

678

Б26 БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

---

УДК 678.027.3:674.812

678,064.3  
674.812

**БАРСУКОВ Владимир Георгиевич**

**ТРИБОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
ЭКСТРУЗИИ ДРЕВЕСНОПОЛИМЕРНЫХ  
ПРЕССКОМПОЗИЦИЙ**

**Специальность:**

05.17.06 - Технология и  
переработка пластмасс,  
эластомеров и композитов

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

**Минск 1998**

+

+

Работа выполнена в Отделе проблем ресурсосбережения и Институте механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор **Ставров В.П.**,  
доктор технических наук, профессор **Онегин В.И.**,  
доктор технических наук, профессор **Врублевская В.И.**

**Оппонирующая организация:** Украинский научно-исследовательский институт механической обработки древесины.

Защита состоится " 6 " октября 1998 в 10 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.04 в Белорусском государственном технологическом университете по адресу:

220630, г. Минск, ул. Свердлова 13а, тел. 227-73-50.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского государственного технологического университета.

Автореферат разослан " 1 " сентября 1998 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций  
к.т.н. доцент



В.Б. Снопков



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Изделия из древеснополимерных пресскомпозиций, благодаря высокой экономичности, комплексу ценных эксплуатационных свойств, возобновляемости сырьевой базы, в качестве основы которой выступают отходы деревообрабатывающих производств, находят широкое применение в промышленности и строительстве. Основным методом получения таких изделий является прессование на гидравлических, ленточных и гусеничных прессах.

В то же время использование метода экструзии, широко распространенного при производстве профильно-погонажных изделий из полимерных материалов, сдерживается при переработке древеснополимерных пресскомпозиций нерешенностью ряда научных и прикладных технологических проблем, главными из которых являются:

в научном плане - неадекватность существующей теоретической базы, основанной на гидродинамике вязкой жидкости или линейной трибомеханике сыпучих сред, реальным условиям деформирования древеснополимерных пресскомпозиций при переработке;

в прикладном плане - сложности обеспечения устойчивого режима работы оборудования, опасности его перегрузок и термодеструкции материала, поверхностные дефекты на выходе из экструзионного канала.

Указанные проблемы обусловлены фрикционным взаимодействием древесных частиц в процессах деформирования, т.е. имеют трибореологическую основу. Изучение роли фрикционного контакта в реологических эффектах при экструзии древеснополимерных пресскомпозиций представляет собой важное, но мало исследованное научно-техническое направление.

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Работа выполнялась в рамках Общесоюзной целевой комплексной научно-технической программы (задание ОЦ 013.06.04 на 1981-1988 г.г.), Комплексной программы научно-технического прогресса стран - членов СЭВ (задание 4.1.2.8 КП НТП СЭВ на 1987-1990 г.г.), Республиканской программы фундаментальных исследований "Материал-2" (задание "Материал 2.20" на 1992-1995 г.г.), Государственной научно-технической программы "Ресурсосбережение" (задание 2.15 на 1995-1997 г.г.).

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является разработка методов расчета процессов экструзии древеснополимерных пресскомпозиций и формующих элементов оборудования с учетом особенностей фрикционного контакта в перерабатываемых материалах при повышенных давлениях.

Основные решаемые задачи:

- разработка нелинейной феноменологической модели фрикционного контакта в древеснополимерных композициях при переработке;
- исследование силовых параметров и трибореологических эффектов при экструзии древеснополимерных пресскомпозиций;



- разработка методик расчета технологических параметров оборудования и оснастки;

- разработка и промышленная проверка процессов и оборудования для экструзии древеснополимерных пресскомпозиций.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются процессы экструзии высоконаполненных древеснополимерных композиций, предметом исследования - триботехнологические аспекты этих процессов.

**Гипотеза.** Фрикционное взаимодействие в высоконаполненных древеснополимерных композициях сопровождается в процессах экструзии рядом реологических эффектов, влияющих на режимы переработки и качество получаемых изделий.

**Методология и методы проведенного исследования.** Теоретический анализ параметров фрикционного взаимодействия в композитах при переработке выполнен с использованием разработанной нелинейной модели, основанной на адгезионной теории трения.

Экспериментальные исследования выполнены с использованием методов трибометрии (трибометр для порошковых материалов), пластометрии (пластометр сжатия), экструзиометрии (установки "Plasticorder PLV 340" и "Rheocord-90"), а также ряда специальных методик, разработанных в процессе выполнения исследований.

**Научная новизна и значимость полученных результатов.** Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить новые представления о механике процессов экструзии высоконаполненных композитов с учетом особенностей фрикционного взаимодействия в перерабатываемых материалах при высоких давлениях:

- предложена и теоретически обоснованная нелинейная феноменологическая модель фрикционного пластического контакта дисперсных прессматериалов, соответствующая в области низких давлений закону трения Кулона, а в области высоких давлений - закону трения Зибеля для насыщенного пластического контакта;

- найдена взаимосвязь транспортирующей способности червяка с параметрами фрикционного взаимодействия в трибосистеме червяк - пресскомпозиция - цилиндр в условиях насыщенного фрикционного контакта рабочих поверхностей;

- установлено существование в экструзионных каналах зоны низких давлений и зоны высоких давлений, в которых материал находится в реологически различных состояниях (твердом и вязкопластическом), определены границы этих зон и распределение давлений внутри зон;

- показано, что вблизи выхода из экструзионного канала под действием сил трения возникает область растягивающих напряжений, которые могут приводить к нарушению сплошности материала;

- предложены способы управления параметрами процессов экструзии путем изменения условий фрикционного взаимодействия древесных частиц между



собой и со стенками экструзионного оборудования, в частности, использование смазок двойного назначения и применение смесей связующих с различающимися реологическими свойствами;

**Практическая (экономическая, социальная) значимость полученных результатов.** Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить следующие важные для практики результаты:

- разработаны инженерные методики расчета силовых параметров процессов и конструктивно-технологических параметров оборудования и оснастки для экструзии древеснополимерных пресскомпозиций;

- разработаны новые способы экструзии древеснополимерных пресскомпозиций и реализующее их оборудование;

- разработаны конструктивно-технологические приемы управления трибореологическими эффектами, исключая образование "мертвых" зон на входе в экструзионную головку и трещин на выходе из нее;

- отработаны промышленные технологические процессы производства методом экструзии строительных (плинтус, наличник, поручень) и машиностроительных (направляющие скребковых и опоры скольжения ленточных конвейеров) изделий из древеснополимерных пресскомпозиций;

- разработаны технические условия и технологические инструкции на производство пресскомпозиций древесных и изделий из них;

- освоено промышленное производство изделий из древеснополимерных пресскомпозиций на предприятиях Республики Беларусь и России.

Применение древеснополимерных погонажных изделий позволяет снизить себестоимость:

- строительных изделий (вместо аналогичных деталей из полимерных материалов)-на 58-62%;

- опор скольжения ленточных конвейеров - на 37%;

- направляющих скребковых конвейеров - на 43%.

Годовой экономический эффект от производства изделий на участке, состоящем из трех технологических линий в Производственном объединении строительных материалов (г. Ветка) составил 235000 рублей в ценах 1991 г.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

- нелинейная феноменологическая модель фрикционного контакта при пластическом деформировании дисперсных композитов;

- метод расчета транспортирующей способности червяка и геометрии его винтового канала на основе нелинейной трибомеханической модели применительно к экструзии пресскомпозиций;

- теоретические и экспериментальные доказательства трибореологических условий возникновения и существования зон твердого и вязкопластического состояния древеснополимерных пресскомпозиций при экструзии в режиме пробкообразного скольжения;

- теоретическое обоснование существования в экструзионном канале вблизи его выхода при экструзии древеснополимерных пресскомпозиций зоны



растягивающих напряжений;

- конструктивные и технологические способы управления силовыми и температурными параметрами процесса экструзии древеснополимерных пресскомпозиций путем изменения условий фрикционного контакта в системе пресскомпозиция - перерабатывающее оборудование.

**Личный вклад соискателя.** Соискателем разработана общая методика исследований, получены основные теоретические и экспериментальные зависимости, разработаны принципы создания технологических процессов и оборудования для получения погонажных изделий из древеснополимерных пресскомпозиций методом червячной экструзии. Совместно с сотрудниками Отдела №3 ИММС НАНБ отработаны составы пресскомпозиций и режимы получения из них погонажных изделий. Совместно с сотрудниками СКБ с ОП ИММС НАНБ разработана техническая документация на формующую оснастку и модернизированные детали оборудования. Совместно с сотрудниками ОПР НАНБ выполнен ряд расчетов оборудования. Совместно с сотрудниками Производственного объединения строительных материалов Гомельского облместпрома отработаны промышленные технологические процессы экструзии древеснополимерных пресскомпозиций.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты исследований и разработок по теме диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях, симпозиумах и семинарах:

**международных**

- "Фундаментальные исследования в области комплексного использования древесины. 4-ый международный симпозиум ученых стран - членов СЭВ", Рига, 1982;
- "Stroe pro spracovani plastic", Brno, Cechoslovakia, 1987;
- "APLICHEM 88", Bratislava, Cechoslovakia, 1988;
- "V Национальная конференция по механике и технологии композиционных материалов", Варна, Болгария, 1988;
- "Достижения науки и техники в области ресурсосбережения и экологии", Гомель, 1989;
- "Modifikacija drevna 89", VII symposium, Puszczykovo, 1989;
- VII Симпозиум "Древесно-полимерные композиционные материалы и изделия". Гомель, 1991;
- "Modifikacija drevna 93", IX symposium, Poznan, 1993;
- 4-th International symposium "Tribology in mining and steel technology. Inicont 94", Krakow, Poland, 1994;
- "YUTRIB' 95", Herzog Novi, Югославия;
- "Otoczenie regionalne i lokalne jako czynnik rozwoju przedsieblorstw", Bialystok, 1995;
- "Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии", Гродно, 1994, 1996.



- "Technology'95", Bratislava, 1995;
- XVII Symposium mechaniki eksperimentalnej ciala stalego, Jachranka, 1996;
- World Tribology Congress, London, 1997;
- "Новые материалы и технологии в трибологии. Вторая Американско-Восточно-Европейская конференция", Минск-Гродно-Варшава, 1997;
- всесоюзных и республиканских**
- "Расчет и контроль энерготехнологических параметров изготовления и переработки полимерных материалов", Москва, 1982;
- "Композиционные и полимерные материалы, свойства, производство и применение", Москва, 1987;
- "Экология производства и применения пластмасс и изделий из них", Ленинград, 1989;
- "Ресурсосберегающие технологии в деревообработке", Алма-Ата, 1989;
- "Теоретические аспекты модифицирования древесины", Рига, 1983;
- "Научно-технический прогресс в лесной и деревообрабатывающей промышленности", Киев, 1983;
- "Новые конструкционные полимерные материалы, клеящие и герметизирующие материалы", Харьков, 1989;
- "Модификация древесины", Минск, 1990;
- "Физика и механика композиционных материалов", Гомель, 1982, 1984, 1985, Солигорск, 1992, 1995;
- "Новые материалы и технологии", Минск, 1994;
- "Неметаллические материалы", Обнинск, 1992;
- "Опыт и перспективы применения композиционных материалов в машиностроении. VIII межотраслевая конференция", Самара, 1992;
- прикладная часть работы демонстрировалась на ВДНХ СССР (серебряная и бронзовая медали).

**Опубликованность результатов.** Основные результаты исследований и разработок опубликованы в 68 печатных работах, включающих монографию, брошюру, 30 статей и 26 авторских свидетельств на изобретения, всего 476 с. текста.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики, 5 глав, выводов, списка использованных источников из 347 наименований и приложений. Работа содержит 48 страниц, 118 рисунков, 44 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована тема и цель диссертационной работы, обоснована ее актуальность и практическая значимость, отмечена связь с плановыми научно-исследовательскими темами НАН Беларуси и государственными научно-техническими программами.

Первая глава содержит обзор работ отечественных и зарубежных исследователей в области технологии экструзии композиционных материалов, теории деформирования расплавов, твердых тел и дисперсных сред.

Из приведенного обзора сделан вывод, что гидродинамическая теория экструзии, получившая развитие в работах многих исследователей, дает хорошее согласование с практикой для ненаполненных полимеров и их смесей, а также для композиций с малой и средней степенями наполнения, где фрикционное взаимодействие частиц наполнителя между собой и со стенками формирующего канала является несущественным.

Отмечено, что в современных условиях резко возрастает роль высоконаполненных древеснополимерных материалов, обеспечивающих максимальную экономию исходных полимеров. В таких материалах полимер полностью или частично находится в адсорбированном состоянии на поверхности древесного наполнителя, контактное взаимодействие характеризуется высокими локальными давлениями и относительный сдвиг частиц происходит в условиях, когда одновременно имеют место элементы сухого, граничного и полужидкостного трения, а также сцепления частиц между собой. Эти явления не учитываются в гидродинамической теории, поэтому при содержании наполнителя свыше 30 % по объему гидродинамические подходы становятся неприемлемыми.

Рассмотрение научных достижений в области трибомеханики показало также ограниченность подходов, основанных на линейной трибомеханике (законе трения Кулона), применительно к задачам пластического деформирования. Более перспективным является анализ силовых параметров процессов экструзии композитов на основе нелинейной модели фрикционного пластического контакта.

Из проведенного анализа существующих теоретических подходов сделаны следующие выводы:

а) в настоящее время имеется необходимость в разработке адекватной теории экструзионного деформирования высоконаполненных композиций;

б) разрабатываемая теория и основанные на ней методы расчета должны базироваться на принципах нелинейной трибомеханики пластического контакта деформируемых тел.

Разработке такого подхода и его практической реализации применительно к одному из наиболее массовых видов высоконаполненных композитов - древопластикам и посвящена настоящая работа.

Отмечается, что решение существующей проблемы заключается в следующем:



- разработка нелинейной трибологической модели, отвечающей в области низких давлений закону трения Кулона, а в области высоких давлений - закону трения Зибеля;

- теоретическое и экспериментальное исследование движения высоконаполненных композиций в винтовом и профилирующем каналах экструзионного устройства, а также в переходной зоне под действием и при противодействии сил трения;

- исследование трибореологических эффектов в пресскомпозиции при различных соотношениях сил трения внутри пресскомпозиции и вне ее (по стенкам каналов);

- разработка инженерных методик расчета силовых параметров процесса и технологических параметров применяемого оборудования;

- разработка рецептурно-технологических и конструктивно-технологических методов управления параметрами процесса экструзии и свойствами получаемых изделий;

- разработка и промышленное освоение технологических процессов и оборудования для производства погонажных изделий из древеснополимерных пресскомпозиций методом экструзии.

**Во второй главе** приводится общая методика исследований.

При выборе трибологической модели исходили из того, что закон трения Кулона справедлив лишь для нагрузок, малых по сравнению с пределом текучести контактирующих тел, т.е. когда площадь фактического контакта мала в сравнении с номинальной. Из работ Е.М.Макушка, Ш.М.Билика, Г.М.Бартенева и В.В.Лаврентьева следует, что в случае контакта твердых тел при высоких давлениях имеет место нелинейная зависимость сил трения от давления. При насыщенном пластическом контакте удельные силы трения практически не зависят от давления и подчиняются закону трения Зибеля. Для дисперсных материалов адекватные модели фрикционного контакта не разработаны из-за неизученности взаимосвязи площади фактического касания с пористостью системы (рис. 1).

Для теоретического анализа в диссертации принята степенная аппроксимация зависимости фактической площади касания  $A_f$  от пористости  $\Pi$  пресскомпозиции:

$$\frac{A_f}{A_n} = 1 - \left( \frac{\Pi}{\Pi_0} \right)^n, \quad (1)$$

где  $\Pi_0$  - исходная пористость материала,

$n$  - показатель степени,

$A_n$  - номинальная площадь контакта.

Взаимосвязь пористости композита с давлением переработки принимали в форме зависимости Кунина-Юрченко, экспериментально подтвержденной для полимерных, древеснополимерных и неупрочняемых металлических порошков

$$p = \sigma_s \ln \frac{H_0}{H} \quad (2)$$

где  $p$  - давление переработки,

$\sigma_s$  - предел текучести деформируемого материала.

Согласно адгезионной теории трения, удельные силы трения  $\tau$  равны произведению прочности адгезионного схватывания  $\tau_a$  на отношение фактической площади касания  $A_f$  к номинальной  $A_n$ :

$$\tau = \tau_a \frac{A_f}{A_n} \quad (3)$$

Совместное решение (1), (2) и (3) дает искомую зависимость удельных сил трения от давления

$$\tau = \tau_a \left( 1 - e^{-\frac{np}{\sigma_s}} \right) \quad (4)$$

схематическое изображение которой представлено на рис. 2. Формула (4) удовлетворяет в области низких давлений закону Кулона

$$\tau = \frac{\tau_a n}{\sigma_s} p = fp, \quad (5)$$

а в области высоких давлений - закону трения Зибеля:

$$\tau = \tau_a = \mu \sigma_s, \quad (6)$$

где  $\mu$  - коэффициент трения Зибеля.

Полученная зависимость объясняет также уменьшение коэффициента трения и увеличение коэффициента бокового давления с ростом нагрузки при допущении о "кулоновском" поведении фрикционного контакта. Анализ показывает, что показатель степени  $n$  в формуле (1) представляет из себя отношение коэффициента трения Кулона к коэффициенту трения Зибеля.

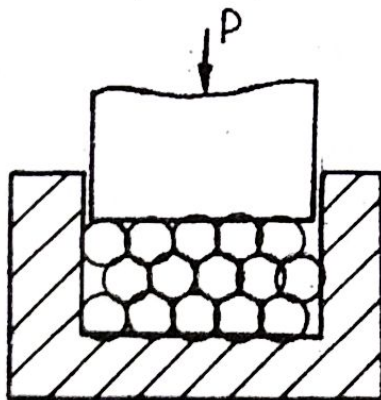


Рис. 1. Схема образования площадок фрикционного контакта при деформировании дисперсных композитов.

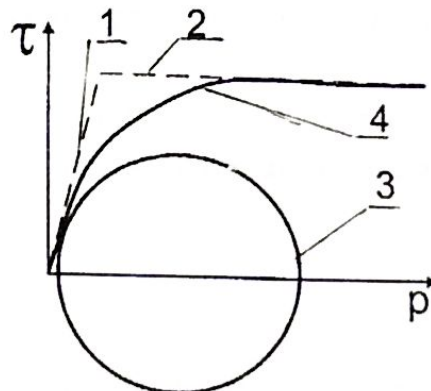


Рис. 2. Исходная расчетная схема сдвига.

1 - зона применимости закона трения Кулона;  
2 - зона применимости закона трения Зибеля;  
3 - круг Мора;  
4 - реальная зависимость удельных сил трения от давления (огибающая кругов Мора).



С целью упрощения расчетов в работе использован метод кусочно-линейных аппроксимаций. Принято, что до достижения давлений, равных пределу текучести наполнителя, выполняется закон трения Кулона, а в области более высоких давлений - закон трения Зибеля для насыщенного пластического контакта.

Такой подход не только упрощает расчетную схему при сохранении достаточной для практики точности расчетов, но и показывает, что для оценки условий сдвига при разгрузке и повторном нагружении высоконаполненных композиций может быть использован критерий, аналогичный по форме записи энергетическому критерию текучести.

Экспериментальные исследования проводили на примере наиболее массового представителя высоконаполненных материалов - пресскомпозициях древесных.

Объектом исследования явились композиты, содержащие крупнодисперсные частицы длиной 5-15 мм, толщиной 0,2-2 мм (дуб, сосна, береза, ольха, осина) различного фракционного состава. В качестве связующего использовали производимый в больших объемах промышленностью порошкообразный полимер - поливинилхлорид (ПВХ) эмульсионный (ГОСТ 14039-78), его отходы (ТУ 6-05-05-40-76) и суспензионный (ГОСТ 14039-78).

В качестве целевых и функциональных добавок использовали: диоктилфталат и дибутилфталат (ГОСТ 8228-77), парафин (ТУ 6-09-3687-74), жидкое стекло (ГОСТ 13078-81), гудрон соапстока черно-хлопкового масла и растительного жира (ТУ 205 БССР 669-82), цинк стеариновокислый (ТУ 6-09-3567-75), кальций стеариновокислый (ТУ 6-14-722-76), отходы кордных нитей, предварительно обработанные  $\epsilon$ -капролактамом (МРТУ 6-09-32-62), фосфополугидрат сульфата кальция - отходы химического завода, гидролизный лигнин - отходы гидролизного завода, измельченные отходы листового ПВХ, полисилоксановую жидкость марок ГЖ-94 (ГОСТ 10834-64), ПЭС-5 (ГОСТ 13004-67), ПМС-200 (ГОСТ 13032-77), масло минеральное МС-20 (ГОСТ 21743-76), полиэфирный лак (ТУ 6-10-791-79), краску масляную МА-25 (ГОСТ 10503-71).

Образцы для испытаний изготавливали на экструдере S-90 фирмы "Reifenhauser" (ФРГ). Ряд экспериментов проводили на экструдерах марки ЕНС.1.90 (ГДР) и ЧП-90x25 (СССР). При исследовании связи структуры и свойств композитов и изделий использовали методы дифференциально-термического анализа (дериватограф ОД-102) и оптической микроскопии (микроскопы NU-2, МПС-2). Физико-механические свойства изделий определяли по соответствующим стандартам. Текучесть определяли по ГОСТ 11368-79. Износостойкость материалов оценивали по линейному износу образцов (призма с основанием 15x15 мм и высотой 10 мм) на машине АРGi. Коэффициент трения определяли по схеме вал-частичный вкладыш на машинах трения МИ-10 при давлениях 0,1-3 МПа и скоростях 0,5-5 м/с. Прочность адгезионного соединения полимер - древесина оценивали методом сдвига пластин из шпона, склеенных между обогреваемыми плитами. Испытания на атмосферостойкость проводили



в камере искусственной погоды ИП-1-3, низкотемпературном шкафу HGL-250-70 и термостате MiM по режимам, включающим дифференциальное воздействие атмосферных факторов, а также в условиях естественного воздействия по ГОСТ 17170-71. Коробление и ползучесть древеснополимерных изделий изучали с помощью специально изготовленных приспособлений. Триботехнические характеристики прессккомпозиций при переработке определяли с использованием метода сжимающей пластовискозиметрии, а также при помощи специально разработанного экспресс-трибометра, состоящего из гидравлического механизма нагружения и динамометрического механизма сдвига. Область рабочих давлений - до 430 МПа, область рабочих температур - до 200°C. Силовые параметры процессов экструзии определяли на экструзиографе "Plasticorder PLV 340" фирмы "Брабендер", приборе "Rheocord-90" фирмы "Haake" (ФРГ), а также на экструдере марки S90 фирмы "Reifenhauser" (ФРГ) с использованием наборной экструзионной головки. Полученные экспериментальные данные статистически обработаны и представлены в виде графиков и таблиц.

**Третья глава** посвящена теоретическому анализу процессов экструзии высоконаполненных древеснополимерных композитов, расчету параметров оборудования и оснастки.

Работоспособность экструзионного оборудования и производительность процессов экструзии зависят от многих факторов, среди которых одним из важнейших является конструкция червяка. Для промышленных термопластов научно обоснованные рекомендации для проектирования червяков в основном известны. Для высоконаполненных материалов типа древесных прессккомпозиций они практически отсутствуют. Существующие методики расчета шага винтовой линии червяка, основанные на гидродинамической теории вязкой жидкости, в данном случае неприемлемы, поскольку, согласно имеющимся экспериментальным данным, высоконаполненные материалы, в особенности с волокнистым наполнителем, перемещаются вдоль винтового канала преимущественно в пробкообразном режиме. Сдвиговые явления наблюдаются лишь в тонких пристенных слоях связующего, а также в короткой зоне входа в профилирующий канал. В связи с этим в диссертации граничные условия на поверхностях скольжения композиции по червяку и цилиндру сформулированы на основе законов трибомеханики с учетом насыщения контактных поверхностей в зонах сжатия и выдавливания.

Дифференциальное уравнение равновесия элементарного объема материала длиной  $dz$ , находящегося в винтовом канале червяка диаметром  $D$ , глубиной  $h$ , шириной гребня витка  $B$  с углом подъема  $\varphi$  винтовой линии по среднему диаметру с удельными силами трения по цилиндру  $\tau_1$  и червяку  $\tau_2$  имеет вид:

$$\frac{d\sigma}{dz} = \frac{\tau_1}{D \cdot Kh \cdot (\pi g \varphi - K_s)} \left[ \left( \pi - \frac{K_s}{\sin \varphi} \right) - \frac{\pi}{\cos \varphi} \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1} \cdot (1 - 2Kh) - \frac{\tau_2}{\tau_1} \cdot \frac{2Kh - K_s}{\sin \varphi \cdot \cos \varphi} \right], \quad (7)$$

где  $\sigma$  - давление экструзии в рассматриваемой точке;

$K_h = h/D$  - коэффициент глубины канала;



$K_B = B/D$  - коэффициент ширины гребня витка.

Непосредственное интегрирование полученного дифференциального уравнения затруднено, поскольку неизвестен закон изменения удельных сил трения  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , особенно в зоне загрузки и сжатия, где переменными величинами являются не только осевые и боковые давления, но и температура рабочих поверхностей. Приводимые в ряде работ приближенные решения, основанные на законе трения Кулона, справедливы лишь для небольшого участка длины червяка вблизи загрузочного отверстия, где рабочие давления малы в сравнении с твердостью перерабатываемого материала.

В диссертации предложено два новых подхода к расчету оптимальных параметров червяка на основе приведенного выше уравнения без применения упрощающих предпосылок и осреднений.

Сущность первого подхода состоит в определении угла подъема винтовой линии, обеспечивающего работоспособность экструдера при наиболее неблагоприятном соотношении удельных сил трения по червяку и цилиндру (критерий максимальной транспортирующей способности). Из условия положительного прироста давления по длине червяка ( $d\sigma/dz > 0$ ) следует, что отношение удельных сил трения прессконпозиции по червяку  $\tau_2$  к удельным силам трения по цилиндру  $\tau_1$ , должно удовлетворять неравенству

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} \leq \frac{\pi \sin \varphi - K_a}{(\pi - 2Kh) \sin \varphi + 2Kh - K_a} \quad (8)$$

Расчеты показывают, что для наиболее часто используемых значений  $K_B = 0,1$ ,  $Kh = 0,05-0,1$  соотношение  $\tau_2/\tau_1$  составляет:  $\tau_2/\tau_1 < 0,92 \dots 0,96$  (рис. 3).

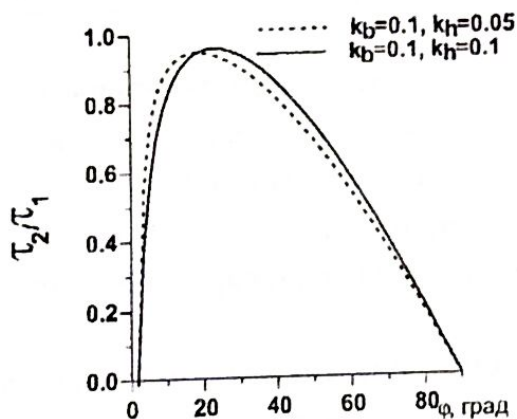


Рис. 3. Зависимость предельных значений соотношения удельных сил трения по червяку и цилиндру от угла подъема винтовой линии червяка.

Исследование отношения  $\tau_2/\tau_1$  на экстремум по  $\varphi$  приводит к следующему решению:

$$\sin \varphi = -\frac{2}{3} \cdot \frac{2Kh - K_a}{\pi - 2Kh} + \sqrt[3]{-\frac{M}{2} + \sqrt{Q}} + \sqrt[3]{-\frac{M}{2} - \sqrt{Q}}, \quad (9)$$

где

$$M = \frac{2}{27} \left[ \frac{2(2Kh - K_s)}{\pi - 2Kh} \right]^3 - \frac{2K_s}{\pi} \left( \frac{2Kh - K_s}{\pi - 2Kh} \right)^2 - \frac{2Kh(\pi - K_s)}{\pi(\pi - 2Kh)}, \quad (9a)$$

$$Q = \left( \frac{N}{3} \right)^3 + \left( \frac{M}{2} \right)^2; \quad N = -\frac{1}{3} \left[ \frac{2(2Kh - K_s)}{\pi - 2Kh} \right]^2 + \frac{K_s}{\pi} \cdot \frac{(2Kh - K_s)}{\pi - 2Kh}. \quad (9b)$$

Результаты расчета червяков по критерию максимальной транспортирующей способности в сопоставлении с экспериментальными данными представлены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные и экспериментальные значения шага винтовой линии червяка

Зона червяка	Шаг винтовой линии ( $t/D$ ) в зависимости от типа червяка		
	универсальный для гранулированных материалов ( $K_H=0,05$ ; $K_B=0,1$ )		специальный для древесных пресскomпозиций (расчет)
	расчет	экспериментальный	
Исполнительная (выдавливания, дозирования)	1,0	1,0	0,78
Подготовительная (загрузки)	1,17	1,0	1,17

Совпадение расчетных данных с экспериментальными значениями для гранулированных материалов для основной зоны червяка - зоны выдавливания свидетельствует о корректности принятой расчетной схемы и правомочности сделанных на основе расчетов выводов о том, что червяки для древесных пресскomпозиций должны иметь шаг меньше, чем для гранулированных термопластов.

Второй подход состоит в определении угла подъема винтовой линии червяка, обеспечивающего максимальный градиент давления по длине винтового канала. Для этого исследовали на экстремум по  $\varphi$  функцию прироста давления экструзии.

В аналитическом виде решение представлено как:

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{\left( \frac{\pi}{2} \sin 2\varphi - K_s \cos \varphi \right) (\pi \sin 2\varphi - K_s \cos 2\varphi) - \frac{1}{2} (\pi \cos 2\varphi - K_s \sin 2\varphi) (\pi - \pi \cos 2\varphi - K_s \sin 2\varphi)}{\frac{\pi}{2} (1 - 2K_s) (1 - \cos 2\varphi) (\pi \cos \varphi + K_s \sin \varphi) + (2K_s - K_s) (\pi \sin 2\varphi - K_s \cos 2\varphi)} \quad (10)$$



Для практического использования этой зависимости разработана методика определения соотношения  $\tau_2/\tau_1$  из опытов на выдавливание материала при открытом выходном отверстии. Экспериментально измеряются производительность экструдера  $Q_m$ , плотность материала  $\rho$ , частота вращения червяка  $n$  (об/мин), а затем рассчитывается соотношение  $\tau_2/\tau_1$  по приводимой в диссертации формуле.

Расчеты и эксперименты показали, что фактические значения удельных сил трения в приработанном оборудовании достаточно высокие и составляют  $\tau_2/\tau_1 = 0,86...0,92$ . При этих значениях  $\tau_2/\tau_1$  результаты расчетов по критериям максимальной транспортирующей способности и максимального давления экструзии близки, что делает расчеты практически равнозначными. Существенные отличия имеются только для полированных червяков с заметно меньшим, чем по цилиндру, коэффициентом трения. Однако в результате приработки оборудования поверхности червяка и цилиндра приобретают практически одинаковую шероховатость, что сближает значения коэффициентов трения.

Расчеты показывают, что применение специализированного червяка ( $t=0,8D$ ) с глубокой нарезкой позволяет повышать давление экструзии в 1,25 раза, а для червяка с мелкой нарезкой - в 3,1 раза в сравнении с универсальным червяком ( $t=D$ ).

Эффективность применения специализированных червяков подтверждается сравнением производительности и потребляемой мощности экструдера ЧП 90x25 с универсальным и специализированным с глубокой нарезкой ( $K_H=0,05$ ) червяками при переработке пресскомпозиций древесных (табл. 2).

Таблица 2

## Результаты сравнительных испытаний червяков

Шаг винтовой линии, $t/D$	Угол винтовой линии по среднему диаметру	Производительность, кг/час	Потребляемая мощность кВт
1,0	18°36'	53	10,4
0,78	14°16'	62	9,5

Примечание: частота вращения червяка  $n=18$  об./мин.

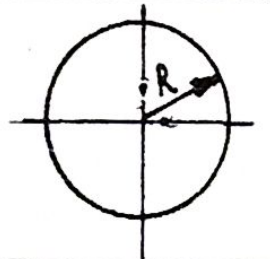
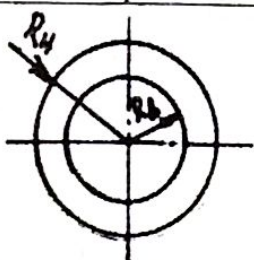
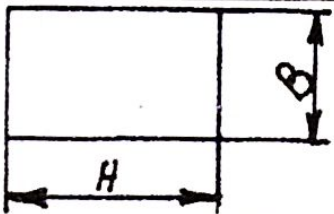
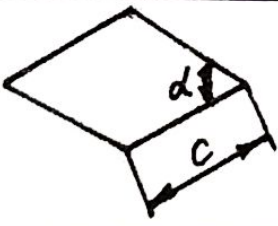
Фрикционное взаимодействие в дисперсных прессматериалах приводит к тому, что они ведут себя в процессах деформирования не как вязкие жидкости (выполнение закона Паскаля о равномерной передаче давления по всем направлениям), а подобно твердому телу. При этом в профилирующей части экс-

трузионного канала отчетливо проявляются две реологические зоны - зона низких давлений (твердая пробка вблизи выхода из экструзионного канала) и зона высоких давлений (вязкопластического состояния) на входе в канал (рис. 4). Поскольку прилипание пресскомпозиций к стенкам канала отсутствует, то процесс экструзии происходит в режиме пристенного (пробкообразного) скольжения.

При теоретическом анализе рассматривали композиции, характеризующиеся сдвиговой прочностью  $\tau_s$ , модулем упругости  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\nu$ . Удельные силы трения на стенках канала принимали равными  $\tau_0$ .

В результате исследований предложены формулы для расчета длины  $L_{12}$  твердой пробки (табл. 3), распределения давлений по длине канала с учетом реологических состояний, а также значений предельных сил трения  $[\tau]$ , превышение которых приводит к распространению зоны вязкопластического состояния на всю длину канала.

Таблица 3  
Длина зоны твердой пробки  $L_{12}$  для основных видов экструзионных каналов

Форма сечения канала	Длина зоны низких давлений
	$L_{12} = \frac{1-\nu}{1-2\nu} R \sqrt{\left[\left(\frac{\tau_s}{\tau_0}\right)^2 - \frac{3}{4}\right]}$
	$L = (R_н - R_в) \cdot \frac{1-\nu}{1-2\nu} \sqrt{\left[\left(\frac{\tau_s}{\tau_0}\right)^2 - \frac{3}{4}\right]}$
	$L_{12} = \frac{1-\nu}{1-2\nu} \cdot \frac{B+H}{B \cdot H} \sqrt{\left[\left(\frac{\tau_s}{\tau_0}\right)^2 - \frac{3}{2}\right]}$
	$L_{12} = \frac{1-\nu}{1-2\nu} \cdot C \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \sqrt{\left[\left(\frac{\tau_s}{\tau_0} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}\right)^2 - \frac{3}{4}\right]}$



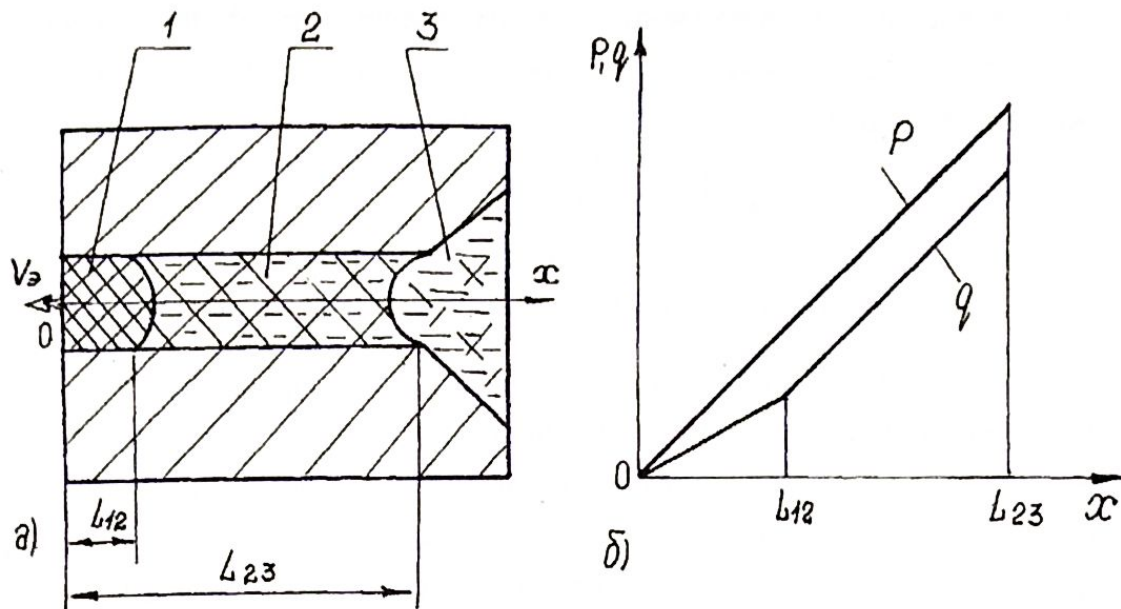


Рис. 4. Реологические зоны экструзионного канала: а - схема расположения зон в канале; б - схема распределения осевого  $p$  и бокового  $q$  давлений по длине канала; 1 - зона низких давлений (твердая пробка); 2 - зона высоких давлений (вязкопластическая пробка); 3 - очаг сдвиговых деформаций.

Полученные выше аналитические зависимости хорошо согласуются с экспериментальными данными. Они позволяют производить инженерный расчет формирующей оснастки и силовых параметров процессов экструзии древеснополимерных пресскомпозиций. Из результатов расчетов следует, что при экструзии древеснополимерных пресскомпозиций профили с острыми углами при вершине нетехнологичны. В этом случае исчезновение режима пробкообразного скольжения возможно при удельных силах трения, меньших, чем сдвиговая прочность пресскомпозиции.

Экструзия высоконаполненных прессматериалов, в частности, древопластиков, сопровождается нередко возникновением в формируемом профиле поверхностных трещин, направленных наклонно к продольной оси. Визуальные наблюдения, а также охлаждение профиля вместе с формирующей головкой с последующим раскрытием разъемных матриц свидетельствуют о том, что процесс трещинообразования начинается непосредственно на выходе из экструзионного канала либо в примыкающей к нему зоне.

В связи с неприемлемостью теории эластической турбулентности для анализа условий возникновения трещин в высоконаполненных материалах рассматривали напряженное состояние пресскомпозиции на площадках, расположенных под углом  $\alpha$  к оси экструзионного канала. На элемент материала действуют осевое давление экструзии  $p$ , боковое давление  $q$ , касательные напряжения  $\tau_{xy}=\tau_{yx}$ ,  $\tau_{zx}=\tau_{xz}$ , вызванные действием сил трения композита о стенки экструзионного канала, нормальные  $\sigma_\alpha$  и касательные  $\tau_\alpha$  напряжения на наклонной площадке. Другие компоненты тензора напряжений в силу специфики процесса экструзии равны нулю. Выбор осей координат  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  произведен таким образом, чтобы начало координат  $O$  совпадало с выходом из экструзионного кана-

ла, а ось  $OX$  проходила через центр тяжести сечения. Из условия равновесия получены формулы для расчета нормальных  $\sigma_\alpha$  и касательных  $\tau_\alpha$  напряжений на наклонных площадках:

$$\sigma_\alpha = p_{(x)} \left( 1 - \frac{1-2\nu}{1-\nu} \cos^2 \alpha \right) - \tau \sin 2\alpha, \quad (11)$$

$$\tau_\alpha = \tau \cos 2\alpha - \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} p_{(x)} \sin \alpha. \quad (12)$$

Из этих формул следует, что вблизи выхода из экструзионной головки ( $p \rightarrow 0$ ) под действием сил трения в экструзионном канале на наклонных площадках возникает зона растягивающих напряжений. Длина этой зоны зависит от коэффициента Пуассона перерабатываемого материала  $\nu$ , периметра  $S$  и площади сечения  $F$  экструзионного канала, а также угла  $\alpha$  наклона площадки относительно оси экструзионного канала (рис. 5).

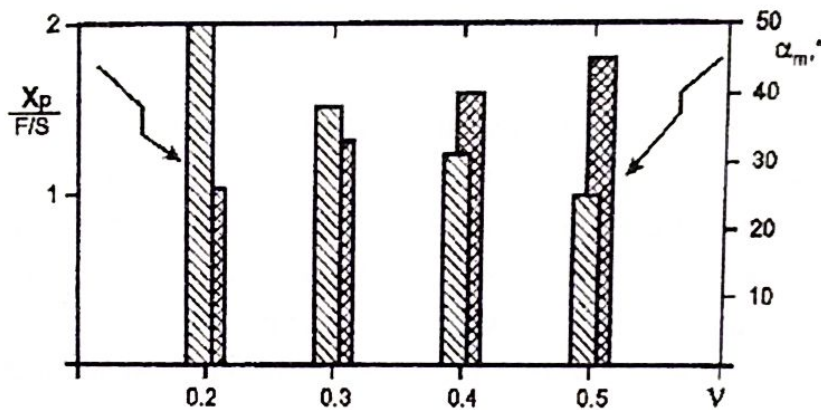
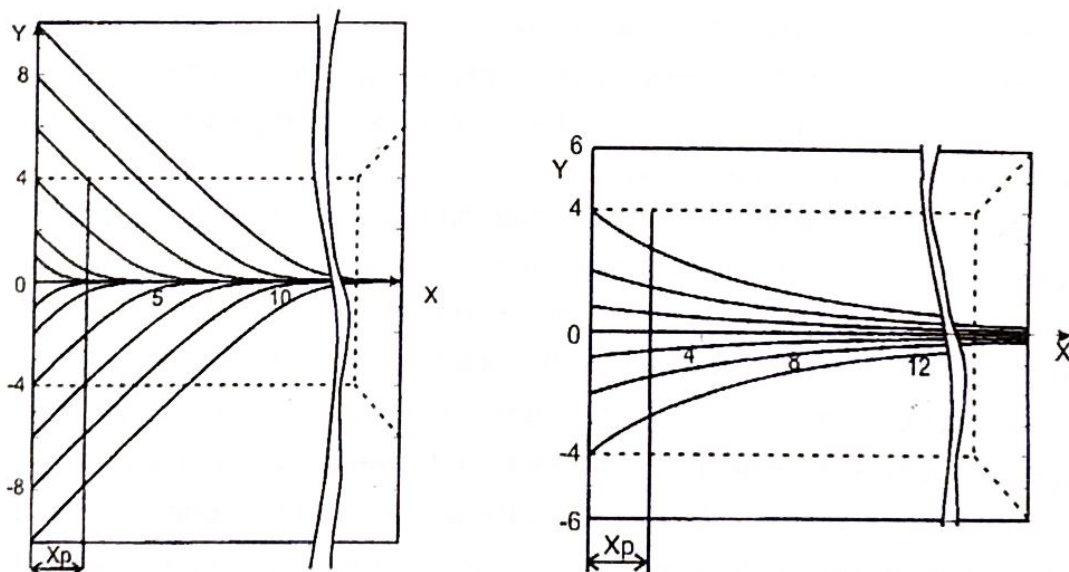


Рис. 5. Значения относительной длины зоны растягивающих напряжений  $\frac{X_p}{F/S}$  и соответствующих углов наклона площадок  $\alpha_m$  в зависимости от коэффициента Пуассона  $\nu$  перерабатываемого материала.



а) б)  
Рис. 6. Траектории главных растягивающих напряжений для кругового экструзионного канала радиусом 4 мм: а - упругое, б - вязкопластическое состояние материала.



По методу Рунге-Кутта рассчитаны траектории главных растягивающих напряжений в пресскомпозициях для схем пробкообразного скольжения в упругом (рис. 6.а) и вязкопластическом (рис. 6.б) состояниях. Сопоставление траекторий главных растягивающих напряжений с траекториями трещин в экструдированных изделиях показывает, что возникновение трещин происходит тогда, когда область растягивающих напряжений накладывается на зону вязкопластического состояния пресскомпозиции. Предложена методика расчета предельных значений удельных сил трения по критерию отсутствия наклонных трещин в материале.

Процессы экструзии неосесимметричных профилей характеризуются концевым эффектом, проявляющимся в виде искривления изделия на выходе из экструзионного канала. Попытки выравнивания экструдата с использованием направляющих или калибрующих устройств оказываются малоэффективными вследствие растрескивания изделия со стороны вогнутости. Анализ напряженно-деформированного состояния материала показывает, что этот концевой эффект обусловлен фрикционным взаимодействием композиции со стенками канала. Поскольку имеет место насыщенный пластический контакт, то удельные силы трения на рабочих поверхностях постоянны и распределены по контуру равномерно. Однако равномерное по контуру распределение сил трения в случае неосесимметричного сечения приводит к неравномерному напряженно-деформированному состоянию, поскольку равнодействующая сил трения приложена не в центре тяжести сечения, а в центре тяжести контура, охватывающего это сечение (внецентренное сжатие).

Предложена методика приближенного расчета поверхности раздела реологических зон экструзионного канала, а также неравномерности деформаций и величины компенсирующего внецентренного подпора.

Концевой эффект на входе в экструзионный канал проявляется в образовании зон, где отсутствует течение расплава ("мертвых зон"). Эксперименты по последовательному продавливанию композиций с различной окраской свидетельствуют о том, что внутренний срез в композиции и образование "мертвых зон" наблюдаются лишь при определенных значениях углов матрицы и удельных сил трения композиции о стенки канала.

Анализ известных решений задач о деформировании пластичных сред в каналах переменного сечения показал, что широко используемое уравнение Янга-Кобаяши не пригодно для описания условий образования зон затрудненной деформации. Использование же подхода Перлина-Райтбарга позволило получить решение, не только предсказывающее образование "мертвых зон", но и дающее хорошее согласование экспериментальных значений угла внутреннего среза в материале (48-52°) с расчетными (49°) в области давлений переработки 20-25 МПа.

Специфической особенностью червячной экструзии высоконаполненных композитов является возникновение застойной зоны вблизи наконечника червяка. Существующие решения задач течения пластичных, зернисто-связанных и



вязких сред не предсказывают возможности существования такого рода застойных зон. В связи с изложенным было выдвинуто предположение о возникновении такой зоны по механизму отжима расплавом к червяку "жесткого" конического сердечника из перерабатываемого материала. На боковой поверхности конического сердечника происходит внутренний срез в композите, а удельные силы трения равны сдвиговой прочности перерабатываемого материала. Экспериментально определенные значения угла при вершине застойного конуса, измеренные по осевому срезу деформированного в конусе материала, составляют 50-60°. Такой же угол следует принимать для конусности наконечника червяка.

Рассмотрены также трибореологические условия среза гребня в результате образования застойных зон в пазах экструзионного канала, предложены рекомендации по конструированию изделий и формующей оснастки, исключающей образование таких зон.

**Четвертая глава** посвящена изучению взаимосвязи технологических свойств и режимов переработки древеснополимерных пресскомпозиций методом экструзии, а также разработке соответствующих процессов, оборудования и оснастки.

Если при экструзии профилей из ненаполненных термопластов давление экструзии составляет 1-3 МПа, то для древеснополимерных пресскомпозиций, как показали проведенные эксперименты, оно может достигать 60-70 МПа и более, в зависимости от содержания и дисперсности древесных частиц, а также параметров экструзионного канала. Введением специальных добавок и повышением содержания связующего можно снизить давление до 20-25 МПа. При дальнейшем снижении давления не обеспечивается требуемая плотность и прочность изделий. Аналогично изменяется и крутящий момент на валу привода червяка (табл. 4).

Таблица 4

Влияние вида смазки на силовые параметры экструзии пресскомпозиции ПД-П на установке "Rheocord-90"

Вид и содержание смазки. %	Крутящий момент, Нм	Давление экструзии на входе в канал, МПа	Давление экструзии в середине канала, МПа
Без смазки	80-104	60-70	33-40
Стеарин (2%)	56-60	40-43	21-23
Стеарин (4%)	46-54	28-30	14-16
Стеарат кальция (2%)	30-40	40-48	18-22
Стеарат цинка (2%)	30-40	45-56	20-26
Олеат меди (2%)	22-24	36-42	18-21
Стеарат цинка (2%) + диоктилфталат (6%)	24-30	25-27	12-14
Стеарат цинка (2%) + диоктилфталат (8%)	20-24	17-22	9-11

С увеличением содержания древесных частиц и уменьшением их размеров давление экструзии возрастает.



Твердые смазки типа стеарата цинка, существенно снижая трение в композите, выполняют двойную роль. В связи с тем, что в древесно-поливинилхлоридных композициях при термическом воздействии происходит отщепление от поливинилхлорида хлористого водорода, катализирующего процесс термодеструкции, при взаимодействии стеарата металла с хлористым водородом образуется хлорид металла и стеариновая кислота (две молекулы кислоты на каждую молекулу стеарата двухвалентного металла). Карбоксильные группы молекул стеариновой кислоты по водородным связям взаимодействуют с адгезионно-активными гидроксильными группами целлюлозы и лигнина, ослабляя адгезионное взаимодействие между связующими и наполнителем, а в итоге - физико-механические свойства композита. С этих позиций содержание стеаратов металлов, как показывают эксперименты, не должно превышать 1-3% от массы композиции.

Диоктилфталат (или его аналоги), являясь маслянистой жидкостью, снижает силы трения в композите и повышает показатели его текучести (табл. 5). Эксперименты показывают, что в области концентраций диоктилфталата до 4-5 масс. % проявляется "плато" эксплуатационных свойств, что может быть объяснено взаимной компенсацией происходящих по разным механизмам процессов пластификации и дисперсного упрочнения. При содержании диоктилфталата свыше 6-7% масс. процессы пластификации становятся доминирующими, прочностные показатели снижаются, а ударная вязкость возрастает.

Таблица 5

Параметры текучести древеснополивинилхлоридной пресскomпозиции ПД-П, определенные с использованием сжимающего пластометра

Наименование показателя	Содержание диоктилфталата. масс. %			
	2	4	6	8
Давление начала течения, МПа	10,13	8,82	5,61	5,47
Приведенный диаметр, мм	90,3	92,7	101,5	103,6
Сдвиговая прочность, МПа	0,367	0,324	0,237	0,210
Приведенная вязкость, МПа.с	46,2	38,4	29,3	28,7

Взаимосвязь плотности композита  $\rho$  с давлением переработки  $p$ , как показывают эксперименты, может быть описана зависимостью, аналогичной формуле Кунина-Юрченко

$$p = \sigma_s \ln \frac{\rho_{np} - \rho_0}{\rho_{np} - \rho}, \quad (13)$$

где  $\sigma_s$  - предел текучести древесины;

$\rho_{np}$  и  $\rho_0$  - соответственно предельная и исходная (насыпная) плотность пресскomпозиций.

Пористое строение древесных частиц приводит к тому, что их плотность и объемное содержание изменяются в процессах переработки. Указанное явление было использовано для оценки давления в промышленных экструдерах, не оснащенных соответствующими датчиками давления. При этом, исходя из состава



пресскомпозиции и плотности входящих в нее компонентов, рассчитывается плотность древесных частиц в изделии, а по ее значению - давление переработки.

Исследование взаимосвязи давления экструзии с длиной экструзионного канала показало, что для древеснополимерных пресскомпозиций с достаточной точностью экспериментальные данные могут быть аппроксимированы линейной зависимостью:

$$p = \tau_0 \frac{SL}{F}, \quad (14)$$

где  $\tau_0$  - удельные силы трения на поверхности контакта пресскомпозиции с формирующей оснасткой;

$S, F$  - периметр и площадь сечения канала соответственно.

Это свидетельствует о том, что в профилирующем канале реализуются условия насыщенного пластического контакта. Временные эффекты, обуславливающие релаксационные явления в материале, существенны лишь при степенях наполнения до 45-50% по объему. При более высоких степенях наполнения пресскомпозиции ведут себя подобно пористому пластически деформируемому телу.

Обеспечение требуемого температурного режима работы червяка предполагает необходимость учета тепла, не только подводимого от внешних нагревательных элементов, но и возникающего в результате диссипации механической энергии привода. Трибологические аспекты этого вопроса применительно к высоконаполненным композициям и, в частности, вклад сил трения в саморазогрев материала, не освещены в научно-технической литературе даже в оценочной постановке, что и предопределило необходимость проведения исследований. В условиях насыщенного пластического контакта работа сил трения на единицу поверхности в единицу времени  $q$  определяется произведением удельных сил трения на скорость взаимного скольжения контактирующих тел. При производительности  $Q_m$  экструдера с червяком диаметром  $D$ , глубиной нарезки  $h$  и шириной гребня витка  $B$  значения  $q$  на рабочих органах равно:

червяк

$$q = \frac{Q_m \tau_2}{\rho \cdot h \cdot \cos \varphi (\pi D \operatorname{tg} \varphi - B)}, \quad (15a)$$

цилиндр

$$q_u = \tau_1 \sqrt{\left(\frac{\pi D n}{60}\right)^2 + \left[\frac{Q_m}{\rho \cdot h \cdot \cos \varphi (\pi D \operatorname{tg} \varphi - B)}\right]^2} - \frac{\pi D n}{30} \cdot \frac{Q_m}{\rho \cdot h (\pi D \operatorname{tg} \varphi - B)}, \quad (15b)$$

наконечник червяка

$$q_u = \tau_2 \sqrt{\left(\frac{\pi D n}{60}\right)^2 + \left(\frac{Q_m}{\pi D \rho h}\right)^2}, \quad (15b)$$



где  $\rho$  - плотность формуемого материала;

$\tau_2$  - удельные силы трения на поверхности червяка;

$\tau_1$  - удельные силы трения на поверхности цилиндра;

$n$  - частота вращения червяка.

Расчеты показывают, что при экструзии материалов типа древесных пресскопозиций марки ПД-П энергия, превращаемая в тепло и рассеиваемая силами трения, на поверхности червяка составляет 4-5 кВт/м<sup>2</sup>, на поверхности цилиндра 9-11 кВт/м<sup>2</sup>, а в зоне наконечника-до 17 кВт/м<sup>2</sup>.

При этом в экспериментах наблюдается самопроизвольный прирост температуры в зоне сжатия до 30°C, сопровождаемый преждевременным плавлением материала и его пробуксовыванием (при отсутствии принудительного охлаждения червяка) а в зоне выдавливания, особенно вблизи наконечника - термодеструкция материала.

С учетом результатов исследований предложены новые конструкции систем термостатирования червяка и его наконечника, способствующие минимизации термодеструктивных явлений в перерабатываемом материале под действием сил трения. Обоснована необходимость применения технологических смазок при экструзии.

Высокая гигроскопичность древесных частиц предопределяет необходимость их сушки перед переработкой до влажности не более 1,5-2%. При более высокой влажности снижаются свойства материала и даже возможно растрескивание изделий на выходе из экструзионного канала.

Эффективным способом управления свойствами изделий является использование в композициях связующих на основе смеси полимеров одинаковой природы, но с разными реологическими свойствами. Так, использование пластифицированных примесей приводит, как показывают эксперименты, к выносу маловязкой составляющей на поверхность, увеличению концентрации связующего в приповерхностных слоях, росту прочности и водостойкости материала. Изменение свойств поверхностного слоя достигается также введением в композицию мелкодисперсных частиц с более высокой объемной массой, чем основные компоненты. Так, введение добавок полугидрата фосфогипса приводит к его преимущественной концентрации в приповерхностных слоях, увеличивая сцепление древесных частиц между собой, твердость и износостойкость поверхностного слоя.

При использовании в качестве армирующих наполнителей отходов капроновых нитей эффективным оказалось введение в композицию мономера капрона -  $\epsilon$ -капролактама. Расплавляясь при температуре около 62°C,  $\epsilon$ -капролактама оказывает хорошее смазывающее действие на систему. Одновременно, взаимодействуя с кордом в присутствии паров влаги, находящейся в лигноцеллюлозных частицах,  $\epsilon$ -капролактама активизирует поверхность капроновых нитей, приводя к повышению адгезии на 25-30 %.



Пористое строение лигноцеллюлозного наполнителя создает благоприятные предпосылки для введения в поры смазок, которые выполняют эту функцию не только в процессе переработки, но и при эксплуатации изделий. Однако объемное наполнение смазками снижает прочностные свойства материала, в связи с чем разработаны способы и устройства для поверхностного модифицирования изделий в процессе переработки композиции.

Полученные результаты составили основу для ряда изобретений, направленных на улучшение процесса переработки высоконаполненных композитов с лигноцеллюлозным наполнителем.

Пятая глава посвящена разработке и промышленному освоению процессов червячной экструзии высоконаполненных древеснополимерных композиций. Основные свойства разработанных древеснополимерных материалов в сравнении с зарубежными аналогами приведены в табл. 6. Из этих данных видно, что по эксплуатационным показателям разработанные материалы находятся на уровне зарубежных аналогов.

Таблица 6

Свойства экструзионных древопластиков в сравнении с зарубежными аналогами

Показатель	МАТЕРИАЛЫ					
	Дарволит (Болгария)	Бизолен (ФРГ)	Лигноцелл (ФРГ)	Экструзионные древопластики		
				Базовый	Инженерный	Специальный
Плотность кг/м <sup>3</sup> ;	900-1400	850-1000	1350-1370	1100-1250	1200-1350	1340
Прочность при изгибе, МПа;	35	21	633-82	15-35	40-50	60
Ударная вязкость кДж/м <sup>2</sup> ;	3	4-6	1,8	4	5-16	8
Водопоглощение за 24 часа, %	3	-	1,8	10-12	4-5	1,5

Среди комплекса вопросов, связанных с промышленным использованием результатов исследований и разработок, описываются технологические процессы получения строительных (плинтус, поручень, наличник, облицовочная рейка) и машиностроительных (направляющие скребковых и опоры скольжения безроликовых ленточных конвейеров) изделий. Приводятся рекомендации по расчету изделий с учетом термических и влажностных напряжений. Дана информация об опытно-промышленной проверке результатов исследований и разработок и об их технико-экономической эффективности.

В приложении содержатся нормативно-технические документы для организации промышленного производства (технические условия ТУ 88 БССР 57-88 "Пресскомпозиции древесные" и технические условия ТУ 205 БССР 607-011-88 "Изделия погонажные из пресскомпозиции древесной", технологический регла-



мент, заключения пожарных и санитарных служб, а также акты, подтверждающие освоение выпуска древеснополимерных изделий на предприятиях Беларуси и России).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплекс выполненных в диссертации теоретических и экспериментальных исследований позволил получить новые представления о процессах экструзии высоконаполненных композиционных материалов, учитывающие влияние межчастичного и внешнего трения на режимы переработки и качество получаемых изделий, что внесло существенный вклад в развитие теории и практики экструзии и позволило решить крупную прикладную проблему - разработать основы инженерных расчетов процессов экструзии древеснополимерных пресскомпозиций и формирующих элементов экструзионного оборудования.

1. Предложен новый метод анализа процессов деформирования древеснополимерных пресскомпозиций, основанный на нелинейной феноменологической модели фрикционного контакта, удовлетворяющей в области низких давлений закону трения Кулона, а в области высоких давлений - закону трения Зибеля для насыщенного пластического контакта /2, 39, 40, 41, 50/.

2. Теоретически и экспериментально исследовано движение древеснополимерных пресскомпозиций в винтовом канале червяка в режиме пристенного (пробкообразного) скольжения. Разработана расчетно-экспериментальная методика определения угла и шага винтовой линии червяка, обеспечивающих оптимальное фрикционное взаимодействие в системе червяк - цилиндр - пресскомпозиция и максимальный градиент развиваемого давления по длине червяка. Предложена методика оценки соотношения удельных сил трения пресскомпозиции по червяку и цилиндру для схемы насыщенного пластического контакта /2, 13, 23, 24, 28, 29, 30/.

3. Установлено, что при отсутствии технологических смазок силовые параметры процессов экструзии древеснополимерных пресскомпозиций на порядок превышают соответствующие показатели, характерные для переработки базовых связующих, снижая запас прочности технологического оборудования и оснастки. Одновременно наблюдается фрикционный разогрев материала и его термодеструкция. Предложены способы и устройства, позволяющие минимизировать деструкционные явления, вызванные дополнительным разогревом пресскомпозиций под действием сил трения /2, 28, 35, 46, 48, 51, 57, 59, 61, 62/.

4. Исследованы фрикционные условия экструзии древеснополимерных пресскомпозиций в режиме пристенного (пробкообразного) скольжения. Показано существование в канале вблизи его выхода зоны низких давлений, в которой отсутствует необратимое течение пресскомпозиции ("твердая пробка"). Для основных видов экструзионных каналов (кругового, кольцевого, прямоугольного и ромбовидного сечений) определены предельные значения удельных сил трения, превышение которых сопровождается исчезновением "твердой пробки" и распространением зоны вязкопластического состояния пресскомпозиции на всю длину экструзионного канала /19, 20, 21, 25, 26, 27, 31/.



5. Исследованы трибореологические эффекты при экструзии древеснополимерных пресскомпозиций (искривление и растрескивание изделий неосесимметричного профиля, образование "мертвых" зон на входе в матрицу и вблизи наконечника червяка, срез гребня). Предложены рекомендации по конструированию формующей оснастки, исключающие реализацию таких эффектов /2, 32, 43, 44, 47, 49/.

6. Показано, что под действием сил трения в экструзионном канале вблизи его выхода возникает область растягивающих напряжений на площадках, наклонных к оси канала. Разработана методика расчета максимальных значений этих напряжений, а также их траекторий для схем упругого и вязкопластического состояния пресскомпозиций. Установлено, что поверхностные дефекты в виде наклонных трещин возникают тогда, когда длина области растягивающих напряжений превышает длину "твердой" пробки в экструзионном канале. Для основных видов экструзионных каналов (кругового, кольцевого, прямоугольного и ромбовидного сечений) определены предельные значения удельных сил трения по критерию отсутствия наклонных трещин в получаемых изделиях /2, 22, 32, 42/.

7. Исследованы рецептурно-технологические аспекты управления параметрами фрикционного взаимодействия в древеснополивинилхлоридных пресскомпозициях при переработке методом экструзии. Проанализирована эффективность технологических смазок двойного назначения. Показано, что при использовании смазок-стабилизаторов типа стеаратов металлов при концентрациях свыше 3% масс. отмечается ухудшение адгезионного взаимодействия в системе древесина-поливинилхлорид, а при использовании жидких смазок с пластифицирующим эффектом типа диоктилфталата в диапазоне концентраций до 4-6% масс. обеспечивается существование "плато" свойств. Предложены способы улучшения перерабатываемости пресскомпозиций путем введения легкоплавких модификаторов, а также по механизму "отжима" маловязкой или эластифицированной составляющей /2, 4, 5, 8, 9, 14, 15, 16, 45, 53, 55, 60, 64, 68/.

8. Разработаны технологические процессы получения строительных и машиностроительных изделий из древеснополимерных пресскомпозиций методом экструзии. Предложены оригинальные конструкции технологического оборудования и оснастки для реализации таких процессов. Применительно к условиям промышленного производства разработана и утверждена нормативно-техническая документация (технические условия на пресскомпозиции и изделия из них, технологические регламенты, заключения пожарных и санитарных служб). Освоено промышленное производство древеснополимерных погонажных изделий на предприятиях Республики Беларусь и Российской Федерации /1, 3, 6, 7, 10, 11, 12, 17, 18, 33, 34, 36, 54, 58, 63, 65, 66, 67/.



## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Купчинов Б.И., Барсуков В.Г., Шаповалов В.М. Получение, свойства, эффективность применения погонажных изделий из древесных пресскомпозиций. -Минск: БелНИИНТИ, 1989.- 39 с.
2. Барсуков В.Г., Свириденко А.И. Технологическое трение при экструзии композитов. -Гродно, Изд-во ГрГУ, 1998.- 196 с.
3. Купчинов Б.И., Немогай Н.В., Барсуков В.Г. Методы получения и использования композитов на основе древесины в узлах трения. // Вестник машиностроения, 1980, N5.- с. 46-48.
4. Барсуков В.Г., Сергиенко В.П. Технологические характеристики древесных прессмасс и оптимальные режимы их переработки. // Расчет и контроль энерготехнологических параметров изготовления и переработки полимерных материалов. -М.: МД НТП, 1982.- с.60-64.
5. Барсуков В.Г., Шаповалов В.М., Костюков П.А., Емельяничков В.П. Исследование физико-механических свойств экструзионных древесных пластиков. // Пластики из растений. -М.: МПС, 1983.- с. 69-72.
6. Барсуков В.Г., Шаповалов В.М. Экструзионная технология погонажных изделий из древопластиков. // Материально-техническое снабжение. Серия 1. Экономия и рациональное использование сырьевых, топливно-энергетических и других материальных ресурсов. Научн.-техн. реф. сб. -М., 1984, вып.7. - с. 3-4.
7. Купчинов Б.И., Шаповалов В.М., Барсуков В.Г. Древеснополимерные материалы для погонажных изделий. // Строительные материалы. 1984, N10.- с. 13.
8. Купчинов Б.И., Шаповалов В.М., Барсуков В.Г. Исследование влияния рецептурно-технологических факторов на адгезионное взаимодействие системы древесина - поливинилхлорид. // Известия АН БССР, 1986, №3.- с. 37-40.
9. Белый В.А., Купчинов Б.И., Барсуков В.Г., Шаповалов В.М. Переработка экструзией композиционных материалов на основе измельченной древесины и термопластов. // Пластмассы. 1987, N11.- с. 42-44.
10. Купчинов Б.И., Барсуков В.Г., Шаповалов В.М. Экструзионная технология получения древеснополимерных опор скольжения. // V Национальная конференция по механике и технологии композиционных материалов. -Варна, 1988.- с. 343-347.
11. Купчинов Б.И., Барсуков В.Г., Шаповалов В.М. Безотходная технология получения погонажных изделий из экструзионных древесных пластиков. // Строительство и архитектура БССР, 1989, №6.- с. 32-33.
12. Барсуков В.Г., Шаповалов В.М., Лапшина Е.М., Кудин С.В. Свойства композиционных материалов на основе ПВХ и лигноцеллюлозных волокон. // Пластмассы. 1991, №1.- с. 23-24.
13. Barsukov V.G., Kuptscinov B.I. Extrusion Anlage fur holzgefuelle Termoplaste. // Int. Simp. "Anlage fur Plastverarbeitung". -Brno, 1987.- p. 166-167.
14. Kupčinov B.I., Barsukov V.G., Šapovalov V.M., Rodnenkov V.G. Nove kompozitny materialy z drevenych trisek a pilin. // Plasty a kaučuk, 1988.- с. 136-139.



15. Купчинов Б.И., Барсуков В.Г., Шаповалов В.М. Лигноцеллюлозные прессконпозиции на основе модифицированных древесных частиц и термопластов. // "Modifikacija drevna'89". Materiyaly na VII Sympozium. -Puszczukovo, 1989.- p.137-142.
16. Барсуков В.Г., Шаповалов В.М., Лапшина Е.М., Губкин В.И. Композиционные отделочные материалы на основе древесных волокон и термопластов. // Строительные материалы, 1991, №5.- с. 18-20.
17. Барсуков В.Г., Шаповалов В.М. Новые композиции для отделки. // Строительство и архитектура Беларуси. 1992, №4.- с. 21-23.
18. Барсуков В.Г., Шаповалов В.М. О формоустойчивости экструзионных лигноцеллюлозных пластиков./ Ред. журн. "Весці АНБ", сер. фізіка-тэхнічных навук, -Мінск, 1991, Деп. в ВИНТИ, 14.01.91, №3977-В91.- 8 с.
19. Барсуков В.Г., Купчинов Б.И. Зона пробкообразного движения при экструзии высоконаполненных прессконпозиций. // Весці АНБ. Сер. фіз.-тэхн. навук, 1993, №3.- с. 14-16.
20. Барсуков В.Г. Расчет зоны пробкообразного движения при экструзии неосесимметричных изделий из древопластиков.// Modifikacija drevna'93". Materiyaly na IX Sympozium, -Poznan, 1993, tom 2.- p. 21-26.
21. Барсуков В.Г., Купчинов Б.И., Антонов В.П. Параметры зоны пробкообразного движения при экструзии неосесимметричных изделий из древопластиков. // Весці АНБ. Сер. фіз.-тэхн. навук, 1993, №4. - с. 21-23.
22. Барсуков В.Г., Купчинов Б.И., Лапшина Е.М. Растягивающие напряжения в экструдруемых профилях из высоконаполненных прессконпозиций. // Весці АНБ. Сер. фіз.-тэхн. навук, 1994, №1.- с. 11-14.
23. Barsukov V.G. Method of calculation of wood plastic sliding pairs and production equipment. // Problemy eksploatacji, 1994, №10.- p. 29-34.
24. Барсуков В.Г. Реологические особенности экструзионной переработки высоконаполненных полимерных композитов на основе коротковолокнистых отходов. // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии. Сборник трудов научно-технической конф., -Гродно, 1994, том 2.- с. 196-201.
25. Барсуков В.Г. Влияние сил трения на параметры зоны скольжения плоскощелевого экструзионного канала. // Трение и износ. 1994, №6.- с. 1069-1073.
26. Барсуков В.Г. Расчет предельных сил трения для зоны пробкообразного скольжения ромбовидного экструзионного канала. // Трение и износ. 1995, №2.- с. 261-266.
27. Барсуков В.Г., Прушак В.Я., Щерба В.Я. Анализ влияния сил трения на реологические состояния высоконаполненных композиций в кольцевом экструзионном канале. // Трение и износ. 1995, №4.- с. 690-697.
28. Barsukov V.G., Prushak V.Ja., Scherba V.Ja., Sviridenok A.I., The effect of friction on the extrusion of high filled composites. // Tribology in industry, V. 18, № 1, 1996.- p. 11-13.



29. Barsukov V.G., Prushak V.Ja. Calculation method of wood-plastic profiles production equipment. //Wood-modification'95. Materials of Simposium. -Poznan, 1995.- p. 35-38.
30. Barsukov V.G., Scherba V.Ja., Zajatz I.M., Shapovalov V.M. / Friction aspects of efficiency of the extrusion equipment for processing of high filled composites. //Quality and reliability of machines. International Symposium. -Nitpa. 1996.- p. 92-94.
31. Барсуков В.Г., Заяц И.М. Поверхность раздела реологических зон экструзионного канала кругового сечения при переработке высоконаполненных прессконпозиций. //Материалы, технологии, инструмент. 1996, №1.- с. 46-48.
32. Барсуков В.Г., Свириденко А.И., Свекло И.Ф. Роль сил трения в возникновении поверхностных дефектов при экструзии высоконаполненных композиций. //Intertribo'96. VI-th International Symposium "Tribological problems in exposed friction systems". -Vysoke Tatry, 1996.- p. 145-147.
33. Крулич Б., Барсуков В.Г. Кавитационная эрозия материалов с различной склонностью к поглощению энергии. //Материалы, технологии, инструмент. 1996, №2.- с. 59.
34. Bazyli Krupicz, Vladimir Barsukov. Problem smęczenia warstwy wierzchniej tworzywa podczas kawitacji.// XVII Sympozjum mechaniki eksperymentalnej ciała stałego. -Jachranka, 1996.- s. 375-379.
35. Барсуков В.Г., Шаповалов В.М., Кудин С.В., Лапшина Е.М. Силовые параметры процессов экструзии прессконпозиций на основе термопластов и коротковолокнистых лигноцеллюлозных отходов.// Материалы II конф. "Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии". -Гродно, 1996.- с. 171-174.
36. Свириденко А.И., Барсуков В.Г., Виноградов Л.В., Антипов В.И., Коваленко Л.В. Экологически чистые конструкционные и отделочные композиционные материалы. // Technologia'95. Int. Symposium, -Bratislava, 1995.- p. 127-130.
37. Купчинов Б.И., Родненков В.Г., Барсуков В.Г. Создание и широкое внедрение машиностроительных древеснополимерных материалов - эффективный путь комплексного использования древесного сырья. // Фундаментальные исследования в области комплексного использования древесины. 4-ый международный симпозиум ученых стран - членов СЭВ. Тез. докл. -Рига, 1982.- с. 189-190.
38. Купчинов Б.И., Барсуков В.Г., Шаповалов В.М., Родненков В.Г. Новые материалы на основе полимеров и древесных наполнителей. // IV международный конгресс "АПЛИХЕМ'88", тез. докл., -Братислава, 1988.- с. 50.
39. Барсуков В.Г., Свириденко А.И., Крулич Б. / Использование нелинейной модели фрикционного контакта для анализа процессов деформирования дисперсных композитов. // Новые материалы и технологии в трибологии. Вторая американско-восточно-европейская конференция. -Минск-Гродно-Варшава, 1997.- с. 55-56.



40. Barsukov V.G., Prushak V.J and Sveklo I.F. Tribological phenomena at extrusion of high filled composites. / Proc. of World Tribology Congress. -London, 1997.- p. 598.
41. Маскевич Е.В., Свириденко И.А., Барсуков В.Г. Экспресс-трибометр для дисперсных композитов. // Новые материалы и технологии в трибологии. Вторая американско-восточно-европейская конференция, -Минск-Гродно-Варшава, 1997.- с. 77-79.
42. Barsukov V.G., Sveklo I.F., Krupich B. The role of contact interaction in extrusion of high-filled composites // Mechanics of composite materials. Tenth International conference. -Riga, 1998.- p.197.
43. А.С. 816778 СССР, МКЛ<sup>3</sup> В 2915/08. Устройство для изготовления погонных изделий из древесных частиц / Б.И.Купчинов, А.А.Львов, В.Г.Барсуков и С.Я.Либерман (СССР). №2857787/29; Заявлено 18.10.79; Опубликовано 30.01.81. Бюл. №12.- 2 с.
44. А.С. 1055043 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 29F 3/04, В29J 5/08. Экструзионная головка / Б.И.Купчинов, В.Г.Барсуков, В.М.Шаповалов, В.А.Извеков и М.Ф.Кравченко (СССР). №3415387/23; Заявлено 31.03.82.- 4 с.
45. А.С.1081927 СССР, МКИ<sup>3</sup> В29J 5/00. Способ изготовления древесно-полимерного композита / Б.И.Купчинов, В.Г.Барсуков, В.М.Шаповалов, В.В.Астапкович (СССР). №3487662/29; Заявлено 03.09.82. -4 с.
46. А.С. 1117225 СССР, МКИ<sup>3</sup> В29J5/08. Устройство для изготовления изделий из полимерных композиционных материалов / Б.И.Купчинов, В.Г.Барсуков, В.И.Индучный, М.Ф.Кравченко, Н.В.Немогай и Р.А.Лукинский (СССР). №3591632/29; Заявлено 18.05.83; Опубликовано 07.10.84; Бюл. №37. - 3 с.
47. А.С. 1121861 СССР, В29С 3/00, В29F 3/08. Устройство для изготовления полимерных изделий / Б.И.Купчинов, В.Г.Барсуков, М.Ф.Кравченко и Б.С.Гайдук (СССР). №3550198/23; Заявлено 08.02.83. - 4 с.
48. А.С. 1178617 СССР, МКИ<sup>4</sup> В29С 47/84, В27N 3/28. Экструдер для переработки полимерных материалов / В.Г.Барсуков, М.Ф.Кравченко, Б.И.Купчинов и В.П.Самусенко (СССР). №3736734/23; Заявлено 16.02.84; Опубликовано 15.09.85; Бюл. №34.- 3 с.
49. А.С. 1258696 СССР, МКИ<sup>4</sup> В27 N 5/00. Устройство для получения древеснополимерных изделий / Б.И.Купчинов, М.Ф.Кравченко, В.Г.Барсуков, Н.В.Немогай, В.Г.Родненков, В.М.Шаповалов (СССР). №3884911/29; Заявлено 08.04.85; Опубликовано 23.09.86; Бюл. №35.- 4 с.
50. А.С. 1278635 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01L 7/00. Устройство для измерения бокового давления вязкопластичного материала при его деформировании / Б.И.Купчинов, В.П.Сергиенко, В.В.Свиридова и В.Г.Барсуков (СССР). №3889460/24; Заявлено 20.03.85; Опубликовано 23.12.86; Бюл. №47.- 4 с.
51. А.С. 1287435 СССР, МКИ<sup>4</sup> В27 N 3/02. Способ получения экструзионных изделий из древеснополимерной композиции / Б.И.Купчинов,



В.М.Шаповалов, В.Г.Барсуков и В.А.Белый (СССР). №3879936/29; Заявлено 08.04.85. - 4 с.

52. А.С. 1315339 СССР, МКИ<sup>4</sup> В29С 47/32. Устройство для изготовления полимерных изделий / М.Ф.Кравченко, В.Г.Барсуков, В.П.Емельянчиков, В.С.Игнатович, Н.М.Климашевич (СССР). №3865473/23; Заявлено 11.03.85; Опубликовано 07.06.87; Бюл. №21.- 4 с.

53. А.С. 1360169 СССР, МКИ<sup>4</sup> С08L 97/08. Композиция для получения формированных изделий / Б.И.Купчинов, Н.В.Немогай, С.А.Шумилина, В.М.Шаповалов, В.Г.Барсуков и Д.Н.Горбаченко (СССР). №3939916/23; Заявлено 31.07.85.- 4 с.

54. А.С. 1419896 СССР, МКИ<sup>4</sup> В27N 3/28. Способ приготовления древесной пресскомпозиции и устройство для его осуществления / Б.И.Купчинов, В.Г.Барсуков, В.М.Шаповалов, С.Ф.Мельников, В.П.Емельянчиков (СССР). №4084421/29; Заявлено 30.06.86; Опубликовано 30.08.88; Бюл. №32.- 4 с.

55. А.С. 1417347 СССР, МКИ<sup>4</sup> В27N 5/02. Способ получения экструзионных изделий из древеснополимерной композиции / Б.И.Купчинов, В.Г.Барсуков, В.М.Шаповалов, В.Н.Литвиненко, Н.Н.Доманьков (СССР). №4118680/29; Заявлено 09.07.86. - 4 с.

56. А.С. 1712150 СССР, МКИ<sup>4</sup> В27 N 3/02. Способ получения погонажных изделий из полимерных композиционных материалов / Б.И.Купчинов, В.Г.Барсуков, В.М.Шаповалов, В.А.Белый (СССР); №4137619/29; Заявлено 23.10.86; Опубликовано 14.02.92; Бюл. №6.- 4 с.

57. А.С. 1497030 СССР, МКИ<sup>4</sup> В29С 47/38. Устройство для изготовления изделий из полимерных композиционных материалов / Б.И.Купчинов, М.Ф.Кравченко, Н.В.Немогай, В.Г.Барсуков и В.М.Шаповалов (СССР). №4313527/31; Заявлено 25.08.87; Опубликовано 30.07.89; Бюл. №28.- 4 с.

58. А.С. 1577211 СССР, МКИ<sup>5</sup> В27N/00. Способ получения экструзионных древеснополимерных изделий и устройство для его осуществления / Б.И.Купчинов, С.Ф.Ермаков, В.М.Шаповалов, В.Г.Барсуков, Р.Я.Пирназаров (СССР); №4478165/29; Заявлено 01.09.88. - 4 с.

59. А.С. 1666333 СССР, МКИ<sup>5</sup> В29С 47/84. Экструдер для переработки полимерных материалов. / Б.И.Купчинов, В.Г.Барсуков, М.Ф.Кравченко, В.М.Шаповалов, Д.А.Богомоллов и Н.В.Кругляк (СССР). №4680110/05; Заявлено 18.04.89; Опубликовано 30.07.91; Бюл. №28.- 4 с.

60. А.С. 1642735 СССР, МКИ<sup>5</sup> С08L 97/08. Поливинилхлоридная композиция / В.М.Шаповалов, Е.М.Лапшина, Г.И.Дубровская, В.Г.Барсуков, Б.И.Купчинов (СССР); №4690347/23; Заявлено 27.03.89. - 4 с.

61. А.С. 1705317 СССР, МКИ<sup>5</sup> С08L 27/06. Экструзионная древеснополимерная композиция / Б.И.Купчинов, В.М.Шаповалов, В.А.Шумилин, В.Г.Барсуков, В.Н.Литвиненко и М.С.Фурман (СССР). №4774703/05; Заявлено 17.10.89; Опубликовано 15.01.92; Бюл. №2.- 2 с.



62. А.С. 1695597 СССР, МКИ<sup>5</sup> В27N 5/02. Способ получения изделий из древеснополимерной композиции / В.М.Шаповалов, Е.М.Лапшина, В.Г.Барсуков, С.В.Кудин, В.Л.Аксенов (СССР). №4791156/15; Заявлено 25.12.89. - 4 с.
63. А.С. 1775959 СССР, МКИ<sup>5</sup> В27N 5/00. Устройство для формирования изделий из полимерных композиционных материалов / В.Г.Барсуков, В.М.Шаповалов, М.Ф.Кравченко, Б.И.Купчинов (СССР). №4903421/05; Заявлено 22.01.91. - 4 с.
64. А.С. 1778956 СССР, МКИ<sup>5</sup> В27N5/00. Способ получения экструзионных древеснополимерных изделий / Б.И.Купчинов, В.И.Губкин, В.М.Шаповалов, В.Г.Барсуков (СССР). №4770277/15; Заявлено 01.11.89. - 4 с.
65. Пат. 1427 С1РБ, МКИ<sup>3</sup> В29D 9/00. Способ получения клеящего холста / В.П.Шустов, А.И.Свириденко, А.В.Сиканевич, А.И.Чернорубашкин, В.Г.Барсуков (РБ); ОПР АНБ, СКБ с ОП ИММС АНБ; №11 61; Заявлено 01.02.94; Опубликовано 16.12.96. - 4 с.
66. А.С. 1021648 СССР, МКИ<sup>4</sup> В65G 39/00. Стенд для испытания роликов конвейера / В.Г.Барсуков, В.И.Индучный, С.М.Горленко и В.А.Извеков (СССР). №3387459/27; Заявлено 04.02.82; Опубликовано 07.06.83; Бюл. №21. - 4 с.
67. А.С. 1426896 СССР, МКИ<sup>4</sup> В65G 15/62. Секция ленточного конвейера / Б.И.Купчинов, Н.В.Немогай, В.Г.Барсуков, М.К.Шолин, Е.Ф.Чижик, П.А.Худан, Э.Я.Коновалов (СССР). №4146440/27; Заявлено 09.07.86; Опубликовано 30.09.88; Бюл. №36. - 3 с.
68. А.С. 1826391 СССР, МКИ<sup>5</sup>, В27N 3/02. Способ получения экструзионных изделий из древеснополимерной композиции / В.М.Шаповалов, Р.Я.Пирназаров, Б.И.Купчинов, В.Н.Савицкий, В.Г.Барсуков и С.Ф.Ермаков (СССР). №4884479/05; Заявлено 02.10.90. - 4 с.

## БАРСУКОЎ УЛАДЗІМІР ГЕОРГІЕВІЧ

## Трыбатэхналагічныя аспекты экструзіі драўнянапалімерных прэскампазіцый

**Ключавыя словы:** экструзія, кампазіт, напаяльнік, трэнне, шнэк, фармуючая аснастка, лігнацэлюлозныя часцінкі, кантактнае ўзаемадзеянне.

**Аб'ект даследавання:** працэсы экструзіі драўнянапалімерных кампазіцый.

**Прадмет даследавання:** рэалагічныя з'явы ў высоканапоўненых драўнянапалімерных кампазіцыях, абумоўленыя дзеяннем сілаў трэння пры экструзіі.

**Мэта работы:** распрацоўка метадаў разліку працэсаў экструзіі высоканапоўненых драўнянапалімерных кампазіцый і фармуючых элементаў абсталявання.

**Метад даследавання і апаратура:** пластаметрыя, трыбаметрыя, матэматычнае мадэліраванне, экструзіяметрычныя устаноўкі "Plasticorder PLV 340", "Rheocord -90".

Паказана, што ў агульным выпадку ў экструзійным канале існуюць дзве рэалагічныя зоны - вязкапругасці і вязкапластычнасці, першая з якіх знаходзіцца паблізу выхада, а другая - увахода ў экструзійны канал. Становішча граніцы паміж зонамі выяўляецца суадносінамі сіл знешняга і ўнутранага трэння і залежыць ад формы сячэння экструзійнага канала.

Пры гэтым ў перапрацоўвываемым кампазіце паблізу ад выхаду з экструзійнага канала ўзнікае вобласць расцягваючых напружанняў. Прадстаўлены рэкамендацыі па разліку гранічных значэнняў сілаў трэння з пазіцыяй недапушчэння растрэсківання вырабаў.

Да ліку рэалагічных эфектаў, абумоўленых дзеяннем сілаў трэння, трэба аднесці таксама магчымасць узнікнення на ўваходзе ў экструзійны канал "мертвай зоны", у якой практычна адсутнічае неадваротнае цячэнне матэрыялу.

У вінтавым канале шнэка сілы трэння прыводзяць да дысіпацыі энергіі прываду на паверхнях склізання, што вызывае павышэнне тэмпературы кампазіта на 5-30°C і больш насупраць першапачаткова устаноўленых значэнняў. Для нетэрмастабільных матэрыялаў тыпу ПВХ-кампазіцый гэта можа вызваць іх тэрмадэструкцыю, а таксама зніжэнне вытворчай магутнасці працэсаў перапрацоўкі.

Вынікі даследаванняў выкарыстоўваюцца ў будаўніцтве і машынабудаванні.



## БАРСУКОВ ВЛАДИМИР ГЕОРГИЕВИЧ

## Триботехнологические аспекты экструзии древеснополимерных пресскомпозиций

**Ключевые слова:** экструзия, композит, наполнитель, трение, червяк, формующая оснастка, лигноцеллюлозные частицы, контактное взаимодействие.

**Объект исследования:** процессы экструзии древеснополимерных пресскомпозиций.

**Предмет исследования:** реологические эффекты в высоконаполненных древеснополимерных композициях, обусловленные действием сил трения при экструзии.

**Цель работы:** разработка методов расчета процессов экструзии высоконаполненных древеснополимерных композиций и формующих элементов оборудования.

**Метод исследования и аппаратура:** пластометрия, трибометрия, математическое моделирование, экструзиометрические установки "Plasticorder PLV 340", "Rheocord -90".

Показано, что в общем случае в экструзионном канале существуют две реологические зоны - вязкоупругости и вязкопластичности, первая из которых примыкает к выходу, а вторая - к входу в канал. Положение границы между зонами определяется соотношением сил внешнего и внутреннего трения и зависит от формы сечения экструзионного канала.

При этом в перерабатываемом материале вблизи выхода из экструзионного канала возникает область растягивающих напряжений. Предложены рекомендации по расчету предельных сил трения с позиций недопущения растрескивания изделий.

К числу реологических эффектов, обусловленных действием сил трения, следует отнести также возможность возникновения на входе в экструзионный канал зоны затрудненной деформации - так называемой "мертвой зоны", в которой практически отсутствует необратимое течение композита.

В винтовом канале червяка силы трения приводят к диссипации энергии привода на поверхностях скольжения, что сопровождается повышением температуры композита на 5-30°C и более против первоначально установленных значений. Для нетермостабильных материалов типа ПВХ-композиций это может вызвать их термодеструкцию, а также снижение производительности процессов переработки.

Результаты исследований используются в строительстве и машиностроении.

## SUMMARY

BARSUKOV VLADIMIR GEORGIEVICH

## Tribotechnological aspects of extrusion of wood-plastic composites

**Key words:** extrusion, composite, filler, friction, screw, die, lignocellulose particle, contact interaction.

**Object of investigation:** extrusion of wood-plastic composites.

**Subject of investigation:** the triborheological phenomena at extrusion of high filled wood-plastic composites.

**Aim of the work:** the purpose of investigation is developing of calculation methods for extrusion of wood-plastic composites and working elements of equipment.

**Method of investigation and apparatuses:** plastometry, tribometry, mathematical modeling, extrusional test equipment "Plasticorder PLV 340", "Rheocord -90".

It was shown that generally there two rheological zones in the extrusion channel, i.e., viscoelastic and viscoelastic ones. The first zone is near the output of the channel and the second is at the input. A position of the boundary between the zones is determined by a ratio between external and internal friction forces and depends on a section shape of the extrusion channel.

Carried out researches showed that under friction forces a region of tensile stresses appears near the output from the extrusion channel in material processed. Recommendations on calculation of the extreme friction forces to cracking are proposed.

One can consider an appearance near the input to the extrusion channel of the zone of labored deformation, known as "dead zone", where irreversible flow of the composites practically absent, as rheological phenomena caused by friction forces.

In the space between flights of screw the friction forces cause the energy dissipation of the drive on the sliding surface. It follows by increasing of the composite temperature on 5-30°C and more versus initial values. It may cause thermodestruction of the nonthermostable material such as PVS-compositions and decreasing of productivity of equipment manufacturing.

The results of investigation are used in building and machine industry.



Подписано в печать 22.06.1998. Бумага офсетная №1.  
Формат 60x84/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,0  
Тираж 100 экз. Заказ 82

Отпечатано на технике издательского отдела Гродненского  
государственного университета имени Янки Купалы  
230023 г. Гродно, ул. Ожешко, 22