

мерности распределения скоростей по сечению аппарата. Уменьшение скорости движения потока в 2 раза приводит к увеличению производительности электрофильтра в 1,6 раза; снижение неравномерности движения по сечению в 2 раза увеличивает эффективность аппарата также в 1,6 раза.

Следовательно, не меняя нагрузку аппарата по очищаемому газу, а лишь улучшив его газораспределение, можно снизить затраты на очистку на 20 %.

Список литературы

1. Шнеерсон Б.Л. Электрическая очистка газов. — М. : Metallurgizdat, 1950.
2. Жеброский С.И. Электрофильтры. — М. : Госэнергоиздат, 1950.
3. Ужов В.Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами. — М. : Химиздат, 1962.
4. Рихтер Л.А. Влияние аэродинамических факторов на эффективность работы электрофильтров // Электр. станции. — 1957. — № 10.

Поступила в редакцию 30.05.07

The Influence of Stream Velocity Irregularity on Gas-Cleaning Device Efficiency

Tatarchuk V.A., Denysova A. E.

Odessa National Polytechnic University

Functional dependence of gas-cleaning device efficiency on stream irregularity degree according to well-known laws of velocities distribution by gas-cleaning device cross-section and device dependence on stream irregularity degree is established. The irregularity decrease provides electrical filter productivity improvement and gas purification expenses reduction.

Key words: gas-cleaning device efficiency, stream velocity irregularity.

Received May 30, 2007

УДК 678.027.3+678.057.3

Некоторые аспекты проектирования и моделирования червячных экструдеров

Микулёнок И.О., Радченко Л.Б., Швед Н.П.

Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

Предложен общий подход к физическому и математическому моделированию червячных экструдеров, максимально отвечающий реальным условиям переработки и в то же время отличающийся минимумом исходных данных, что делает его достаточно удобным для практического применения. Созданные по разработанным моделям программы расчета одно- и двухчервячных экструдеров успешно апробированы во время проектирования нового и модернизации существующего промышленного оборудования.

Ключевые слова: червячная экструзия, отходы, полимеры, моделирование.

Запропоновано загальний підхід до фізичного й математичного моделювання черв'ячних екструдерів, який максимально відповідає реальним умовам переробки і в той же час відрізняється мінімумом вихідних даних, що робить його досить зручними для практичного застосування. Створені за розробленими моделями програми розрахунку одно- і двочерв'ячних екструдерів успішно апробовані під час проектування нового й модернізації існуючого промислового обладнання.

Ключові слова: черв'ячна екструзія, відходи, полімери, моделювання.

Экструзионные методы в последние годы нашли широкое применение для переработки полимеров, композиционных материалов на основе полимеров (в первую очередь вторичных), сельскохозяйственного сырья, пищевых продуктов, отходов переработки мяса и кожи, а также как реакторы-полимеризаторы. Распространение экструдеров можно объяснить тем, что в них возможно создание таких условий переработки, которые невозможно реализовать в другом технологическом оборудовании: регулируемое давление, температурный режим, механические нагрузки, а также относительно небольшое время пребывания в активной зоне перерабатываемой массы и отсутствие ее контакта с окружающей средой.

В экструдерах осуществляется переработка высоковязких сред, а потому тепловой режим процесса экструзии определяется не только внешними системами теплоснабжения, как это имеет место в большинстве традиционного технологического оборудования, а и интенсивностью диссипативных источников энергии во всем объеме перерабатываемой массы. Интенсивность диссипации определяется свойствами перерабатываемой массы (вязкостью), геометрией и частотой вращения подвижных рабочих органов (червяков). Так, в линиях для производства труб энергия диссипации вводится в полимер на длине червяка обычно до трех метров, а отводится в охлаждающих ваннах длиной десятки метров. Поскольку каждый перерабатываемый материал имеет свои свойства, то для его переработки необходимы определенные геометрия рабочих органов и режим переработки.

Появляется много новых материалов, которые нуждаются в своей особой конструкции экструдеров. Этим, в частности, объясняется большое разнообразие экструзионного оборудования, предлагаемого различными фирмами. Не единичны случаи, когда даже наиболее современное оборудование уже во время смены производителя одного и того же полимера перестает обеспечивать необходимое качество переработки, в связи с чем моделированию процессов переработки на протяжении продолжительного времени уделяется значительное внимание. Это позволяет, с одной стороны, обоснованно проектировать ра-

бочие органы экструдеров, а с другой — осуществлять выбор существующего оборудования для переработки конкретного материала.

Классическая теория экструзии базируется на решении математических моделей аналитическими методами для так называемой обращенной плоскопараллельной модели с неподвижным червяком и вращающимся цилиндром, развернутыми на плоскость. При этом отдельно рассматриваются и анализируются зоны питания, плавления и гомогенизации, которые последовательно проходит перерабатываемый материал, двигаясь вдоль развернутого канала червяка. Эти модели уточнялись с учетом возможностей компьютерной техники с целью исследования факторов, не учтенных в упрощенных классических моделях.

Сравнение простых и более сложных моделей с экспериментальными данными показывает погрешность, находящуюся в пределах точности определения теплофизических и реологических свойств перерабатываемых материалов, что делает возможным применение упрощенных моделей для разработки инженерных методик расчета экструзии. В литературе имеется мало информации относительно использования разработанных моделей для расчета процесса червячной экструзии в целом. На наш взгляд, только такие модели, которые рассматривают экструдер как единое целое с учетом взаимосвязи всех зон (питания, плавления и гомогенизации), могут предоставить инструмент для практического проектирования или правильного выбора существующего оборудования для переработки конкретного материала.

Для решения задачи поиска геометрии необходимо формулирование условий, которым эта геометрия должна удовлетворять в каждой зоне экструдера. Для зоны питания таковым принято условие, при котором глубина нарезки в этой зоне обеспечивает заданную удельную производительность (производительность экструдера на каждый оборот червяка). Соответственно для зоны гомогенизации условием выбора глубины нарезки было принято равенство нулю градиента давления на выходе экструдера.

Для реализации этих моделей выбраны модифицированные классические модели процес-

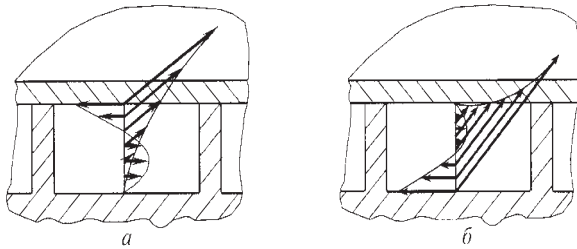


Рис.1. Скоростные поля расплава в канале червяка для плоскопараллельной модели при вращающемся цилиндре (а) и вращающемся червяке (б).

сов питания, плавления и гомогенизации, на базе которых разработаны программы расчета одночервячных, комбинированных и дисковых экструдеров [7]. Выполненные по этим программам расчеты почти всех наиболее распространенных типоразмеров экструдеров с диаметром червяков 20–250 мм доказали перспективность разработанного подхода к моделированию. Для проверки адекватности моделей в программу вводили данные, полученные экспериментально на лабораторном или промышленном оборудовании (свойства полимера, производительность, конечная температура расплава). Сравнение вычисленной геометрии с реальной геометрией червяков, для которых эти результаты были получены, показало достаточную для инженерных расчетов сходимость. При этом анализ расчетов, а также экспериментальных и практических данных показал ограничения разработанных моделей и программ.

Поскольку классические решения получены для плоскопараллельной модели с неподвижным червяком и вращающимся цилиндром, то процессы, которые в действительности имеют место вблизи поверхности вращающегося червяка, условно переносятся к стенке неподвижного цилиндра (рис.1).

Это не имеет существенного значения при расчете гидродинамики и определении производительности, а также при вычислении интен-

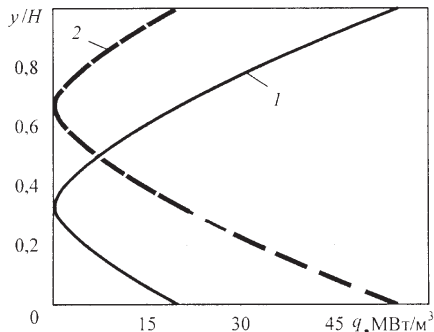


Рис.2. Изменение мощности диссипации q по безразмерной высоте нарезки канала при вращающемся цилиндре (1) и вращающемся червяке (2).

сивности диссипации и интегрального значения температуры, но такой подход может привести к существенным погрешностям, если необходимо учитывать теплообмен с внешними системами теплообеспечения. Так, на рис.2 показаны кривые изменения интенсивности диссипации q_V по безразмерной высоте y/H канала для плоскопараллельной модели с вращающимся цилиндром и червяком, вычисленные для ньютоновской модели жидкости (здесь y — текущая координата по высоте канала, H — общая высота канала).

Из рис.2 видно, что интенсивность диссипации для модели с вращающимся червяком больше возле поверхности червяка по сравнению с моделью с вращающимся цилиндром. Это необходимо учитывать при расчете процесса теплообмена с поверхностями червяка и цилиндра, если энергия, подводимая от внешних нагревателей, значительно больше по сравнению с энергией диссипации, которая особенно важна во время переработки таких полимеров, как, например, полиэтилентерефталат, а также биологического сырья, которое характеризуется значительным содержанием влаги. Увеличение доли энергии внешних нагревателей требует для ее передачи увеличения поверхности теплообмена, то есть длины червяка, или уменьшения производительности экструдера, а поэтому для заданной длины червяка существенно сужается диапазон режимов переработки, при которых достигается необходимое качество продукции. Таким образом, все это нуждается в разработке нового подхода к моделированию процесса червячной экструзии.

При разработке новой модели экструзии будем считать, что, как и в реальном процессе, вращается червяк, а цилиндр остается неподвижным. Кроме того, в отличие от плоскопараллельной модели задачу будем решать в цилиндрической системе координат (рис.3,а). Далее выделим объем, отвечающий объему одного шага винтовой нарезки, и условно деформируем его, повернув на величину угла наклона нарезки (рис. 3,б).

Для формулирования математического описания процесса теплообмена воспользуемся одновременно системами координат Лагранжа и Эйлера. В координатах Лагранжа выделенный кольцеобразный объем движется вдоль оси червяка со скоростью V_L , которую можно определить из уравнения массового расхода G :

$$G = \rho V_L F_{\varphi} = \rho V_L \left\{ \pi [D^2 - (D - 2H)^2] / 4 - E H / \operatorname{tg} \varphi \right\}, \quad (1)$$

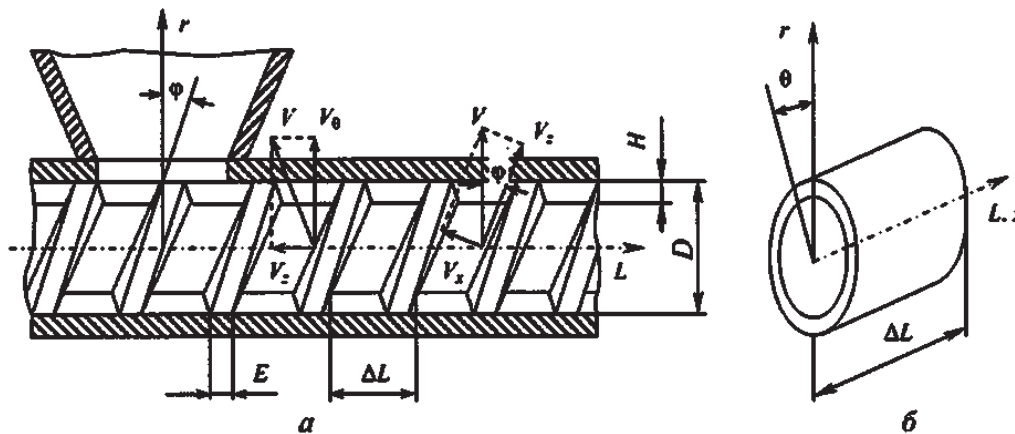


Рис.3. Системы координат для формулирования математической модели червячной экструзии.

где ρ — плотность полимера как функция температуры; $F_{\text{ч}}$ — площадь диаметрального сечения канала червяка; D, H, E, φ — диаметр, глубина, ширина гребня и угол наклона винтовой нарезки червяка.

Из уравнения (1) имеем

$$V_L = G / (\rho \{ \pi [D^2 - (D - 2H)^2] / 4 - EN / \text{tg } \varphi \}). \quad (2)$$

В пределах выделенного объема выберем еще одну подвижную систему координат r, θ, z (см. рис.3,б). Учитывая, что время t перемещения объема вдоль координаты L связано со скоростью V_L зависимостью $L = V_L t$, запишем уравнение сохранения энергии в цилиндрической системе координат Эйлера для выделенного объема:

$$\rho c V_L \frac{\partial}{\partial L} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda \frac{\partial}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} (\lambda \frac{\partial}{\partial \theta}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial}{\partial z}) + \rho c (W_r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} W_\theta \frac{\partial}{\partial \theta} + W_z \frac{\partial}{\partial z}) = q_V, \quad (3)$$

где W_r, W_θ, W_z — компоненты скорости в выделенном объеме; c, λ — удельная массовая теплоемкость и теплопроводность полимера как функции температуры T ; q_V — интенсивность внутренних источников энергии.

Рассмотрим плоскопараллельную модель червячной экструзии с вращающимся цилиндром (см. рис.3). Если V — угловая скорость вращения, которую определяют по зависимости $V = \pi D n$ (где n — частота вращения), то ее проекции на координатные оси составляют:

$$V_x = V \sin \varphi; \quad V_z = V \cos \varphi.$$

Из рис.3 можно видеть, что для кольцевого объема проекции скорости определяются следующим образом:

$$V = V \cos \varphi; \quad V_z = V \sin \varphi.$$

Профили скорости по высоте нарезки для кольцевого объема с вращающимся цилиндром приведены на рис.1,а, с вращающимся червяком — на рис.1,б. Таким образом, для определения составляющих скорости W_θ и W_z можно использовать известные решения уравнений гидродинамики, полученные для плоскопараллельной модели червяка, развернув их на 180° и согласовав соответствующим образом системы координат. Скоростью W_r можно пренебречь, поскольку она намного меньше W_θ и W_z .

В кольцевом объеме имеет место вращение массы под действием составляющей V и ее циркуляция в поперечном направлении под действием составляющей V_z (см. рис.3,б), что дает возможность считать процесс осесимметричным и пренебречь производными по координате θ в уравнении (3). В зоне питания и в области зоны плавления, где полимер находится в твердом состоянии, циркуляционная составляющая скорости W_z отсутствует, а мощность диссипации равняется нулю. В случае переработки высоковязких жидкостей температура в каждой точке объема, как показали расчеты [8], определяется преимущественно интенсивностью диссипации, которая зависит от скорости сдвига в этой точке. Поэтому составляющую $W_z \partial T / \partial z$ в уравнении (3) также можно не учитывать и в случае необходимости оценку перемешивания осуществить введением коэффициента эквивалентной теплопроводности $\lambda_e = \varepsilon \lambda$, где $\varepsilon \geq 1$. Тогда с учетом указанных упрощений уравнение (3) принимает вид:

$$\rho c V_L \frac{\partial}{\partial L} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda \frac{\partial}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial}{\partial z}) = q_V. \quad (4)$$

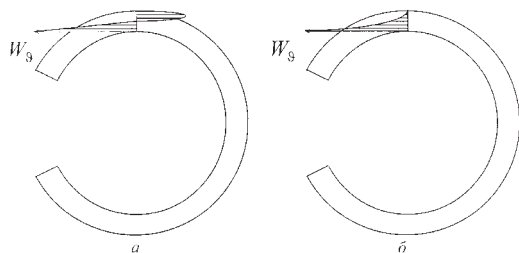


Рис.4. Схемы С-образных секций рабочих каналов двухчервячных экструдеров с разнонаправленным (а) и однонаправленным (б) вращением червячков.

Мощность диссипации определяется по уравнению

$$qv_{r\theta} \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{W_\theta}{r} \right) \right]_{rz} \frac{\partial W_z}{\partial r}. \quad (5)$$

Значение напряжений определяются по соответствующим реологическим уравнениям.

Вышеописанный подход был использован и для анализа процесса двухчервячной экструзии. В этом случае в пределах каждого червяка также выделяется объем, соответствующий объему одного шага его винтовой нарезки, после чего этот объем условно деформируют, повернув его на величину угла наклона ϕ нарезки (в отличие от цилиндрической формы для одночервячного экструдера указанный объем для двухчервячного экструдера имеет С-образную форму).

На рис.4 представлены эпюры скорости W_θ для случая разнонаправленного и однонаправленного вращения червячков. Определенную разницу в распределении скорости можно объяснить тем, что в случае разнонаправленного вращения червячков на С-образный объем каждого червяка влияет соответствующий С-образный объем другого червяка, вращающийся в противоположном направлении (рис.4,а). В случае однонаправленного вращения червячков поток из С-образного объема каждого червяка просто переходит в соответствующий С-образный объем другого червяка (рис.4,б).

Описанный подход был использован во время разработки математических моделей процессов питания, плавления и гомогенизации, на основе которых разработаны алгоритмы и программы расчета одно- и двухчервячных экструдеров [9–15].

Разработанные в соответствии с предложенным подходом программы расчета апробированы при проектировании и модернизации промышленных экструдеров, которыми укомплектованы технологические линии переработки полимеров и композиционных материалов, эксплуатирующиеся в отечественных и зарубежных предприятиях и организациях.

Список литературы

1. Радченко Л.Б., Швед Н.П. Исследование экструдеров с жесткой характеристикой. Сообщение 1 // Хим. машиностроение. — 1983. — Вып. 38. — С. 8–12.
2. Радченко Л.Б., Швед Н.П., Шум М.Д. Исследование экструдеров с жесткой характеристикой. Сообщение 2 // Там же. — С. 12–16.
3. Радченко Л.Б., Швед Н.П. Исследование экструдеров с жесткой характеристикой. Сообщение 3 // Там же. — 1984. — Вып. 39. — С. 24–26.
4. Лукач Ю.Е., Радченко Л.Б. Тенденции создания экструзионного оборудования // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. «Полимермаш-91». — Киев : НПО «Большевик», 1991. — С. 6–8.
5. Лукач Ю.Е., Радченко Л.Б. Современные методы расчета и оптимизация машин // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. «Реология и оптимизация процессов переработки полимеров». — Ижевск, 1989. — Ч. 2. — С. 169.
6. Радченко Л.Б., Демин П.П., Алтайская Л.Б. Червячный пресс с комбинированными рабочими органами // Хим. и нефт. машиностроение. — 1985. — № 2. — С. 8–10.
7. Радченко Л.Б. Переробка термопластів методом екструзії. — К. : ІЗМН, 1999. — 220 с.
8. Радченко Л.Б., Двойнос Я.Г., Шатило В.Ю. Метод розрахунку температурних полів під час переробки полімерних композицій в екструдері // Хім. пром-сть України. — 1999. — № 3. — С. 28–31.
9. Будзинська О.С., Лукашова В.В., Мікульюнок І.О., Радченко Л.Б. Моделювання процесу неізо-термічного живлення одночерв'ячного екструдера // Наук. пр. ОНАХТ. — 2006. — Вип. 28, т. 2. — С. 190–192.
10. Радченко Л.Б., Лукашова В.В., Микуленок І.О., Целья Б.Я. Математическая модель процесса экструзии // Там же. — С. 206–207.
11. Лукашова В.В., Мікульюнок І.О., Радченко Л.Б. Моделювання процесу плавлення в одночерв'ячному екструдері // Упаковка. — 2005. — № 4. — С. 23–27.
12. Лукашова В.В., Мікульюнок І.О., Радченко Л.Б. Моделювання процесу плавлення в одночерв'ячному екструдері // Там же. — № 5. — С. 35–37.
13. Радченко Л.Б., Мікульюнок І.О., Новік В.О. Моделювання процесу двочерв'ячної екструзії. 1. Екструзія в умовах різноспрямованого обертання черв'яків // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2005. — № 3. — С. 75–83.
14. Зубрій О.Г., Мікульюнок І.О., Радченко Л.Б., Радчук О.О. Моделювання процесу двочерв'ячної екструзії. 2. Екструзія в умовах односпрямованого обертання черв'яків // Там же. — № 5. — С. 39–43.
15. Мікульюнок І.О., Радченко Л.Б. Переробка вторинної сировини екструзією. — К. : Політехніка, 2006. — 184 с.

Поступила в редакцию 30.10.07

An Aspects of Screw Extruders Design and Simulation

Mikulionok I.O., Radchenko L.B., Shved N.P.

National Technical University of Ukraine «KPI», Kiev

General approach to physical and mathematical simulation of screw extruders is proposed. The approach is highest possible applicable for actual operating conditions and at the same time demands minimum input data. It makes the approach convenient enough for practical application. Software programs developed by the models for single- and twin-screw extruders computation are successfully tested during engineering of new and modernization of existing equipment.

Key words: screw extrusion, waste, polymers, simulation.

Received October 30, 2007

УДК 621.59.7

Сушильный потенциал атмосферного воздуха

Дензанов Г.А.

Винницкий государственный педагогический университет

Рассмотрена возможность использования воздуха в технологии утилизации медьсодержащих отходов, в частности, в процессах упаривания водного раствора хлорида аммония и сушки медного купороса. Определены необходимые при этом затраты высокопотенциальной энергии, границы влажности воздуха. Предложено для увеличения скорости упаривания раствора воздухом использовать низкопотенциальную энергию экзотермической реакции получения медного купороса.

Ключевые слова: раствор хлорида аммония, медный купорос, относительная влажность, сушка, упаривание, низкопотенциальная энергия.

Розглянуто можливість використання повітря в технології утилізації відходів, які містять мідь, зокрема в процесах упарювання водного розчину хлориду амонію та сушки мідного купоросу. Визначено необхідні при цьому витрати високопотенційної енергії, межі вологості повітря. Запропоновано для збільшення швидкості упарювання розчину повітрям використовувати низкопотенційну енергію екзотермічної реакції отримання мідного купоросу.

Ключові слова: розчин хлориду амонію, мідний купорос, відносна вологість, сушка, упарювання, енергія з низьким потенціалом.

Развитие цивилизации сопровождается увеличением потребностей в энергии. Так, в 1900 г. производство энергии в мире составляло 21 ЭДж (1 ЭДж = 10^{18} Дж, что эквивалентно сжиганию 27 млн м³ сырой нефти), а в начале XXI в. за год на производственные и бытовые потребности тратится энергии около 320 ЭДж, то есть за столетие потребление энергии возросло более чем в 15 раз. Удовлетворение энергетических потребностей происходит в основном за счет переработки традиционного топлива: угля, нефти, газа. Очевидно, что его запасы ограничены, а темпы по-

требления возрастают с каждым днем, что грозит возникновением серьезных энергетических проблем. Даже если энергетического кризиса удастся избежать, человечество неизбежно столкнется с тем, что запасы традиционных энергетических ресурсов будут исчерпаны [1]. Приведенные данные убедительно свидетельствуют о необходимости использования альтернативных источников энергии, например, ветровой энергии.

От Солнца Земля получает энергии около 1 ЭДж/ч. Лишь 1–2 % этого колоссального количества энергии преобразуется в энергию дви-