

Доцент П.П. Иванов, аспирант М.А. Халтурин

(Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (ун-т)) кафедра машин и аппаратов пищевых производств. тел. (384-2) 39-68-48

E-mail: mapp@kemtipp.ru

Associate Professor P.P. Ivanov, post-graduate M.A. Khalturin

(Kemerovo Institute of Food Science and Technology (university)) Department of machines and equipment of food industries. phone (384-2) 39-68-48

E-mail: mapp@kemtipp.ru

Переработка замороженных плодов рябины красной в аппарате с вибрационной насадкой непрерывного действия, оснащенном внешним контуром рециркуляции

Frozen ash berries processing in the device with a nozzle continuous vibration, equipped with an external recirculation loop

Реферат. В качестве способа повышения концентрации сухих растворимых веществ (СРВ) в получаемом экстракте использован контур внешней рециркуляции. Задача исследований заключается в определении значения коэффициента внешней рециркуляции (K_R), при котором создаются оптимальные условия проведения процесса. Результаты проведенных исследований показывают прирост концентрации СРВ, содержащихся в экстракте, при увеличении коэффициента внешней рециркуляции. Это обусловлено увеличением продолжительности взаимодействия обрабатываемого твердого сырья с экстрагентом, а также уменьшением поверхностного натяжения экстрагента, что способствует улучшению условий его проникновения в поры частиц. Отмечается и противоположное свойство рециркуляции, выражающееся в снижении скорости массоотдачи. Следствием этого является значительный рост потерь СРВ с выгружаемым шротом, приводящий к снижению технико-экономических показателей процесса. Согласно аналитической оценке полученных результатов, максимальные показатели процесса наблюдаются при значениях $K_R = 1$ (без рециркуляции) и $K_R = 2$, которым соответствуют значения критерия оптимальности $5,02 \cdot 10^{-3}$ и $4,92 \cdot 10^{-3}$ % масс/Вт. При этом работа аппарата с рециркуляцией при $K_R = 2$ характеризуется повышением концентрации СРВ в экстракте на 62 % по сравнению с чистым экстрагентом. Эффективность использования рециркуляции при $K_R = 2$ подтверждена экономией энергии, идущей на процесс выпаривания полученного экстракта. Расчет энергетических затрат на процесс получения 60 л экстракта концентрацией СРВ 12 % масс. показал, что при повышении начальной концентрации СРВ в экстракте до 6 % масс. ($K_R = 2$) наблюдается снижение потребляемого количества насыщенного водяного пара на 104,1 кг, что при удельной энтальпии пара 2706,29 кДж/кг составляет 281685 кДж.

Summary. An external recirculation loop was used as the method of increasing the concentration of dry soluble substances in the obtained extract. The objective of the research is to determine the value of the external recirculation index (K_R), which provides the optimal conditions for the process carrying out. The results of the conducted research show the increase in the concentration of dry soluble substances in the extract if the external recirculation index increases. It is conditioned by the extension of the interaction between the processed raw material and the extract, as well as by the decrease in the surface tension of the extracting agent, which results in improving the conditions of its penetration into the pores of particles. Such an opposite property of recirculation as the decrease in mass transfer rate was also observed. It causes the significant rise of dry soluble substances losses while discharging extraction cake, which leads to the performance degradation. According to the analytical evaluation of the obtained results, the maximum process results are observed if $K_R = 1$ (without recirculation) and $K_R = 2$, the values of the optimality criterion are $5,02 \cdot 10^{-3}$ and $4,92 \cdot 10^{-3}$ % mass/W respectively. At the same time the operation of the apparatus with the recirculation loop at $K_R = 2$ is characterized by 62%-increase in dry soluble substances concentration in the extract as compared to a pure extracting agent. The efficiency of recirculation at $K_R = 2$ is proved by the saving of energy consumed on the evaporation of the extract obtained. The energy costs calculation for the production of 60l of 12 % mass dry soluble substances concentration extract showed that if the initial dry soluble substances concentration is raised to 6 % mass ($K_R = 2$), the amount of consumed saturated vapor is 104.1 kg less, which is 281685 kJ if the vapor specific enthalpy is 2706.29 kJ/kg.

Ключевые слова: экстрактор с вибрационной тарелкой, рябина красная, экстракт, контур внешней рециркуляции, коэффициент рециркуляции.

Keywords: a vibration plate extractor, red ash berries, extract, external recirculation loop, recirculation index

Повышение качества производимой продукции при эффективном использовании производственных фондов является одной из актуальных задач современной организации производства. Переход к осуществлению технологических процессов в непрерывном режиме позволяет повысить коэффициент использования оборудования и совместить транспортные и технологические процессы [1].

Например, использование экстрактора с вибрационной насадкой непрерывного действия позволяет достичь непрерывной организации технологического потока путем повышения его класса, а также способствует устранению вспомогательных операций. Преимущества от внедрения в промышленность экстрактора с вибрационной насадкой непрерывного действия заключаются главным образом в решении проблемы масштабного перехода и создании оптимальных условий работы приводных механизмов устройства [1, 2]. Однако существенным недостатком при проведении процесса экстрагирования в экстракторах непрерывного действия является недостаточное извлечение сухих растворимых веществ (СРВ) [3] по сравнению с экстракторами периодического действия [4].

Одним из способов повышения эффективности технологических процессов является применение контура рециркуляции [5, 6], что позволяет максимально использовать сырьевые ресурсы и увеличить время взаимодействия обрабатываемых сред. В случае процесса экстрагирования эффективность рециркуляции будет наблюдаться,

прежде всего, в химическом аспекте [5, 7]. Применение рециркуляции при экстрагировании плодово-ягодного сырья водой позволяет улучшить условия массообмена благодаря использованию в качестве экстрагента полученной жидкой фазы, имеющей меньшее поверхностное натяжение, чем свежий экстрагент [8], что повышает смачиваемость частиц твердой фазы и улучшает условия проникновения экстрагента в поры частиц. Недостатком способа при этом является уменьшение скорости массоотдачи вследствие уменьшения движущей силы процесса экстрагирования, характеризуемой разностью между концентрацией извлекаемого вещества у поверхности твердых частиц и его средней концентрацией в основной массе экстрагента (суспензии).

Эффективность работы экстрактора с вибрационной насадкой непрерывного действия, оснащенного контуром рециркуляции, зависит от соотношения обрабатываемых объемов среды, находящихся в прямой линии и в рецикле, и от скорости потока рециркуляции [9].

Целью настоящих исследований является определение значения коэффициента внешней рециркуляции, при котором будет наблюдаться максимальная эффективность работы аппарата с вибрационной насадкой непрерывного действия, выражающаяся в повышении концентрации СРВ в получаемом экстракте при минимально допустимых потерях СРВ с отработанной твердой фазой.

Исследования проводились на экспериментальной установке, представленной на рисунке 1.

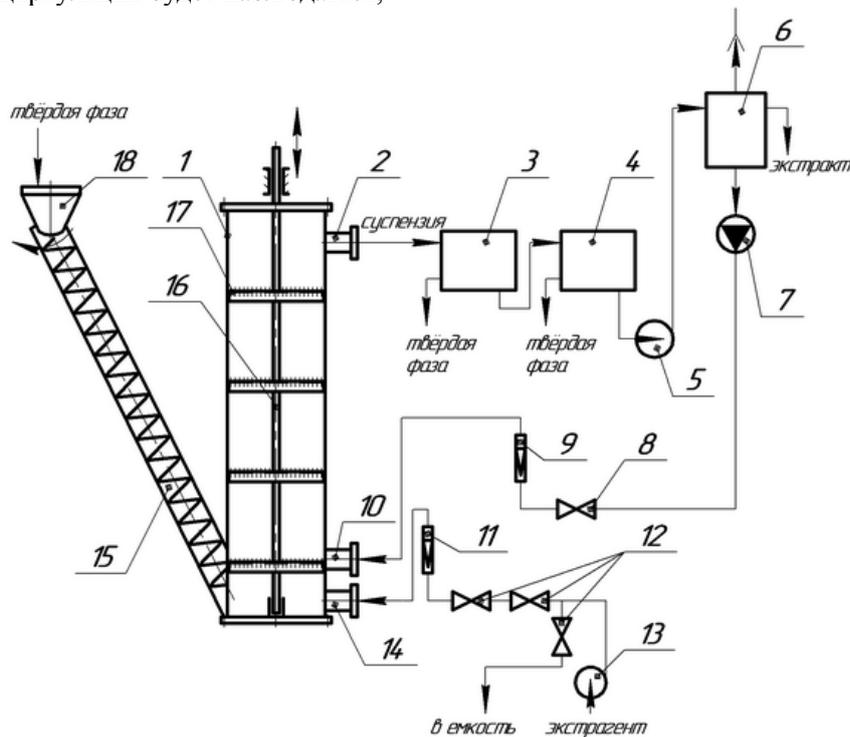


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из цилиндрического корпуса 1 диаметром 150 мм и высотой 640 мм, внутри которого совершает возвратно-поступательное движение вибрационная насадка 16, включающая вертикальный шток с установленными на нем четырьмя перфорированными тарелками 17. Обработываемое плодово-ягодное сырье загружается в воронку 18, откуда шнековым питателем 15 подается в нижнюю часть корпуса аппарата 1. Количество подаваемого в аппарат сырья регулируется частотой вращения питающего шнека. Экстрагент (вода) подается в аппарат насосом 13 из накопительной термостатированной емкости через патрубок 14. Расход экстрагента при этом контролируется ротаметром 11 марки LZM-Z, а регулирование расхода осуществляется системой вентилей 12.

Суспензия, пройдя снизу вверх через рабочую зону экстрактора, отводится из него через патрубок 2 вначале на сита 3, где осуществляется грубое отделение твердой фазы, а затем на вакуум-фильтр 4, где осуществляется тонкая очистка экстракта от твердой фазы. Полученный экстракт насосом 5 подается в напорный бак 6, откуда часть его отводится, как готовый продукт, а часть возвращается в экстрактор через патрубок 10 с помощью рециркуляционного насоса 7. Расход экстракта, идущего на рециркуляцию, контролируется ротаметром 9, а регулирование расхода осуществляется вентилем 8.

Для проведения исследований использовались плоды рябины красной обыкновенной, собранные в ОАО «Плодопитомник-1» в городе Кемерово и замороженные до температуры минус 18 ± 1 °С.

Плоды рябины красной, как объект промышленной переработки, характеризуются высокой доступностью и перспективностью в условиях большинства регионов нашей страны [3]. Причем, для производства экстрактов их рекомендуется использовать в замороженном виде, что в свою очередь объясняется необходимостью длительного хранения сырья вследствие сезонности урожая. Кроме того, клеточная вода при медленном замораживании, превращается в кристаллики льда, что при механическом воздействии на замороженное сырье способствует эффективному процессу разрушения его клеточной структуры, повышая тем самым эффективность процесса в целом.

В качестве экстрагента использовалась вода питьевая ГОСТ Р 51232-98 температурой 20 ± 1 °С [4].

Производительность по твердой фазе составляла 0,125 кг/мин при гидромодуле 1/4, частоте колебаний насадки 16,7 Гц и амплитуде – 14 мм [3].

Поминутный отбор проб производился с момента начала поступления экстракта в напор-

ный бак 6 и продолжался до наступления установившегося режима работы аппарата, характеризующегося постоянством значения концентрации СВР в экстракте на выходе из вакуум-фильтра. Содержание СВР в пробах полученного экстракта определялось рефрактометром ИРФ-454 Б2М.

В соответствии с поставленной задачей исследований, изучалось соотношение объемов свежего экстрагента, подаваемого в аппарат, и экстракта, идущей на рециркуляцию. Значение соотношения этих объемов описывалось коэффициентом внешней рециркуляции [5, 7]:

$$K_R = \frac{G_B + G_R}{G_B}, \quad (1)$$

где G_B – расход подаваемого экстрагента, кг/мин; G_R – расход экстракта, возвращаемого на рециркуляцию, кг/мин.

Числитель выражения (1) представляет собой производительность экстрактора по жидкой фазе, которая с учетом гидромодуля 1/4, всегда составляла 0,5 кг/мин. Значение коэффициента внешней рециркуляции варьировалось от 1 (без рециркуляции) до 8.

Собранный на ситах 3 и вакуум-фильтре 4 шрот подвергался повторному экстрагированию с целью определения содержания в нем СВР. Процесс экстрагирования шрота проводился в лабораторном экстракторе с вибрационной насадкой периодического действия [3].

В аппарат загружалось 190 ± 2 г шрота и заливалось 2 л свежего экстрагента. По истечении 5 минут после запуска аппарата определялась массовая доля СВР в полученном экстракте и пересчитывалась на массу шрота по следующей формуле:

$$C_{СВШ} = \frac{C_{СВС} \cdot m_B}{m_{ШРОТ}}, \quad (2)$$

где $C_{СВС}$ – концентрация СВР в полученном экстракте, %масс; m_B – масса экстрагента, кг; $m_{ШРОТ}$ – масса обрабатываемого шрота, кг.

Дальнейшая оценка результатов процесса экстрагирования с применением рециркуляции производилась по результатам расчета материально баланса по СВР.

Исследования подтвердили удовлетворительную пропускную способность аппарата по твердой фазе. При работе во всем диапазоне изучаемых значений коэффициента внешней рециркуляции не наблюдалось переполнения аппарата шротом. При этом отмечено постоянное соответствие между количеством подаваемого в аппарат сырья и количеством выгружаемого влажного шрота. В тоже время с увеличением коэффициента внешней рециркуляции снижалось количество отводимого экстракта, которое составляли расход свежего экстрагента, подаваемого в аппарат, и количество сока, получаемого при разрушении обрабатываемого сырья (таблица 1).

Значения материальных потоков в аппарате, оснащённом контуром внешней рециркуляции экстрагента

Коэффициент внешней рециркуляции	Расход свежего экстрагента, кг/мин	Количество экстракта, идущего на рециркуляцию, кг/мин	Подача твердой фазы, кг/мин	Выход экстракта, кг/мин	Выход шрота, кг/мин
1	0,5	0	0,125	0,562	0,063
1,333	0,375	0,125	0,125	0,437	0,063
2	0,25	0,25	0,125	0,312	0,063
4	0,125	0,375	0,125	0,187	0,063
8	0,0625	0,4375	0,125	0,1245	0,063

Согласно графику, представленному на рисунке 2, с увеличением коэффициента внешней рециркуляции K_R , повышается концентрация СВВ $C_{СВ}$ в экстракте. Причем, существенный прирост концентрации наблюдается при значении $K_R = 2$. Это, прежде всего, объясняется увеличением продолжительности взаимодействия обрабатываемого сырья и жидкой фазы. Кроме того, жидкая фаза, находящаяся в рецикле, имеет меньшее поверхностное натяжение, чем свежий экстрагент, что способствует улучшению условий проникновения экстрагента в поры частиц, повышая, таким образом, скорость процесса экстрагирования.

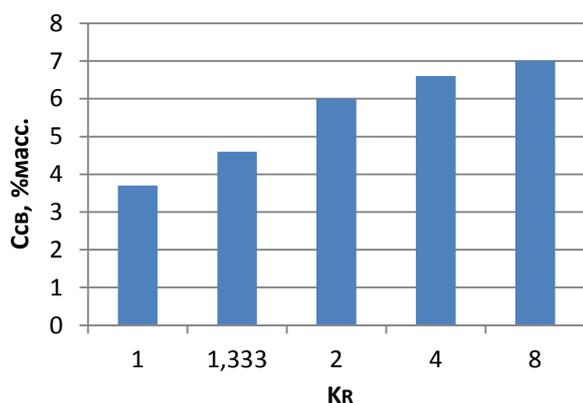


Рисунок 2. Влияние коэффициента внешней рециркуляции на концентрацию СВВ в экстракте

Однако, несмотря на положительный эффект от применения контура рециркуляции, при увеличении коэффициента K_R более 2 рост концентрации СВВ идет медленнее, при этом происходит значительное увеличение потерь СВВ со шротом, что отражено на рисунках 3 и 4. Это главным образом объясняется снижением скорости массоотдачи, сопровождающееся отсутствием видимого переноса СВВ из твердой фазы в жидкую. Кроме того, при повышении концентрации СВВ в экстракте возрастает его вязкость, что ухудшает условия массообмена, затрудняет обновление поверхности контакта фаз в рабочем пространстве аппарата, а также ведет к увеличению толщины пограничного слоя.

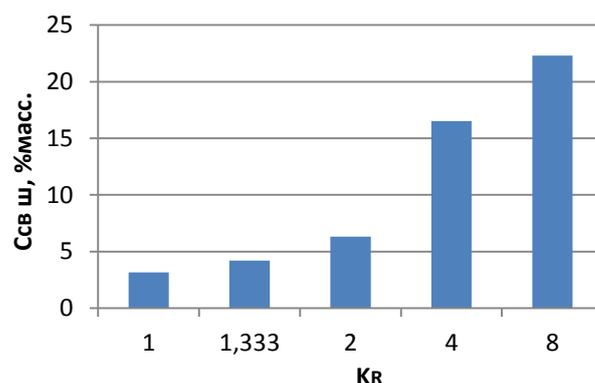
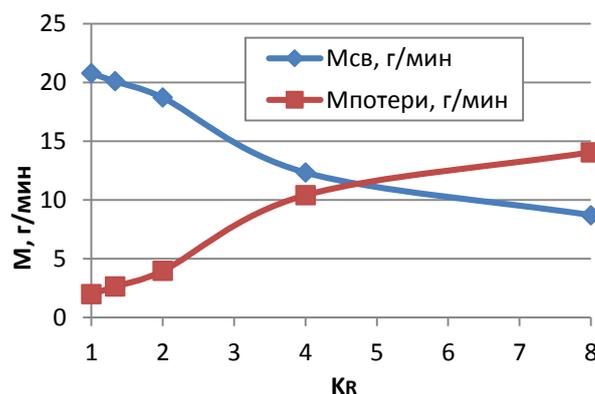


Рисунок 3. Влияние коэффициента внешней рециркуляции на концентрацию СВВ в шроте

Рисунок 4. Извлечение СВВ с экстрактом $M_{СВ}$, г/мин, и потери СВВ со шротом $M_{Потери}$, г/мин, в зависимости от коэффициента внешней рециркуляции

Повышение концентрации СВВ в отводимом из аппарата экстракте до 6,6 % масс. при $K_R = 4$ и 7 % масс. при $K_R = 8$ (рисунок 2), ввиду увеличения потерь СВВ со шротом (рисунок 3), сопровождается снижением производительности экстрактора по количеству извлекаемых СВВ (рисунок 4). Поэтому работа аппарата с K_R более 2 считается неэффективной, поскольку снижает основные технико-экономические показатели процесса.

Значение коэффициента внешней рециркуляции, равное 2, характеризуется повышением концентрации СВВ в экстракте на 62 % по сравнению с чистым экстрагентом. Потери СВВ со шротом при этом составляют 4 г/мин, а выход их с экстрактом – 18,7 г/мин (рисунок 4), что говорит о создании рациональных условий проведе-

ния процесса экстрагирования с отсутствием перечисленных выше недостатков.

Эффективность рециркуляции при $K_R = 2$ подтверждается критерием оптимальности процесса, % масс./Вт:

$$\Phi = \frac{C_{CB}}{N \cdot \frac{M_{CB0}}{M_{CBi}}}, \quad (3)$$

где C_{CB} – концентрация СРВ в получаемом экстракте, % масс; N – суммарная мощность электродвигателей установки, Вт; M_{CB0} – извлечение СРВ с экстрактом при $K_R = 1$, г/мин; M_{CBi} – извлечение СРВ с экстрактом при исследуемом значении K_R , г/мин.

Суммарная мощность электродвигателей установки составляла 737 Вт при $K_R = 1$ и 1097 Вт – для значений K_R более 1, что обусловлено работой дополнительного оборудования контура внешней рециркуляции.

Отношение $\frac{M_{CB0}}{M_{CBi}}$ в выражении (3) яв-

ляется показателем увеличения продолжительности процесса экстрагирования до получения требуемого количества СРВ.

На рисунке 5 представлен график изменения критерия оптимальности, согласно которому наилучшие показатели процесса наблюдаются при значении $K_R = 1$ (без рециркуляции) и при $K_R = 2$ с соответствующими значениями критерия оптимальности $5,02 \cdot 10^{-3}$ и $4,92 \cdot 10^{-3}$ % масс./Вт.

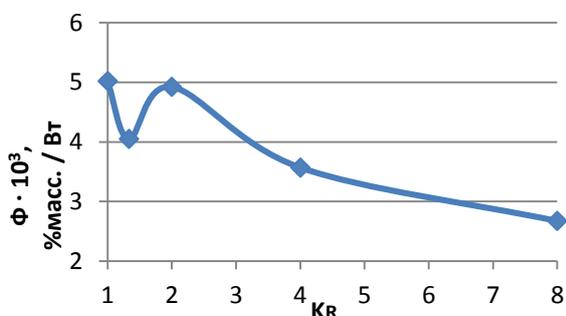


Рисунок 5. График изменения критерия оптимальности процесса

ЛИТЕРАТУРА

1 Панфилов В.А. Теория технологического потока. 2-е изд., исправл. и доп. М.: КолосС, 2007. 319 с.

2 Розен А.М., Мартюшин Е.И., Олевский В.М. и др. Масштабный переход в химической технологии: разработка промышленных аппаратов методом гидродинамического моделирования. М.: Химия, 1980. 320 с.

3 Пат. 2545300 РФ, МПК В 01 D 11/02 (2006.01) Экстрактор вибрационный / Сорокопуд А.Ф., Иванов П.П., Халтурин М.А.; Оpubл. 27.03.2015, Бюл. №9, 5 с.

Несмотря на меньшее значение критерия оптимальности при $K_R = 2$, эффективность использования рециркуляции при проведении процесса экстрагирования замороженных плодов рябины красной будет определяться экономией энергии, идущей на процесс последующего концентрирования полученного экстракта. Расчет энергетических затрат на процесс получения 60 л экстракта концентрацией СРВ 12 % масс. [10] на вакуум-выпарной установке (ВВУ) Агромаш [11] показал, что при начальной концентрации СРВ в экстракте, равной 3,7 % масс. (без рециркуляции), для проведения процесса требуется 187,8 кг насыщенного водяного пара. С повышением начальной концентрации СРВ в экстракте до 6 % масс. ($K_R = 2$) наблюдается снижение потребляемого количества, насыщенного водяного пара на 104,1 кг, что при удельной энтальпии пара 2706,29 кДж/кг составляет 281685 кДж.

Использование контура рециркуляции позволяет таким образом снизить требуемое количество насыщенного водяного пара на обогрев ВВУ, а следовательно и затрат энергии на его получение.

На основании результатов, полученных в процессе исследований, можно утверждать, что использование контура рециркуляции позволяет повысить концентрацию СРВ в получаемом экстракте. Наилучшие технико-экономические показатели работы экстрактора с вибрационной насадкой непрерывного действия обеспечиваются при значении коэффициента внешней рециркуляции равном 2. Процесс экстрагирования при этом характеризуется улучшением условий массоотдачи, а величина потерь СРВ со шротом составляет 4 г/мин при выходе СРВ с экстрактом, равном 18,7 г/мин.

4 Иванов П.П., Плотников И.Б., Халтурин М.А. Влияние температуры экстрагента на процесс получения экстракта из замороженных плодов рябины красной в аппарате с вибрационной насадкой // ВЕСТНИК МАХ. 2014. № 5. С. 64-68.

5 Нагиев М.Ф. Теория рециркуляции и повышение оптимальности химических процессов. Новые технологические принципы, моделирование и оптимизация хим. процессов, осуществляемых в системах с обратной связью. М.: Наука, 1970. 390 с.

6 Меньшиков В.В. Разработка методов повышения эффективности химико-технологических процессов с применением рециркуляции : автореф. дисс. ... док. техн. наук: 05.17.08. М., 1994. 33 с.

7 Шахтахтинский Т.Н., Кузнецов В.И., Зайцева З.А. Создание и развитие учения о рециркуляционных процессах в химической технологии. Баку : Элм, 1979. С. 119-138.

8 Сорокопуд А.Ф., Иванов П.П. Исследование физико-химических свойств водных и водно-спиртовых экстрактов ирги и шиповника Химия растительного сырья. 2002. № 2. С. 111–116.

9 Зиганшин Г.К., Осинцев А.А. Влияние рециркуляции индивидуальных сырьевых компонентов на селективность и основные показатели процесса экстракции // Тезисы докладов V международной научной конференции «Методы кибернетики химико-технологических процессов» (КХТП–V–99). Уфа: Изд-во УГНТУ, 1999. С. 146–147.

10 ГОСТ Р 52184-2003. Консервы. Соки фруктовые прямого отжима. Технические условия. М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2009. 14 с.

11 Вакуум-выпарная установка [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.agro-mash.ru/a-vak_vyp_ust.htm (17 апреля 2015)

REFERENCES

1 Panfilov V.A. Teoriya tekhnologicheskogo potoka [Workflow theory]. Moscow, KolosS, 2007. 319 p. (In Russ.).

2 Rozen A.M., Martyushin E.I., Olevskii V.M. et al. Masshtabnyi perekhod v khimicheskoi tekhnologii: razrabotka promyshlennykh apparatov metodom gidrodinamicheskogo modelirovaniya [Massive transition in chemical technology: designing industrial apparatuses by hydrodynamic simulation technique]. Moscow, Khimiya, 1980. 320 p. (In Russ.).

3 Sorokopud A.F., Ivanov P.P., Khalaturin M.A. Ekstraktor vibratsionnyi [Oscillating extractor]. Patent RF, no. 2545300, 2015.

4 Ivanov P.P., Plotnikov I.B., Khalaturin M.A. The influence of extracting agent temperature on the process of frozen ashberries extracting in the apparatus equipped with the vibrating nozzle. *Vestnik MAH №3*. [The bulletin of International Academy of Refrigeration], 2014, no. 5, pp. 64-68. (In Russ.).

5 Nagiev M.F. Teoriya retsirkulyatsii i povyshenie optimal'nosti khimicheskikh protsessov. Novye tekhnologicheskie printsipy, modelirovanie i optimizatsiya khim. protsessov, osushchestvlyayemykh v sistemakh s obratnoi svyaz'yu [The theory of recirculation and the optimization of chemical process. New technological principles, simulation and optimization of chemical process in feedback systems]. Moscow, Nauka, 1970. 390 p. (In Russ.).

6 Men'shikov V.V. Razrabotka metodov povysheniya effektivnosti khimiko-tekhnologicheskikh protsessov s primeneniem retsirkulyatsii : avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni d-ra tekhn. nauk: 05.17.08 [Working out the methods of effectiveness increase in chemical-engineering process by using recirculation. Abstr. diss. dr. techn. sci.]. Moscow, 1994. 33 p. (In Russ.).

7 Shakhtakhtinskii T.N., Kuznetsov V.I., Zaitseva Z.A. Sozdanie i razvitie ucheniya o retsirkulyatsionnykh protsessakh v khimicheskoi tekhnologii : nauchnoe izdanie [Formation and development of study of recirculation in chemical techniques: scientific paper]. Baku, Jelm, 1979. 138 p. (In Russ.).

8 Sorokopud A.F., Ivanov P.P. The study of physicochemical properties of aqueous and aqueous alcoholic extracts of serviceberries and rose hips. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*. [Chemistry of plant raw material], 2002, no. 2, pp. 111–116. (In Russ.).

9 Ziganshin G.K., Osintsev A.A. The influence of recirculation of certain raw components on the selectivity and key indicators of extraction. Tez. dokl. V mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Metody kibernetiki khimiko-tekhnologicheskikh protsessov» (KHTP–V–99). [V International scientific conference «Methods of cybernetics of chemical-engineering processes» (MCCEP–V–99). Heads of reports]. Ufa, UGN-TU, 1999. pp. 146–147. (In Russ.).

10 GOST R 52184-2003. Konservy. Soki fruktovye pryamogo otzhima. Tekhnicheskie usloviya [State standard 52184-2003. Canned food. Directly expressed juice. Technical requirements]. Moscow, FGUP «STANDARTINFORM», 2009. 14 p. (In Russ.).

11 Vakuum-vyparnaya ustanovka [Vacuum-evaporator installation]. Available at: http://www.agro-mash.ru/a-vak_vyp_ust.htm (Accessed 17 April 2015). (In Russ.).