

УДК 621.77.043

Иваницкий Г.К., Шурчкова Ю.А., Радченко Н.Л.

Институт технической теплофизики НАН Украины

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ В ПРЕДМАТРИЧНОЙ ЗОНЕ И В МАТРИЦЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Створено математичну модель, що описує екструзійні процеси в передматричній та в матричній зонах шнекового екструдера. В моделі розглянуто стаціонарний рух в'язкопластичного рідинного продукту як в кільцевому конічному каналі передматричної зони, так і в циліндричному каналі матриці. Отримані рівняння дозволяють розрахувати зміну тиску, температури, в'язкості та швидкості потоку, а також величини зсувних напружень по довжині каналу.

Разработана модель, которая описывает экструзионные процессы в предматричной зоне и в матрице шнекового экструдера. В модели рассматривается стационарное течение вязкопластичного жидкого продукта как в кольцевом коническом канале предматричной зоны, так и в цилиндрическом канале матрицы. Полученные уравнения позволяют рассчитать изменение давления, температуры, вязкости и скорости потока, а также величины сдвиговых напряжений по длине канала.

A mathematical model of extrusion has been developed, which describes pre-matrix and matrix zones of a screw extruder. Steady flow of a viscoplastic liquid product both through a conical ring channel of the pre-matrix zone and a cylindrical channel of the matrix is considered in this study. The model allows prediction of variation of pressure, temperature, viscosity and velocity of a liquid product along the channel, as well shear stress values.

C_p – теплоемкость экструдата;
 G – массовый расход;
 p – давление в канале;
 R – радиус;
 S_z – площадь сечения канала;

T – температура;
 v – скорость;
 ρ – плотность расплава экструдата;
 ω – угловая скорость вращения шнека;
 ПМЗ – предматричная зона.

Введение

Экструзионные технологии широко распространены в различных отраслях промышленности, что объясняется широким спектром производимой продукции, а также возможностью совмещения в одном аппарате операций дробления термообработки и гомогенизации продукта. В последние годы экструзия успешно используется в пищевой и консервной промышленности для переработки растительного сырья. Трудность выбора рациональной конструкции экструдера и оптимальных режимов обработки в конкретных технологиях объясняется сложностью взаимосвязанных гидромеханических, тепломассообменных, реологических и биохимических процессов, определяющих эффективность экструзионной обработки. Специфика протекания этих процессов изучена недостаточно, что препятствует созданию достоверных моделей работы аппаратов

такого типа. Сегодня промышленные образцы экструдеров продолжают разрабатываться преимущественно на основе эмпирических подходов.

Принцип работы экструдера заключается в следующем: растительное сырье подается на вход аппарата и с помощью шнека транспортируется вдоль рабочей камеры. Интенсивное сжатие и действие сдвиговых напряжений в межвитковом пространстве шнека приводит к термомеханической деструкции материала, и продукт из дисперсно-сыпучего состояния переходит в текучую вязкопластическую гелеобразную массу. Под действием вращения шнека вязкая смесь перемещается сквозь узкие кольцевые каналы предматричной зоны и под высоким давлением выталкивается с большой скоростью через цилиндрический канал матрицы. На входе в предматричную зону давление смеси возрастает до 5...10 МПа, а температура – до

140...180°C. Из-за резкого падения давления на выходе из матрицы происходит взрывное вскипание перегретой влаги в смеси, что способствует разрушению структуры клеток. Именно в предматричной зоне и в матрице протекают сложные физико-механические и реологические процессы, которые в конечном итоге определяют структурно-механические и качественные показатели продукта.

В существующих моделях экструдера, как правило, рассматриваются процессы, протекающие в наиболее простых для расчета зонах аппарата, в которых отсутствуют фазовые преобразования биомассы, а происходит только сжатие, дробление и макроперемешивание твердой фазы. Для каждой из этих зон предлагаются свои эмпирические уравнения. Моделированию процессов в предматричной зоне и в матрице посвящено весьма ограниченное число работ [1, 2], что объясняется сложностью физико-химических, реологических и структурных преобразований, которые претерпевает продукт на этих стадиях обработки. Трудность моделирования предматричной зоны объясняется еще и сложностью ее геометрии. Неньютоновская жидкость с меняющимися реологическими свойствами перемещается вдоль узкого кольцевого конусного канала, одна из стенок которого вращается с высокой скоростью. При моделировании процессов в этой зоне зачастую используется большое число упрощающих допущений, таких как изотермичность процесса, ньютоновский характер течения, пренебрежение вращением конусной насадки шнека и т.п. [1], что не отражает реальную картину явлений и исключает возможность создания надежной методики расчета экструдера.

В данном исследовании рассматриваются принципы построения математической модели гидродинамических и теплообменных процессов, протекающих в предматричной зоне (ПМЗ) и в матрице экструдера с учетом основных определяющих факторов.

Основные положения модели

Модель описывает стационарное течение несжимаемой неньютоновской жидкости в

ПМЗ и в матрице экструдера, которые схематически представлены на рис. 1.

Температура и давление жидкой смеси (расплава) на входе в ПМЗ являются входными параметрами модели. Теплофизические свойства исследуемого продукта считаются известными, так же как теплофизические характеристики материала корпуса экструдера и окружающего воздуха.

Изменение температуры жидкости за время пребывания в рассматриваемых зонах связано с нагревом за счет вязкой диссипации и отводом теплоты в окружающую среду.

В предматричной зоне жидкость течет в кольцевом канале вдоль вращающегося конусного наконечника шнека. Основание конуса определяет начало перехода в кольцевой канал ПМЗ, а вершина конуса – переход в канал матрицы. Ось симметрии OO_1 проходит через центр основания конуса и его вершину. Параметры конусной части шнека – радиус основания R_0 , высота H , длина образующей L , угол φ , угловая скорость вращения шнека ω а также ширина кольцевого канала h – считаются

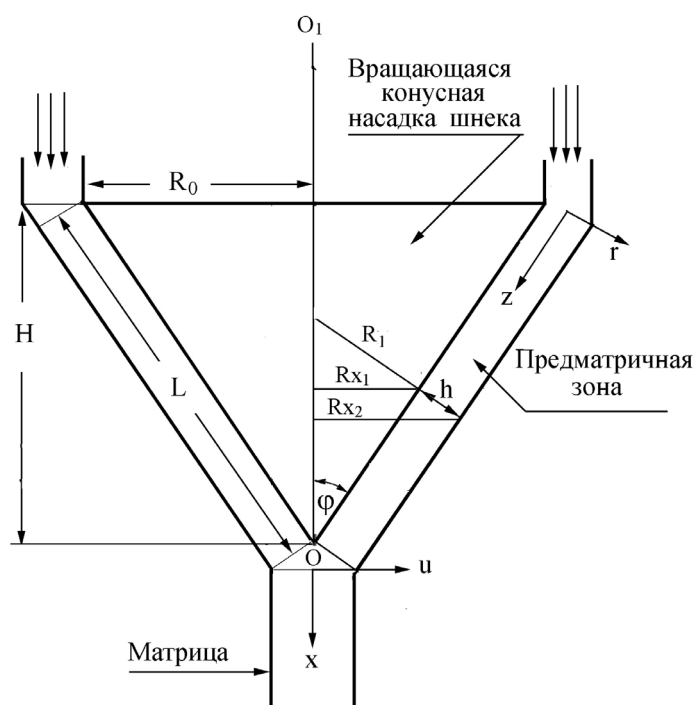


Рис. 1. Схема канала предматричной и матричной зон экструдера.

заданными величинами, также как длина L_f и радиус R_f цилиндрического канала матрицы. Из кольцевого канала ПМЗ жидкость плавно переходит в канал матрицы. Условие плавности перехода без потери напора выполняется благодаря фактическому равенству площади сечения кольцевого канала на выходе из ПМЗ и площади поперечного сечения канала матрицы. Течение в канале матрицы описываем в цилиндрических координатах (x, u, θ) . Ось x совпадает с осью симметрии OO_1 , а радиальная координата u перпендикулярна стенке канала матрицы. Течение в конусном кольцевом канале ПМЗ рассматривается в специальной конической ортогональной системе координат (z, r, θ) . Ось z совпадает с направлением образующей конуса L и с направлением потока. Радиальная координата r в любой точке внутри кольцевого канала перпендикулярна стенке канала и определяется расстоянием от данной точки до оси OO_1 в направлении r . Похожая система координат впервые использовалась в работах [3, 4].

Коническая система координат связана с исходной цилиндрической системой простыми соотношениями. Осевые координаты z и x связаны зависимостью $x = z \cdot \cos\varphi$, а радиальные координаты u и r – зависимостью $u = r \cdot \cos\varphi$. Зависимости внутреннего $R_1(z)$ и внешнего $R_2(z)$ радиуса кольцевого канала от расстояния z определяются соотношениями $R_1(z) = (L - z) \cdot \operatorname{tg}\varphi$ и $R_2(z) = R_1(z) + h$. Площадь сечения конусного канала $S(z)$ определяется как поверхность, образованная огибающей усеченного конуса (отрезок h) при его вращении вокруг оси OO_1 . Используя обозначения отрезков на рис. 1, на основании формул геометрии напишем:

$$S_z = \pi h \cdot (Rx_1 + Rx_2) = \pi h \cdot \cos\varphi \cdot (R_1 + R_2) = \pi h \cdot [2 \sin\varphi \cdot (L - z) + h \cos\varphi].$$

Базовая система уравнений модели включает уравнение неразрывности (1), уравнение движения (2), уравнение энергии (3) и реологическое уравнение (4).

$$\bar{v}_z(z) = \frac{G}{\rho S_z(z)}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} + \mu \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \mu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \rho g_\omega; \quad (2)$$

$$\rho c_p v_z \frac{dT}{dz} = \lambda \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \bar{\mu} \Phi; \quad (3)$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \exp[\beta \cdot (T - T_0)] \cdot (\Phi)^{\frac{n-1}{2}}, \quad (4)$$

где μ_0 , β , n – эмпирические реологические параметры расплава, учитывающие зависимость вязкости от температуры и сдвиговых напряжений. Переменные v_z , v_r и v_θ – составляющие вектора локальной скорости жидкости в канале в конической системе координат, а $T = T(z, r)$ значение локальной температуры жидкости. Давление жидкости $p(z)$ в любом сечении канала одинаково по сечению и не зависит от радиальной координаты r .

В уравнениях (3) и (4) параметр Φ – диссипативная функция, которая является квадратичным тензором скоростей деформации, и в цилиндрической (и в конической) системе координат может быть представлена в виде [5]

$$\Phi = \left[2 \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2 + \left(r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial r} \right) \right)^2 \right] \quad (5)$$

Градиент давления на любом участке каналов ПМЗ и матрицы определяется суммой отдельных составляющих, входящих в правую часть уравнения (2).

Первая составляющая – обратимое падение давления, связанное с непрерывным уменьшением площади сечения кольцевого канала. Вторая – необратимая потеря напора вследствие действия нормальных напряжений при сужении канала. Третья составляющая – необратимая потеря напора из-за действия сдвиговых напряжений в направлении r , создаваемых трением потока о стенки канала. Четвертая – изменение давления из-за действия центробежной силы в направлении z , связанной с вращением конусной насадки и появлением с тангенциальной скорости $v_\theta = \omega(r) \cdot r$.

Решение уравнения (2) при соответствующих граничных условиях дает возможность определить в произвольном сечении обоих каналов значение скорости потока $v = f(z, r)$ и

величину градиента давления. Уравнение (2) можно представить в обобщенной форме как сумму градиентов давления, обусловленных указанными факторами.

$$\frac{dp}{dz} = \left(\frac{dp}{dz}\right)_v + \left(\frac{dp}{dz}\right)_{zz} + \left(\frac{dp}{dz}\right)_{zr} + \left(\frac{dp}{dz}\right)_\omega. \quad (6)$$

1. Градиент давления, обусловленный изменением сечения кольцевого канала, определяем через усредненную по сечению скорость потока \bar{v}_z . С учетом уравнения неразрывности (1)

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_v = \rho \bar{v}_z \frac{d\bar{v}_z}{dz} = \frac{2G^2 \sin \varphi}{\rho \pi^2 h^2 [2(L-z) \cdot \sin \varphi + h \cos \varphi]^3}. \quad (7)$$

2. Аналогично определяется градиент давления, связанный с действием нормальных напряжений при изменении площади поперечного сечения канала:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{zz} = -\mu \frac{d^2 \bar{v}_z}{dz^2} = -\frac{4\bar{\mu}G \sin^2 \varphi}{\rho \pi h [2(L-z) \cdot \sin \varphi + h \cos \varphi]^3}. \quad (8)$$

3. Скорость потока в локальной точке кольцевого канала $v_z(z, r)$ с учетом трения потока о стенку при граничных условиях $v_z(R_1) = 0$ и $v_z(R_2) = 0$, усредненная по сечению скорость течения $\bar{v}_z(z)$ и изменение давления вызванного действием сдвиговых напряжений $\mu \cdot \partial^2 v_z / \partial r^2$ определяются, соответственно, уравнениями

$$v_z(z, r) = -\frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz} \left[R_2^2 - r^2 + \frac{R_2^2 - R_1^2}{\ln(R_2/R_1)} \ln\left(\frac{r}{R_2}\right) \right]; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \bar{v}_z &= -\frac{1}{8\mu} \frac{dp}{dz} \left(\frac{R_2^4 - R_1^4}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{R_2^2 - R_1^2}{\ln(R_2/R_1)} \right) = \\ &= \frac{1}{8\mu} \frac{dp}{dz} \left(R_2^2 + R_1^2 - \frac{R_2^2 - R_1^2}{\ln(R_2/R_1)} \right); \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{dp}{dz}\right)_{zr} &= -8\bar{\mu}G / \left(\rho \pi \cos \varphi \cdot [(L-z) \cdot \operatorname{tg} \varphi + h]^4 - \right. \\ &\left. - (L-z)^4 \cdot \operatorname{tg}^4 \varphi - \frac{[2(L-z) \cdot h \cdot \operatorname{tg} \varphi + h^2]^2}{\ln[1+h/(L-z) \cdot \operatorname{tg} \varphi]} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

4. Тангенциальную составляющую скоро-

сти находим с использованием граничных условий $v_\theta = \omega_0 R x_1$ при $u = R x_1$ и $v_\theta = 0$ при $u = R x_2$. В конической системе координат тангенциальная скорость и составляющая центробежного давления в направлении z определяются уравнениями

$$v_\theta = \frac{\omega(R_1 - r \sin^2 \varphi)^2}{(R_2 - R_1)(R_2 + R_1 - 2r \sin^2 \varphi)} \times \left(\frac{(R_2 - r \sin^2 \varphi)^2}{r \cos^3 \varphi} - r \cos \varphi \right), \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{dp}{dz}\right)_\omega &= -\frac{2\rho\omega^2 \cdot y^3 (y+h) \cdot \operatorname{tg} \varphi}{(h(2y+h) \cdot \cos \varphi)^2} \left\{ \frac{1}{2y+h} \times, \right. \\ &\times \left[\left(r \cos^2 \varphi \right)^2 - \frac{(y+h)^4}{(r \cos^2 \varphi)^2} - 4(y+h)^2 \ln\left(\frac{r \cos^2 \varphi}{y}\right) \right] - \\ &\left. - y \cdot \left(\frac{y+h}{r \cos^2 \varphi} \right)^2 - 2y \cdot \ln\left(\frac{r \cos^2 \varphi}{y}\right) + (y+h) \right\}. \end{aligned} \quad (13)$$

где $y = (L-z) \operatorname{tg} \varphi - r \sin^2 \varphi$.

Результирующее изменение давления в произвольном сечении конического канала в соответствии с уравнениями (2) и (6) определяется как сумма всех четырех составляющих.

Изменение давления в канале матрицы обусловлено только третьей составляющей, связанной с трением потока о стенку. Уравнение движения для канала матрицы решается в цилиндрических координатах с граничными условиями $v_x = 0$ при $u = R_f$ и $dv_x/du = 0$ при $u = 0$. Тогда

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_f = \left(\frac{dp}{dx}\right)_{xu} = -\frac{8\mu G}{\pi \rho R_f^4}. \quad (14)$$

В базовые уравнения модели (1)-(3) входит локальная вязкость $\mu = f(z, r)$, которая зависит от температуры потока $\bar{T}_z = f(z)$ и от локальных значений скорости сдвига, входящих в правую часть (5). В уравнения (8) и (11), определяющие составляющие градиента давления, входит усредненная по сечению вязкость $\bar{\mu}(z)$, которая рассчитывается следующим образом.

Определяем скорости сдвига $\partial v_z / \partial z$, $\partial v_z / \partial r$ и $\partial v_\theta / \partial r$ как функцию r . Подставляя полученные выражения в (5), находим диссипативную функцию $\Phi(z, r)$, и затем по формуле (4) рассчитываем локальные значения вязкости $\mu(z, r)$. Проводя численное интегрирование по r , определяем усредненное по сечению значение вязкости $\bar{\mu}(z)$, которое используется при вычислении градиента давления. Это же значение $\bar{\mu}(z)$ используется также и в представленных ниже уравнениях для расчета градиента температуры по длине канала. В соответствии с положениями реодинамики, усредненная по сечению канала вязкость рассматривается как эффективная вязкость неньютоновской жидкости.

По этой же процедуре рассчитывается усредненная вязкость и в цилиндрическом канале матрицы, где присутствует только одна скорость сдвига $-\partial v_x / \partial u$.

При оценке локального динамического и термического действия сдвиговых напряжений на микроструктуру смеси и на интенсивность протекающих в продукте биохимических процессов используются рассчитанные по уравнениям (4) и (5) локальные значения вязкости $\mu(z, r)$.

Изменение температуры смеси в каналах ПМЗ и матрицы обусловлено, в первую очередь, вязкой диссипацией механической энергии при совокупном влиянии сдвиговых напряжений, которые в уравнении энергии (3) представлены диссипативной функцией Φ . Изменение температуры потока связано также с передачей тепла через стенку канала в окружающую среду. Этот фактор учитывается первым членом в правой части (3), который определяет кондуктивный перенос тепла в элементе слоя в радиальном направлении за счет разности температур между жидкостью и стенкой канала. Второй член в правой части (3), учитывает кондуктивный перенос тепла в жидкости вдоль канала. При рассмотрении течения в каналах эту составляющую обычно исключают из уравнения энергии как пренебрежимо малую, когда $Re \leq 1$ [6]. Левая часть уравнения (3) определяет конвективный перенос теплоты вдоль канала

с массовым потоком.

Интенсивный нагрев жидкости в каналах ПМЗ и матрицы за счет диссипации механической энергии является характерной особенностью экструзии [1, 6]. Сочетание таких факторов как высокая скорость течения в узком канале, высокая вязкость продукта и высокая скорость вращения одной из стенок канала определяет чрезвычайно высокие значения сдвиговых напряжений. Моделирование процессов теплообмена при работе экструдера невозможно выполнить без детального учета и количественной оценки вязкостной диссипации.

Суммарный вклад сдвиговых напряжений в нагревание жидкости описывается диссипативной функцией Φ , которая входит в уравнение энергии (3). В правой части уравнения (5) содержатся все составляющие скоростей сдвига, что позволяет оценить вклад каждой из этих диссипативных факторов в нагревание жидкости на элементарном участке канала. Первый член определяет вклад сил нормального напряжения на участке dz в направлении оси z ; Второй член определяет нагрев единицы объема жидкости за счет вязкой диссипации из-за трения потока жидкости о стенку канала; Третий – определяет нагрев единицы объема жидкости за счет вязкой диссипации, связанной с вращения стенки канала. Каждый из этих членов соответствует рассмотренным выше трем составляющим уравнения движения, ответственным за необратимую потерю напора.

В уравнение энергии (3) подставляются составляющие диссипативной функции Φ , которые определены для расчета локальных значений вязкости. Каждая из этих составляющих рассматривается как объемный источник тепла, который оказывает локальное термическое воздействие на жидкий продукт внутри канала.

Для оценки изменения температуры по длине кольцевого и цилиндрического канала используется уравнение энергии в интегральной форме, для чего все члены, входящие в уравнение (3), усредняются по сечению. Для кольцевого канала уравнение энергии пред-

ставлено в виде.

$$Gc_p \frac{d\bar{T}_z}{dz} = \frac{dQ_r}{dz} + 4\pi\mu \cos\varphi \int_{R_1}^{R_2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)^2 r dr + 2\pi\mu \cos\alpha \int_{R_1}^{R_2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r}\right)^2 r dr + 2\pi\mu \cos\varphi \int_{R_1}^{R_2} \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r}\right)^2\right] r dr, \quad (15)$$

где $d\bar{T}_z$ – усредненная температура в сечении z . Параметр dQ_r/dz в правой части (15) определяет изменение теплового потока за счет передачи тепла в окружающую среду. Разделив обе части уравнения на Gc_p , получим выражения для определения изменения температуры на участке dz за счет всех факторов, входящих в правую часть (15).

$$\left(\frac{d\bar{T}_z}{dz}\right)_{sum} = \left(\frac{d\bar{T}_z}{dz}\right)_r + \left(\frac{d\bar{T}_z}{dz}\right)_{zz} + \left(\frac{d\bar{T}_z}{dz}\right)_{zr} + \left(\frac{d\bar{T}_z}{dz}\right)_{\theta r}. \quad (16)$$

Процедура расчета составляющих градиентов температуры в уравнении (16) следующая. Для каждого диссипативного члена в правой части (15) находим соответствующую скорость сдвига, рассчитываем подинтегральную функцию и проводим интегрирование по r .

Изменение температуры в кольцевом слое вследствие действия нормальных напряжений при изменении площади проходного сечения канала определяется уравнением:

$$\left(\frac{d\bar{T}_z}{dz}\right)_{zz} = \frac{8\mu G \sin^2\varphi}{\rho^2 \pi \cos^3\varphi \cdot c_p (R_2^2 - R_1^2)^3}. \quad (17)$$

Изменение температуры, связанное с трением потока о стенку канала:

$$\left(\frac{d\bar{T}_z}{dz}\right)_{zr} = \frac{8G\mu \cos\varphi}{\rho^2 \pi c_p \left[(R_2^4 - R_1^4) \cdot \ln(R_2/R_1) - (R_2^2 - R_1^2)^2 \right]}. \quad (18)$$

Изменение температуры жидкости вследствие вязкой диссипации, связанной с вращением конусной насадки шнека:

$$\left(\frac{d\bar{T}_z}{dz}\right)_{\theta r} = \frac{2\pi \cos\varphi \cdot \mu}{Gc_p S_z} \int_{R_1}^{R_2} \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r}\right) \right]^2 r dr. \quad (19)$$

Изменение температуры жидкости $(d\bar{T}_z/dz)_r = (dQ_r/dz)/c_p G$, связанное с отводом тепла в ок-

ружающую среду через стенку кольцевого канала определяется следующим образом.

Передача тепла от жидкости с температурой \bar{T}_z к стенке канала с радиусом $R_z(z)$ и температурой $T_{s2}(z)$ осуществляется за счет конвекции при коэффициенте теплоотдачи α_c . Через корпус ПМЗ теплота передается кондуктивным путем при разности температур $T_{s2} - T_{s3}$ и заданном значении коэффициента теплопроводности материала корпуса $\lambda_m(T_{s2})$. Параметр $T_{s3}(z)$ – температура поверхности корпуса, радиус которого равен $R_3(z)$. Толщина корпуса $R_3 - R_2$ определяется геометрией ПМЗ. От поверхности корпуса в воздух с температурой \bar{T}_a теплота передается при разности температур $T_{s2} - \bar{T}_a$ путем естественной конвекцией и радиационного излучения с эффективным коэффициентом теплоотдачи α_{eff} , который является суммой конвективного α_{sa} и радиационного α_{rad} коэффициентов теплоотдачи. Коэффициенты теплоотдачи α_c , α_{sa} и α_{rad} рассчитываем по соответствующим формулам теории теплообмена.

Величина теплового потока Q_r определяется общим температурным потенциалом $(\bar{T}_z - \bar{T}_a)$ и суммой трех последовательно стоящих сопротивлений. На участке dz тепловой поток равен

$$Q_r = \frac{(\bar{T}_z - \bar{T}_a)}{\frac{1}{2\pi R_{2ls} \cdot \alpha_c} + \frac{\ln(R_3/R_2 \cos\varphi)}{2\pi \lambda_s \cdot \cos\varphi} + \frac{1}{2\pi R_3 \cdot \alpha_a \cdot \cos\varphi}} \cdot dz. \quad (20)$$

Разделив обе части (20) на $c_p G dz$, определим понижение температура потока $(d\bar{T}_z/dz)_r$ на участке dz , обусловленное отводом тепла в окружающую среду.

Рассчитывая по формуле (20) величину теплового потока Q_r и величины термических сопротивлений в знаменателе правой части (20), можно определить температурный потенциал для каждого из этих сопротивлений и таким образом оценить значения температур T_{s2} и T_{s3} .

По такой же процедуре в цилиндрической системе координат рассчитывается изменение температуры в канале матрицы, где действует лишь одна составляющая диссипативной функ-

ции, обусловленная трением потока о стенку канала.

Заключение

Представленная математическая модель описывает закономерности протекания теплообменных и гидродинамических процессов в предматричной зоне и в матрице экструдера при течении неньютоновской жидкости с заданными реологическими свойствами. Модель учитывает основные факторы, определяющих специфику протекания экструзионных процессов в этих зонах. При заданных теплофизических и реологических характеристиках обрабатываемой жидкости определяющими параметрами процесса являются температура и давление на входе в канал ПМЗ и скорость вращения шнека. Применительно к конкретному типу экструдера модель позволяет рассчитать величину расхода и обосновать оптимальные режимы работы аппарата для получения гомогенизированного продукта с требуемыми качественными и структурными показателями. В рамках модели оценивается степень термического и динамического локального воздействия на продукт за время его пребывания в данных зонах экструдера. Применение модели для анализа результатов экспериментального исследования работы экструдера открывает возможность получения новой информации относительно механизма структурных

и реологических преобразований в продукте, а также возможность направленного влияния на эти процессы. Данная модель может быть использована для анализа работы различных экструзионных аппаратов при обработке широкого спектра продуктов, теплофизические и реологические свойства которых известны

ЛИТЕРАТУРА

1. *Остриков А.Н., Абрамов О.В., Рудометкин А.С.* Экструзия в пищевых технологиях. – Санкт-Петербург: Гиорд, 2004. – 280 с.
2. *Бегулов М.Ш.* Основы переработки семян сои. – Москва: ДеЛи принт, 2006. – 173 с.
3. *Вачагин К.Д., Зиннатулин Н.Х., Тябин Н.В.* Пленочное течение неньютоновской жидкости по вращающимся поверхностям. – М.: Инженерно-физический журнал, 1965. – Т. 9. – № 2. – С. 190.
4. *Рябчук Г.В., Тябин Н.В.* Определение расхода мощности на разбрызгивание вязкожесткопластической среды с помощью вращающейся конической насадки // Труды конференции по физико-химической механике дисперсных материалов. – Минск. 1970. – С. 54-63.
5. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Наука. 1979. – 736 с.
6. *Берд Р., Стюарт В., Лайтфут Е.* Явления переноса. М.: Химия, 1974. – 688 с.

Получено 10.10.2011 г.