

УДК 664.143/.149.014/.019

ОСОБЕННОСТИ СТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ СПЛОШНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ СРЕД В СКВОЗНЫХ КАНАЛАХ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ПРИСТЕННОГО СКОЛЬЖЕНИЯ

Корячкин В.П.

Орловский государственный технический университет

Разработана концепция деформационного поведения сплошных пластических сред, заключающаяся в том, что на сдвиговое течение пластических сред в сквозных каналах влияет соотношение упругих и пластических свойств, которое изменяется в зависимости от скорости сдвига. Анализ кривых течения широкого спектра сплошных пластических сред позволил предложить характерные и принципиально различные реологические уравнения состояния, которые позволяют оценить соотношение упругости и пластичности пластических объектов исследования. Получена формула расчета производительности для круглых сквозных каналов при течении в них пластических сред с учетом их пластических и упругих параметров и эффекта пристенного скольжения.

Современными технологиями поточного производства продукции в различных отраслях промышленности перерабатывают широкий спектр сплошных пластических сред, обладающих нелинейными вязкостными свойствами.

К пластическим средам относятся такие, у которых упругие деформации пренебрежимо малы [1]. Однако, именно упругие деформации оказывают существенное влияние на характер деформационного поведения тиксотропных пластических дисперсных сред, что обуславливает особенность их сдвигового течения в сквозных каналах измерительных приборов и технологического оборудования.

Особенностью сплошных пластических сред является то, что их течение в сквозных каналах характеризуется соотношением упругости и пластичности, количественная величина которого изменяется в зависимости от скорости сдвига.

Кроме этого, при течении в трубах межоперационного транспорта, в сквозных каналах формирующих прессов и других рабочих зонах технологического оборудования пластические дисперсные среды проявляют эффект пристенного скольжения, или П – эффект, который необходимо учитывать в инженерных расчетах, поскольку он влияет на производительность.

Графики кривых течения пластических сред, получаемые в широком диапазоне скоростей сдвига, как правило, не только нелинейные, но и

имеют кривизну разного направления. При этом выпуклость участка графика кривой течения может быть обращена к оси касательного напряжения или к оси скорости сдвига.

Участки нелинейных графиков кривых течения пластических сред в логарифмических координатах $\lg \theta = \lg \theta (\lg \gamma)$, обращенные к разным осям координат разделяются точкой смены направления кривизны, так называемыми точками перегиба.

На рисунке 1 представлены схемы характерных графиков кривых течения пластических сред в безразмерных координатах с точками перегиба А и В, в которых происходит смена направления кривизны графиков $\lg \theta = \lg \theta (\lg \gamma)$.

Из рисунка 1 видно, что с увеличением скорости сдвига γ направление выпуклости графика кривой течения (1) в точке А(20, 8) изменяется с направления к оси $\lg \theta$ на направление к оси $\lg \gamma$. А направление выпуклости графика кривой течения (2) изменяется в точке В(20, 3) в обратной последовательности, то есть с направления к оси $\lg \gamma$ на направление к оси $\lg \theta$.

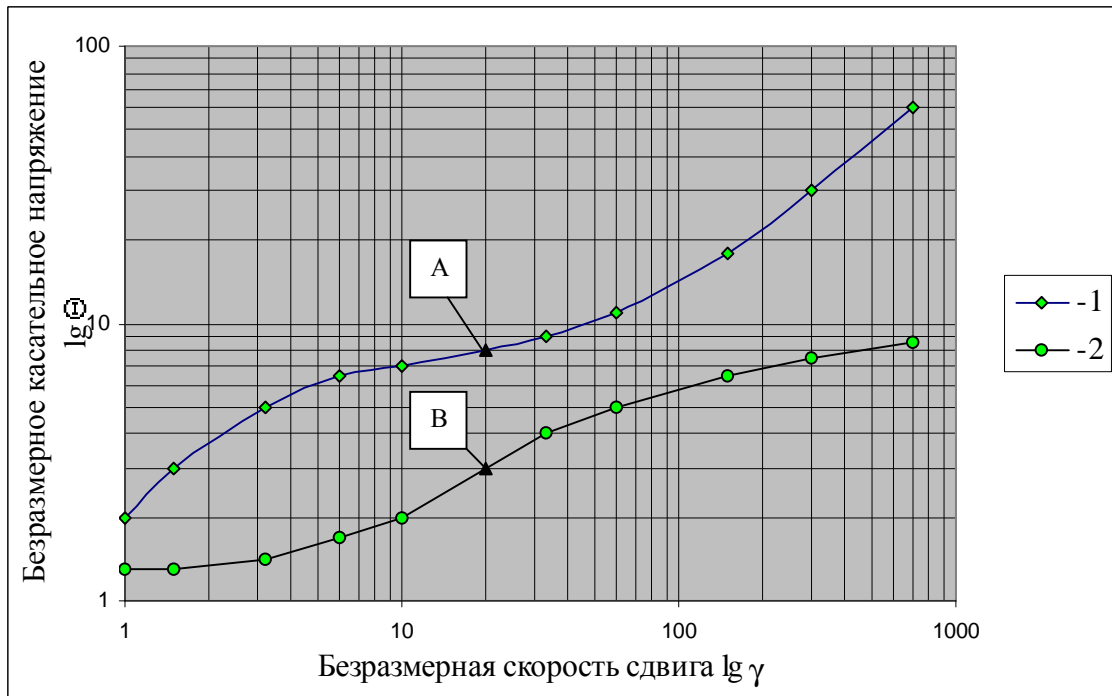


Рисунок 1. Схемы графиков кривых течения в логарифмических координатах

Для обозначения направления кривизны участков графиков кривых течения $lg \theta = lg \theta(lg \gamma)$ введем знаки «+» и «-». При этом если кривая течения обращена выпуклостью к оси $lg \gamma$, ей присваивают знак «+», а если кривая течения обращена выпуклостью к оси $lg \theta$ - знак «-». Эти же знаки следует учитывать при написании реологических уравнений состояния пластичных материалов, проставляя их перед основной реологической характеристикой пластичных материалов – предельным напряжением сдвига q_0 , поскольку на кривизну зависимостей касательного напряжения от скорости сдвига в логарифмических координатах влияет θ_0 .

Если в реологические уравнения состояния входят символы предельного напряжения сдвига θ_0 со знаками $\pm \theta_0$ и $m\theta_0$, то это означает следующее. Данные реологические уравнения состояния соответственно описывают кривые течения пластичных сред с точкой перегиба, в которой изменяется направление выпуклости графика $lg \theta = lg \theta(lg \gamma)$ от оси $lg \gamma$ к оси $lg \theta$ и от оси $lg \theta$ к оси $lg \gamma$.

Для кривых течения с точками перегиба обозначение смены направления кривизны графиков (1) и (2) с целью упрощения написания уравне-

ний можно выполнить индексами α и β при символе предельного напряжения сдвига θ_0 :

$$\theta = \frac{\theta_{0\alpha}^2}{\theta} + K \gamma^n \quad \text{или} \quad \theta = \frac{(m\theta_0)^2}{\theta} + K \gamma^n; \quad (1)$$

$$\theta = \frac{\theta_{0\beta}^2}{\theta} + K \gamma^n \quad \text{или} \quad \theta = \frac{(\pm \theta_0)^2}{\theta} + K \gamma^n; \quad (2)$$

где $(\theta_{0\alpha}) \equiv (m\theta_0)$ и $(\theta_{0\beta}) \equiv (\pm \theta_0)$.

На рисунках 2, 3 и 4 представлены экспериментальные кривые течения полиэтилена [2], ацетат целлюлозы [3], консистентных смазок [4] и некоторых кондитерских сред [5, 6, 7], которые по характеру кривизны графиков относятся к первой и второй группам и могут быть описаны соответствующими реологическими уравнениями состояния (1) или (2).

Кривые течения 1, 2а; 1,2 б и 2в, изображенные на рисунке 2, а также кривая течения 1 – на рисунке 3 относятся к первой группе и описываются реологическим уравнением состояния (1). Эти графики кривых течения показывают, что с ростом скорости сдвига происходит смена упруго-вязкого течения на пластично – вязкое.

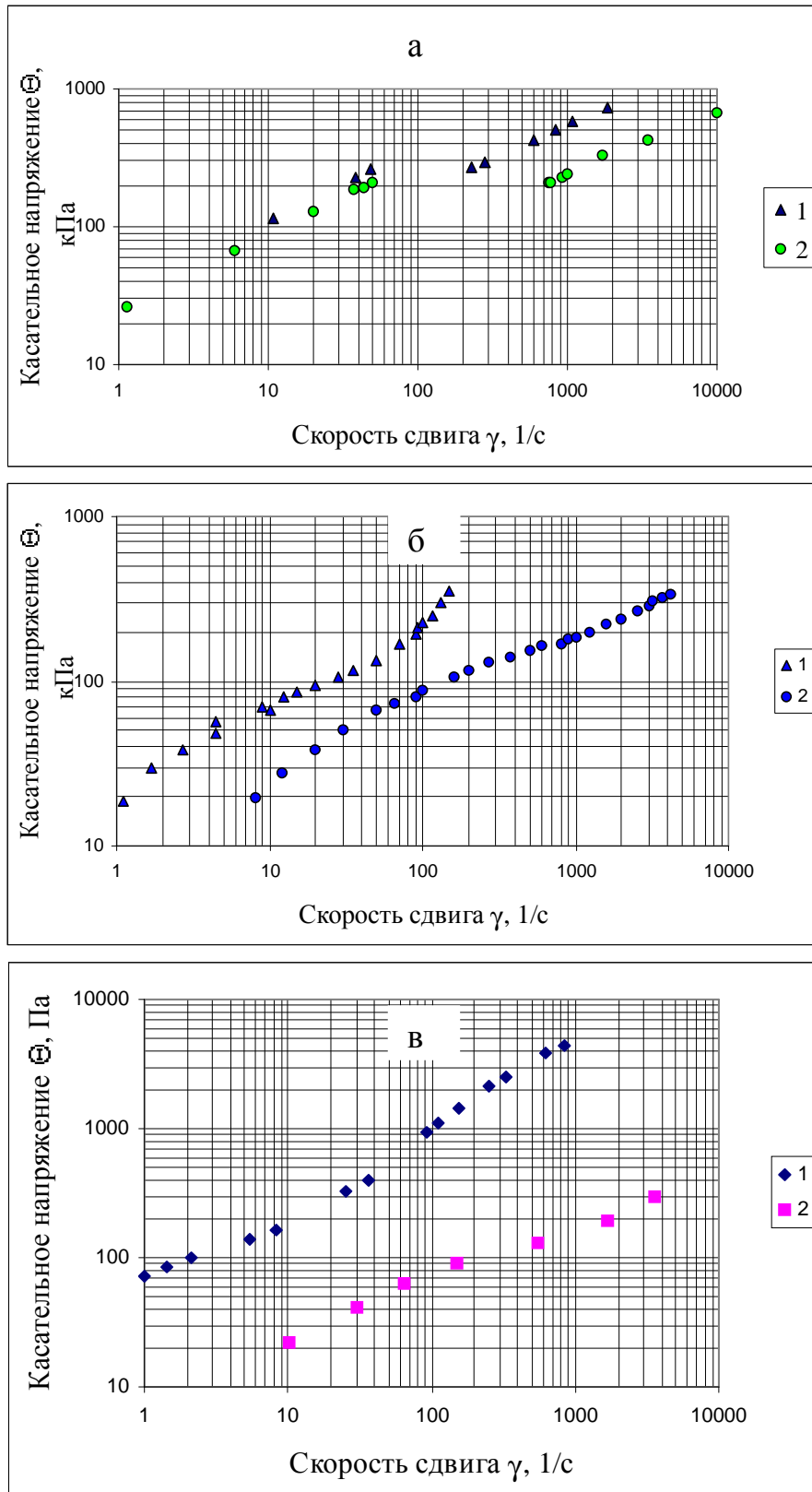


Рисунок 2. Кривые течения: а - линейного полиэтилена при отношении длины капилляра к диаметру: 1 – 3,65 и 2 – 16 (температура 152 °С) [2]; б - ацетат целлюлозы при температуре: 1 - 190 °С и 2 - 210 °С [3]; в – 1 - смазки ГОИ – 54п при температуре 15°С и 2 - солидола жирового при температуре 20°С [4].

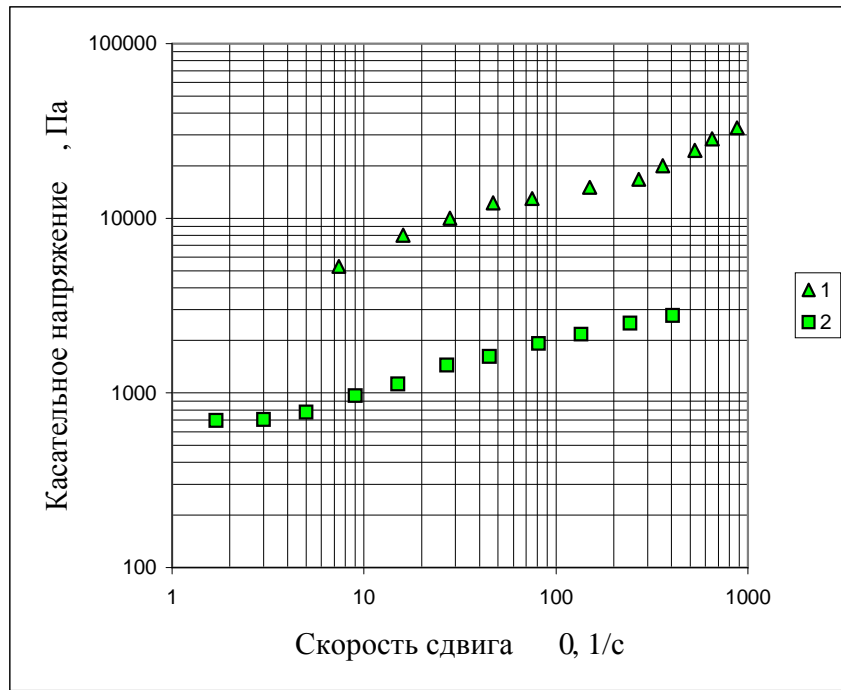


Рисунок 3. Кривые течения: 1 - песочное тесто с 20% яблочной пасты, 2 – жировая начинка для вафельных изделий [5, 6].

Кривая течения ржаного теста с отрубями для коржиков (рисунок 4) подобна кривой течения для жировой начинки, представленной на

рисунок 3б, и может быть описана с высокой точностью реологическим уравнением состояния (2).

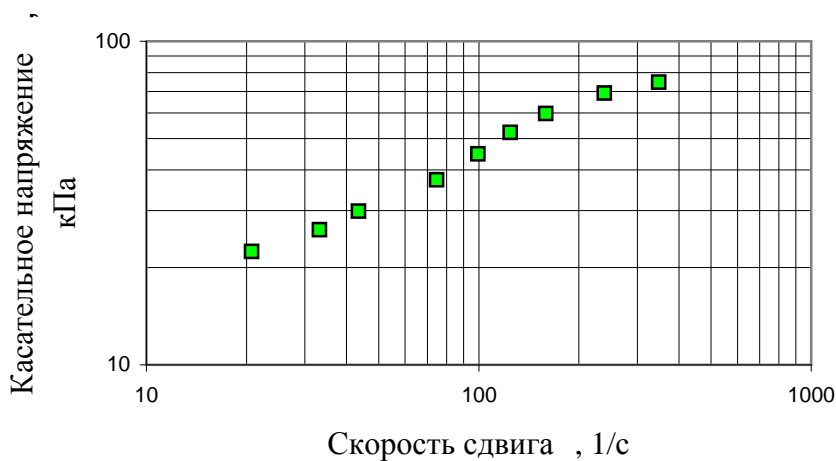


Рисунок 4. Кривая течения ржаного теста для коржиков - с 10% отрубей.

Кривые течения 1 и 2 (рисунок 2в) и (рисунок 3), включая кривую течения на рисунке 4, в области малых значений скорости сдвига обращены выпуклостью к оси скорости сдвига. С ростом скорости сдвига кривизна графика меняется на противоположное направление и для данных кривых течения предлагается реологическое уравнение состояния (2). Такая очередность знаков у символа предельного напряжения сдвига $(\theta_{0\beta}) \equiv (\pm \theta_0)$ в реологическом уравнении

состояния указывает на преобладание пластических свойств, проявляемых средой при течении в диапазоне малых значений скорости сдвига. С ростом скорости сдвига пластично-вязкое течение среды меняется на упруго-вязкое с отрицательным значением предельного напряжения сдвига, что говорит о превосходящих упругих свойствах, проявляемых средой в области высоких скоростей сдвига.

На рисунках 5 и 6 приведены схемы кривых течения, изображенные в прямоугольной декар-

товой системе координат и относящиеся к первой и второй группам, что соответствует реологическим уравнениям состояния (1) и (2).

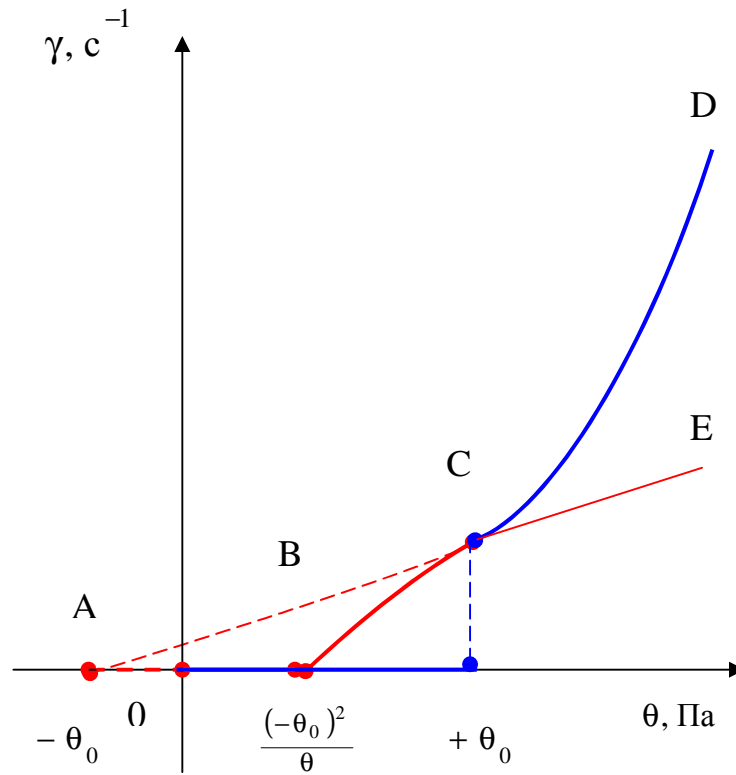


Рисунок 5. Схема кривой течения упруго – вязко - пластической среды

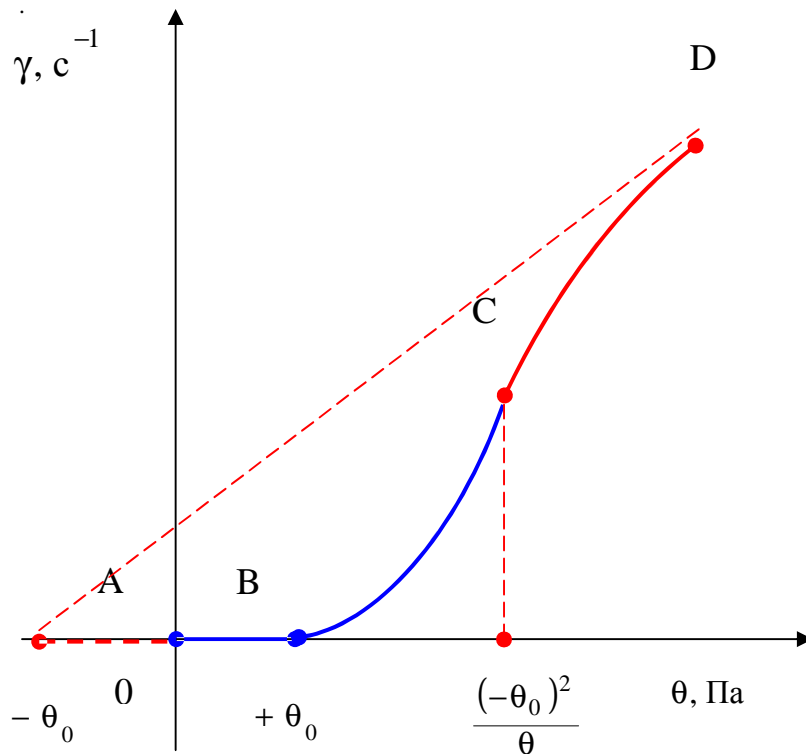


Рисунок 6. Схема кривой течения пластично – вязко - упругой среды

Из рисунков 5 и 6 очевидно пояснение знаков «+» и «-» перед символом предельного напряжения сдвига.

Определим производительность сквозных каналов с круглым профилем поперечного сечения при течении в них дисперсных сред с учетом пристенного скольжения. С этой целью запишем уравнение Навье – Стокса в напряжениях на ось z канала:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\theta_{rz}) = \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3)$$

После интегрирования (3) получим:

$$\theta_{rz} = \frac{r}{2} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{C_1}{r}; C_1 = 0 \quad (4)$$

Реологическое уравнение состояния (1) запишем в виде:

$$\theta = \frac{\theta_{0\alpha}^2}{\theta} + \left[K \left(\frac{-du}{dr} \right) \right]^{\frac{1}{m}} \quad (5)$$

где $m = \frac{1}{n}$ - величина, обратная индексу течения.

Преобразуем (5) с учетом (4), получим дифференциальное уравнение течения пластической среды в сквозном канале с круглым профилем поперечного сечения:

$$dU = - \left(\frac{\Delta p}{2l} \right)^m \cdot \frac{1}{K} (r - r_0)^m dr \quad (6)$$

Решением (6) с учетом граничных условий:

$$\text{при } \begin{cases} r = R \\ U_R = \beta\theta; U_R \neq 0 \end{cases}$$

будет:

$$U = \frac{2l}{K(m+1)\Delta P} \left[(\theta - \theta_{0\alpha})^{m+1} - \frac{\Delta P}{2l} (r - r_0)^{m+1} \right] + \beta\theta \quad (7)$$

где β - коэффициент скольжения, учитывающий П - эффект.

Выражение расхода определим как сумму центрального квази - твердого ядра и периферийной кольцевой области:

$$Q = Q_{r < r_0} + Q_{r_0 < r < R} \quad (8)$$

Скорость ядра потока:

Расход центральной части потока:

$$Q_{r < r_0} = \pi r_0^2 U_0; Q_{r < r_0} = \frac{\pi R^3}{\theta^5} \theta_0^4 \left[\frac{(\theta - \theta_{0\alpha}^2)^{m+1}}{K(m+1)} + \beta \frac{\theta^2}{R} \right] \quad (9)$$

Расход периферийной части

$$Q_{r_0 < r < R} = 2\pi \int_{r_0}^R U r dr;$$

$$Q_{r_0 < r < R} = 2p \frac{2l \left(q - \frac{q_0^2 a}{q} \right)^{m+1}}{K(m+1)\Delta P} \int_{r_0}^R U r dr - 2p \frac{2l}{K(m+1)\Delta P} \int_{r_0}^R \left(\frac{\Delta P}{2l} r - \frac{q_0^2 a}{q} \right)^{m+1} r dr + 2pbq \int_{r_0}^R r dr \quad (10)$$

Решением (10) будет:

$$Q_{r\Delta < r < R} = \frac{p \left(q - \frac{q_0^2 a}{q} \right)^{m+1}}{K \left(\frac{\Delta P}{2l} \right)^{(m+1)}} R^2 - pq \frac{2l}{\Delta P} \frac{2l \left(q - \frac{q_0^2 a}{q} \right)^{m+1}}{K \left(\frac{\Delta P}{2l} \right)^{(m+1)}} - 2p \frac{\left(q - \frac{q_0^2 a}{q} \right)^{m+2}}{K \left(\frac{\Delta P}{2l} \right)^2 (m+1)(m+2)} R + \frac{\left(q - \frac{q_0^2 a}{q} \right)^{m+3}}{K \left(\frac{\Delta P}{2l} \right)^3 (m+1)(m+2)(m+3)} + \frac{q^3 - q \left(\frac{q^2 a}{q} \right)^2}{\left(\frac{\Delta P}{2l} \right)^2} \quad (11)$$

Расход по всему круглому поперечному сечению канала с учетом эффекта пристенного скольжения (П-эффект):

$$Q = \frac{pR^3}{Kq^3} \left(q - \frac{q_{0a}^2}{q} \right)^{m+1} \times \left[\frac{2 \left(q - \frac{q_{0a}^2}{q} \right)^2}{(m+1)(m+2)(m+3)} - \frac{2q \left(q - \frac{q_{0a}^2}{q} \right)}{(m+1)(m+2)} + \frac{q^2}{(m+1)} \right] + b \frac{q}{R} \quad (12)$$

По уравнению (12) можно определить производительность сквозных каналов с учетом эффекта пристенного скольжения пластической среды относительно стенки канала.

Пристенное скольжение или П-эффект является характерным для пластических дисперсных сред. Если напряжение на стенке канала не превосходит значения предельного напряжения сдвига пластической среды, то сохраняется внутренняя структура среды и пластическая среда скользит по стенкам сквозного канала подобно твердой пробке. Повышение нагрузки приводит к переходу через предел пластической прочности среды вблизи стенки канала и в пристенной области возникает вязкое течение, а область неразрушенной структуры сохраняется вблизи оси потока, начиная с того значения радиуса, на котором напряжение сдвига достигает значения предельного напряжения сдвига дисперсной среды.

Characteristic properties of stationary flow continuous plasticity mediums in through channels with due account of wall sliding effect

Koryachkin V.P.

There has been developed a conception of deformable behaviour continuous plasticity mediums concluding that relationship of elastic and plastic properties has an affect upon shift flow of plasticity mediums in through channels and it changes depending on shift velocity.

The analysis of flow curves of wide range continuous plasticity mediums made it possible to offer characteristic and basic different the reological state equations which give the opportunity to estimate the relationship of elastic and plastic properties of subjects inquiry.

It is obtained the equation of capacity for round through channels for flow plasticity mediums in them with allowance for plastic and elastic parameters and wall sliding effects.

Механизм пристенного скольжения характерен для высоконаполненных полимеров, консистентных смазок и широкого спектра пищевых дисперсных материалов, обладающих пластическими свойствами.

Список использованной литературы

1. Тябин Н.В. Реологическая кибернетика, часть 1. – Волгоград: Волгоградская правда, 1977. – 111 с.
2. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1977. – 462 с.
3. Бернхард Э. Переработка термопластичных материалов. – М.: Химия, 1965. – 747 с.
4. Фройштетер Г.Б., Трильский К.К., Ищук Ю.Л., Ступак П.М. Реологические и теплофизические свойства пластичных смазок. – М.: Химия, 1980. – 175 с.
5. Корячкин В.П., Ермолаев В.Д. Расчет параметров свойств пищевых систем. Кемерово: ЦНТИ, 1982. - № 297. - 3 с.
6. Корячкин В.П., Мачихин Ю.А. Комплект макетов устройств для анализа качества формирования кондитерских масс в изделия. // Новые методы контроля технологических процессов и качество продукции: Сборник научных трудов: – Новосибирск: СО РАСХН, 1991.
7. Корячкин В.П. Установка для обработки пищевых сред давлением // Индустрия образования: Сборник статей. Выпуск 3. – М: МГИУ, 2002. – С. 105 – 110.