

По данной методике был рассчитан индекс течения n , входящий в формулу (табл. 2), определена зависимость индекса течения и вязкости от начальной влажности растительно-мясной смеси и температуры расплава в предматричной зоне двухшнекового экструдера (рис. 2). Влияние температуры на реологические свойства зерновой смеси изучалось в интервале от 323 до 433 К, а влажность была выбрана в интервале от 18 до 22 %, что соответствует режиму горячей экструзии.

Из анализа графических зависимостей (см. рис. 2) следует, что разрушение структуры расплава зерновой смеси происходит в интервале скоростей сдвига $100...200 \text{ с}^{-1}$, что свидетельствует о внутренней перестройке, происходящей в расплаве продукта, а в диапазоне $400...435 \text{ К}$ имеет место экспоненциальное увеличение скорости сдвига расплава зерновой смеси. Также следует, что влажность оказывает большее влияние, чем температура.

В результате интерполяции экспериментальных данных с помощью математического комплекса Statistica 9.0 были получены следующие регрессионные уравнения:

$$\mu = 2848,259 + 0,02T^2 - 15,21T - 0,07TW + 32,847W - 0,061W^2, \quad (2)$$

$$n = 44,812 + 0,0003T^2 - 0,205T + 0,0001TW - 0,135W + 0,0012W^2, \quad (3)$$

где T — температура расплава продукта в предматричной зоне экструдера, К; W — начальная влажность зерновой смеси, %.

Таким образом, в результате исследования реологических свойств расплава зерновой смеси, нахо-

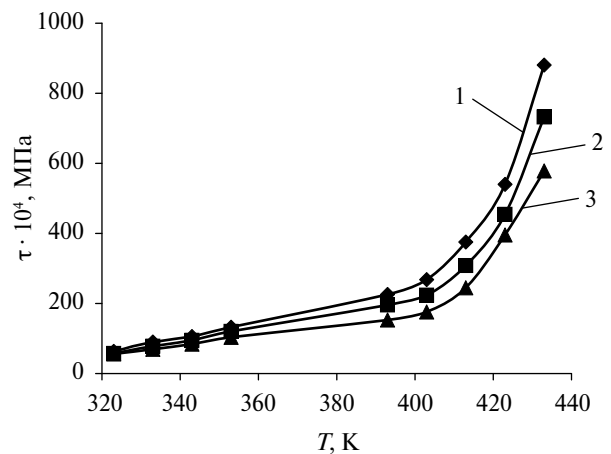


Рис. 2. Кривые течения расплава растительно-мясной смеси при влажности: 1 — 18 %; 2 — 20 %; 3 — 22 %

дящегося в предматричной зоне экструдера, было определено, что расплав в определенном диапазоне скоростей деформации можно отнести к аномально-вязким (неньютоновским) жидкостям. Результаты исследования реологических свойств расплава растительно-мясной смеси будут использованы для проектирования конструкций формирующих устройств с целью получения высококачественных экструзионных продуктов.

Список литературы

1. Малкин, А.Я. Реология: концепции, методы: пер. с англ. / А.Я. Малкин, А.Я. Исаева. — СПб.: Профессия, 2007. — 560 с.
2. Остриков, А.Н. Экструзия в пищевой технологии / А.Н. Остриков, О.В. Абрамов, А.С. Рудометкин. — СПб.: ГИОРД, 2004. — 288 с.

УДК 621.43, 631.37

М.В. Селезнёв

А.А. Глущенко, канд. техн. наук

В.М. Холманов, канд. техн. наук

Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия им. П.А. Столыпина

АНАЛИЗ РАЗДЕЛЕНИЯ ОТРАБОТАННЫХ МАСЕЛ НА ФРАКЦИИ В ГИДРОЦИКЛОНЕ

Процесс разделения отработанных масел на фракции в гидроциклоне может быть представлен следующим образом. На частицу, находящуюся в потоке жидкости в гидроциклоне, действуют следующие силы (рис. 1): центробежная $P_{ц}$, отбрасывающая частицу к периферии; радиальная сила P_r , возникающая от действия радиального потока жидкости и направленная к оси аппарата; сила Кориолиса P_K , которая перемеща-

ет частицу в окружном направлении относительно потока; сила сопротивления среды P_c , препятствующая осаждению частицы; сила инерции $P_{и}$, образующаяся вследствие изменения скорости осаждения [1].

Если вследствие малости частицы принять, что она увлекается потоком во вращательное движение с угловой скоростью ω , то основная действующая на нее сила — центробежная:

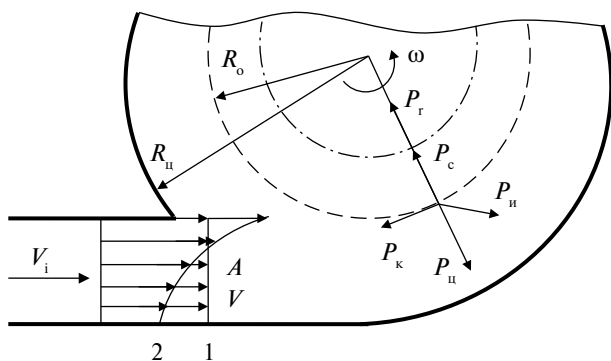


Рис. 1. Силы, действующие на частицу в спиральном потоке в гидроциклоне

$$P_{ц} = m_{ч} \omega^2 r_{в} = \frac{\pi d_{ч}^2 \rho_{ч} \omega^2 r_{в}}{6} = \frac{\pi d_{ч}^2 \rho_{ч} v^2}{6 r_{в}}$$

где $m_{ч}$ — масса частицы, кг; ω — угловая скорость вращения, c^{-1} ; $r_{в}$ — радиус вращения частицы, м; $\rho_{ч}$ — плотность частицы, $кг/м^3$; v — линейная локальная скорость потока, м/с.

Сила инерции $P_{и}$ обусловлена изменением относительной скорости частицы в потоке среды при перестройке профиля скорости частицы на входе в цилиндрическую часть гидроциклона. Поток жидкости входит в циклон с начальной скоростью v_1 (скорость жидкости во входном патрубке циклона); затем профиль скорости изменяется по линии 1–1 (рис. 1).

При переходе жидкости в искривленный канал входного патрубка профиль скорости v изменяется (рис. 1, линия 2–2) и ее распределение по сечению входного канала соответствует закону

$$vR^n = const,$$

где n — показатель свободы.

Большинство исследователей принимает $n = 1$.

Скоростью сепарации частиц называют вектор \bar{v}_c , равный разности векторов

$$\bar{v}_c = \bar{v}_н - \bar{v}(r),$$

где $\bar{v}_н$ — вектор скорости потока на входе в цилиндрическую часть гидроциклона, м/с; $\bar{v}(r)$ — вектор скорости частицы по радиусу гидроциклона, м/с.

Вследствие изменения скорости сепарации частицы появляется дополнительная сила инерции [2]:

$$P_{и} = m_{ч} \left(\frac{d\bar{v}_c}{d\tau} \right),$$

где τ — время сепарации частицы, ч.

Вектор скорости \bar{v}_c изменяет свое направление в различных зонах потока. Ниже точки A он направлен к периферии циклона, а выше — к его оси.

Поэтому учесть силу инерции $P_{и}$ при анализе очень сложно; обычно этой силой пренебрегают, что и является основной причиной расхождения экспериментальных данных с расчетными.

На частицу, перемещающуюся во вращающемся потоке, действует сила Кориолиса [3]:

$$P_{к} = 2m_{ч} \omega \bar{v}_c.$$

Так как изменение скорости \bar{v}_c в направлении центробежной силы $P_{к}$ невелико, то силой Кориолиса можно пренебречь.

Сила сопротивления потока среды [2] такова:

$$P_c = \frac{\xi S_{ч} \rho_{ч} v_c^2}{2},$$

где ξ — коэффициент лобового сопротивления частицы; $S_{ч}$ — площадь сечения частицы по нормали к ее движению, $м^2$.

Радиальная сила

$$P_r = \frac{3\mu Q d_{ч}}{2hr},$$

где μ — кинематическая вязкость масла, $м^2/с$; Q — производительность гидроциклона, $м^3/ч$; h — высота воздушного столба гидроциклона, м.

Под действием указанных сил скорость движения частицы в любой точке гидроциклона может быть разложена на следующие три составляющие (рис. 2):

v_t — тангенциальную скорость, направленную перпендикулярно радиусу вращения частицы в данной точке на горизонтальной плоскости;

v_r — радиальную скорость, направленную по радиусу гидроциклона внутрь его;

v_z — осевую или вертикальную скорость, направленную под прямым углом к v_t и v_r вдоль оси гидроциклона.

Поскольку на частицу, находящуюся в потоке жидкости, в гидроциклоне действуют в основном две силы: центробежная $P_{ц}$ и радиальная P_r , то в каждой точке гидроциклона в плоскости, перпендикулярной его оси, частица будет иметь скорость v (см. рис. 2), состоящую из тангенциальной v_t и радиальной v_r скоростей. Исходя из этого, уравнение радиального движения частицы в гидроциклоне

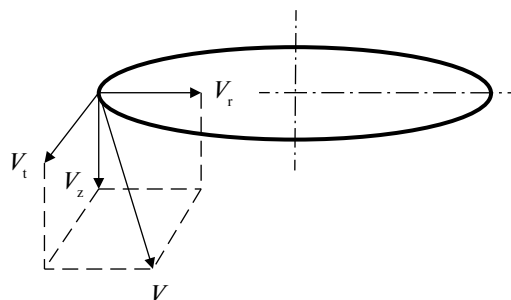


Рис. 2. Составляющие скорости движения частицы в гидроциклоне

коническом гидроциклоне можно записать следующим образом:

$$m_{\text{ч}} \frac{d^2 r}{dt^2} = m_{\text{ч}} \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{м}}} - 1 \right) \frac{v_{\text{т}}(r)}{r} - \mu \left(\frac{dr}{dt} - v_{\text{т}}(r) \right) + \xi(t), \quad (1)$$

где $v_{\text{т}}(r)$ — функция, описывающая распределение тангенциального компонента скорости частицы в потоке; $v_{\text{р}}(r)$ — функция, описывающая распределение радиального компонента скорости частицы в потоке; $\xi(t)$ — функция времени, учитывающая случайную составляющую скорости, вызванную стесненностью движения частиц и их взаимными столкновениями.

Предположив обратную пропорциональность тангенциальной $V_{\text{т}}(r)$ и радиальной $v_{\text{р}}(r)$ функций компонента скорости жидкости радиальной координате, в условиях отсутствия относительно движения частицы в окружном направлении и ускорения их при радиальном перемещении и, определив силу сопротивления по линейному закону Стокса, уравнение (1) можно записать в следующем виде:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{d_{\text{ч}}^2 \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{м}}} - 1 \right) A^2}{18 \nu_{\text{с}}} \frac{1}{r^3} - \frac{\gamma}{r} + \frac{\xi(t)}{3\pi d_{\text{ч}} \rho_{\text{ч}} \nu_{\text{с}}}, \quad (2)$$

где A — параметр, характеризующий геометрические характеристики гидроциклона.

Таким образом,

$$A = v_{\text{т}} R_{\text{т}},$$

где $v_{\text{т}}$ — тангенциальная скорость частицы на участке, м/с; $R_{\text{т}}$ — радиус, на котором выполняется соотношение $v_{\text{т}} = \text{const}$, м; γ — параметр, характеризующий пропускную возможность гидроциклона.

Поэтому

$$\gamma = A \left(\frac{d_{\text{вх}}}{8HR_{\text{т}}} - 4C^2 \right),$$

где $d_{\text{вх}}$ — диаметр входного патрубка гидроциклона, м; H — высота конической части гидроциклона, м; C — постоянная величина, характеризующая зависимость производительности от высоты гидроциклона.

Постоянную величину находят так:

$$C = \frac{Q}{2\pi L},$$

где Q — производительность гидроциклона, м³/ч; L — высота гидроциклона от сливного патрубка до верхнего среза диафрагмы, м.

Если предположить, что функция $\xi(t)$, учитывающая случайную составляющую скорости, вызванную стесненностью движения частиц и их взаимными столкновениями, определяется функцией времени с нулевым средним значением, то описываемое уравнением (2) случайное перемещение частицы вдоль радиуса гидроциклона в любом его се-

чении является простым процессом и может быть представлено одномерной плотностью вероятности $W(t, r)$. Тогда величина $W(t, r)dr$ характеризует относительное число частиц, находящихся в момент времени t в сечении $r + dr$, а функция $W(t, r)$ может быть истолкована как концентрация частиц в этот момент времени в данном сечении и определена уравнением

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(-aW + \frac{b}{2} \frac{\partial W}{\partial r} \right), \quad (3)$$

с соответствующими уравнению коэффициентами:

$$a = \frac{r^3 d_{\text{ч}}^2 \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{м}}} - 1 \right) A^2}{18 \nu_{\text{с}}} - \frac{\gamma}{r},$$

$$b = \frac{4,8 \cdot 10^{-15} \left(\frac{d_{\text{в}}}{d_{\text{с}}} \right)^{0,65}}{9\pi^2 d_{\text{ч}}^2 \rho_{\text{м}}^2 \nu_{\text{с}}^2},$$

где $d_{\text{с}}$ — диаметр сливного патрубка, м.

Граничные условия, указывающие на отсутствие перемещения частицы вдоль радиуса вращения r при достижении ими стенки $r = R_{\text{т}}$ гидроциклона, а также границы зоны противотока $r = r_0$, соответствующие радиусу воздушного столба r_0 и определяющие унос частиц в приспособление для отвода очищенного масла, могут быть записаны в таком виде [1]:

$$W(t, r) = 0 \text{ при } r = R_{\text{т}} - z \text{tg } \alpha \text{ и } r = r_0,$$

где z — координата точки по высоте гидроциклона, м; α — угол конусности гидроциклона, град.

С учетом граничных условий и безразмерных параметров, влияющих на процесс отделения частицы r_0 , α , γ дифференциальное уравнение (3) принимает следующий вид:

$$\frac{\partial \bar{W}}{\partial \bar{t}} = \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left[- \left(\frac{1}{\bar{r}^3} - \frac{\bar{\gamma}}{\bar{r}} \right) \bar{W} + \frac{1}{2\alpha} \frac{\partial \bar{W}}{\partial \bar{r}} \right].$$

Тогда унос частиц через сливной патрубок, выраженный в долях единицы от общего числа частиц, поступающих с очищаемым маслом, может быть определен как безразмерная величина потока частиц:

$$\bar{G}(\bar{t}, \bar{r}) = \left[- \left(\frac{1}{\bar{r}^3} - \frac{\bar{\gamma}}{\bar{r}} \right) \bar{W} + \frac{1}{2\alpha} \frac{\partial \bar{W}}{\partial \bar{r}} \right],$$

зависимостью

$$S_{\text{в}}(\bar{t}) = \frac{1}{2\alpha} \int_0^{\bar{t}} \bar{G}(\bar{t}, \bar{r}) d\bar{t}.$$

Таким образом, качество очистки, определяемое массовым содержанием частиц в потоке масла, удаляемого через нижнее сливное отверстие, зависит от времени t , нахождения частицы в гидроциклоне и радиуса зоны противотока $r = r_0$, т. е. от радиуса поверхности нулевой осевой скорости, определяющей разделение потока масла и унос частиц через верхнее или нижнее сливные отверстия. Поэтому, задавшись временем очистки масла и радиусом поверхности нулевых скоростей, можно рассчитать геометрические параметры гидроциклона, удовлетворяющего предъявляемым тре-

бованиям качества очистки масел от нерастворимых примесей.

Список литературы

1. Глушенко, А.А. Экологически безопасные технологии для восстановления эксплуатационных свойств отработанного моторного масла с использованием гидроциклона / А.А. Глушенко. — Ульяновск: УГСХА, 2011. — 166 с.
2. Поваров, А.К. Гидроциклоны / А.К. Поваров. — М.: Госгортехиздат, 1961. — 256 с.
3. Мустафьев, А.М. Теория и расчет гидроциклона / А.М. Мустафьев. — Баку: РИФ, 1969. — 172 с.

УДК 681.5:637.117

А.Б. Коршунов, канд. техн. наук

Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства Россельхозакадемии

КОНТРОЛЬ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ МОЛОКА С АККУМУЛЯТОРАМИ ЕСТЕСТВЕННОГО ХОЛОДА

Важнейшими задачами оптимального функционирования технологических линий первичной обработки и хранения молока является создание и внедрение автоматизированных систем, обеспечивающих контроль и регулирование потоков молока и хладоносителя с высокой степенью точности изолированно от окружающего воздуха.

Схема контроля и регулирования потоков молока и хладоносителя в системах охлаждения с аккумуляторами естественного холода с использованием электромагнитных средств измерения была разработана во Всероссийском научно-исследовательском институте электрификации сельского хозяйства. На рисунке представлена функционально-структурная схема, определяющая режимы работы оборудования этой системы, которая состоит из объекта управления (ОУ) и системы управления (СУ). СУ включает электрически связанные между собой устройства управления отдельными подсистемами, комплекты датчиков и преобразователей [1–3].

Из функционально-структурной схемы видно, что режим работы устройств для контроля и регулирования потоков молока и хладоносителя зависит от функционирования дискретно-регулируемого электропривода (ДРЭ) молочного насоса 2 и насоса хладоносителя 5, управляемых датчиками верхнего и нижнего уровня, расположенных в молочном релизере 1. В общем случае объектом управления в рассматриваемой подсистеме является система трубопровод — поток молока и хладо-

носителя — накопительно-регулирующая емкость (релизер). Это — стационарная, динамическая система с распространенными параметрами, характеризующаяся широким изменением технологических параметров.

Установлено, что параметрическими возмущениями для этой системы являются приращения величин потока молока Q_m в молочном релизере 1 и Q_x потока хладоносителя с учетом требуемой температуры охлаждения.

Основными уравнениями, описывающими потоки подачи и расхода молока и хладоносителя на i -м участке молокопровода линии обработки являются стационарные, случайные функции, зависящие от времени:

$$Q_m = \left. \begin{aligned} &\sum \tilde{m}[Q_m]; Q_m^0(t) \\ &\int_0^T Q_{i-1}(t) dt - \int_0^T Q_i(t) dt \leq V_p \end{aligned} \right\}, \tag{1}$$

где: $\tilde{m}[Q_m]$ — оценка математического ожидания потока подачи молока, м³/ч; $Q_m^0(t)$ — центрированное значение сплошного случайного потока подачи, м³/ч; $Q_{i-1}(t)$, $Q_i(t)$ — средние значения потоков расхода на двух соседних ступенях регулирования, м³/ч; T — время цикла обработки, ч; V_p — вместимость накопительно-регулирующей емкости, м³.

Учитывая, что для системы контроля и регулирования потоков молока и хладоносителя $Q_n(t) = Q_p(t)$ и соответственно $V_p = 0$, $Q_p(t) = \text{const}$, получим широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) потоков молока и хладоносителя, определяемую ре-