

На правах рукописи



Буртелов Лев Вадимович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ
ПСЕВДОПЛАСТИЧНЫХ СРЕД НА ОДНОЧЕРВЯЧНЫХ МАШИНАХ
НА ПРИМЕРЕ РЕЗИНОВОЙ СМЕСИ**

Специальность

05.17.08 — Процессы и аппараты химических технологий

05.13.18 — Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2006

**Диссертация выполнена на кафедре автоматизации
теплоэнергетических процессов теплоэнергетического факультета
Томского политехнического университета**

Научные руководители:

доктор технических наук, доцент Яковенко Павел Георгиевич

кандидат технических наук, доцент Татарников Анатолий Алексеевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Волокитин Геннадий Георгиевич

кандидат технических наук, доцент Костюченко Тамара Георгиевна

Ведущая организация:

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

Защита состоится «21» марта 2006 г. в __:__ 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 «__» _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета, к.т.н.

 Петровская Т.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Процесс экструзии резиновых смесей на одночервячных машинах широко распространен в химической промышленности при производстве резинотехнических изделий (РТИ). Данный процесс является весьма дорогостоящим и энергоемким. Снижение энергозатрат в данном процессе при минимизации процента бракованных изделий может дать значительный экономический эффект.

В настоящее время не существует адекватной математической модели данного процесса, которая учитывала бы ряд его существенных особенностей. В качестве такой модели используется математическая модель процесса экструзии расплавов термопластов, что является не вполне корректным.

Оптимизация процесса экструзии резиновых смесей на одночервячных машинах в настоящее время либо не проводится вовсе, либо проводится на основании производственного опыта и интуиции инженера-технолога. Такой подход требует значительных затрат материальных ресурсов, денежных средств и времени, а также высокой квалификации технического персонала и не позволяет использовать полученные результаты для другого оборудования и/или перерабатываемого материала.

Таким образом, создание математической модели процесса экструзии псевдопластичных сред представляется весьма актуальным.

Работа выполнена по направлению научной деятельности Томского политехнического университета «Развитие теоретических основ и разработка технологий производства энергии и энергоресурсосбережения в различных отраслях» и поддержана грантом Томского политехнического университета для молодых ученых.

Цель работы заключается в разработке адекватной математической модели процесса экструзии псевдопластичных сред, в том числе резиновых смесей, на одночервячных машинах, а также разработке соответствующего программного обеспечения. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- разработка методики обработки кривых течения псевдопластичных сред, в том числе резиновых смесей;
- исследование процессов, происходящих в различных функциональных зонах червячной машины (питания, буферной, напорной), и разработка математических моделей данных процессов.
- получение формул для расчета важнейших параметров технологического процесса: производительности напорной зоны, величины утечки, потребляемой мощности, количества деформации, получаемого резиновой смесью, средней и максимальной температуры

резиновой смеси на выходе червячной машины.

Научная новизна.

- Впервые разработана полная математическая модель процесса экструзии резиновых смесей на одночервячных машинах, учитывающая существенные отличия процесса переработки резиновой смеси от процесса переработки расплавов термопластов, а также влияние на технологический процесс утечки перерабатываемого материала через зазор между гребнем червяка и цилиндром.
- На основе комплексного анализа аппроксимирующей способности наиболее распространенных реологических уравнений псевдопластичных сред выбрано уравнение, наилучшим образом аппроксимирующее кривые течения псевдопластичных сред, в том числе резиновых смесей, в широком диапазоне изменения скорости сдвига.
- Впервые получено обобщенное уравнение производительности напорной зоны червячной машины, применимое, в отличие от известных автору аналогов, для перерабатываемых материалов с ньютоновскими и неньютоновскими реологическими свойствами как для случая одномерного течения перерабатываемого материала, так и для случая течения со сложным сдвигом.
- Получено новое уравнение для расчета величины утечки перерабатываемого материала через зазор между гребнем червяка и цилиндром. Показано, что утечка не влияет на производительность червячной машины, перерабатывающей резиновую смесь.
- Получены новые уравнения для численного расчета распределения температуры перерабатываемого материала по оси и сечению канала червяка, учитывающие теплообмен через гребни червяка.

Достоверность результатов диссертации обеспечена корректной постановкой математических задач, строгими математическими выводами, использованием обоснованных методов численных расчетов, а также совпадением результатов вычислений с экспериментальными данными.

Практическая ценность. На основе предложенной математической модели разработана методика и программное обеспечение, позволяющее провести в среде MathCAD расчет важнейших параметров технологического процесса экструзии псевдопластичных сред, в том числе резиновых смесей. Использование математического моделирования позволяет свести к минимуму или вовсе избежать дорогостоящих натурных экспериментов, а также снизить затраты материальных ресурсов, денежных средств и времени. Разработанное программное обеспечение может также быть использовано в качестве тренажера для обучения и повышения квалификации студентов и ин-

женеров-технологов.

Внедрение результатов исследования. Разработанное программное обеспечение внедрено на ЗАО «Сибкабель», а также в учебный процесс на кафедре электроизоляционной и кабельной техники электротехнического института при Томском политехническом университете.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель процесса экструзии псевдопластичных сред, в том числе резиновых смесей, на одночервячных машинах с постоянной глубиной нарезки канала червяка, учитывающая наличие зоны питания, буферной зоны и напорной зоны, а также влияние утечки перерабатываемого материала через зазор между гребнем червяка и цилиндром.

2. Две методики обработки кривых течения псевдопластичных сред с целью получения реологического уравнения, описывающего кривую течения в широком диапазоне изменения скоростей сдвига, начиная с нуля, при известном и неизвестном значении коэффициента вязкости Ньютона.

3. Обобщенное уравнение производительности напорной зоны одночервячной машины, применимое для случая одномерного течения и течения перерабатываемого материала со сложным сдвигом, для материалов с ньютоновскими и неньютоновскими реологическими свойствами.

4. Методика расчета распределения температуры перерабатываемого материала по оси и сечению канала червяка.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Пятая Всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: экология, надёжность, безопасность», г. Томск, 1999 г.; Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии СТТ'2000», г. Томск, 2000 г.; Седьмая Всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: экология, надёжность, безопасность», г. Томск, 2001 г.; Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии СТТ'2001», г. Томск, 2001 г.; Международная научно-техническая конференция «Электромеханические преобразователи энергии», г. Томск, 2001 г.; Всероссийская научная конференции молодых ученых «Наука, технологии, инновации», г. Новосибирск, 2003 г.; Девятая Всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: экология, надёжность, безопасность», г. Томск, 2003 г.; Третья Всероссийская научная конференция «Химия и химическая технология на рубеже

тысячелетий», г. Томск, 2003 г.; Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии СТТ'2005», г. Томск, 2005 г.

Публикация результатов. Основные положения работы изложены в 21 печатной работе [1-21], в том числе 5 — в рецензируемых журналах [7, 8, 10, 11, 15], 2 статьи переведены на английский язык и изданы за рубежом [8, 11].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы из 165 наименований и 10 приложений. Работа изложена на 236 страницах машинописного текста и содержит 63 рисунка и 15 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цели работы, перечисляются полученные научные результаты.

В первой главе проведен анализ текущего состояния предметной области и сделана постановка задачи. Рассмотрен процесс изготовления резинотехнических изделий [2, 6, 16], технологическая схема которого приведена на рис. 1.



Рис. 1. Технологическая схема изготовления РТИ

Показано, что процесс подготовки резиновой смеси к экструзии через формующий инструмент на одночервячной машине является одним из важнейших звеньев во всей технологической цепочке и обосновано применение метода математического моделирования для

исследования данного процесса.

Во второй главе выявлены принципиальные отличия процесса переработки резиновой смеси от процесса переработки расплава на одночервячных машинах. Показано, что при переработке резиновых смесей в червячной машине существуют три функциональные зоны: питания, буферная и напорная. Наличие буферной зоны, которая отсутствует в случае переработки расплава, оказывает существенное влияние на весь процесс в целом, что *не позволяет без изменений использовать математическую модели процесса переработки расплава в качестве математической модели процесса переработки резиновой смеси* [10]. Таким образом, существует необходимость разработки математической модели процесса переработки резиновых смесей с учетом особенностей данного процесса. Теоретические результаты подтверждены экспериментами на лабораторной установке одночервячной машины [4, 17].

В третьей главе рассматривается практически важный вопрос описания реологическим уравнением кривой течения псевдопластичных сред, в том числе резиновых смесей. Проводится анализ аппроксимирующей способности наиболее распространенных реологических уравнений с целью выбора уравнения, наиболее адекватно описывающего кривые течения резиновых смесей в широком диапазоне изменения скорости сдвига [9, 14, 20]. В качестве эталонной кривой использовалась температурно-инвариантная кривая течения, полученная на основе температурно-инвариантной кривой вязкости Виноградова-Малкина, обобщающей кривые вязкости промышленных полимеров, каучуков и резиновых смесей. Критерием качества аппроксимации являлась сумма квадратов отклонений исследуемой кривой от эталонной и отклонение зависимостей значений индекса течения и приведенного коэффициента консистенции от скорости сдвига от зависимостей, построенных для эталонной кривой.

По результатам анализа в диссертации в качестве реологического уравнения, описывающего кривые течения псевдопластичных сред, в том числе резиновых смесей, было выбрано уравнение, полученное на основе уравнения вязкости Виноградова-Малкина

$$\tau = \frac{\eta_n(T) \cdot \dot{\gamma}}{1 + C_2 \cdot |\dot{\gamma}|^{2\alpha}} *^1. \quad (1)$$

Достоинствами уравнения (1) являются достаточная для проведения технологических расчетов точность аппроксимации кривых течения псевдопластичных сред в широком диапазоне изменения ско-

1. Здесь и далее формулы, помеченные знаком «*», получены автором впервые.

рости сдвига, малое число неизвестных параметров и то, что при стремлении значения скорости сдвига к нулю оно преобразуется в реологическое уравнение Ньютона $\tau = \eta_n(T)\dot{\gamma}$.

На основе уравнения (1) в диссертации предлагаются две новые методики обработки кривых течения резиновых смесей при известном и неизвестном значении коэффициента ньютоновской вязкости перерабатываемого материала [7].

Данные методики, в отличие от известных автору аналогов, работают при малом количестве экспериментальных данных (2 и 3 соответственно для случая известного и неизвестного коэффициента вязкости Ньютона), не требуют проведения касательной к экспериментальной кривой вязкости и позволяют оценить значение коэффициента вязкости Ньютона без экстраполяции экспериментальной кривой в область малых значений скорости сдвига. По данным методикам были обработаны кривые течения различных резиновых смесей и полимерных материалов. На рис. 2 приведены результаты обработки кривой течения полиэтилена высокого давления ПЭВП по 20 и 3 точкам и кривых течения резиновой смеси на основе каучука СКС-30 АРКМ-15 при температурах 50 °C и 80 °C.

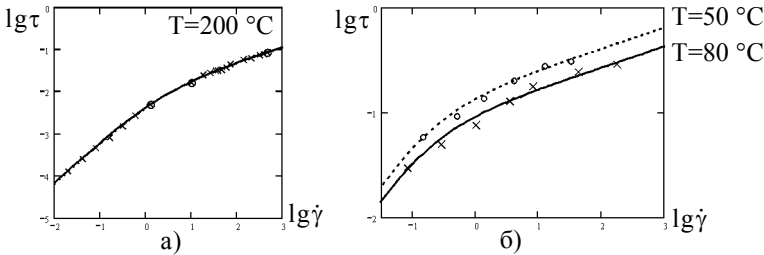


Рис. 2. Результаты обработки кривых течения псевдопластичных сред:

а) полиэтилен высокого давления ПЭВП:

по 20 точкам: $\tau = (0,007 \cdot \dot{\gamma}) / (1 + 0,705 \cdot |\dot{\gamma}|^{2 \cdot 0,322})$;

по 3 точкам: $\tau = (0,006 \cdot \dot{\gamma}) / (1 + 0,584 \cdot |\dot{\gamma}|^{2 \cdot 0,334})$;

б) резиновая смесь на основе каучука СКС-30 АРКМ-15:

для $T = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$: $\tau = (0,632 \cdot \dot{\gamma}) / (1 + 5,896 \cdot |\dot{\gamma}|^{2 \cdot 0,4})$;

для $T = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$: $\tau = (0,834 \cdot \dot{\gamma}) / (1 + 5,123 \cdot |\dot{\gamma}|^{2 \cdot 0,4})$

Из графиков рис. 2 следует, что разработанные методики хорошо работают даже при малом числе экспериментальных данных и дают приемлемую оценку коэффициента ньютоновской вязкости. Так, в случае обработки кривой течения полиэтилена высокого давления ПЭВП экспериментальное значение коэффициента вязкости Ньютона состав-

ляло 0,007 МПа·с, а определенное по трем точкам при больших скоростях сдвига — 0,006 МПа·с.

Из уравнения (1) получены практически важные формулы для расчета индекса течения и коэффициента консистенции в зависимости от скорости сдвига:

$$n(\dot{\gamma}) = \left(1 - \frac{2C_2\alpha|\dot{\gamma}|^{2\alpha}}{1 + C_2|\dot{\gamma}|^{2\alpha}}\right)^{-1} *; \quad (2)$$

$$\mu_0(\dot{\gamma}) = 10^{\lg\left(\frac{\eta_n|\dot{\gamma}|}{1 + C_2|\dot{\gamma}|^{2\alpha}}\right) - \frac{1}{n(\dot{\gamma})}\lg|\dot{\gamma}|} *; \quad (3)$$

На рис. 3 приведены графики зависимости индекса течения и коэффициента консистенции от логарифма скорости сдвига для резиновой смеси на основе каучука СКД ($\eta_n = 1,46$ МПа·с, $C_2 = 1,92$, $\alpha = 0,45$), построенные по формулам (2) и (3).

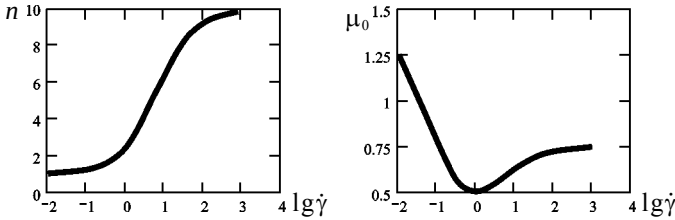


Рис. 3. Графики зависимости индекса течения и коэффициента консистенции от логарифма скорости сдвига для резиновой смеси на основе каучука СКД

В четвертой главе проводится исследование процесса переработки резиновой смеси в напорной зоне червячной машины и разработка его математической модели [3, 4, 5, 8, 11, 12, 15, 17, 18, 19]. Разработанная математическая модель включает в себя:

1. Обобщенное уравнение для расчета безразмерной производительности напорной зоны:

$$q_p = \frac{2}{n+2} \left[(1 - \eta_0) + \chi \operatorname{tg} \varphi (1 - \eta_{\text{ок}}) - (n+1) \frac{(1 + \chi \operatorname{tg} \varphi) \Phi(0)}{\Phi(1) - \Phi(0)} \right] *, \quad (4)$$

где $\Phi(\eta) = [(\eta - \eta_0)^2 + \chi^2(\eta - \eta_{\text{ок}})^2]^{(n+1)/2}$.

Уравнение (4), в отличие от известных автору аналогов, применимо для случаев одномерного течения ($\chi = 0$) и течения со сложным сдвигом ($\chi \neq 0$), для материалов с ньютоновскими ($n = 1$) и неньютоновскими ($n > 1$) реологическими свойствами и не требует вычисления двойного интеграла. Расчеты, приведенные в табл. 1, показывают, что

уравнение (4) корректно вычисляет значение безразмерной производительности. Для расчета параметров η_0 , $\eta_{\text{от}}$, χ в зависимости от n , φ , q_p на основе уравнения (4) в среде Borland Delphi была разработана программа, доступная как в виде отдельного приложения, так и в виде модуля расширения (DLL) к системе MathCAD.

Таблица 1. Результаты расчета безразмерной производительности напорной зоны для угла нарезки червяка $\varphi = 17,65^\circ$

Индекс течения	Одномерная модель			Модель со сложным сдвигом		
	Безразмерный градиент давления	Безразмерная производительность		Безразмерный градиент давления	Безразмерная производительность	
		По уравнению Торнера	По уравнению (4)		Через двойной интеграл	По уравнению (4)
2	-1,0	1,5000	1,5000	-0,9559	1,4314	1,4311
	-0,1	1,0567	1,0567	-0,0938	0,9933	0,9925
	0,1	0,9433	0,9423	0,0938	0,8951	0,8943
	1,0	0,4186	0,4187	0,9529	0,5001	0,5001
5	-1,0	1,7019	1,7014	-0,9708	1,6063	1,6060
	-0,1	1,1184	1,1184	-0,0922	0,9159	0,9145
	0,1	0,8816	0,8816	0,0924	0,7504	0,7519
	1,0	0,2857	0,2857	0,9474	0,2738	0,2738
10	-1,0	1,8000	1,8000	-0,9847	1,7079	1,7074
	-0,1	1,1726	1,1726	-0,0929	0,8674	0,8669
	0,1	0,8274	0,8275	0,0928	0,6517	0,6525
	1,0	0,2000	0,2000	0,9498	0,1827	0,1827

2. Уравнение для расчета безразмерной величины утечки при $n_3 = n$:

$$q_3 = \frac{2}{n_3 + 2} \frac{(\delta/D)}{k \left[1 - \left(\frac{e}{D} \right) \right] \cdot \left(\frac{h}{D} \right)} \left[(1 - \eta_{0,3}) - (n_3 + 1) \frac{\Phi_3(0)}{\Phi_3(1) - \Phi_3(0)} \right] \frac{1}{F_d \varepsilon_K} \cdot (5)$$

3. Уравнение для вычисления величины расчетной безразмерной производительности q_p напорной зоны:

$$q_p = q_m + q_z^* . \quad (6)$$

Уравнение (6) положено в основу учета влияния утечки на процесс в напорной зоне. Схема материального баланса в напорной зоне изображена на рис. 4.



Рис. 4. Схема материального баланса напорной зоны

Из уравнения (6) следует принципиально важный вывод, что при переработке резиновых смесей утечка не влияет на производительность червячной машины, а влияет только на длину напорной зоны, согласно уравнению (8), где $B_{z,p}$ вычисляется по q_p , значение которого определяет параметры η_0 , η_{out} , χ .

4. Уравнение для вычисления безразмерного градиента давления в зависимости от q_p (Торнер):

$$B_{z,p} = (1 + \chi \operatorname{tg} \varphi)^{1/n} / [\Phi(1) - \Phi(0)]^{1/n} . \quad (7)$$

5. Уравнение для вычисления длины напорной зоны (Торнер):

$$L_n = P_\phi \frac{h^{1+1/n}}{\mu_0 (\pi D N \cos \varphi)^{1/n} (n+1)^{1/n} B_{z,p}} \sin \varphi . \quad (8)$$

6. Уравнение потребляемой мощности в напорной зоне:

$$W = 2V_m^{max} P_\phi [(1 - \eta_0) + \chi \operatorname{tg} \varphi (1 - \eta_{out})]^* . \quad (9)$$

7. Уравнение потребляемой мощности в зазоре в пределах напорной зоны (Торнер):

$$W_{з,Т} = k\mu_{0,з} \frac{(\pi D N / 60)^{1/n_з + 1}}{\delta^{1/n_з}} e \cos \varphi L_{hz} \cdot 10^3 . \quad (10)$$

8. Уравнение для оценки удельного количества деформации, получаемого резиновой смесью в напорной зоне, Дж/кг:

$$Q_{hz}^{уд} = \frac{Q_{hz}}{G_m t_{hz}} = \frac{P_\phi}{\rho_p} \left\{ \frac{2}{q} [(1 - \eta_0) + \chi \operatorname{tg} \varphi (1 - \eta_{out})] - 1 \right\} \cdot 10^3^* . \quad (11)$$

9. Уравнение для численного расчета средней температуры на выходе элементарного участка напорной зоны:

$$t_{i+1} = B/A^* , \quad (12)$$

где $A = 3c_p \rho_p w h \varepsilon_k + \frac{120 w L_{\text{из}} \text{tg} \varphi}{q_p \pi D N I} (k_{\text{ч}} + k_{\text{ц}})$;

$$B = 555,56 \frac{1}{k} \frac{G_m P_{\text{ф}}}{\rho_p} \left\{ \frac{2}{q_m} [(1 - \eta_0) + \chi \text{tg} \varphi (1 - \eta_{\text{оц}}) - 1] \right\} \frac{120}{q_p \pi D N \cos \varphi I} + \\ + \left(3c_p \rho_p w h \varepsilon_k - \frac{120 w L_{\text{из}} \text{tg} \varphi}{q_p \pi D N I} (k_{\text{ч}} + k_{\text{ц}}) \right) t_i + \frac{240 w L_{\text{из}} \text{tg} \varphi}{q_p \pi D N I} (k_{\text{ч}} \overline{t_{\text{ок,ч}}} + k_{\text{ц}} \overline{t_{\text{ок,ц}}})$$

10. Уравнение для оценки максимальной температуры резиновой смеси на выходе напорной зоны:

$$t_{\text{max}} \approx (18 t_{\text{ср}} - 7 \overline{t_{\text{ок,ч}}} - 3 \overline{t_{\text{ок,ц}}}) / 8. \quad (13)$$

11. Уравнение для вычисления расчетной скорости сдвига (Торнер):

$$\dot{\gamma}_p = (\pi D N (n + 1)) / h. \quad (14)$$

12. Реологическое уравнение:

$$\tau = (\eta_n(T) \cdot \dot{\gamma}) / (1 + C_2 \cdot |\dot{\gamma}|^{2\alpha})^*. \quad (15)$$

В пятой главе проводится исследование процессов в зоне питания и буферной зоне канала червяка и разработка их математических моделей [21], а также рассматриваются вопросы оптимизации энергозатрат технологического процесса в целом [1, 13].

В основу математической модели процесса в буферной зоне в первом приближении положено уравнение Сквайрса. На его основе разработано аппроксимирующее регрессионное уравнение для расчета степени заполнения канала червяка в буферной зоне в зависимости от отношения глубины канала к его ширине (h/w) в диапазоне 0,1-0,5 и безразмерной производительности червячной машины q_m в диапазоне 0,05-0,8:

$$f = -1,101 \cdot 10^{-3} + 0,266 \cdot (h/w) + 1,004 \cdot q_m^*. \quad (16)$$

Уравнение (16) отличается от аналогов тем, что в нем учитывается не только отношение глубины канала к его ширине (h/w) , но и безразмерная производительность червячной машины q_m .

Для расчета мощности, потребляемой в буферной зоне, используется уравнение Торнера:

$$W_{\text{бз}} = k_{\mu_0} \frac{(\pi D N \cos \varphi)^{1/n+1}}{h^{1/n}} f_w \frac{L_{\text{бз}}}{\sin \varphi}. \quad (17)$$

Получено уравнение для расчета относительной длины буферной зоны по оси червяка в зависимости от коэффициента сопротивления формирующего инструмента $k_{\text{ф}}$:

$$\left(\frac{L_{\text{вз}}}{D}\right) = \left(\frac{L_{\text{к}}}{D}\right) - \left(\frac{L_{\text{н}}}{D}\right) = \left(\frac{L_{\text{к}}}{D}\right) - \frac{(h/D)^{2/n+1} (w/D)^{1/n} \sin \varphi}{2^{1/n} (k_{\text{ф}}/D^3)^{1/n} (n+1)^{1/n} B_{\text{зр}}} q_{\text{м}}^{1/n} *. \quad (18)$$

Получено уравнение для расчета средней температуры резиновой смеси на выходе элементарного участка буферной зоны с учетом теплообмена на гребнях червяка:

$$t_{i+1} = B/A *, \quad (19)$$

где $A = 3c_p \rho_p w h \varepsilon_{\text{к}} f + \left(\frac{120 w f L_{\text{вз}} \text{tg} \varphi}{\pi D N I} \right) (k_{\text{ч}} + k_{\text{и}})$,

$$B = 240 \cdot 10^6 \mu_0 \frac{\left(\frac{\pi D N \cos \varphi (2 \varepsilon_{\text{с}} - 1)}{60} \right)^{\frac{1}{n} + 1}}{h^{1/n} \pi D N \cos \varphi} f w \frac{L_{\text{вз}}}{I} + \\ + \left(3c_p \rho_p w h \varepsilon_{\text{к}} f - \frac{120 w f L_{\text{вз}} \text{tg} \varphi}{\pi D N I} (k_{\text{ч}} + k_{\text{и}}) \right) t_i + \frac{240 w f L_{\text{вз}} \text{tg} \varphi}{\pi D N I} (k_{\text{ч}} \overline{t_{\text{ох,ч}}} + k_{\text{и}} \overline{t_{\text{ох,и}}})$$

Получено уравнение, позволяющее определить диапазон безразмерной производительности напорной зоны, в котором потребляемая в напорной зоне удельная мощность будет близка к минимальной [1]:

$$W_{\text{нз}}^{\text{уд}} = W_{\text{нз}} / (V_{\text{нз}} P_{\text{ф}}) = \{ 2[(1 - \eta_0) + \chi \text{tg} \varphi (1 - \eta_{\text{оц}})] \} / q_{\text{р}} *. \quad (20)$$

Графики удельной мощности $W_{\text{нз}}^{\text{уд}}$ в зависимости от расчетной безразмерной производительности $q_{\text{р}}$ имеют участки, практически параллельные оси абсцисс, на которых значение удельной мощности близко к оптимальному (рис. 5).

На основе разработанной математической модели создана программа в среде MathCAD, которая позволяет анализировать существующие и проектировать новые технологические процессы, а также может использоваться в учебном процессе и для повышения квалификации инженеров-технологов. На рис. 6 приведены построенные с помощью данной программы графики распределения температуры резиновой смеси по сечению и длине канала червяка (пунктирными линиями обозначены допустимые границы изменения температуры резиновой смеси и температура по зонам охлаждения цилиндра). Разработанная программа зарегистрирована во Всероссийском научно-техническом информационном центре (инв. №50200501697).

Адекватность разработанной модели была проверена путем сопоставления экспериментальных и расчетных значений потребляемой мощности и температуры резиновой смеси для различных червячных машин. Результаты проверки адекватности приведены в табл. 2. Из результатов, приведенных в табл. 2, следует, что точность разработанной модели достаточна для проведения технологических расчетов.

Таблица 2. Экспериментальные и расчетные значения мощности и температуры резиновой смеси

Величина	МЧТ-125, D=125 мм, L/D=6,56			Лабораторная машина с коническим сердечни- ком, D=52 мм, L/D=5,6			Лабораторная машина с цилиндрическим сердеч- ником, D=52 мм, L/D=5,6		
	Протекторная смесь, T = 55 °C, n = 4,69 , $\mu_0 = 0,223 \text{ МПа}\cdot\text{с}^{1/n}$			Резиновая смесь на основе каучука СКС-30 АРКМ-15, T = 50 °C, n = 3,8 , $\mu_0 = 0,398 \text{ МПа}\cdot\text{с}^{1/n}$					
Частота вращения червяка, мин ⁻¹	20	30	40	45	66	80	46	64	83
Сопротивление головки, МПа	6,374	6,276	6,374	1,7	1,91	1,7	1,8	1,8	1,88
Весовая производительность, кг/ч	111,5	160	204	19,9	23,8	38	21,9	20	31
Суммарный КПД привода	0,42	0,42	0,42	0,45	0,50	0,55	0,45	0,45	0,50
Мощность, подводимая к двигателю, кВт	5,85	8,1	11,725	0,76	0,93	1,2	0,63	0,70	1,1
Расчетная мощность, подводимая к двигателю, кВт	5,43	7,97	10,54	0,722	0,88	1,2	0,636	0,79	1,038
Относительная погрешность по мощности, %	-7,2	-1,6	-9,9	-5	-5,4	0	0,95	13	-5,64
Максимальная температура резиновой смеси, °C	97	105	110	66	65	75	—	—	—
Расчетная максимальная температура резиновой смеси, °C	97	103	108	68,2	72	72	—	—	—
Относительная погрешность по температуре, %	0	-1,9	-1,8	3,3	10,8	-4,4	—	—	—

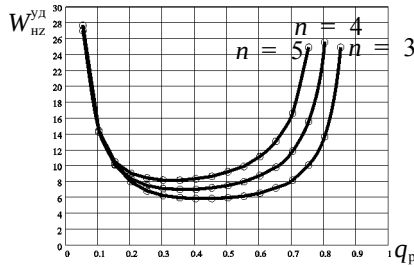


Рис. 5. Зависимость удельной потребляемой мощности от безразмерной производительности напорной зоны для $\varphi = 17,65^\circ$

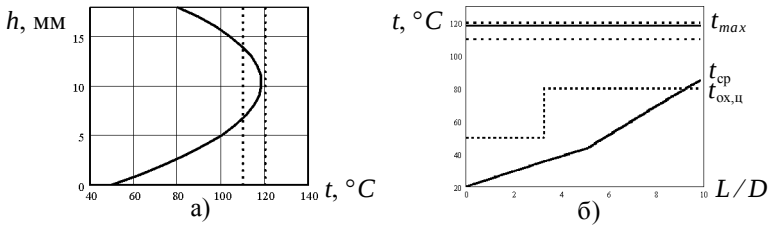


Рис. 6. Распределение температуры резиновой смеси по сечению (а) и средней температуры резиновой смеси по длине канала червяка (б)

Предложенная методика также может быть использована в первом приближении для расчета технологических параметров процесса экструзии резиновых смесей на червячных машинах с коническим сердечником.

В приложениях приводится список используемых в работе обозначений, дается подробный вывод наиболее важных формул и примеры расчетов по предложенным методикам, приводятся акты о внедрении результатов диссертационной работы в учебный и производственный процессы.

ВЫВОДЫ

1. Математическая модель процесса экструзии псевдопластичных сред на одночервячных машинах с постоянной глубиной нарезки, учитывающая наличие в экструдере трех зон: питания, буферной и напорной, а также влияние утечки перерабатываемого материала через зазор между гребнем червяка и цилиндром, разработана впервые и позволяет анализировать существующие и разрабатывать новые улучшенные технологические режимы процесса экструзии псевдопластичных сред с пониженным энергопотреблением и меньшим

процентом брака готовых изделий.

2. Уравнение, выбранное по результатам комплексного анализа аппроксимирующей способности 16-ти наиболее распространенных реологических уравнений псевдопластичных сред, наилучшим образом аппроксимирует кривые течения псевдопластичных сред, в том числе резиновых смесей, в широком диапазоне изменения скорости сдвига.

3. Две методики обработки кривых течения псевдопластичных сред предложены впервые и позволяют получить параметры аппроксимирующего реологического уравнения как при известном, так и при неизвестном значении коэффициента вязкости Ньютона и применимы для положительных и отрицательных значений скорости сдвига при количестве экспериментальных данных, начиная с трех точек. Данные методики не требуют проведения экспериментов при малых скоростях сдвига и проведения касательной к экспериментальной кривой, а также позволяют оценить коэффициент вязкости Ньютона для перерабатываемого материала.

4. Уравнение производительности напорной зоны червячной машины является новым и обобщает известные уравнения для перерабатываемых материалов с ньютоновскими и неньютоновскими реологическими свойствами как для случая одномерного течения перерабатываемого материала, так и для случая течения со сложным сдвигом. Данное уравнение получено в явном виде и не требует вычисления двойного интеграла.

5. Уравнение для расчета величины утечки перерабатываемого материала через зазор между гребнем червяка и внутренней поверхностью цилиндра получено впервые и учитывает, в отличие от известных автору аналогов, аномально-вязкие свойства материала в зазоре путем использования степенного закона. Показано, что при наличии буферной зоны утечка не оказывает влияния на производительность червячной машины.

6. Аппроксимирующее уравнение для расчета степени заполнения канала червяка перерабатываемым материалом является новым и позволяет рассчитать степень заполнения канала червяка в зависимости не только от отношения глубины канала к его ширине, но и от безразмерной производительности червячной машины.

7. Преобразованное уравнение Р.В. Торнера для расчета мощности, потребляемой в напорной зоне, показывает, что мощность, потребляемая в напорной зоне, не зависит от коэффициента консистенции перерабатываемого материала, а зависит только от величины безразмерной производительности червячной машины, индекса течения перерабатываемого материала и угла нарезки червяка, а коэффициентом консистенции перерабатываемого материала опреде-

ляется длина напорной зоны.

8. Уравнения для расчета распределения средней температуры перерабатываемого материала по оси канала червяка и максимальной температуры перерабатываемого материала на выходе канала червяка, являются новыми и позволяют производить расчеты с учетом теплообмена через гребни червяка.

9. Программное обеспечение на основе предложенной математической модели разработано впервые и позволяет провести в среде MathCAD расчет важнейших параметров технологического процесса экструзии псевдопластичных сред, в том числе резиновых смесей: потребляемой мощности, средней и максимальной температуры перерабатываемого материала на выходе червяка, количества деформации, величины утечки, длин напорной и буферной зон в зависимости от частоты вращения червяка, его геометрических параметров, режима охлаждения червяка, реологических и теплофизических свойств перерабатываемого материала.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Буртелов Л.В., Горбунов Д.Б., Татарников А.А. Определение оптимального по потребляемой мощности режима работы червячной машины при переработке резиновых смесей //Материалы III Всероссийской научной конференции «Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий», 2-4 сентября. - Томск: Томский политехн. ун-т, 2004. - С. 264-265.

2. 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 г., С. 309-311.

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

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

5. Татарников А.А., Буртелов Л.В. Прямой, циркуляционный и обратный потоки в канале червяка при течении в нём расплава или ре-

зиновой смеси. Томский политехнический университет. Томск, 1999. - 23 с. - Деп. в ВИНТИ №1085-B99. 09.04.99.

6. Татарников А.А., Буртелов Л.В. АРМ инженера-технолога по разработке технологических режимов изготовления на ЛКНВ кабельных изделий //Материалы международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии». 6-7 сентября. - Томск: ТПУ, 2001. - С. 170-171.

7. Татарников А.А., Буртелов Л.В. Новые методы обработки экспериментальной кривой течения //Пластические массы, 2005. - № 11. - С. 34-36.

8. Татарников А.А., Буртелов Л.В. Обобщенная математическая модель производительности напорной зоны червяка //Пластические массы, 2004. - № 4. - С. 50-52.

Tatarnikov A.A., Burtelov L.V. Generalised mathematical model of the throughput of the pressure zone of an extruder //International Polymer Science and Technology, Volume 31, №12, 2004, pp. T/72-75.

9. Татарников А.А., Буртелов Л.В. Оценка аппроксимирующей способности реологических моделей псевдопластичных сред //Томск: Томский политехн. ун-т, 2002. - 19 с. - Деп. в ВИНТИ, 15.02.01, № 404-B2001.

10. Татарников А.А., Буртелов Л.В. Принципиальные отличия процессов переработки резиновых смеси и расплава на одночервячных машинах //Каучук и резина, 2002. - № 4. - С. 29-31.

11. Татарников А.А., Буртелов Л.В. Течение в круглой трубе сред с псевдопластичными реологическими свойствами //Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2003. - №11. - С. 3-5.

Tatarnikov A.A., Burtelov L.V. Flow of Media with Pseudo-Plastic Properties in a Circular Pipe //Chemical and Petroleum Engineering, Volume 39, Numbers 11-12, November 2003, pp. 627-632.

12. Татарников А.А., Буртелов Л.В. Электрические схемы-аналогии для описания совместной работы червячной машины с формулирующим инструментом //Томск: Томск. политехн. ин-т, 1999. - 11 с. - Деп. в ВИНТИ № 1084-B99, 09.04.99.

13. Татарников А.А., Буртелов Л.В. Энергосберегающий режим работы одночервячных машин при производстве резинотехнических изделий //Материалы докладов Пятой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надёжность, безопасность». Томск, 1999. - с. 95.

14. Татарников А.А., Буртелов Л.В. Эффективная и кажущаяся вязкости, коэффициент консистенции и индекс течения. Связь между ними //Томск: Томский политехн. ун-т, 2001. - 13 с. - Деп. ВИНТИ, 15.02.01. - № 403 - B2001.

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. 7-10.

16. Татарников А.А., Буртелов Л.В., Горбунов Д.Б. Динамические характеристики одночервячной машины как объекта управления при переработке резиновых смесей //Труды VII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современная техника и технологии СТТ'2001».

17. Татарников А.А., Буртелов Л.В., Горбунов Д.Б. Лабораторная установка для исследования течения псевдопластичных сред в канале червяка //Материалы докл. Всероссийской науч. конф. молодых ученых: Наука, технологии, инновации. 4-7 декабря. - Новосибирск, 2003, 2003. - С. 142-144.

18. Татарников А.А., Буртелов Л.В., Горбунов Д.Б. Расчет 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 г., с. 156-159.

19. Татарников А.А., Буртелов Л.В., Горбунов Д.Б. Расчет 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 г., с. 17-19.

20. Татарников А.А., Буртелов Л.В., Горбунов Д.Б. Оценка значения коэффициента ньютоновской вязкости резиновых смесей по кривой течения //Материалы международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии». 6-7 сентября. - Томск: ТПУ, 2001. - С. 169-170.

21. Татарников А.А., Горбунов Д.Б., Буртелов Л.В. Изучение статического режима работы буферной зоны одночервячной машины при переработке псевдопластичных сред //Том. политехн. ун-т. - Томск, 2005 - 22 с.: ил. Библиогр.: 11 назв. - Рус. - Деп. в ВИНТИ.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

D — наружный диаметр червяка, м; e — ширина гребня червяка вдоль оси червяка, м; w — ширина канала червяка, м; s — площадь сечения канала червяка, м²; t — шаг нарезки канала червяка, м; h — глубина нарезки канала червяка, м; φ — угол нарезки канала червяка, градусы; δ — зазор между гребнем червяка и внутренней поверхнос-

тью цилиндра, м; k — число заходов червяка; N — частота вращения червяка, с^{-1} ; $L_{\text{нз}}$, $L_{\text{н}} = L_{\text{нз}} \sin \varphi$ — соответственно длина напорной зоны по оси канала червяка и по оси червяка, м; $V_{\text{м}}$ — соответственно объемная производительность червячной машины, $\text{м}^3/\text{с}$; $G_{\text{м}}$ — весовая производительность червячной машины, $\text{кг}/\text{час}$; $P_{\text{ф}}$ — давление на входе в формующий инструмент, МПа; τ — напряжение сдвига, МПа; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига, с^{-1} ; $\dot{\gamma}_{\text{эф}}$ — эффективная скорость сдвига, с^{-1} ; $\rho_{\text{р}}$ — плотность резиновой смеси, $\text{кг}/\text{м}^3$; $c_{\text{р}}$ — теплоемкость резиновой смеси, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $\eta_{\text{н}}$ — коэффициент ньютоновской вязкости, $\text{МПа}\cdot\text{с}$; n — индекс течения; μ_0 — коэффициент консистенции, $\text{МПа}\cdot\text{с}^{1/n}$; $\eta = y/h$ — безразмерная координата по оси Y ; $\eta_0 = y_0/h$ — безразмерная координата по оси Y , в которой градиент скорости сдвига для прямого течения равен нулю; $\eta_{\text{оц}} = y_{\text{оц}}/h$ — безразмерная координата по оси Y , в которой градиент скорости сдвига для циркуляционного течения равен нулю; χ — отношение градиента давления в циркуляционном течении к градиенту давления в прямом течении; B_z — безразмерный градиент давления; q — безразмерный расход; $k_{\text{ц}}$ — коэффициент теплопередачи от резиновой смеси к охлаждающей жидкости через стенку цилиндра, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$; $k_{\text{ч}}$ — эквивалентный коэффициент теплопередачи от резиновой смеси к охлаждающей жидкости через сердечник и гребень червяка, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$; $\Delta s_{\text{ц}}$, $\Delta s_{\text{ч}}$ — элементарные поверхности теплообмена соответственно через цилиндр и червяк, м^2 ; $\overline{t_{\text{ок,ц}}}$, $\overline{t_{\text{ок,ч}}}$ — средняя температура охлаждающей жидкости соответственно цилиндра и червяка, $^\circ\text{C}$; F_d — коэффициент, учитывающий тормозящее влияние стенок канала червяка; $\varepsilon_{\text{к}}$ — коэффициент, учитывающий уменьшение сечения канала червяка за счет скруглений у оснований гребня;