

На правах рукописи

Горбунов Денис Борисович

**СТАЦИОНАРНЫЕ И НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ
ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ ПСЕВДОПЛАСТИЧНЫХ СРЕД
НА ОДНОЧЕРВЯЧНЫХ МАШИНАХ**

Специальность 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2006

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент А.А. Татарников

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Волокитин Геннадий Георгиевич

кандидат технических наук, доцент Анিকেенко Владимир Михайлович

Ведущая организация:

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет», г. Кемерово

Защита состоится «12» декабря 2006 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного Совета Д.212.269.08 при Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета

Автореферат разослан «__» ноября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета,
кандидат технических наук

Петровская Т.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Экструзия является одним из основных способов переработки резиновых смесей в изделия. В современных рыночных отношениях к продукции промышленных предприятий резинотехнической, кабельной, шинной промышленности предъявляются высокие требования к качеству изделия, которое определяет во многом себестоимость продукции, а, следовательно, ее конкурентоспособность. Одним из факторов, влияющих на качество изделия, является правильный выбор технологических параметров процесса экструзии и их соблюдение.

Теоретические и экспериментальные исследования процессов, проходящих в канале червяка при переработке резиновых смесей, в публикациях представлены весьма ограниченно. Это связано с тем, что для описания процесса переработки резиновой смеси в канале червяка была использована аналогия с процессом, протекающим в напорной зоне червяка при переработке в нем расплава полимера. Основанием такой аналогии послужила принадлежность расплавов полимеров и резиновых смесей к псевдопластичным средам.

Однако следует отметить, что процессы переработки на одночервячных машинах резиновых смесей и расплавов полимеров имеют существенные отличия. Одно из таких отличий состоит в том, что длину нарезной части червяка при переработке резиновых смесей условно можно разделить не на две зоны, как это принято для случая переработки расплавов полимеров, а на три: напорную, буферную и питания. Наличие буферной зоны оказывает существенное влияние на технологический процесс переработки резиновой смеси в канале червяка.

Для производства резинотехнических изделий высокого качества целесообразно предусмотреть контроль и автоматическое управление процессом экструзии. При разработке автоматических систем управления процессом экструзии на одночервячных машинах необходимо иметь адекватные математические модели, описывающие не только стационарный, но и нестационарный режимы ее работы, так как червячная машина работает в квазистационарном режиме, который определяется ее динамическими характеристиками по различным каналам.

К настоящему времени число работ, посвященных исследованию нестационарных процессов в канале червяка одночервячной машины, незначительно и, в основном, изучались нестационарные процессы для случая переработки расплавов полимеров. Работы по исследованию нестационарных процессов в червячных машинах, перерабатывающих резиновые смеси, ограничены экспериментальными исследованиями, проведенными на лабораторных машинах, где одночервячная машина рассматривалась как «черный» ящик.

Исследование нестационарных процессов работы одночервячной машины и визуальное исследование процесса течения резиновой смеси в канале червяка требует значительных материальных и временных затрат (см. работу Брзорсковски Р.). Поэтому, целесообразно провести экспериментальные исследования по изучению стационарного и нестационарного процессов экструзии на экспериментальной установке с использованием модельной среды.

Цель диссертационной работы – разработка аналитического метода расчета характеристики нестационарного процесса экструзии на одночервячной машине в виде дифференциального уравнения или передаточной функции.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать и изготовить легко разбираемую конструкцию лабораторной экспериментальной установки одночервячной машины, которая позволяла бы: легко производить демонтаж и монтаж цилиндра для визуального исследования заполнения канала червяка модельной средой; измерять температуру и давление модельной среды на выходе из червяка; измерять величину крутящего момента для вычисления потребляемой мощности; легко производить смену фильтр; изменять и измерять частоту вращения червяка; проводить вращение червяка вручную.

2. Определить реологические характеристики, используемой в эксперименте, модельной среды.

3. Провести экспериментальную проверку адекватности математических моделей для расчета производительности напорной зоны.

4. Провести экспериментальные и теоретические исследования процессов, проходящих в зоне питания, буферной и напорной зоне, а также визуально исследовать заполнение канала червяка при различных режимах работы одночервячной машины.

5. Разработать метод и методику аналитического расчета переходной кривой изменения производительности одночервячной машины при переработке на ней псевдопластичных сред по каналу «питание напорной зоны – производительность машины».

6. Провести экспериментальные и теоретические исследования стационарного и нестационарного процессов переработки на одночервячной машине резиновой смеси и сравнить полученные результаты с результатами, полученными при переработке модельной среды.

Научная новизна работы.

1. Предложен метод аналитического расчета математической модели нестационарного режима процесса экструзии псевдопластичных сред на одночервячной машине, позволяющий определять технологические параметры процесса, при которых колебания производительности машины от номинального значения будут минимальными.

2. Показано, что переходная кривая производительности одночервячной машины может быть аппроксимирована звеном, которое эквивалентно последовательному соединению аperiodического звена и звена чистого запаздывания, а напорную зону можно по своим физическим свойствам рассматривать как низкочастотный фильтр, который фильтрует высокочастотные возмущающие помехи, действующие на напорную зону.

3. Определена адекватность разработанных на основе степенного закона математических моделей для расчета производительности напорной зоны, которая заключалась в сравнении длины напорной зоны, вычисленной с помощью математических моделей, и длины, определенной экспериментально.

Практическая ценность работы.

1. Разработана методика расчета математической модели нестационарных режимов процесса экструзии псевдопластичных сред на одночервячных машинах, которая позволяет прогнозировать при заданных технологических параметрах процесса экструзии величину максимального и минимального отклонения размеров экструдированных изделий от номинального значения, а также рассчитать параметры технологического процесса экструзии, с целью его оптимизации по критерию минимума отклонения размеров экструдированного изделия от номинального значения.

2. Определена адекватная изотермическая математическая модель для расчета производительности напорной зоны (модель со сложным сдвигом Р.В. Торнера, в которой поток утечки суммируется с основным потоком, поступающим на вход напорной зоны со стороны буферной зоны). Она может быть использована как при проведении инженерных расчетов, так и в научных исследованиях.

3. Предложена модельная среда с псевдопластичными реологическими свойствами – тесто, которое может быть использовано при проведении экспериментальных исследований течения псевдопластичных сред типа резиновой смеси в канале червяка, что значительно упростит проведение натурных экспериментов.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Впервые разработанный метод аналитического расчета динамической характеристики одночервячной машины как объекта управления при переработке на ней псевдопластичных сред по каналу «питание напорной зоны – производительность машины» и экспериментальные данные, подтверждающие адекватность метода.

2. Методика и результаты проверки адекватности разработанных изотермических математических моделей для расчета производительности напорной зоны одночервячной машины.

3. Движение перерабатываемого материала в буферной зоне происходит дискретно, что подтверждено экспериментальными и теоретическими исследованиями. Как следствие этого, питание напорной зоны будет осуществляться также дискретно, а, следовательно, режим работы напорной зоны и машины в целом будет квазистационарным.

4. Факт увеличения производительности одночервячной машины с двухзаходным червяком практически в два раза по сравнению с производительностью машины с однозаходным червяком, что подтверждено экспериментально.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы заслуживались на: VI-й Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», г. Томск, 2000 г.; VII-й Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современная техника и технологии», г. Томск, 2001 г.; Седьмой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надёжность, безопасность», г. Томск, 2001 г.; Международной научно-технической конференции «Электромеханические transforma-

тели энергии», г. Томск, 2001 г.; Всероссийской научной конференции молодых учёных «Наука, технологии, инновации», г. Новосибирск, 2003 г.; Девятой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надёжность, безопасность», Томск, 2003 г.; III-й Всероссийской научной конференции «Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий», г. Томск, 2004 г.; X-й Юбилейной Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», посвященной 400-летию г. Томска, г. Томск, 2004 г.; XI-й Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», г. Томск, 2005 г., XII-й Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», г. Томск, 2006 г.

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 22 печатных работах, в том числе 3 – в рецензируемых журналах, 2 работы изданы за рубежом.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и шести приложений. Диссертация изложена на 161 странице машинописного текста, содержит 34 рисунка, 13 таблиц, библиография включает 110 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи проводимых исследований, показана научная новизна и практическая значимость, представлена структура и объем работы.

В первой главе проведен анализ текущего состояния предметной области. Рассмотрен процесс изготовления и технологическая схема производства резинотехнических изделий. Показано, что процесс подготовки резиновой смеси к экструзии на одночервячной машине является одним из важнейших звеньев во всей технологической цепочке, поскольку во многом определяет качество готового изделия.

Проведен анализ существующих математических моделей для расчета производительности функциональных зон одночервячной машины – напорной зоны, буферной зоны, зоны питания. Выделено три математические модели для расчета производительности напорной зоны, которые отражают различные подходы к теоретическому определению ее производительности: одномерная модель Д.М. Мак-Келви с учетом неньютоновских свойств аномально-вязких сред и с учетом утечки через радиальный зазор (модель 1); одномерная модель Р.В. Торнера с учетом утечки через радиальный зазор (модель 2); модель со сложным сдвигом Р.В. Торнера с учетом утечки через радиальный зазор (модель 3). К настоящему времени в литературе отсутствует проверка адекватности представленных выше математических моделей, описывающих переработку в напорной зоне псевдопластичных сред типа резиновой смеси.

Во второй главе приведено описание разработанной экспериментальной установки одночервячной машины, которая использовалась при проверке адекватности математических моделей стационарного и нестационарного режимов работы одночервячной машины, а также при изучении реологических свойств, используемой в эксперименте модельной среды. При проектировании экспериментальной установки учитывались основные соотношения геометрических параметров червяков и конструктивные приемы элементов одночервячных машин промышленного назначения, перерабатывающих резиновые смеси. Экспериментальная установка позволяет проводить измерение гидравлического сопротивления P_c и температуры перерабатываемого материала на выходе червяка, крутящего момента на валу. Измерения производительности одночервячной машины Q_m проводились весовым методом. Вращение червяка одночервячной машины можно осуществлять вручную или при помощи электрического привода с определенной частотой вращения N . Цилиндр экспериментальной установки состоит из двух частей, соединенных гайкой. В составе экспериментальной установки имеются два червяка с постоянной глубиной h канала: однозаходный ($h=3,85$ мм) и двухзаходный ($h=4,3$ мм). Диаметр червяков $D=20$ мм, шаг нарезки $t_n=20$ мм, соотношение длина нарезной части – диаметр червяка $L/D=11$.

Модельная среда, которую целесообразно применять при проведении экспериментальных исследований, должна отвечать следующим требованиям: при ее переработке на одночервячной машине в канале червяка может существовать свободная вертикальная граница, что характерно для псевдопластичных сред типа резиновой смеси; относится по своим реологическим свойствам к псевдопластичным средам; простота получения, не требующая специализированного оборудования для смешения ингредиентов; доступность ингредиентов и низкие затраты на ее приготовление; вязкость должна быть на порядок ниже, чем вязкость резиновых смесей, что должно позволить проведение демонтажа рабочего цилиндра одночервячной машины без использования специального инструмента; применение этой среды должно исключить предварительную термическую или иную обработку перерабатываемого материала в канале червяка перед демонтажем рабочего цилиндра одночервячной машины; при переработке этой среды должна быть исключена система охлаждения цилиндра по зонам и в формирующем инструменте; переработка среды на экспериментальной установке должна быть близка к изотермическому процессу.

Этим требованиям отвечает модельная среда – тесто, приготовленное из муки высшего сорта и водопроводной воды в соотношении по массе 2:1. Переработка модельной среды на одночервячной машине экспериментальной установки показала, что разница ΔT между температурой материала, подаваемого в одночервячную машину, и его температурой на выходе червяка не превышала 5°C .

В качестве экструзионного реомера для исследования реологических характеристик модельной среды применялась экспериментальная установка. По мето-

дике [18] получено уравнение кривой течения вида $\tau = \frac{0,021 \cdot \dot{\gamma}}{1 + 2,241 \cdot (\dot{\gamma})^{0,486}}$, где $\dot{\gamma}$ –

истинная скорость сдвига, c^{-1} ; τ - напряжение сдвига, МПа.

Третья глава посвящена изучению функциональных зон одночервячной машины. На рис. 1 представлена фотография распределения модельной среды вдоль оси однозаходного червяка, а на рис. 2 – вдоль оси двухзаходного червяка. Червяки (см. рис. 1, 2) извлечены из передней части цилиндра непосредственно после экспериментов.



Рис. 1. Распределение модельной среды вдоль оси однозаходного червяка



Рис. 2. Распределение модельной среды вдоль оси двухзаходного червяка

Представленные рисунки (рис. 1, 2) показывают, что при переработке модельной среды по длине канал червяка заполнен материалом не полностью. Сравнивая фотографии по распределению резиновой смеси вдоль оси червяка, представленные в работе Брзорсковски Р., и фотографии, изображенные на рис. 1 и рис. 2, можно наблюдать явную аналогию по виду распределения материала вдоль оси червяка.

В связи с тем, что длина напорной зоны зависит от P_z , а Q_m однозначно определяется производительностью зоны питания, проверка адекватности моделей 1-3 проведена путем сравнения вычисленной с помощью математических моделей длины напорной зоны L_{nz} и длины напорной зоны, определенной экспериментально при заданной производительности зоны питания.

В моделях 1-3 принято считать, что эта утечка влияет на Q_m и, как следствие, величина утечки Q_{ym} через зазор вычитается из Q_m . В работе [15] показано, что Q_{ym} не влияет на Q_m , а влияет только на L_{nz} . Поэтому Q_m не зависит от величины зазора (величины утечки), а определяется только производительностью зоны питания. Течение материала в напорной зоне канала червяка принято изотермическим со сложным сдвигом, а в зазоре – одномерным. Реологические свойства перерабатываемого материала в канале и в зазоре описываются степенным законом. Процесс переработки в напорной зоне определяется расчетной безразмерной производительностью q_p , вычисляемой по формуле [15]

$$q_p = q_m + q_{ym}, \quad (1)$$

где $q_m = Q_m / Q_{max}$ – безразмерная производительность одночервячной машины; $Q_{max} = 0,5 \cdot k \cdot \pi \cdot D \cdot N \cdot \cos \varphi \cdot h \cdot w \cdot F_D \cdot \varepsilon_k$ – объемная максимальная теоретическая производительность одночервячной машины; Q_m – объемная производительность одночервячной машины; k – число заходов червяка; φ – угол нарезки канала червяка; F_D – коэффициент, учитывающий тормозящее влияние стенок канала червяка; ε_k – коэффициент, учитывающий уменьшение сечения канала червяка за счет скругления у основания гребня $q_{ym} = Q_{ym} / Q_{max}$ – безразмерная величина утечки.

В качестве четвертой модели для расчета производительности напорной зоны возьмем модель со сложным сдвигом Р.В. Торнера, производительность которой определяется уравнением (1).

Оценка адекватности этих моделей произведена по критерию Стьюдента выборочного среднего значения относительной ошибки δ_n ($\delta_n = (L_{нз}^{мод} - L_{нз}^{экс}) / L_{нз}^{экс}$,

где $L_{нз}^{мод}$ – значение длины напорной зоны, определенное по модели; $L_{нз}^{экс}$ – значение длины напорной зоны, полученное в ходе эксперимента) с известным генеральным значением равным «0». Результаты проверки адекватности представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты проверки адекватности математических моделей для расчета производительности напорной зоны

Модель	m	t_p	t_α
<i>Однозаходный червяк</i>			
1	19	9,686	2,101
2	19	3,852	2,101
3	19	3,257	2,101
4	19	0,132	2,101
<i>Двухзаходный червяк</i>			
4	16	1,36	2,131

В представленной выше таблице m – объем выборки; t_p – расчетное значение критерия Стьюдента; t_α – табличное значение критерия Стьюдента, определенное с доверительной вероятностью 0,95.

Из таблицы 1 видно, что только модель 4 как для одно-, так и двухзаходного червяков адекватно описывает процесс переработки в напорной зоне.

Показано, что расхождение между значениями «входной» производительности (масса материала, поданного в загрузочную воронку за определенное время) и «выходной» производительности (масса материала, полученного из одночервячной машины за определенное время) для однозаходного червяка составляет -0,6 ... 5,5 %, а для двухзаходного -4,8 ... 3,7 %, что подтверждает независимость Q_m от $Q_{ум}$.

Проведены исследования работы буферной зоны на экспериментальной установке с применением одно- и двухзаходного червяков при работе одночервячной машины в режиме свободного выхода. Модельная среда подавалась в загрузочную воронку в виде ленты с различной шириной a_n и толщиной b_n . Эксперимент показал, что распределение модельной среды в буферной зоне имеет вид отдельных сегментов различной длины, ширины и массы. Причем высота каждого сегмента соответствует глубине нарезки канала червяка. Поэтому процесс питания напорной зоны можно представить импульсами с переменной амплитудой и с переменной скважностью. Показано, что выборки массы и скважности сегментов в одно – и двухзаходном червяках во всех экспериментах подчиняются лог-

нормальному закону распределения.

Поскольку при переработке модельной среды на экспериментальной установке имеется буферная зона, то Q_m не должна зависеть от P_2 . В этом случае Q_m определяется линейной зависимостью от N . На рис. 3 представлены статические характеристики характеристики одночервячной машины экспериментальной установки. Линей-

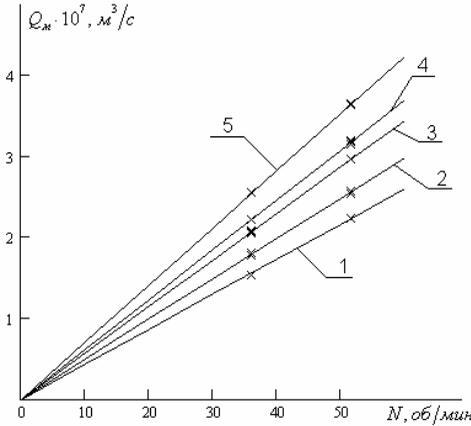


Рис. 3. Статические характеристики одночервячной машины экспериментальной установки при различных значениях параметра K_n/D^3 : 1-0,032; 2-0,037; 3-0,043; 4-0,046; 5-0,053; × - экспериментальные точки

дования работы зоны питания промышленных одночервячных машин при переработке на них резиновых смесей. Для них $K_n/D^3=0,085$. Таким образом, процесс в зоне питания при переработке модельной среды на экспериментальной установке одночервячной машины идентичен процессу в зоне питания при переработке на одночервячных машинах резиновых смесей.

Для исследования зависимости Q_m от P_2 проведены две серии экспериментов на одночервячной машине экспериментальной установки с применением одно- и двухзаходного червяков для одного режима питания машины внутри серии при $N=36,1$ мин⁻¹. Показана независимость Q_m от P_2 в серии экспериментов. На рис. 4 знаком «×» показаны экспериментальные точки с применением однозаходного червяка, а знаком «+» – с применением двухзаходного червяка. Среднее значение Q_m в серии для однозаходного червяка (прямая 1, рис. 4) превышает в 1,9 раза аналогичное значения для двухзаходного (прямая 2, рис. 4), хотя при проведении экспериментальных исследований геометрические размеры ленты питания поддерживались приблизительно постоянными, a_n находилась в пределах 12,1...12,2 мм, а b_n – 3,1...3,7 мм. Отмечено, что средняя скорость захвата ленты питания двухзаходным червяком выше средней скорости захвата ленты однозаходным

ность зависимости $Q_m=f(N)$ доказана (с доверительной вероятностью 0,95) при помощи параметрических методов математической статистики. Каждая статическая характеристика определяется режимом питания, характеризующегося параметром K_n/D^3 , который был предложен Татарниковым А.А. K_n – коэффициент, определяемый из формулы $Q_m=K_n \cdot N$.

При питании одночервячной машины «катышами» (материал свернут в рулон) получено максимальное значение K_n/D^3 , которое составило 0,08 при использовании однозаходного червяка и 0,1 – двухзаходного червяка. Полученный результат хорошо согласуется с результатами исследова-

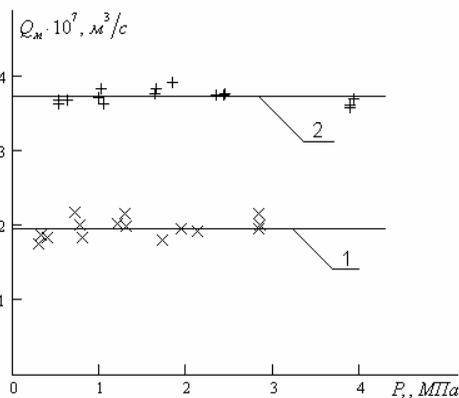


Рис. 4. Зависимость Q_m от P_z

захватывается и начинает наматываться на червяк до тех пор, пока намотанная часть по высоте не достигнет размера h . Далее эта часть перемещается по каналу червяка.

Для исследования скорости захвата ленты питания червяком рассмотрен коэффициент захвата ленты питания K_z (предложен Татарниковым А.А.). Показано, что K_z не зависит от N , а определяется геометрическими размерами ленты питания (a_n и b_n). Для выявления зависимости $K_z=f(a_n, b_n)$ использованы математические методы теории планирования эксперимента.

В четвертой главе разработан метод аналитического расчета кривой переходного процесса производительности одночервячной машины по каналу «питание напорной зоны – производительность машины» с нанесением отрицательного ступенчатого возмущающего воздействия (питание напорной зоны прекращено). В основе метода лежит уравнение

$$\frac{L_{нз}}{D} = \frac{\mu_{0f} \cdot \left(\frac{q_m}{k'_z} \cdot k \cdot \pi \cdot D \cdot N \cdot \cos \varphi \cdot h \cdot w \cdot F_D \cdot \varepsilon_k \right)^{\frac{1}{n_f}} \cdot h^{\frac{1}{n} + 1}}{\mu_0 \cdot \left(\pi \cdot D \cdot N \cdot \cos \varphi \cdot (n+1)^{\frac{1}{n}} \right) \cdot D \cdot 2^{\frac{1}{n_f}} \cdot B_{zp}}$$

где k'_z – коэффициент сопротивления формующей головки для течения псевдопластичной жидкости; μ_0 и μ_{0f} – коэффициенты консистенции материала соответственно в канале червяка и в фильере; n и n_f – индексы течения материала соответственно в канале червяка и в фильере; B_{zp} – безразмерный градиент давления, определяемый по значению q_p .

Суть метода заключается в последовательном вычислении точек переходного процесса, которые определяются при постепенном уменьшении q_m на величину Δq_m . Величина Δq_m выбирается из условия, что на интервале между двумя сосед-

червяком. При применении одночервячной машины можно выделить два характерных способа захвата ленты питания: 1) захват гребнем червяка; 2) захват гребнем и поверхностью сердечника червяка. Первый способ захвата является основным и участвует при захвате ленты питания любых геометрических размеров, второй – может принять участие только при захвате ленты питания с b_n большей, чем значение h в зоне питания. В проведенных экспериментах осуществлялся захват ленты питания модельной среды первым способом. В этом случае лента питания гребнем червяка

ними точками переходного процесса производительность можно считать изменяющейся линейно. В этом случае скорость v_i уменьшения $L_{нз}$ на интервале между двумя соседними точками переходного процесса можно определить по формуле $v_i = 0,5 \cdot \pi \cdot D \cdot N \cdot \cos \varphi \cdot \bar{q}_m^i \cdot F_D \cdot \varepsilon_k$, где $\bar{q}_m^i = 0,5 \cdot (q_m^i + q_m^{i+1})$ – средняя безразмерная производительность одночервячной машины между двумя соседними точками переходного процесса.

При этом время изменения производительности на величину Δq_m можно оценить по формуле $\Delta t_i = (L_{нз}^i - L_{нз}^{i+1}) / v_i$, где $L_{нз}^i$ и $L_{нз}^{i+1}$ – длина напорной зоны, определяемая производительностью соответственно q_m^i и q_m^{i+1} .

Для оценки применимости предложенного метода расчета и построения переходного процесса получена на экспериментальной установке с применением однозаходного червяка экспериментальная переходная характеристика одночервячной машины по каналу «питание напорной зоны – производительность машины» при нанесении отрицательного ступенчатого возмущающего воздействия. Экспериментальные данные Q_m при нанесении положительного ступенчатого возмущения питанием (в предположении линейности системы) представлены на рис. 5 (помечены знаком \times). На рис. 5 также представлена переходная характеристика производительности одночервячной машины при нанесении положительного возмущения, рассчитанная по предложенному методу.

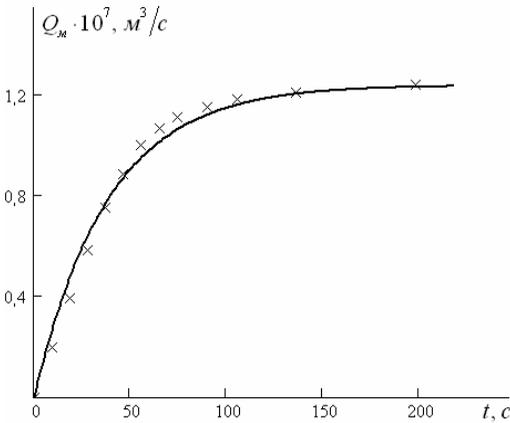


Рис. 5. Переходный процесс производительности одночервячной машины экспериментальной установки при нанесении положительного возмущения питанием: $N=19,3$ об/мин; $P_c=1,7$ МПа; $\Delta T=3$ °С

Показано, что аппроксимирующее уравнение имеет смысл, а средняя погрешность аналитического расчета переходной кривой составляет 6 %.

Поскольку параллельных экспериментов не проведено, то по критерию Фишера произведена оценка качества аппроксимации экспериментальных точек аппроксимирующим уравнением, полученным по предложенному методу. Показано, что аппроксимирующее уравнение имеет смысл, а средняя погрешность аналитического расчета переходной кривой составляет 6 %.

Одной из основных характеристик, оказывающих влияние на стабильность производительности одночервячной машины, является длина напорной зоны. Для исследования влияния длины напорной зоны на динамические характеристики одночервячной машины по предложенному методу произведен расчет переходных процессов Q_m по каналу «питание напорной зоны – производительность машины» при нанесе-

нии отрицательного возмущения для двух различных режимов работы машины. Значения производительности одночервячной машины и частоты вращения червяка в этих режимах были одинаковыми, а значение k'_z для режима 1 выше, чем для режима 2.

Аналитически рассчитанные точки переходных процессов Q_m для режимов описываются решением дифференциальных уравнений: для режима 1 – $68 \cdot \frac{dQ_m(t)}{dt} + Q_m(t) = Q_n(t-0,2)$, для режима 2 – $21 \cdot \frac{dQ_m(t)}{dt} + Q_m(t) = Q_n(t-0,1)$,

где Q_n – объемная производительность зоны питания червячной машины, m^3/c ; Q_m – объемная производительность одночервячной машины, m^3/c ; t – время, c .

При анализе влияния динамических характеристик одночервячной машины на стабильность ее производительности входной сигнал моделировался последовательностью детерминированных прямоугольных импульсов постоянной амплитуды и скважности. Анализ произведен в системе «MATLAB. SIMULINK».

Объем элементарного сегмента,двигающегося в буферной зоне, определен по формуле $V_u = 0,5 \cdot \pi \cdot h \cdot w \cdot t_u \cdot D \cdot N \cdot \cos \varphi$, где t_u – длительность прямоугольного импульса. Значение периода следования импульсов T выражено формулой

$$T = z_1 \cdot \frac{[D - 2 \cdot h]}{K_z \cdot N \cdot D} + \frac{L_{en}}{\pi \cdot D^2 \cdot \operatorname{tg} \varphi}, \text{ где } z_1 \text{ равна целой части выражения } \left(\frac{h}{b_n} - 1 \right),$$

если $h > b_n$, иначе $z_1 = 0$; L_{en} – длина воронки питания, измеренная вдоль оси червяка. Длительность импульсов определена по уравнению $t_u = F_D \cdot \varepsilon_k \cdot q_m \cdot T$. Амплитуда входного сигнала определяется выражением $A_u = V_u / t_u$.

В подсистеме моделирования динамических процессов «SIMULINK» произведено моделирование переходных процессов производительности одночервячной машины для режимов работы 1 (см. рис. 6б, кривая 1) и 2 (см. рис. 6б, кривая 2). На рис. 6а представлен входной сигнал.

Результаты моделирования в системе «MATLAB. SIMULINK» показали, что колебания производительности относительно среднего значения во втором режиме работы одночервячной машины значительно выше, чем колебания в первом режиме работы машины. Для первого режима работы одночервячной машины значение коэффициента понижения амплитуды колебаний производительности δ_ϕ , который определяется как отношение A_u к колебаниям производительности одночервячной машины в переходном режиме, в три раза больше, чем значение δ_ϕ для второго режима. Таким образом, показано, что увеличение длины напорной зоны приводит к увеличению значения δ_ϕ и уменьшению колебаний производительности одночервячной машины. Следовательно, при составлении технологической карты на изготовление изделия необходимо предусматривать такие режимные мероприятия процесса экструзии, которые в значительной мере способны стабилизировать производительность одночервячной машины.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований стационарного и нестационарного режимов работы одночервячной машины, которые проведены на лабораторном оборудовании управления научно-техничес-

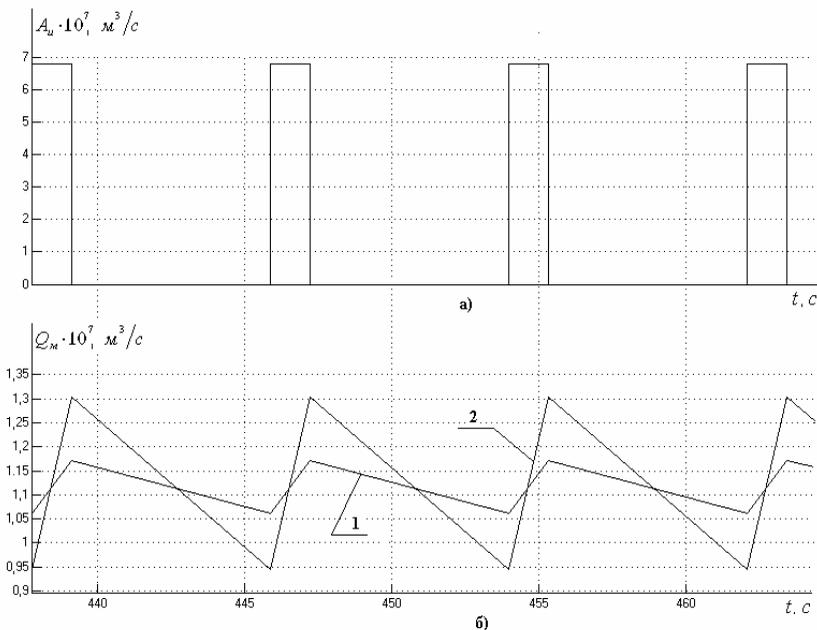


Рис. 6. Временные характеристики: а) входной сигнал; б) производительность одночервячной машины; 1 – для режима 1; 2 – для режима 2

кого развития ООО «Томскнефтехим». При проведении реологических исследований применялся капиллярный вискозиметр марки «Instron 3211», процесс экструзии изучался на лабораторном экструдере PL V151 фирмы «BRABENDER». Лабораторный экструдер имел червяк с постоянным шагом нарезки и переменной глубиной канала ($D=0,019$ м, $L/D=25$, $k=1$, $\varphi=17,65^\circ$, $\delta=0,00005$ м, глубина канала в зоне питания $h_p=0,00375$ м, глубина канала на выходе червяка $h_n=0,0018$ м). В данной модификации лабораторного экструдера имеется три зоны нагрева с двухпозиционным регулированием температуры (соответственно по зонам T_1 , T_2 , T_3) цилиндра и головки T_2 .

Экспериментальные исследования процесса экструзии проводились при переработке смеси, имеющей следующую рецептуру: на 100 массовых частей каучука марки СКЭПТ-50 добавлено 11 массовых частей атактического полипропилена. Приготовление смеси проведено в резинумесителе типа «Benberg». Кривые течения получены при различных температурах T смеси. Обработка экспериментальных данных и получение уравнений истинных кривых течения проведены по методике, изложенной в [18]. Экспериментальные данные кривых течения аппроксимированы уравнением вида

$$\tau = \frac{\eta_n \cdot \dot{\gamma}}{1 + C_2 \cdot \dot{\gamma}^{2-\alpha}}, \quad (2)$$

где τ – напряжение сдвига, МПа, $\dot{\gamma}$ – истинная скорость сдвига, c^{-1} , α и C_2 – постоянные коэффициенты; η_n – коэффициент ньютоновской вязкости, МПа·с.

Значения α , C_2 и η_n для истинных кривых течения вида (2), полученных при различных температурах смеси, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения α , C_2 и η_n для истинных кривых течения вида (2)

$T, ^\circ C$	α	C_2	η_n
80	0,4039	0,3117	0,048
100	0,4134	0,1496	0,0202
120	0,4077	0,1023	0,0105
140	0,3822	0,1769	0,0109

На рис. 7 представлены графики истинных кривых течения, которые построены по данным таблицы 2 и по уравнению (2), а также экспериментальные точки напряжения сдвига и истинной скорости сдвига.

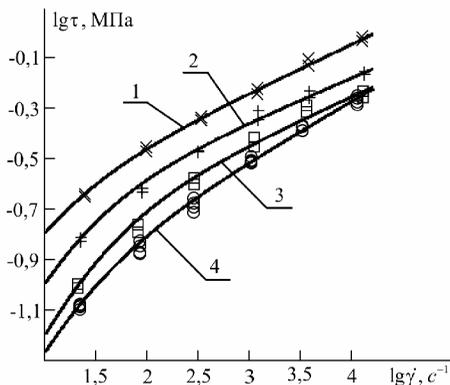


Рис. 7. Истинная кривая течения смеси: 1 – при $T=80$ °C, 2 – при $T=100$ °C, 3 – при $T=120$ °C, 4 – при $T=140$ °C; × – экспериментальные точки при $T=80$ °C, + – экспериментальные точки при $T=100$ °C, □ – экспериментальные точки при $T=120$ °C, о – экспериментальные точки при $T=140$ °C

В экспериментальных исследованиях, проведенных на лабораторном экструдере PL V151 при питании его лентой, наблюдалось накопление части перерабатываемого материала в конце загрузочной воронки экструдера, при этом материал в виде ленты питания подавался в начало загрузочной воронки. Таким образом, моделировалось максимально возможное питание лабораторного экструдера PL V151. Установлено, что способ захвата ленты питания смеси червяком лабораторного экструдера PL V151 идентичен способу захвата ленты питания модельной среды червяком одночервячной машины экспериментальной установки. Следовательно, в буферной зоне лабораторного экструдера материал двигался отдельными сегментами.

На рис. 8 представлены зависимости $Q_M=f(N)$, а также экспериментальные значения (помечены знаком «×») Q_M и N червяка лабораторного экструдера. Максимальное значение параметра $K_n/D^3=0,068$, отмеченное в ходе экспериментальных исследований и характеризующее максимальное питание лабораторного экструдера, меньше на 15 %, чем максимальное значение параметра K_n/D^3 , полученное

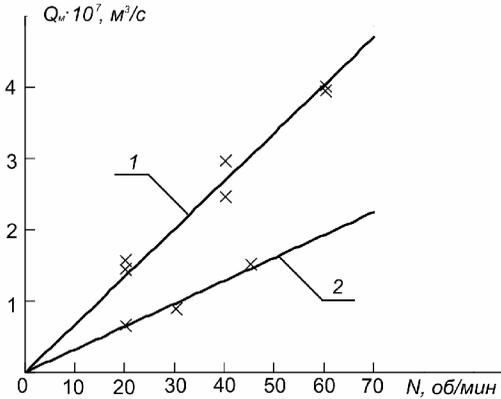


Рис. 8. Статические характеристики экструдера PL V151 при различных значениях параметра K_n/D^3 : 1-0,061; 2-0,028

резиновые смеси. Расхождение между значениями «входной» и «выходной» производительностей для лабораторного экструдера составила 4,3...5,6 %, что подтверждает независимость Q_m от $Q_{mт}$.

Для апробации метода расчета и построения переходного процесса по каналу «питание напорной зоны – производительность машины» при нанесении отрицательного ступенчатого возмущающего воздействия на лабораторном экструдере получены экспериментальные временные характеристики для двух различных режимов его работы. Экспериментальные данные Q_m при нанесении положительного ступенчатого возмущения питанием (в предположении линейности системы) представлены на рис. 9.

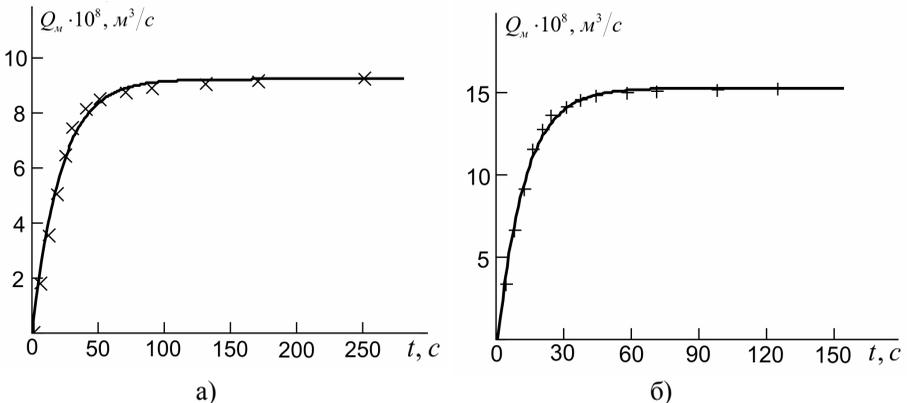


Рис. 9. Переходный процесс Q_m при нанесении положительного возмущения питанием для режимов: а) 1 ($N=30$ об/мин; $P_z=5,9$ МПа; $T_1=110$ °С; $T_2=115$ °С; $T_3=120$ °С; $T_z=115$ °С); б) 2 ($N=45$ об/мин; $P_z=9,2$ МПа; $T_1=110$ °С; $T_2=115$ °С; $T_3=120$ °С; $T_z=115$ °С); × и + – экспериментальные точки

на экспериментальной установке при экструзии модельной среды. Такое отличие в значениях параметра K_n/D^3 можно объяснить различием в конструкциях загрузочных воронок лабораторного экструдера и одночервячной машины экспериментальной установки. В первом случае использовалась центральная загрузочная воронка, которую не предпочтительно применять при загрузке резиновых смесей в виде ленты, а в экспериментальной установке применена тангенциальной загрузочная воронка, которая характерна для конструкции одночервячных машин, перерабатывающих

На рис. 9 также представлены переходные характеристики производительности лабораторного экструдера по каналу «питание напорной зоны – производительность машины» при нанесении положительного возмущения, рассчитанные по предложенному методу. Расчет произведен при глубине нарезки, определенной по формуле $h = 0,5 \cdot (h_p + h_n)$. Произведена оценка по критерию Фишера качества аппроксимации экспериментальных точек аппроксимирующими уравнениями (для режимов 1 и 2), полученными по методу. Показано, что аппроксимирующие уравнения обоих режимов имеют смысл, а средняя погрешность аналитического расчета переходных кривых не превышает 4 %.

Таким образом, метод аналитического расчета точек переходного процесса производительности одночервячной машины оправдывает свое применение также для червяков с переменной глубиной нарезки канала при неизотермическом режиме процесса экструзии на одночервячной машине.

ВЫВОДЫ

1. Метод расчета переходной характеристики одночервячной машины по каналу «питание напорной зоны - производительность машины», который построен на базе адекватной математической модели для расчета производительности напорной зоны одночервячной машины, разработан впервые и позволяет прогнозировать, при заданных параметрах технологического процесса экструзии, величину максимального и минимального отклонения размеров экструдированного изделия от номинального значения, а также рассчитать параметры технологического процесса экструзии, с целью его оптимизации по критерию минимума отклонения размеров экструдированного изделия от номинального значения.

2. Динамические характеристики одночервячной машины определяют стабильность производительности машины. Увеличение длины напорной зоны уменьшает колебания производительности одночервячной машины. Таким образом, при помощи режимных мероприятий (гидравлическое сопротивление в головке, температура экструзии, режим питания одночервячной машины, частота вращения червяка) можно управлять колебаниями производительности одночервячной машины, сводя их к минимуму.

3. По результатам проведенной проверки адекватности математических моделей для расчета производительности напорной зоны можно утверждать, что только математическая модель со сложным сдвигом Р.В. Горнера, в которой поток утечки суммируется с основным потоком, поступающим на вход напорной зоны со стороны буферной зоны, является адекватной.

4. Характер питания напорной зоны одночервячной машины со стороны буферной зоны является дискретным. Выборки значений массы и скважности следования сегментов,двигающихся в буферной зоне, подчиняются логнормальному закону распределения. Поэтому характер питания напорной зоны можно представить импульсами с переменной амплитудой и с переменной скважностью, что необходимо учитывать при анализе влияний внутренних и внешних возмущающих воздействий на производительность одночервячной машины в

квазистационарном режиме ее работы.

5. Производительность одночервячной машины с двухзаходным червяком практически в два раза больше, чем производительность машины с однозаходным червяком, что объясняется различием в значениях коэффициента захвата (отношение скорости движения ленты питания при ее захвате червяком к линейной скорости червяка) ленты питания.

6. Модельная среда (тесто, выполненное из муки высшего сорта и водопроводной воды в соотношении по массе 2:1) с псевдопластичными реологическими свойствами может быть использована при проведении экспериментальных исследований течения псевдопластичных сред типа резиновой смеси в канале червяка, что значительно упростит проведение натуральных экспериментов.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Горбунов Д.Б., Буртелов Л.В. Вычисление коэффициентов чувствительности одночервячной машины как объекта управления по различным каналам возмущающих воздействий // Труды VI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии СТТ'2000». Томск. 28 февраля – 3 марта 2000. – С. 309 – 311.

2. Татарников А.А., Буртелов Л.В., Горбунов Д.Б. АРМ инженера-технолога по разработке технологических режимов изготовления на ЛКНВ кабельных изделий // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы Международной науч.-техн. конф. 6 – 7 сентября 2001. – Томск: ТПУ, 2001. – С. 170 – 171.

3. Татарников А.А., Буртелов Л.В., Горбунов Д.Б. Оценка значения коэффициента ньютоновской вязкости резиновых смесей по кривой течения // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы Международной науч.-техн. конф. 6 – 7 сентября 2001. Томск: ТПУ, 2001 – С. 169 – 170.

4. Татарников А.А., Буртелов Л.В., Горбунов Д.Б. Расчёт потребляемой мощности в напорной зоне одночервячной машины при переработке резиновой смеси // Материалы докладов Седьмой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надёжность, безопасность». Томск, 5 – 7 декабря 2001. – Томск, 2001. – С. 156 – 159.

5. Горбунов Д.Б., Буртелов Л.В., Татарников А.А. Динамические характеристики одночервячной машины как объекта управления при переработке резиновых смесей // Труды VII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии СТТ'2001». Томск. 28 февраля – 3 марта 2001. – С. 47– 49.

6. Горбунов Д. Б., Буртелов Л.В. Лабораторная установка для исследования течения псевдопластичных сред в канале червяка // Материалы докладов Всероссийской научной конференции молодых учёных «Наука, технологии, инновации». Новосибирск. 4 – 7 декабря 2003. – Новосибирск, 2003. – С. 142 – 144.

7. Буртелов Л.В., Горбунов Д.Б., Татарников А.А. Расчёт удельного расхода мощности при переработке резиновых смесей на одночервячных машинах //

Материалы докладов девятой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надёжность, безопасность». Томск, 3 – 5 декабря 2003. – Томск, 2003. – С. 17 – 19.

8. Горбунов Д.Б., Буртелов Л.В., Татарников А.А. Статические характеристики одночервячной машины как объекта управления // Труды X Юбилейной Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии». Томск. 29 марта – 2 апреля 2004. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2004. – Т.1. – С. 232 – 234.

9. Буртелов Л.В. Горбунов Д.Б. Статические характеристики напорной зоны одночервячной машины как объекта управления // Труды X Юбилейной Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии». Томск. 29 марта – 2 апреля 2004. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2004. – Т.1. – С. 220 – 222.

10. Буртелов Л.В., Горбунов Д.Б., Татарников А.А. Определение оптимального по потребляемой мощности режима работы червячной машины при переработке резиновой смеси // Материалы докладов III Всероссийской научной конференции «Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий». Томск, 2 – 4 сентября 2004, Томск, 2004. – С. 264 – 265.

11. Горбунов Д.Б., Буртелов Л.В., Татарников А.А. Выбор математической модели производительности одночервячной машины // Материалы докладов III Всероссийской научной конференции «Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий». Томск, 2 – 4 сентября 2004. – Томск, 2004. – С. 266 – 267.

12. Burtelov L.V., Gorbunov D.B., Tatarnikov A.A. Optimization of the process relevant to rubber mixture processing in pressure zone of a single-worm machine // Proceedings the eleventh International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists «Modern Techniques and Technologies» (МТТ'2005), Tomsk: TPU, 2005.– P. 81 – 83.

13. Gorbunov D.B., Burtelov L.V., Tatarnikov A.A. Analyzing the operation of the buffer zone of a single-worm machine as the object of control // Proceedings the eleventh International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists «Modern Techniques and Technologies» (МТТ'2005), Tomsk: TPU, 2005.– P. 78 – 79.

14. Татарников А.А., Горбунов Д.Б., Буртелов Л.В. Изучение статического режима работы буферной зоны одночервячной машины при переработке псевдопластических сред / Томск. политехн. ун-т. – Томск, 2005. – 22 с. – Деп. в ВИНТИ 11.04.05 № 491 – В2005.

15. Татарников А.А., Буртелов Л.В., Горбунов Д.Б. Влияние расхода утечки на процесс переработки резиновой смеси в напорной зоне червячной машины // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2005. – № 4. – С. 7 – 9.

16. Горбунов Д.Б., Буртелов Л.В., Татарников А.А. Проверка адекватности математических моделей производительности напорной зоны одночервячной машины, перерабатывающей псевдопластичные среды / Том. политехн. ун-т. – Томск, 2004. – 14 с. – Деп. в ВИНТИ 15.07.04 № 1237 – В2004.

17. Татарников А.А., Горбунов Д.Б., Буртелов Л.В. Описание динамических

характеристик одночервячной машины при переработке псевдопластичных сред / Том. политех. ун-т. – Томск, 2005. – 22 с. – Деп. в ВИНТИ 21.12.05 № 1724 – В2005.

18. Татарников А.А., Буртелов Л.В., Горбунов Д.Б. Новый метод обработки экспериментальной кривой течения псевдопластичной среды // Известия вузов. Пищевая технология. – 2005. – № 5 – 6. – С. 105 – 108.

19. Горбунов Д.Б., Буртелов Л.В., Татарников А.А. Временные характеристики одночервячной машины // Труды XII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии». Томск. 27 – 31 марта 2006. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2006. – Т.1. – С. 248 – 250.

20. Татарников А.А., Горбунов Д.Б. Реологические характеристики модельного тела, используемого для изучения течения псевдопластичных сред в канале червяка / Том. политех. ун-т. – Томск, 2006. – 14 с. – Деп. в ВИНТИ 03.05.06 г., № 593 – В2006.

21. Татарников А.А., Горбунов Д.Б. Изучение работы зоны питания одночервячной машины при переработке псевдопластичных сред / Том. политех. ун-т. – Томск, 2006. – 13 с. – Деп. в ВИНТИ 03.05.06 г., № 593 – В2006.

22. Татарников А.А., Горбунов Д.Б. Аналитический расчет динамических характеристик одночервячной машины с коническим каналом червяка при переработке резиновой смеси // Известия ТПУ – 2006. – №5. – С. 141 – 145.