УДК 664.1.033

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ДАВЛЕНИЙ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ КАК СПОСОБ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Д.Н. Люлька*, В.В. Пономаренко, С.Ю. Лементарь

Национальный университет пищевых технологий,
01601, Украина, г. Киев, ул. Владимирская, 68

**e-mail: lulkadm@ukr.net*

Дата поступления в редакцию: 27.04.2015
Дата принятия в печать: 08.07.2015

Рассмотрена интенсификация массообменных процессов на примере экстрагирования сахарозы из свекловичной стружки при воздействии на сокостружечную смесь низкочастотных механических колебаний. Исследовано формирование и перемещение слоя сокостружечной смеси под воздействием переменных силовых полей, которые создаются вращающимися лопастями транспортной системы колонного диффузионного аппарата, и их влияние на фильтрационную способность слоя, а соответственно, степень прогрева сокостружечной смеси, скорость массопередачи сахарозы. Решена задача уплотнения слоя сокостружечной смеси, что позволило выявить влияние ряда факторов на процесс распределения давления в слое и процесс фильтрации экстрагента через слой стружки. Получен закон изменения давления от времени для любого фиксированного сечения слоя, а также закон изменения давления по высоте слоя для любого фиксированного промежутка времени. Распределение давлений в сокостружечной смеси под действием рабочих органов транспортных систем в аппаратах различных типов влияет на фильтрационную способность слоя стружки и соответственно формирует температурные поля в аппаратах. Получены результаты математического моделирования процесса сжатия пористой среды для волнообразного профиля транспортных лопастей диффузионных аппаратов, которые вызывают пульсационные низкочастотные колебания сокостружечной смеси, что приводит к заметной интенсификации массообменных процессов. Их рекомендуется применять при профилировании рабочей поверхности элементов транспортных систем, при разработке новых и модернизации существующих промышленных экстракторов.

Диффузия, сок, стружка, сокостружечная смесь, фильтрация, давление, структурно-механические свойства

Введение

Движущей силой любого массообменного процесса является разность концентраций. В случае гетерогенного процесса массоперенос осуществляется не только внутри фазы, но и через границу раздела фаз.

Увеличить движущую силу, а следовательно и скорость процесса, возможно следующими путями:

1) повысить концентрацию вещества (реагента), то есть работать с более концентрированным сырьем;

2) понизить равновесную концентрацию вещества на границе раздела фаз.

Первый путь не всегда может быть реализован, так как концентрация исходного целевого компонента в сырье зачастую ограничена.

Реализовать второй путь интенсификации процесса массопередачи возможно, изменяя внешние условия проведения процесса. Выбор способа смещения равновесия зависит от конкретного типа исследуемой системы.

Для системы газ-жидкость сместить равновесие процесса растворения газа в жидкости можно, увеличивая общее давление (соответственно увеличивается парциальное давление абсорбируемого газа) или уменьшая температуру, при наложении на газожидкостный поток низкочастотных механических колебаний. Интенсификация абсорбции также возможна при существенном увеличении относительной скорости движения фаз [1]. Эффективным аппаратом для осуществления такой интенсификации является эжекционный аппарат.

Для систем газ-твердое тело и жидкость-твердое тело необходимо найти условия смещения равновесия процесса массопередачи. Обычно для этого понижают температуру и повышают давление. Для систем жидкость-жидкость, а также твердое тело-жидкость (когда твердое вещество растворяется в жидкости) обычно повышают температуру. Принципы смещения равновесия в процессах массопереноса те же, что и для химических равновесий.

Другим инструментом управления гетерогенным процессом, протекающим в диффузионной области, является коэффициент массопередачи *Км*, который характеризует количество вещества, переданного из фазы в фазу через единицу поверхности в единицу времени при движущей силе, равной единице. Коэффициент массопередачи выше при более высоком коэффициенте молекулярной диффузии диффундирующего вещества в данной фазе, при интенсивной конвективной диффузии и малой толщине пограничного слоя δ.

Для повышения коэффициента конвективной диффузии и уменьшения толщины пограничного слоя используют различные методы турбулизации внешнего потока: повышение скорости движения, интенсификация перемешивания, вибрация поверхности, низкочастотные механические колебания, импульсный ввод энергии, воздействие электрических и магнитных полей и др.

Не следует стремиться к максимально возможной величине межфазной поверхности. Она должна быть оптимальной, так как слишком сильное диспергирование одной из фаз приводит к уносу ее из аппарата, снижению проницаемости слоя и другим нежелательным эффектам.

Научной основой интенсификации технологических процессов является выбор наиболее эффективных способов воздействия на исследуемую систему, установление и использование новых физических эффектов, теоретическое описание поведения системы под влиянием таких воздействий.

В работе рассмотрена интенсификация массообменных процессов на примере экстрагирования сахарозы из свекловичной стружки при воздействии на сокостружечную смесь низкочастотных механических колебаний.

Если в процессе противоточного экстрагирования участвует только 20…25 % всей внешней поверхности частиц, то благодаря низкочастотным механическим колебаниям при оптимальных параметрах активная поверхность частиц приближается к 100 %.

Из общих положений теории процесса экстрагирования следует, что для интенсификации процесса необходимо увеличивать движущую силу и уменьшать диффузионное сопротивление.

Главный параметр, с помощью которого можно изменять коэффициент диффузии экстрагируемого вещества в частицах растительного сырья, – температура. Однако повышение ее выше определенного уровня для случая экстрагирования сахарозы из свекловичной стружки приводит к ухудшению свойств частиц, а в результате – ухудшению условий массоотдачи и соответствующему увеличению внешнего диффузионного сопротивления, так что суммарное диффузионное сопротивление окажется в результате не меньшим, а большим.

Таким образом, при экстракции сахарозы из свекловичной стружки температура не является определяющим средством интенсификации процесса экстрагирования.

Значительное влияние на внутреннее диффузионное сопротивление оказывает размер частиц. Уменьшение размера частиц является одним из самых мощных средств для увеличения количества переданного вещества.

Очевидно, с повышением степени измельчения сырья будет увеличиваться суммарная поверхность частиц и молекулярная (внутренняя) диффузия, так как становится больше разорванных клеток сырья, экстрагент более свободно проникает в клетку и увеличивается контакт сырья с растворителем. Вслед за увеличением молекулярной диффузии должна увеличиться и наружная (конвективная), то есть диффузия от поверхности частиц сырья в экстрагент, а значит, увеличится и количество проэкстрагированной сахарозы.

Однако гидродинамические условия течения экстрагента через слой частиц по мере уменьшения их размера значительно ухудшаются. Для каждого вида сырья и условий протекания процесса существует минимальный размер частиц, при котором суммарное внутреннее и внешнее диффузионное сопротивление является минимальным. При дальнейшем уменьшении размера частиц внешнее диффузионное сопротивление увеличивается в большей степени, чем уменьшается внутреннее сопротивление [2].

Для интенсификации процесса экстрагирования необходимо уменьшение размера частиц сопровождать улучшением условий массоотдачи от поверхности частиц к экстрагенту. При этом важно как увеличение относительной скорости фаз, так и то, чтобы вся поверхность частиц участвовала в процессе. По мере уменьшения размера частиц увеличивается блокирование поверхности одних частиц другими, уменьшаются поры, по которым движется жидкость, могут возникать области, в которых жидкость не циркулирует.

Описанные процессы экстрагирования сахарозы из свекловичной стружки имеют место в промышленных вертикальных диффузионных аппаратах непрерывного действия. Структурно-механические свойства сокостружечной смеси оказывают влияние на характер противоточного перемещения твердой фазы вдоль аппарата и фильтрационную способность слоя смеси, которая изменяется при изменении давления на нее рабочими органами транспортных систем. Увеличение скорости течения экстрагента через поры твердой фазы вызывает снижение равновесной концентрации сахарозы у поверхности раздела фаз, увеличивает коэффициент массопередачи.

Согласно нашим исследованиям на величину внешнего диффузионного сопротивления оказывает влияние фильтрационная способность слоя, повысить которую возможно при воздействии низкочастотных механических колебаний, которые генерируются в систему при вращении специально разработанной лопасти волнообразного профиля [3].

Объекты и методы исследований

В промышленных экстракторах при переработке сахарной свеклы различного качества, разной степени измельчения возможно появление застойных зон, пробок, сжатие слоя свекловичной стружки с уменьшением его фильтрационной способности, наблюдается неравномерность прогревания сокостружечной смеси. Это приводит к снижению скорости массопередачи [4].

Нами рассмотрено формирование и распределение силовых полей и их влияние на поведение сокостружечной смеси, ее фильтрационную способность, а соответственно, степень прогрева сокостружечной смеси и скорость массопередачи при перемещении ее лопастями различной конструкции по высоте колонны.

Сокостружечная смесь представляет собой двухфазную систему, которая состоит из свекловичной стружки и экстрагента. Состояние смеси характеризуется величиной удельного наполнения стружкой объема диффузионного пространства. У аппаратов различных типов эта величина различна и колеблется в пределах

400...850 кг/м^3 [5]. В процессе работы диффузионного аппарата сокостружечная смесь подвергается механическому воздействию разной интенсивности, что значительно влияет на процесс экстрагирования. Для оценки этого воздействия необходимо определить локальное направление движения жидкости в аппарате, так как градиент давлений перед рабочим органом и после него разный.

Таким образом, в результате исследований необходимо изучить вопрос о распределении давлений в сокостружечной смеси и определить коэффициент фильтрации под действием сжимающих усилий, различных по величине при прохождении смеси рабочих органов, которые перемещают твердую фазу.

Для выявления влияния распределения давления в слое сокостружечной смеси на его фильтрационную способность используем метод математического моделирования сжатия пористой среды.

Результаты и их обсуждение

Для построения математической модели процесса сжатия сокостружечной смеси сделаем следующие предположения:

- слой свекловичной стружки полностью насыщен экстрагентом, состояние которого в порах считается свободным, несжатым и гидравлически непрерывным;
- слой стружки принимается линейно деформированным: возникающие напряжения в нем мгновенно вызывают его перемещение;
- слой стружки не структурирован и внешнее давление, которое прикладывается к ней, моментально полностью передается на сок;
- фильтрация сока в порах слоя стружки подчиняется закону Дарси.

Внешнее давление, приложенное к выделенному объему сокостружечной смеси, составляет:

$$P = P_П + P_C, \qquad (1)$$

где $P_П$ – избыточное давление экстрагента в порах; P_C – давление, которое передается движущимися лопастями на части свекловичной стружки.

В начальный момент времени t_1 внешнее давление P полностью передается на сокостружечную смесь, но в следующие промежутки времени давление в соке P_C будет уменьшаться, а давление, действующее на стружку $P_П$, расти до тех пор, пока не станет равным внешнему давлению (рис. 1).

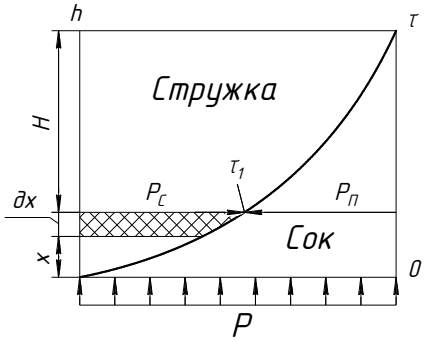

Рис. 1. Схема сжатия сокостружечной смеси

Для элементарного слоя на глубине x в объеме сокостружечной смеси увеличение расхода сока q равно уменьшению пористости слоя n:

$$\frac{\partial q}{\partial x} = -\frac{\partial n}{\partial t}, \qquad (2)$$

где q – расход сока в направлении x; n – объем сока в слое между стружкой.

Зависимость (2) представляет собой условие неразрывности движения сока в слое сокостружечной смеси. По закону фильтрации Дарси для случая направленного движения сока (вдоль оси x) получим:

$$q = -k_Ф \cdot \frac{\partial H}{\partial x}, \qquad (3)$$

где $k_Ф$ – коэффициент фильтрации; H – напор в соке.

Отсюда:

$$\frac{\partial q}{\partial x} = -k_Ф \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}. \qquad (4)$$

Принимая во внимание, что напор в соке H равен избыточному давлению экстрагента в порах $P_П$, разделенному на $\rho_П$ и g, и учитывая уравнение (1), получим:

$$P_П = P - P_C, \; H = \frac{P_П}{\rho_П \cdot g}, \; H = \frac{P - P_C}{\rho_П \cdot g},$$

откуда:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = -\frac{1}{\rho_П \cdot g} \cdot \frac{\partial^2 P_C}{\partial x^2}.$$

С учетом (4) имеем:

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{k_Ф}{\rho_П \cdot g} \cdot \frac{\partial^2 P_C}{\partial x^2}. \qquad (5)$$

Для преобразования правой части уравнения (2) введем понятие коэффициента пористости слоя сокостружечной смеси $e_{сс}$. Поскольку выделенный единичный объем сокостружечной смеси состоит из объема твердой фазы m и объема сока в порах твердой фазы n, то:

$$n + m = 1, \qquad (6)$$

тогда:

$$e_{сс} = \frac{n}{m}. \qquad (7)$$

Из выражений (6) и (7) получаем выражение:

$$n = \frac{e_{сс}}{1 + e_{сс}}, \text{ и } \frac{\partial n}{\partial t} \approx \frac{1}{1 + e_{ср}} \cdot \frac{\partial e}{\partial t}. \qquad (8)$$

Принимаем в знаменателе выражения (8) переменную $e_{сс}$, равную среднему значению пористости слоя $e_{ср}$.

Введем также коэффициент сжимаемости слоя m_0, равный отношению изменения коэффициента пористости к действующему давлению:

$$m_0 = \frac{e_0 - e_i}{P_{Ci}}. \quad (9)$$

Для некоего промежуточного текущего значения P_{Ci} имеем:

$$e_i = e_0 - m_0 \cdot P_{Ci}, \quad (10)$$

где e_0 – начальный коэффициент пористости.

Дифференцируя уравнение (10) по t, получим:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -m_0 \cdot \frac{\partial P_C}{\partial t}.$$

Или:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{m_0}{1+e_{cp}} \cdot \frac{\partial P_C}{\partial t}. \quad (11)$$

Тогда уравнение (2) с учетом выражений (5) и (11) можно записать в виде:

$$\frac{k_\Phi \cdot (1+e_{cp})}{m_0 \cdot \rho_\Pi \cdot g} \cdot \frac{\partial^2 P_C}{\partial x^2} = \frac{\partial P_C}{\partial t}.$$

Обозначив множитель в левой части через a, получим в конечном виде дифференциальное уравнение одномерной задачи уплотнения сокостружечной смеси:

$$\frac{\partial P_C}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 P_C}{\partial x^2}, \quad (12)$$

где

$$a = \frac{k_\Phi \cdot (1+e_{cp})}{m_0 \cdot \rho_\Pi \cdot g}. \quad (13)$$

Величина a называется коэффициентом фильтрационного уплотнения, который отражает исходные условия задачи по характеристике уплотнения сокостружечной смеси.

Для однозначного решения уравнения (12) дополняем его краевыми условиями сжатия слоя смеси толщиной $2h$ при двухсторонней фильтрации экстрагента (вверх и вниз) (рис. 2).

Выбираем начало координат в центре слоя. В этом случае функция $P_C(x,t)$ является четной относительно x для любого фиксированного t, поэтому данная задача является симметричной и для нее при $x = 0$ можно записать условие симметрии в виде (первое граничное условие):

$$\frac{\partial P_C(0,t)}{\partial x} = 0. \quad (14)$$

Поскольку рассматриваем фильтрацию сока через слой, то второе граничное условие при $x = h$ может быть записано в виде:

$$P_C(h,t) = P = const, \quad (15)$$

так как сок свободно выходит после фильтрации сквозь внешнюю поверхность слоя $x = h$. Начальным условием задачи примем, что в момент времени $t = 0$ по глубине слоя уплотнительное давление равномерно распределено: $P_0 = const$:

$$P_C(x,0) = P_0 = const. \quad (16)$$

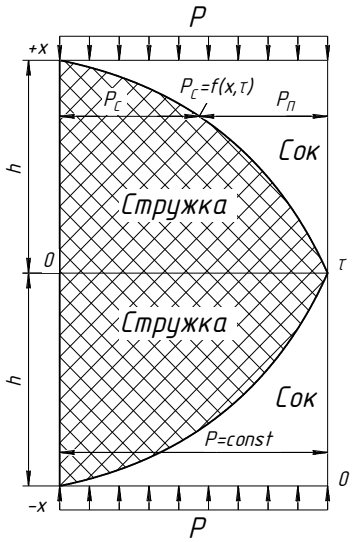

Рис. 2. Сжатие слоя смеси при двухсторонней фильтрации экстрагента

Тогда краевая задача может быть сформулирована в виде:

$$\frac{\partial P_C(x,t)}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 P_C(x,t)}{\partial x^2},$$

$$(t > 0, \ -h \le x \le +h), \quad (17)$$

$$\frac{\partial P_C(0,t)}{\partial x} = 0, \quad (18)$$

$$P_C(h,t) = P = const, \quad (19)$$

$$P_C(x,0) = P_0 = const. \quad (20)$$

Решение задачи проведем методом разделения переменных (методом Фурье). Частное решение уравнения (17) представим в виде произведения функций, каждая из которых зависит только от одного аргумента x или t:

$$P_C(x,t) = c \cdot \theta(t) \cdot \psi(x) \quad (21)$$

Подставим выражение (21) в (17):

$$\theta_t(t) \cdot \psi(x) = a \cdot \theta(t) \cdot \psi_{xx}(x),$$

откуда:

$$\frac{\theta_t(t)}{\theta(t)} = a \cdot \frac{\psi_{xx}(x)}{\psi(x)}, \quad (22)$$

где

$$\theta_t(t) = \frac{\partial \theta(t)}{\partial t}, \ \psi_{xx}(x) = \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2}.$$

Выражение (22) должно выполняться при любых значениях x, t. Это возможно только в том случае, если правая и левая его части равны некоторой постоянной величине:

$$\frac{\theta_t(t)}{\theta(t)} = F, \tag{23}$$

$$a \cdot \frac{\psi_{xx}(x)}{\psi(x)} = F \cdot \tag{24}$$

Интегрируя выражение (23), получим:

$$\theta(t) = e^{F \cdot t}. \tag{25}$$

Так как при прохождении бесконечно большого промежутка времени ($t \to \infty$) величина $P_C(x,t)$ принимает конечное значение, а именно $P_C \to P = const$, следовательно, из физических соображений величина F может быть только отрицательной. Поскольку величина F пока произвольная постоянная по числовым значениям, то можно принять $F = -a \cdot k^2$, где a – параметр дифференциального уравнения (17), a>0; k – некоторая постоянная, что определяется из граничных условий.

Тогда получим:

$$\theta(t) = e^{-a \cdot k^2 \cdot t}, \tag{26}$$

а уравнение (24) может быть представлено в виде:

$$\psi_{xx}(x) + k^2 \cdot \psi(x) = 0. \tag{27}$$

Решением уравнения (27) в общем виде будет выражение:

$$\psi(x) = A \cdot \sin kx + B \cdot \cos kx \cdot \tag{28}$$

Тогда частное решение уравнения фильтрационного уплотнения будет иметь вид:

$$P_C(x,t) = (A \cdot \sin kx + B \cdot \cos kx) \cdot e^{-a \cdot k^2 \cdot t}. \tag{29}$$

Из условия симметрии (18) следует, что:

$$\frac{\partial P_C(0,t)}{\partial x} = \lim_{x \to 0} (A \cdot k \cdot \cos kx - B \cdot k \cdot \sin kx) \cdot e^{-a \cdot k^2 \cdot t} =$$

$$= A \cdot k \cdot e^{-a \cdot k^2 \cdot t} = 0,$$

откуда $A = 0$.

Рассмотрим второе граничное условие. Для упрощения расчета временно примем $P = 0$, то есть уплотнение проходит под действием силы тяжести слоя смеси.

Итак:

$$P_C(h,t) = B \cdot \cos(k \cdot h) \cdot e^{-a \cdot k^2 \cdot t} = 0,$$

отсюда следует, что $\cos(k \cdot h) = 0$, следовательно, $k_n = (2 \cdot n - 1) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{h}$, где $n = 1, 2, \ldots$, а k имеет бесконечное количество решений. Итак, общее решение представляет собой сумму всех частных решений:

$$P_C(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot cos\left[(2 \cdot n - 1) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{x}{h}\right] \times \cdot$$

$$\times exp\left[-(2 \cdot n - 1)^2 \cdot \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{a \cdot t}{h^2}\right]. \tag{30}$$

Общее решение данной задачи можно записать так:

$$P_C(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot P_0}{k_n \cdot h} \cdot sin(k_n \cdot h) \cdot cos(k_n \cdot h \cdot x) \cdot e^{-a \cdot k_n^2 \cdot t}, \tag{31}$$

или:

$$\frac{P_C(x,t)}{P_0} = 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \cdot cos\left[(2 \cdot n - 1) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{x}{h}\right] \times$$

$$\times exp\left[-(2 \cdot n - 1)^2 \cdot \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{a \cdot t}{h^2}\right]. \tag{32}$$

Если внешнее давление не равно нулю, а равно P, так как это следует из условия задачи, то решение (32) можно записать в виде:

$$P_C(x,t) = P - (P - P_0) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \cdot \frac{4}{(2 \cdot n - 1) \cdot \pi} \cdot cos\left[(2 \cdot n - 1) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{x}{h}\right] \times$$

$$\times exp\left[-(2 \cdot n - 1)^2 \cdot \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{a \cdot t}{h^2}\right]. \tag{33}$$

Для решения практических задач ограничимся первым членом ряда, то есть примем $n = 1$, отсюда получим:

$$P_C(x,t) = P - (P - P_0) \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{x}{h}\right) \cdot e^{-\frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{a \cdot t}{h^2}}. \tag{34}$$

В случае приложения большого внешнего давления $P >> P_0$ уравнение (34) примет вид:

$$P_C(x,t) = P \cdot \left(1 - \frac{4}{\pi} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{x}{h}\right) \cdot e^{-\frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{a \cdot t}{h^2}}\right). \tag{35}$$

Полученное аналитическое решение задачи уплотнения слоя сокостружечной смеси (35) позволяет выявить влияние ряда факторов на процесс распределения давления в слое и процесс фильтрации экстрагента через слой стружки.

1. Из выражения (35) можно получить закон изменения давления P_C от времени для любого фиксированного сечения слоя $x = h_1 = const$, $0 \le h_1 \le +h$:

$$P_C(h_1,t) = P \cdot (1 - A \cdot e^{-B \cdot t}), \tag{36}$$

где A и B – некоторые постоянные числа для данного значения.

2. Аналогично можно получить закон изменения давления по высоте слоя для любого фиксированного промежутка времени $t = t_1$:

$$P_C(x,t_1) = P \cdot \left[1 - A_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{2 \cdot h}\right)\right], \tag{37}$$

где A_1 – некоторое постоянное число для данного значения t_1.

3. Решение уравнения (1) позволяет найти распределение давлений в экстрагенте в любом сечении слоя для любого момента времени при заданной внешней нагрузке P. Предварительно по выражению (35) просчитывается значение P_C.

4. Уравнение (35) позволяет определить скорость фильтрации сока в любом сечении слоя для любого момента времени.

Из уравнения (5) следует, что:

$$q = \frac{k_\Phi}{\rho_П \cdot g} \cdot \frac{\partial P_C}{\partial x}.$$

Таким образом, чтобы определить расход сока (объемную скорость фильтрации), необходимо дифференцировать по x уравнение (35). В результате получим:

$$q = \frac{k_\Phi}{\rho_П \cdot g} \cdot P \cdot \frac{2}{h} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot h} \cdot x\right) \cdot e^{-\frac{\pi^2 \cdot a}{4 \cdot h^2} \cdot t}. \qquad (38)$$

5. Из решения (35) видно, что изменения физико-механических свойств сокостружечной смеси, которые учтены параметром a, влияют на распределение давлений P_C и P аналогично изменению продолжительности процесса.

Выводы

Полученные решения описывают изменение параметров, характеризующих состояние сокостружечной смеси в разные моменты времени ее пребывания в аппарате. Фильтрационная способность слоя стружки под действием давления, которое вызвано силовым воздействием лопастей транспортной системы, формирует температурные поля в аппаратах, поскольку в большинстве из них нагревание стружки происходит за счет передачи тепла стружке от нагретого сока. Фильтрационная способность слоя стружки косвенно характеризует протекание массообменных процессов между твердой фазой и экстрагентом. Повышение скорости фильтрации слоя стружки вызывает однозначное увеличение скорости массообменных процессов.

На основе полученных результатов математического моделирования процесса сжатия пористой среды был разработан волнообразный профиль транспортной системы, при движении которого поочередно вызывалось сжатие пористого слоя и последующее его увеличение. Вызванные механическим воздействием пульсационные низкочастотные колебания сокостружечной смеси приводят к заметной интенсификации массообменных процессов при ограниченной технологическими возможностями и экономической целесообразностью объемной скорости экстрагента.

Результаты математического моделирования фильтрационной способности слоя позволяют провести профилирование рабочей поверхности элементов транспортных систем при разработке новых и модернизации существующих промышленных экстракторов различных типов и производительности.

Список литературы

1. Wave motion and heat and mass transfer of the disperse phase under the conditions of low-frequency gas pulsations Original Research Article International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 53, Issues 15–16, July 2010, Pages 3213-3221 P.V. Akulich, A.V. Akulich, V.L. Dragun.

2. Верхола, Л.А. Гидродинамические процессы в колонных диффузионных установках / Л.А. Верхола, Н.Н. Пушанко // Цукор України. – 2008. – № 6. – С. 33–41.

3. Люлька, Д.Н. Зависимость интенсивности массоотдачи в системе «свекловичная стружка – диффузионный сок» от конструкции транспортных систем колонных диффузионных аппаратов / Д.Н. Люлька, А.А. Серегин // Сахар. – 2010. – № 3. – С. 47–48.

4. Василяка, А. Пути повышения тепловой и технологической эффективности диффузионных установок / А. Василяка, Л. Верхола, М. Ладановский // Сахар и свекла. – 2011. – № 1. – С. 22–24.

5. Пушанко, М.М. Розподіл питомого навантаження стружки в об'ємі колонних дифузійних апаратів / М.М. Пушанко, А.М. Парахоня // Цукор України. – 2012. – № 9. – С. 12–16.

LOW FREQUENCY OSCILLATIONS OF PRESSURE IN HETEROGENEOUS SYSTEMS AS A WAY TO INTENSIFY MASS TRANSFER PROCESSES

D.N. Lyul'ka*, V.V. Ponomarenko, S.Yu. Lementar

National University of Food Technologies,
68, Volodymyrska Str., Kyiv, 01601, Ukraine

**e-mail: lulkadm@ukr.net*

Received: 27.04.2015
Accepted: 08.07.2015

The intensification of mass transfer processes has been considered by the example of the sucrose extraction from beet chips under the influence of low frequency mechanical oscillations on a juice-chips mixture. The formation and the layer movement of the juice-chips mixture have been investigated under the influence of variable force fields that are generated by the rotating blades of the handling system of the column diffuser, and their impact on the filtering ability of the layer, and the degree of juice-chips mixture warming respectively, the rate of sucrose mass transfer. The problem of thickening the layer of juice-chips mixture has been solved,

which enables to reveal the influence of several factors on the pressure distribution in the layer and filtering of the extracting agent through the layer of beet chips. The law governing the change in pressure over time for any fixed section of a layer, has been obtained as well as the law of changes in pressure through the layer height for any fixed period of time. The pressure distribution in juice-chips mixture under the influence of the handling systems in various types of devices affects the filtration ability of the beet chips layer and thus forms the temperature fields in the apparatuses. The results of mathematical modeling of the porous medium compression for the wave-like profile of the handling blades of diffusers have been obtained, which cause pulsating low frequency oscillations of juice-chips mixture. This leads to a significant intensification of mass transfer processes. The results of studies are recommended for profiling the working surface of elements of handling systems, and for developing new and modernizing the existing commercial extractors.

Diffusion, juice, beet chips, juice-chips mixture, filtration, pressure, structural and mechanical properties

References

1. Akulich P.V., Akulich A.V., Dragun V.L. Wave motion and heat and mass transfer of the disperse phase under the conditions of low-frequency gas pulsations Original Research Article. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, July 2010, vol. 53, iss. 15–16, pp. 3213–3221.

2. Verhola L.A., Pushanko N.N. Gidrodinamicheskie processy v kolonnyh diffuzionnyh ustanovkah [Hydrodynamic processes in columned diffusive installations]. *Zhurnal «Cukor Ukraïni»*, 2008, no. 6, pp. 33–41.

3. Ljul'ka D.N., Seregin A.A. Zavisimost' intensivnosti massootdachi v sisteme «sveklovichnaja struzhka – diffuzionnyj sok» ot konstrukcii transportnyh sistem kolonnyh diffuzionnyh apparatov [Dependence of the intensity mass transfer in the system "beet chips - diffusion juice" on the design of transport systems of column diffusers]. *Sahar* [Sugar], 2010, no. 3, pp. 47–48.

4. Vasiljaka A., Verhola L., Ladanovskij M. Puti povyshenija teplovoj i tehnologicheskoj jeffektivnosti diffuzionnyh ustanovok [Ways to improve the thermal and technological efficiency diffusion systems]. *Sahar i svekla* [Sugar and beet], 2011, no. 1, pp. 22–24.

5. Pushanko M.M., Parahonja A.M. Rozpodil pitomogo navantazhennja struzhki v ob'єmi kolonnih difuzijnih aparativ [Average specific load chips in volume columnar diffusion facilities]. *Zhurnal «Cukor Ukraïni»*, 2012, no. 9, pp. 12–16.

Дополнительная информация / Additional Information

Люлька, Д.Н. Низкочастотные колебания давлений в гетерогенных системах как способ интенсификации массообменных процессов / Д.Н. Люлька, В.В. Пономаренко, С.Ю. Лементарь // Техника и технология пищевых производств. – 2015. – Т. 38. – № 3. – С. 94-100.

Lyul'ka D.M., Ponomarenko V.V., Lementar S.Yu. Low frequency oscillations of pressure in heterogeneous systems as a way to intensify mass transfer processes. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2015, vol. 38, no. 8, pp. 94-100 (In Russ.).

Люлька Дмитрий Николаевич
канд. техн. наук, доцент кафедры технологического оборудования и компьютерных технологий проектирования, Национальный университет пищевых технологий, 01601, Украина, г. Киев, ул. Владимирская, 68, тел.: +38 (044) 289-54-72, e-mail: lulkadm@ukr.net

Пономаренко Виталий Васильевич
канд. техн. наук, доцент кафедры технологического оборудования и компьютерных технологий проектирования, Национальный университет пищевых технологий, 01601, Украина, г. Киев, ул. Владимирская, 68

Лементарь Святослав Юрьевич
канд. техн. наук, доцент кафедры технологического оборудования и компьютерных технологий проектирования, Национальный университет пищевых технологий, 01601, Украина, г. Киев, ул. Владимирская, 68

Dmytro N. Lyul'ka
Cand. Tech. Sci., Associate Professor of the Department of Technological Equipment and Computer Design Technology, National University of Food Technologies, 68, Volodymyrska Str., Kyiv, 01601, Ukraine, phone: +38(044) 289-54-72, e-mail: lulkadm@ukr.net

Vitaliy V. Ponomarenko
Cand. Tech. Sci., Associate Professor of the Department of Technological Equipment and Computer Design Technology, National University of Food Technologies, 68, Volodymyrska Str., Kyiv, 01601, Ukraine

Svyatoslav Yu. Lementar
Cand. Tech. Sci., Associate Professor of the Department of Technological Equipment and Computer Design Technology, National University of Food Technologies, 68, Volodymyrska Str., Kyiv, 01601, Ukraine