

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТИПЫ  
ЭКСТРАКЦИОННЫХ АППАРАТОВ  
ДЛЯ СИСТЕМЫ «ТВЕРДОЕ ТЕЛО – ЖИДКОСТЬ»  
(аспекты теории и анализ конструкций)**

**Ю.И. Шишацкий, Е.И. Мельникова, С.Ю. Плюха,  
Е.В. Кузьмин, С.С. Иванов, М.А. Самойлова**

*ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет  
инженерных технологий», г. Воронеж*

*Рецензент д-р техн. наук, профессор А.Н. Остриков*

**Ключевые слова и фразы:** классификация аппаратов; конструкции; математические модели процессов; способы интенсификации; экстрагирование.

**Аннотация:** Обоснована актуальность экстрагирования. Проведена классификация основных типов экстракторов и теоретические аспекты процесса. Проанализированы конструкции аппаратов. Рассмотрены способы интенсификации процесса экстрагирования.

Экстрагирование в системе «твердое тело – жидкость» является одной из важнейших стадий технологических процессов. Экстракты широко используются в хлебопекарной, кондитерской, молочной, пивобезалкогольной, ликероводочной и других отраслях промышленности. Это, в определенной степени, способствует решению проблемы сбалансированного питания и сокращению дефицита животных белков, недостатка полиненасыщенных кислот, витаминов, минеральных веществ и микроэлементов.

Промышленные экстракционные аппараты можно подразделить на периодически и непрерывно действующие. Аппараты периодического действия применяются только в производствах с небольшими массовыми потоками. В то же время оба типа аппаратов должны обеспечивать протекание процесса в условиях наиболее близких к противотоку при минимальном гидродинамическом сопротивлении относительно движению фаз, соотношении расхода масс экстрагента и твердых частиц и суммарных внутреннем и внешнем диффузионных сопротивлениях [1].

---

Шишацкий Юлиан Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры промышленной энергетики; Мельникова Елена Ивановна – доктор технических наук, профессор кафедры технологии молока и молочных продуктов; Плюха Сергей Юрьевич – аспирант кафедры промышленной энергетики, e-mail: pluh\_atr@mail.ru; Кузьмин Евгений Викторович – аспирант кафедры промышленной энергетики; Иванов Сергей Сергеевич – аспирант кафедры промышленной энергетики; Самойлова Марина Александровна – аспирант кафедры технологии молока и молочных продуктов, ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», г. Воронеж.

На рисунке 1 предлагается общая классификация основных типов экстракторов.

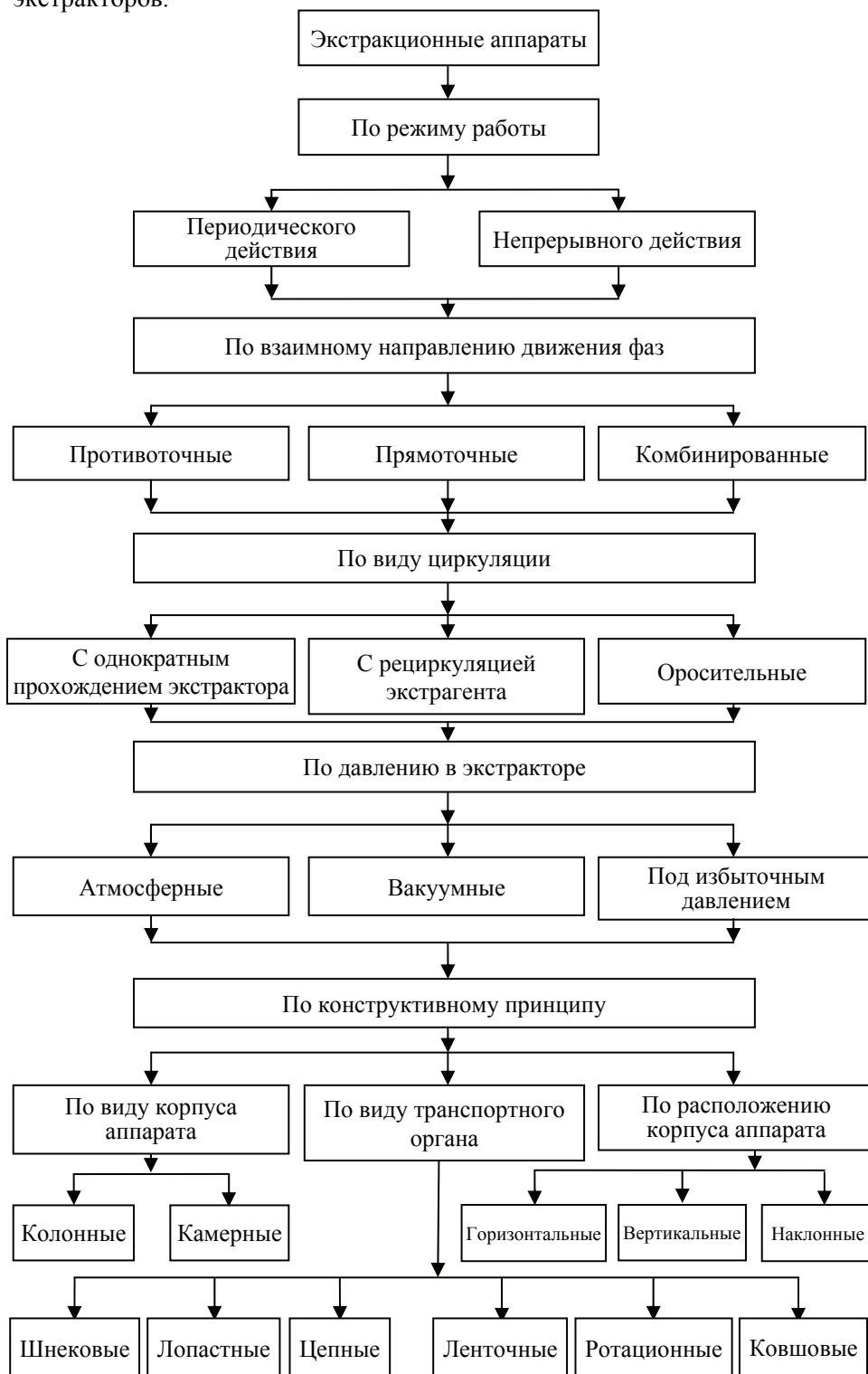


Рис. 1. Общая классификация основных типов экстракторов

Для расчета экстрактора необходимо иметь данные о скоростях протекания процесса тепло- и массопередачи и о гидродинамической обстановке или структуре потоков в экстракторе.

К числу основных факторов, влияющих на работу экстрактора, следует отнести:

1) термодинамические – константы фазового равновесия; эта группа факторов определяет направление процесса, технологические параметры проведения процесса и оказывает влияние на скорость и селективность всего процесса;

2) кинетические – константы скорости и энергии активации основных и побочных процессов;

3) массообменные – коэффициенты массопередачи исходных и промежуточных веществ и конечных продуктов процесса;

4) теплообменные – коэффициенты теплопередачи между фазами и коэффициенты теплопередачи между средой и теплообменными устройствами; величина поверхности внешнего теплообмена;

5) гидродинамические – характеристики межфазной поверхности и перемешивания по сплошной и дисперсной фазам.

Построенные модели экстракторов должны точно отражать физическую сущность процесса и иметь достаточно простой математический вид, удобный для практических расчетов и выбора метода оптимизации.

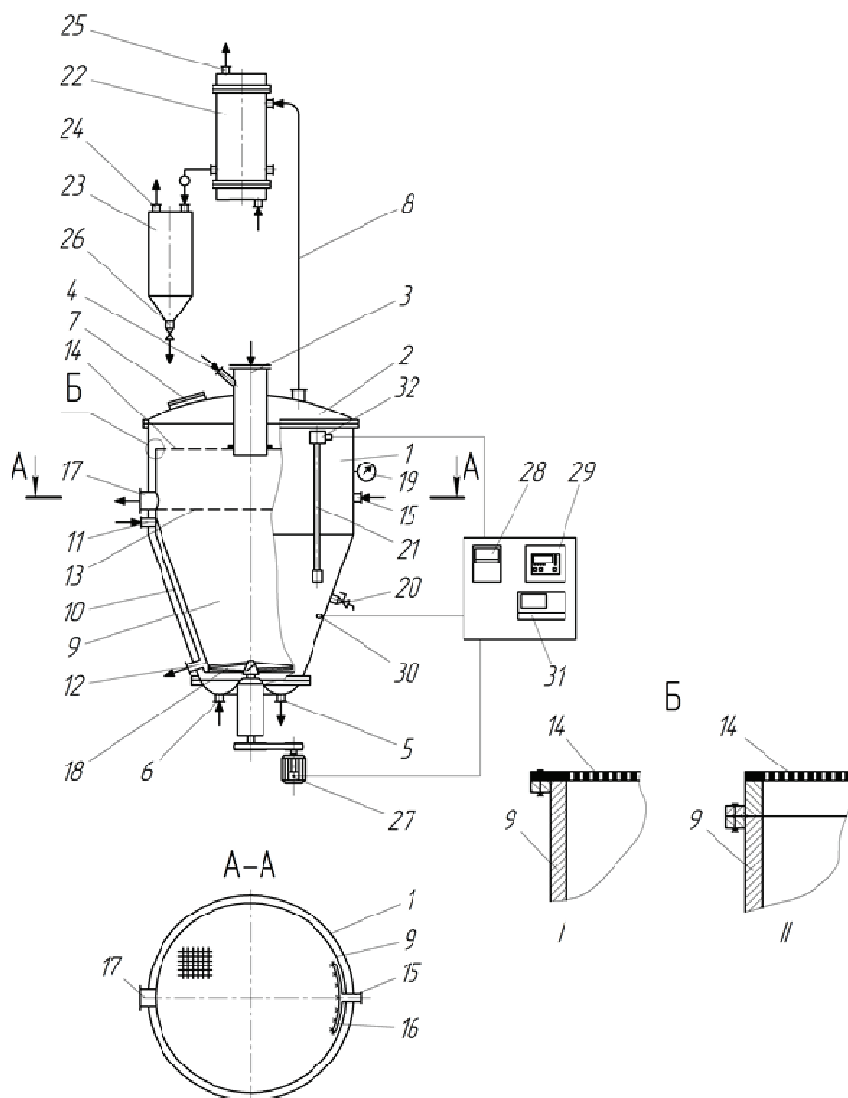
Рассмотрим некоторые типы экстракторов.

К аппаратам периодического действия относятся настоящие чаны, экстракторы с пневматическим перемешиванием, периферическим аэролифтом, мешалкой, диффузоры с разделительным перколятором (ситом).

Установка периодического действия с псевдооживленным слоем представлена на рис. 2 [16]. Высота аппарата 2280 мм, диаметр цилиндрической части 1420 мм, полный объем экстрактора 3 м<sup>3</sup>, ширина зазора между корпусом и разделителем 150 мм.

Исходный материал и экстрагент загружается в резервуар через патрубки 3 и 4, включается подача теплоносителя в рубашку 10 и подача хладоносителя в конденсатор 22. В процессе заполнения резервуара воздух, содержащий пары экстрагента и легколетучих компонентов материала, вытесняется по воздушной трубке 8 в конденсатор, откуда конденсат стекает в сборник 23, а воздух удаляется через патрубок 25.

Температура раствора контролируется с помощью термометра 19 и терморегулятора 29 с термопарой 30, а уровень заполнения резервуара – с помощью водомерного стекла 21 и датчика уровня 31 с уровнемером 32. При пуске насоса 18 с подачей вверх, в резервуаре организуется циркуляционное движение раствора: он совершает восходящее движение внутри разделителя, проходя через перколятор 13, и образует псевдооживленный слой с материалом, заключенным в цилиндрической части разделителя между перколятором и сетчатой крышкой 14. Затем раствор опускается вниз в пространстве между разделителем и стенкой корпуса. В результате осуществляется процесс экстрагирования в активном псевдооживленном слое. При достижении заданной концентрации экстрактивных веществ в пробах, отбираемых в процессе с помощью крана 20, реверсируя подачу



**Рис. 2. Принципиальная схема опытно-промышленной установки:**

1 – корпус; 2 – крышка; 3–6, 11, 12, 15, 17, 24–26 – патрубки; 7 – смотровой люк; 8 – воздушная труба; 9 – разделитель; 10 – рубашка; 13 – перколятор; 14 – сменная сетчатая крышка; 16 – размыватель; 18 – осевой насос; 19 – термометр; 20 – пробный кран; 21 – водомерное стекло; 22 – поверхностный конденсатор; 23 – сборник конденсата; 27 – электродвигатель АИР80А4 (1,1 кВт, 1500 об/мин); 28 – преобразователь частоты ЕЗ-8100; 29 – измеритель-регулятор двухканальный ОВЕН 2ТРМ1; 30 – термопара ТПК004; 31 – датчик уровня емкостной ДУЕ-1; 32 – уровень ДУЕ-1

насоса, направление циркуляции раствора изменяется на противоположное и материал образует на перколяторе фильтрующий слой. При этом процесс экстрагирования продолжается. При достижении конечной концентрации насос выключается и через патрубок 5 сливается готовый настой. Затем через патрубок 6 подается острый пар с целью прогрева отработанного материала и выпаривания из него остатков экстрагента. Пары поступают в конденсатор, а конденсат отводится из сборника 23 через патрубок 26 для

использования по назначению. По завершению выпаривания через патрубок 15 подается вода в размыватель слоя 16 и отработанный материал вместе с промывной водой выгружается через патрубок 17. Промывная вода, прошедшая через перколятор 13, удаляется через патрубок 5.

В статье [19] приведены результаты исследования процесса извлечения экстрактивных веществ (ЭВ) из плодов рябины обыкновенной и черноплодной на опытно-промышленной установке с псевдооживленным слоем. Установлено (рис. 3), что для рябины

обыкновенной наибольший выход экстрактивных веществ (60 % а.с.в.) и меньшую продолжительность процесса (6,2 ч) имеет место при извлечении 30%-м этанолом (для черноплодной рябины 58 % а.с.в. и 6 ч соответственно). Процесс извлечения экстрактивных веществ на опытно-промышленной установке в активных гидродинамических режимах протекает существенно быстрее и продуктивнее по сравнению с традиционным настаиванием, которое длится более 32 суток.

С ростом температуры увеличивается доля экстрактивных веществ, извлекаемых из сырья 30%-м этанолом. Так, при  $t = 20^\circ\text{C}$  степень извлечения составила 56 % а.с.в., а при  $80^\circ\text{C}$  – 63 % а.с.в. Однако при увеличении температуры следует учитывать лабильность извлекаемых компонентов и энергетическую целесообразность.

Степень измельчения сырья заметно влияет на выход экстрактивных веществ и продолжительность процесса экстрагирования. Слишком сильное измельчение замедляет процесс экстрагирования вследствие забивания сетки экстрактора. Так, при  $d_3 = 3$  мм наблюдается наименьшая продолжительность процесса – 5,05 ч, а при  $d_3 = 2$  мм время экстрагирования увеличивается до 5,1 ч.

С ростом скорости до 0,5 м/с увеличивается интенсивность протекания процесса (время экстрагирования уменьшается с 7,17 до 6,2 ч). Дальнейшее увеличение скорости приводит к замедлению процесса.

На рисунке 4 показаны зависимости выхода витаминов С и Р от температуры и концентрации экстрагента при экстрагировании сушеных плодов рябины обыкновенной.

Повышение температуры от 20 до  $50^\circ\text{C}$  (см. рис. 4, а) ведет к увеличению выхода витамина С. При изменении температуры от 50 до  $80^\circ\text{C}$  содержание аскорбиновой кислоты в 45%-м растворе этанола снижается с 72 до 23 % от содержания ее в сырье. По всей вероятности, увеличивается эффект его термического разрушения. Максимальное его извлечение 45%-м водным раствором этанола достигается при  $50^\circ\text{C}$  и равняется 72 %.

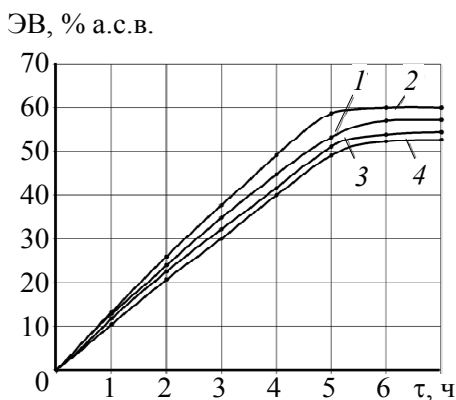


Рис. 3. Кинетика извлечения экстрактивных веществ из плодов рябины обыкновенной сушеной при температуре  $t = 50^\circ\text{C}$ , нагрузке на решетку  $G/F = 2500 \text{ Н/м}^2$ , скорости экстрагента  $v = 0,5 \text{ м/с}$

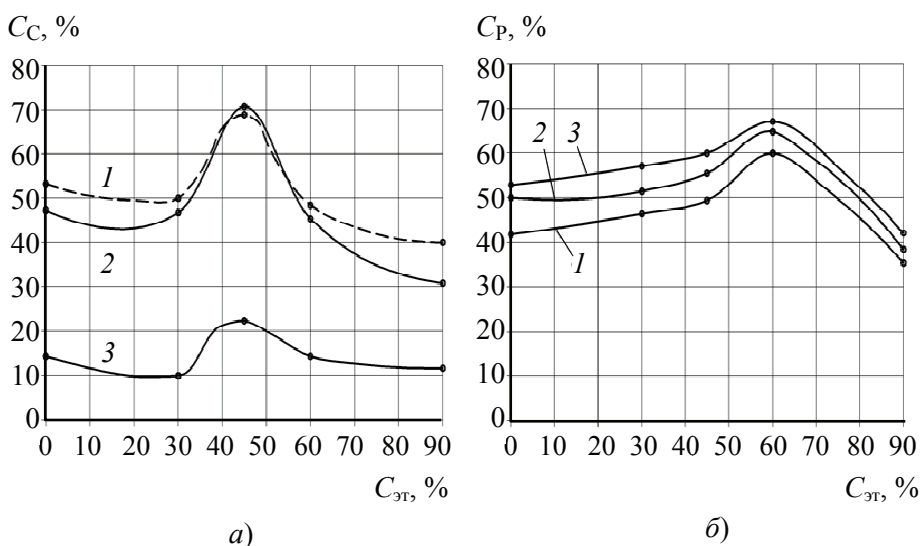


Рис. 4. Зависимости выхода витаминов С (а) и Р (б) от концентрации и температуры экстрагента при  $v = 0,5$  м/с,  $G/F = 2500$  Н/м<sup>2</sup>:  
1 – 20 °С; 2 – 50 °С; 3 – 80 °С

Из рисунке 4, б, видно, что наибольший выход витамина Р наблюдается при извлечении 60%-м раствором этанола. С ростом температуры от 20 до 80 °С концентрация витамина Р в экстракте увеличивается. Наибольшая концентрация отмечена при экстрагировании 60%-м раствором этанола при температуре 80 °С – 67 % от исходного.

Максимальный выход дубильных веществ (69 %) наблюдается при извлечении 60%-м раствором этанола. С ростом температуры до 50 °С выход дубильных веществ увеличивается, а при дальнейшем увеличении температуры снижается.

Наибольший выход флавоноидов имеет место при извлечении 60%-м этанолом и температуре 80 °С (82 %), а наибольший выход антоцианов – при температуре 50 °С 60%-м этанолом (33 %). Таким образом, параметры процесса: температура 50 °С, концентрация этилового спирта 50 % и скорость экстрагента 0,5 м/с обеспечивают максимальный выход физиологически ценных компонентов.

При математическом описании процесса экстрагирования в аппаратах с перемешиванием дисперсной фазы в псевдооживленном слое принимается допущение: частицы твердого материала равномерно распределены во всем рабочем объеме аппарата, перемещение жидкой фазы одномерно и зависит только от одной координаты, совпадающей с высотой аппарата  $H$  и отсчитываемой от плоской распределительной решетки.

Модель [16] включает линейное неоднородное уравнение второго порядка

$$\varepsilon(D_L + D_M) \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \varepsilon\omega_C \frac{\partial C}{\partial z} - BC = BC_H, \quad (1)$$

где

$$B = 7,9D^{\frac{2}{3}} \frac{N_{\text{ч}}}{2\pi\sigma_R\sigma_{\omega}\Gamma_{\frac{4}{3}}} \exp\left(-\frac{3}{2} \frac{\omega_C^2}{\sigma_{\omega}^2}\right) \left[ D_{-\frac{4}{3}}\left(-\sqrt{\frac{2}{\sigma_{\omega}^2}}\omega_C\right) \right] -$$

$$- \left[ D_{-\frac{4}{3}}\left(-\sqrt{\frac{2}{\sigma_{\omega}^2}}\omega_C\right) \right] \frac{1}{\Gamma_{\frac{7}{3}}4\sigma_R^2} \exp\left(-\frac{3}{2} \frac{R_{\text{ч}}^2}{\sigma_R^2}\right) \left[ D_{-\frac{7}{3}}\left(-\frac{R_{\text{ч}}}{\sigma_R}\right) \right],$$

$\Gamma$  – коэффициент, характеризующий форму тела.

Решение уравнения (1) позволило получить зависимость для определения величин концентрации целевого компонента на выходе из аппарата и в объеме аппарата (при  $z \neq H_a$ ):

$$C(z) = -C_{\text{н}} - \frac{\lambda_2 C_{\text{н}}}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{\lambda_1 z} + \frac{\lambda_1 C_{\text{н}}}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 z};$$

$$\lambda_1 = \frac{\varepsilon\omega_C}{2\varepsilon(D_L + D_M)} + \sqrt{\frac{\varepsilon^2\omega_C^2}{4\varepsilon^2(D_L + D_M)^2} + \frac{B}{\varepsilon(D_L + D_M)}};$$

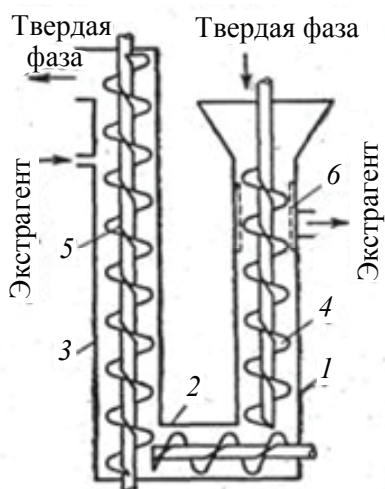
$$\lambda_2 = \frac{\varepsilon\omega_C}{2\varepsilon(D_L + D_M)} - \sqrt{\frac{\varepsilon^2\omega_C^2}{4\varepsilon^2(D_L + D_M)^2} + \frac{B}{\varepsilon(D_L + D_M)}},$$

где  $\varepsilon$  – порозность слоя;  $D_L$  – коэффициент продольного перемешивания;  $D_M$  – коэффициент молекулярной диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $z$  – координата;  $\omega_C$  – скорость движения жидкости,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $C_{\text{н}}$  – концентрация насыщения,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $D$  – коэффициент диффузии целевого компонента в растворе,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $N_{\text{ч}}$  – среднее число частиц в единице объема псевдооживленного слоя;  $\sigma_R, \sigma_{\omega}$  – дисперсии случайных величин  $R_{\text{ч}}$  и  $\omega_D$  соответственно;  $R_{\text{ч}}$  – среднее значение радиуса частиц,  $\text{м}$ ;  $H_a$  – высота аппарата,  $\text{м}$ .

Большое число аппаратов непрерывного действия разработано для экстрагирования из сырья растительного происхождения. В экстракторах колонного типа разделение твердой и жидкой фаз осуществляется в результате разного уровня разгрузки твердой и жидкой фаз. При этом уровень разгрузки жидкой фазы ниже, чем твердой. Колонные аппараты для транспортировки фаз оснащаются шнековыми или лопастными транспортерами.

Получил распространение трехколонный аппарат со шнековыми транспортерами. В каждой из трех колонн вертикального шнекового экстрактора (рис. 5) размещены шнеки. В верхней части загрузочной колонны  $I$  имеется цилиндрическое сито  $b$  для отделения экстракта, выходящего из аппарата, от твердых частиц.

Достоинства аппарата: небольшая площадь, занимаемая экстрактором, практически полное использование всего объема аппарата, а также надежность и простота конструкции. К недостаткам следует отнести дробление твердой фазы при движении по колонне, запрессовка сырья, закручивание твердого материала вместе со шнеками. Вследствие этого массообмен в



**Рис. 5. Трехколонный аппарат с шнековым транспортным органом:**  
 1 – загрузочная колонна; 2 – горизонтальная колонна; 3 – экстракционная колонна;  
 4 – шнек загрузочной колонны;  
 5 – шнек экстракционной колонны;  
 6 – разделительное сито

Для решения задачи использовался метод сеток, что позволило определить изменение концентрации по длине колонны.

В работе [17] проведено математическое описание гидродинамической обстановки в шнековом экстракторе при определенных допущениях. Стационарное уравнение Навье–Стокса в безразмерных переменных в форме Гельмгольца имеет вид

$$\frac{1}{\text{Re}} \Delta \xi - \frac{\partial \psi \partial \xi}{\partial y \partial x} + \frac{\partial \psi \partial \xi}{\partial x \partial y} = 0; \quad (3)$$

$$\Delta \psi = -\xi, \quad (4)$$

где  $\psi$  – функция тока;  $\xi$  – вихрь.

Для решения уравнений (3), (4) использовался метод конечных разностей.

Интенсификация процесса экстрагирования достигается методами дискретно-импульсного ввода энергии [6–8]. Физическая сущность этих методов заключается в том, что подводимая энергия диссипируется в основном вблизи поверхности твердых частиц, а непродуктивные расходы энергии вне этих зон минимальны.

Так, механические колебания обеспечивают непрерывное обтекание твердых частиц жидкостью с переменным вектором скорости. Используются экстракторы с вибрирующими корпусами и специальные вибрирующие устройства, установленные в самом аппарате. Последние применяются преимущественно в экстракторах колонного или емкостного типов. Экспериментально доказано, что наложение поля колебания различной частоты и амплитуды существенно ускоряет внешний массообмен [1, 6, 8, 18].

аппаратах этого типа зачастую недостаточно эффективен. Продольное перемешивание по длине шнекового экстрактора колонного типа описывается однопараметрической диффузионной моделью [3]:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \omega \frac{\partial C}{\partial x}; \quad (2)$$

$$C(0, \tau) = \frac{D_L}{\omega} \Big|_{x=0} + C_{\text{вх}}(\tau);$$

$$\frac{D_L}{\omega} \Big|_{x=L} = 0; \quad C(x, 0) = 0;$$

$$0 \leq x \leq L; \quad \tau \geq 0,$$

где  $C$  – концентрация, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время, ч;  $D_L$  – коэффициент продольного перемешивания;  $x$  – координата;  $\omega$  – доля недоизвлеченного вещества;  $C_{\text{вх}}$  – концентрация на входе.

Возможность интенсификации процесса экстрагирования с применением низкочастотных колебаний рассмотрено в статье [19].

На рисунках 6, 7 представлены кинетические кривые извлечения экстрактивных веществ из сушеной рябины обыкновенной в зависимости от вида экстрагента и температуры при частоте колебаний 50 Гц и амплитуде 10 мм.

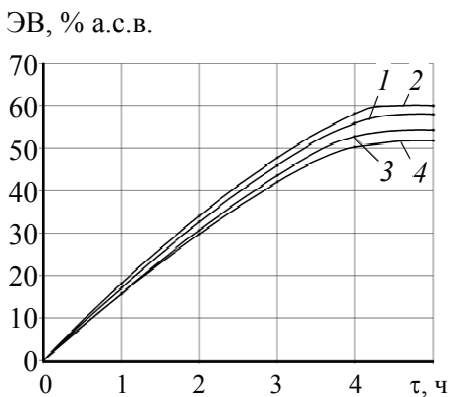
Из полученных результатов видно, что при всех исследованных режимах наиболее интенсивное извлечение наблюдается в течение первых 3,5 ч, затем оно плавно снижается и к 4,5–5 ч практически заканчивается. Также видно, что содержание этанола оказывает влияние на выход экстрактивных веществ, который максимален при извлечении 30%-м раствором этанола – 60 % а.с.в. и минимален при извлечении этанолом – 52 % а.с.в.

Экстрагирование в поле механических колебаний позволяет интенсифицировать процесс. От механических колебаний в упругой среде обычно развиваются пульсации различных масштабов, при этом крупномасштабные переходят в мелкомасштабные, то есть возникает иерархия колебаний. Чем меньше масштаб колебаний, тем большую турбулизацию потока вызывают они в устье капилляров. За счет этого интенсифицируются как внутренняя, так и внешняя диффузии.

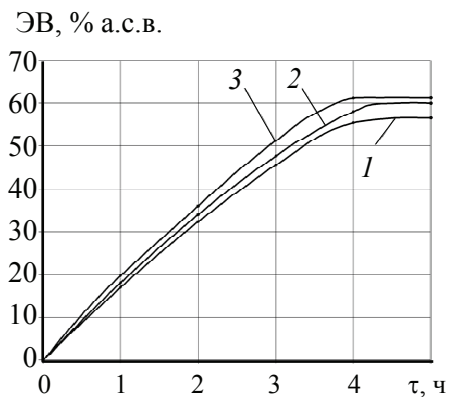
Если продолжительность экстрагирования в псевдооживленном слое составляла 5–6 ч, то при низкочастотных колебаниях 4–4,5 ч. Таким образом процесс сокращается на 1–1,5 ч.

С целью устранения нежелательного нарушения противотока фаз в аппаратах с вибрирующими перфорированными тарелками, связанного с повышением турбулентности потока, осуществляется секционирование вибрирующими перегородками. Последние выполняют также функции транспортирующих устройств [3]. Для расчета производительности транспортирующих перегородок предложена зависимость

$$Q = (V_1 - V_2) \cdot f \cdot n_{\text{п}}, \quad (5)$$



**Рис. 6.** Кинетика извлечения экстрактивных веществ из плодов рябины обыкновенной сушеной при температуре  $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , нагрузке  $G/F = 300 \text{ Н/м}^2$ :  
1 – вода; 2 – 30%-й раствор этанола;  
3 – 60%-й раствор этанола; 4 – этанол



**Рис. 7.** Кинетика извлечения экстрактивных веществ из плодов рябины обыкновенной сушеной в зависимости от температуры, при нагрузке  $G/F = 250 \text{ Н/м}^2$ :  
1 – 20 °C; 2 – 50 °C; 3 – 80 °C

где  $V_1$ ,  $V_2$  – объемы фильтрата, прошедшего через перфорации в течение полупериода колебаний при движении тарелки в сторону транспортировки твердой фазы и в обратном направлении, м<sup>3</sup>;  $f$  – частота колебаний, Гц;  $n_{\text{п}}$  – отношение объемов твердой и жидкой фаз в зоне колебаний.

Для определения величин  $V_1$  и  $V_2$  используется уравнение

$$V = \frac{2AF_a\sqrt{C_0}}{\sqrt{C_0 + \sqrt{(C_{\text{ф}} + C_{\text{п}})k}}}, \quad (6)$$

где  $A$  – амплитуда колебаний перегородки, м;  $F_a$  – площадь поперечного сечения аппарата, м<sup>2</sup>;  $C_0$ ,  $C_{\text{п}}$  – константы, характеризующие гидродинамические особенности переточных окон и перфораций перегородки (равные отношению коэффициентов гидравлических сопротивлений при движении в прямом и обратном направлениях к квадратам их живых сечений);  $C_{\text{ф}}$  – гидравлическая характеристика слоя твердой фазы, образующегося на перегородке в течение полупериода колебаний (прямо пропорциональна удельному сопротивлению осадка, объемной доле твердой фазы в зоне колебаний перегородки и обратно пропорциональна частоте колебаний, плотности жидкости и квадрату относительной площади фильтрования);  $k$  – константа, учитывающая различие плотностей фаз.

Для описания явления массопереноса от твердой частицы к потоку жидкости, движущейся в турбулентном режиме, для процессов экстрагирования, осуществляемых в экстракторах с вибрирующими устройствами, используются двухпараметрические модели, в которых параметрами служат характеристическая длина и скорость.

В том случае, когда необходимо по технологическим соображениям проводить процесс экстрагирования при низких температурах, используются вакуумные аппараты. Конструкция усложняется необходимостью оснащать аппарат герметичными загрузочными и разгрузочными устройствами.

Пульсационные аппараты также позволяют интенсифицировать процесс. Пульсационная подача жидкости в слой твердых частиц повышает скорость массообмена вследствие возникновения движения жидкости в «мертвых зонах», то есть в точках соприкосновения твердых частиц в слое.

Положительное влияние на процесс пульсаций давления сказывается как на стадии капиллярной пропитки частиц, так и при последующем извлечении целевых компонентов из них. В установках с переменным давлением положительно себя зарекомендовал пульсационный резонансный аппарат (**ПРА**).

Гидравлические удары, кавитация, механическая деформация сырья и другие эффекты обеспечивают снижение внутридиффузионного сопротивления и ускорение массопереноса.

Влияние ультразвуковых колебаний на массообмен в системе «твердое тело – жидкость» установлено многими экспериментаторами. Кавитация возникает при некотором пороговом значении интенсивности звука. Затем

число стационарных кавитационных пузырьков и энергия схлопывания единичных пузырьков возрастает до 0,6...0,8 Вт/м. После этого эффективность расходуемой энергии снижается, поскольку образующиеся пузырьки большого размера не успевают схлопываться в период сжатия. Недостатки метода: высокая стоимость аппаратуры, незначительные объемы кавитационных зон (~ 1 л при вводимой мощности 100...300 Вт) [5, 11, 13].

Эффективно применение высоковольтных разрядов в жидкости. В процессе искрового заряда в жидкости возникает плазменная каверна, которая расширяется, а по достижении максимального объема схлопывается. «Плазменный вибратор» снижает вязкость жидкости, существенно увеличивает коэффициент диффузии, интенсифицирует проникновение экстрагента внутрь сырья. Давление в месте схлопывания достигает нескольких тысяч МПа [1, 10, 14, 17].

Поскольку движение жидкости оказывает решающую роль в массообменном процессе в [1] установлено, что

$$\text{Nu} \approx \sqrt{\frac{E\omega d}{pr^2\nu}}; \quad (7)$$

$$\text{Nu} \approx \sqrt{\frac{E\omega d}{pFv}}, \quad (8)$$

где Nu – массообменный критерий Нуссельта, Дж;  $E$  – энергия выделяющаяся в центре сферического объема диаметром  $d$ ;  $\omega$  – число электрических разрядов в секунду;  $p$  – внешнее давление, Па;  $r$  – расстояние частицы от центра, м;  $F$  – площадь поперечного сечения трубы, м<sup>2</sup>;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с.

Метод считается перспективным, однако, сложность аппаратного оформления сдерживает его широкое использование.

Интересные исследования проводятся по экстрагированию из сырья растительного происхождения в режиме вакуумного кипения [4], в электромагнитных полях [2] и др.

Промежуточный отжим упругого пористого сырья, а также экстрагирование в планетарном аппарате с измельчением сырья, позволяет заменить внутридиффузионный режим извлечения на конвективный [9, 12] и др.

Исследованиями последних лет установлено, что получение высококачественных экстракторов из растительного сырья целесообразно вести в качестве растворителя диоксида углерода. Ведутся работы по совершенствованию экстракционной технологии и оборудования с целью интенсификации процесса и применения полученных CO<sub>2</sub> – экстрактов в отрасли пищевой промышленности.

Большое количество конструкций экстракторов объясняется значительным разнообразием видов сырья с различными физико-химическими свойствами, перерабатываемого в этих аппаратах. Предпочтительными можно считать те аппараты, в которых обеспечивается активный гидродинамический процесс с оптимальными размерами частиц. Незначительные габариты аппаратов, минимальная металлоемкость, простота конструкций, удобство в эксплуатации и ремонте в совокупности с перечисленными выше условиями гарантирует их успешное использование в промышленности.

### *Список литературы*

1. Аксельруд, Г.А. Экстрагирование (система твердое тело – жидкость) / Г.А. Аксельруд, В.М. Лысянский. – Л. : Химия, 1974. – 256 с.
2. Белобородов, В.В. Экстрагирование из твердых материалов в электромагнитном поле сверхвысоких частот / В.В. Белобородов // Инженер.-физ. журн. – 1999. – Т. 72, № 1. – С. 141–146.
3. Белоглазов, И.Н. Твердофазные экстракторы / И.Н. Белоглазов. – Л. : Химия, 1985. – 240 с.
4. К вопросу интенсификации процесса экстракции / С.А. Боровикова [и др.] // Тез. междунар. съезда «Актуальные проблемы создания новых лекарственных препаратов природного происхождения». – СПб., 2001. – С. 66–68.
5. Гершал, В.А. Ультразвуковая технологическая аппаратура / В.А. Гершал, А.М. Фридман. – М. : Энергия, 1976. – 319 с.
6. Долинский, А.А. Использование принципа дискретно-импульсного ввода энергии для создания эффективных энергосберегающих технологий / А.А. Долинский // Инженер.-физ. журн. – 1996. – Т. 69, № 6. – С. 35–43.
7. Дискретно-импульсный ввод энергии в теплотехнологиях / А.А. Долинский [и др.]. – Киев : Ин-т техн. теплофизики Нац. акад. наук Украины, 1996. – 206 с.
8. Долинский, А.А. Принципы разработки новых энергосберегающих технологий и оборудования на основе методов дискретно-импульсного ввода энергии / А.А. Долинский, Г.К. Иваницкий // Пром. теплотехника. – 1997. – Т. 19, № 6. – С. 5–9.
9. Способ экстрагирования лекарственного растительного сырья в планетарном аппарате / Е.В. Иванов [и др.] // Хим.-фармацевт. журн. – 2004. – Т. 38, № 11. – С. 29–32.
10. Экстракция биологически активных соединений из растительного сырья импульсными электрическими разрядами / В.Т. Казуб [и др.] ; – М. : Гос. науч.-исслед. ин-т электрон.-механ. приборов, 1998. – 27 с. – (Серия «Химико-фармацевтическое производство» ; вып. 3).
11. Кардашев, Г.А. Тепломассообменные акустические процессы и аппараты / Г.А. Кардашев, Н.Е. Михайлов. – М. : Машиностроение, 1973. – 239 с.
12. Ломачинский, В.А. Экстрагирование с промежуточным отжимом растительного сырья / В.А. Ломачинский. – М. : АгроНИИТЭИПП, 1995. – 24 с.
13. Молчанов, Г.И. Ультразвук в фармации / Г.И. Молчанов. – М. : Медицина, 1980. – 176 с.
14. Наугольник, К.А. Электрические разряды в воде (гидродинамическое описание) / К.А. Наугольник, Н.А. Рой. – М. : Наука, 1971. – 190 с.
15. Пат. 24427409 Российская Федерация, МПК В 01 D 11/02, С 12 G 3/06. Экстракционная установка / Ю.И. Шишацкий, Г.В. Агафонов, Н.Н. Яковлев, С.В. Лавров, С.Ю. Плюха (Россия) ; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технолог. акад. – № 2010102050/05, заявл. 22.01.2010 ; опубл. 27.08.2011; Бюл. № 24. – 1 с. : ил.

16. Простодьяконов, И.О. Явления переноса в процессах химической технологии / И.О. Простодьяконов, Н.А. Марцулевич, А.В. Марков. – Л. : Химия, 1981. – 264 с.
17. Романков, П.Г. Экстрагирование из твердых материалов / П.Г. Романков, М.И. Курочкина. – Л. : Химия. – 256 с.
18. Систер, Р.Г. Принципы повышения эффективности тепломассообменных процессов / Р.Г. Систер, Ю.В. Мартынов. – Калуга : Изд-во Бочкаревой Н., 1998. – 507 с.
19. Исследование кинетики извлечения экстрактивных веществ из плодов рябины в псевдооживленном слое / Ю.И. Шишацкий [и др.] // Вестн. Воронеж. гос. технол. акад. – 2010. – № 1. – С. 90–93.
- 

**Promising Types of Extraction Devices  
for the System of Solid Body-Liquid  
(Aspects of the Theory and Analysis of Structures)**

**Yu.I. Shishatsky, E.I. Melnikova, S.Yu. Plyukha,  
E.V. Kuzmin, S.S. Ivanov, M.A. Samoiloa**

*Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh*

**Key words and phrases:** classification of devices; extraction; mathematical models of processes; structures; ways of intensification.

**Abstract:** The necessity of extraction is described; the classification of the main types of extractors and theoretical aspects of the process are given; the design of devices is analyzed; the ways of intensification of process of extraction are discussed.

---

© Ю.И. Шишацкий, Е.И. Мельникова, С.Ю. Плюха,  
Е.В. Кузьмин, С.С. Иванов, М.А. Самойлова, 2012

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**