

УДК 004.942:[678.027.3+678.057.3]-023.834

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.139886

## Моделирование процесса переработки полимеров в двухчервячных экструдерах

И. О. Микулёнок, А. Н. Гавва, Л. А. Кривопляс-Володина

*Розроблено математичну модель процесу перероблення полімерів у дво-черв'ячних екструдерах з одно- і різноспрямованим обертанням черв'яків. Модель враховує теплообмін полімеру з черв'яками й циліндром, а також реальні граничні умови (черв'яки обертаються, циліндр нерухомий).*

*Для аналізу процесу використано модель виділеного С-подібного об'єму, який обмежено одним витком нарізки кожного із черв'яків і в якому перебуває певний об'єм перероблюваного полімеру. Така модель дає змогу описати процес перероблення як у випадку повного, так і часткового заповнення робочого каналу перероблюваним матеріалом. Це особливо важливо в разі дозованого живлення екструдера полімером, що характерно для сучасного екструзійного обладнання.*

*Досліджено температурне поле полімеру в робочих каналах екструдерів з одно- і різноспрямованим обертанням черв'яків і виконано порівняння результатів розрахунків з експериментом. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що на відміну від одночерв'ячного екструдера у дво-черв'ячному екструдері робочі органи спочатку потрібно інтенсивно нагрівати, а потім охолоджувати (у напрямку від завантажувальної лійки до екструзійної головки).*

*Розроблена методика була успішно використана під час відпрацювання режимів перероблення різних полімерних матеріалів на двочерв'ячних екструдерах з одно- і різноспрямованим обертанням черв'яків діаметром 125 і 83 мм, відповідно.*

*Розбіжність розрахованого та експериментального значень температури на виході двочерв'ячного екструдера з односпрямованим обертанням черв'яків  $\varnothing 83 \times 30D$  не перевищує 10 %. При цьому експериментальне значення температури дещо перевищило задане значення. Це можна пояснити тим, що система термостабілізації робочих органів для досліджених режимів перероблення не могла ефективно відводити теплоту дисипації, що виділялася.*

*Використання розробленої математичної моделі дасть змогу краще прогнозувати ефективні режими роботи двочерв'ячних екструдерів, особливо під час перероблення матеріалів з низькою термічною стійкістю*

*Ключові слова: двочерв'ячний екструдер, різно- та односпрямоване обертання черв'яків, граничні умови, температурне поле*

### 1. Введение

Для непрерывного изготовления продукции из термопластичных полимеров наряду с одночервячными экструдерами в последнее время широко исполь-

зуются двухчервячные экструдеры. Двухчервячные экструдеры характеризуются высокой производительностью и смесительной способностью, а также стабильностью параметров процесса переработки при замене формующего инструмента (экструзионной головки) [1–4].

В настоящее время производители оборудования для переработки полимеров предлагают значительное количество двухчервячных экструдеров с рабочими органами разнообразной геометрии, что существенно усложняет выбор необходимого оборудования. Поэтому большое значение приобретает математическое моделирование процесса двухчервячной экструзии, которое позволяет быстро выбрать наиболее эффективное оборудование, существенно сократив дорогостоящие экспериментальные исследования и отработку технологии полимерных изделий.

Если моделирование одночервячных экструдеров рассмотрено достаточно подробно (например, [2, 3, 5–7]), то моделированию двухчервячной экструзии внимания уделено значительно меньше.

За последние годы достаточно сложный процесс двухчервячной экструзии был исследован многими авторами, которые с целью упрощения его математического описания принимали различные допущения. Долгое время такой подход был вполне оправдан, однако со временем производительность экструдеров существенно возросла, в связи с чем многие модели переработки стали неприемлемыми для практического использования. Поэтому моделирование процесса переработки полимеров в двухчервячных экструдерах с учётом реальных граничных условий, а также теплообмена полимера с червяками и цилиндром экструдера, представляется актуальным.

## **2. Анализ литературных данных и постановка проблемы**

Каждый термопластичный материал имеет определённые свойства, поэтому для его переработки в двухчервячном экструдере необходимы соответствующие геометрия рабочих органов (прежде всего червяков) и режим переработки. При этом одним из путей выбора наиболее эффективных экструдеров, обеспечивающих необходимое качество получаемой продукции, является математическое моделирование процессов переработки полимеров [2, 3, 5]. Разработанные на раннем этапе двухчервячной экструзии математические модели базируются на аналитических решениях системы уравнений, в основе которой лежит классическая для червячной экструзии обращённая плоскопараллельная модель (червяки неподвижны, цилиндр вращается). Указанная модель имеет существенные недостатки, что уже было показано при анализе одночервячной экструзии [5–7].

По сравнению с одночервячной экструзией переработка полимеров в двухчервячных экструдерах значительно сложнее. Это объясняется не только наличием двух вращающихся в одном либо противоположных направлениях червяков, но и формой канала корпуса (цилиндра) экструдера [8–10].

При этом исследователи указывают, что математическое моделирование двухчервячных экструдеров сдерживается отсутствием надёжного программно-

го обеспечения, поэтому проектирование осуществляется преимущественно на основе экспериментальных и практических данных [9].

В этой связи исследования двухчервячной экструзии долгое время были посвящены анализу процесса смешения (в основном для червяков, вращающихся в одном направлении). Например, в работе [11] рассмотрены конструкции смесительных элементов червяков как со взаимным зацеплением, так и без него. В работе [12] рассмотрена эффективность червяков с нейтральными и реверсивными штифтовыми смесительными кулачками, а в работах [13, 14] – с овальными кулачками. Результаты аналогичных исследований для червяков с овальными кулачками приведены также в работе [15]. При этом в работе [16] приведена классификация и подробно рассмотрены конструкции смесительно-диспергирующих элементов червяков.

Авторами [17] подробно исследована гидродинамика и смесительный эффект двухчервячного экструдера с однонаправленным вращением червяков. Однако анализ скорости расплава полимера выполнен в изотермическом приближении, что может привести к существенной погрешности при переработки высоковязких полимеров.

В работе [18] исследованы скоростное поле и давление в канале двухчервячного экструдера с однонаправленным вращением червяков. При этом анализ температурного поля полимера отсутствует.

В работах [19, 20] приведены результаты исследования зависимости производительности двухчервячного экструдера с однонаправленным вращением червяков и давления вдоль его рабочего канала. Исследования приведены для червяков с каналом различной геометрии и различных скоростей их вращения. Однако указанные исследования актуальны лишь в случае отсутствия дозатора на входе в экструдер, что на практике встречается крайне редко.

Аналізу процесса смешения и распределения давления вдоль рабочего канала двухчервячного экструдера с однонаправленным вращением червяков посвящена и работа [21]. Аналогичные исследования (применительно к червякам со смесительными кулачками) приведены в работе [22]. При этом в указанных работах не рассматривается влияние систем теплоснабжения червяков и цилиндра на температурное поле перерабатываемого материала, что существенно влияет на качество получаемой продукции.

В работе [23] исследована скорость плавления полимерных гранул в двухчервячном экструдере с разнонаправленным вращением червяков, в частности определена длина зоны плавления в зависимости от скорости вращения червяков. При этом процесс переработки полимера в зазоре между червяками рассматривается по аналогии с процессом переработки на валковых машинах [24]. Также не приведена зависимость температуры перерабатываемого материала по длине канала экструдера, что затрудняет анализ влияния параметров процесса на качество получаемой продукции.

Большинство экспериментальных и практических исследований направлено на анализ смесительной способности двухчервячных экструдеров и определение их производительности. В то же время анализу температурного поля перерабатываемого материала, а также определению мощности диссипации внимания

практически не уделяется. Но именно эти параметры определяют качество подготавливаемого в экструдере расплава полимера и получаемой продукции.

В силу особенностей конструктивного оформления рабочего канала двухчервячных экструдеров на процесс плавления полимера и обеспечение необходимого температурного режима переработки существенно влияют системы теплоснабжения червяков и цилиндра, а также реальные граничные условия. С учётом изложенного требуется новый подход для моделирования процесса двухчервячной экструзии.

### **3. Цель и задачи исследования**

Целью данного исследования является математическое моделирование процесса переработки полимерных материалов в рабочем канале двухчервячных экструдеров. Модель должна учитывать дозированное питание экструдеров перерабатываемым материалом, наличие систем теплоснабжения его рабочих органов, а также реальные граничные условия (геометрические, скоростные и температурные). Это позволит определить рациональные параметры процесса двухчервячной экструзии для обеспечения требуемого распределения температуры полимера на выходе из экструдера при его заданной производительности. К указанным параметрам относятся метод обогрева или охлаждения червяков и корпуса экструдера, тип теплоносителя, его температура и объёмный расход, геометрия рабочего канала червяков и частота их вращения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- учесть особенности полного и частичного заполнения перерабатываемым материалом рабочего канала экструдера и теплообмен полимера с вращающимися червяками и неподвижным цилиндром;
- теоретически исследовать процесс переработки полимера в рабочем канале экструдера;
- экспериментально проверить адекватность разработанной математической модели.

## **4. Материалы и методы исследований процессов переработки полимеров в двухчервячных экструдерах**

### **4. 1. Моделирование процесса переработки полимеров в двухчервячном экструдере с разнонаправленным вращением червяков**

Среди двухчервячных экструдеров одними из наиболее распространённых являются экструдеры с разнонаправленным вращением червяков и их полным зацеплением, закрытым как в продольном, так и поперечном направлениях. Особенностью таких экструдеров является то, что винтовые каналы червяков представляют собой ряд практически изолированных друг от друга С-образных секций, в каждой из которых находится определённый объём перерабатываемого ТпМ (рис. 1). В этой связи, для анализа процесса двухчервячной экструзии предложена модель выделенного объёма, ограниченного одним витком червяка [5, 25].

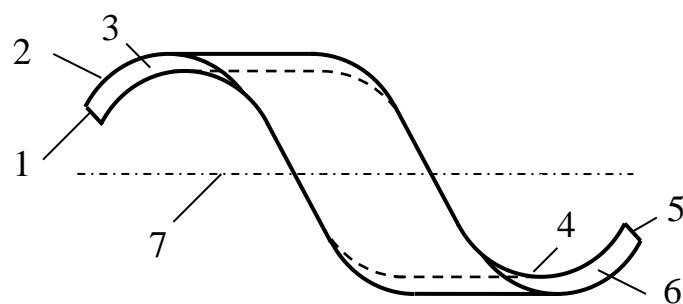


Рис. 1. Схема объёма перерабатываемого ТпМ в пределах одного витка нарезки червяка двухчервячного экструдера: 1, 5 – поверхности ТпМ, ограниченные соответствующим объёмом соседнего червяка; 2 – поверхность, ограниченная цилиндром; 3, 6 – поверхности, ограниченные заплечиками гребней нарезки червяка; 4 – поверхность, ограниченная сердечником червяка; 7 – продольная ось червяка

Материал, который попадает в С-образную секцию рабочего канала экструдера из загрузочного бункера, при вращении червяков транспортируется в направлении формующей головки, и за один оборот из неё выходят два С-образных объёма ТпМ. При этом производительность экструдера практически не зависит от сопротивления формующей головки [5, 26]. Глубина нарезки червяков может быть относительно большой, что уменьшает скорость деформации ТпМ и интенсивность диссипации, а также приводит к увеличению доли теплоты, подводимой к ТпМ от стенки цилиндра. Данная схема движения ТпМ обеспечивает равенство времени его пребывания в каналах червяков, что особенно важно при переработке термочувствительных материалов.

Зазоры между червяками и между червяком и цилиндром приводят к некоторому уменьшению производительности, однако улучшает перемешивание ТпМ. Переход материала через указанные зазоры из одного С-образного объёма в другой зависит от перепада давления между объёмами и зависит от сопротивления формующей головки. Такие зазоры имеются между гребнями одного и сердечником соседнего червяка (валковый зазор)  $\delta_{rs-cs}$ , между боковыми поверхностями гребней  $\delta_{rs-rs}$ , а также между гребнями витков и стенкой цилиндра  $\delta_{rs-b}$  (рис. 2).

При разнонаправленном вращении червяков их относительная скорость в зазорах  $\delta_{rs-rs}$  приблизительно равна нулю, а потому их влияние на интенсивность диссипации незначительно.

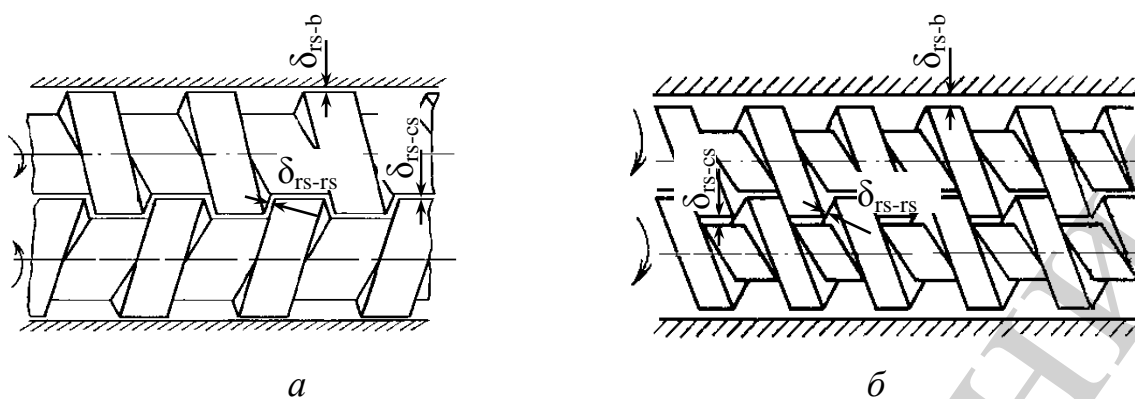


Рис. 2. Характер зацепления червяков двухчервячного экструдера:  
*а* – при разнонаправленном вращении червяков;  
*б* – при однонаправленном вращении червяков

Экструдеры с червяками со взаимным зацеплением, вращающимися в противоположных направлениях, обеспечивают высокий смесительный эффект при значительной производительности. Однако при этом радиальные (распорные) усилия, возникающие в двухчервячных экструдерах, приводят к повышенному износу рабочих органов (в первую очередь цилиндра).

Уплотнение ТпМ в экструдере осуществляется за счёт уменьшения объёма замкнутого С-образного объёма в направлении формующей головки. При этом необходимо учесть, что при различных значениях степени сжатия червяков возможно переуплотнение материала и их заклинивание. Поэтому двухчервячные экструдеры должны иметь дозированное питание.

Теоретически объёмная производительность двухчервячных экструдеров без учёта перетоков может быть определена как произведение двух С-образных объёмов на выходе экструдера на частоту вращения червяков [5, 26]. Однако теоретические зависимости дают существенно большие значения производительности по сравнению с практическими данными, что можно объяснить наличием дозаторов и необходимостью достижения высокого качества переработки. Таким образом, теоретические данные дают только верхнее ограничение производительности. С другой стороны, при дозированном питании производительность экструдера определяется производительностью дозатора, а потому её определение не имеет существенного значения для дальнейшего расчёта экструдера, если эта производительность не превышает максимально возможной для заданной геометрии червяков и их частоты вращения.

Определим максимально возможную производительность экструдера с дозированным питанием и частотой вращения червяков  $n_s$ . В этом случае полностью заполненными являются лишь последние С-образные секции, объём которых, как правило, наименьший. С этой целью рассмотрим поперечное сечение экструдера в плоскости, перпендикулярной продольным осям червяков (рис. 3) [26].

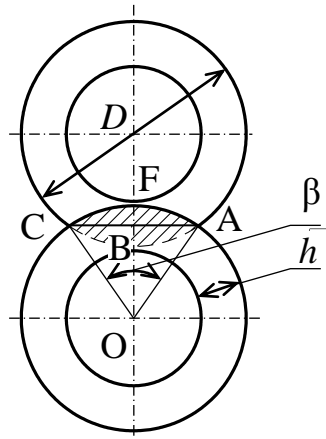


Рис. 3. Поперечное сечение двухчервячного экструдера:  $D$  – диаметр гребня нарезки червяков, м;  $h$  – глубина канала (глубина нарезки) каждого из червяков, м;  $\beta$  – угол сопряжения червяков, рад

За каждый оборот червяков из экструдера выходит удвоенный С-образный объем ТпМ с поперечным сечением в виде кольца площадью  $\pi(D^2 - (D - 2h)^2)/4$  за исключением заштрихованной на рис. 3 площади длиной  $(s - ke)$  в направлении оси экструдера (здесь  $e$  и  $s$  – ширина гребня витка и шаг нарезки червяка, м;  $k$  – количество заходов винтовой нарезки червяка).

Площадь сегмента  $ABCF$  равна площади сектора  $O AFC$  за исключением площади треугольника  $OAC$ :

$$F_{ABCF} = F_{O AFC} - F_{OAC}.$$

Определим эти площади:

$$F_{O AFC} = \frac{\pi D^2}{4} \frac{\beta}{2\pi} = \frac{D^2 \beta}{8}; \quad F_{OAC} = \frac{1}{2} |OB| \cdot |AC|;$$

$$|OB| = \frac{D - h}{2}; \quad |AC| = 2 \frac{D}{2} \sin \frac{\beta}{2} = D \sin \frac{\beta}{2}.$$

Тогда имеем

$$F_{OAC} = \frac{D}{2} \left( \frac{D - h}{2} \right) \sin \frac{\beta}{2}$$

и

$$F_{ABCF} = \frac{D^2\beta}{8} - \frac{D}{2} \left( \frac{D-h}{2} \right) \sin \frac{\beta}{2}.$$

Площадь поперечного сечения каналов двух червяков составляет

$$S_s = \frac{1}{2} \left\{ \pi \left[ D^2 - (D-2h)^2 \right] - D \left[ \frac{D\beta}{2} - (D-h) \sin \frac{\beta}{2} \right] \right\}$$

или

$$S_s = 2\pi h(D-h) - \frac{D}{2} \left[ \frac{D\beta}{2} - (D-h) \sin \frac{\beta}{2} \right],$$

тогда объём двух С-образных секций ( $m^3$ ) равен

$$\begin{aligned} V_c &= S_s(s - ke) = \\ &= \left\{ 2\pi h(D-h) - \frac{D}{2} \left[ \frac{D\beta}{2} - (D-h) \sin \frac{\beta}{2} \right] \right\} (s - ke). \end{aligned} \quad (1)$$

С учётом (1) массовая производительность экструдера составляет

$$G_M = \rho V_c n_s = \rho (s - ke) n_s \left\{ 2\pi h(D-h) - \frac{D}{2} \left[ \frac{D\beta}{2} - (D-h) \sin \frac{\beta}{2} \right] \right\}, \quad (2)$$

где  $G_M$  – массовая производительность экструдера, кг/с;  $\rho$  – плотность ( $kg/m^3$ ) ТпМ как функция температуры  $T$ , °С;  $n_s$  – частота вращения червяка, об/с.

Угол  $\beta$  сектора ОАFC можно определить из зависимости (рис. 3)

$$\beta = 2\arccos \left( \frac{|OB|}{|OA|} \right) = 2\arccos \left( \frac{D-h}{D} \right).$$

При расчёте не полностью заполненных материалом С-образных секций степень их заполнения можно определить как отношение производительности последней секции к производительности полностью заполненной рассматриваемой секции, которую определяют по формуле (2). При этом в действительности вследствие встречного вращения червяков канал на входе в валковый зазор будет заполнен полностью, а незаполненной останется только противоположная часть С-образной секции (на выходе из валкового зазора).

Площадь поперечного сечения объёма ТпМ в неполовностью заполненных секциях можно определить из зависимости (2), если известна массовая производительность, обеспечиваемая дозатором



$$S_s = \frac{G_M}{\rho n_s (s - ke)}. \quad (3)$$

С другой стороны, площадь  $S_s$  равна разнице площадей секторов с радиусами  $R_2$  и  $R_3$  и углом  $(2\pi - \beta_1)$ . Здесь  $\beta_1$  – центральный угол кольцевого пространства, не заполненного ТпМ, рад;  $R_2$  и  $R_3$  – радиусы сердечника каждого из червяков и внутренней поверхности цилиндра, соответственно, м.

Тогда для двух червяков имеем

$$S_s = 2 \left[ \frac{(2\pi - \beta_1) R_3^2}{2} - \frac{(2\pi - \beta_1) R_2^2}{2} \right] = (2\pi - \beta_1) (R_3^2 - R_2^2)$$

или

$$S_s = (2\pi - \beta_1) (D - h) h. \quad (4)$$

Приравнивая между собой зависимости (3) и (4) и решая полученное выражение относительно угла  $\beta_1$ , получим

$$\beta_1 = 2\pi - \frac{G_M}{\rho n_s (s - ke) (D - h) h}.$$

Общий подход к расчёту гидродинамики и температурного поля ТпМ в рабочих каналах двухчервячного экструдера рассмотрен в работе [5].

Теперь определим суммарную мощность диссипации  $\Delta Q_{dis}$  в объёме двух С-образных секций. Учитывая, что при принятых допущениях интенсивность диссипации  $q_{dis}$  (Вт/м<sup>3</sup>) изменяется только по радиусу, по формуле числового интегрирования Симпсона получим

$$\Delta Q_{dis} = \frac{2}{3} (2\pi - \beta_1) \Delta r (s - ke) \left( q_{dis 0} R_2 + q_{dis m} R_3 + 4 \sum_{i=1}^{m-1} q_{dis i} r_i + 2 \sum_{j=2}^{m-2} q_{dis j} r_j \right)$$

или

$$\Delta Q_{dis} = \frac{2}{3} (2\pi - \beta_1) \Delta r (s - ke) \left( q_{dis 0} \left( \frac{D}{2} - h \right) + q_{dis m} \frac{D}{2} + 4 \sum_{i=1}^{m-1} q_{dis i} r_i + 2 \sum_{j=2}^{m-2} q_{dis j} r_j \right), \quad (5)$$

где  $i = 1, 3, \dots, m-1$ ;  $j = 2, 4, \dots, m-2$ ;  $r_i$  и  $r_j$  – радиусы соответствующих элементов  $\Delta r$ , м;  $m$  – количество узлов в формуле Симпсона.

Значение  $q_{dis i}$  и  $q_{dis j}$ , которые входят в зависимость (5), определяют по формуле

$$q_{dos} = \mu(\dot{\gamma})(\dot{\gamma}_r^2 + \dot{\gamma}_z^2),$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость ТпМ, Па·с;  $\dot{\gamma}$ ,  $\dot{\gamma}_r$  и  $\dot{\gamma}_z$  – скорость сдвига и её компоненты в направлении осей  $r$  и  $z$ , соответственно,  $c^{-1}$ .

Кроме этого мощность привода расходуется на деформирование расплава в зазорах  $\delta_{rs-b}$ ,  $\delta_{rs-cs}$  и  $\delta_{rs-rs}$  (рис. 2, а). Поскольку вращение червяков разнонаправленное, то деформации сдвига в боковых зазорах зацепления  $\delta_{rs-rs}$  практически отсутствуют, а потому их учитывать не будем. Затраты мощности в валковом зазоре  $\delta_{rs-cs}$ , как показали выполненные расчёты по методике расчётов валковых машин [24], также существенного влияния на результаты инженерных расчётов не оказывают. Наибольшие затраты мощности имеют место в радиальном зазоре  $\delta_{rs-b}$  между гребнем витка и стенкой цилиндра. Как уже отмечалось, вследствие малой величины этого зазора влияние градиента давления на профиль скорости незначительно и течение в зазоре можно рассматривать как течение между неподвижной и подвижной поверхностями с линейным распределением скорости. Тогда скорость сдвига в этом зазоре составит  $\dot{\gamma} = W_s / \delta_{rs-b}$ , а мощность диссипации определится зависимостью

$$q_{dis rs-b} = \mu(\dot{\gamma}_{rs-b}, T_{rs-b}) \dot{\gamma}_{rs-b}^2 = \mu(\dot{\gamma}_{rs-b}, T_{rs-b}) \left( \frac{W_s}{\delta_{rs-b}} \right)^2,$$

где  $T_{rs-b}$  – средняя температура ТпМ в зазоре между гребнем червяка и цилиндром, которую можно принять равной температуре ТпМ вблизи поверхности цилиндра  $T_b$ , °С,  $W_s$  – окружная скорость гребня каждого из червяков ( $W_s = \pi D n_s$ ), м/с.

Тогда затраты мощности в зазорах двух соседних С-образных секций обоих червяков равняются

$$\Delta Q_{dis rs-b} = 2q_{dis rs-b} (2\pi - \beta_1)(D - h) e \delta_{rs-b}.$$

#### 4. 2. Моделирование процесса переработки полимеров в двухчервячном экструдере с однонаправленным вращением червяков

Вращение червяков двухчервячного экструдера в одном направлении позволяет повысить их частоту вращения, исключая возможное заклинивание червяков. Соответственно увеличивается производительность при качественном перемешивании ТпМ и самоочищении червяков. Во многих случаях червяки изготавливают многозаходными с полукруглым профилем нарезки, который способствует лучшему перемешиванию расплава.

Рассмотрим трёхзаходный червяк (рис. 4). При этом для анализа процесса, как и для двухчервячного экструдера с разнонаправленным вращением червяков, воспользуемся моделью выделенного объёма, ограниченного одним витком каждого из червяков.

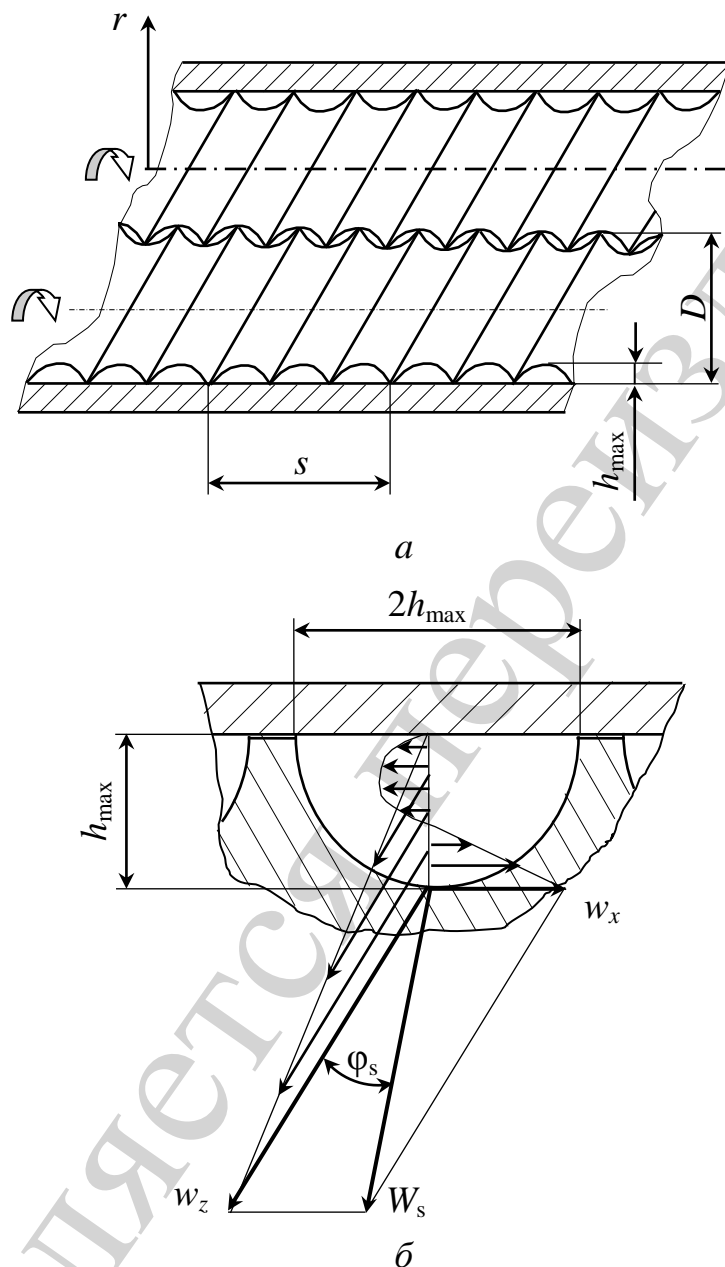


Рис. 4. Расчётная схема экструдера с однонаправленным вращением червяков:  
*a* – характер зацепления червяков с полукруглым профилем нарезки;  
*б* – составляющие скорости в канале червяка ( $D$  – диаметр гребня нарезки червяков, м;  $s$  – шаг нарезки червяков, м;  $h_{\max}$  – максимальная глубина рабочего канала (радиус нарезки каждого из червяков), м;  $r$ ,  $L$  – координаты, направленные по высоте нарезки червяков и вдоль оси каждого из червяков, соответственно, м;  $\varphi_s$  – угол подъёма винтовой нарезки червяков, рад,  $w_x$  и  $w_z$  – составляющие скорости вдоль осей  $x$  и  $z$ , соответственно, м/с;  $W_s$  – окружная скорость каждого из червяков, м/с)

Из рис. 4 видно, что поток ТпМ в месте контакта червяков перераспределяется между соседними каналами их нарезок, а для остальной длины каналов движение ТпМ аналогично его движению в одночервячном экструдере. Поскольку двухчервячные экструдеры работают при условии дозированного питания, то полностью заполненными являются лишь несколько последних витков нарезки червяков, которые и обеспечивают необходимое давление на выходе из экструдера. Объём канала каждого из червяков уменьшается вдоль его оси как за счёт уменьшения глубины, так и за счёт уменьшения шага нарезки. Такое уменьшение обычно происходит ступенчато по длине червяка в местах контакта нескольких конструктивных зон червяка между собой. Поскольку поток ТпМ непрерывно перераспределяется, и расплав в зоне плавления смешивается с твёрдым материалом, будем считать, что как и в экструдере с разнонаправленным вращением червяков чётко выраженной зоны плавления нет. При этом деформация сдвига имеет место во всем объёме ТпМ по всей длине червяков.

В отличие от экструдеров с разнонаправленным вращением червяков, в данном случае объём С-образной секции не является изолированным (рис. 4, а). Однако последние секции нарезки благодаря наличию сопротивления формирующей головки заполнены материалом полностью, а потому скорость его осевого движения  $w_L$  в этих секциях можно определить из уравнения массового расхода

$$G_M = \rho S_s w_L, \quad (6)$$

где  $w_L$  – скорость осевого движения ТпМ, м/с.

Учитывая, что профиль канала полукруглый с радиусом нарезки  $h_{\max}$ , для двух червяков с  $k$ -заходной нарезкой имеем

$$S_s = 2k \frac{\pi h_{\max}^2}{2 \sin \phi_s}, \quad (7)$$

где  $S_s$  – площадь поперечного сечения каналов двух червяков, м.

Подставляя выражение (7) в зависимость (6) и решая его относительно  $w_L$ , получим

$$w_L = \frac{G_M \sin \phi_s}{k \rho \pi h_{\max}^2}, \quad (8)$$

где угол подъёма винтовой нарезки червяков рассчитывается по формуле

$$\phi_s = \arctg \left( \frac{s}{\pi D} \right).$$

Вычисленную по зависимости (8) среднюю скорость материала  $w_L$  для последних секций червяков при расчёте их остальных секций будем уточнять

умножением скорости  $w_L$  на соотношение шага нарезки рассматриваемой секции к шагу нарезки последней секции.

Определим эквивалентную глубину  $h$  канала полукруглой формы, заменив её прямоугольной при условии равенства площадей их поперечных сечений (рис. 4, б)

$$\frac{\pi h_{\max}^2}{2} = (2h_{\max})h,$$

откуда эквивалентная глубина канала составит (м)

$$h = \frac{\pi h_{\max}}{4}.$$

При наличии смесительных кулачков эквивалентную глубину канала на участке их расположения можно определить аналогично.

Эквивалентная нарезка в поперечном сечении образует не полностью заполненное материалом кольцевое пространство, площадь которого в диаметральном сечении для двух червяков приблизительно равна

$$S_s = 2(2\pi - \beta_1)h \frac{D-h}{2}, \quad (9)$$

где  $\beta_1$  – центральный угол поперечного сечения С-образной секции, не заполненного ТпМ, рад.

Подставляя выражение (9) в зависимость для массовой производительности (6) и решая полученное выражение относительно угла  $\beta_1$ , получим

$$\beta_1 = 2\pi - \frac{G_M}{\rho w_L (D-h)h}.$$

Производительность экструдера при условии дозированной подачи равняется производительности дозатора, но она не может превышать максимальной производительности  $G_{M \max}$ , которая определяется частотой вращения червяков  $n_s$  и геометрией полностью заполненных последних секций. Поскольку в случае однонаправленного вращения С-образные секции не полностью изолированы друг от друга, то для определения производительности последних секций воспользуемся теорией одночервячной экструзии. Для плоскопараллельной модели червяка при градиенте давления, близкого к нулевому значению, производительность составит

$$G_{\max} = k \rho \frac{\pi h_{\max}^2 G_M w_z}{2}, \quad (10)$$

где  $w_z = \pi D n_s \cos \phi_s$  – составляющая скорости вдоль развёрнутого на плоскость канала червяка, м/с.

Подставляя это выражение в зависимость (10), получим

$$G_{\max} = \frac{1}{2} \pi^2 k \rho h_{\max}^2 D n_s \cos \phi_s.$$

Для определения интенсивности диссипации  $q_{dis}$  в объёме ТпМ необходимо определить скорость деформации в узловых точках (по аналогии с двухчервячными экструдерами с разнонаправленным вращением червяков). В этом случае, при определении составляющей скорости деформации  $\dot{\gamma}_z$  необходимо учесть, что С-образные секции не заперты и в них отсутствует циркуляция в продольном направлении, как это имеет место при разнонаправленном вращении червяков. Но для незаполненных секций градиент давления в направлении  $z$  близок к нулевому значению, поэтому можно предположить, что скорость по высоте канала изменяется линейно, а скорость деформации соответственно составит

$$\dot{\gamma}_z = \frac{w_z}{h} = \frac{\pi D n_s \cos \phi_s}{h}.$$

Мощность диссипации определим интегрированием интенсивности диссипации  $q_{dis}$  по объёму ТпМ, который находится в рассматриваемой секции

$$\Delta Q_{dis} = 2 \int_0^{2\pi - \beta_1} \int_0^s \int_0^{D/2} q_{dis} dr dL d\theta, \quad (11)$$

где  $r, \theta, z$  – цилиндрические координаты.

Поскольку  $q_{dis}$  зависит только от радиуса, то выражение (11) принимает вид

$$\Delta Q_{dis} = 2(2\pi - \beta_1) s \int_{(D-2h)/2}^{D/2} q_{dis} dr. \quad (12)$$

Интеграл в выражении (12) вычислим по формуле численного интегрирования Симпсона (по аналогии с выражением (5))

$$\Delta Q_{dis} = \frac{2}{3} (2\pi - \beta_1) s \Delta r \left( q_{dis 0} R_2 + q_{dis m} R_3 + 2 \sum_{i=1}^{m-1} q_{dis i} r_i + 4 \sum_{j=2}^{m-2} q_{dis j} r_j \right).$$

Значение  $q_{dis i}$  и  $q_{dis j}$  в узловых точках определяются по методике, аналогичной для двухчервячного экструдера с разнонаправленным вращением червяков.

В отличие от экструдера с разнонаправленным вращением червяков, профиль нарезки имеет форму сегмента, а потому деформирования ТпМ в зазорах  $\delta_{rs-cs}$ ,  $\delta_{rs-rs}$  и  $\delta_{rs-b}$  для расчёта мощности привода существенного значения не имеют (рис. 2,б). Погрешность отсутствия учёта деформации в указанных зазорах можно уменьшить, интегрируя интенсивность диссипации по всему заполненному перерабатываемым материалом объёму С-образной секции (т.е. при условии  $\beta_1 = 0$ ).

## **5. Результаты численного моделирования процесса переработки полимеров в двухчервячных экструдерах**

### **5. 1. Результаты моделирования двухчервячного экструдера с разнонаправленным вращением червяков**

Проанализируем выполненные результаты расчёта процесса переработки ТпМ на двухчервячном экструдере с разнонаправленным вращением червяков диаметром 125 мм и рабочей длиной  $30D$  для производительности 500 кг/ч и частоты вращения червяков 50 об/мин. Расчёты выполняли для двух вариантов: при заданной температуре поверхностей червяков и цилиндра, а также при отсутствии теплообмена с поверхностями червяков и цилиндра (адиабатический режим). Показатель степени  $n$  степенного реологического уравнения в расчётах принимали равным 0.3 и 1.0.

Зависимость температуры от безразмерной высоты канала  $y/h$  для трёх поперечных сечений на первом, пятнадцатом и тридцатом витках червяков при значениях показателя степени  $n = 1$  и  $n = 0.3$  для адиабатического режима приведен на рис. 5. Из рис. 5 видно, что более интенсивное нагревание ТпМ имеет место вблизи поверхности каждого из червяков, а температурная неоднородность ТпМ может достигать 30...50 °С. В то же время с увеличением отклонения от ньютоновского поведения температурный уровень переработки снижается, что связано с уменьшением интенсивности циркуляции расплава.

Изменение температуры по безразмерной высоте канала  $y/h$  при граничных условиях первого рода (заданы температуры рабочих поверхностей червяков и цилиндра) для указанных сечений червяков приведено на рис. 6. Из рис. 6 видно, что на первых витках для поддержания заданной температуры необходимо нагревание ТпМ, а затем поверхности червяков и цилиндра необходимо охладить.

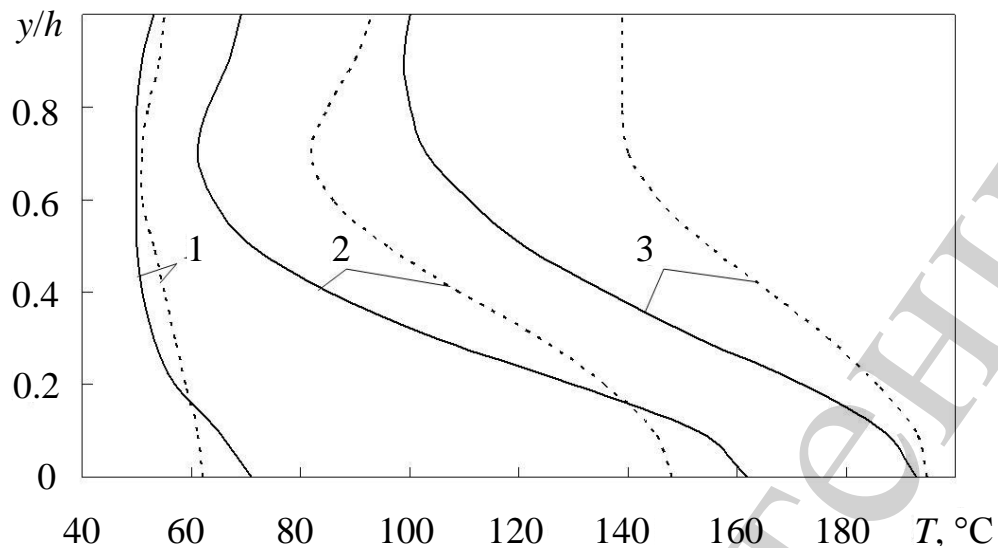


Рис. 5. Изменение температуры по высоте канала червяков для адиабатического режима при значениях  $n=0.3$  (сплошные линии) и  $n=1$  (штриховые линии) по длине червяков: 1 – в начале; 2 – в середине; 3 – в конце червяков;  $y$  – координата, направленная по высоте рабочего зазора ( $y = \overline{0, h}$ )

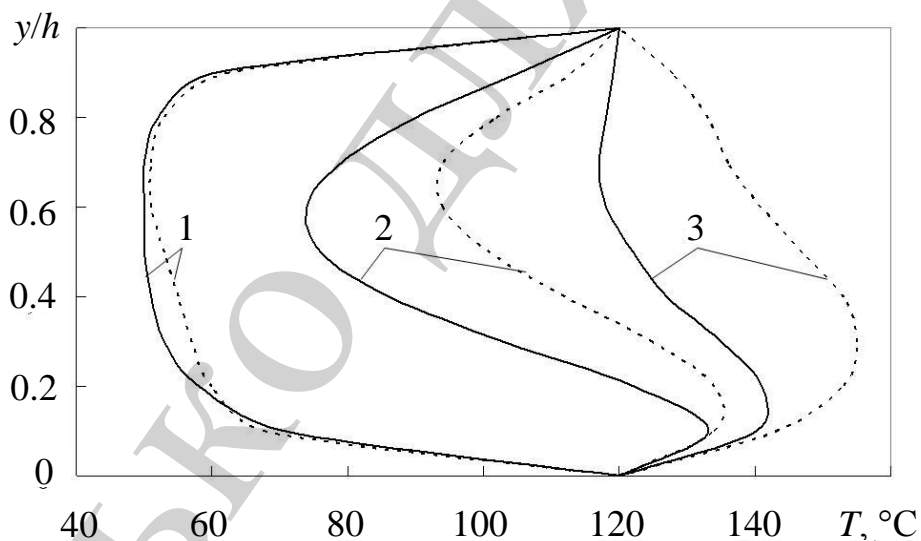


Рис. 6. Изменение температуры по высоте канала червяков для заданных температур червяка и цилиндра при значениях  $n=0.3$  (сплошные линии) и  $n=1$  (штриховые линии) по длине червяков: 1 – в начале; 2 – в середине; 3 – в конце червяков

Необходимость поддержания такого теплового режима следует из рис. 7, 8, на которых приведены кривые изменения теплового потока по длине экструдера  $q_b$ , который необходимо подвести или отвести от поверхностей цилиндра и каждого из червяков. По этим кривым можно определить и подобрать необхо-



димый температурный режим переработки. При этом некоторые скачки тепловых потоков на 5-м, 13-м и 19-м витках вызваны особенностью геометрии червяков.

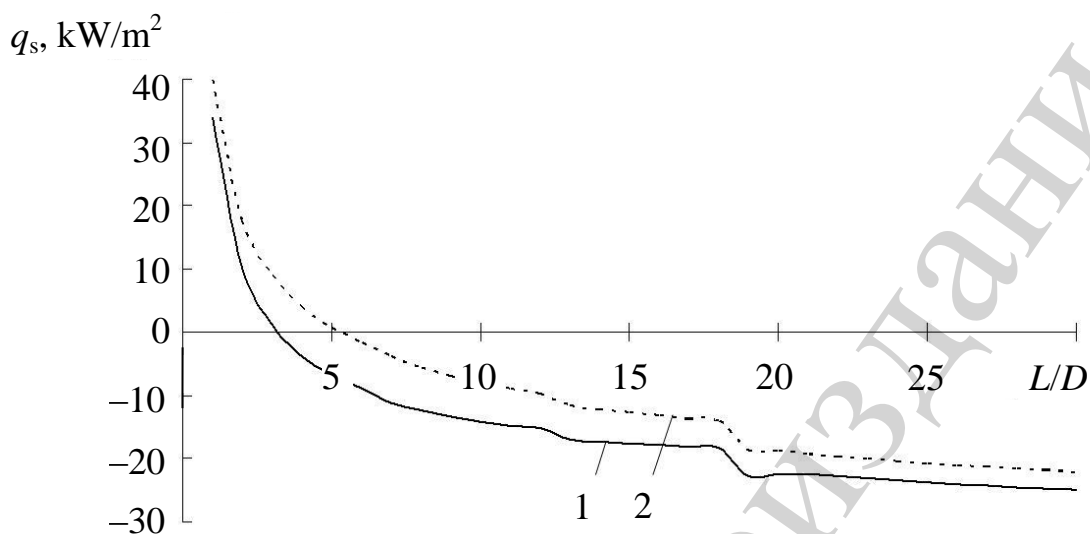


Рис. 7. Тепловой поток, который необходимо подвести к червяку (или отвести от червяка) по его длине при значениях  $n=0.3$  (1) и  $n=1$  (2)

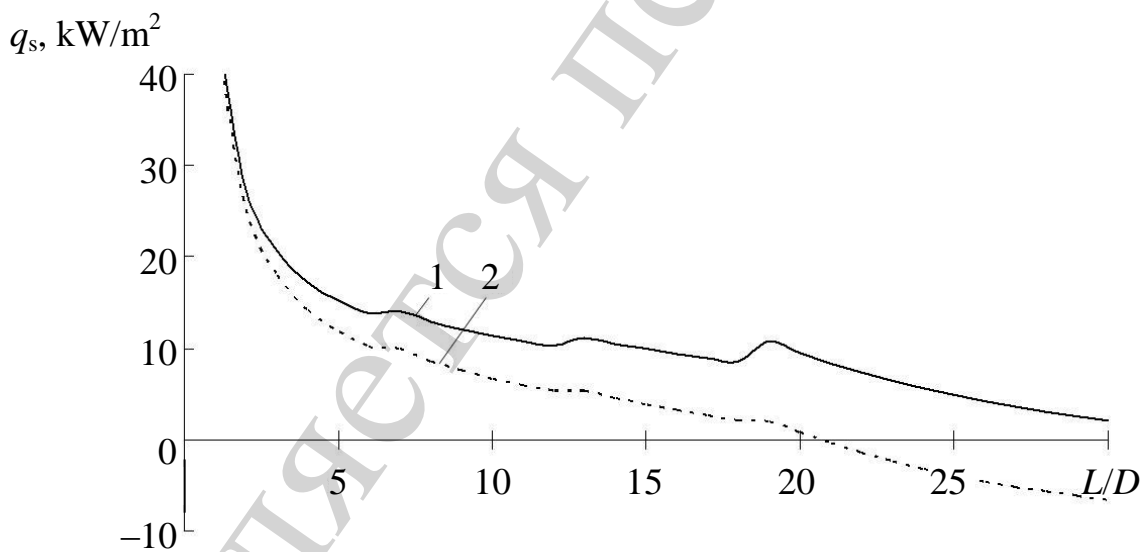


Рис. 8. Тепловой поток, который необходимо подвести к цилиндру (или отвести от цилиндра) по его длине при значениях  $n=0.3$  (1) и  $n=1$  (2)

На рис. 9 показано изменение температуры  $T_{пМ}$  по безразмерной высоте канала  $y/h$  для трёх поперечных сечений в начале, в середине и в конце червяков. Анализ выполнен для производительности 200 кг/ч, адиабатического режима переработки и двух значений эквивалентной теплопроводности [5]: обычной и удвоенной, т. е. для различных режимов перемешивания.

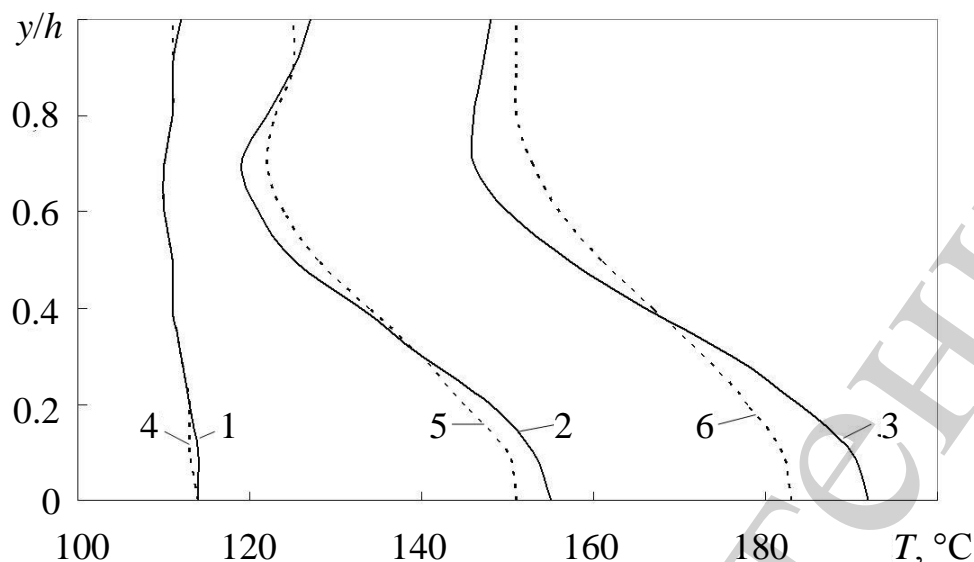
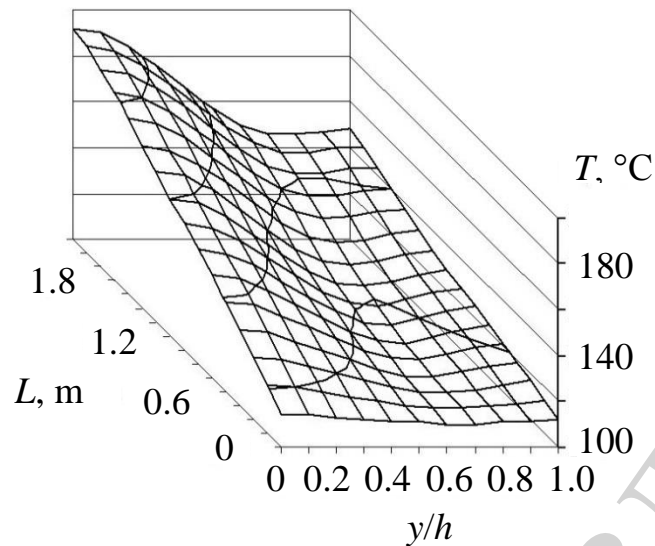
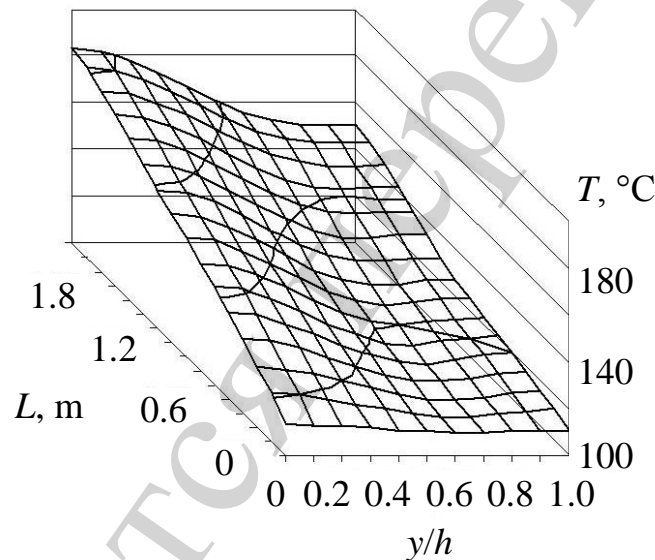


Рис. 9. Зависимость температуры расплава по высоте канала червяка в начале (1, 4), в середине (2, 5) и в конце (3, 6) червяка для различных значений эквивалентной теплопроводности – обычной (1–3) и удвоенной (4–6)

Из рис. 9 видно, что значения температуры в определённых местах по длине экструдера для различных значений эквивалентной теплопроводности достаточно близки друг к другу. Таким образом, температурные поля определяются преимущественно интенсивностью диссипации в определённых точках объёма ТпМ. Это подтверждает и сходство температурных полей, полученных в результате расчётов для адиабатического режима (рис. 10).



*a*



*б*

Рис. 10. Температурное поле для адиабатического режима процесса экструзии: *a* – при обычной эквивалентной теплопроводности расплава; *б* – при удвоенной эквивалентной теплопроводности расплава

Следует заметить, что на первых витках для поддержания заданного температурного режима червяка и цилиндра необходим подвод к ним значительного количества теплоты, что не всегда возможно, поскольку площадь поверхности теплообмена рабочих органов ограничена. Поэтому сначала целесообразно выполнять расчёт для случая граничных условий второго рода (известны тепловые потоки на рабочих поверхностях червяков и цилиндра), по результатам которого выбирать значения температур на поверхностях рабочих органов.

Для уменьшения температурной неоднородности расплава ТпМ в рабочем канале экструдера целесообразно использовать смесительные элементы [16].

## **5. 2. Результаты моделирования двухчервячного экструдера с однонаправленным вращением червяков**

Проверка разработанной модели осуществлялась во время выбора и отработки режимов переработки ТпМ на основе полиэтилена высокого давления с наполнителем (гидроксид алюминия) и добавками. Этот материал используется в качестве самозатухающей электрической изоляции для кабельной продукции. Результаты численного моделирования сравнивали с экспериментальными данными, полученными при гранулировании указанной композиции в ОАО «Киевхимволокно» (г. Киев, Украина) на двухчервячном экструдере с диаметром червяков 83 мм и рабочей длиной 30D. Наборные червяки комплектовались трёхходовными секциями с шагом нарезки 120, 90 и 60 мм с полукруглым профилем нарезки радиусом 12, 8 и 6 мм соответственно, а также смесительными кулачками треугольной формы. Эксперименты проводили при производительности 50 кг/ч и частоте вращения червяков 40 и 25 об/мин. Температуру стенки цилиндра поддерживали жидкостной системой термостабилизации с четырьмя автономными зонами по его длине. В ходе экспериментов непрерывно фиксировали значения температуры стенки цилиндра  $T_b$ , температуры ТпМ на выходе из экструдера, производительность и частоту вращения червяков.

Температуру стенки цилиндра экструдера определяли с помощью термоэлектрических преобразователей ТХК-259 и ТХК-539 (НСХ L, диапазон измерения 0...400 °С). Также в измерительный комплект входили автоматические потенциометры типа А-565-001-01 (класс точности 0.15/0.05, диапазон измерения от минус 50 до 800 °С, степень дискретизации цифрового отсчёта 0.1 °С).

Температуру расплава на выходе из экструдера определяли с помощью термоэлектрических преобразователей игольчатого типа К1 (аналог ТП174, НСХ L, диапазон измерения от минус 40 до 200 °С). Также в измерительный комплект входили автоматические потенциометры типа А100-Н-1 (класс точности 0.5, диапазон измерения 0...200 °С, степень дискретизации цифрового отсчёта 0.1 °С).

В качестве примера на рис. 11 приведены рассчитанные профили температуры по безразмерной высоте канала  $y/h$  на 7, 14, 21 и 28-м витках для производительности 50 кг/ч и частоты вращения червяков 40 об/мин. Температура стенки цилиндра в зонах поддерживалась системой термостабилизации и составляла 160, 160, 180 и 180 °С, а при расчётах считалась заданной.

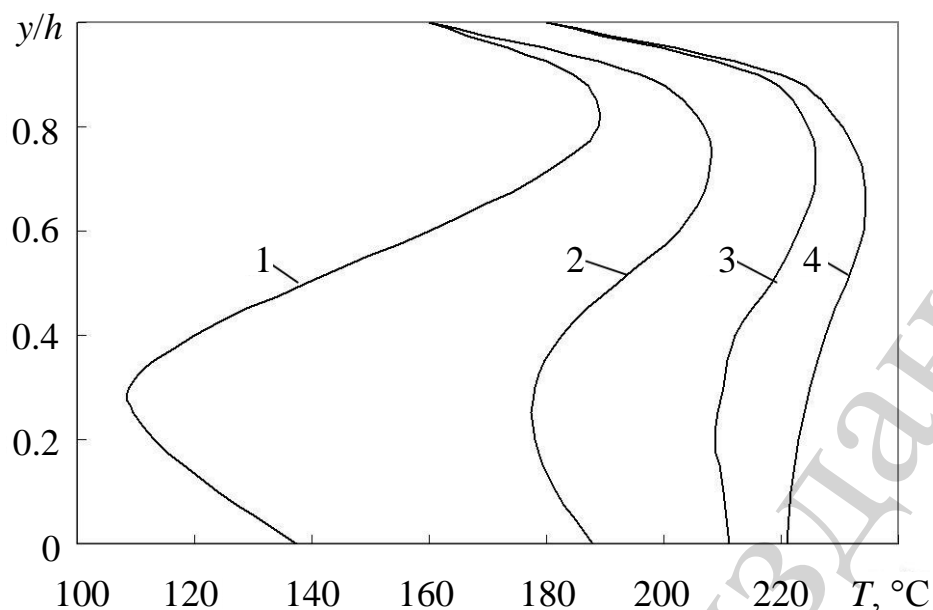


Рис. 11. Профили температуры  $T_{пМ}$  по высоте нарезки червяков для  $n_s=40$  об/мин (1–4 – на длине червяков, соответствующей номерам витков нарезки № 7, 14, 21 и 28)

Из рис. 11 видно, что температура вблизи поверхности цилиндра резко падает до заданного значения, что можно объяснить большим значением теплового потока, отводимого системой термостабилизации. Температура материала на выходе экструдера составляла  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что близко к расчётному значению. В то же время сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными показало, что реальная температура (приблизительно  $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) близка к средней температуре  $T_{пМ}$  и превышала заданное значение. Это свидетельствует о том, что система термостабилизации при данном режиме переработки не может эффективно отводить выделяющуюся теплоту диссипации.

На рис. 12 приведены аналогичные зависимости, полученные для той же производительности, но при сниженной до 25 об/мин частоте вращения и заданной температуре стенки цилиндра в зонах соответственно  $140, 140, 140$  и  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а на рис. 13 – температурное поле  $T_{пМ}$  для граничных условий первого рода при температуре стенки цилиндра по зонам  $140, 140, 160$  и  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

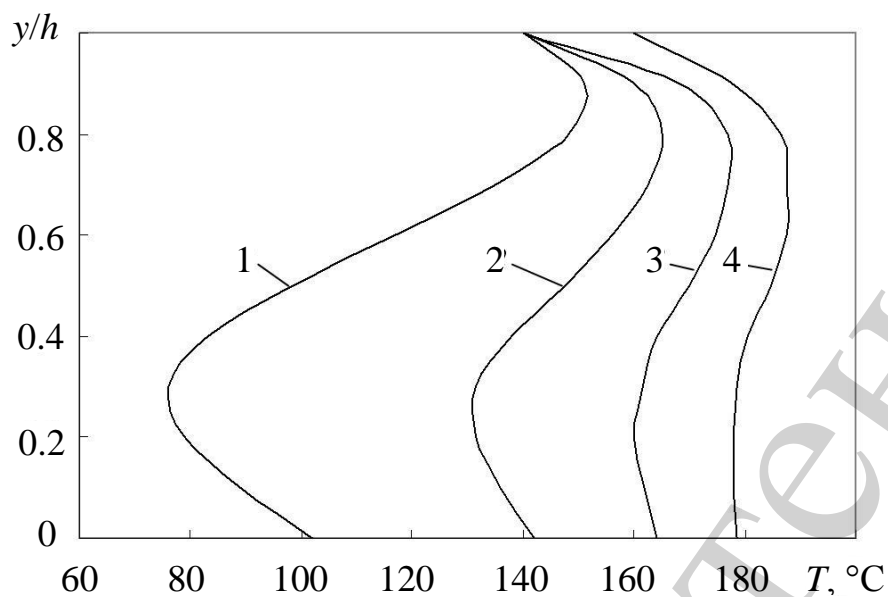


Рис. 12. Профили температуры по высоте канала для  $n_s=25$  об/мин (1–4 – на длине червяков, соответствующей номерам витков нарезки № 7, 14, 21 и 28)

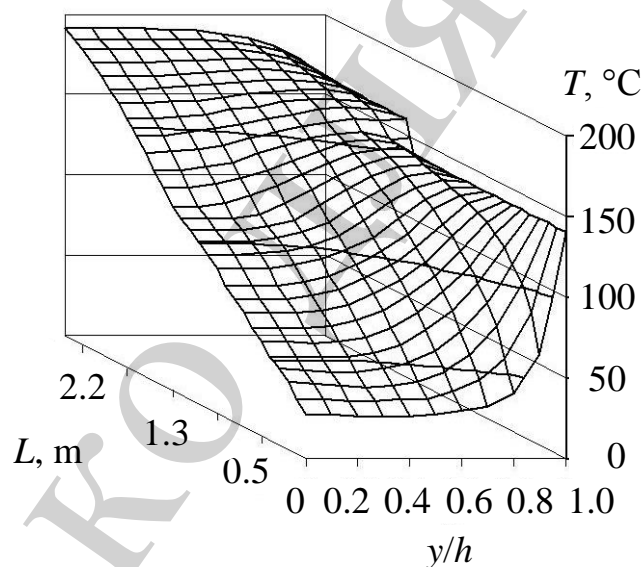


Рис. 13. Температурное поле ТпМ в двухчервячном экструдере с однонаправленным вращением червяков при граничных условиях первого рода

Сравнение теоретических и экспериментальных значений температуры стенки цилиндра показало, что в первых трёх зонах система охлаждения отводит теплоту, необходимую для поддержания заданной температуры стенки. При этом значительная амплитуда регулирования свидетельствует, что температура ТпМ в целом выше заданной температуры стенки. В четвёртой зоне, в которой температура стенки составляла  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ , амплитуда колебаний регулирования меньше, поскольку температура стенки ближе к температуре ТпМ.

Рассчитанное значение температуры материала 180 °С близко к экспериментальному значению температуры стенки в этой зоне.

## **6. Обсуждение результатов численного моделирования процесса плавления в одночервячном экструдере**

Анализ результатов численного моделирования показал, что они удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Расхождение рассчитанного и измеренного значений температуры на выходе двухчервячного экструдера с однонаправленным вращением червяков  $\text{Ø}83 \times 30D$  не превышает 10 %, что является приемлемым для проведения инженерных расчётов. При этом измеренные значения температуры несколько превышало заданное значение. Это можно объяснить тем, что системы термостабилизации цилиндра и червяков для исследованных режимов переработки не могли эффективно отвести выделяющуюся теплоту диссипации.

Хорошее согласование результатов численного моделирования с экспериментальными данными можно объяснить учётом частичного заполнения начального участка рабочего канала перерабатываемым материалом, а также корректностью принятых граничных условий (скоростных и температурных).

Пренебрежение частичным заполнением начального участка рабочего канала полимером привело бы к увеличению расчётных значений мощности диссипации и температуры перерабатываемого материала.

Также были учтены реальные скорости на поверхностях рабочих органов экструдера: нулевая скорость на поверхности неподвижного цилиндра и соответствующие скорости на поверхностях вращающихся червяков. С учётом условий теплообмена на внешней поверхности цилиндра и внутренних поверхностях червяков это позволило уточнить температуру полимера как у поверхностей цилиндра и червяков, так и в объёме рабочего канала в целом.

Показано, что для перерабатываемых материалов с явно выраженными ньютоновскими свойствами в рабочем канале двухчервячного экструдера необходимо использовать смесительные элементы. Также показано, что температурные поля в объёме перерабатываемого материала определяются в первую очередь интенсивностью диссипации энергии в определённых местах перерабатываемого материала.

Недостатками проведенных исследований можно считать то, что экспериментальная проверка адекватности разработанных моделей была проведена лишь для одного типоразмера экструдера. Отсутствие полных экспериментальных данных для других экструдеров не позволило выполнить более подробный анализ эффективности разработанной методики расчёта.

Кроме того, полученные зависимости справедливы для анализа процесса двухчервячной экструзии только «степенной» жидкости. Тем не менее, предлагаемый подход позволяет получить аналогичные зависимости для расплавов полимеров, поведение которых под нагрузкой описывается другими реологическими уравнениями.

Разработанная методика успешно апробирована при проектировании промышленных экструдеров, разработанных ПАО «НПП "Большевик"» (г. Киев, Украина) (JSSPC "Bolshevik").

Дальнейшие исследования планируется выполнить для анализа процесса измельчения отходов полимеров и эластомеров в червячных машинах [27], а также процессов переработки полимерных материалов в дисковых, комбинированных и каскадных экструдерах с рабочими органами различного конструктивного исполнения.

## **7. Выводы**

1. На основе обобщённой математической модели червячной экструзии разработаны модели переработки полимеров в двухчервячных экструдерах с разно- и однонаправленным вращением червяков. Предложенные модели базируются на анализе выделенного С-образного объёма, который ограничен одним витком нарезки каждого из червяков и в котором находится определённый объём перерабатываемого полимера. Такая модель позволяет описать процесс переработки как в случае полного, так и частичного заполнения рабочего канала перерабатываемым материалом. Это особенно важно в случае дозированного питания экструдера полимером, что характерно для современного перерабатывающего оборудования.

Также в предложенных моделях учтены реальные граничные условия на рабочих поверхностях вращающихся червяков и неподвижного цилиндра, что позволяет обоснованно выбирать параметры систем термостабилизации рабочих органов экструдера.

2. Теоретически исследован процесс плавления полимерных гранул в рабочем канале червяка экструдера. Результаты исследования показали, что с увеличением отклонения поведения перерабатываемого материала от ньютоновского поведения в рабочем канале червяков необходимо использовать смесительные элементы. Установлено, что температурные поля в объёме перерабатываемого материала определяются в первую очередь интенсивностью диссипации энергии в определённых точках объёма перерабатываемого полимера.

Обосновано, что в отличие от одночервячной экструзии, во время переработки полимера на двухчервячных экструдерах сначала необходим интенсивный внешний подвод энергии к червякам и цилиндру с их последующим постепенным охлаждением.

3. Адекватность разработанной модели проверена сравнением результатов численного моделирования с экспериментальными данными при переработке композиции на основе полиэтилена высокого давления, наполненного гидроксидом алюминия, в двухчервячном экструдере  $\text{Ø}83 \times 30$  с однонаправленным вращением червяков. Исследования были проведены для массовой производительности 50 кг/ч и частоты вращения червяков 25 и 40 об/мин.

Предложенная модель двухчервячной экструзии при проведении проектного расчёта для заданной производительности и необходимой конечной температуры расплава полимера позволяет определять основные параметры оборудования и процесса, а также оценивать температурную неоднородность расплава. К указан-



ным параметрам относятся геометрия рабочих органов, частота вращения червяков и минимально необходимая мощность привода. При проведении же проверочного расчёта экструдера для заданной геометрии червяков можно определить частоту вращения червяков и тепловые режимы рабочих органов экструдера.

### **Благодарности**

Авторы благодарят доктора технических наук, профессора Леонида Борисовича Радченко, стоявшего у истоков математического моделирования изготавливаемых в Украине червячных, дисковых, червячно-дисковых и каскадных экструдеров, за разработку идей, которые легли в основу проведенных исследований.

### **Литература**

1. Schenkel G. Schneckenpressen für kunststoffe. München: Carl Hanser Verlag, 1959. 467 p.
2. Tadmor Z., Gogos C. G. Principles of polymer processing. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. 961 p.
3. Rauwendaal C. Polymer extrusion. 5th ed. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. 950 p. doi: <https://doi.org/10.3139/9781569905395>
4. Mikulionok I. O. Classification of Processes and Equipment for Manufacture of Continuous Products from Thermoplastic Materials // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. Vol. 51, Issue 1-2. P. 14–19. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-015-9990-6>
5. Mikulionok I. O., Radchenko L. B. Screw extrusion of thermoplastics: I. General model of the screw extrusion // Russian Journal of Applied Chemistry. 2012. Vol. 85, Issue 3. P. 489–504. doi: <https://doi.org/10.1134/s1070427211030305>
6. Mikulionok I. O., Radchenko L. B. Screw extrusion of thermoplastics: II. Simulation of feeding zone of the single screw extruder // Russian Journal of Applied Chemistry. 2012. Vol. 85, Issue 3. P. 505–514. doi: <https://doi.org/10.1134/s1070427211030317>
7. Mikulionok I., Gavva O., Kryvoplias-Volodina L. Modeling of melting process in a single screw extruder for polymer processing // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 2, Issue 5 (92). P. 4–11. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127583>
8. Todd D. B. Improving incorporation of fillers in plastics. A special report // Advances in Polymer Technology. 2000. Vol. 19, Issue 1. P. 54–64. doi: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1098-2329\(20000117\)19:1<54::aid-adv6>3.0.co;2-#](https://doi.org/10.1002/(sici)1098-2329(20000117)19:1<54::aid-adv6>3.0.co;2-#)
9. Potente H., Kretschmer K. In 60 Sekunden optimiert // Kunststoffe. 2001. Issue 9. P. 76, 78, 80–81.
10. Mikulyonok I. O. Equipment for preparing and continuous molding of thermoplastic composites // Chemical and Petroleum Engineering. 2013. Vol. 48, Issue 11-12. P. 658–661. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-013-9676-x>
11. Rauwendaal C. The geometry of self-cleaning twin-screw extruders // Advances in Polymer Technology. 1996. Vol. 15, Issue 2. P. 127–133. doi: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1098-2329\(199622\)15:2<127::aid-adv2>3.0.co;2-x](https://doi.org/10.1002/(sici)1098-2329(199622)15:2<127::aid-adv2>3.0.co;2-x)

12. Shearer G., Tzoganakis C. Distributive mixing profiles for co-rotating twin-screw extruders // *Advances in Polymer Technology*. 2001. Vol. 20, Issue 3. P. 169–190. doi: <https://doi.org/10.1002/adv.1014>
13. Avalosse T., Rubin Y. Analysis of Mixing in Corotating Twin Screw Extruders through Numerical Simulation // *International Polymer Processing*. 2000. Vol. 15, Issue 2. P. 117–123. doi: <https://doi.org/10.3139/217.1586>
14. Bravo V. L., Hrymak A. N., Wright J. D. Numerical simulation of pressure and velocity profiles in kneading elements of a co-rotating twin screw extruder // *Polymer Engineering & Science*. 2000. Vol. 40, Issue 2. P. 525–541. doi: <https://doi.org/10.1002/pen.11184>
15. Non-Newtonian Fluid Mixing in a Twin-Screw Mixer Geometry: Three-Dimensional Mesh Development, Effect of Fluid Model and Operating Conditions / Rathod M. L., Ashokan B. K., Fanning L. M., Kokini J. L. // *Journal of Food Process Engineering*. 2014. Vol. 38, Issue 3. P. 207–224. doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12154>
16. Mikulionok I. O. Screw extruder mixing and dispersing units // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2013. Vol. 49, Issue 1-2. P. 103–109. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-013-9711-y>
17. Eitzlmayr A., Khinast J. Co-rotating twin-screw extruders: Detailed analysis of conveying elements based on smoothed particle hydrodynamics. Part 1: Hydrodynamics // *Chemical Engineering Science*. 2015. Vol. 134. P. 861–879. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.04.055>
18. Numerical simulation of 2D unsteady shear-thinning non-Newtonian incompressible fluid in screw extruder with fictitious domain method / He Q., Huang J., Shi X., Wang X.-P., Bi C. // *Computers & Mathematics with Applications*. 2017. Vol. 73, Issue 1. P. 109–121. doi: <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2016.11.005>
19. Experimental characterization and modeling of twin-screw extruder elements for pharmaceutical hot melt extrusion / Eitzlmayr A., Khinast J., Hörl G., Koscher G., Reynolds G., Huang Z. et. al. // *AIChE Journal*. 2013. Vol. 59, Issue 11. P. 4440–4450. doi: <https://doi.org/10.1002/aic.14184>
20. Eitzlmayr A., Matic J., Khinast J. Analysis of flow and mixing in screw elements of corotating twin-screw extruders via SPH // *AIChE Journal*. 2017. Vol. 63, Issue 6. P. 2451–2463. doi: <https://doi.org/10.1002/aic.15607>
21. Héту J.-F., Ilinca F. Immersed boundary finite elements for 3D flow simulations in twin-screw extruders // *Computers & Fluids*. 2013. Vol. 87. P. 2–11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2012.06.025>
22. Numerical simulation and experimental validation of mixing performance of kneading discs in a twin screw extruder / Zhang X.-M., Feng L.-F., Chen W.-X., Hu G.-H. // *Polymer Engineering & Science*. 2009. Vol. 49, Issue 9. P. 1772–1783. doi: <https://doi.org/10.1002/pen.21404>
23. A composite model for an intermeshing counter-rotating twin-screw extruder and its experimental verification / Lewandowski A., Wilczyński K. J., Nastaj A., Wilczyński K. // *Polymer Engineering & Science*. 2015. Vol. 55, Issue 12. P. 2838–2848. doi: <https://doi.org/10.1002/pen.24175>

24. Mikulionok I. O. Technique of parametric and heat computations of rollers for processing of plastics and rubber compounds // Russian Journal of Applied Chemistry. 2011. Vol. 84, Issue 9. P. 1642–1654. doi: <https://doi.org/10.1134/s1070427211090333>

25. Wilczyński K., Lewandowski A. Study on the Polymer Melt Flow in a Closely Intermeshing Counter-Rotating Twin Screw Extruder // International Polymer Processing. 2014. Vol. 29, Issue 5. P. 649–659. doi: <https://doi.org/10.3139/217.2962>

26. Басов Н. И., Казанков Ю. В., Любартович В. А. Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов. М.: Химия, 1986. 488 с.

27. Mikulionok I. O. Pretreatment of recycled polymer raw material // Russian Journal of Applied Chemistry. 2011. Vol. 84, Issue 6. P. 1105–1113. doi: <https://doi.org/10.1134/s1070427211060371>

Не является переизданием