

Учреждение образования  
«Белорусский государственный технологический университет»

УДК 678.067

**Хрол**  
**Евгений Зенонович**

**ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ПРОЦЕСС РОТАЦИОННОГО ФОРМОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.17.06 – Технология и переработка полимеров  
и композитов

Минск 2011

Работа выполнена в Учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет».

Научный руководитель

**Ревяко Михаил Михайлович**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры технологии нефтехимического синтеза и переработки полимерных материалов Учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты:

**Ставров Василий Петрович**  
доктор технических наук, профессор, и.о. зав. кафедрой механики материалов и конструкций Учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»;

**Можейко Юрий Михайлович**  
кандидат технических наук, начальник Центральной исследовательской лаборатории ОАО «Могилевхимволокно»

Оппонирующая организация

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», г. Гомель

Защита диссертации состоится 20 июня 2011 г. в 16 часов на заседании Совета по защите диссертаций Д 02.08.04 при Учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет». 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, зал заседаний ученого совета, ауд. 240, к. 4.

Тел.: 8-(017)226-14-32, факс 8-(017)-227-62-17.

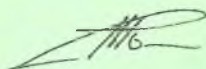
E-mail: root@bstu.unibel.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Автореферат разослан «17» мая 2011 г.

Ученый секретарь

Совета по защите диссертаций  
кандидат технических наук, доцент



Толкач О. Я.

## ВВЕДЕНИЕ

Ротационное формование как метод изготовления изделий из термопластичных полимеров характеризуется следующими признаками: возможность изготовления в одной и той же форме изделий различной толщины и цвета; невысокая стоимость оснастки; небольшие затраты на подготовку и переналадку оборудования и оснастки; возможность изготовления крупногабаритных изделий, недоступных для других методов, изделий достаточно сложной конфигурации, с двойными стенками, с металлическими и пластмассовыми закладными деталями; низкий уровень остаточных напряжений в изделиях, а потому достаточная прочность и герметичность изделий. Благодаря этим свойствам ротационное формование все шире используется для изготовления крупногабаритных полых изделий из полимерных материалов – резервуаров, контейнеров, баков и т.п.

Наряду с перечисленными достоинствами ротационное формование обладает и рядом недостатков, в числе которых: длительность цикла формования, а поэтому низкая производительность процесса; ограниченность номенклатуры полимеров, пригодных для изготовления изделий, а потому ограниченность номенклатуры выпускаемых изделий; относительно высокая материал- и энергоемкость изделий. Устранение отмеченных недостатков позволит значительно расширить сферу применения этой перспективной технологии в Республике Беларусь.

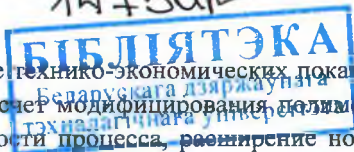
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами.**

Исследования осуществлялись в рамках государственной программы прикладных исследований «Полимерные материалы и технологии» (задание 2.23, гос. рег. № 20064120, 2007–2009 гг.) и гранта Министерства образования Республики Беларусь «Изучение кинетики процесса ротационного формования термопластов» (гос. рег. № 20100699). Экспериментальные данные получены в результате исследований по теме «Разработка научных основ производства крупногабаритных полых изделий из термопластов методом ротационного формования» (гос. рег. № 2008592, заказчик ОАО «Борисовский завод пластмассовых изделий»).

**Цель и задачи исследования.**

Цель исследования – улучшение технико-экономических показателей процесса ротационного формования за счет модифицирования полимерных материалов, повышение производительности процесса, расширение номенклатуры



выпускаемых изделий и снижение затрат на подготовку производства за счет теоретического обоснования технологических параметров формования изделий, а также материальных и энергетических затрат при формовании.

**Задачи исследования:**

– на основе анализа особенностей состава, физико-химических и физико-механических свойств полимеров и модификаторов обосновать выбор полимерных композиций для формования конкурентоспособных изделий с повышенными характеристиками прочности и долговечности;

– исследовать влияние модифицирования полимерных материалов на кинетику ротационного формования и характеристики готового изделия;

– установить особенности теплопереноса при ротационном формовании изделий из модифицированных композиций, разработать методики расчета параметров процесса на стадии подготовки производства изделий из модифицированных композиций;

– изучить кинетику одностадийного и двухстадийного процесса ротационного формования изделий из модифицированных полимеров и возможность применения этого процесса для получения многослойных изделий с улучшенными эксплуатационными характеристиками;

– сформулировать научно-обоснованные рекомендации для производства методом ротационного формования типичных изделий из модифицированных композиций и проверить их в опытно-промышленных условиях.

Объектом исследований является технология ротационного формования изделий из полимерных материалов. Предметом исследования являются модифицированные полимерные материалы и кинетика теплопереноса при ротационном формовании изделий из различных полимерных систем.

**Положения, выносимые на защиту:**

– зависимости продолжительности формования изделия заданной толщины от показателей свойств композиции и условий теплопередачи [5];

– кинетика изменения температуры в стенке формируемого изделия при одностадийном и двухстадийном ротационном формовании [8];

– способ двухстадийного ротационного формования крупногабаритных изделий из модифицированных полимерных материалов, позволяющий получать многослойные изделия с повышенными эксплуатационными характеристиками и долговечностью [24];

– полимерные композиции на основе ПЭВП и ПА для одностадийного и двухстадийного ротационного формования и показатели свойств композиций, предназначенных для изготовления изделий с улучшенными прочностными характеристиками и долговечностью [22, 23];

– режимы двухстадийного ротационного формования изделий и результаты освоения процесса на предприятиях Республики Беларусь [24].

### **Личный вклад соискателя.**

Автор диссертации обосновал цели и задачи исследования, осуществил аналитический обзор литературы, патентную проработку предлагаемых технических решений, выполнил эксперименты, обработал и проанализировал экспериментальные данные, провел расчеты, результаты которых включены в диссертацию, предложил и исследовал модель теплопереноса при ротационном формовании. Установленные автором зависимости температуры формы и толщины стенки формуемого изделия как функции теплофизических свойств модифицированной композиции и параметров процесса формования изделия упрощают технологическую подготовку производства методом ротационного формования изделий из модифицированных композиций. По результатам ротационного формования изделий из модифицированных композиций на промышленном оборудовании подтвердил обоснованность предложенных технических решений.

По результатам исследований автором (в том числе в соавторстве) подготовлены статьи [1–10] и доклады на конференциях [11–21].

### **Апробация результатов диссертации.**

Результаты исследований, включенные в диссертацию, доложены на следующих конференциях:

Международная научно-техническая конференция «Полимерные композиты и трибология. Поликомтриб-2007», Гомель, ИММС НАН Беларуси, 16–19 июля 2007 г.

IX Республиканская студенческая научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии их обработки», Минск, БНТУ, 23–25 апреля 2008 г.

Международная научно-техническая конференция «Новые технологии рециклинга отходов производств и потребления», Минск, БГТУ, 28–29 мая 2008 г.

IV Гомельская региональная конференция молодых ученых «Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования», Гомель, ИММС НАН Беларуси, 23–24 сентября 2008 г.

Международная научно-техническая конференция «Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии», Минск, БГТУ, 19–20 ноября 2008 г.

73-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, БГТУ, 26–31 января 2010 г.

62-я региональная научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов ВУЗов (с международным участием) «Молодежь. Наука. Инновации – 2009», Ярославль, ЯГТУ, 15 апреля 2009 г.

Международная научная конференция молодых ученых «Молодежь в нау-



ке – 2009», Минск, НАН Беларуси, 21–24 апреля 2009 г.

Международная научно-техническая конференция «Полимерные композиции и трибология. Поликомтриб-2009», Гомель, ИММС НАН Беларуси, 22–25 июля 2009 г.

Международная научно-техническая конференция «Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов и перспективы их развития», Минск, БГТУ, 25–27 ноября 2009 г.

74-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, БГТУ, 25–30 января 2010 г.

Международная конференция «Композит-2010. Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология», Саратов, СГТУ, 30 июня–2 июля 2010 г.

Республиканская научно-техническая конференция молодых ученых «Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования», Гомель, ИММС НАН Беларуси, 5–7 октября 2010 г.

Республиканская научно-практическая молодежная конференция с международным участием «Научные стремления – 2010», Минск, НАН Беларуси, 1–3 ноября 2010 г.

Международная научно-техническая конференция «Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии», Минск, БГТУ, 24–26 ноября 2010 г.

75-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, БГТУ, 24–29 января 2011 г.

### **Опубликованность результатов диссертации.**

Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в соавторстве в 10 статьях в рецензируемых научных журналах (3 авт. листа). Результаты исследований представлены в 7 материалах конференций; в 6 тезисах докладов конференций; в двух патентах Республики Беларусь и в одной заявке на патент Республики Беларусь.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав, заключения, библиографического списка и приложений. В первой главе содержится аналитический обзор литературы по теме диссертационной работы, указаны новейшие достижения в этой области, описанные в отечественных и зарубежных патентах. Во второй главе приведены показатели свойств исходных материалов, методы, использованные при проведении исследований и статистической обработке их результатов. В третьей главе представлены экспери-

ментальные результаты, а также анализ и обоснование полученных данных.

Полный объем диссертации 125 с. В диссертации имеется 57 иллюстраций (на 15 с.), 27 таблиц (9 с.), 2 приложения (2 с.), ссылки на 221 библиографический источник, в том числе на 24 собственные публикации соискателя.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

**Во введении** обоснована актуальность работы.

**В первой главе** проанализированы литературные источники и выделены основные направления развития технологии ротационного формования: модифицирование полимерных материалов и оптимизация параметров процесса с целью получения изделий с улучшенными эксплуатационными характеристиками и при меньших затратах энергии. Дан критический анализ технологии ротационного формования, а также процессов, которые позволяют качественно подготовить полимерный материал к переработке.

Отмечены работы, направленные на расширение номенклатуры изделий и повышение их долговечности в условиях эксплуатации за счет применения модифицированных композиций, задания соответствующих параметров конструкции получаемого изделия и технологической оснастки для его производства, выбора и расчета технологических параметров процесса, специфичных приемов его осуществления. Проанализировано влияние указанных факторов на технико-экономические показатели изделий и процесса ротационного формования. Показано, что роль многих из отмеченных факторов и их влияние на показатели изделий и процесса ротационного формования изучены недостаточно, а применяемые приемы, включая модифицирование полимеров и задание тепловых режимов формования изделий из модифицированных композиций, не имеют строгого теоретического обоснования.

В результате анализа литературных источников сформулированы основные задачи, решение которых обеспечивает достижение цели диссертационного исследования.

**Вторая глава** посвящена методике экспериментального исследования. Объектом исследований является технология ротационного формования изделий из полимерных материалов. Предметом исследования являются модифицированные полимерные материалы и процессы тепломассопереноса в течение цикла ротационного формования.

Для определения показателей свойств композиций и материала в изделиях, получаемых ротационным формованием, использовали следующие методы: определение сыпучести и объемной плотности материалов; определение гранулометрического состава; испытание на растяжение (тензометр 2020, «Instron», США); определение твердости по Шору; определение показателя текучести

расплава (ИИРТ-М, Россия); определение горючести; термический анализ (Mettler Toledo, Швейцария); ИК-спектроскопия (Nicolet Nexus 670, «Thermo Electron Corporation», США); сканирующая электронная микроскопия (JSM-5610 LV, Япония). Выбранные методы позволяют охарактеризовать и сравнить сырье, используемое при ротационном формовании, выявить свойства, влияющие на процесс формования пластмассового изделия и на показатели материала в изделиях, в том числе определяющие прочность и долговечность изделий, полученных методом ротационного формования, в условиях эксплуатации.

При исследованиях использовали полимерные материалы на основе полиэтилена низкой плотности (ПЭВП) марки Liten RS 58 и полиамида (ПА) марки ПА6-Э2. Для целенаправленного изменения показателей свойств в материалы вводили модифицирующие добавки: дисперсный наполнитель (измельченное стекло), волокнистые наполнители (стеклянное волокно, ПА-волокно, ПШ-волокно, ПАН-волокно), химический пенообразователь (концентрат «БАСКО-вспениватель П0027/01-СЭ»), светостабилизаторы (синтезированы на кафедре органической химии Учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»), антипирен (концентрат «БАСКО Антифлейм ПЭК»). В диссертации приведены основные характеристики модификаторов. Образцы для испытаний из исследуемых материалов получали методами ротационного формования, литья под давлением, а также валцевания и прессования.

Продолжительность формования изделия с заданной толщиной стенки рассчитывали по упрощенным формулам и с использованием численного решения дифференциального уравнения теплопроводности (по методу сеток). Получены кинетические зависимости для температуры материала стенки формируемого изделия в процессе формования.

В главе описаны также методы статистической обработки экспериментальных данных.

**В третьей главе** приводятся результаты анализа полимерных материалов, предназначенных для ротационного формования изделий.

Описан процесс подготовки полимерного сырья для ротационного формования. Приведены показатели свойств полимерных порошков – форма и размер частиц, сыпучесть, гранулометрический состав. Показано влияние этих характеристик на продолжительность цикла формования и показатели свойств отформованного изделия. Проанализированы возможности изготовления изделий с варьируемыми показателями свойств. Установлено, что при ротационном формовании необходимо использовать материалы со следующими характеристиками:

- гранулометрический состав: 95% с размером частиц менее 300 мкм, не более 15% материала с размером частиц менее 150 мкм;



- угол естественного откоса не более 45°;
- насыпная плотность более 320 кг/м<sup>3</sup>.

Такие порошки получаются в результате измельчения при температурах 60–90°С. Из них качественные изделия формуются при минимальной возможной температуре, что позволяет снизить затраты энергии. Из материалов, характеристики которых существенно отличаются от приведенных, получить качественные изделия, как правило, не удается. Изделия имеют недопустимые дефекты – вздутия, неоднородную стенку, пузыри и т.д. На основании полученных экспериментальных данных сформулированы рекомендации относительно подготовки сырья для ротационного формования, включающие требования к сыпучести, форме частиц, гранулометрическому составу, а при необходимости – дополнительной обработки, например, измельчение.

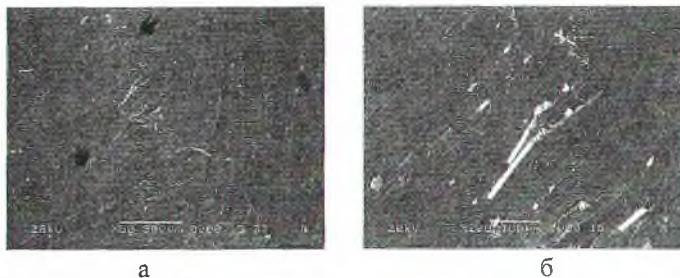
Исследовано модифицирование полимерных материалов как фактор управления свойствами формуемого изделия, в том числе с целью повышения прочности и долговечности в условиях эксплуатации. Установлено, что введение модифицирующих добавок может иметь и нежелательные последствия, в частности изменять вязкость полимерного расплава. В случае высокой вязкости расплава распределение материала по поверхности формирующей оснастки оказывается неравномерным, что снижает качество изделия.

Рассмотрены и проанализированы показатели свойств полимерных материалов на основе полиэтилена и полиамида с перечисленными выше модифицирующими добавками. Для оценки резервов повышения прочности изделий вводили дисперсные наполнители (стеклянный порошок) и армирующие волокна – стеклянные, полиамидные, полипропиленовые, полиакрилонитрильные (ПАН-волокна). Установлено, что материалы с описанными добавками обладают более высокими прочностными характеристиками по сравнению с исходным полимерным материалом (предел текучести материала увеличивается приблизительно на 20%). Кроме того, введение добавок незначительно увеличивает вязкость расплава полимера, поэтому из таких материалов методом ротационного формования получают качественные изделия.

Из модифицированных полимеров на ОАО «Борисовский завод пластмассовых изделий» методом ротационного формования получали контейнеры для сбора мусора вместимостью 120 л, исследовали их прочностные характеристики. Выяснилось, что ввиду разной плотности частиц полимера и модифицирующих компонентов возможно расслоение композиции, сепарация компонентов. Изделия имеют низкие прочностные характеристики.

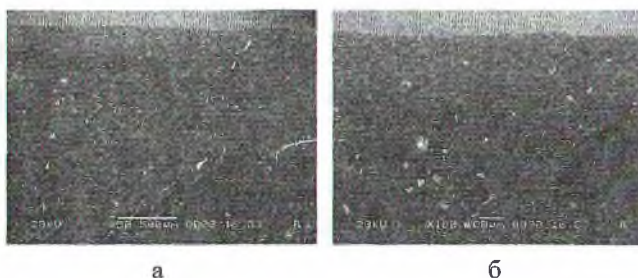
Исследована двухстадийная технология ротационного формования. На первой стадии формировали наружный слой из ПЭВП, содержащего добавки (стекловолокно в количестве до 20 масс.% или стеклянный порошок в количестве до 1 масс.%). За счет более высокой плотности стекловолокно или стек-

лянный порошок распределялись в основном на внутренней стороне стенки изделия. Затем вращение формы прекращали, в нее вводили порцию ПЭВП без добавок и формовали внутренний монокристаллический слой изделия. В результате получили изделия, внутренняя часть стенки которых армирована стеклянными волокнами (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Сечение стенки изделия из ПЭВП Liten RS 58 со стекловолокном (10 масс.%) в зоне разрушения от растягивающей нагрузки (увеличение: а – 50х; б – 200х)**

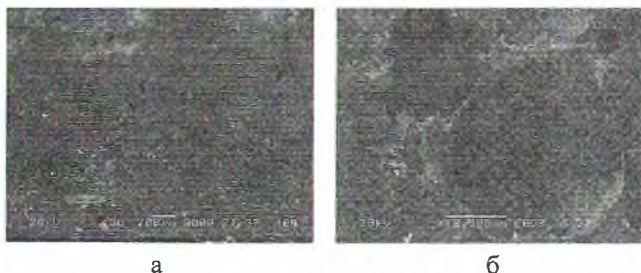
Стеклянные волокна способствуют увеличению прочности при растяжении стенки изделия до 20%. При использовании ПЭВП с частицами стеклянного порошка получили изделия с более упорядоченной структурой (рисунок 2). Это свидетельствует о том, что частицы дисперсных наполнителей в полимерной композиции выполняют функцию структурообразователей, а образующаяся упорядоченная структура обуславливает более высокие характеристики изделия (прочность материала увеличивается почти на 20%).



**Рисунок 2 – Фрактограмма поверхности разрушения образца из композиции ПЭВП (первичный) + 0,1 масс.% дисперсного модификатора (увеличение: а – 50х; б – 100х)**

Таким образом, модифицирование стеклянными дисперсными и волокнистыми наполнителями увеличивает прочность при растяжении материала в изделиях приблизительно на 20%. Кроме того, изделие формируется при тех же технологических режимах, что и в случае немодифицированного полимера, а дефекты поверхности отсутствуют.

Изучена возможность получения ротационным формованием изделий из вспененных полимеров. В качестве базового полимера использован полиэтилен высокой плотности (ПЭВП). Его вспенивание с помощью химического пенообразователя «концентрат БАСКО-вспениватель». Выяснилось, что получение изделий из вспененных полимеров по одностадийной технологии затруднительно, поэтому использовали двухстадийную схему. Испытания показали, что изделия из вспененного ПЭВП, масса которых равна массе изделия из исходного полимера, имеют толщину стенок на 40–50%, а разрушающие напряжения при растяжении на 15–20% выше. Стенка изделия имеет два слоя: наружный – монолитный, корковый, и внутренний – вспененный (рисунок 3).



**Рисунок 3 – Вид внешнего коркового и внутреннего вспененного слоя образца (увеличение 50х; а – корковый слой; б – вспененный слой)**

Параметры изделий, процесса их получения и показатели свойств материала стенки приведены в таблице 1.

Таким образом, введение вспенивателя способствует улучшению качества изделий и может использоваться как фактор снижения их материалоемкости.

В процессе эксплуатации многие изделия (контейнеры, детские площадки, резервуары, баки), полученные ротационным формованием, подвержены воздействию различных факторов окружающей среды – воды, влаги, УФ-излучение и др., ускоряющих деструкцию полимеров. Для замедления деструкции в полимеры вводят стабилизаторы.

Таблица 1 – Параметры изделий из ПЭВП Liten исходного и вспененного

Параметры изделия/процесса формования	Монолитный полимер	Вспененный полимер (при равной массе изделия)	Вспененный полимер (изделие с уменьшенной массой)
Масса изделия, кг /% к исходному	13,1 /100	13,1 /100	10,6 /81
Продолжительность цикла формования, мин	6,0	7,0	6,2
Толщина стенки изделия, мм	5,0	7,0	5,0
Условный предел текучести при растяжении*, МПа	16,0	20,0	15,5

\*Отнесен к толщине стенки изделия из монолитного полимера

Исследовали светостойкость композиций на основе ПЭВП Liten RS 58 с различными светостабилизаторами из ряда производных пиразола. Получены композиции, которые даже после 100 ч ускоренного старения сохраняют деформационно-прочностные характеристики, а поэтому могут использоваться для изготовления изделий, предназначенных для длительной эксплуатации в условиях прямого воздействия солнечного излучения. Введение наиболее эффективных светостабилизаторов защищено двумя патентами [22, 23].

Далее исследованы процессы тепломассопереноса при ротационном формовании. В результате изучения процесса теплопереноса предложена приближенная зависимость продолжительности формования изделия с заданной толщиной стенки от характеристик полимерного материала и температурного режима формования. При выводе этой зависимости предполагали, что в течение цикла ротационного формования происходит постепенное увеличение толщины стенки формируемого изделия, потому термическое сопротивление постепенно увеличивается, т.е. процесс протекает в нестационарном режиме (скорость переноса тепла уменьшается). Кроме того, удельная теплоемкость материала также зависит от температуры. Аналитическое решение задачи нестационарной теплопередачи в общей постановке затруднительно. Поэтому для получения приближенной зависимости предполагали, что коэффициент теплопередачи остается неизменным. Предложенное выражение имеет следующий вид:

$$t = \frac{C_m \cdot \delta_m \cdot \rho_m \cdot (T_{mn} - T_{mk})}{K \cdot \Delta T_{cp}} \quad (1)$$

где  $C_m$  – теплоемкость полимера, кДж/кг·К;  $\delta_m$  – толщина слоя материала (толщина стенки отформованного изделия), м;  $\rho_m$  – плотность полимера в изделии, кг/м<sup>3</sup> (для ПЭВП  $\rho_m = 940$  кг/м<sup>3</sup>);  $T_{mn}$ ,  $T_{mk}$  – начальная и конечная температура материала, К;  $K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $\Delta T_{cp}$  – средняя



разность температур стенки, К.

Как показала проверка путем формования изделий, несмотря на приближенный характер, предложенная зависимость дает приемлемые результаты при оценке продолжительности цикла формования, а отклонение от значений, полученных в результате трудозатратной экспериментальной отработки режимов, не превышает 10%.

Для анализа кинетики изменения температуры при формовании изделий из модифицированных композиций и влияния условий теплопередачи на границе решали задачу нестационарной теплопередачи путем численного интегрирования дифференциального уравнения теплопроводности с использованием пакета MatLab, реализующего метод сеток. Сравнивали варианты формования изделий в стальных и алюминиевых формах (рисунок 4).

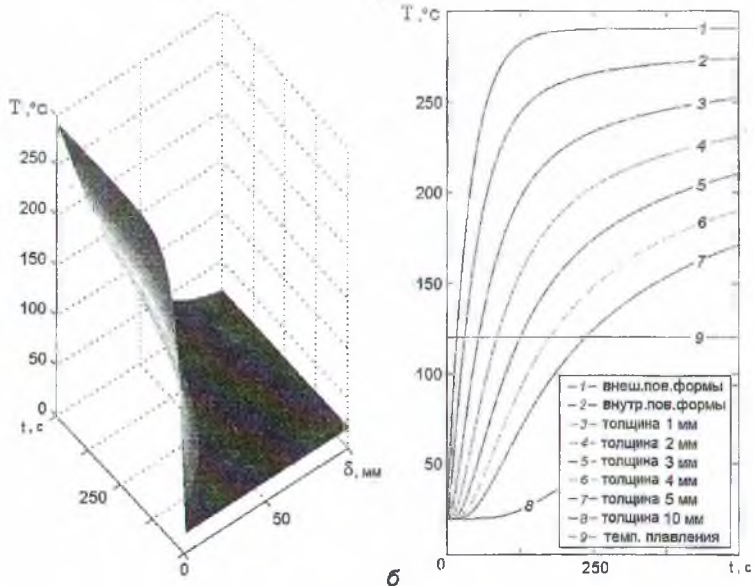
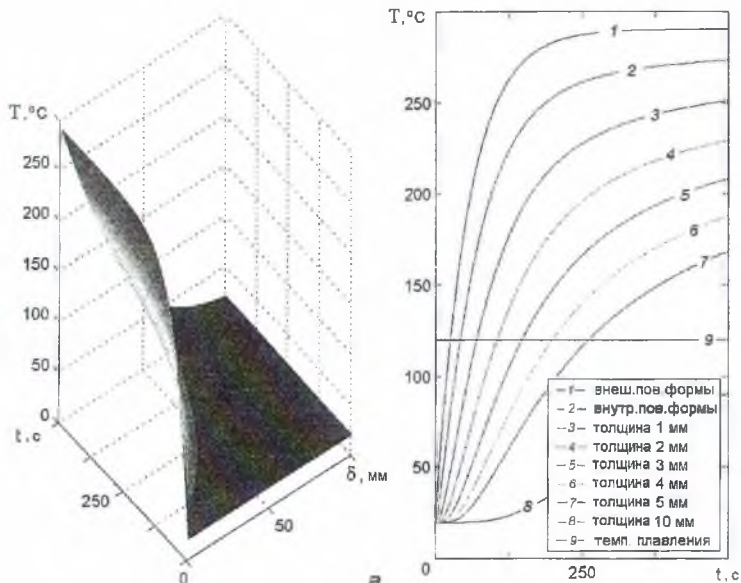
Под эквивалентной термической толщиной материала формы понимали толщину стенки, через которую обеспечивается эквивалентный тепловой поток, а под эквивалентной механической толщиной понимали толщину стенки материала с эквивалентной прочностью. Сравнение материалов оснастки приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Эквивалентные механические и термические толщины стенки форм (материал сравнения – алюминий)

Материал формы	Эквивалентная механическая толщина	Эквивалентная термическая толщина
Алюминий	10	10
Углеродистая сталь	7,0	3,5
Нержавеющая сталь	7,0	1,0

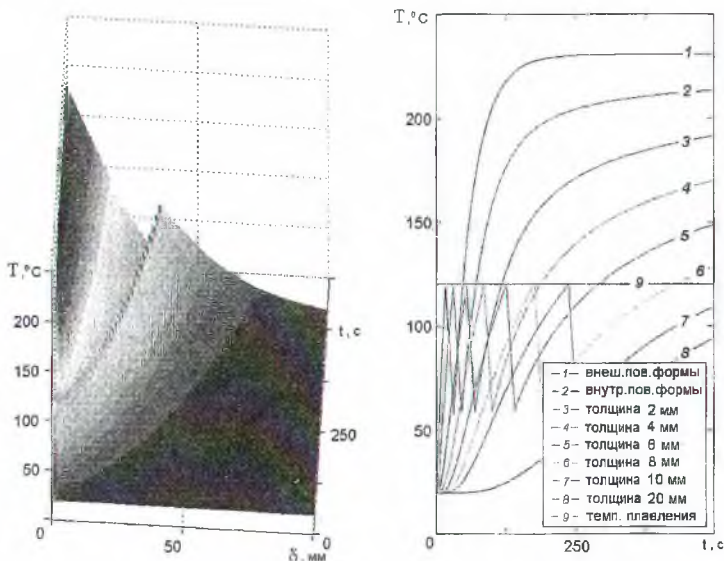
При расчете времени формования по дифференциальному уравнению теплопроводности (рисунок 4) результаты получаются с меньшей погрешностью (до 5%). Численный метод позволяет получить более близкие к практическим значения, но в инженерных расчетах в большинстве случаев предпочтительно использовать приближенное уравнение (1), благодаря его простоте и высокой степени соответствия получаемых результатов практическим данным.

По указанному выше численному методу решали также задачу теплопередачи при двухстадийном формовании (рисунок 5). Расчетные значения продолжительности формования задавали при изготовлении изделий из модифицированных полимерных материалов. Оценивали продолжительность и качество изделий, полученных по одно- и двухстадийным методам.



а – в стальной форме; б – в алюминиевой форме

**Рисунок 4 – Изменение температуры оснастки и материала в зависимости от расстояния до внутренней поверхности формы при формировании изделия**  
*(t – время, с; T – температура, °C; δ – толщина стенки изделия, мм)*



**Рисунок 5 – Изменение температуры алюминиевой формы и материала в зависимости от расстояния до внутренней поверхности формы при двухстадийном формовании ( $t$  – время, с;  $T$  – температура, °С;  $\delta$  – толщина стенки изделия, мм)**

Установлено, что для получения изделия равной толщины путем двухстадийного формования необходимо увеличить продолжительности цикла на 10–15% по сравнению с одностадийным вариантом.

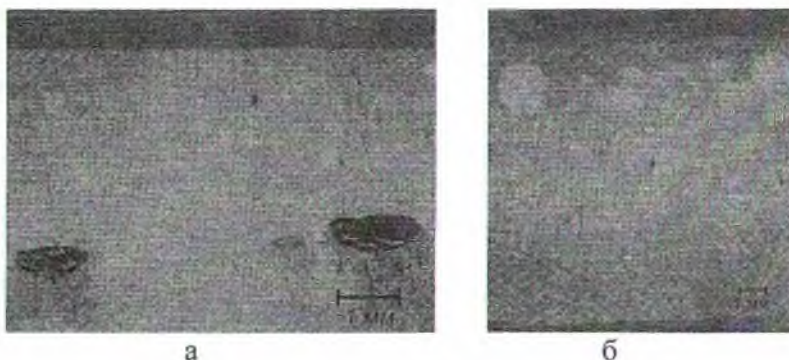
По методу двухстадийного ротационного формования на ОАО «Борисовский завод пластмассовых изделий» формовали многослойные контейнеры для сбора мусора со стенкой двух типов:

1. Внешний слой стенки изделия – монолитный ПЭВП, а внутренний – вспененный ПЭВП. Изделия равной прочности могут быть меньшей массы, но с более толстой стенкой;

2. Внешний и внутренний слой стенки образованы исходным ПЭВП, а между слоями полимера располагается слой с армирующими стеклянными волокнами.

Показатели структуры и свойств материала в изделиях изучали на образцах, вырубленных из стенки изделий, полученных методом двухстадийного ротационного формования на ОАО «Борисовский завод пластмассовых изделий». В результате испытаний выяснилось, что прочность материала в изделиях, полученных по двухстадийной технологии из композиций на основе ПЭВП со стекловолокном (до 20 масс. %), превышает прочность в изделиях из исходного

ПЭВП на 15–20%. Изделия из вспененного ПЭВП, имеющие такую же массу, характеризуются более высокой прочностью (разрушающее напряжение при растяжении на 10% выше), но они имеют и более толстую стенку (на 40–50%). Из фотографий разрезов стенки изделий (рисунок 6) видно, что вспененный материал имеет вполне однородную структуру.



а – изделие со стеклянными волокнами; б – вспененное изделие

**Рисунок 6 – Сечения стенки многослойных изделий, полученных двухстадийным ротационным формованием**

Кроме того, в работе разработали конструкцию нового изделия «Ящик тарный» для изготовления методом ротационного формования из модифицированных полимерных материалов, а также предложили ряд рекомендаций по конструированию изделий и по их производству.

Таким образом, в результате исследования процесса ротационного формования изделий из модифицированных материалов:

- подобраны составы модифицированных полимерных материалов, из которых получены изделия с повышенными эксплуатационными характеристиками;

- дана характеристика влияния модификаторов на показатели вязкости (показатель текучести расплава) композиций и показатели прочности материала в изделиях, получаемых из этих композиций ротационным формованием;

- выведена приближенная формула для расчета продолжительности формования из модифицированных композиций изделий с заданной толщиной и установлены зависимости температуры материала в формируемом изделии при изготовлении по одностадийному и двухстадийному вариантам;

- предложен способ ротационного формования многослойных изделий из модифицированных композиций и в опытно-промышленных условиях подтверждена его эффективность.



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

## Основные научные результаты диссертации

1. Установлены показатели свойств полимерных порошковых материалов, предназначенных для ротационного формования крупногабаритных изделий. Выявлено, что при ротационном формовании необходимо использовать материалы со следующими характеристиками: гранулометрический состав – 95% с размером частиц менее 300 мкм, не более 15% материала с размером частиц менее 150 мкм; угол естественного откоса не более 45°; насыщенная плотность более 320 кг/м<sup>3</sup>. Такие порошки получаются в результате измельчения гранулированных полимеров при температурах 60–90°С [11].

2. Предложены составы полимерных композиционных материалов на основе промышленно выпускаемых термопластов (полиэтилен высокой плотности марки Liten RS 58 и полиамида марки ПА6-Э2) и модификаторов (стеклянное волокно, ПП-, ПА-волокно (содержание до 20 масс.%), ПАН-волокно (содержание до 10 масс.%), стеклянный порошок (содержание до 1 масс.%), антипирен (содержание до 15 масс.%), стабилизаторы (содержание до 1 масс.%)), предназначенные для процесса ротационного формования изделий с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Определено, что количество вводимого в полимер модификатора ограничено влиянием добавки на вязкость композита. Установлено, что при ротационном формовании необходимо использовать материалы с показателем текучести расплава не менее 3 г/10 мин [12, 13, 15, 20, 22, 23].

3. В результате отработки технологии ротационного формования изделий из модифицированных полимерных композиций на промышленном оборудовании выявлена существенная роль сепарации компонентов в процессе формования изделий, обуславливающая неоднородную структуру материала в формируемом изделии. Предложен двухстадийный вариант ротационного формования, позволяющий избежать данного недостатка. На основе экспериментального изучения структуры и свойств материала в изделиях, полученных из модифицированных полимерных композиций двухстадийным ротационным формованием, показана возможность повышения эксплуатационных характеристик изделия, в частности величины разрушающей нагрузки (до 20%) и долговечности, при неизменных затратах на изготовление [1, 2, 6, 8, 10, 12, 14, 24].

4. В результате изучения процесса теплопередачи при ротационном формовании предложены зависимости, позволяющие рассчитывать продолжительность формования изделий заданной толщины из модифицированных полимерных композиций. Полученные значения подтверждены экспериментами и

результатами решения задачи теплопроводности при ротационном формировании численным методом. С использованием данного численного решения построены зависимости температуры материала как функции времени теплового воздействия, позволяющие проследить кинетику процесса ротационного формирования изделий из модифицированных композиций. Решение использовалось для обоснования режимов двухстадийного формирования изделий из модифицированных композиций [3, 5, 7, 10]. Установлено, что рассчитанные по предложенным зависимостям значения отличаются от используемых на практике величин не более чем на 10%.

5. На основании более точного учета показателей теплофизических свойств модифицированной композиции и условий теплопередачи установлены параметры процесса, обеспечивающие получение изделий, удовлетворяющих повышенным требованиям к долговечности в условиях эксплуатации. Показано, что предложенные приближенные зависимости пригодны для задания параметров процесса при освоении производства новых изделий, при изменении свойств полимерной композиции, параметров изделия и материала формующей оснастки [6, 9].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Результаты исследований, представленные в диссертации, создают теоретическую основу для обоснованного выбора модифицированных полимерных композиций, предназначенных для ротационного формирования изделий, что способствует расширению номенклатуры изделий, получаемых этим методом, а также для задания параметров процессов ротационного формирования на стадии подготовки производства, что значительно сокращает затраты на отработку режимов получения изделий при использовании модифицированных композиций, варьировании их состава, свойств исходного полимера, параметров получаемого изделия и формующей оснастки. Предложенный в работе метод двухстадийного ротационного формирования позволяет получать из модифицированных полимерных материалов изделия с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Кроме того, в работе разработана конструкция изделия для изготовления методом ротационного формирования из исследованных модифицированных полимерных материалов на производстве [4, 6]. Результаты исследований внедрены в ОАО «Борисовский завод пластмассовых изделий» и используются для обоснования выбора параметров процесса ротационного формирования, что подтверждается актом промышленных испытаний и актом внедрения (Приложения А и Б).

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи*

1. Ревяко, М.М. Некоторые особенности технологии ротационного формования / М.М. Ревяко, Е.З. Хрол // Труды БГТУ. Сер. IV, Химия и технология органических веществ. – 2007. – № 15. – С. 114–116.
2. Ревяко, М.М. Характеристика этапов цикла ротационного формования / М.М. Ревяко, Е.З. Хрол // Труды БГТУ. Сер. IV, Химия и технология органических веществ. – 2008. – № 16. – С. 113–115.
3. Ревяко, М.М. Тепломассоперенос при ротационном формовании / М.М. Ревяко, Е.З. Хрол // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2009. – Т. 14, №1. – С. 78–82.
4. Ревяко, М.М. Анализ напряженного состояния изделий, получаемых методом ротационного формования / М.М. Ревяко, Е.З. Хрол // Труды БГТУ. Сер. IV, Химия и технология органических веществ. – 2009. – № 17. – С. 113–117.
5. Ревяко, М.М. Теплопередача в процессе ротационного формования / М.М. Ревяко, С.К. Протасов, Е.З. Хрол // Известия Академии наук Беларуси. – 2009. – №4. – С. 79–82.
6. Хрол, Е.З. Разработка и изготовление модифицированных изделий из полимерных материалов методом ротационного формования / Е.З. Хрол, М.М. Ревяко // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2009. – Т. 14, №3. – С. 85–89.
7. Ревяко, М.М. Некоторые вопросы тепломассопереноса при ротационном формовании / М.М. Ревяко, Е.З. Хрол // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т.83, № 5. – С. 1022–1025.
8. Ревяко, М.М. Моделирование процесса модифицированного двустадийного ротационного формования / М.М. Ревяко, Е.З. Хрол // Труды БГТУ. Серия IV, Химия, технология органических веществ и биотехнология. – 2010. – № 18. – С. 71–74.
9. Хрол, Е.З. Обоснование технологических параметров процесса ротационного формования / Е.З. Хрол // Молодежь в науке – 2009: приложение к журналу «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі», Серия физико-технических наук, в 5-и частях – Мн.: Беларуская навука, 2010. – ч. 5.– С. 212–213.
10. Revyako, M.M. Certain problems of heat and mass transfer in rotational molding / M.M. Revyako, E.Z. Khrol // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2010. – Vol.83, № 5. – С. 1089–1092.

11. Ревяко, М.М. Использование вторичного сырья при ротационном формовании / М.М. Ревяко, Е.З. Хрол // Новые технологии рециклинга отходов производств и потребления: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 мая 2008 г. / Белорус. гос. технологический ун-т; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2008. – С. 188–191.

12. Хрол, Е.З. Вспенивание как способ экономии материала при ротационном формовании / Е.З. Хрол, М.М. Ревяко // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–20 ноября 2008 г. / Белорус. гос. технологический ун-т; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2008. – С. 358–362.

13. Ревяко, М.М. Модификация полимеров для ротационного формования / М.М. Ревяко, Е.З. Хрол // Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов и перспективы их развития: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25–27 ноября 2009 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. технологический ун-т; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск: БГТУ, 2009. – ч. 1. – С. 28–31.

14. Хрол, Е.З. Ротационное формование изделий с улучшенными характеристиками из модифицированных полимерных композиций / Е.З. Хрол, М.М. Ревяко // Композит-2010. Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология: материалы Международной конференции, Саратов, 30 июня – 2 июля 2010 г. / СГТУ. – Саратов, 2010. – С. 78–80.

15. Хрол, Е.З. Моделирование вращения формирующего инструмента при ротационном формовании / Е.З. Хрол // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: материалы Республиканской научно-технической конф. молодых ученых, Гомель, 5–7 октября 2010 г. / ИММС НАН Беларуси. – Гомель, 2010. – С. 133–135.

16. Хрол, Е.З. Конструирование и анализ изделий, получаемых методом ротационного формования / Е.З. Хрол // Научные стремления – 2010: сборник материалов Республиканской науч.-практ. молодежной конф. с международным участием: в 2 ч., Минск, 1–3 ноября 2010 г. / НАН Беларуси [и др.]; редкол.: В.В. Казбанов [и др.]. – Минск, 2010. – Ч.1. – С. 342–345.

17. Ревяко, М.М. Получение модифицированных изделий как способ экономии материала при ротационном формовании / М.М. Ревяко, Е.З. Хрол // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф.: в 2 ч., Минск, 24–26 ноября 2010 г. / Белорус. гос. технологический ун-т; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2010. – Ч.1. – С. 18–22.



18. Ревяко, М.М. Ротационное формование, как метод получения крупнотоннажных изделий из термопластов / М.М. Ревяко, Е.З. Хрол // Полимерные композиты и трибология. Поликомтриб-2007: материалы тезисов междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 16–19 июля 2007 г. / НАН Беларуси [и др.]; редкол.: В.Н. Адери́ха [и др.]. – Гомель, 2007. – С. 182–183.

19. Хрол, Е.З. Моделирование теплопереноса при ротационном формовании / Е.З. Хрол // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: материалы IV гомельской региональной конф. молодых ученых, Гомель, 23–24 сентября 2008 г. / ИММС НАН Беларуси. – Гомель, 2008. – С. 183–184.

20. Хрол, Е.З. Модификация полимерных материалов для ротационного формования / Е.З. Хрол // Молодежь. Наука. Инновации – 2009: тезисы докладов шестидесят второй региональной науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием, Ярославль, 15 апр. 2009 г. / Ярославский гос. технический ун-т; редкол.: И.Г. Абрамов [и др.]. – Ярославль: ЯГТУ, 2009. – С. 67.

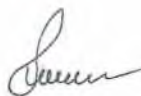
21. Хрол, Е.З. Разработка и изготовление модифицированных изделий из полимерных материалов методом ротационного формования / Е.З. Хрол, М.М. Ревяко // Полимерные композиты и трибология. Поликомтриб-2009: материалы тезисов междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 22–25 июля 2009 г. / НАН Беларуси [и др.]; редкол.: В.Н. Адери́ха [и др.]. – Гомель, 2009. – С. 234–235.

*Патенты и заявки на патенты*

22. Стабилизатор светоокислительной деструкции: пат. 11564 Респ. Беларусь, МПК (2006) С 08К 5/00, С 08L 23/00 / В.В. Яценко, Н.М. Кузьменок, Л.А. Попова, Т.А. Ковальчук, Е.З. Хрол; заявитель Учреждение образования «Белорус. гос. технологический ун-т». – № а 20071172; заявл. 27.09.2007; опубл. 28.02.2009.

23. Стабилизатор светоокислительной деструкции: пат. 11565 Респ. Беларусь, МПК (2006) С 08К 5/00, С 08L 23/00 / В.В. Яценко, Э.Т. Крутько, Л.А. Попова, Е.З. Хрол; заявитель Учреждение образования «Белорус. гос. технологический ун-т». – № а 20071238; заявл. 10.10.2007; опубл. 28.02.2009.

24. Способ двухстадийного ротационного формирования армированных крупногабаритных полых изделий: заявка на патент Респ. Беларусь, МПК (2009) В 29С 41/04 / М.М. Ревяко, Е.З. Хрол; заявитель Учреждение образования «Белорус. гос. технологический ун-т». – № а 20100607; заявл. 22.04.2010.



## РЭЗІЮМЭ

Хрол Яўген Зянонавіч

### УПЛЫЎ МАДЫФІКАВАННЯ ПАЛІМЕРНЫХ МАТЭРЫЯЛАЎ НА ПРАЦЭС РАТАЦЫЙНАГА ФАРМАВАННЯ ВЫРАБАЎ

Ключавыя словы: ратацыйнае фармаванне, мадыфікаванне, палімерны матэрыял, цепламасаперанос, мнагаслойны выраб, тэрмапласты, парашок, кансалідацыя, час фармавання.

Мэтай даследавання з'яўляецца паляпшэнне тэхніка-эканамічных паказчыкаў працэсу ратацыйнага фармавання за кошт мадыфікавання палімерных матэрыялаў, павышэнне прадукцыйнасці працэсу, пашырэнне наменклатуры вырабаў і зніжэнне выдаткаў на падрыхтоўку вытворчасці, а таксама матэрыяльных і энергетычных затрат пры фармаванні.

Метады даследавання – метады вырабу ўзораў з мадыфікаваных палімерных матэрыялаў, якія выкарыстоўваюцца ў прамысловасці перапрацоўкі пластмас; метады вызначэння паказчыкаў уласцівасцяў кампазіцыйных матэрыялаў. Сканавальная электронная мікраскапія, ІЧ-спектраскапія, рэалагічныя выпрабаванні палімераў.

У рабоце прадстаўлены вынікі даследаванняў, накіраваных на вывучэнне кінетыкі працэсу ратацыйнага фармавання вырабаў з мадыфікаваных палімерных матэрыялаў. Прыведзены вынікі выпрабаванняў палімерных кампазіцый для ратацыйнага фармавання, вызначаны ўплыў мадыфікатараў на паказчыкі ўласцівасцяў кампазіцый, вылучаны параметры, па якіх ажыццяўляецца параўнанне матэрыялаў для ратацыйнага фармавання. Акрамя таго, у рабоце выведзены аналітычныя і прадстаўлены графічныя залежнасці, з дапамогай якіх можна разлічваць асноўны параметр тэхналагічнага працэсу – час фармавання. У рабоце апісваецца спосаб атрымання ратацыйным фармаваннем мнагаслойных вырабаў і прадстаўлены вынікі мнагастадыйнага фармавання на практыцы, а таксама графічныя залежнасці, якія апісваюць змяненне тэмпературы палімернага матэрыялу ў працэсе двухстадыйнага ратацыйнага фармавання.

Вобласці прымянення вынікаў дысертацыі – прадпрыемствы канцэрна «Белнафтахім» і Міністэрства прамысловасці Рэспублікі Беларусь.

## РЕЗЮМЕ

Хрол Евгений Зенонович

### ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРОЦЕСС РОТАЦИОННОГО ФОРМОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ

Ключевые слова: ротационное формование, модифицирование, полимерный материал, тепломассоперенос, многослойное изделие, термопласты, порошок, консолидация, время формования.

Целью исследования является улучшение технико-экономических показателей процесса ротационного формования за счет модифицирования полимерных материалов, повышение производительности процесса, расширение номенклатуры выпускаемых изделий и снижение затрат на подготовку производства, а также материальных и энергетических затрат при формовании.

Методы исследования – методы изготовления образцов из модифицированных полимерных материалов, используемые в промышленности переработки пластмасс; методы определения показателей свойств композиционных материалов. Сканирующая электронная микроскопия, ИК-спектроскопия, реологические испытания полимеров.

В работе представлены результаты исследований, направленных на изучение кинетики процесса ротационного формования изделий из модифицированных полимерных материалов. Приведены результаты испытаний полимерных композиций для ротационного формования, определено влияние модификаторов на показатели свойств композиций, выделены параметры, по которым осуществляется сравнение материалов для ротационного формования. Кроме того, в работе выведены аналитические и представлены графические зависимости, с помощью которых можно рассчитывать основной параметр технологического процесса – время формования. В работе описывается способ получения ротационным формованием многослойных изделий и представлены результаты многостадийного формования на практике, а также графические зависимости, описывающие изменение температуры полимерного материала в процессе двухстадийного ротационного формования.

Область применения результатов диссертации – предприятия концерна «Белнефтехим» и Министерства промышленности Республики Беларусь.

## SUMMARY

Khrol Eugene Z.

### POLYMERIC MATERIALS MODIFYING INFLUENCE ON THE PROCESS OF ROTATIONAL MOLDING OF PARTS

**Keywords:** rotational molding, modifying, polymeric material, heat-masstransfer, multilayered part, thermoplastic materials, powder, consolidation, time of molding.

The objective of the research is the improvement of engineering-and-economical performance of the rotational molding process at the expense of polymeric materials modifying, increasing of the process productivity, expansion of the nomenclature of the produced parts and decreasing of manufacture preparation cost, and also material and power cost during molding.

Research methods – methods of samples manufacturing from the modified polymeric materials used in the plastic processing industry; methods of definition of characteristics of composite materials. Scanning electronic microscopy, IR-spectroscopy, rheological tests of polymers.

The results of the researches directed on studying of process kinetics of rotational molding of products from modified polymeric materials are presented in the work. The results of testing of polymeric compositions for rotational molding are resulted there, influence of modifiers on characteristics of compositions is defined, parameters on which comparison of materials for rotational molding is carried out are allocated. Besides, analytical and graphic dependences which can be used to calculate key parameter of technological process – time of molding – are deducted in the work. The method of producing by the rotational molding of multilayered products and the results of multistage molding on practice, and also the graphic dependences describing the change of polymeric material temperature during the two-stage rotational molding are described in the work.

The application field of the results of the dissertation – the enterprises of «Belneftekhim» concern and the Ministry of Industry of the Republic of Belarus.



Научное издание

Хрол Евгений Зенонович

**ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ПРОЦЕСС РОТАЦИОННОГО ФОРМОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.17.06 – технология и переработка полимеров  
и композитов

Ответственный за выпуск Е.З. Хрол

Подписано в печать 13.05.2011. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,5.

Тираж 60 экз. Заказ 213.

Издатель и полиграфическое исполнение:

УО «Белорусский государственный технологический университет».

ЛИ № 02330/0549423 от 08.04.2009.

ЛП № 02330/0150477 от 16.01.2009.

Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.