

И. Б. Ефремов, А. Н. Николаев, В. Ф. Шарафутдинов,
Б. А. Ефремов, А. В. Шарафутдинова

ГИДРОДИНАМИКА И МАССООБМЕН В ПУЛЬСАЦИОННОМ ЭКСТРАКТОРЕ ВНЕШНЕ УРАВНОВЕШЕННОГО ТИПА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ С УПРУГОЙ КЛЕТЧАТКОЙ

Ключевые слова: экстракция, пульсация, резонанс, плоды, клетчатка, деформация.

Рассмотрены особенности гидродинамики и массообмена пульсационного процесса экстракции растительного сырья с упругой клетчаткой. Приведены аналитические выражения для расчёта резонансных частот пульсаций, скоростей движения растворителя в поровом пространстве сырья и давления газа, обеспечивающих ресурсосберегающую технологию.

Key words: extraction, pulsation, resonance, fruits, cellulose, deformation.

Features of hydrodynamic and mass transfer the pulsation process of extraction of vegetative raw material with elastic cellulose are considered. Analytical expressions for calculation of resonance frequencies of pulsations, of traveling speeds of solvent in a pore space of raw materials and pressure of the gas, providing power saving up technology are resulted.

В настоящее время на предприятиях, производящих пищевые продукты широко используют экстракты из растительного сырья. В зависимости от объектов экстрагирования проблемы интенсификации процесса решаются методами совершенствования технологии и оборудования, повышением эффективности использования сырья и энергетических ресурсов[1,2]. Одними из потребителей природного сырья являются производства ликероводочных изделий и лекарственных препаратов. В практике ликероводочного производства используют более 25 наименований свежих, замороженных, сухих плодов и трав [3], имеющих клетчатку способную к набуханию при контакте с жидкостью и деформации при воздействии усилий извне.

К числу перспективных экстракционных аппаратов интенсивного действия относятся пульсационные и вибрационные экстракторы. Как известно, эти экстракторы работают по общему принципу – путем сообщения колебательного возврата – поступательного движения перерабатываемой среде и отличаются лишь способом подвода внешней энергии. В пульсационных экстракторах колебания перерабатываемой среде сообщаются с помощью внешнего пульсатора. В вибрационных – внешняя энергия сообщается посредством движущейся внутренней насадки. Использование высокоэффективных аппаратов сдерживается по причинам истирания твердого сырья в период пульсирующего движения и сложностью фильтрации экстрактов от мелко дисперсных частиц.

Явными преимуществами, при сравнении этих двух типов экстракторов, обладают периодически действующие внешне уравновешенные пульсационные экстракторы горизонтального рис.1 и вертикального [4] рис. 2 исполнения с пневматической системой пульсации.

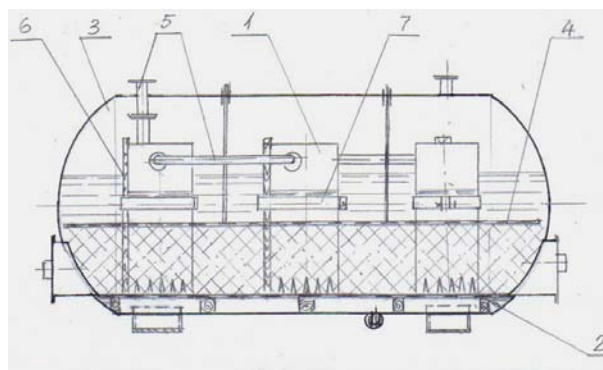


Рис. 1 - Экстрактор горизонтального типа

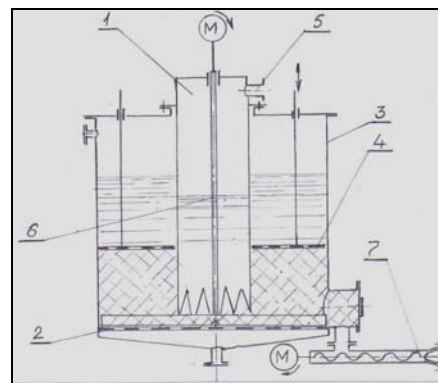


Рис. 2 - Экстрактор вертикального типа

Пульсационные экстракторы являются системами, в которых формируются вынужденные колебания (пульсирующий поток) и свободные колебания, определяемые конструкцией аппарата. Подсистема технологического аппарата состоит из пульсационного цилиндра 1, встроенных в ёмкость 3 неподвижных конструктивных элементов "ложного" дна 2, тарелки 4, прижимающей сырьё, а также гетерогенной системы в виде насыпных слоёв сырья, имеющих малые гидравлические диаметры проходных сечений. Импульсы давления подаются в экстракторы через патрубки 5 от пульсаторов, например, золотникового типа [5].

Теория и практика показывают [6], что резонанс на входе в пульсопровод является необходимым условием максимальной отдачи активной мощности технологическому аппарату. В этих экстракторах импульс давления на среду передаётся через газовую подушку. Аппараты таких конструкций позволяют перерабатывать большие объёмы сырья. Работа в области резонансных частот пульсаций даёт значительную экономию энергии и создает условия для высокой эффективности массопередачи.

В большинстве исследовательских работ рассматриваются вопросы расчёта собственных частот колебательных систем, амплитуды пульсации в аппарате, гидравлических сопротивлений, энергетических затрат.

Для аппаратов с газовой подушкой в пульсационных камерах собственная частота колебаний f_0 может быть определена по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m p_0 S_1}{\rho h_1^0 \bar{V}} + \frac{g}{h_1^0}} \quad (1)$$

где m - показатель политропы; p_0 - среднее значение величины перепада давления в пульсационной камере; S_1 - площадь сечения пульсационной камеры; ρ - плотность жидкости; h_1^0 - уровень жидкости в пульсационной камере; g - ускорение силы тяжести; $\bar{V}$ - средний объём газа в пульсационной камере.

Промышленные пульсационные экстракторы периодического действия работают на частотах ниже резонансных и при невысоких пульсационных скоростях движения экстрагента.

При сжатии из плодов вытесняется растворитель с растворёнными экстрактивными веществами. Извлечение их происходит значительно быстрее и, в большем количестве, чем диффузионным способом. При этом порозность слоя сырья и фильтрация растворителя уменьшаются. Однако изменение проницаемости слоёв плодов в экстракторах при малых числах Re оказывается незначительным. Время сжатия и восстановления исходной формы частиц различны. На рис.3 представлено поведение слоя рябины красной в промышленном пульсационном экстракторе. Периоды действия импульсов давления (В) и деформации (С) плодов в слое не совпадают и резонансные явления в аппарате отсутствуют.

Исследования показали рис. 4, что при восстановлении первоначального значения проницаемости слоя в состоянии насыщения (D) плодов растворителем, а также равенстве периода импульса давления периоду деформации достижимы резонансные явления. Увеличивается деформация сжатия более чем на 12%, а концентрация веществ в экстракте возрастает на 17%.

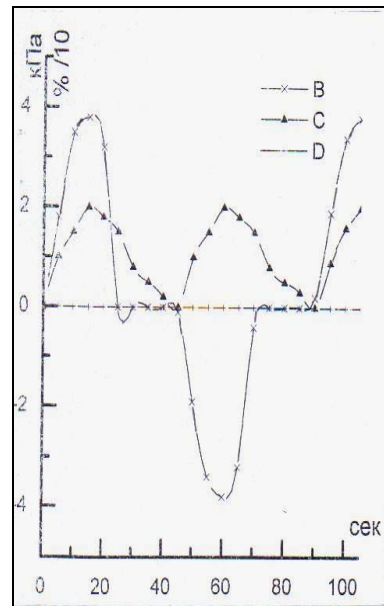


Рис. 3 – Влияние пульсаций давления (кПа) на деформацию (%) плодов при отсутствии резонанса

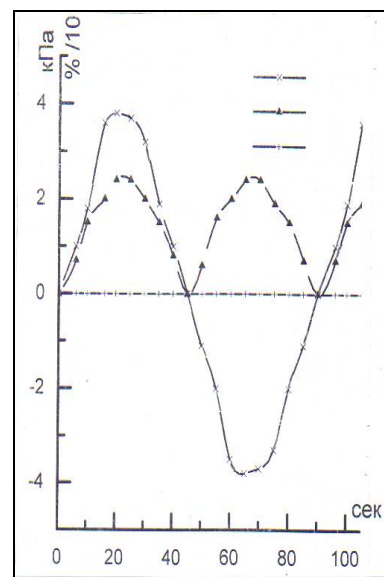


Рис. 4 - Влияние пульсаций давления (кПа) на деформацию (%) плодов в режиме резонанса частот

Клетчатка перерабатываемого сырья при обработке водно-спиртовой смесью и определённых пульсациях давления становится упругой и деформируемой и под действием импульсов испытывает только деформации сжатия, а восстановление структуры происходит за счет упругих свойств клетчатки[7]. При сжатии из плодов вытесняется растворитель с растворёнными экстрактивными веществами. Извлечение их происходит значительно быстрее и, в большем количестве, чем диффузионным способом. При этом порозность слоя сырья и фильтрация растворителя уменьшаются. Однако изменение проницаемости слоёв плодов в экстракторах при малых числах Re

оказывается незначительным. Время сжатия и восстановления исходной формы частиц различны. На рис.3 представлено поведение слоя рябины красной в промышленном пульсационном экстракторе. Периоды действия импульсов давления (В) и деформации (С) плодов в слое не совпадают и резонансные явления в аппарате отсутствуют.

Исследования показали рис.4, что при восстановлении первоначального значения проницаемости слоя в состоянии насыщения (D) плодов растворителем, а также равенстве периода импульса давления периоду деформации достижимы резонансные явления. Увеличивается деформация сжатия более чем на 12%, а концентрация веществ экстракте возрастает на 17%.

Гидродинамика периодически действующих пульсационных экстракторов с неподвижным слоем сырья рассматривается как фильтрация пульсирующего потока жидкости сквозь пористый слой. Дифференциальные уравнения для определения основных гидродинамических параметров [8] получены с учетом следующих допущений: фильтрация в слое сырья подчиняется закону Дарси; изменение давления в газовой подушке пульсационной камеры происходит по закону гармонических колебаний, что характерно для большинства промышленных пульсационных аппаратов; исключен при подаче импульса проскок сжатого газа из пульсационной камеры в зону перерабатываемого твердого сырья. Решение дифференциальных уравнений представлено выражениями для определения гидродинамических параметров работы пульсационного экстрактора

$$H = 1 - \frac{P_0}{2(1+S)} + \frac{P_0(\beta \cos 2\pi\tau + \sin 2\pi\tau)}{2(1+S)(1+\beta^2)} \quad (2)$$

$$V = \frac{P_0(-\cos 2\pi\tau + \beta \sin 2\pi\tau)}{2(1+\beta^2)} \quad (3)$$

$$P = 1 + \frac{SP_0}{2(1+S)} + \frac{P_0[\beta \sin 2\pi\tau - (1+S+S\beta^2)\cos 2\pi\tau]}{2(1+S)(1+\beta^2)} - \beta \left[\gamma + \frac{P_0(\beta \sin 2\pi\tau - \cos 2\pi\tau)}{2(1+\beta^2)} \right] \quad (4)$$

$$\text{где } \beta = \frac{\alpha(1+S)}{2\pi}; \xi = \frac{X}{\delta}; H = \frac{h_1}{h_1^0}; P = \frac{p}{\rho g h_1^0};$$

$$P_1 = \frac{p_1}{\rho g h_1^0}; S = \frac{S_1}{S_2}; \tau = \frac{t}{T}; \alpha = \frac{\kappa \rho g T}{\mu \delta S};$$

$$V = \frac{W\mu\delta}{\kappa\rho g h_1^0}; \gamma = \frac{\delta}{h_1^0} \text{ - безразмерные величины.}$$

T – период колебаний давления, W – скорость фильтрации; P – избыточное давление в жидкости; μ – динамическая вязкость жидкости; K – константа проницаемости слоя.

Формулы (2),(3),(4) показывают, что при гармонических колебаниях жидкости в аппарате уровень H жидкости в пульсационной камере и скорость V фильтрации принимают максимальные и минимальные значения, определяемые из равенств

$$V_{max} = \frac{1}{2} \frac{P_0}{\sqrt{1+\beta^2}}; \quad (5)$$

$$V_{min} = -\frac{1}{2} \frac{P_0}{\sqrt{1+\beta^2}} \quad (6)$$

$$H_{max} = 1 + \left(\frac{P_0}{2(1+S)} \right) \left(-1 + \frac{\beta}{\sqrt{1+\beta^2}} \right); \quad (7)$$

$$H_{min} = 1 - \left(\frac{P_0}{2(1+S)} \right) \left(1 + \frac{\beta}{\sqrt{1+\beta^2}} \right) \quad (8)$$

Для исключения проникновения воздуха в слой ягод из пульсационной камеры, необходимо выполнить неравенство $H_{min} > 0$. Используя (8) и выражение $P_0 = \frac{p_0}{\rho g h_1^0}$ получаем ограничение, накладываемое на амплитуду колебаний давления в пульсационной камере

$$p_0 \leq \frac{2\rho g h_1^0 (1+S)\sqrt{1+\beta^2}}{\beta + \sqrt{1+\beta^2}} \quad (9)$$

Для описания напряженного состояния зернистого слоя ягод были использованы известные уравнения фильтрационной консолидации. Уравнения, наряду с законом Дарси и уравнениями неразрывности, включают в себя суммарное уравнение движения (квазиравновесия) жидкой и твердой фаз. Решение этих уравнений позволило $U = U(\sigma_{xx}^f)$ установить связь между напряженным состоянием слоя ягод и усилиями деформации, формируемыми колебаниями давления пульсации в виде зависимости

$$\sigma = -\frac{P_0}{2\sqrt{1+\beta^2}} \left(\left(\xi - \frac{1}{2} \right) \sin 2\pi\tau + \frac{1}{2} |\sin 2\pi\tau| \right) \quad (10)$$

Из формулы (10) следует, что напряжения σ , возникающие в слое, вызывают объёмные деформации, приводящие к переупаковке частиц и изменению проницаемости слоя, а также к деформации скелета их клеточной структуры. Деформации клетчатки в частицах изменяют их пористость ε за счёт отжима жидкости из пор. Поэтому реологические свойства частиц, определяемые связью напряжение-деформация, близкой к упругой, могут быть представлены зависимостью вида $\varepsilon = \varepsilon(\sigma_{xx}^f)$. Для каждого вида сырья эта зависимость определяется экспериментально, а в аппарате проще отследить напряжённо-деформационное состояние объёма V зернистого слоя и самих частиц, т.е. $V = V(\sigma_{xx}^f)$

При деформировании частиц с пористой структурой процесс массопередачи определяется не столько диффузией, то есть разностью $(C_2 - C_1)$, сколько объёмами жидкости, выходящей из частиц и поступающей в них при периодическом сжатии и

следующей за сжатием разгрузке[9] Полученное выражение

$$\frac{c_2^0}{c_2} = \frac{\varepsilon^0 (1 - \varepsilon^0) + \frac{c_1}{c_2} (\varepsilon^0 - \varepsilon^*)}{\varepsilon^0 (1 - \varepsilon^*)} \quad (11)$$

даёт возможность качественно оценить изменение концентрации экстрагируемых веществ в экстракте при сжатии плодов под действием пульсирующего давления.

Изменение проницаемости слоя, в свою очередь, изменяет и скорость фильтрации растворителя. Однако это изменение скорости столь мало, что не оказывает существенного влияния на процесс переноса массы от частиц в экстрагент. Деформации же самих частиц оказывают значительное влияние на процесс экстрагирования.

Полезная работа пульсирующего потока в технологическом аппарате совершается только благодаря активной мощности поступающей через пульсатор и пульсопровод от источника энергии. Энергетическая оптимизация колебательных систем пульсации, в целом, определяется согласованностью входящих в неё подсистем

Показано, что только при малом активном гидравлическом сопротивлении технологического аппарата достигается резонансный режим работы. При этом расход воздуха становится минимальным, а на создание пульсационного режима затрачивается мощность в 1,4 раза меньше чем в пульсационных экстракторах иных конструкций. Расчеты, приведенные в работе, выполнены для статически и динамически уравновешенных аппаратов. При экстрагировании красной рябины значение p_0 соответствовало 0 – 9 кПа. Собственная частота

колебаний f_0 пульсации, вычисленная по формуле (1) с использованием зависимости (9), соответствовала значениям 3,2 и 2,2 кол/мин, а рабочая – 2,75 и 2 кол/мин, соответственно. Выход аппаратов на установившийся пульсационный режим был осуществлён за пять периодов пульсаций.

Литература

1. А.А.Лапин, П.А. Гуревич, М.К.Герасимов, Б.А. Ефремов, В.Ф. Шарафутдинов, О.Н. Рябый, III Всероссийская конференция "Химия и технология растительных веществ". (Саратов, сентябрь7-10, 2004) с.205-207
2. Б.А. Ефремов, М.К. Герасимов, И.Б. Ефремов, Н.В. Солодовникова. Четвертая международная научно – практическая конференция "Прогрессивные технологии и современное оборудование – важнейшие составляющие успеха экономического развития предприятий спиртовой и ликероводочной промышленности" (Москва, апрель23-24,2003) с.280
3. О.В.Евдокимова. В сб. Нетрадиционные природные ресурсы, инновационные технологии и продукты. В.15. РАЕН, Москва, 2007. С.189-194.
4. Пат. РФ №2225242 (1997)
5. С.М.Карпачева. Пульсационная аппаратура. Пульсаторы.В1, Москва. Атомиздат,1980. С 28.
6. А.И.Гурьянов. Дисс. докт. техн. наук КГТУ, Казань,1996. 355 с.
7. И.Б.Ефремов, В.Ф.Шарафутдинов, А.Н.Николаев, Б.А.Ефремов, Вестник Казан. технол. ун-та,14,19,148-154 (2011).
8. И.Б.Ефремов, В.Ф.Шарафутдинов, Н.А.Николаев, Б.А. Ефремов, ХИПС,2 ,53-56(2005)
9. И.Б.Ефремов, В.Ф.Шарафутдинов, Н.А.Николаев, Б.А. Ефремов, ХИПС,5 ,23-26(2011)

© И. Б. Ефремов – инж. каф. оборудования пищевых производств КНИТУ, OPP-SRV@rambler.ru; А. Н. Николаев – д.т.н., проф., зав. каф. оборудования пищевых производств КНИТУ; В. Ф. Шарафутдинов – д.т.н., проф. каф. моделирования экологических систем К(П)ФУ; Б. А. Ефремов – к.т.н., доц. каф. оборудования пищевых производств КНИТУ; А. В. Шарафутдинова – к.т.н., доц. каф. химии и инженерной экология в строительстве КГАСУ.