

СОКОЛОВ Михаил Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ
ЭКСТРУЗИИ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ**

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы
(химической промышленности)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тамбов 2001

Работа выполнена в Тамбовском государственном техническом университете на кафедре
"Полимерное машиностроение".

Научные руководители: кандидат технических наук, профессор
Клишков Алексей Степанович
кандидат технических наук, доцент
Кочетов Виктор Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Скуратов Владимир Кириллович
доктор технических наук, профессор
Долгунин Виктор Николаевич

Ведущая организация: АО "НИИРТмаш" г. Тамбов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В производстве резинотехнических изделий методом экструзии существует проблема нерационального использования экструзионного оборудования с точки зрения значительных энергозатрат на пластикацию перерабатываемого материала, ухудшения физико-механических показателей экструдата, и иногда брака изделий за счет термодеструкции при изменении режимных параметров процесса.

Существующие математические модели процесса экструзии резиновых смесей не имеют уравнений, описывающих качество экструдата, в частности, при переработке резиновых смесей – подвулканизацию. Поэтому методики инженерного расчета процесса и оборудования для экструзии резиновых смесей не содержат разделы, учитывающие качество получаемых изделий.

Создание математической модели процесса экструзии резиновых смесей позволит минимизировать полезную мощность с учетом получения качественного экструдата и разработать программное обеспечение для оптимального проектирования, что позволит устранить перечисленные недостатки.

В связи с этим, проведенные в работе исследования процесса и оборудования для экструзии резиновых смесей, разработанная математическая модель, а также методика инженерного расчета оптимальных технологических параметров процесса и конструктивных параметров оборудования имеют актуальное научное и практическое значение.

Работа выполнялась в соответствии с межвузовской научно-технической программой Минобразования РФ "Информационные технологии в образовании" (код 630), 1996 - 1998 гг.

Цель работы. Разработка математической модели процесса экструзии резиновых смесей, позволяющая определять оптимальные технологические параметры процесса и конструктивные параметры оборудования с учетом минимизации полезной мощности и получения качественного экструдата. В соответствии с этим решались следующие задачи:

- анализ современного состояния описания процесса экструзии резиновых смесей;
- математическое моделирование процесса экструзии резиновых смесей, с целью определения оптимальных технологических параметров процесса и конструктивных параметров оборудования с учетом минимизации технологической мощности и получения качественного экструдата;
- исследование влияния различных режимных параметров процесса экструзии и конструктивных параметров оборудования на величину критерия оптимизации (полезной мощности), качества и производительности червячной машины с целью выбора параметров управления;
- исследование влияния основных режимных параметров процесса экструзии и конструктивных параметров оборудования на величину критерия оптимизации (полезной мощности) при заданных производительности червячной машины, качестве экструдата и температуре его на выходе с целью выбора оптимальных технологических и конструктивных параметров процесса экструзии и червячного оборудования.

Научная новизна работы. Предложена усовершенствованная математическая модель, позволяющая рассчитать оптимальные технологические и конструктивные параметры процесса и оборудования экструзии резиновых смесей при условии минимизации энергозатрат и получении качественных изделий.

Разработана методика инженерного расчета оптимальных технологических и конструктивных параметров червячного оборудования с учетом прочностных, качественных и технологических ограничений, предназначенная как для оптимального проектирования нового оборудования, так и для улучшения работы существующего.

Практическая ценность. Разработан алгоритм расчета технологических и конструктивных параметров процесса и оборудования экструзии резиновых смесей, создано программное обеспечение на ЭВМ для его реализации.

Разработанная методика инженерного расчета внедрена на АО "Тамбоврезинаасботехника", которая позволила снизить энергозатраты на 15 - 17 %. Программное обеспечение на ЭВМ для автоматизированного проектирования червячного оборудования внедрено в учебный процесс подготовки инженеров механиков по специальности 170505.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы доложены на Международных конференциях молодых ученых "Синтез, исследование свойств, модификация и переработка ВМС", (Казань, 1999, 2001 гг.), Международной научной конференции "Методы кибернетики химико-технологических процессов" (Казань, 1999 г.), международной научно-практической конференции "Информационные технологии в образовании" (Шахты, 2000 г.), IV, V, VI научных конференциях ТГТУ (Тамбов, 1999, 2000, 2001 гг.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 работ.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованных источников из наименований и приложений. Содержит страниц основного текста, рисунков, таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано краткое содержание работы и показана актуальность решаемых в ней задач.

В первой главе проведен анализ работ отечественных и зарубежных авторов по математическому описанию процесса течения аномально вязких жидкостей в каналах нарезки червяка, расчету на прочность, жесткость и устойчивость червяка экструзионных машин.

Проведен подробный анализ работ по проблемам оптимального проектирования процесса и оборудования для экструзии аномально вязких жидкостей на червячных машинах. Среди задач оптимального проектирования процесса решается задача о минимуме расхода энергии на процесс экструзии при обеспечении заданной производительности.

Большой вклад в решение проблем моделирования и оптимизации экструзии полимеров и эластомеров, создания нового оборудования внесли ученые *Т. Э. Бернхардт, Р. В. Торнер, Н. И. Басов, Ю. В. Казанков, В. В. Скачков, В. С. Ким, Н. Г. Бекин* и др.

Одним из основных критериев, с помощью которого можно математически описать качество резиновой смеси (оценка теплового старения или подвулканизации) является критерий Бейли.

Применение критерия Бейли в качестве ограничения по качеству резиновой смеси при переработке на валковом оборудовании было предложено *Н. Г. Бекиньм*.

На основании проведенного анализа установлено, что все известные аналитические и численные методы расчета и оптимизации течения аномально вязкой жидкости в канале винтовой нарезки червяка не учитывают уравнений описывающих качество резиновой смеси с точки зрения оценки ее подвулканизации.

Вместе с тем, от правильного выбора математического описания процесса экструзии резиновой смеси с учетом ограничений в виде уравнений описывающих качество перерабатываемого материала, прочность, жесткость и устойчивость червяка, рационального выбора варьируемых технологических и конструктивных параметров в значительной мере зависит долговечность, надежность и экономичность червячного оборудования, а следовательно, производство в нем резинотехнических изделий с гарантируемым качеством.

Первая глава завершается постановкой задачи исследования, которая состоит в разработке и исследовании математической модели процесса экструзии резиновых смесей, позволяющая определять оптимальные технологические и конструктивные параметры процесса и червячного оборудования с учетом минимизации энергозатрат и получения качественных изделий.

Вторая глава посвящена разработке математической модели процесса экструзии и проверке ее адекватности.

Били выбраны уравнения описывающие зависимость энергосиловых параметров процесса экструзии от конструктивных и технологических параметров оборудования полученные учеными *Н. И. Басовым, Ю. В. Казанковым*.

Технологическая мощность

$$N = N_1 + N_2 + N_3; \quad (1)$$

где $N_1 = (B/h) (4V_x^2 + V_z^2) m_0 (V/h)^{n-1} z_d F_z$; $N_2 = (V_z/2) Bh \Delta P$;

$F_z = \frac{1}{z_d} \int_0^{z_d} \exp \frac{E}{RT(z)} dz$; $N_3 = V (V/\delta)^n m_0 \exp [E/(RT_u)] e \cos(\varphi) z_d$; $V_z = V \cos \varphi$; $z_d = L / \sin \varphi$; $V =$

$\omega D / 2$;

напорно-расходо-вая характеристика

$$Q = Q_1 - Q_2; \quad (2)$$

где $Q_1 = (V_z/2) (B/h) F_g$; $Q_2 = Bh^3 F_p \Delta P / [12(V/h)^{n-1} m_0 F_z z_d]$.

температурное поле по длине червяка

а) политропный режим

$$T(z) = T_{\text{ц}} + G \exp [E/(RT)] - (G \exp [E/(RT)] - T_{\text{см.вх}} + T_{\text{ц}}) \exp (-Az), \quad (3)$$

где $G = m_0 h^2 / (2K\lambda)(V/h)^{n+1}$; $A = 2KaB/(Qh)$; $a = \lambda/(\rho c)$; $K = \alpha h/\lambda$; $V_{\text{м}} = Q/Bh$,

трансцендентное уравнение для определения средней по длине зоны температуры $T_{\text{ср}}$:

$$T_{\text{ср}} = T_{\text{ц}} + G \exp(E/RT_{\text{ср}}) (1 + (\exp(-Az_d) - 1)/(Az_d)) + (T_{\text{ц}} - T_{\text{см.вх}}) (\exp(-Az_d) - 1)/Az_d, \quad (4)$$

б) адиабатический режим

$$T(z) = T_{\text{см.вх}} + GBh/(\rho c Q) \exp(E/RT_{\text{ср}}) z, \quad (5)$$

трансцендентное уравнение для определения средней по длине зоны температуры $T_{\text{ср}}$.

$$T_{\text{ср}} = T_{\text{см.вх}} + GBh/(\rho c Q) \exp(E/RT_{\text{ср}}) z_d/2. \quad (6)$$

в) изотермический режим

$$T_{\text{см.вх}} = T_{\text{см.вых}}, \quad (7)$$

реологическое уравнение

$$\eta = m_0 \gamma^{n-1} \exp \frac{E}{RT}. \quad (8)$$

Для оценки качества резиновой смеси предложено использовать критерий Бейли

$$J(t) = \int_0^{t'} \frac{\partial t}{\tau[T(t)]} \sum_i \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{\partial t}{\tau[T(t)]} = 1 \quad (9)$$

где $\int_0^{t'} \frac{\partial t}{\tau[T(t)]} \int_0^{t^*} \frac{\partial t}{\tau[T(t)]}$ - оценка подвулканизации резиновых смесей; $\tau [T(t)]$ - кривая,

характеризующая подвулканизацию (время достижения "скорчинга" в условиях постоянства температуры); t' - время достижения "скорчинга" при заданном процессе подвулканизации $T(t)$.

Для оценки адекватности математической модели процесса экструзии необходимо исследовать свойства перерабатываемого материала до загрузки в червячную машину и после проведения процесса экструзии.

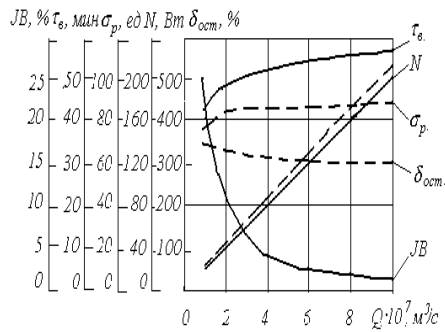


Рис. 2 Зависимость полезной мощности (N) и параметров качества экструдата (σ_p , $\delta_{ост}$) при:
 $\varphi = 17^\circ$; $h = 0,003$ м; $D = 0,032$ м; $L = 0,325$ м;
 $\omega = (0,2 \dots 1,88) \text{ с}^{-1}$; $T_{см. вх.} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$;
 $T = (80 \dots 100)$.

измерения температуры резиновой смеси. Формующая головка снабжена датчиком давления и термопарой для измерения давления и температуры резиновой смеси на выходе из канала нарезки червяка, соответственно. Управление ЭУ осуществляется с пульта управления. На щите расположены: амперметр - для задания нужной частоты вращения; вольтметр - для измерения потребляемого напряжения. Измерение потребляемой мощности ЭУ происходит с помощью вольтамперной характеристики.

С целью исключения ошибки при измерении полезной мощности электрическим методом проводились экспериментальные исследования на установке типа "мотор-весы", состоящей из корпуса червячного цилиндра установленного в подшипниках, с размещенным в нем червяком диаметром $D = 0,06$ м, углом наклона нарезки $\varphi = 17^\circ$, глубиной винтового канала $h = (0,003 \dots 0,008)$ и возможностью изменять угловую скорость в пределах $\omega = (0 \dots 12,56) \text{ с}^{-1}$. Устройство работает следующим образом: при вращении червяка момент сопротивления передается резиновой смесью на цилиндр и заставляет его отклоняться вокруг своей оси на некоторый угол α .

Технологическая мощность рассчитывается по уравнению: $N = Pr \sin \alpha$, где P - вес груза, r - радиус рычага.

В качестве объекта исследования принят процесс экструзии резиновой смеси НО - 68 со следующими параметрами: $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,22 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$; $c = 2300 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{град)}$; $m_0 = 600 \text{ кПа}\cdot\text{с}^n$; $n = 0,2$; $T_{см. вх.} = 323 \text{ K}$; $T_{ц} = 348 \text{ K}$; для $\Delta P = (5 \dots 10) \text{ МПа}$.

Сравнительный анализ значений предела прочности и относительного остаточного удлинения (рис. 2) до ($\sigma_{pэ}$, $\delta_{ост.э}$) и после (σ_p , $\delta_{ост.}$) процесса экструзии при различной производительности показал их расхождение не более 12 %.

Сравнительный анализ кривых подвулканизации, которые носят нелинейный характер при условии $JB \leq 0,5 \%$ до и после процесса экструзии показал их расхождение не более 2 %.

Третья глава посвящена теоретическому анализу влияния технологических параметров процесса экструзии и конструктивных параметров червячного оборудования на параметры состояния и выбору параметров управления.

В качестве параметров состояния принимали технологическую мощность N , критерий подвулканизации JB , производительность червячной машины Q .

Влияние конструктивных и технологических параметров червячной машины рассмотрено на примере экструзии резиновой смеси НО - 68 со следующими параметрами: $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,22 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$; $c = 2300 \text{ Дж / (кг}\cdot\text{град)}$; при: $a = 100 \text{ кПа}\cdot\text{с}^n$; $n = 0,2$; $T_{см. вх.} = T_{см. вых.} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для этих целей спроектирована и изготовлена специальная экспериментальная установка (ЭУ) (рис. 1), представляющая собой червячную машину с диаметром червяка $D = 0,032$ м, отношением длины нарезки к диаметру $L/D = 10$, углом наклона его нарезки $\varphi = 17^\circ$, глубиной винтового канала $h = (0,003 \dots 0,007)$ м. Вращение червяка машины происходит от электродвигателя постоянного тока с возможностью регулирования угловой скорости в пределах $\omega = (0 \dots 7,85) \text{ с}^{-1}$. ЭУ снабжена системой термостатирования цилиндра, червяка, формующей головки, которая включает термостат, снабженный термопарой и приборами регулирования и контроля температуры теплоносителя (воды). В цилиндре установлена термопара для

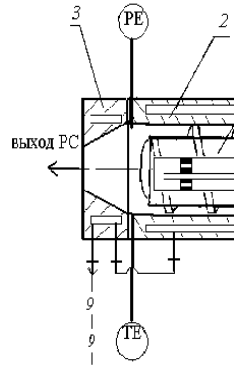


Рис. 1 Схема экспериментальной установки для определения параметров процесса экструзии электрическим методом. 1 - корпус червячного цилиндра; 2 - формующая головка; 3 - термопара; 4 - червяк; 5 - электродвигатель постоянного тока; 6 - датчик температуры; 7 - датчик давления.

348 К; $T_{ц} = 348$ К); б – неизотермический режим экструзии ($m_0 = 600$ кПа · сⁿ; $n = 0,2$; $T_{см. вх.} = 323$ К; $T_{ц} = 348$ К); для $\Delta P = 10$ МПа.

Исходя из анализа линий уровня функций полезной мощности N , критерия качества JB и производительности червячной машины Q (рис. 3 - 8), производился выбор параметров управления для исследования и оптимизации процесса и конструкции оборудования для переработки резиновой смеси при различных режимах экструзии. Рассматривая влияние каждого из основных технологических (ω) и конструктивных (φ , h , D , L , δ , e) параметров на величину изменения функций состояния (N , JB , Q), то есть, определяя их вес, выбираем в качестве параметров управления следующие варьируемые величины: угол наклона винтовой линии червяка φ ; его глубину винтового канала h ; наружный диаметр D ; угловую скорость ω ; длину нарезной части L .

Четвертая глава посвящена постановке и решению задачи оптимизации процесса и оборудования экструзии резиновых смесей, позволяющей определять оптимальные технологические и конструктивные параметры процесса экструзии и червячного оборудования с учетом минимизации полезной мощности и получения качественного экструдата, а так же, теоретическому исследованию влияния основных конструктивных и технологических параметров на величину критерия оптимизации (полезной мощности) при заданном режиме экструзии.

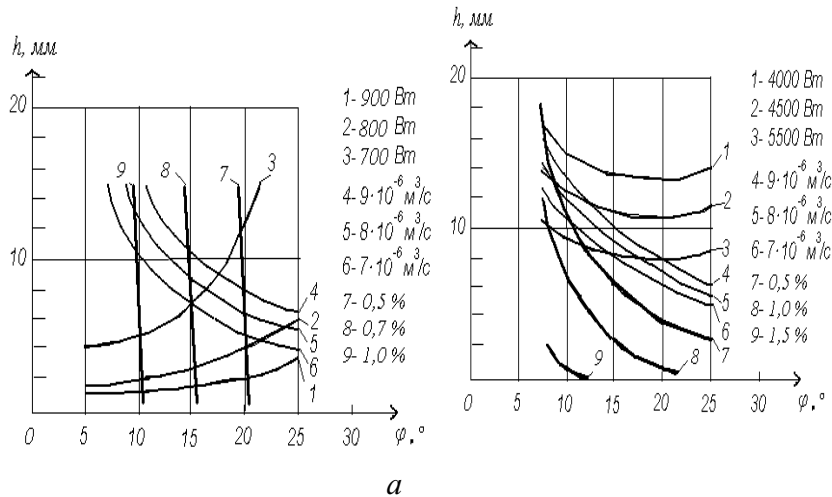


Рис. 3 Линии уровня функций мощности N (Вт), критерия качества JB (%) и производительности Q ($\text{м}^3/\text{с}$) при $D = 0,032$ м; $\omega = 0,83$ с^{-1} (50 мин $^{-1}$); $L = 0,32$ м; $e = 0,0032$ м; $\delta = 0,001$ м:
a - изотермический режим; *б* - неизотермический режим

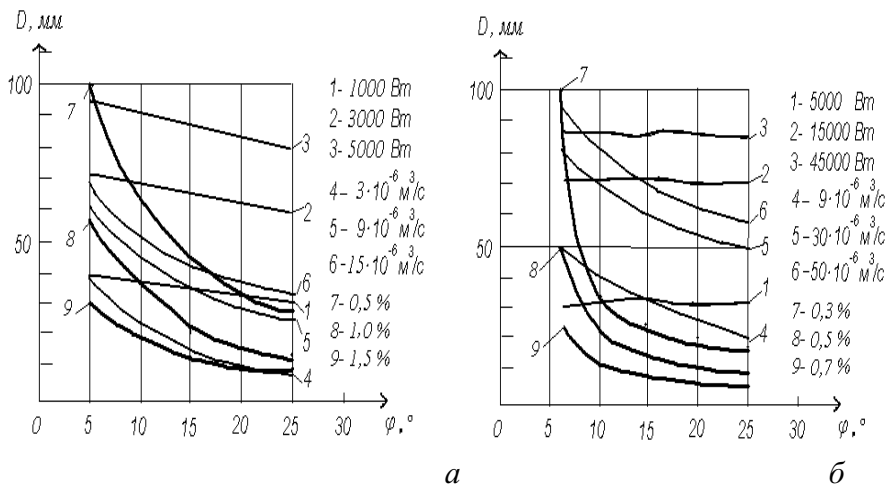


Рис. 4 Линии уровня функций мощности N (Вт), критерия качества JB (%) и производительности Q ($\text{м}^3/\text{с}$) при $H = 0,01$ м; $\omega = 0,83$ с^{-1} (50 мин $^{-1}$); $L = 0,32$ м; $e = 0,0032$ м; $\delta = 0,001$ м:
a - изотермический режим; *б* - неизотермический режим

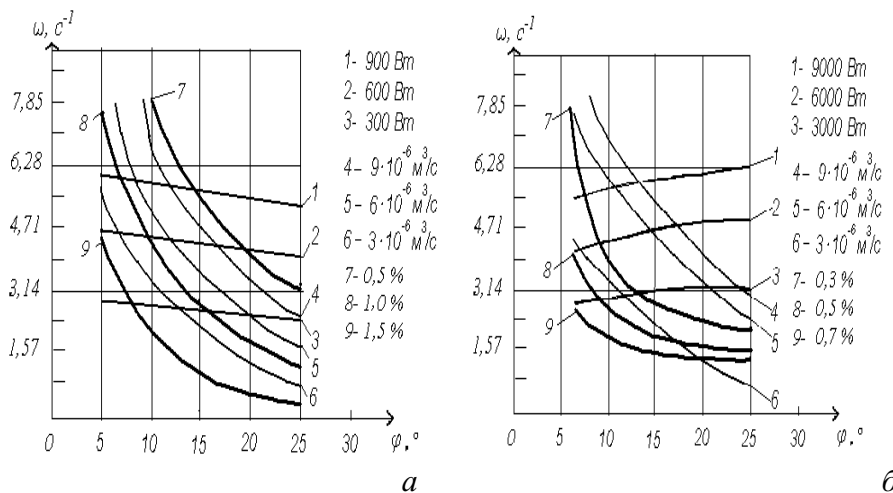


Рис. 5 Линии уровня функций мощности N (Вт), критерия качества JB (%) и производительности Q ($\text{м}^3/\text{с}$) при $H = 0,01$ м; $D = 0,032$ м; $L = 0,32$ м; $e = 0,0032$ м; $\delta = 0,001$ м:

а - изотермический режим; *б* - неизотермический режим

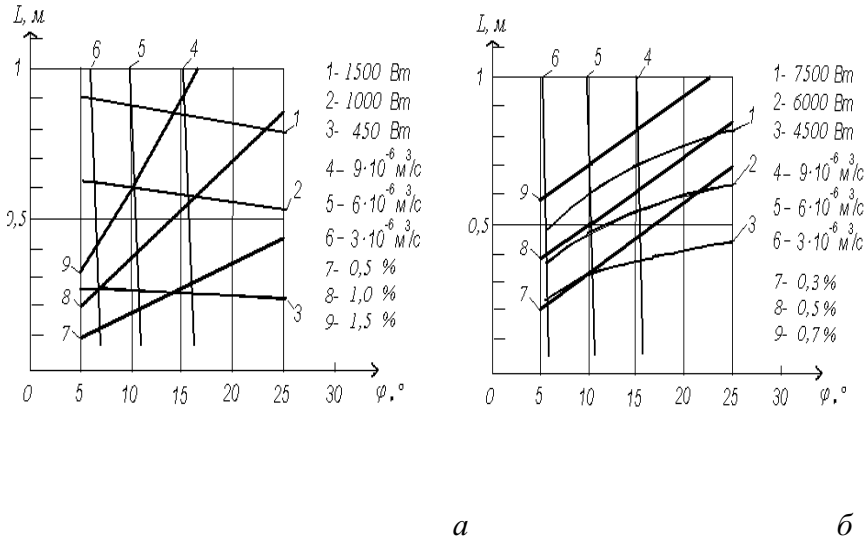


Рис. 6 Линии уровня функций мощности N (Вт), критерия качества JB (%) и производительности Q ($\text{м}^3/\text{с}$) при $H = 0,01 \text{ м}$; $D = 0,032 \text{ м}$; $\omega = 0,83 \text{ с}^{-1}$ (50 мин^{-1}); $e = 0,0032 \text{ м}$; $\delta = 0,001 \text{ м}$:
а - изотермический режим; *б* - неизотермический режим

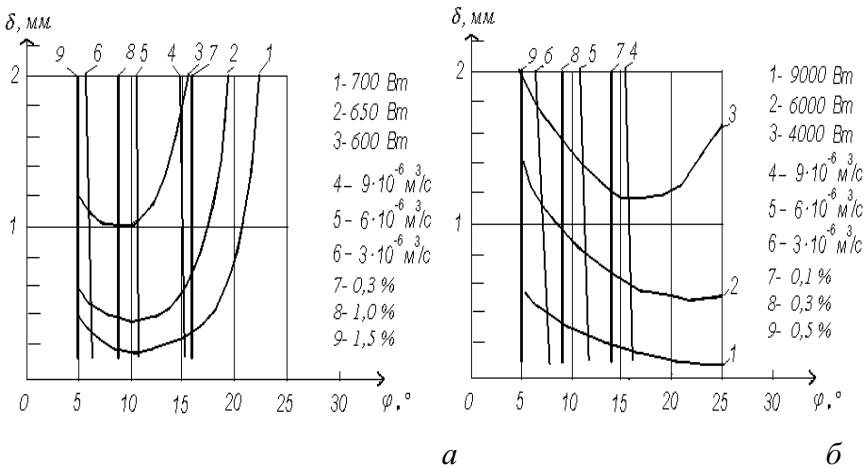


Рис. 7 Линии уровня функций мощности N (Вт), критерия качества JB (%) и производительности Q ($\text{м}^3/\text{с}$) при $H = 0,01 \text{ м}$; $D = 0,032 \text{ м}$; $\omega = 0,83 \text{ с}^{-1}$ (50 мин^{-1}); $L = 0,32 \text{ м}$; $e = 0,0032 \text{ м}$:
а - изотермический режим; *б* - неизотермический режим

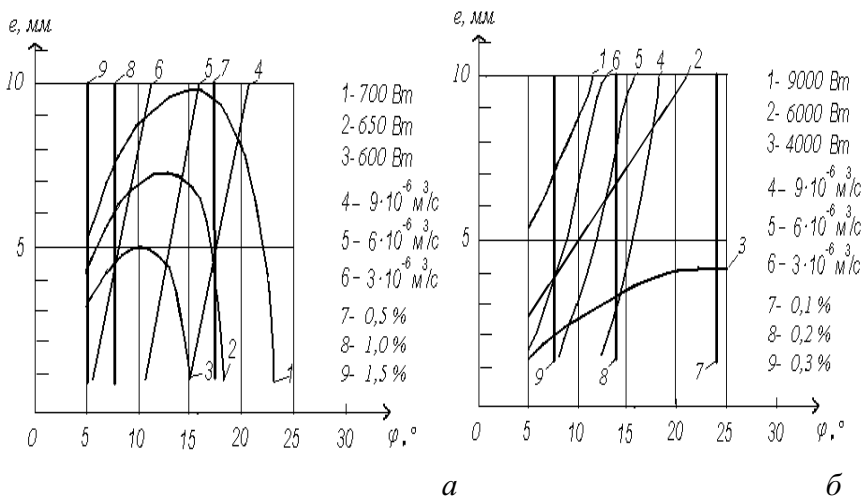


Рис. 8 Линии уровня функций мощности N (Вт), критерия качества $JВ$ (%) и производительности Q (м³/с) при $H = 0,01$ м; $D = 0,032$ м; $\omega = 0,83$ с⁻¹ (50 мин⁻¹); $L = 0,32$ м; $\delta = 0,001$ м:
 a - изотермический режим; \bar{b} - неизотермический режим

Постановка задачи оптимизации процесса и оборудования экструзии резиновых смесей заключается в следующем: необходимо найти такие значения конструктивных и технологических параметров, чтобы критерий оптимизации (полезная мощность) стремился к минимуму

$$[F = N(\varphi, h, D, \omega, L)] \rightarrow \min \quad (10)$$

при выполнении условий в виде ограничений (11 – 15):

- качество экструдата

$$R_1 = J(t) = \int_0^{t'} \frac{\partial t}{\tau[T(t)]} = \sum_i \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{\partial t}{\tau[T(t)]} \leq \varepsilon; \quad (11)$$

- прочность материала (жесткость, устойчивость) червяка

$$R_2(\varphi, h, D, \omega, L) \leq [\sigma]; \quad (12)$$

- производительность червячной машины

$$Q_{\text{зад}} = Q(\varphi, h, D, \omega, L); \quad (13)$$

- температуру выхода экструдата

$$T_{\text{см. вых}}(\varphi, h, D, \omega, L) = T_{\text{зад}}; \quad (14)$$

- границы изменения варьируемых параметров

$$\left. \begin{array}{l} D' \leq D \leq D'; \\ \varphi' \leq \varphi \leq \varphi'; \\ Dk_h' \leq k_h D \leq Dk_h'; \\ \omega' \leq \omega \leq \omega'; \\ Dk_L' \leq k_L D \leq Dk_L'; \end{array} \right\} \quad (15)$$

где $\varphi, Dk_h', D, \omega, Dk_L'$ и $\varphi', Dk_h', D', \omega', Dk_L'$ - левая и правая границы изменения конструктивных (φ, h, D, L) и технологического (ω) параметров, соответственно; k_h^*, k_L^*, k_h', k_L' - коэффициенты учитывающие левую, правую границы и начальные значения конструктивных параметров (h, L), соответственно; $\varepsilon, Q_{\text{зад}}, T_{\text{зад}}$ - заданные значения интеграла Бейли, производительности червячной машины, температуры резиновой смеси на выходе, соответственно; $[\sigma]$ - допускаемое напряжение материала червяка (допускаемый прогиб, коэффициент запаса по устойчивости).

Для решения поставленной задачи (10) - (15) применялся метод скользящего допуска, реализуемый программой на языке Бейсик. получены значения оптимальных конструктивных (φ, h, D, L) и технологических (ω, N) параметров в виде графических зависимостей от: производительности червячной машины Q при изо- и неизотермическом режимах экструзии; перепада температуры по длине червяка ΔT .

Принимались следующие исходные и начальные данные: $D = 0,03 \dots 0,09$ м; $\varphi = (15 \dots 22)^\circ$; $k_h' = 0,05$; $k_h = 0,15$; $\omega = 1,25 \dots 9,4$ с⁻¹; $k_L' = 5$; $k_L = 10$; $\Delta P = 25$ МПа; $\delta = 0,001$ м; $e = 0,1D$; $D_0 = 0,05$ м; $\varphi_0 = 17^\circ$; $h_0 = 0,1D$ м; $\omega_0 = 3,14$ с⁻¹; $L_0 = 7D$ м.

Согласно кривым на (рис. 9 - 10), при увеличении производительности червячной машины Q , полезной мощности N увеличивается главным образом за счет увеличения угловой скорости червяка ω , так как возрастают затраты энергии на: транспортирование перерабатываемого материала по винтовому каналу; компенсацию потерь вследствие перепада давления по длине червяка; трение в зазоре δ .

Из рис. 10? а видно, что с ростом длины L происходит увеличение перепада температуры ΔT , т.к. материал пребывает в цилиндре большее время, а следовательно, успевает

прогреться до большей температуры. Так же, с уменьшением глубины h и соответствующим этому увеличению угловой скорости ω , наблюдается рост перепада температуры ΔT . Причем уменьшение глубины h приводит к уменьшению производительности Q и, ее заданное значение компенсируется увеличением угловой скорости ω .

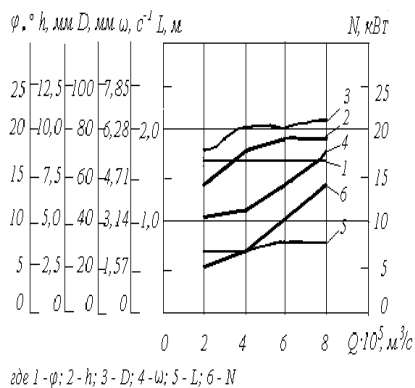
Из рис. 10, б видно, что технологическая мощность при изотермическом режиме экструзии примерно в 1,5 ... 3,0 раза меньше, чем при неизотермическом режиме. Это объясняется тем, что для заданного перепада температур ($\Delta T = 30$ К), вязкость резиновой смеси изменяется в широком интервале в сторону уменьшения ($6 \dots 1$) $\cdot 10^5$ Па \cdot с^{*n*}, что в свою очередь приводит к более интенсивным сдвиговым деформациям, чем при изотермическом режиме.

Результаты оптимизации для политропного и адиабатического режимов (рис. 10, б) практически не отличаются, так как при оптимизации политропного процесса потери в системе термостатирования стремятся к нулю.

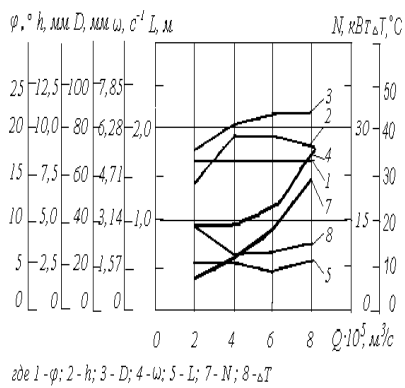
Полученные в работе зависимости (рис. 9, 10) позволяют определять оптимальные технологические и конструктивные параметры процесса и оборудования экструзии резиновых смесей.

Адекватность решения задачи оптимизации так же проверялась с помощью экспериментальных исследований на опытных установках (рис. 1). Для трех червяков одного и того же диаметра, но разной оптимальной глубины винтового канала, получены зависимости мощности от величины расхода при заданном давлении и перепаде температуры (рис. 11), а также ограничения на качество экструдата ($JВ = 0,001$ %).

Расхождение экспериментальных и теоретических результатов составило не более 14 %.

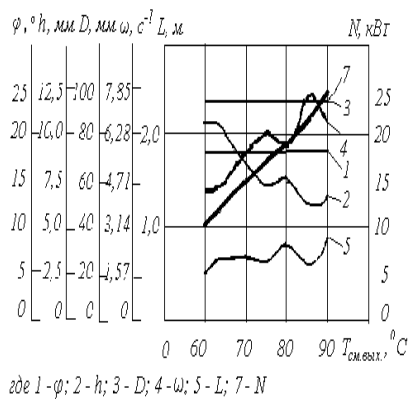


a

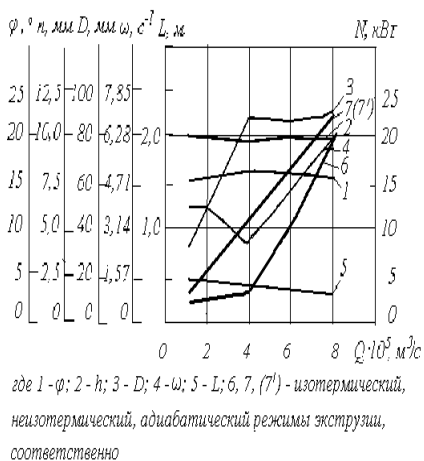


б

Рис. 9 График зависимости оптимальных конструктивных (φ, h, D, L) и технологических (ω, N) параметров от производительности Q при $\Delta P = 20$ МПа для:
a - изотермический режим; *б* - неизотермический режим



a



б

Рис. 10 График зависимости оптимальных конструктивных (φ, h, D, L) и технологических (ω, N) параметров от:
a - перепада температуры по длине червяка ΔT при $Q = 6 \cdot 10^{-5}$ м³/с;
б - производительности Q при различных режимах экструзии

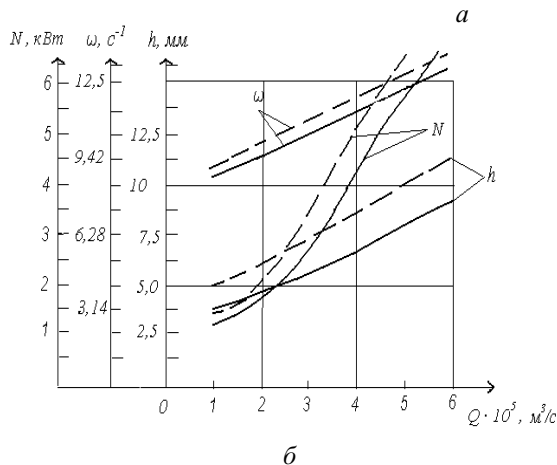
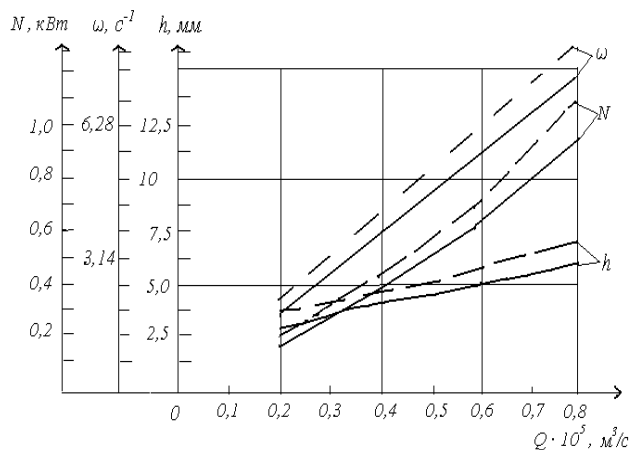


Рис. 11 Сравнение экспериментальных () и теоретических () значений технологической мощности N и оптимальных параметров h , ω при различной производительности Q для $\Delta P = 10$ МПа, $\Delta T_{\text{см.вых.}} = (80 \dots 10) \text{ } ^\circ\text{C}$:

a - электрический метод;

b - механический метод

В пятой главе на основании анализа результатов исследований предложена методика инженерного расчета оптимальных технологических и конструктивных параметров процесса экструзии и червячного оборудования. оптимальных параметров производства экструзионным методом и существующего процесса и

должны быть заданы: перерабатываемого кривая подвулканизации τ

При расчете основных процесса и оборудования могут встре-

Вариант 1: разработка резинотехнических изделий (РТИ) проектирование нового оборудования.

Вариант 2: модернизация оборудования при производстве РТИ.

В качестве исходных параметров реологические константы материала при температуре входа;

$[T(t)]$; границы изменения варьируемых параметров; перепад давления ΔP и температуры ΔT по длине червяка; производительность червячной машины; ограничения на прочность материала червяка (жесткость и устойчивость); ограничение на качество экструдата.

По описанной в диссертации методике при условии минимизации полезной мощности и соответствующих исходных данных и ограничениях определяются: вариант 1 - оптимальные технологические (ω , N) и конструктивные (φ , h , D , L) параметры; вариант 2 - оптимальные технологические (ω , N) и конструктивные (φ , h) параметры. Расчет проведен на примере экструзии резиновой смеси марки НО-68-1.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 Разработана математическая модель процесса экструзии резиновых смесей, позволяющая определять оптимальные технологические и конструктивные параметры процесса и оборудования при условии минимизации полезной мощности с учетом получения качественных резинотехнических изделий и проверена ее адекватность.

2 Разработан алгоритм и программное обеспечение для расчета процесса экструзии резиновых смесей.

3 Разработана экспериментальная установка, позволяющая определять полезную мощность процесса при заданном режиме экструзии (ΔT , ΔP , ω).

4 Проведены исследования влияния различных режимных параметров процесса экструзии и конструктивных параметров оборудования на величину критерия оптимизации N

(полезной мощности), критерия качества JB и производительности червячной машины Q , позволяющие выбрать параметры управления.

5 Сформулирована и решена задача оптимизации процесса и оборудования экструзии резиновых смесей при условии минимизации полезной мощности и получения качественного экструдата.

6 Проведены исследования влияния основных режимных параметров процесса экструзии и конструктивных параметров червячного оборудования на величину критерия оптимизации N (полезной мощности) при заданных производительности червячной машины Q , качестве экструдата JB и температуре его на выходе $T_{см.вых.}$.

7 На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана методика инженерного расчета червячного оборудования.

8 Разработанная методика инженерного расчета внедрена на АО "Тамбоврезинаасботехника", которая позволила снизить энергозатраты на 15 - 17 %. Программное обеспечение на ЭВМ для автоматизированного проектирования червячного оборудования внедрено в учебный процесс подготовки инженеров механиков по специальности 170505.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

a - температуропроводность, $м^2/с$; B - ширина винтового канала червяка, $м$; c - теплоемкость резиновой смеси, $Дж/(кг·град)$; D - диаметр червяка, $м$; JB -критерий подвулканизации, %; e - ширина витка червяка, $м$; F_g, F_p - коэффициенты формы канала червяка; h - глубина винтового канала, $м$; L - длина нарезной части червяка, $м$; m_0, n - реологические константы перерабатываемого материала при $T_{см. вх.}$, $Па с^n$; N - полезная мощность, $Вт$; ΔP - перепад давления по длине червяка, $МПа$; $T_{ц}, T_{см. вх.}, T_{см. вых.}$ - температура материального цилиндра, резиновой смеси на входе и выходе, $К$; V_m, V, V_x, V_z - скорость перерабатываемого материала, окружная скорость червяка и ее проекции, соответственно, $м/с$; Q - производительность червячной машины, $м^3/с$; z_d - длина винтового канала червяка, $м$; α - коэффициент теплоотдачи от резиновой смеси к стенке материального цилиндра и червяка, $Вт/(м^2·град)$; δ - зазор между гребнем червяка и внутренней поверхностью материального цилиндра, $м$; $\delta_{ост.э}, \delta_{ост}$ - относительное остаточное удлинение образцов резины до и после процесса экструзии, соответственно, %; φ - угол наклона винтовой линии, $град$; λ - теплопроводность резиновой смеси, $Вт/(м·град)$; ρ - плотность резиновой смеси, $кг/м^3$; $\sigma_{рз}, \sigma_p$ - предел прочности на разрыв образцов резины до и после процесса экструзии, соответственно; ω - угловая скорость червяка, $с^{-1}$;

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1 *Клинков А. С., Кочетов В. И., Соколов М. В.* Определение оптимальных технологических и конструктивных параметров прессового и литьевого оборудования с учетом получения высококачественных формовых изделий из пластмасс и эластомеров // Тез. докл. IV науч. конф. ТГТУ. Тамбов, 1999. С. 15-16.

2 *Соколов М. В., Клинков А. С., Кочетов В. И.* Методика определения оптимальных конструктивных и технологических параметров червячного узла пластикации для переработки пластмасс и эластомеров // Тезисы докл. междун. научн. конф. "Методы кибернетики химико-технологических процессов". Казань, 1999. С. 24-25.

3 *Соколов М. В., Клинков А. С., Кочетов В. И.* Оптимальное проектирование прессового и литьевого оборудования с учетом получения высококачественных формовых изделий из пластмасс и эластомеров // Вестник ТГУ. Естественные и технические науки. Тамбов, 1999. Т. 4. Вып. 2. С. 237-238.

4 *Соколов М. В., Клинков А. С., Кочетов В. И.* К вопросу определения конструктивных и технологических параметров прессового и литьевого оборудования для производства формовых изделий из пластмасс и эластомеров // Технологические процессы и оборудование: Сб. научн. тр. ТГТУ. Тамбов, 1999. Вып. 3. С. 72-74.

5 *Кочетов В. И., Соколов М. В.* Определение оптимальных технологических и конструктивных параметров экструзионного оборудования // Тез. докл. V научн. конф. ТГТУ: Тамбов, 2000. С. 58-59.

6 *Соколов М. В.* Методика исследования и экспериментальная установка для экструзии эластомеров // Технологические процессы и оборудование: Сб. науч. тр. ТГТУ. Тамбов, 2000. Вып. 6. С. 147 - 150.

7 *Соколов М. В., Клинков А. С., Ефремов О. В.* Обучающее программное обеспечение для изучения и оптимального проектирования экструзионного оборудования // Междунар. научн.-практ. конф. "Информационные технологии в образовании". Шахты, 2000. С. 75 - 78.

8 *Кочетов В. И., Клинков А. С., Соколов М. В.* Определение оптимальных технологических и конструктивных параметров червячных машин для переработки эластомеров // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2000. № 8. С. 15 - 17.

9 *Клинков А. С., Соколов М. В., Кочетов В. И.* К вопросу определения оптимальных режимов и конструктивных параметров червячных машин для переработки эластомеров // Вестник ТГТУ. 2000. Т. 4. С. 68 - 73.

10 *Соколов М. В., Клинков А. С.* Оптимизация процесса экструзии эластомеров при различных режимах // Тез. докл. VI научн. конф. ТГТУ. Тамбов, 2001. С. 240-241.

11 *Соколов М. В., Беляев М. П., Клинков А. С.* Особенности расчета оптимальных конструктивных и технологических параметров червячных машин. // Тез. докл. XX междунар. конф. "Синтез, исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений". Казань, 2001. С. 106-107.

12 *Соколов М. В., Клинков А. С.* Оптимизация процесса экструзии и оборудования для переработки эластомеров // Технологические процессы и оборудование: Сб. науч. тр. ТГТУ Тамбов, 2001. Вып. 8. С. 64 - 67.