подводных магистралей гидромоторов, обеспечивающих вращение шнека и ворошителя, позволяет синхронизировать их частоту вращения и обеспечить подачу материала из загрузочного бункера с максимально возможным заполнением межвиткового пространства шнека в зоне пластикации. В результате все функциональные зоны шнека работают с полной загрузкой, материал в вязкотекучем состоянии равномерно поступает к формующей фильере и продавливается через нее без пульсаций и разрывов, что повышает качество готовых изделий. Выполнение шнека сборным из различных секций позволяет значительно уменьшить

затраты на ремонтные работы путем изготовления и замены только этих двух секций.

При экструзии композиционных материалов из отходов, включающих волокнистые компоненты, большое влияние на свойства готового изделия оказывает степень измельчения волокон. Чем выше степень измельчения, тем ниже будут прочностные показатели композиционного материала. Поэтому оборудование для переработки таких материалов не должно оказывать сильного диспергирующего воздействия на волокна материала. Конструктивные особенности экструдера для переработки отходов искусственных кож [256], общий вид которого показан на рисунке 76, позволяют снизить степень измельчения волокон в композиционном материале при его переработке в изделие.

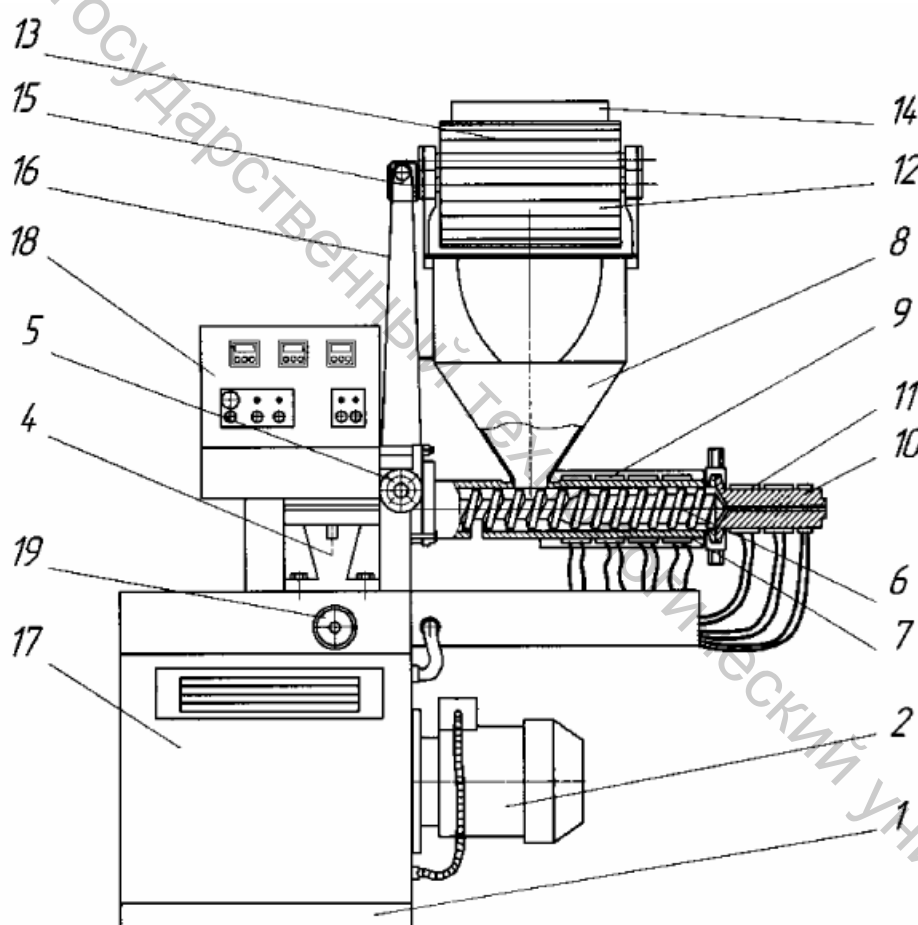


Рисунок 76 – Экструдер с механизмом резки и коротким шнеком уменьшает степень измельчения волокон

В верхней части загрузочного бункера экструдера 8 установлен механизм резки, состоящий из приводного вала 12, на котором закреплены расположенные по образующей плоские ножи 13, и прижимного гладкого вала 14. Шнек 9 выполнен коротким: его длина составляет

шесть диаметров, при этом шаг его нарезки равен половине диаметра, а глубина винтовой канавки уменьшается дискретно на витке, условно разделяющем зону питания и плавления, исходя из соотношения $h_{пл} = (0,5 \dots 0,7)h_{пд}$, где $h_{пл}$ и $h_{пд}$ – глубина винтовой канавки шнека в зоне пластикации и в зоне подачи соответственно.

Поскольку первоначальное измельчение материала осуществляется на устройстве резки между кромками ножей, исходная степень измельчения волокон в материале минимальна. Конструкция короткого шнека с указанными конструктивными особенностями также обеспечивает минимальное диспергирующее воздействие шнека на волокна. В результате повышаются прочностные характеристики экструдированного композиционного материала.

При переработке на шнековых экструдерах интегральных пенополиуретанов [10] может возникать ряд проблем, обусловленных их гигроскопичностью и разветвленной пористой структурой. В экструдере для термомеханического рециклинга отходов интегральных полиуретанов [7] применено специальное конструктивное решение загрузочного бункера.

Экструдер (рис. 77) состоит из станины 1, на которой закреплены: вертикальная стойка-плита 2, мотор-редуктор 3 и шкаф управления с пускорегулирующей электроаппаратурой 4. С одной стороны стойки-плиты закреплен подшипниковый узел 5, с другой стороны, соосно с подшипниковым узлом, закреплен корпус 6 с нагревателями 7, которые закрыты защитным кожухом 8. К корпусу крепится загрузочный бункер 9, на котором установлен червячный редуктор 10, быстроходный вал которого связан с электродвигателем 11. К выходному концу корпуса крепится фильера 13. Внутри корпуса размещается шнек 14.

Конструктивные особенности загрузочного бункера экструдера состоят в том, что тихоходный вал редуктора ворошителя 12, а также сам ворошитель, выполнены полыми, при этом в месте пересечения шнека 14 с ворошителем 12 выполнена проточка на высоту витка шнека. За счет этого переходящая в пар влага, содержащаяся в исходном материале, отводится через полый вал ворошителя и не воздействует на находящийся в зоне пластикации материал. В результате повышается качество продукции и снижается опасность неконтролируемого выхода пара из фильеры.

В экструдере для переработки полимерсодержащих отходов [8] устранены эксплуатационные недостатки, характерные при переработке подобных материалов. Перерабатываемые на одном оборудовании композиционные материалы могут различаться по составу. При частой замене одной композиции на другую (например, при отработке технологии) необходимо полностью удалять предыдущий материал из межвиткового пространства шнека. В этом случае осуществляют разборку установки, извлечение шнека и его чистку. Указанная операция являет-

Рисунок 77 – Экструдер для термомеханического рециклинга отходов интегральных полиуретанов с отводом пара из зоны пластикации

Конструктивное решение экструдера (рис. 78), при котором корпус с нагревателями 8 и подшипниковый узел 3 соосно крепятся с двух сторон вертикальной поворотной плиты 2, установленной на станине с возможностью поворота относительно ее боковой поверхности, обеспечивает быстрый и качественный монтаж корпуса.

Многообразие перерабатываемых композиционных материалов на полимерной основе с различными свойствами приводит к необходимости разработки и применения шнековых устройств с возможностью контроля ее продольным перемещением в ходе процесса экструзии. Это

пластикации

Многообразие перерабатываемых композиционных материалов на полимерной основе с различными свойствами приводит к необходимости разработки и применения шнековых устройств с возможностью контроля за различными параметрами в ходе процесса экструзии. Экспериментальный экструдер для переработки отходов [9] позволяет изготавливать изделия с одновременным получением данных о силовых и температурных параметрах процесса экструзии.

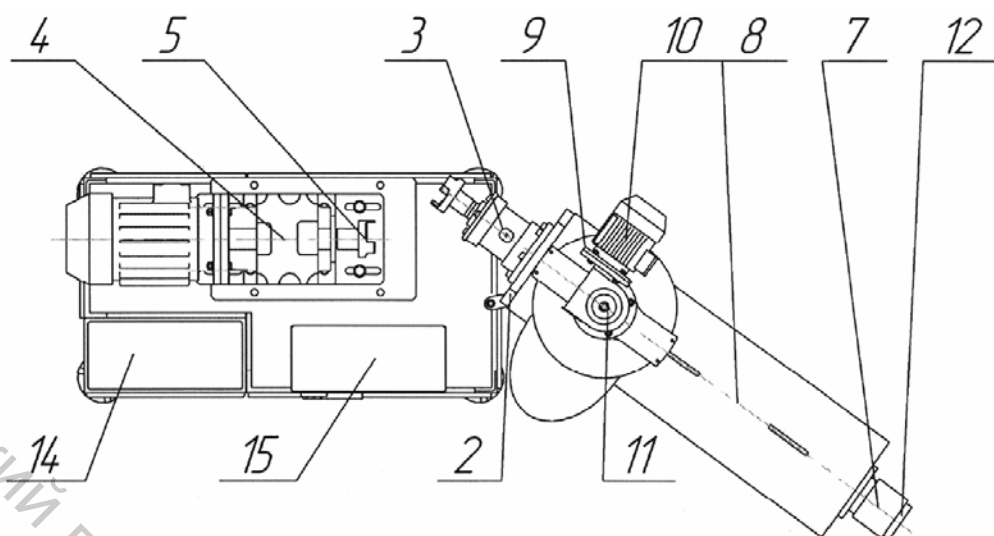


Рисунок 78 – Шнековый экструдер с монтажом на вертикальной поворотной плите

Экспериментальный экструдер (рис. 79) состоит из станины, верхняя часть которой накрыта плитой 2 с установленным редуктором 3 и шкафом управления.

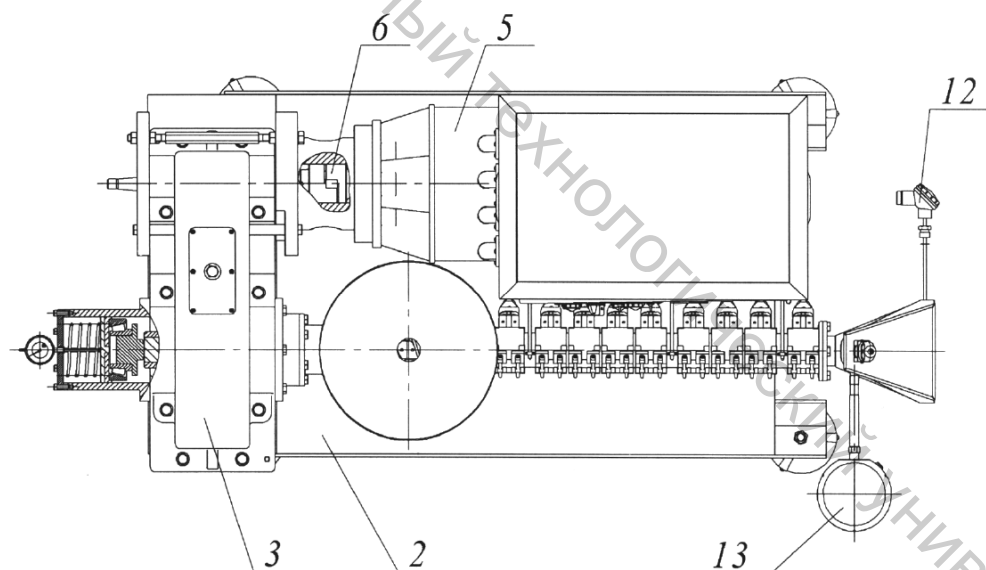


Рисунок 79 – Экспериментальный экструдер с возможностью контроля температурных и силовых параметров

Вращающий момент на быстроходный вал редуктора передается от двигателя постоянного тока с регулируемым приводом 5 через муфту 6. Подшипниковый узел и корпус шнека крепятся к редуктору соосно с тихоходным валом последнего. На корпус шнека устанавливается бункер для загрузки перерабатываемого материала, крепятся фильера 10, нагреватели 11 и термопары 12 (рис. 80). В фильере выполнено отвер-

стие для установки датчика давления расплава 13. Внутри корпуса 8 размещается шнек 14.

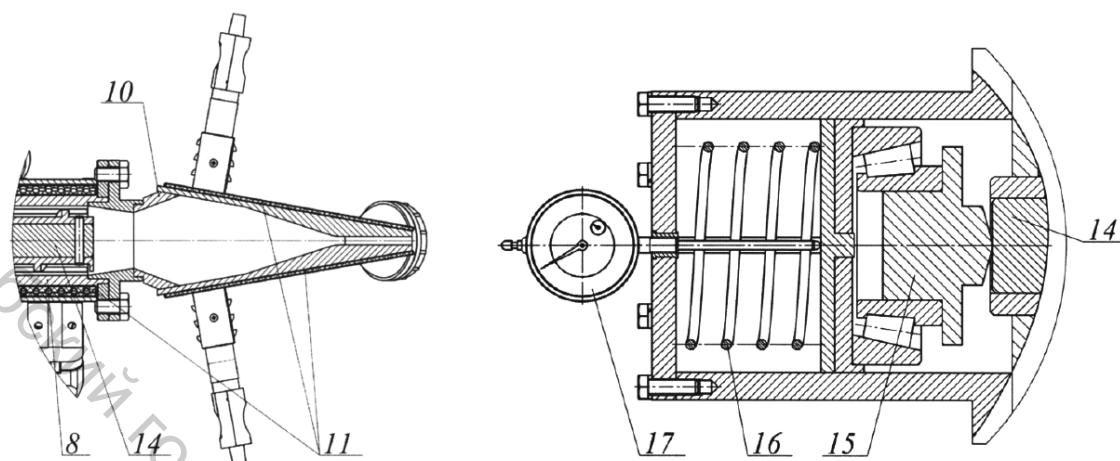


Рисунок 80 – Расположение датчиков контроля температурных и силовых параметров в экспериментальном экструдере

Благодаря тому, что шнек имеет свободное осевое перемещение, возникающее осевое усилие в процессе переработки через опору 15 шнека передается на динамометрическую пружину 16 и при помощи датчика 17 контролируется.

7.4 Нанесение покрытий

Сложную задачу представляет собой формование покрытий на внутренних поверхностях длинных труб. Такая необходимость возникает при изготовлении теплообменников, фильтров и других изделий. При большой длине и малом диаметре трубы ее внутренняя поверхность становится труднодоступной.

Традиционно в порошковой металлургии покрытия получают припеканием свободнонасыпанных порошков [257–258], напрессовкой с последующим припеканием [259], накаткой роликом-электродом [260], обмазкой шликерами [261] или центробежным формованием [262–263]. Все эти методы позволяют наносить гладкие покрытия на внутренние поверхности коротких труб. Больше возможностей дает использование экструзии пластифицированных сред.

Нанесение покрытий на внутренние поверхности труб удобно проводить в два этапа [264]. Это техническое решение схематически изображено на рисунке 81.

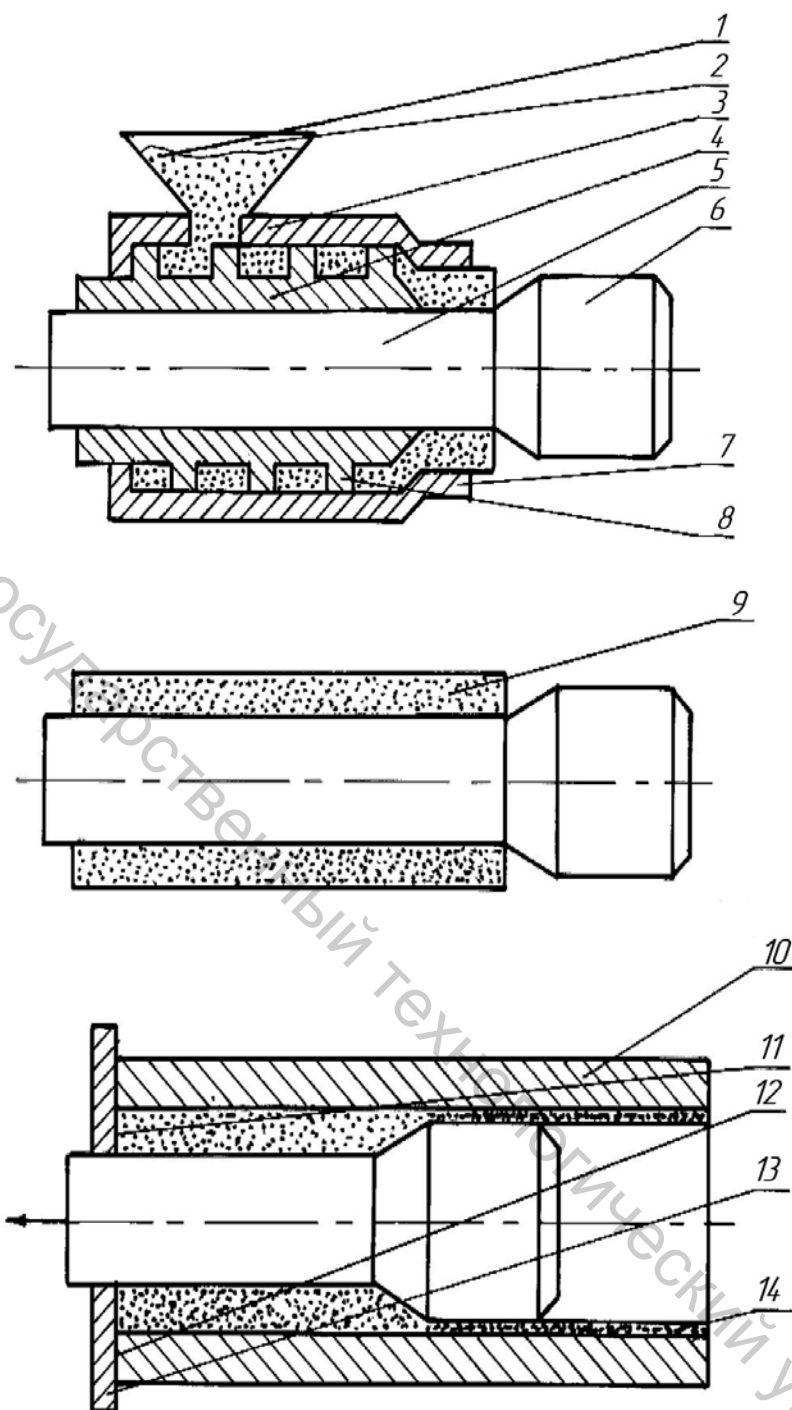


Рисунок 81 – Схема нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы

Пластифицированный порошок 1 поступает из бункера 2 в шнековый пресс 3. Внутри полого шнека 4 установлена оправка 5 таким образом, чтобы дорн 6 находился со стороны конической матрицы 7. Гребень 8 винтового канала вращающегося шнека выдавливает материал через матрицу, формируя наружное покрытие 9 на оправке, перемещающейся вместе с ним в направлении экструзии. Оправку с наружным покрытием помещают внутрь обрабатываемой трубы 10, а зазор 11 на ее торце 12 закрывают опорной плитой 13. Затем оправку

протягивают, при этом дорн напрессовывает покрытие 14 на внутреннюю поверхность трубы. Профиль нанесенного покрытия соответствует профилю используемого дорна.

Операции нанесения покрытия на оправку и трубу можно совместить [265–266]. Такая схема обработки внутренней поверхности представлена на рисунке 82.

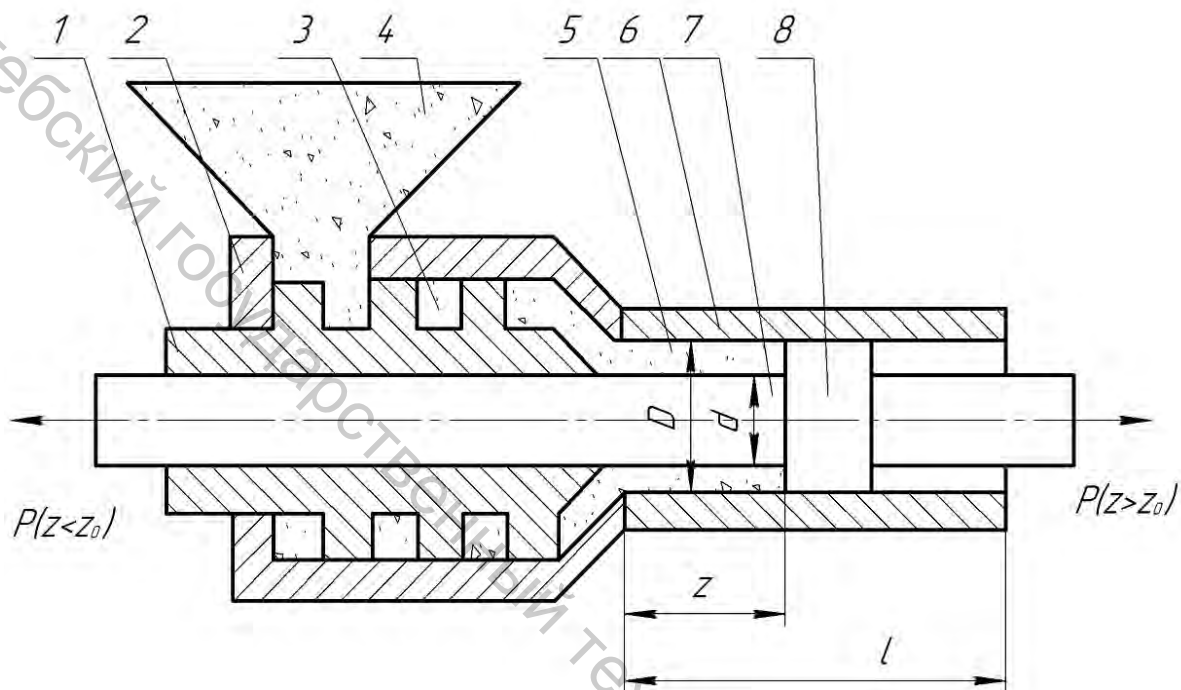


Рисунок 82 – Однопроходная схема нанесения внутренних покрытий

Вращающийся шнек 1, установленный в неподвижном корпусе 2, продавливает пластифицированный порошок 3, поступающий из бункера 4, через кольцевой зазор 5, образованный внутренней поверхностью трубы 6 и оправкой 7. Материал, воздействуя на поверхность оправки и имеющийся на ней наконечник 8, перемещает оправку внутрь трубы. Так как сила трения порошка о внутреннюю поверхность трубы возрастает с увеличением глубины погружения в нее наконечника, к оправке прикладывают закономерно изменяющееся усилие, компенсирующее увеличение силы трения и обеспечивающее равномерную по длине плотность покрытия.

Если формируемое покрытие должно иметь развитую поверхность, эффективно использование двухшнекового устройства [267], конструкция которого изображена на рисунке 83. Оно обеспечивает нанесение внутренних покрытий с продольными и винтовыми ребрами на поверхностях различного профиля.

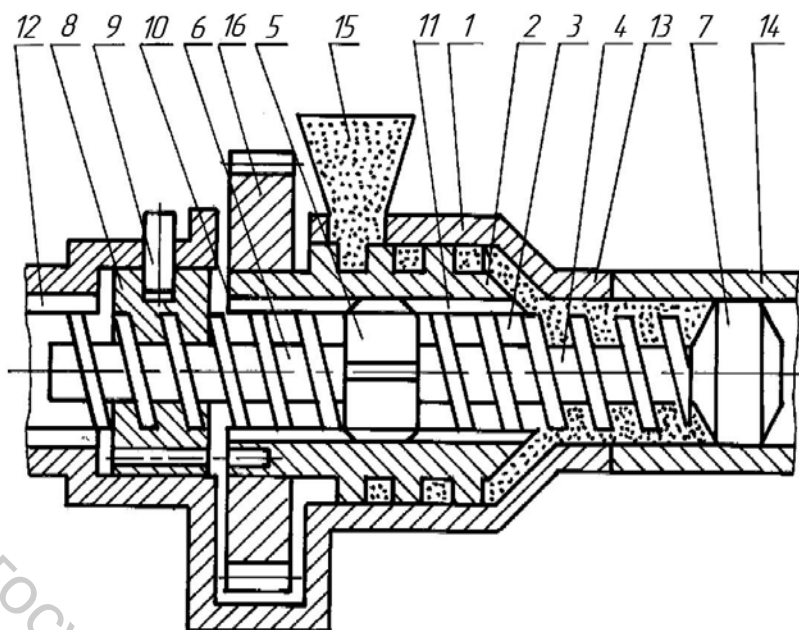


Рисунок 83 – Схема нанесения внутренних покрытий с развитой поверхностью

Внутри неподвижного корпуса 1 расположен полый шнек 2, в осевом отверстии 3 которого установлен внутренний шнек, состоящий из трех частей: формующей 4, направляющей 5 и опорной 6. На торце внутреннего шнека закреплен центрирующий хвостовик 7. Опорная часть шнека, представляющая собой грузовой винт, сопряжена с приводной гайкой 8, которая с помощью штифта 9 может крепиться на корпусе или торце 10 полого шнека. Направляющая часть внутреннего шнека соединена с направляющими 11 полого шнека или с направляющими 12 корпуса. На корпусе закреплена матрица 13 к которой прижата обрабатываемая труба 14. Материал поступает из бункера 15. Полый шнек получает вращение через зубчатое колесо 16.

Для получения покрытий с винтовой поверхностью используют формующую часть внутреннего шнека с соответствующей винтовой нарезкой, его направляющую часть соединяют с направляющими полого шнека, а приводную гайку неподвижно закрепляют на корпусе. На торце формующей части шнека устанавливают центрирующий хвостовик, необходимый для получения покрытия равномерной толщины. На центрирующий хвостовик надевают обрабатываемую трубу и плотно прижимают ее торец к матрице. Затем включают привод. Вращающийся полый шнек выдавливает пластичную среду через зазор между матрицей и формующей частью внутреннего шнека. Подвергшийся экструзии материал образует покрытие на формующей части внутреннего шнека, затекает в имеющийся на ней винтовой канал. Вместе с полым шнеком вращается и внутренний шнек, соединенный с ним через направляющие. Внутренний шнек перемещается в осевом направлении, опираясь на неподвижную приводную гайку, угол

подъема резьбы которой выбирают таким, чтобы скорость этого перемещения равнялась скорости экструзии материала.

После выхода центрирующего хвостовика из противоположного матрице конца трубы привод выключают и снимают хвостовик. Затем включают привод в обратном направлении. Внутренний шнек получает вращение от полого шнека и осевое перемещение от приводной гайки. В результате сложения этих двух движений формующая часть внутреннего шнека вывинчивается из нанесенного покрытия.

Для получения гладких покрытий или продольного оребрения используют формующую часть необходимого профиля. Направляющую часть соединяют с направляющими корпуса, а приводную гайку закрепляют на торце полого шнека. Центрирующий хвостовик в этом случае имеет такой же профиль, как и внутренняя поверхность обрабатываемой трубы. В этом случае внутренний шнек получает осевое перемещение от приводной гайки, вращающейся вместе с полым шнеком. Направляющая часть внутреннего шнека, соединенная с направляющими неподвижного корпуса, предотвращает его проворот. В результате внутренний шнек перемещается в осевом направлении без вращения.

После окончания прямого хода центрирующий хвостовик снимают и включают привод в обратном направлении. При этом формующая часть внутреннего шнека удаляется из трубы без вращения. Возможно и принципиально другое решение этой технической задачи [268].

При изготовлении тепловых труб для нанесения покрытия предложено оригинальное техническое решение [269]. Медный порошок с размером частиц 0,4–0,7 мм смешивают с парафином и продавливают через мундштук со степенью обжатия 90–95 %. Из этого материала наносят наружное покрытие на цилиндрическую оправку диаметром 10 мм, как это описано выше, и помещают оправку внутрь медной трубки.

Затем сборку нагревают до температуры 50°C и выдерживают около трех минут для перераспределения парафина по длине трубы. После охлаждения оправку протягивают, перенося покрытие на внутреннюю поверхность медной трубки. В результате получают тепловую трубу, фитиль которой имеет неравномерную по длине пористость, что улучшает ее эксплуатационные характеристики.

7.5 Экструзия проволоки и шнуров

Наиболее перспективным методом формования шнуров и проволоки из порошков в условиях массового производства является

т. н. conform-метод, реализуемый на дисковом экструдере. В классическом исполнении это устройство представляет собой диск с каналом на боковой поверхности, прижатый к неподвижному башмаку. При вращении диска порошок из бункера попадает в канал и уплотняется под действием сил трения, действующих на него со стороны стенок канала и башмака в противоположных направлениях. Проведенные исследования позволили выявить некоторые недостатки этого метода формования и наметить пути его совершенствования. Основные задачи, которые необходимо решить: уменьшение габаритов и мощности применяемых дисковых экструдеров, улучшение качества получаемых изделий, расширение технических возможностей формующего оборудования.

Уменьшить размеры и необходимую мощность прессы позволит использование извилистого канала, занимающего меньше места на диске [270]. Схематически это техническое решение изображено на рисунке 84.

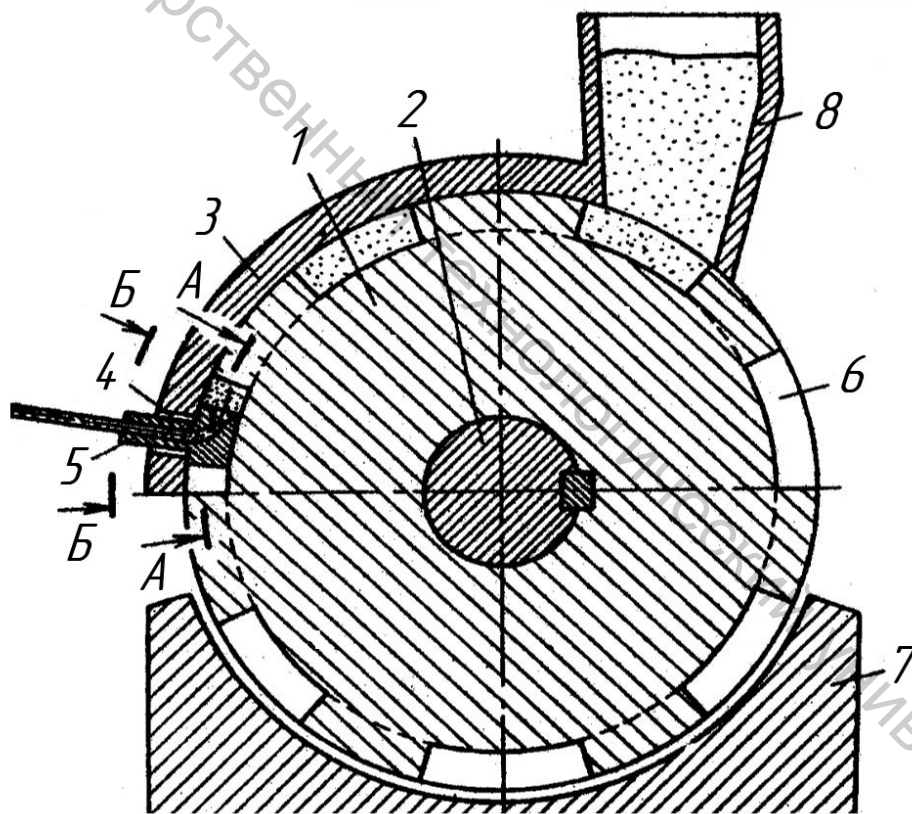


Рисунок 84 – Извилистый канал уменьшает размеры дисковых экструдеров

Экструдер состоит из диска 1, установленного на валу 2, и неподвижного башмака 3 с горизонтальным пазом 4. В этом пазу установлена с возможностью возвратно-поступательного перемещения матрица 5, а канал 6 на боковой поверхности диска выполнен

извилистым. На корпусе 7 пресса расположен загрузочный бункер 8, из которого в канал поступает пластифицированный порошок. В процессе экструзии матрица совершает сложное движение, являющееся результатом трех простых перемещений: по окружности диска, в горизонтальной плоскости и вращения вокруг своей оси. Извилистый канал имеет длину, значительно превышающую длину окружности диска (и, соответственно, длину обычного кольцевого канала). Усилие прессования, зависящее от длины канала, достигается при меньшем диаметре диска, что снижает энергоемкость процесса формования и металлоемкость пресса.

Улучшить качество изделий, получаемых экструзией на дисковых прессах, позволит способ формования, улучшающий плотность и однородность прессовок за счет создания в порошке сложного напряженно-деформированного состояния [271]. Схематически он изображен на рисунке 85.

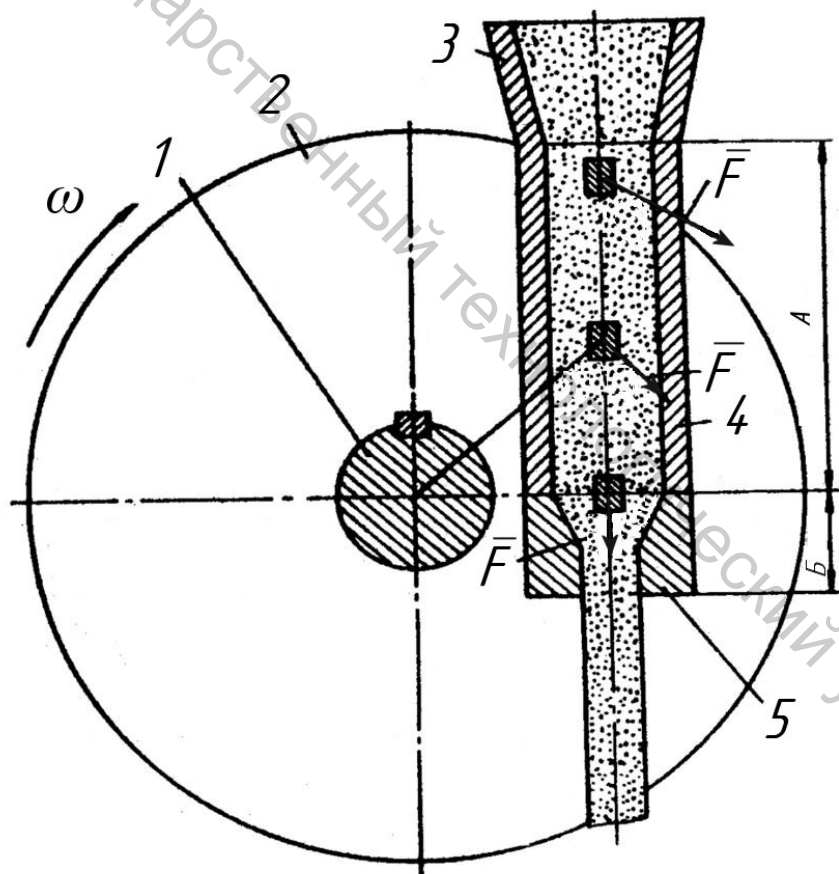


Рисунок 85 – Способ формования порошковых шнуров на дисковом экструдере

На приводной вал 1 насажены два диска 2, захватывающие при вращении порошок из бункера 3 и выдавливающие его через матрицу 4 с мундштуком 5. Интенсивные и закономерно изменяющиеся

касательные напряжения, возникающие в формуемом материале, укладывают частицы порошка очень компактно, что обеспечивает высокую и равномерную плотность изделий.

Еще один недостаток conform-метода – искривление шнуров и проволоки после спекания. Улучшить геометрию изделий позволяет способ формования [272]; его схема изображена на рисунке 86.

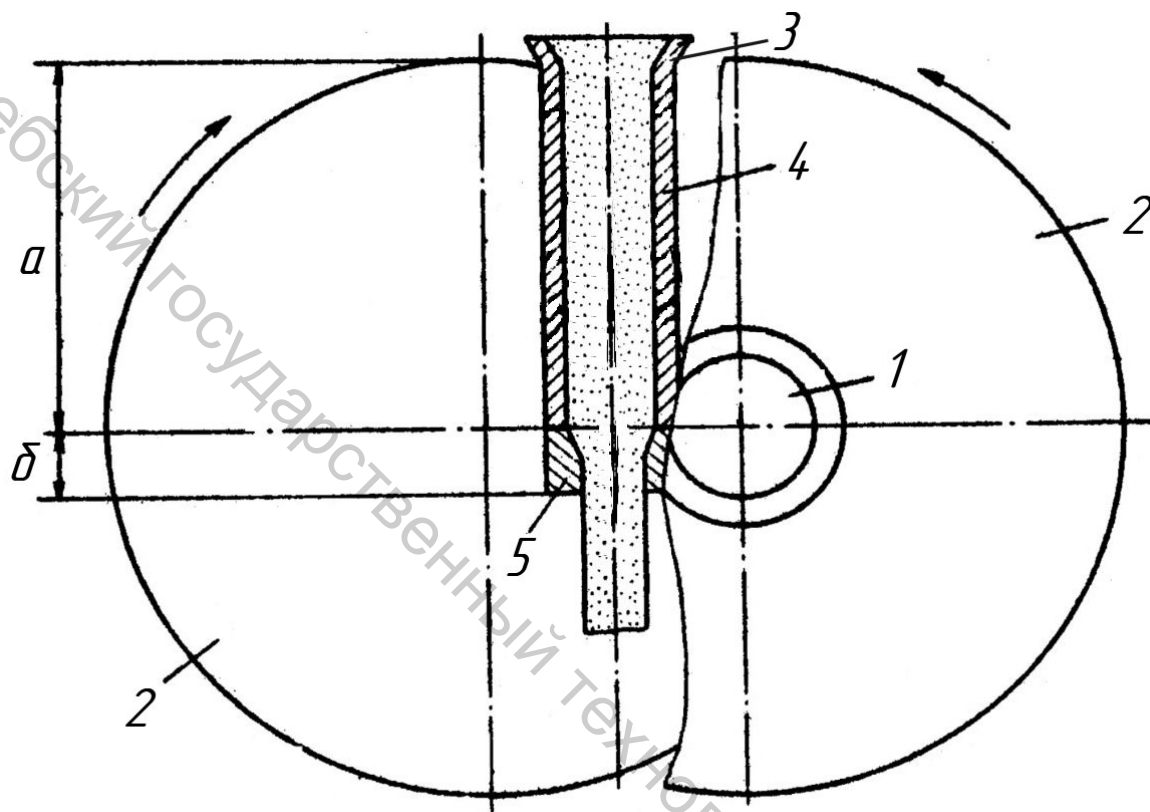


Рисунок 86 – Противоположное вращение дисков улучшает геометрию изделий

Эта схема отличается от предыдущей противоположным вращением дисков. Полученная таким образом прессовка при спекании равномерно усаживается по всему объему и не искривляется.

Расширить технологические возможности conform-метода позволяет дисковый экструдер с наклонно расположенными дисками. Это техническое решение [273] схематически изображено на рисунке 87. В этом экструдере неподвижный башмак отсутствует, а порошок уплотняется между двумя вращающимися дисками, слегка наклоненными по отношению к оси мундштука. Такое расположение дисков позволяет формировать низкопластифицированные и, в некоторых случаях, непластифицированные порошки.

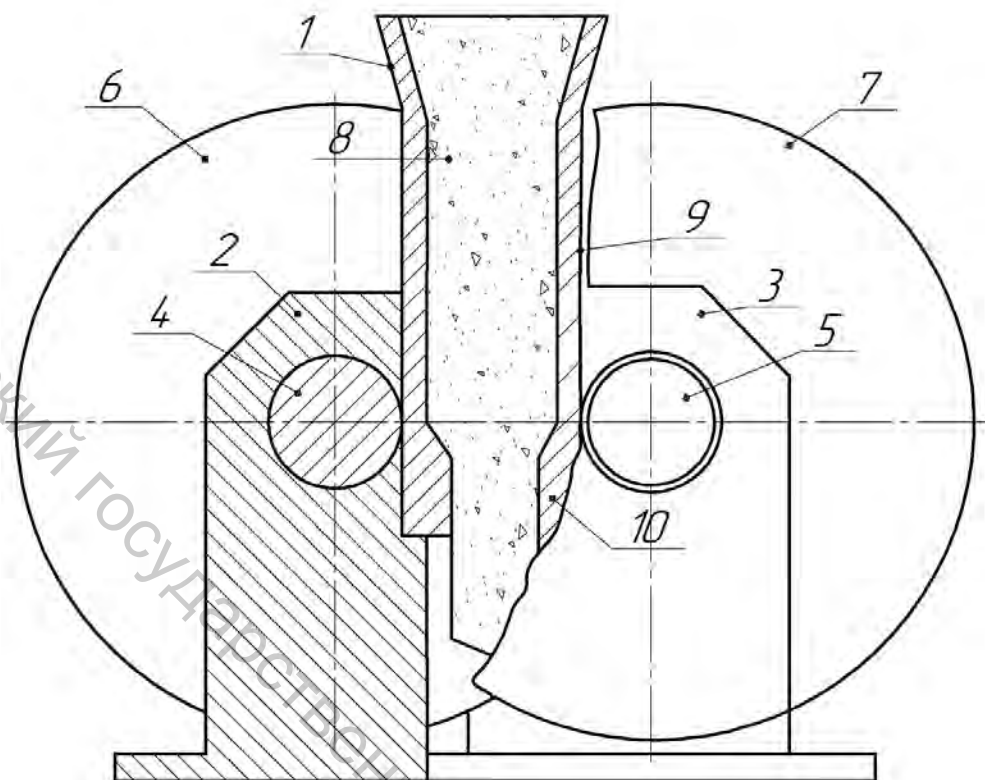


Рисунок 87 – Наклонное расположение дисков и их встречное вращение расширяет технические возможности дисковых экструдеров

Существенным недостатком дисковых экструдеров, реализующих conform-метод, является их высокая материалоемкость. Они представляют из себя массивные установки с мощным приводом, необходимым для вращения диска, диаметр которого составляет около 500 мм.

Снизить энергоемкость в процессе формирования порошкового шнура позволит устройство, в котором рабочим органом является шнек [274]. При этом попутно решается задача снижения материалоемкости устройства и упрощения его конструкции.

Работу устройства поясняет схема, изображенная на рисунке 88. Вращающийся шнек 1, установленный в неподвижном цилиндрическом корпусе 2, захватывает пластифицированный порошковый материал из бункера 3. Уплотняясь в винтовом канале 4 шнека, материал перемещается к его последнему витку 5. Таким образом, на данном этапе работа устройства полностью аналогична работе шнекового экструдера.

Последний виток 5 шнека выполнен кольцевым; иначе говоря, винтовой канал шнека заканчивается кольцевой проточкой, выполняющей те же функции, что и канал на боковой поверхности диска в устройствах для реализации conform-метода. Кольцевой виток шнека соединен с мундштуком 6, установленным на боковой поверхности ци-

линдрического корпуса.

Пластичный материал, проходя по кольцевому витку, попадает в очко мундштука и превращается в шнур 7. При этом радиальное обжатие, как и в conform-методе, практически отсутствует. Это позволяет избежать бесполезных затрат энергии на постоянное продавливание конической пробки, свойственное традиционным шнековым устройствам.

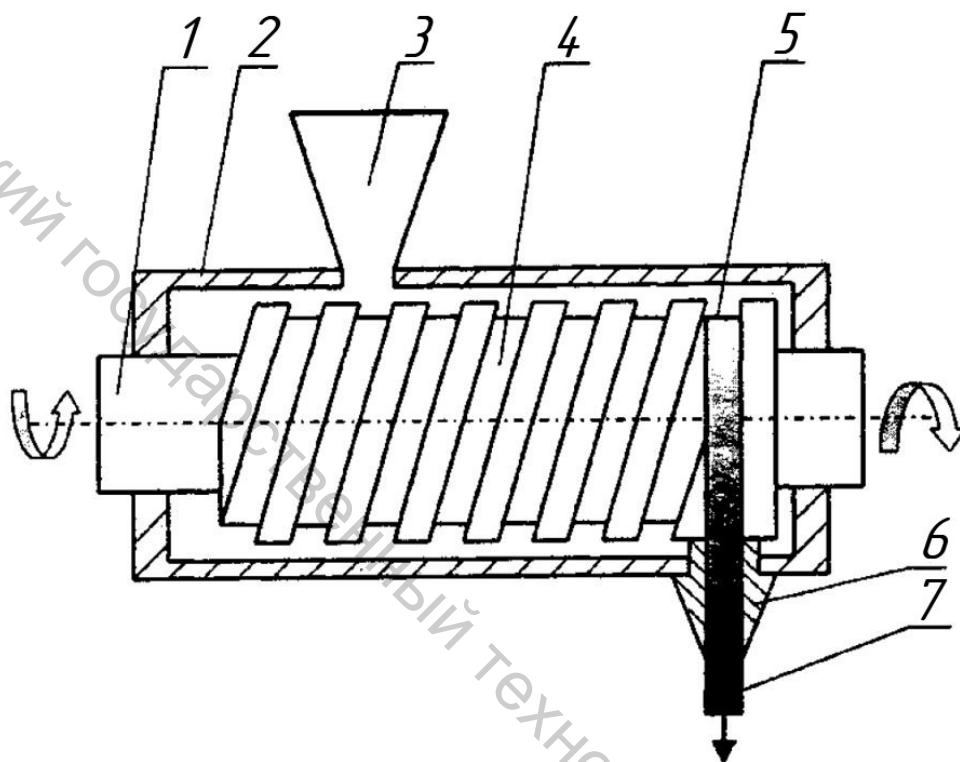


Рисунок 88 – Гибрид шнекового пресса и conform-устройства позволяет уменьшить материалоемкость установки для формирования шнура

Рассмотренное устройство совмещает достоинства шнекового экструдера и установки для реализации conform-метода. Компактность и простота конструкции оказываются такими же, как у шнековых экструдеров, при этом энергоемкость процесса формования находится на уровне conform-устройств – изделие формируется без излишней деформации материала.

7.6 Комбинированные методы формования

Существуют три основных способа реализации экструзии измельченных материалов: мундштучное прессование, шнековое формование и инжекция порошка на дисковых экструдерах. Комбинации этих трех способов, иногда дополненные элементами прокатки [275], позволяют получать разнообразные изделия из

порошковых материалов [276–277].

Сочетание элементов экструзии и прокатки позволяет организовать непрерывный процесс формирования крупногабаритных длинномерных прессовок повышенной однородности. Так, в устройстве [278] порошок под действием сил трения продавливается через зазор, образованный стержнем и эластичным вкладышем, имеющим форму тора. Вкладыш в процессе формирования проворачивается, обеспечивая равномерное уплотнение материала. Схематически это техническое решение изображено на рисунке 89.

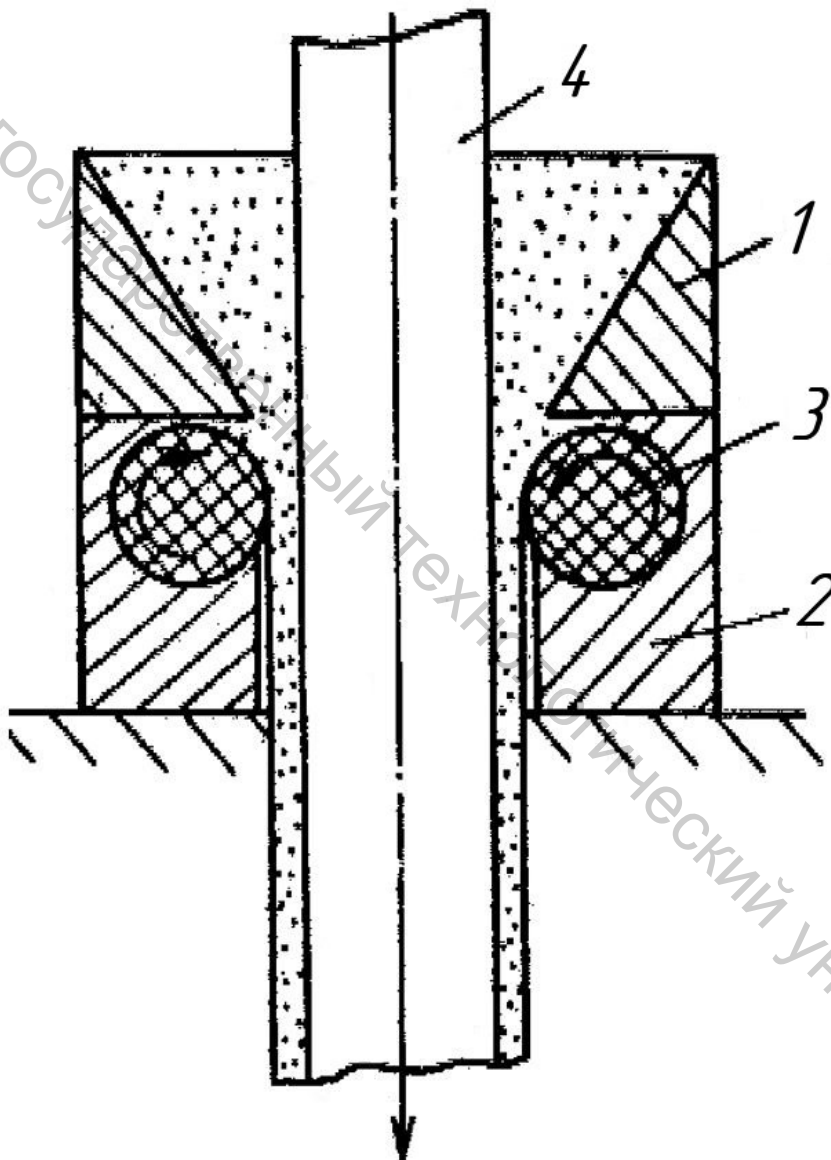


Рисунок 89 – Комбинация экструзии и прокатки улучшает качество изделий

Устройство состоит из бункера 1 и матрицы 2, внутри которой соосно установлены эластичный вкладыш 3 и формирующий стержень 4. Вкладыш имеет форму тора и может проворачиваться относительно

оси. В процессе формования стержень перемещается вместе с материалом, что вызывает вращение вкладыша, дополнительно пропрессовывающего материал в радиальном направлении.

Чередование элементов экструзии и прокатки позволяет прессовать даже труднопрессуемые твердосплавные порошки. Схема предложенного способа формования [279] изображена рисунке 90.

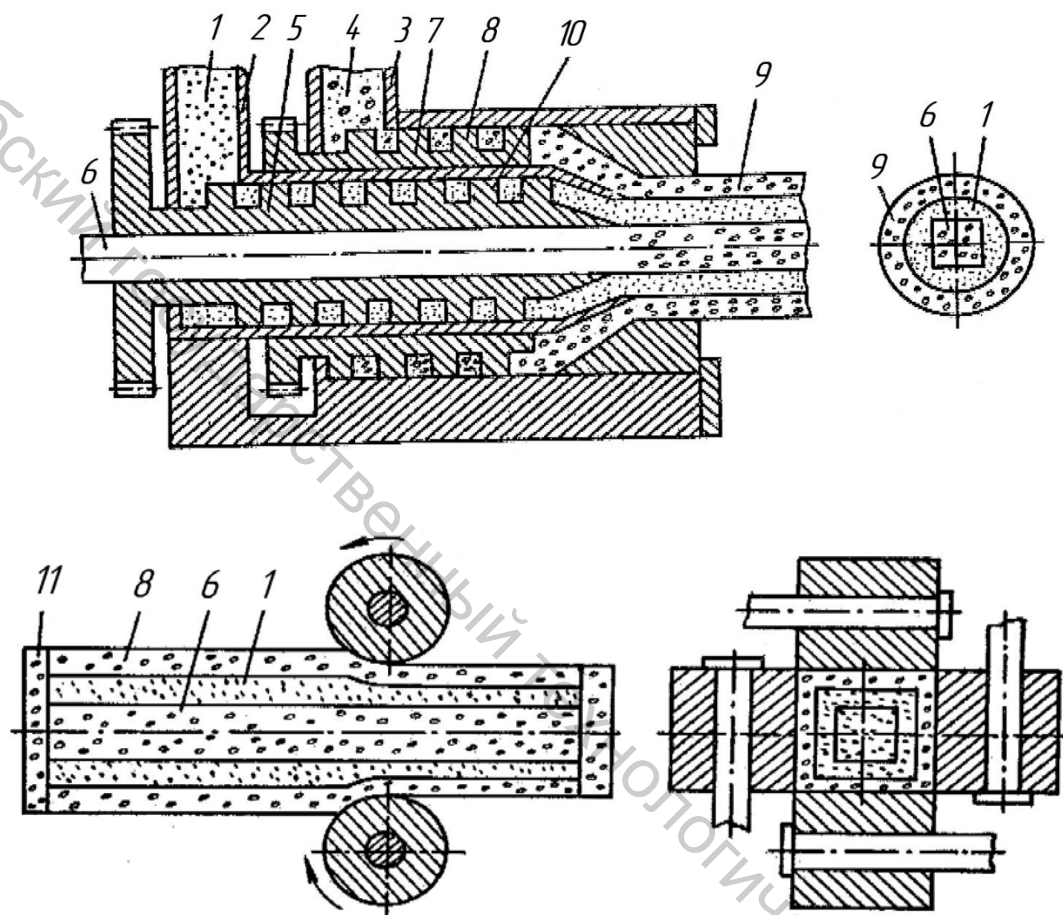


Рисунок 90 – Сочетание элементов экструзии и прокатки позволяет формировать труднопрессуемые порошки

Порошок 1 загружают в бункер 2 экструдера. Одновременно в бункер 3 загружают бентонитовую глину 4, разведенную водой. В полем шнеке 5 размещен стержень 6, изготовленный из такой же глины. Шнек расположен внутри полого шнека 7, витки 8 которого уплотняют глину и формируют гильзу 9. Стержень перемещается в направлении экструзии со скоростью формования гильзы. Витки 10 внутреннего шнека заполняют материал полость, образованную внутренней поверхностью гильзы и наружной поверхностью стержня. Когда длина сборки достигнет необходимой величины, процесс экструзии останавливают, необходимую часть сборки обрезают и закрывают ее торцовые поверхности заглушками 11. Окончательную форму изделие приобретает после прокатки. Затем всю сборку помещают в печь для

спекания. Вначале происходит обжиг глиняных деталей, которые превращаются в форму для спекания, предохраняющую прессовку от деформаций и разрушения.

Комбинация элементов шнекового и мундштучного прессования реализована в способе формования, при котором материал продавливается шнеком через матрицу, совершающую возвратно-поступательные движения. Давление подпора при экструзии с помощью автоматики изменяется по определенному закону, что позволяет повысить качество изделий. Схематически этот способ формования [280] изображен на рисунке 91.

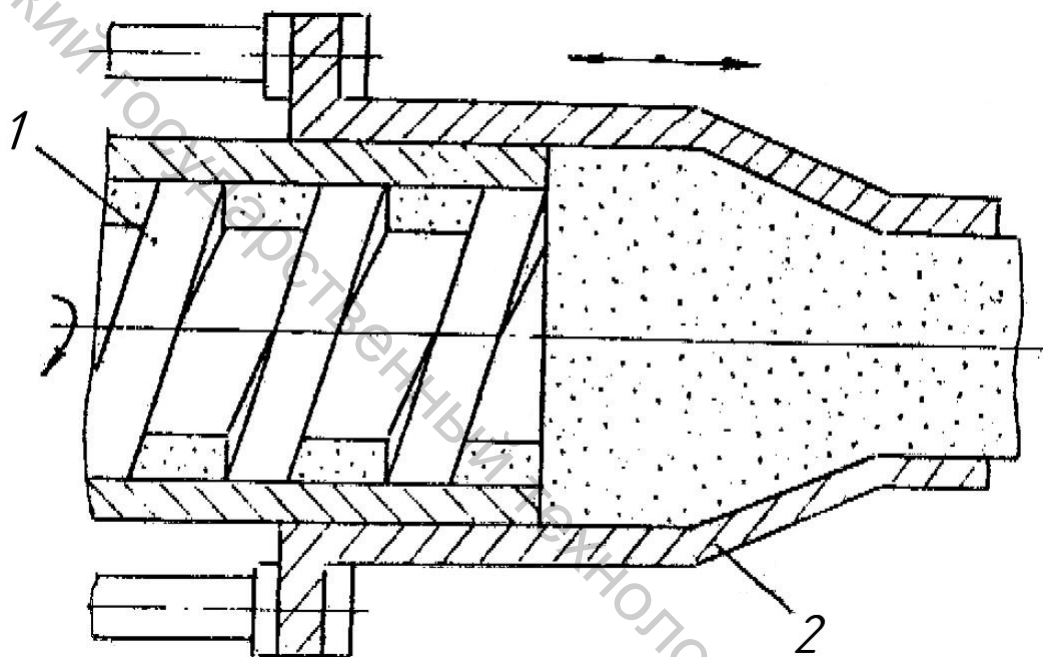


Рисунок 91 – Комбинация элементов мундштучного и шнекового формования позволяет улучшить качество изделий

При вращении шнека 1 пластифицированный порошок выдавливается через формующий инструмент 2, совершающий возвратно поступательное движение. Экструзия происходит при наезде инструмента на шнек, основная функция которого — транспортировка и уплотнение среды. По существу, это мундштучное прессование с непрерывной подачей материала.

Совместить шнековое и мундштучное прессование можно и без пульсаций, присущих предыдущему способу. Для этого предложено использовать сферический шнек, совершающий в процессе формования сложное движение. Это техническое решение [281] изображено на рисунке 92.

Движение шнека в этом способе формования складывается из двух простых вращений: вокруг собственной оси и регулярной прецессии относительно направления экструзии. Прецессию

осуществляют с частотой 10–30 % от частоты вращения шнека и углом нутации 5–15 °. Усилие прессования также складывается из двух составляющих: усилия, развиваемого шнеком в результате его вращения и усилия, развиваемого шнеком в результате прецессии. Первая составляющая характерна для шнекового, а вторая – для мундштучного прессования.

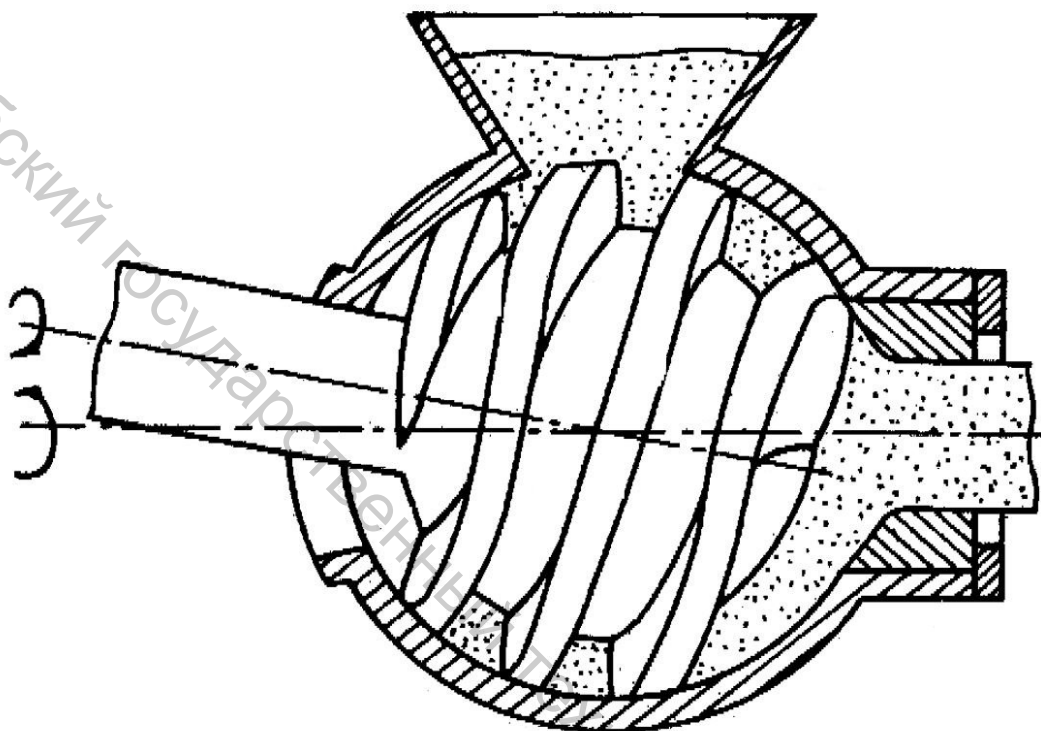


Рисунок 92 – Сферический шнек, совершающий прецессионное движение, позволяет совместить элементы мундштучного и шнекового формования

Такой способ позволяет избавиться от главной проблемы шнекового формования – срыва экструзии из-за проворота материала: пробка в матрице, если она возникнет, будет разрушена прецессионным вращением шнека. В результате получается прочная прессовка с высокой и равномерной плотностью.

При формовании порошков на шнековом прессе выделяется большое количество теплоты, которая без пользы уходит в окружающую среду. Из-за этого увеличивается энергоемкость процесса экструзии и себестоимость изделий. Высокая энергоемкость процесса формования – главный недостаток шнековых устройств. Однако иногда этот недостаток можно превратить в достоинство. Выделяющейся из-за трения теплоты может хватить для спекания прессовки непосредственно после ее формования. В этом случае из пресса выходит готовое изделие. Более того, тепловыделение на разных участках можно регулировать, вращая не только шнек, но и цилиндр, в котором он установлен.

Матрица устройства, реализующего этот способ формования, также может вращаться [282]. Схема реализации способа изображена на рисунке 93.

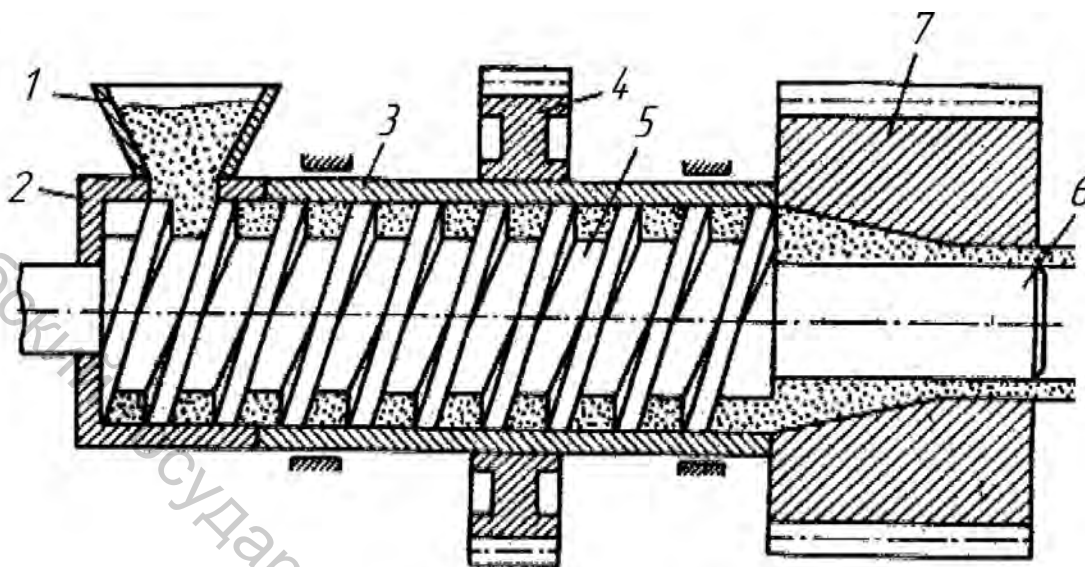


Рисунок 93 – Горячая экструзия порошков позволит совместить операции формования и спекания

Бункер 1 с порошком закреплен на неподвижной части 2 корпуса, соосно которой расположена его подвижная часть 3, получающая вращение через зубчатое колесо 4. Хвостовик шнека 5, на конце которого имеется калибрующая оправка 6, также соединен с приводом. На наружной поверхности матрицы 7 нарезаны зубья, через которые она получает вращение. Такая конструкция шнекового пресса позволяет гибко управлять тепловыделением, возникающим из-за трения материала о формующие поверхности инструмента. В результате температуру прессовки в калибрующей части матрицы доводят до температуры спекания порошка и на выходе пресса получают готовое изделие. Несмотря на высокую энергоемкость процесса, суммарные затраты энергии при разделении операций формования и спекания будут еще больше.

Подобную идею можно реализовать и при мундштучном прессовании. Если тепла выделяется очень много, его можно использовать для предварительного (или даже окончательного) спекания заготовки. Примером может служить устройство [283], схема которого изображена на рисунке 94.

Устройство состоит из основания 1, на котором закреплен корпус 2. Внутри корпуса расположена матрица 3 с термоизоляционным слоем 4, опирающаяся на упругую втулку 5. Матрица сопряжена с пуансоном 6, верхняя часть которого совмещена с бункером, в котором находится пластифицированный порошок 7. На крышке бункера имеется центрирующая оправка 8. На наружной поверхности пуансона нарезаны

зубья, зацепляющиеся с направляющим кольцом 9, установленном с возможностью вращения в корпусе, и зубчатым колесом 11, соединенным с двигателем 12 через муфту 13. На пуансоне установлен вибратор 14 и дополнительный груз 15.

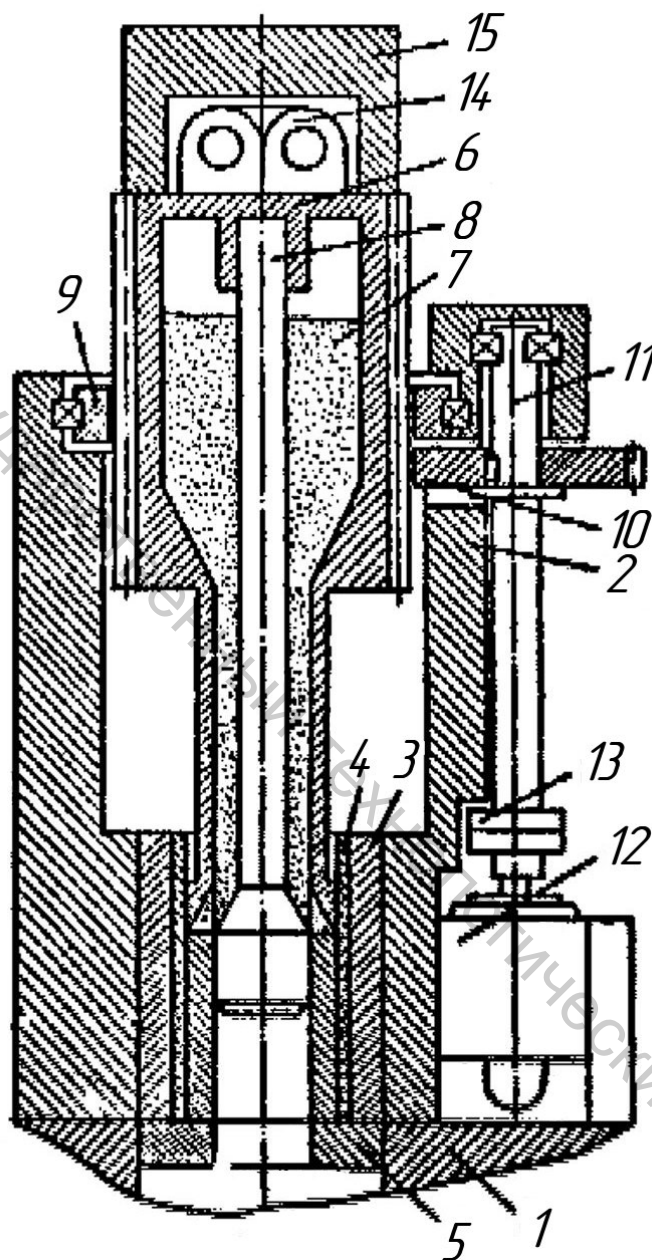


Рисунок 94 – Устройство, позволяющее совместить операции формования и спекания порошка

Пуансон этого устройства может вращаться и одновременно совершать колебательные движения, причем частота его колебаний связана с частотой вращения определенным соотношением. Теплота, необходимая для спекания материала, выделяется непосредственно в нем за счет сил трения, причем процесс жестко контролируется.

Совмещение операций прессования и спекания возможно и на

дисковых экструдерах, где в результате интенсивного трения порошка о вращающийся диск выделяется много тепла. Впервые это использовали японцы при производстве проволоки [284]. Температура материала в процессе прессования достигает 300–700 °С; этого достаточно для спекания некоторых порошков. На выходе изделие быстро охлаждают, и материал не успевает окислиться.

При совмещении операций формования и спекания время, необходимое для спекания, значительно сокращается. Процесс диффузии интенсифицируется высоким давлением и касательными напряжениями в материале, как при сварке трением. Время спекания и окисление порошка минимальны, к тому же зона спекания изолирована от окружающей среды и может быть насыщена газами-восстановителями, выделяющимися из органических наполнителей.

При реализации способа формования [285], сложное движение инструмента также приводит к дополнительному тепловыделению и спеканию порошка. Этот способ схематически изображен на рисунке 95.

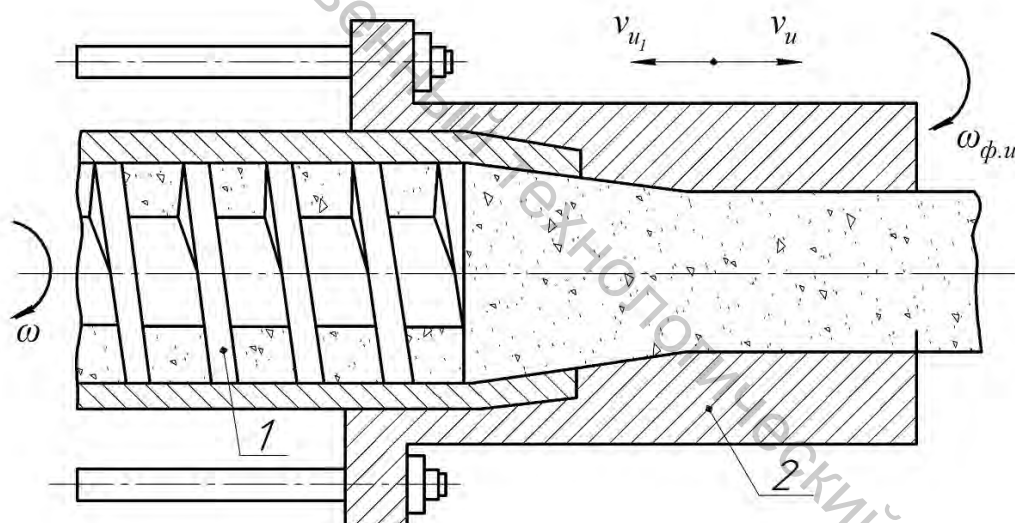


Рисунок 95 – Горячая экструзия порошковых изделий

Возможность регулировки температуры обеспечивается путем изменения режимов формования. Получено соотношение, которое, по замыслу авторов, поможет правильно рассчитать необходимую скорость движения инструмента.

Процесс экструзии может быть существенно активирован вибрацией. Иногда виброуплотнение используют как самостоятельный способ компактирования труднопрессуемых порошков, но чаще его применяют в сочетании с другими методами формования. Вибрация облегчает выдавливание среды и улучшает равномерность подачи материала из бункера. При использовании вибраторов на шнековых

устройствах экструзия становится стабильнее, количество срывов и аварийных остановок пресса уменьшается.

7.7 Модернизация формующего инструмента

Основные направления модернизации формующего инструмента – изменение геометрии матрицы и шнека, придание им дополнительного движения и использование различных насадок, расширяющих технические возможности шнековых экструдеров.

Большая проблема при формовании пластифицированных порошков шнеком связана с плохим уплотнением внутренних слоев изделий, что ограничивает максимальный их диаметр размером в 10–15 мм. Значительно увеличить усилие пресса и поперечный размер прессовок позволит использование гладких неподвижных [286] или вращающихся [287] наконечников к шнекам; однако наибольший эффект дает использование нарезных наконечников [288]. Прогрессивная схема формования профилей [289] изображена на рисунке 96.

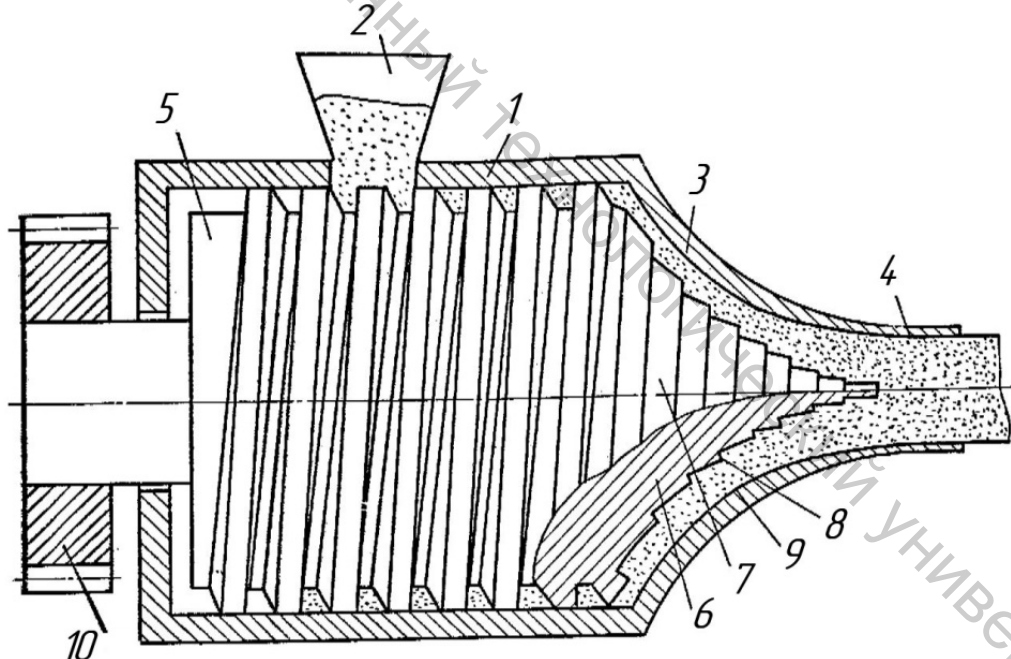


Рисунок 96 – Нарезной наконечник позволит увеличить усилие шнекового пресса и поперечный размер прессовок

На корпусе 1 пресса закреплены бункер 2 и матрица 3 с мундштуком 4. Шнек 5 снабжен наконечником 6 со спиральной нарезкой 7. Рабочая поверхность 8 нарезки расположена нормально образующей внутренней поверхности 9 матрицы. В процессе формования такой наконечник пропрессовывает изделие по всему

диаметру, что позволяет формировать сплошной профиль.

Эффективной насадкой к шнеку является специальный ротор-нож [290], разрезающий полуфабрикат на пластины перед экструзией (рис. 97).

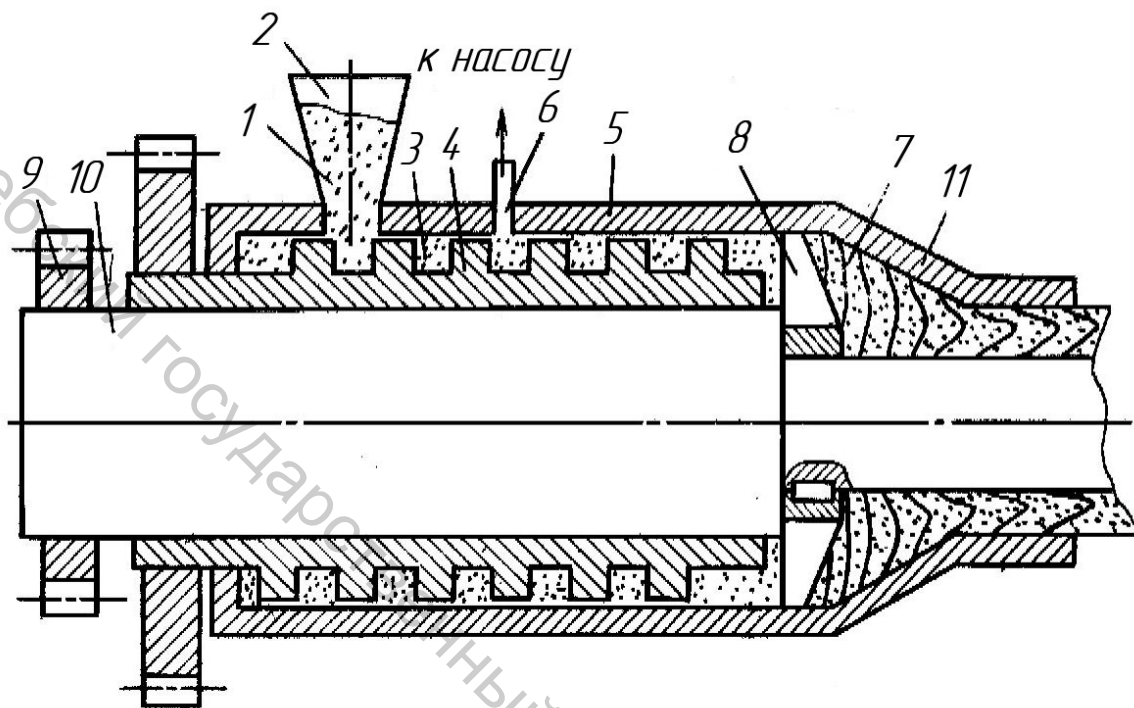


Рисунок 97 – Ротор-нож, установленный на выходе шнека

Последующая укладка этих пластин в матрице при их радиальном обжатии позволяет получать крупногабаритные изделия с повышенной плотностью и однородностью. Дополнительное вращение матрицы еще более расширяет технические возможности этого устройства [291].

Неожиданные эффекты могут быть получены изменением геометрии таких элементов шнекового пресса, как шнек, цилиндр, в котором он установлен, а также используемых при формировании дорнов и матриц. Так, наружная поверхность шнека может быть винтовой, а внутренняя поверхность цилиндра образована пересечением соосных ему пазов и точно сопряжена со шнеком. Такая геометрия обеспечивает увеличение усилия пресса без изменения длины шнека. Схематически это техническое решение [292] изображено на рисунке 98.

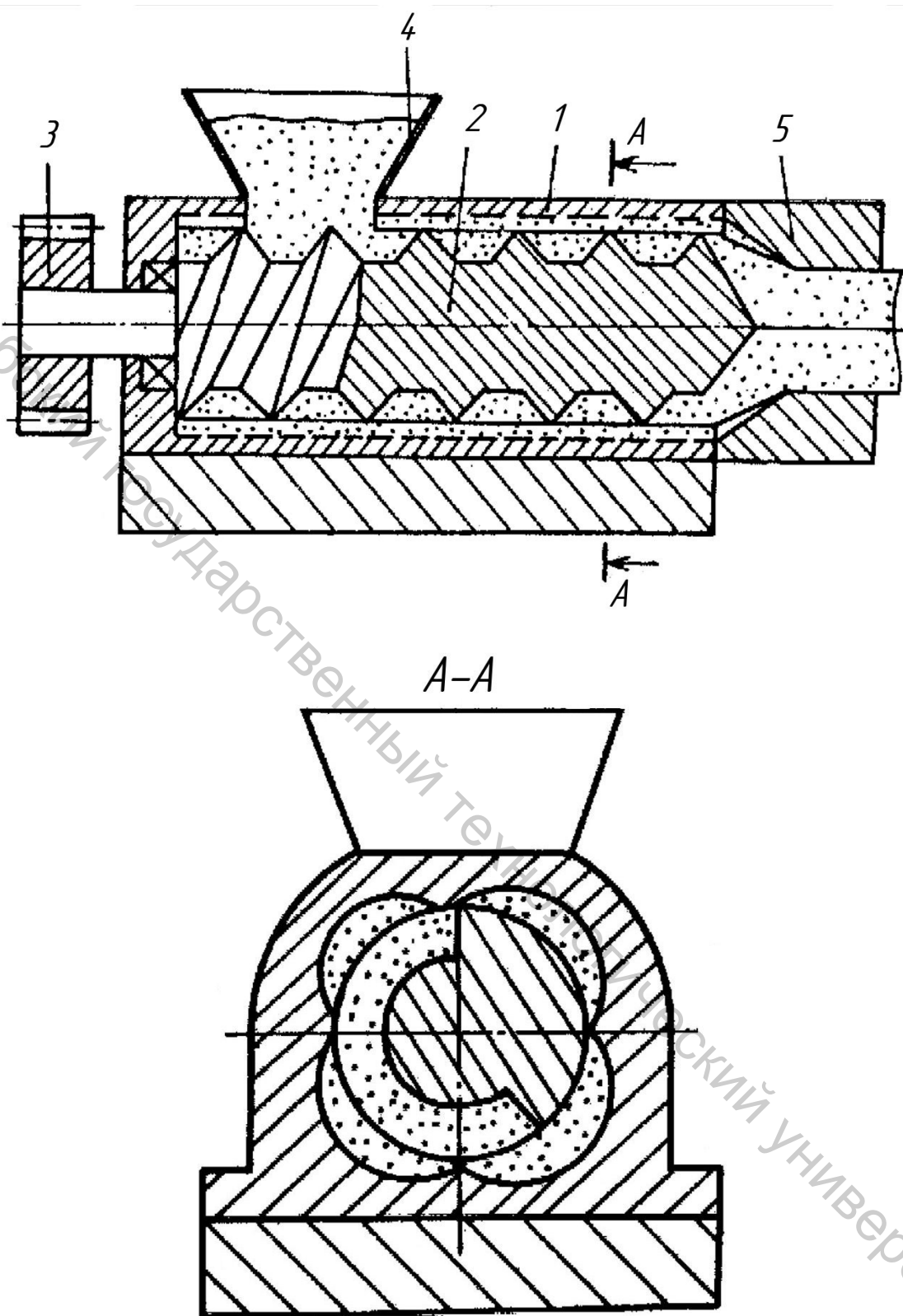


Рисунок 98 – Специальный рельеф на внутренней поверхности цилиндра позволяет увеличить эффективность шнекового формования

Сложный рельеф на внутренней поверхности цилиндра, в котором установлен шнек, позволяет также стабилизировать процесс экструзии и уменьшить вероятность проворота формируемого материала. Кроме того,

для подавления проворота материала цилиндр, в котором установлен шнек, можно изготовить с винтовой нарезкой противоположного шнеку направления. Воздействие нарезки компенсирует крутящий момент, передаваемый материалу от шнека [293]. Обычно при шнековом формовании вращается только шнек, а цилиндр и матрица неподвижны. Придав движение и этим элементам пресса, можно значительно расширить его возможности. Так, одновременное вращение дорна и матрицы в противоположных направлениях, согласованное определенным образом с вращением шнека [294], способно снизить энергоемкость процесса.

Более того, шнек можно сделать вообще неподвижным. В этом случае порошок перемещается по его каналу за счет колебаний корпуса, на внутренней поверхности которого имеется регулярный рельеф. Этот микрорельеф обеспечивает анизотропию трения материала о поверхность корпуса. При согласованной частоте продольных и крутильных колебаний возникает усилие, достаточное для экструзии пластифицированного порошка. Это техническое решение [295] поясняет рисунок 99.

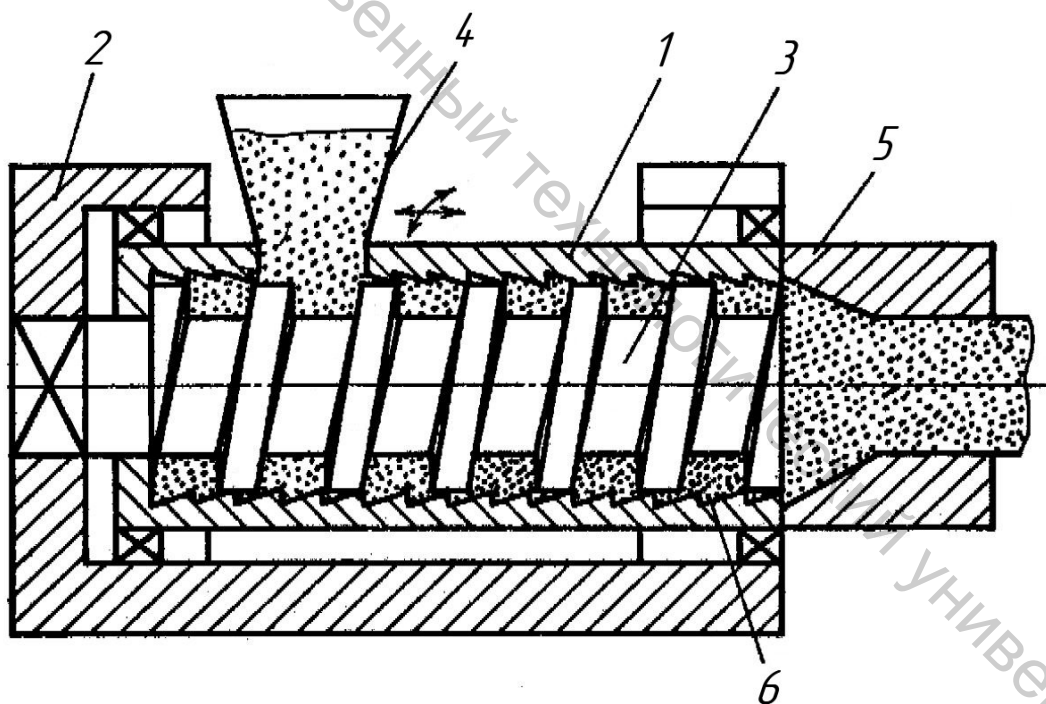


Рисунок 99 – Комбинация шнекового формования и виброуплотнения

Пресс состоит из корпуса 1, установленного на основании 2 с возможностью колебаний в различных направлениях. Внутри корпуса находится шнек 3, жестко закрепленный на основании пресса, а снаружи – бункер 4 с пластифицированным порошком. На торце корпуса расположена матрица 5. Внутренняя поверхность корпуса имеет регулярный микрорельеф 6, образованный винтовыми канавками

треугольного профиля. В процессе формования корпус совершает сложную вибрацию, состоящую из продольных и крутильных колебаний. Под воздействием этой вибрации порошок, опираясь на рельеф корпуса, перемещается по каналу шнека, уплотняется и продавливается через коническую матрицу. В этом устройстве нет привода, составляющего обычно более половины массы всего пресса. Эксперименты показали, что три магнитострикционных вибратора суммарной мощностью 2 кВт способны заменить электропривод мощностью 24 кВт.

Большое влияние на режим формования оказывает геометрия винтового канала шнека. Так, изменив наклон последнего витка и увеличив его глубину, можно улучшить однородность получаемых изделий [296] (рис. 100).

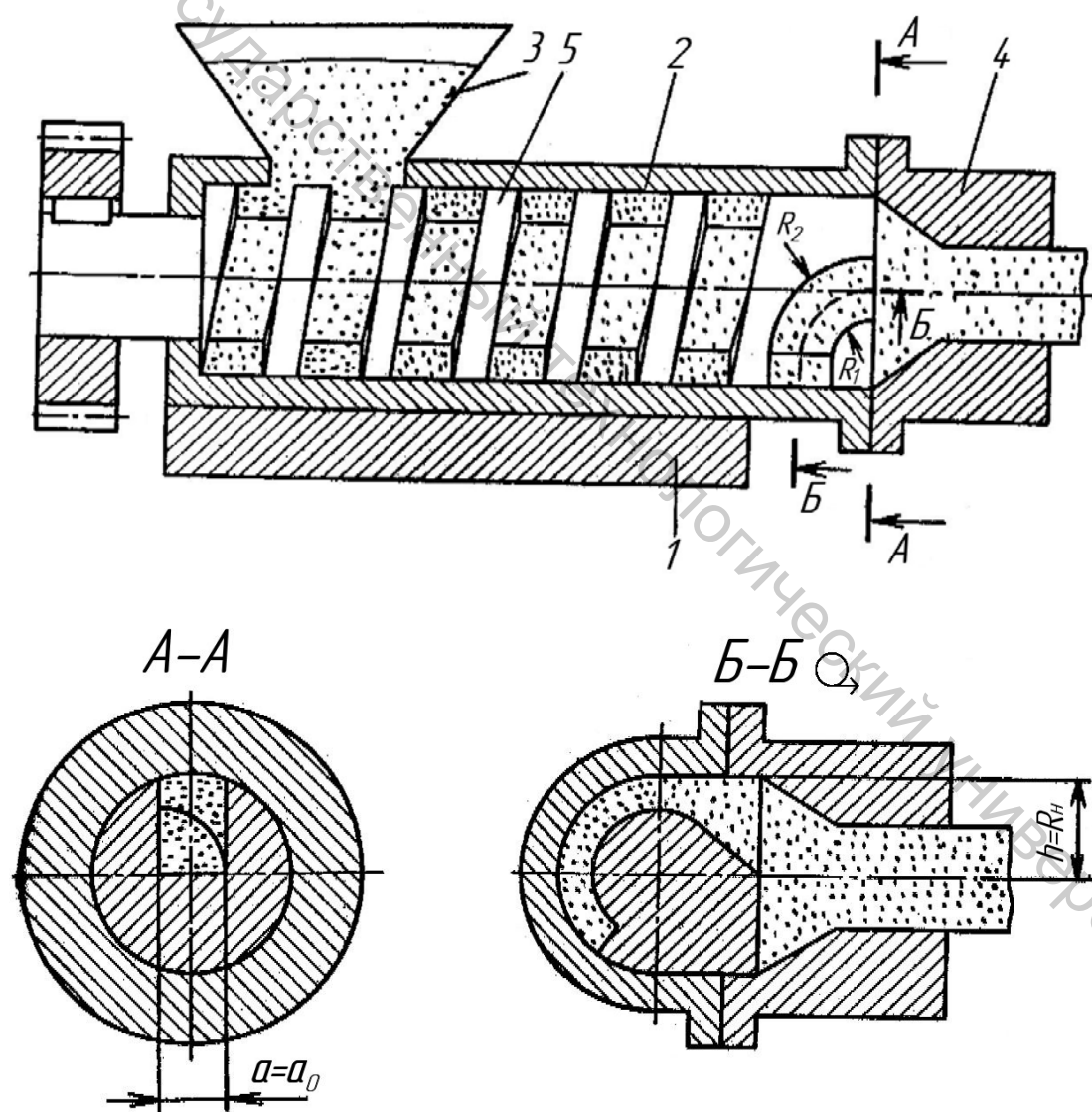


Рисунок 100 – Модификация последнего витка канала шнека позволит повысить качество прессовок

На последнем витке винтовой канал изгибается, ширина его остается неизменной, а глубина плавно увеличивается, достигая максимального значения на торце шнека. Шнек с таким каналом выдавливает пластифицированный порошок в матрицу с минимальными пульсациями давления, что положительно сказывается на качестве прессовок и равномерности процесса экструзии.

Модификация внутренней поверхности цилиндра, в котором установлен шнек, позволяет улучшить его загрузку, производительность и стабильность работы пресса. Это техническое решение [297] поясняет рисунок 101.

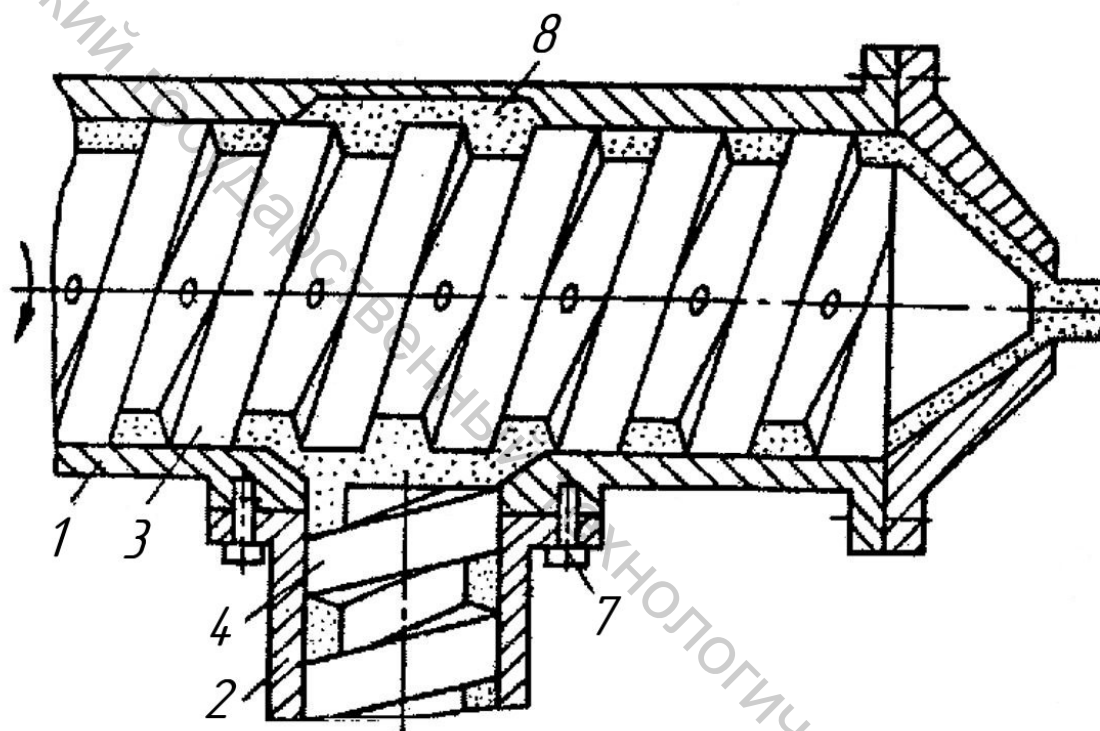


Рисунок 101 – Модификация цилиндра в зоне загрузки шнека позволит увеличить производительность и стабильность работы экструдера

При вращении подающего шнека 4 пластифицированный порошок попадает в зону загрузки прессующего шнека 3 и там заполняет специальную выемку, имеющуюся на внутренней поверхности цилиндра. Это обеспечивает загрузку канала прессующего шнека сразу по всей окружности, а не только со стороны подачи материала, как это имеет место при традиционной загрузке порошка из бункера. Полностью заполненный таким образом канал шнека гарантирует стабильную и высокопроизводительную работу пресса.

Увеличить производительность шнекового экструдера можно также за счет оптимизации формы канала шнека [298]; принципиальная схема такого устройства изображена на рисунке 102.

Шнек в этом случае имеет канал прямоугольного профиля,

причем геометрические параметры канала жестко связаны с другими размерами математическим соотношением.

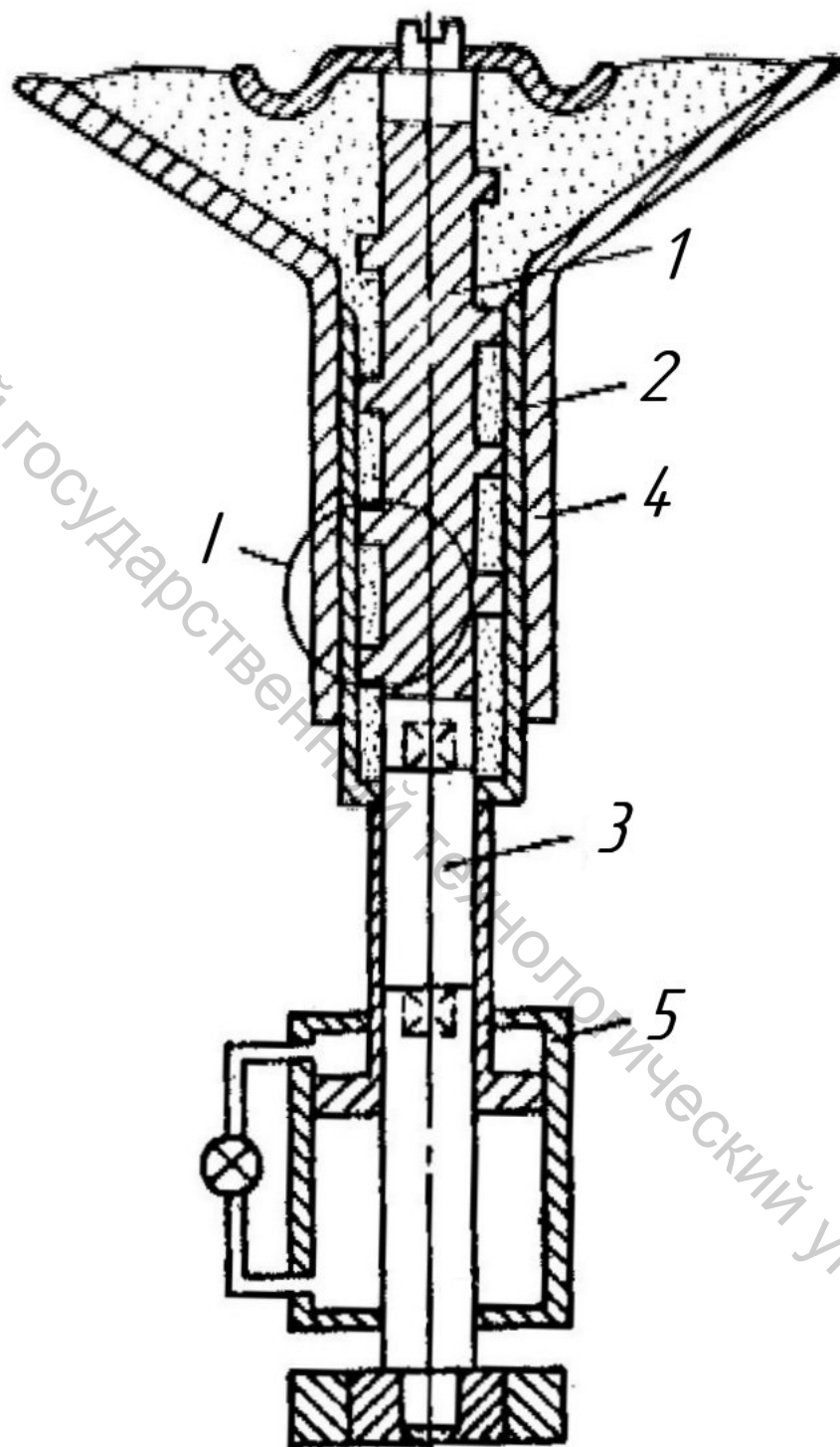


Рисунок 102 – Оптимизация профиля канала шнека позволит увеличить производительность процесса экструзии

Уменьшить износ шнека помогают продольные пазы определенной формы на гребне его нарезки. Это техническое решение [299] поясняет рисунок 103.

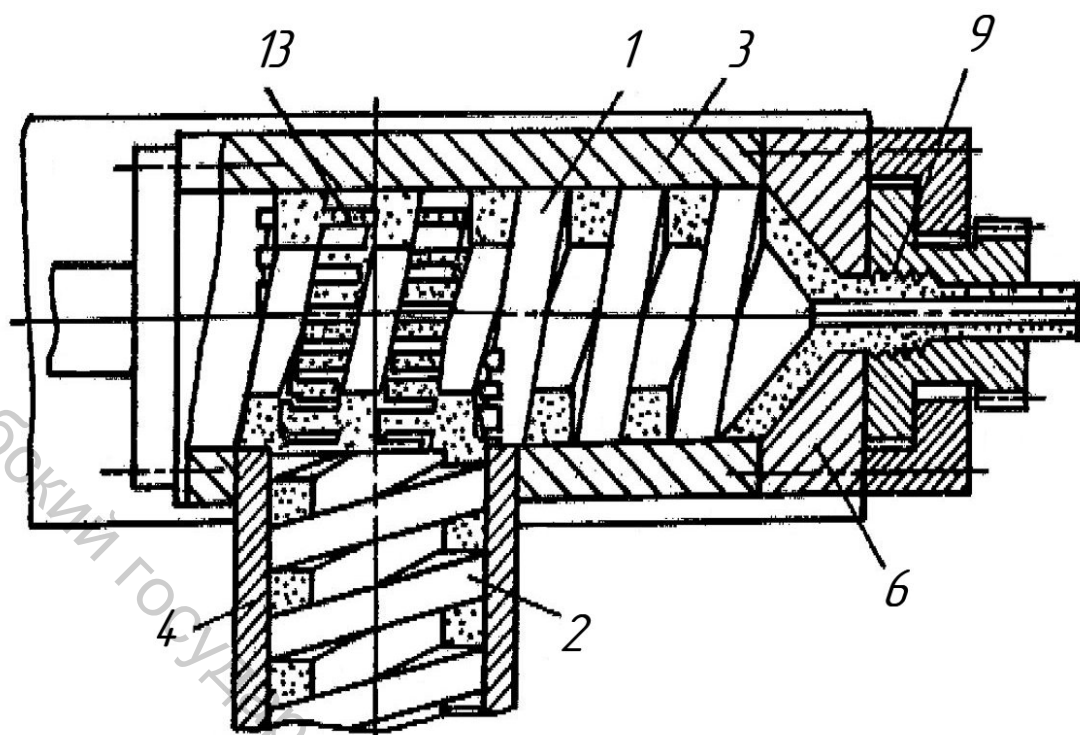


Рисунок 103 – Специальный рельеф на гребне винтовой нарезки позволит уменьшить износ шнека

Устройство содержит прессующий 1 и подающий 2 шнеки, установленные в цилиндрах 3 и 4, бункер 5, матрицу 6 с формующим мундштуком 7, а также калибрующий 8 и компенсирующий 9 мундштуки. Два последних элемента расположены во втулке 10, установленной на матрице с возможностью вращения; они закреплены на цилиндре прессующего шнека фланцем 11. Устройство установлено на основании 12. На гребне нарезки прессующего шнека в зоне его загрузки имеются продольные пазы 13. Такая конструкция шнекового пресса позволяет значительно увеличить долговечность наиболее изнашиваемых его деталей.

Дополнительно увеличить плотность изделий позволяет использование формующего инструмента со специальными выпукло-вогнутыми участками [300]. На этих участках возникает повышенное сопротивление движению материала, что увеличивает давление в зоне формования и плотность прессовки. Вогнутый участок предлагается размещать на матрице, а выпуклый – на специальной оправке, используемой для формования трубчатых изделий. Важна также правильная взаимная ориентация этих участков.

7.8 Автоматизация процесса экструзии

Большим достоинством процессов, основанных на экструзии пластичных сред, является легкость автоматизации этого высокопроизводительного метода формования. При создании автоматизированного производства особое внимание следует обратить на предотвращение т.н. срывов в работе шнекового пресса, при которых материал неожиданно проворачивается вместе со шнеком и экструзия останавливается.

Основной причиной срыва экструзии является возникновение внештатных ситуаций, приводящих к полной или частичной закупорке экструзионного инструмента (канала шнека или матрицы). Полная закупорка возникает обычно из-за попадания в материал инородных тел, для ее предотвращения достаточно аккуратности при проведении различных технологических операций. Частичная закупорка инструмента возникает по причине неоднородности формуемого материала и возникновения пробок в конической части матрицы. Тщательное соблюдение технологии при подготовке пластифицированного порошка к формованию способно устранить и эту проблему, но снизить вероятность возникновения такой ситуации можно и конструкторскими приемами.

Очень полезен непосредственный контроль за давлением в зоне формования. В устройстве [301] датчик давления установлен между шнеком и матрицей. Сигналы от датчика поступают в цепь автоматического управления, поддерживающую давление постоянным или изменяющимся по заданному закону. В результате появляется возможность не только стабилизировать процесс экструзии, но и изменять, в известных пределах, плотность формуемого изделия.

Решить задачу стабилизации давления в зоне формования отчасти можно более простым способом. В устройстве для экструзии пластифицированных порошков [302] использована подпружиненная матрица. Не жесткая установка этого ответственного формирующего элемента способна гасить случайные пульсации давления, возникающие из-за неоднородности материала. Надежность работы всего устройства при этом увеличивается, срыв экструзии наступает заметно реже. Особенно эффективно такое решение при формовании термопластичных сред, чувствительных к увеличению трения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экструзионное формование пластично-вязкой среды используют в пищевой и химической промышленности, в электротехнике, строительстве и металлургии. Перспективной областью для внедрения технологий, основанных на экструзии, является порошковая металлургия, где из пластифицированных порошков получают трубы с развитыми поверхностями, фильтрующие элементы и детали теплообменных устройств, разнообразные композиционные материалы, шнуры для напыления и наплавки. Экструзией наносят внутренние и наружные покрытия на трубы, а также формуют жесткие керамические и твердосплавные порошки, не способные образовать прессовку без связующей добавки.

Экструзия пластичных сред – высокопроизводительный ресурсосберегающий метод формования, хорошо поддающийся автоматизации. Пластификация порошка значительно улучшает технологические свойства среды и исключает пластическую деформацию частиц ее основной фазы, что позволяет сильно увеличить допустимую скорость экструзии. Ресурсосбережение связано с безотходностью производства и малым усилием прессования пластичных сред: современные грамотно спроектированные шнековые машины представляют собой весьма компактные устройства с низким энергопотреблением.

Дальнейшее развитие метода экструзионного формования прежде всего связано с совершенствованием процесса проектирования новых технологий и шнековых машин. Надо построить теорию процесса деформации или течения формуемой среды, исследовать ее физические свойства и получить математическую модель, связывающую технологические характеристики материала с энергосиловыми параметрами процесса экструзии и геометрией формирующего инструмента. Затем надо составить компьютерную программу, выполняющую необходимые конструкторские и технологические расчеты. На ее входе будут измеренные на предыдущем этапе технологические характеристики среды, а на выходе – основные силовые и геометрические параметры машины. Результаты расчетов передаются в систему автоматизированного проектирования, создающую по ним конструкторскую и технологическую документацию.

Настоящая работа посвящена решению задачи автоматизации проектирования устройств для шнековой экструзии неупругих пластично-вязких сред. Описаны теоретические и экспериментальные результаты всех этапов исследования, показана возможность их практического использования для создания новых техпроцессов и

оборудования.

Авторы выражают надежду, что их труд окажется полезным при решении более общих задач, учитывающих как упругие свойства формуемой среды, так и возможную нестационарность некоторых экструзионных процессов.

Витебский государственный технологический университет

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Володин, В. П. Экструзия профильных изделий из термопластов / В. П. Володин. – Санкт-Петербург: Профессия, 2005. – 480 с.

2 Ким, В. С. Теория и практика экструзии полимеров / В. С. Ким. – Москва: Химия, 2005. – 568 с.

3 Производство кабелей и проводов / Н. И. Белоруссов [и др.]. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 632 с.

4 Пятов, В. В. Теоретические и технологические основы холодной экструзии порошковых материалов / В. В. Пятов. – Витебск: УО «ВГТУ», 2002. – 237 с.

5 Шелег, В. К. Переработка гальваноотходов / В. К. Шелег, А. С. Ковчур, В. В. Пятов. – Витебск: УО «ВГТУ», 2004. – 185 с.

6 Термомеханический рециклинг композиции из отходов подошвенных пенополиуретанов шнековой экструзией / К. С. Матвеев, В. В. Пятов // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: материалы VIII научно-тех. конф. – Гродно: ГрГУ, 2010. – С. 304–309.

7 Экструдер для термомеханического рециклинга отходов интегральных полиуретанов : пат. 5320 С08 ВУ, МПК С 08G 18/00 / К. С. Матвеев, А. К. Новиков, В. В. Пятов, С. В. Бровко, А. К. Матвеев, А. Н. Голубев. – 2009.

8 Шнековый экструдер для переработки полимерсодержащих отходов : пат. ВУ 5953, МПК В 29С 47/00, С 08G 18/00 / А. К. Новиков, К. С. Матвеев, В. В. Пятов, А. Н. Голубев, С. В. Бровко, Т. С. Куксенюк. – 2010.

9 Экспериментальный экструдер для переработки полимерных отходов : пат. ВУ 6093, МПК В 29С 47/92 / А. К. Новиков, К. С. Матвеев, С. В. Бровко, В. В. Пятов, А. Н. Голубев, А. К. Матвеев. – 2010.

10 Способ переработки отходов жестких полиуретанов : пат. ВУ 16053, МПК С 08G 18/00, С 08G 71/00 / К. С. Матвеев, В. В. Пятов, А. К. Новиков, Е. А. Егорова, Г. Н. Солтовец, А. К. Матвеев. – 2012.

11 Разработка и исследование процесса получения длинномерных спеченных труб: отчет о НИР / С. С. Клименков [и др.]. – Витебск: ВТИЛП, 1984. – 319 с. – № ГР 01.83.0031788.

12 Разработка и внедрение на предприятиях легкой и приборостроительной промышленности новых технологий улавливания пыли и аэрозолей, очистки промышленных сточных вод от ионов тяжелых и цветных металлов: отчет о НИР / С. Г. Ковчур [и др.]. – Витебск: ВТИЛП, 1995. – 102 с. – № ГР 1994519.

13 Разработка технологии получения металлических порошков для

восстановления деталей машин: отчет о НИР / С. С. Клименков [и др.]. – Витебск: ВТИЛП, 1995. – 301 с. – № ГР 1995793.

14 Разработка технологии и изготовление установки для переработки отходов обувного производства: отчет о НИР / В. В. Пятов [и др.]. – Витебск: ВГТУ, 1997. – 40 с. – № ГР 1997379.

15 Разработка технологии формования порошкового шнура для плазменной наплавки: отчет о НИР / В. В. Пятов [и др.]. – Витебск: ВГТУ, 1997. – 20 с. – № ГР 1997803.

16 Разработка и изготовление опытного образца экструдера для переработки отходов обувного производства: отчет о НИР / В. В. Пятов [и др.]. – Витебск: ВГТУ, 1997. – 119 с. – № ГР 19971228.

17 Разработать и внедрить экологобезопасные технологии комплексной утилизации жидких и шламовых металлосодержащих промышленных отходов предприятий Витебской области: отчет о НИР / С. Г. Ковчур [и др.]. – Витебск: ВГТУ, 1998. – 323 с. – № ГР 19971236.

18 Создать технологию и оборудование для производства сварочных электродов в защитной оболочке: отчет о НИР / С. С. Клименков [и др.]. – Витебск: ВГТУ, 1998. – 313 с. – № ГР 19971233.

19 Исследование процесса непрерывного формования многокомпонентных пластифицированных порошковых композиций для изготовления гибкого порошкового шнура, используемого для газотермического нанесения покрытий: отчет о НИР / В. В. Пятов, О. Н. Ахтанин. – Витебск: ВГТУ, 1998. – 52 с. – № ГР 1998833.

20 Разработка технологии получения профилактики для обуви из отходов полиуретана методом экструзии: отчет о НИР / Д. Р. Амирханов [и др.]. – Витебск: ВГТУ, 1998. – 70 с. – № ГР 1998831.

21 Разработка и исследование саморегенерирующейся установки для обеспыливания воздуха на предприятиях легкой промышленности: отчет о НИР / С. С. Клименков [и др.]. – Витебск: ВГТУ, 1998. – 170 с. – № ГР 19961287.

22 Разработать методику определения триботехнических свойств нестандартных порошков цветных металлов, полученных из производственных отходов: отчет о НИР / С. Г. Ковчур [и др.]. – Витебск: ВГТУ, 1999. – 48 с. – № ГР 19991312.

23 Исследование процесса рециклинга полиуретана и стелечного картона, разработка оборудования для получения термопластичных композиций: отчет о НИР / В. В. Пятов [и др.]. – Витебск: ВГТУ, 1999. – 68 с. – № ГР 19982465

24 Разработка организационно-технических мероприятий для создания региональной системы очистки гальваносток, обезвреживания и утилизации шламов: отчет о НИР / С. Г. Ковчур, В. В. Пятов, А. П. Платонов. – Витебск: ВГТУ, 1999. – 76 с. – № ГР 19982125.

25 Разработка и исследование процессов изготовления композиционных материалов и изделий на основе сырьевых запасов

Республики Беларусь и отходов производства: отчет о НИР / С. С. Клименков [и др.]. – Витебск: ВГТУ, 1999. – 136 с. – № ГР 1999285.

26 Разработать и освоить технологию изготовления медных контактодержателей, облицовочных пластин электроконтактов и электродов для контактной сварки из отходов гальванического производства: отчет о НИР / С. Г. Ковчур [и др.]. – Витебск: ВГТУ, 2000. – 73 с. – № ГР 19992069.

27 Разработать методику и изготовить прибор для комплексного исследования технологических свойств порошковых материалов: отчет о НИР / С. Г. Ковчур, В. В. Пятов. – Витебск: УО «ВГТУ», 2001. – 93 с. – № ГР 2001528.

28 Разработать научные и технологические основы экструзии высокопластифицированных порошковых композиций: математическая модель экструзии пластифицированных порошковых материалов: отчет о НИР / В. В. Пятов [и др.]. – Витебск: УО «ВГТУ», 2001. – 99 с. – № ГР 2001394.

29 Разработать научные и технологические основы экструзии высокопластифицированных порошковых композиций: теория и технология мундштучного формования пластифицированных порошков: отчет о НИР / В. В. Пятов [и др.]. – Витебск: УО «ВГТУ», 2002. – 80 с. – № ГР 2001394.

30 Разработать научные и технологические основы экструзии высокопластифицированных порошковых композиций: теория и технология шнекового формования пластифицированных порошков: отчет о НИР / В. В. Пятов [и др.]. – Витебск: УО «ВГТУ», 2003. – 138 с. – № ГР 2001394.

31 Разработать научные и технологические основы экструзии высокопластифицированных порошковых композиций: разработать технологию изготовления порошковых шнуров для газотермического нанесения покрытий: отчет о НИР / В. В. Пятов [и др.]. – Витебск: УО «ВГТУ», 2004. – 54 с. – № ГР 2001394.

32 Разработать научные и технологические основы экструзии высокопластифицированных порошковых композиций: разработать технологию изготовления изделий электротехнического назначения из труднопрессуемых порошков, извлеченных из отходов производства: отчет о НИР / В. В. Пятов [и др.]. – Витебск: УО «ВГТУ», 2005. – 60 с. – № ГР 2001394.

33 Разработка технологии и оборудования для переработки полимерсодержащих отходов обувной промышленности: отчет о НИР / В. В. Пятов [и др.]. – Витебск: УО «ВГТУ», 2007. – 58 с. – № ГР 2007858.

34 Внедрение технологии и оборудования для переработки полимерсодержащих отходов обувной промышленности: отчет о НИР / В. В. Пятов [и др.]. – Витебск: УО «ВГТУ», 2008. – 47 с. – № ГР

20082895.

35 Исследование степени диспергирования полимерсодержащих отходов упаковки при рециклинге на шнековом оборудовании: отчет о НИР / В. В. Пятов [и др.]. – Витебск: УО «ВГТУ», 2008. – 60 с. – № ГР 20081260.

36 Разработать, исследовать и внедрить на ООО «Дубль-МК» технологию получения композиционного армированного стелечного материала с использованием отходов интегральных пенополиуретанов: отчет о НИР / В. В. Пятов [и др.]. – Витебск: УО «ВГТУ», 2008. – 67 с. – № ГР 20081928.

37 Разработка и внедрение технологии получения композиционного стелечного материала: отчет о НИР / В. В. Пятов [и др.]. – Витебск, 2010. – 42 с. – № ГР 431.

38 Разработка технологии получения подошвенного материала из отходов производства: отчет о НИР / В. В. Пятов [и др.]. – Витебск, 2010. – 47 с. – № ГР 379.

39 Исследование процесса получения композиционных материалов из отходов производства и разработка оборудования для формования подошвенных материалов: отчет о НИР / В. В. Пятов [и др.]. – Витебск, 2011. – 60 с. – № ГР 05-63/01-10.

40 Исследование старения композиционных материалов из отходов, при воздействии деструктирующих факторов в процессе эксплуатации: отчет о НИР / В. В. Пятов [и др.]. – Витебск, 2012. – 71 с. – № ГР 20121174.

41 Разработать теоретические и технологические основы экструзии многофункциональных композиционных материалов: отчет о НИР / В. В. Пятов, А. Н. Голубев, П. С. Ширяев. – Витебск, 2017. – 77 с. – № ГР 20163071.

42 Иванченко, А. И. Расчет одночервячных прессов / А. И. Иванченко. – Киев, 1962. – 120 с.

43 Каплун, Я. Б. Формующее оборудование экструдеров / Я. Б. Каплун. – Москва, 1969.

44 Лукинов, М. И. Производство керамических дренажных труб / М. И. Лукинов. – Москва: Стройиздат, 1981. – 216 с.

45 Производство керамических канализационных труб / Р. М. Зайонц [и др.]. – М.: Стройиздат, 1971.

46 Кашкаев, И. С. Производство глиняного кирпича / И. С. Кашкаев, Е. Ш. Шейман. – Москва: Высшая школа, 1978.

47 Ничипоренко, С. П. О формировании керамических масс в ленточных прессах / С. П. Ничипоренко. – Киев: Наук. думка, 1971. – 75 с.

48 Плющ, Г. В. Исследование закономерностей мундштучного прессования металлокерамических твердых сплавов: дис... к.т.н. / Г. В. Плющ. – Киев, 1970.

49 Самсонов, Г. В. Тугоплавкие соединения / Г. В. Самсонов [и др.]. – Москва: Металлургия, 1976. – 558 с.

50 Клименков, С. С. Теория и технология экструдирования реологических порошковых композиций методом шнекового прессования, создание оборудования и внедрение в народное хозяйство: дис... д.т.н. / С. С. Клименков. – Минск, 1991. – 436 с.

51 Бальшин, М. Ю. Порошковая металлургия / М. Ю. Бальшин. – Москва, 1938. – 288 с.

52 Каспаров, А. М. Советские твердые и сверхтвердые сплавы и способы их применения / А. М. Каспаров. – Москва, 1932. – 120 с.

53 Брохин, И. С. Формование порошков твердосплавных смесей методом выдавливания / И. С. Брохин // В кн.: Твердые сплавы. – Москва, 1959. – С. 100–101.

54 Злобин, Г. П. Формование изделий из порошков твердых сплавов / Г. П. Злобин. – Москва: Металлургия, 1980. – 224 с.

55 Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения / И. М. Федорченко. – Киев: Наук. думка, 1985. – 624 с.

56 Макаров, Б. В. Пластификация ферритовых порошков / Б. В. Макаров // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1979. – № 11. – С. 6–9.

57 Гарднер, Н. Р. Экструзия металлокерамических порошков / Н. Р. Гарднер // Новое в порошковой металлургии. – Москва: Металлургия, 1970.

58 Живов, Л. И. Экструзия титановых сварочных электродов / Л. И. Живов // Цветные металлы. – Москва: Металлургия, 1968. – № 2. – С. 84–85.

59 Swartzwelder, J. H. Extrusion of aluminum powder compacts / J. H. Swartzwelder // Int. J. Powder Metallurgy, 1967. – v. 3. – № 3. – p. 53–57.

60 Sheppard T. and Greasley. Densification and pressure requirements during extrusion of atomized aluminum powder // Powder Metallurgy. – 1972. – v. 15. – № 29. – p. 17.

61 Sheppard T. and Greasley. Structure and properties of some tin bronzes produced by extrusion of atomized powder // Powder Metallurgy. – 1978. – v. 21. – № 3. – p. 155.

62 Андриевский, Р. А. Фильтры и пористые изделия / Р. А. Андриевский. – Москва, 1963.

63 Share P. and Sheppard T. Powder Extrusion as a Primary Fabricating Process for Al-Fe Alloys // Powder Metallurgy. – 1973. – v. 16. – № 32. – p. 437.

64 Shaker, H. D. Cold extrusion of powder material. Material flow and workpiece properties. “Proceeding 18th International Machine Tool Design and Research Conference”. – London, September. – 1977. – p. 233.

65 Косторнов, А. Г. Реологические исследования

пластифицированной порошковой шихты / А. Г. Косторнов, А. И. Райченко // Порошковая металлургия. – 1966. – № 5. – С. 21–22.

66 Райченко, А. И. Реологические исследования пластифицированной порошковой шихты / А. И. Райченко, А. Г. Косторнов // Порошковая металлургия. – 1966. – № 6. – С. 11–12.

67 Косторнов, А. Г. Реологические исследования пластифицированной порошковой шихты / А. Г. Косторнов, А. И. Райченко // Порошковая металлургия. – Киев : Наук. думка, 1966. – № 12. – С. 10–11.

68 Уилкинсон, У. Неньютоновские жидкости / У. Уилкинсон. – Москва: Мир, 1964. – 216 с.

69 Рейнер, М. Деформация и поток / М. Рейнер. – Москва: ИЛ, 1964.

70 Берихардт, Э. Переработка термопластичных материалов / Э. Берихардт. – Москва: Госхимиздат, 1962. – 747 с.

71 Виноградов, Г. В. Реология полимеров / Г. В. Виноградов. – Москва: Химия, 1977. – 438 с.

72 Виноградов, Г. В. Вязкостные свойства эластомера на примере дивинил-стерильного каучука / Г. В. Виноградов // «Коллоидный журнал», 1968.

73 Каргин, В. А. Краткие очерки по физико-химии полимеров / В. А. Каргин, Г. Л. Слонимский. – Москва: Химия, 1967. – 231 с.

74 Косторнов, А. Г. Свойства пластифицированной порошковой смеси и закономерности ее экструзии / А. Г. Косторнов, А. И. Райченко // В кн.: Порошковая металлургия. – Мн.: Выш. школа, 1996. – С. 96–104.

75 Друянов, Б. А. Вязкопластическое течение сжимаемого порошкового материала / Б. Я. Друянов // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1984. – № 8. – С. 24–27.

76 Гун, Г. Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением / Г. Я. Гун. – Москва: Металлургия, 1983. – 352 с.

77 Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – Москва: Металлургия, 1986. – 688 с.

78 Айзенкольб, Ф. Порошковая металлургия / Ф. Айзенкольб. – Москва, 1959.

79 Федорченко, И. М. Основы порошковой металлургии / И. М. Федорченко. – Киев, 1963.

80 Раковский, В. С. Основы порошкового металловедения / В. С. Раковский. – Москва, 1962.

81 Дорофеев, Ю. Г. Уравнения уплотнения пористых материалов / Ю. Г. Дорофеев // В кн.: Использование метода динамической металлокерамики в стружковой и порошковой металлургии. – Ростов, 1966. – С. 21–25.

82 Жданович, Г. М. Теория прессования металлических порошков

/ Г. М. Жданович. – Москва: Металлургия, 1969. – 264 с.

83 Бальшин, М. Ю. Об определении контактного сечения и некоторых механических свойств пористых, порошковых и волокнистых материалов / М. Ю. Бальшин // Порошковая металлургия в новой технике. – М.: Наука, 1968. – С. 51–55.

84 Пятов, В. В. Разработка процесса непрерывного формования пористых изделий сложного профиля экструзией порошков на шнековом прессе: дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.06 / В. В. Пятов. – Мн., 1988. – 187 с.

85 Груздев, И. Э. Теория шнековых устройств / И. Э. Груздев [и др.]. – Л., 1978. – 144 с.

86 Багаугдинов, И. И. Применение шнеков в мясной промышленности / И. И. Багаугдинов. – Москва, 1971.

87 Шляхтер, Г. Н. Исследование двухстадийного пресса: дис... к.т.н. / Г. Н. Шляхтер. – Москва, 1970.

88 Исследование особенностей процесса формования ППМ на вакуумном червячном прессе / Б. Д. Сторож, П. С. Кислый // В кн.: Развитие методов формования изделий из порошков. – Киев, 1976. – С. 142–151.

89 Акимов, М. И. О движении тяжелой точки по винтовой линии на шероховатой поверхности / М. И. Акимов // Записки горного института. – Ленинград, 1936. – Т. 10. – С. 1–21.

90 Алтынбеков, Ф. Е. Исследование процесса транспортирования сыпучих грузов быстроходным шнеком: дис. к.т.н. / Ф. Е. Алтынбеков. – Л., 1968. – 116 с.

91 Григорьев, А. М. Винтовые конвейеры / А. М. Григорьев. – М., 1972. – 184 с.

92 Рыбаков, И. Я. Теория и расчет вертикальных шнеков / И. Я. Рыбаков // Торфяная промышленность. – 1951. – № 8.

93 Прессы пищевых и кормовых производств / под ред. А. Я. Соколова. – М.: Машиностроение, 1973. – 288 с.

94 Салазкин, К. А. Таблеточные машины / К. А. Салазкин. – Москва: Машиностроение, 1966.

95 Расчет усилия червячного пресса для формования изделий из пластифицированных порошковых масс / Б. Д. Сторож, П. С. Кислый // В кн.: Развитие методов формования изделий из порошков. – Киев, 1976.

96 Бернхард, Т. Э. Переработка термопластичных материалов / Т. Э. Бернхард. – Москва: Химия, 1965. – 747 с.

97 Дорофеев, Ю. Г. Динамическое горячее прессование пористых материалов / Ю. Г. Дорофеев. – Москва: Наука, 1968. – 120 с.

98 Дорофеев, Ю. Г. Динамическое горячее прессование пористых порошковых заготовок / Ю. Г. Дорофеев. – Москва: Металлургия, 1977. – 216 с.

99 Ковальченко, М. С. Теоретические основы горячей обработки пористых материалов давлением / М. С. Ковальченко. – Киев: Наукова думка, 1980. – 238 с.

100 Дорофеев, В. Ю., Лозовой, В. И. Некоторые особенности уплотнения порошкового материала при горячей штамповке с элементами экструзии / В. Ю. Дорофеев, В. И. Лозовой // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1985. – № 3. – С. 11–14.

101 Уплотнение материалов в жестких матрицах / Г. Л. Петросян [и др.] // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1982. – № 5. – С. 22–27.

102 Исследование процесса выдавливания спеченного пористого материала через коническую матрицу / Г. Л. Петросян [и др.] // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1985. – № 3. – С. 19–23.

103 Исследование напряженно-деформированного состояния осесимметричной осадки пористых материалов методом конечных элементов / Г. Л. Петросян [и др.]. – Изв. АН АрмССР, 1980. – № 1 (33). – С. 65–76.

104 Петросян, Г. Л. Формование пористых труб и стержней / Г. Л. Петросян // Докл. АН АрмССР, 1977. – № 3 (14). – С. 176–181.

105 Петросян, Г. Л. О теории пластичности пористых тел / Г. Л. Петросян // Изв. вузов. Машиностроение, 1977. – № 5. – С. 10–13.

106 Скороход, В. В. Условие пластичности пористых тел / В. В. Скороход, Л. И. Тучинский // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1978. – № 11. – С. 83–87.

107 Осадчий, В. А. Расчет процесса экструзии порошковой заготовки через коническую матрицу / Осадчий В. А. – Известия вузов. – 1985. – № 11. – С. 81–84.

108 Райченко, А. И. К вопросу об экструзии пластично-вязкой порошковой смеси / А. И. Райченко // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1967. – № 9. – С. 6–9.

109 Райченко, А. И. Задачи, связанные с непрерывным прессованием труб из порошков / А. И. Райченко // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1964. – № 6. – С. 17–21.

110 Райченко, А. И. Задачи, связанные с выдавливанием труб из вязко-пластичной шихты / А. И. Райченко // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1965. – № 8. – С. 23–34.

111 Hadfield, D. Injection molding for near-net-shape PM components / D. Hadfield // Metals and Mater. – 1985. – 1. – № 10. – p. 609–612.

112 Kaczmar, J. Injection molding of metal powders-present state and development perspectives / Kaczmar Jacek // Crundlag., Herstell und Eigenschaft pulverment. Werkst. 8 Int. powermet. Tag., Dresden, 24–26 Sept. 1985. Bd 1: Hauptvortrag. paster – Kurrfess. – s. 1., a., 75.

113 Прессование тугоплавких соединений в вакуумной шнек-машине / П. С. Кислый [и др.]. // В кн.: Теория и практика прессования

порошков. – Киев: изд-во АН УССР, 1975.

114 Попильский, Р. Я. Прессование порошковых керамических масс / Р. Я. Попильский, Ю. Е. Пивинский. – Москва: Металлургия, 1983. – 176 с.

115 Кудря, Н. А. Исследование и экспериментальная проверка пластификатора для производства твердых сплавов / Н. А. Кудря // Научные труды Всесоюзного НИИ тугоплавких металлов и твердых сплавов. – Москва, 1977. – № 17. – С. 53–61.

116 Kotovich, C. S. Technical report AFML-TR-69-101 / C. S. Kotovich. – Ohio, June 1969.

117 Moyer, K. H. Modern developments in Powder metallurgy / K. H. Moyer // Vol. 5, Plenum press. – New York, 1971. – P. 85.

118 Кислый, П. С. Высокотемпературные неметаллические нагреватели / П. С. Кислый, А. Х. Бадян, В. С. Киндышева. – Киев: Наук. думка, 1981. – 160 с.

119 Корниенко, П. А. Механические свойства пластификаторов / П. А. Корниенко, В. С. Пугин // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1969. – № 1. – С. 34–36.

120 Корниенко, П. А. Исследование влияния синтетического пластификатора на свойства пористых металлокерамических материалов / П. А. Корниенко, В. С. Пугин // В кн.: Порошковая металлургия. Сб. докл. – Минск, 1966. – С. 207–214.

121 Плющ, Г. В. Применение поверхностно-активных веществ в процессе мундштучного прессования твердых сплавов / Г. В. Плющ, А. И. Слезко // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1970. – № 2. – С. 11–12.

122 Грибовский, П. О. Горячее литье керамических изделий / П. О. Грибовский. – Москва: Госэнергоиздат, 1961. – 400 с.

123 Кислый, П. С. Основы процесса мундштучного прессования труб и стержней из порошков тугоплавких соединений / П. С. Кислый, Г. В. Самсонов // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1962. – № 3. – С. 31–48.

124 Либенсон, Г. А. Производство спеченных изделий / Г. А. Либенсон. – Москва: Металлургия, 1982. – 256 с.

125 Булычев, В. П. Роль пластификатора при мундштучном прессовании заготовок из карбида циркония / В. П. Булычев // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1982. – С. 21–27.

126 Худокормов, Д. Н. Влияние способа введения пластификатора в дисперсные порошки на их свойства / Д. Н. Худокормов, Л. Ф. Керженцева, В. М. Шелехина // В кн.: Порошковая металлургия. – 1980. – Вып. 4.

127 Пористые порошковые материалы и изделия из них / П. А. Витязь, В. М. Капцевич, В. К. Шелег. – Минск : Выш. шк., 1987. – 164 с.

128 Степаненко, А. В. Непрерывное формование труб из

металлических порошков / А. В. Степаненко // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1983. – № 11. – С. 12–17.

129 Способ формования трубных заготовок из порошков: а. с. СССР 664751 / В. П. Северденко, А. В. Степаненко, Л. А. Исаевич. – БИ. – 1979. – № 20.

130 Устройство для непрерывного формования труб из порошка: а. с. СССР 952439 / А. В. Степаненко, Л. А. Исаевич. – БИ. – 1982. – № 31.

131 Wassink, R. J. Klein. Continuous hot pressing of reactive materials / Wassink R. J. Klein. // High Temp. – High Pressure, 1971, 3. – № 4. – p. 411-418.

132 Okimoto, K. Соединение под давлением прессовок из металлических порошков. / Okimoto Kunio // J. Jap. Soc. Technol. Plast., 1977, 18. – № 195. – p. 319–324.

133 Дмитриев, Л. М. Устройства для переработки пластических масс литьем под давлением : обзор зарубежных патентов / Л. М. Дмитриев. – Москва : ЦНИИПИТЭИ, 1964.

134 Герман, Х. Шнековые машины в технологии / Х. Герман. – Ленинград : Химия, 1975. – 230 с.

135 Ильинский, Д. Я. Расчет и конструирование червячных машин для легкой промышленности / Д. Я. Ильинский. – Москва : Легкая индустрия, 1965. – 51 с.

136 Королев, К. М. Исследование ленточных шнековых прессов пластического формования керамических изделий / К. М. Королев. – Москва : ЦИНТИМ, 1960. – 210 с.

137 Производство электрических кабелей и проводов с резиновой и пластмассовой изоляцией / И. Д. Троицкий [и др.]. – Москва : Высш. шк., 1972. – 400 с.

138 Шенкель, Г. Шнековые прессы для пластмасс / Г. Шенкель. – Москва : Мир, 1965. – 293 с.

139 Бокшицкий, М. Н. Формующий инструмент экструзионных машин / М. Н. Бокшицкий, Ф. Г. Гурфинкель. – Москва : ЦНИИПИ, 1965. – 34 с.

140 Сторож, Б. Д. Формование многослойных изделий из материалов на основе тугоплавких соединений на вакуумном прессе / Б. Д. Сторож, Б. Л. Грабчук, О. В. Заверуха // Сб. ст. – Киев: Наук. думка, 1976. – С. 151–155.

141 Сторож, Б. Д. Исследование особенностей процесса формования пластифицированной порошковой шихты на вакуумном червячном прессе / Б. Д. Сторож, П. С. Кислый // Развитие методов формования изделий из порошков. – Киев : Наук. думка, 1976. – С. 142–150.

142 Алексеев, И. С. Разработка процесса непрерывного формования пористых длинномерных изделий из порошковых материалов методом экструзии шнеком: дисс... канд. техн. наук / И. С.

Алексеев. – Минск, 1985.

143 Кулагин, В. И. Разработка теории и технологии непрерывного формования сплошных профилей: дисс... канд. техн. наук / В. И. Кулагин. – Минск, 1985.

144 Жемчужный, М. И. Разработка способов и технологии формования из порошковых композиций изделий с переменными свойствами: дисс... канд. техн. наук / М. И. Жемчужный. – Минск, 1986.

145 Красновский, А. Н. Разработка технологии непрерывного формования изделий из порошковых материалов и композиций: дисс... канд. техн. наук / А. Н. Красновский. – Минск, 1990.

146 Устройство для непрерывного прессования порошков : а. с. СССР 1199447 / А. В. Степаненко [и др.]. – БИ. – 1987. – № 47.

147 Остапчук, Ю. Г. Дисковые экструдеры / Ю. Г. Остапчук, М. Л. Язловицкий, В. В. Бернацкий, Н. К. Жук [и др.]. – Киев: Техніка, 1972. – 132 с.

148 Continuous extrusion of metals : pat. US 4552520 / J. East, I. Maxwell. – Publ. date 12.11.1985.

149 Пятов, В. В. Теоретический анализ процесса ротационного прессования / В. В. Пятов, И. С. Алексеев, А. В. Карпушко // Tendencje rozwojowe w technologii maszyn: Сб. ст. – Zielona Gora, 1991. – С. 50–55.

150 Джонсон, В. Механика процесса выдавливания металлов / В. Джонсон. – Москва : Металлургия, 1965. – 174 с.

151 Береснев, Б. И. Процесс гидроэкструзии / Б. И. Береснев, Е. В. Трушин. – Москва : Наука, 1976. – 200 с.

152 Колпашников, А. И. Гидропрессование металлов / А. И. Колпашников, В. А. Вялов. – Москва : Металлургия, 1973. – 295 с.

153 Прозоров, Л. В. Прессование стали и тугоплавких сплавов / Л. В. Прозоров – Москва : Машиностроение, 1969. – 244 с.

154 Мальцев, М. В. Гидростатическая обработка тугоплавких металлов / М. В. Мальцев, Е. Д. Доронькин, К. И. Езерский. – Москва : Металлургия, 1978. – 271 с.

155 Швецов, Г. А. Технология переработки пластических масс / Г. А. Швецов, Д. У. Алимова, М. Д. Барышникова. – Москва: Химия, 1988. – 512 с.

156 Грифф, А. Технология экструзии пластмасс / А. Грифф. – Москва : Мир, 1965. – 307 с.

157 Фишер, Э. Экструзия пластических масс / Э. Фишер. – Москва: Химия, 1970. – 340 с.

158 Новые процессы деформации металлов и сплавов / А. П. Коликов, П. И. Полухин, А. В. Крупин. – Москва: Высшая школа, 1986. – 351 с.

159 Степаненко, А. В. Обработка давлением порошковых сред / А. В. Степаненко, Л. А. Исаевич, В. Е. Харлан. – Минск : Наука и техника, 1993. – 167 с.

160 Плющ, Г. В. Удаление пластификатора из твердосплавных изделий, полученных методом мундштучного прессования / Г. В. Плющ // В кн.: Технология получения новых материалов. – Киев, 1972. – С. 104–111.

161 Федорченко, И. М. Исследование свойств материалов, полученных экструзией и спеканием пластифицированных порошковых смесей / И. М. Федорченко, А. Г. Косторнов // Порошковая металлургия. Сб. докл. – Минск : Высшая школа, 1966. – С. 179–185.

162 Кислый, П. С. Спекание заготовок, полученных методом мундштучного прессования порошков тугоплавких соединений / П. С. Кислый // Порошковая металлургия. – Киев : Наук. думка, 1962. – № 5.

163 Харченко, В. К. Некоторые данные о влиянии температуры на прочность и пластичность тугоплавких соединений / В. К. Харченко, Л. И. Струк // Порошковая металлургия. – Киев : Наук. думка, 1962. – № 2. – С. 86–91.

164 Слепцов, В. М. Удаление связи из образцов нитрида кремния / В. М. Слепцов, О. Д. Щербина // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1975. – № 7. – С. 99–101.

165 Ренни, Э. Т. Вакуумные печи для депарафинизации и спекания / Э. Т. Ренни // Британская промышленность и техника. – 1985, 60. – № 1. – С. 31–32.

166 Плющ, Г. В. Удаление пластификатора из твердосплавных заготовок / Г. В. Плющ, Г. А. Прядко // Порошковая металлургия. – Киев : Наук. думка, 1970. – № 5. – С. 50–55.

167 Скороход, В. В. Об электропроводности дисперсных смесей проводников с непроводниками / В. В. Скороход // Инж.-физ. журнал. – Минск, 1959. – № 8. – С. 51–58.

168 Оболенцев, Ф. Д. Изготовление изделий сложной конфигурации из термопластичных шликеров / Ф. Д. Оболенцев // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1985. – № 3. – С. 15–18.

169 Скороход, В. В. и др. Исследование механизма спекания высокопористых материалов с улетучивающимся порообразователем / В. В. Скороход // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1974. – № 11. – С. 42–47.

170 Способ спекания прессованных заготовок из пластифицированных ферромагнитных порошков : а. с. СССР 1193891 / С. С. Клименков, В. В. Пятов. – Заявл. 11.07.84.

171 Чайников, Н. А. Исследование коэффициента трения при прессовании металлических порошков / Н. А. Чайников // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1979. – № 10. – С. 35–38.

172 Чайников, Н. А. Расчетный коэффициент внешнего трения при прессовании металлических порошков. / Н. А. Чайников // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1981. – № 5. – С. 11–15.

173 Меерсон, Г. А. Экспериментальное исследование процесса

прессования порошкообразных материалов / Г. А. Меерсон // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1970. – № 1. – С. 21–29.

174 Кипарисов, С. С. Порошковая металлургия / С. С. Кипарисов, Г. А. Либенсон. – Москва: Металлургия, 1991. – 432 с.

175 Беркович, И. И. Исследование трения и сопротивления сдвигу порошков железа и алюминия / И. И. Беркович // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1971. – № 11.

176 Виноградов, Г. А., Каташинский, В. П. Теория листовой прокатки металлических порошков и гранул / Г. А. Виноградов, В. П. Каташинский. – Москва: Металлургия, 1979. – 224 с.

177 Бесчастная, Н. В. Устройства для определения коэффициента трения дисперсных материалов / Н. В. Бесчастная // В кн.: Порошковая металлургия. – Пермь, 1979. – С. 63–68.

178 Коновалов, Е. Г. Измерения коэффициентов бокового давления при прессовании порошков железа с наложением ультразвуковых колебаний / Е. Г. Коновалов, Г. М. Жданович // В кн.: Пластичность и обработка металлов давлением. – Минск: Наука и техника, 1968. – С. 25–30.

179 Роман, О. В. Теоретический анализ зависимости давления на стенки матрицы от плотности прессуемого материала / О. В. Роман, В. Е. Перельман // В кн.: Матер. IX Всес. конф. по порошковой металлургии. – Рига: Знание, 1968. – С. 73–79.

180 Верейкина, А. А. Приспособление для определения предела прочности на сжатие образцов из тугоплавких соединений при высоких температурах / А. А. Верейкина [и др.] // Завод. лаб., 1960. – № 5. – С. 620–621.

181 Ребиндер, П. А. Физико-химическая механика – новая область науки / П. А. Ребиндер. – Москва: Знание, 1958. – 63 с.

182 Ничипоренко, С. П. Физико-химическая механика дисперсных структур в технологии строительной керамики / С. П. Ничипоренко. – Киев: Наук. думка, 1968. – 76 с.

183 Ребиндер, П. А. О методе погружения конуса для характеристики структурно-механических свойств пластично-вязких тел / П. А. Ребиндер, Н. А. Семененко // Доклады АН СССР. – Т. 64. – № 6. – 1949. – С. 835.

184 Классен, П. В. Основы техники гранулирования / П. В. Классен, И. Г. Гришаев. – Москва: Химия, 1982. – 272 с.

185 Корниенко, П. А. Структурно-механические свойства пластификаторов / П. А. Корниенко, В. С. Пугин // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1968. – № 1. – С. 101–103.

186 Корниенко, П. А. Исследование структурно-механических свойств пластификаторов / П. А. Корниенко, В. С. Пугин // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1967. – № 6. – С. 8–15.

187 Ничипоренко, С. П. Основные вопросы теории процессов

обработки и формования керамических масс / С. П. Ничипоренко. – Киев: АН УССР, 1960.

188 Пятов, В. В. Теоретический анализ процесса непрерывного формования порошков / В. В. Пятов, А. С. Ковчур // Сб. ст. – Витебск: ВГТУ, 1995. – С. 62–65.

189 Пятов, В. В. Анализ напряженно-деформированного состояния при формовании пластифицированного порошкового материала / В. В. Пятов, А. С. Ковчур // Сб. научных трудов ВГТУ: Ч.2. – Витебск: ВГТУ, 1995. – С. 31–34.

190 Пятов, В. В. Экструзия композитных материалов, армированных дискретными волокнами / В. В. Пятов, А. С. Ковчур // Сб. ст. – Витебск: ВГТУ, 1998. – С. 60–65.

191 Пятов, В. В. Исследование геометрии очага деформации при формовании материалов вращающимся шнеком / В. В. Пятов [и др.]. – Деп. в ЦНИИЭИ № 4960 // РЖ: Metallurgiya. – 1989. – № 2. – С. 153.

192 Пятов, В. В. Динамика экструзии изотропного материала / В. В. Пятов, А. С. Ковчур // Сб. научных трудов ВГТУ: Ч.2. – Витебск: ВГТУ, 1995. – С. 37–39.

193 Прудников, А. П. Интегралы и ряды. Специальные функции / А. П. Прудников, Ю. А. Брычков, О. И. Марычев. – Москва : Наука, 1983. – 752 с.

194 Устройство для исследования внешнего и межчастичного трения порошка : а. с. СССР 1176695 / С. С. Клименков, В. В. Пятов, К. В. Шульков. – Заявл. 29.03.84.

195 Пятов, В. В. Прибор для комплексного исследования свойств порошковых материалов / В. В. Пятов // Сб. ст. – Витебск: ВГТУ, 1998. – С. 51–54.

196 Пятов, В. В. Исследование трения пластифицированных металлических порошков / В. В. Пятов // Трение и износ. – 2004. – Т. 25. – № 1. – С. 104–107.

197 Klemm, V. Grundlag Herstell und Eigenschaft pulvermet / Klemm, V., Sobek, D. – Werkst. 8 Int. pulvermet. Tag., Dresden, 1985.

198 Gerritsen, A. H. // Powder Tech. – № 1. – 1985. – №1. – р. 61–70.

199 Способ определения коэффициента бокового давления : пат. ВУ 5665 / В. В. Пятов, О. Н. Ахтанин, С. С. Клименков, А. Н. Голубев. – № а 19990668; Заявлено 06.01.98; Оpubл. 30.09.03 // Офиц. бюлл. Гос. патентного ведомства Республики Беларусь. – 2003. – № 5.

200 Пятов, В. В. Использование трибометра для измерения коэффициентов бокового давления пластифицированных металлических порошков / В. В. Пятов // Трение и износ. – 2004. – Т. 25. – № 2. – С. 223–225.

201 Устройство для определения структурно-пластической прочности пластифицированных порошковых материалов : а. с. СССР 1274848 / П. А. Витязь, С. С. Клименков, В. В. Пятов, К. В. Шульков. –

№ 3855518/22-02; Заявл. 11.02.85; Оpubл. 08.08.86 // Открытия. Изобретения. – 1986. – № 45. – С. 46.

202 Устройство для экструзии порошка : а. с. СССР 1341034 / А. В. Степаненко, С. С. Клименков, В. В. Пятов, В. В. Петухов. – № 4059263/31-02; Заявлено 21.04.86; Оpubл. 30.09.87 // Открытия. Изобретения. – 1987. – № 36. – С. 91.

203 Устройство для экструзии порошковых композиций : а. с. СССР 1659179 / А. Н. Красновский, К. С. Матвеев, В. В. Пятов, А. Л. Коваленко. – № 4719618/02; Заявлено 14.07.89; Оpubл. 30.06.91 // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 24. – С. 53.

204 Способ пластифицирования порошковых материалов : а. с. СССР 1146893 / С. С. Клименков, И. С. Алексеев, В. В. Пятов. – № 3591513/22-02; Заявл. 11.01.83.

205 Устройство для гранулирования порошковых материалов : а. с. СССР 1638905 / А. Н. Красновский, К. С. Матвеев, В. В. Пятов, А. Л. Коваленко. – № 4736272/02; Заявл. 11.09.89.

206 Способ получения заготовок экструзией порошковых композиций и устройство для его осуществления : а. с. СССР 1664462 / А. Н. Красновский, К. С. Матвеев, В. В. Пятов, В. В. Савицкий, А. С. Шандриков, А. М. Лапшин. – № 4710690/31-02; Заявлено 26.06.89; Оpubл. 23.07.91. // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 27. – С. 53.

207 Пятов, В. В. Спекание порошковых прессовок, содержащих парафин / В. В. Пятов [и др.] // Сб. ст. – Витебск: ВГТУ, 1998. – С. 47–50.

208 Способ обработки пластифицированных заготовок из металлических порошков : а. с. СССР 1153455 / С. С. Клименков, В. В. Пятов, И. С. Алексеев, М. И. Жемчужный. – № 3650036/22-02; Заявл. 24.06.83.

209 Ганин, Н. Б. Проектирование и прочностной расчет в системе КОМПАС-3D V13 / Н. Б. Ганин. – Москва: ДМК-пресс, 2011. – 320 с.

210 Голованов, Н.Н. Геометрическое моделирование: учебник для учреждений высшего профессионального образования. – Москва : Академия, 2011. – 272 с.

211 Пятов, В. В. Прикладная САПР для расчета и проектирования деталей и узлов экструдера / В. В. Пятов, А. Н. Голубев, Ш. Й. Ашуров // Сб. ст. – Витебск: УО «ВГТУ», 2016. – С. 82–85.

212 Бровко, С. В. Технология и оборудование для переработки полимерных отходов / С. В. Бровко, В. В. Пятов // Сб. ст. – Витебск: УО «ВГТУ», 2009.

213 Куксёнок, Т. С. Особенности конструкции специализированного экструдера для переработки композиционных материалов. / Т. С. Куксенок, А. К. Новиков. // Сб. ст. – Витебск : УО «ВГТУ», 2009.

214 Балышин, М. Ю. Научные основы порошковой металлургии и

металлургии волокна / М. Ю. Бальшин. – Москва : Металлургия, 1972. — 335 с.

215 Зарубин, В. С. Об оптимальной геометрии оребрения на поверхности теплообмена / В. С. Зарубин // Изв. ВУЗов. – Москва: Машиностроение, 1963. – № 3.

216 Калинин, Э. К. Современные проблемы интенсификации теплообмена при движении двухфазных потоков в каналах / Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер // Повышение эффективности теплообмена в энергетическом оборудовании. – Ленинград : Наука, 1981. – С. 5–21.

217 Гуляев, А. И. Контактная сварка спеченных порошковых материалов / А. И. Гуляев, В. Г. Поднозов, Л. А. Пырялов // Порошковая металлургия. — Киев: Наук. думка, 1976. – № 6. – С. 98–102.

218 Кишнев, П. В. Изготовление ребристых труб из САПа и их аргонно-дуговая и диффузионная сварка / П. В. Кишнев [и др.] // Порошковая металлургия. – Киев, Наук. думка, 1970. – № 2. – С. 90–94.

219 Шибряев, Б. Ф. Пористые проницаемые спеченные материалы / Б. Ф. Шибряев. – Москва : Металлургия, 1982. – 168 с.

220 Ермаков С. С. Металлокерамические детали в машиностроении / С. С. Ермаков, Н. Ф. Вязников. – Ленинград : Машиностроение, 1975. – 232 с.

221 Артамонов, А. Я. Влияние некоторых факторов на качество обработанной поверхности пористых металлокерамических материалов / А. Я. Артамонов, Л. В. Заболотный // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1962. – № 1. – С. 57–60.

222 Фельдштейн, Б. Э. Токарная обработка порошковой стали, легированной хромом / Б. Э. Фельдштейн // Порошковая металлургия. – Киев: Наук. думка, 1980. – № 5. – С. 104–106.

223 Кононенко, В. И. Износ инструментов при резании металлокерамических материалов / В. И. Кононенко. – Москва: Машиностроение, 1972. – 73 с.

224 Белькевич, Б. А. Обработка металлокерамических материалов резанием / Б. А. Белькевич. – Минск : Наука и техника, 1965. — 100 с.

225 Добровольский, А. Г. Шликерное литье / А. Г. Добровольский. – Москва : Металлургия, 1977. – 240 с.

226 Трунов, Г. В. Метод литья термопластичных шликеров / Г. В. Трунов // Порошковая металлургия. – Киев, Наук. думка, 1969. – № 5. – С. 33–42.

227 Устройство для формования трубчатых изделий с винтовым оребрением : а. с. СССР 1332658 / П. А. Витязь, С. С. Клименков, В. В. Пятов. – № 3956116/22-02; Заявл. 17.09.85.

228 Устройство для непрерывного формования порошковых материалов : а. с. СССР 1671414 / С. С. Клименков, В. В. Пятов, А. М. Лапшин. – № 4680557/02; Заявлено 18.04.89; Опубл. 23.08.91. // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 31. – С. 37–38.

229 Устройство для формования пористых изделий из пластифицированных порошков : а. с. СССР 1607198 / К. С. Матвеев, А. Н. Красновский, В. В. Пятов, В. В. Савицкий, А. В. Карпушко. – № 4689972/31-02; Заявл. 06.04.89.

230 Устройство для непрерывного формования порошков : а. с. СССР 1093395 / С. С. Клименков, В. В. Пятов. – № 3565955/22-02; Заявлено 14.03.83; Оpubл. 23.05.84 // Открытия. Изобретения. – 1984. — № 19. – С. 29.

231 Устройство для непрерывного формования длинномерных изделий из порошков : а. с. СССР 1412888 / С. С. Клименков, В. В. Пятов, К. С. Матвеев, А. Н. Красновский. – № 4123898/31-02; Заявлено 14.06.87; Оpubл. 30.07.88 // Открытия. Изобретения. – 1988. – № 28. – С. 60.

232 Устройство для непрерывного формования изделий из порошка : а. с. СССР 1336354 / С. С. Клименков, В. В. Пятов, К. С. Матвеев. – № 4017332/31-02; Заявл. 22.01.86.

233 Устройство для непрерывного прессования изделий из порошка : а. с. СССР 1469689 / С. С. Клименков, В. В. Пятов, А. С. Шандриков. – № 4201384/31-02; Заявл. 02.03.87.

234 Витязь, П. А. Теоретические и практические основы создания эффективных спеченных проницаемых материалов и их внедрение в народное хозяйство : дисс...докт. техн. наук / П. А. Витязь. – Минск, 1983.

235 Андриевский, Р. А. Пористые металлокерамические материалы / Р. А. Андриевский. – Москва : Металлургия, 1964. – 188 с.

236 Пористые проницаемые материалы / С. В. Белов [и др.]. – Москва : Металлургия, 1987. – 335 с.

237 Белов, С. В. Пористые металлы в машиностроении / С. В. Белов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 247 с.

238 Павловская, Е. И. Металлокерамические фильтры / Е. И. Павловская, Б. Ф. Шибряев. – Москва : Недра, 1967. – 164 с.

239 Свойства порошков металлов, тугоплавких соединений и спеченных материалов : Информационный справочник. – Киев: Наук. думка, 1978. – С. 82–95.

240 Низкотемпературные тепловые трубы / Л. Л. Васильев [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1976. – 134 с.

241 Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов / Г. И. Воронин [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1976. – 44 с.

242 Изготовление и исследование криогенных тепловых труб со спеченной капиллярно-пористой структурой / П. А. Витязь [и др.]. // Теплообмен в криогенных устройствах. – Минск : АН БССР, 1979. – С. 124–137.

243 Stengel, R. F. Stacked micro orifice modules feed rocket fuel and

oxidizer / R. F. Stengel // Design News, 1967. – v. 22. – № 3. – p. 32–33.

244 Локализация пламени пористыми металловолокнистыми пламепреградителями / И. И. Стрижевский [и др.] // Порошковая металлургия. – Киев : Наук. думка, 1979. – № 6. – С. 88–89.

245 Земо, Ф. Д. Передача тепла через пористые материалы / Ф. Д. Земо // Новое в порошковой металлургии. – Москва : Металлургия, 1970. – С. 168–179.

246 Интенсификация теплообмена в кольцевом канале / В. М. Поляев [и др.] // Изв. ВУЗов. – Москва : Машиностроение, 1976. – № 2. – С. 86–90.

247 Способ прессования фильтрующих элементов с переменной пористостью из ферромагнитных материалов : а. с. СССР 1694345 / В. В. Пятов, К. С. Матвеев, А. Н. Красновский, В. В. Савицкий, А. С. Шандриков, А. В. Карпушко. – № 4715866/02; Заявлено 25.05.89; Оpubл. 30.11.91 // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 44. – С. 41.

248 Устройство для центробежного формования изделий из порошка : а. с. СССР 1739581 / В. В. Пятов, К. С. Матвеев, В. В. Савицкий, А. Н. Красновский, А. М. Лапшин. – № 4852406/02; Заявл. 18.07.90.

249 Устройство для непрерывного формования порошков : а. с. СССР 1110545 / С. С. Клименков, В. В. Пятов. – № 3539025/22-02; Заявлено 11.01.83; Оpubл. 30.08.84 // Открытия. Изобретения. – 1984. – № 32. – С. 32.

250 Устройство для формования труб с винтовыми ребрами : а. с. СССР 1292270 / П. А. Витязь, С. С. Клименков, В. В. Пятов. – № 3889080/22-02; Заявл. 24.04.85.

251 Устройство для получения многослойных трубчатых изделий из порошков экструзией : а. с. СССР 1653900 / С. С. Клименков, А. Н. Красновский, А. М. Лапшин, В. В. Пятов, К. С. Матвеев. – № 4715698/02; Заявлено 09.06.89; Оpubл. 07.06.91 // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 21. – С. 52.

252 Устройство для прессования металлических порошков : а. с. СССР 1804026 / К. С. Матвеев, В. В. Пятов, А. Н. Красновский, В. В. Савицкий, А. М. Лапшин. – № 4756869/02; Заявл. 09.11.89.

253 Пятов, В. В. Экструзионное формование металлополимерных композиционных материалов / В. В. Пятов, П. В. Станкевич, К. С. Матвеев // Композиционные материалы в промышленности: Материалы двадцать четвертой ежегодной международной конференции и выставки: Сб. ст. – Ялта-Киев: УИЦ «Наука, техника, технология», 2004. – С. 289–290.

254 Экструдер для переработки кожевенных отходов : полез. модель ВУ 1249 / К.С. Матвеев, А.К. Новиков, А.Н. Голубев, А.В. Гусаков, В. А. Хмельницкий. – Заявл. 2003.07.15; Оpubл. 2004.03.30.

255 Экструдер для рециклинга отходов кожевенных материалов :

полез. модель ВУ 1530 / К. С. Матвеев, А. К. Новиков, А. Н. Голубев, П. В. Станкевич, П. М. Фомин. – Заявл. 2004.01.08; Оpubл. 2004.09.30.

256 Экструдер для переработки отходов искусственных кож : полез. модель ВУ 1964 / К. С. Матвеев, А. К. Новиков, А. Н. Голубев, Е. А. Егорова, Д. В. Розов, Д. С. Ревин. – Заявл. 2004.11.15; Оpubл. 2005.06.30.

257 Дорожкин, Н. Н. Упрочнение и восстановление деталей машин металлическими порошками / Н. Н. Дорожкин. – Минск : Наука и техника, 1975. – 152 с.

258 Дорожкин, Н. Н. Получение покрытий методом припекания / Н. Н. Дорожкин, Т. М. Абрамович, В. И. Жорник. – Минск : Наука и техника, 1980. – 176 с.

259 Ярошевич, В. К. Антифрикционные покрытия из металлических порошков / В. К. Ярошевич, М. А. Белоцерковский. – Минск : Наука и техника, 1981. – 174 с.

260 Кашицын, Л. П. Способы и устройства для нанесения покрытий из металлических порошков / Л. П. Кашицын // Порошковая металлургия. – Вып. 4. – Минск : Вышэйшая школа, 1980. – С. 88–94.

261 Бакалюк, Я. Х. Производство труб с металлическими покрытиями / Я. Х. Бакалюк. – Москва : Металлургия, 1975. – 216 с.

262 Способ нанесения покрытий на внутреннюю поверхность длинномерных изделий : а. с. СССР 1183299 / П. А. Витязь, С. С. Клименков, И. С. Алексеев, В. К. Щелег. – БИ. – 1985. – № 37.

263 Авдеев, Н. В. Металлирование / Н. В. Авдеев. – Москва : Машиностроение, 1978. – 184 с.

264 Способ нанесения покрытия из порошка на внутреннюю поверхность трубы : а. с. СССР 1223519 / П. А. Витязь, С. С. Клименков, В. В. Пятов. – № 3757475/22-02; Заявл. 21.06.84.

265 Способ нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы : а. с. СССР 1380072 / П. А. Витязь, С. С. Клименков, В. В. Пятов. – № 3977569/31-02; Заявл. 10.11.85.

266 Витязь, П. А. Прессование покрытий на внутренних поверхностях труб методом экструзии / П. А. Витязь, С. С. Клименков, В. В. Пятов // Прогрессивные процессы обработки материалов давлением: тез. докл. конф. – Минск, 1985. – С. 51–52.

267 Устройство для нанесения покрытий на внутренние поверхности труб : а. с. СССР 1320977 СССР, МКИ В 22 F 3/20; В 30 / П. А. Витязь, С. С. Клименков, В. В. Пятов. – № 3956117/22-02; Заявл. 17.09.85.

268 Устройство для нанесения покрытий на внутреннюю поверхность труб : а. с. СССР 1547949 / А. В. Карпушко, К. С. Матвеев, В. В. Пятов, В. В. Савицкий, А. Н. Красновский. – № 4419666/31-02; Заявл. 03.05.88; Оpubл. 07.03.90 // Открытия. Изобретения. – 1990. – № 9. – С. 54.

269 Способ изготовления тепловых труб : а. с. СССР 1601883 / А. В. Карпушко, А. Н. Красновский, К. С. Матвеев, В. В. Пятов, В. В. Савицкий. – № 4607546/31-02; Заявл. 21.11.88.

270 Устройство для непрерывного прессования порошков : а. с. СССР 1683235 / В. В. Пятов, О. Н. Ахтанин, И. С. Алексеев, К. С. Матвеев, А. Н. Красновский. – № 4731636/02; Заявл. 25.08.89.

271 Способ непрерывного формования порошков : а. с. СССР 1219253 / С. С. Клименков, И. С. Алексеев, В. В. Пятов, О. Н. Ахтанин. – № 3821938/22-02; Заявлено 15.10.84; Оpubл. 23.03.86 // Открытия. Изобретения. – 1986. – № 11. – С. 63.

272 Способ непрерывного формования порошка : а. с. СССР 1400779 / С. С. Клименков, И. С. Алексеев, В. В. Пятов. – № 4017330/31-02; Заявлено 22.01.86; Оpubл. 07.06.88 // Открытия. Изобретения. – 1988. – № 21. – С. 57.

273 Устройство для непрерывного формования изделий из порошков : а. с. СССР 1623836 / С. С. Клименков, И. С. Алексеев, В. В. Пятов, О. Н. Ахтанин, А. С. Шандриков, В. В. Савицкий. – № 4666197/02; Заявлено 23.03.89; Оpubл. 30.01.91 // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 4. – С. 41.

274 Устройство для формования порошковых шнуров : пат. ВУ 4116 / А. Н. Красновский, В. В. Пятов, О. Н. Ахтанин, К. С. Матвеев, В. В. Савицкий. – № а 19980683; Заявл. 1998.07.20; Оpubл. 2001.09.30.

275 Степаненко, А. В. Непрерывное формование металлических порошков и гранул / А. В. Степаненко, Л. А. Исаевич. – Минск : Наука и техника, 1980. – 256 с.

276 Виноградов, Г. А. Прессование и прокатка металлокерамических материалов / Г. А. Виноградов, И. Д. Радомысльский. – Москва-Киев: Машгиз, 1963. – 200 с.

277 Устройство для прокатки порошков : а.с. СССР 557875 / В. П. Северденко, А. В. Степаненко, Л. А. Исаевич. – БИ. – 1977. – № 18.

278 Устройство для формования порошковых материалов : а. с. СССР 1671410 / А. В. Карпушко, В. В. Савицкий, К. С. Матвеев, В. В. Пятов, А. Н. Красновский, А. С. Шандриков. – № 4704237/02; Заявлено 14.06.89; Оpubл. 23.08.91 // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 31. – С. 37.

279 Способ получения изделий из труднодеформируемых порошковых материалов : а. с. СССР 1804021 / В. В. Пятов, К. С. Матвеев, А. Н. Красновский, В. В. Савицкий, А. Л. Коваленко, А. М. Лапшин. – № 4824067/02; Заявл. 10.05.90.

280 Способ экструзии порошковых материалов : а. с. СССР 1783691 / А. Н. Красновский, В. В. Пятов, А. Л. Коваленко, К. С. Матвеев, В. В. Савицкий. – № 4658863/02; Заявл. 06.03.89.

281 Способ прессования изделий из порошковых материалов : а. с. СССР 1555965 / А. В. Степаненко, С. С. Клименков, В. В. Пятов, А. Н.

Красновский, К. С. Матвеев. – № 4484044/31-02; Заявл. 19.09.88.

282 Способ формования порошковых материалов : а. с. СССР 1694351 / С. С. Клименков, В. В. Пятов, А. С. Шандриков. – № 4489902/02; Заявлено 03.10.88; Оpubл. 30.11.91 // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 44. – С. 42.

283 Устройство для получения спеченных порошковых изделий : а. с. СССР 1627322 / С. С. Клименков, К. С. Матвеев, В. В. Пятов, А. Н. Красновский. – № 4477065/02; Заявлено 20.06.88; Оpubл. 15.02.91 // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 6. – С. 35.

284 Способ производства проволоки из порошковых сплавов : заявка JP 59-185743 / Йокота Минору [и др.]. – Б. И. – 22.10.84.

285 Способ экструдирования металлических порошков : а. с. СССР 1589493 / С. С. Клименков, И. С. Алексеев, В. В. Пятов, А. С. Шандриков. – № 4402384/31-02; Заявл. 04.04.88.

286 Устройство для экструзии пластифицированных порошковых материалов : а. с. СССР 1548946 / А. Н. Красновский, В. В. Петухов, В. В. Пятов, В. В. Савицкий, А. В. Карпушко, К. С. Матвеев. – № 4414017/31-02; Заявл. 21.04.88.

287 Устройство для экструзии непластифицированных металлических порошков : а. с. СССР 1555966 / А. Н. Красновский, В. В. Пятов, В. В. Савицкий, А. В. Карпушко, К. С. Матвеев. – № 4486633/31-02; Заявл. 26.09.88.

288 Устройство для прессования порошков : а. с. СССР 1374566 / С. С. Клименков, В. В. Пятов, В. В. Петухов, А. Н. Красновский. – № 4038867 31-02; Заявл. 18.03.86.

289 Устройство для непрерывного прессования изделий из порошка : а. с. СССР 1154812 / С. С. Клименков, В. В. Пятов. – № 3716500/22-02; Заявл. 29.03.84.

290 Способ непрерывного изготовления изделий из порошков : а. с. СССР 1435405 / С. С. Клименков, В. Г. Буткевич, В. В. Пятов. – № 4213497/31-02; Заявлено 23.03.87; Оpubл. 07.11.88 // Открытия. Изобретения. – 1988. – № 41. – С. 49.

291 Способ непрерывного изготовления изделий из порошков : а. с. СССР 1650363 / В. В. Пятов, А. С. Шандриков, А. В. Карпушко, А. Н. Красновский, К. С. Матвеев, В. В. Савицкий. – № 4694182/02; Заявлено 19.05.89; Оpubл. 23.05.91. // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 19. – С. 54.

292 Устройство для непрерывного прессования порошка : а. с. СССР 1671413 / А. В. Степаненко, А. Н. Красновский, В. В. Пятов, К. С. Матвеев, А. Л. Коваленко. – № 4659627/02; Заявлено 06.03.89; Оpubл. 23.08.91. // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 31. – С. 37.

293 Устройство для непрерывного формования порошковых материалов : а. с. СССР 1806898 / В. В. Пятов, А. Н. Красновский, К. С. Матвеев, А. Л. Коваленко, А. М. Лапшин. – № 4795708/02; Заявлено

26.02.90; Оpubл. 07.04.93 // Открытия. Изобретения. – 1993. – № 13. – С. 61.

294 Способ непрерывного формования изделий из порошковых материалов : а. с. СССР 1694350 / В. В. Пятов, К. С. Матвеев, А. Н. Красновский, В. В. Савицкий, А. В. Карпушко. – № 4427339/02; Заявлено 16.05.88; Оpubл. 30.11.91 // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 44. – С. 42.

295 Устройство для непрерывной экструзии порошковых материалов : а. с. СССР 1619567 / В. В. Пятов, В. В. Савицкий, К. С. Матвеев, А. Н. Красновский, А. С. Шандриков, А. В. Карпушко. – № 4705357/02; Заявл. 15.06.89.

296 Устройство для экструдирования изделий из порошков : а. с. СССР 1600142 / В. В. Пятов, А. Н. Красновский, К. С. Матвеев, В. В. Савицкий, А. В. Карпушко. – № 4635863/31-02; Заявл. 12.12.88.

297 Устройство для непрерывного прессования порошков : а. с. СССР 1577924 / А. Н. Красновский, А. В. Карпушко, В. В. Савицкий, В. В. Пятов, В. В. Петухов. – № 4387905/31-02; Заявлено 09.03.88; Оpubл. 15.07.90. // Открытия. Изобретения. – 1990. – № 26. – С. 48.

298 Устройство для прессования изделий из порошковых материалов : а. с. СССР 1565725 / А. Н. Красновский, К. С. Матвеев, В. В. Савицкий, В. В. Пятов, А. В. Карпушко. – № 4482742/31-02; Заявлено 17.06.88; Оpubл. 23.05.90 // Открытия. Изобретения. – 1990. – № 19. – С. 83–84.

299 Устройство для формования длинномерных заготовок из порошка : а. с. СССР 1656773 / В. В. Пятов, А. Н. Красновский, К. С. Матвеев, А. М. Лапшин, А. Л. Коваленко. – № 4767825/02; Заявл. 09.11.89.

300 Устройство для экструдирования полых изделий из порошка : а. с. СССР 1323234 / П. А. Витязь, С. С. Клименков, И. С. Алексеев, В. В. Пятов, В. В. Савицкий. – № 4017331/22-02; Заявл. 22.01.86; Оpubл. 15.07.87 // Открытия. Изобретения. – 1987. – № 26. – С. 50.

301 Устройство для непрерывного формования изделий из порошков : а. с. СССР 1823288 / В. В. Пятов, К. С. Матвеев, В. В. Савицкий, А. Н. Красновский, А. М. Лапшин, А. С. Шандриков. – № 4827638/02; Заявлено 21.05.90.

302 Устройство для экструзии пластифицированных порошковых материалов : а. с. СССР 1785143 / В. В. Пятов, К. С. Матвеев, А. Н. Красновский, В. В. Савицкий, А. М. Лапшин, А. С. Шандриков. – № 4795709/02; Заявл. 26.02.90.

Научное издание

Пятов Владислав Владимирович
Голубев Алексей Николаевич

ЭКСТРУЗИЯ ПЛАСТИЧНО-ВЯЗКОЙ СРЕДЫ

Монография

Редактор *Т. А. Осипова*
Корректор *Т. А. Осипова*
Компьютерная верстка *А. Н. Голубев*

Подписано к печати 19.12.2018. Формат 60х90^{1/16}. Усл. печ. листов 13,3.
Уч.-изд. листов 14,8. Тираж 53 экз. Заказ № 379.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.