

## КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПИЩЕВЫХ РАСТВОРОВ В ВЫПАРНЫХ УСТАНОВКАХ С ТЕПЛОВЫМ НАСОСОМ

А. В. МАНЬКОВ,  
аспирант,  
Л. А. МИНУХИН,  
доктор технических наук, профессор,  
Уральский государственный аграрный университет  
(620075, г. Екатеринбург, ул. К. Либкнехта, д. 42)

*Ключевые слова:* выпарной аппарат, тепловой насос, вторичный пар, греющий пар, технологический раствор, концентрирование, многокорпусные установки, мембранные аппараты.

Рассматриваются различные способы концентрирования технологических пищевых растворов на основе применения однокорпусных и многокорпусных выпарных установок, а также мембранной технологии. Показано, что для условий концентрирования термолабильных растворов (ягодные и фруктовые соки и экстракты) наиболее перспективным может быть использование вакуумных однокорпусных выпарных установок с тепловым насосом и с полной регенерацией теплоты сконцентрированного раствора (продукта) и конденсата выпаренного растворителя (воды). Предложены принципиальная схема такой установки и способ полной регенерации тепловой энергии для этого метода. Представлены результаты численных исследований по определению и сравнительной оценке удельных затрат энергии на концентрирование. При этом удельные затраты энергии на концентрирование растворов определялись как отношение мощности (тепловой или электрической), затраченной на выпаривание, к массовому расходу выпаренной воды. В результате численного анализа показано, что предложенный метод концентрирования и известная мембранная технология концентрирования – наиболее экономичные методы проведения процесса. Отмечено также, что традиционный метод многокорпусного выпаривания может иметь сопоставимую энергетическую эффективность лишь при большом числе корпусов установки, что технологически несовместимо с задачами концентрирования термолабильных технологических пищевых растворов. Полученные результаты положены в основу разработки опытно-промышленной установки для концентрирования термолабильных и других технологических растворов в однокорпусном выпарном аппарате с тепловым насосом.

## CONCENTRATION OF TECHNOLOGICAL FOOD SOLUTIONS IN EVAPORATORS WITH HEAT PUMP

A. V. MANKOV,  
postgraduate student,  
L. A. MINUKHIN,  
doctor of technical sciences, professor,  
Ural State Agrarian University  
(42 K. Libknehta str., 620075, Ekaterinburg)

*Keywords:* evaporator, heat pump, secondary stream, heating stream, technological solution, concentration, vacuum pump, multi-body plants, membrane devices.

Various methods for concentrating technological food solutions based on the use of single-hull and multi-hull evaporators, as well as membrane technology, are considered. It is shown that for concentration conditions thermolabile solutions (berry and fruit juices and extracts) the most promising is the use of vacuum single-hull evaporators with a heat pump and with the complete regeneration of the heat of the concentrated solution (product) and the condensate of the evaporated solvent (water). A schematic diagram of such an installation and a method for the complete regeneration of thermal energy for this method are proposed. The results of numerical studies on the determination and comparative estimation of the specific energy consumption for concentration are presented. At the same time, the specific energy consumption for the concentration of solutions was determined as the ratio of the power (thermal or electrical) expended for evaporation to the mass flow of evaporated water. As a result of numerical analysis, it is shown that the proposed method of concentration and the known membrane concentration technology are the most economical methods of carrying out the process. It is also shown that the traditional method of multi-body evaporation can have comparable energy efficiency only with a large number of installation housings, which is technologically incompatible with the problems of concentrating thermolabile technological food solutions. The obtained results are the basis for the development of a pilot plant for concentrating thermolabile and other process solutions in a single-hull evaporator with a heat pump.

*Положительная рецензия представлена Г. Б. Пищиковым, доктором технических наук, профессором Уральского государственного экономического университета.*

Как известно, концентрирование жидких пищевых продуктов (фруктовых и овощных соков, молока, сыворотки, экстрактов и др.) методом выпаривания является одним из распространенных способов консервирования, при котором можно наиболее полно сохранить их полезные свойства [1]. Однако достичь такого эффекта удается лишь при определенных условиях, основными из которых являются невысокие температуры выпаривания, порядка 42–50 °С. Это означает, что выпаривание жидких пищевых продуктов должно протекать при кипении выпариваемых растворов в условиях вакуума при абсолютном давлении над кипящим раствором 8–12 кПа [2]. При этом разработчики выпарного оборудования сталкиваются с проблемой снижения затрат энергии на выпаривание, которая не может быть решена на основе общеизвестного способа использования многокорпусных установок [3–4], так как их применение приводит к необходимости работы при высоких температурах кипения (100 °С и выше) в первых по ходу греющего пара корпусах выпарной установки [5].

Известный метод повышения концентрации технологических растворов с помощью мембранных аппаратов [3–4, 6–8] является достаточно экономичным современным способом концентрирования растворов. Однако возможность эффективного использования мембранной технологии снижается при высоких степенях конечного концентрирования растворов.

Предварительный анализ путей решения поставленной задачи позволил предложить для концентрирования жидких пищевых растворов известный, но в определенной степени забытый способ выпаривания в однокорпусной выпарной установке с тепловым насосом [9–10].

#### **Цель и методика исследований**

Целью настоящей работы явился сравнительный анализ эффективности концентрирования жидких пищевых сред следующими конкурентными способами: известный метод использования многокорпусных выпарных установок, установок для концентрирования на основе мембранного метода и способ концентрирования с использованием однокорпусного выпарного аппарата с тепловым насосом.

Основной оценкой энергетических затрат в установках, предназначенных для концентрирования технологических растворов (удаление из растворов воды), выступает соотношение, которое определяет значение коэффициента удельной затраты внешней энергии на единицу массы выпаренного растворителя (воды)  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{E}{W}, \text{ Дж/кг} \quad (1)$$

где  $W$  – расход количества выпаренного растворителя (воды) из концентрируемого (выпариваемого) раствора, кг/с;

$E$  – внешняя мощность, затрачиваемая при концентрировании, Вт.

Для однокорпусных и многокорпусных выпарных установок значение затрачиваемой мощности  $E$  определится соотношением:

$$E = D_0 \times (i_1 - i_2), \quad (2)$$

где  $D_0$  – массовый расход пара, поступающего от внешнего источника в греющую камеру первого корпуса выпарной установки, кг/с;

$i_1$  – теплосодержание пара, поступающего в греющую камеру первого корпуса выпарной установки, Дж/кг;

$i_2$  – теплосодержание конденсата греющего пара, удаляемого из греющей камеры первого корпуса выпарной установки, Дж/кг.

Таким образом, в предложенном к анализу методе выпаривания с тепловым насосом мощность  $E$  представляет собой мощность, затрачиваемую на сжатие вторичного пара, удаляемого из сепаратора и направляемого с помощью этого насоса в греющую камеру выпарного аппарата. В аппаратах мембранной технологии мощность  $E$  представляет собой мощность, затрачиваемую на прокачивание исходного раствора через пористые стенки соответствующих мембран. В типовых однокорпусных и многокорпусных выпарных установках мощность  $E$  представляет собой мощность тепловой энергии пара, поступающего от внешнего источника в греющую камеру первого корпуса выпарной установки.

Принципиальная схема принятой к сравнительному анализу однокорпусной выпарной установки с тепловым насосом представлена на рис. 1. Установка включает в себя выпарной аппарат 1, состоящий из греющей камеры А и сепаратора Б, а также теплового насоса 2 и вакуумного насоса 3.

Греющая камера А представляет собой кожухотрубный паровой теплообменник со стекающей пленкой жидкости по внутренней поверхности греющих труб. Межтрубное пространство теплообменника служит камерой для конденсации пара, теплота конденсации которого обеспечивает нагрев и выпаривание стекающей пленки жидкости. Отделение пара, полученного при кипении стекающей пленки жидкости в трубках (вторичный пар), осуществляется в сепараторе Б, которая представляет собой емкость, в которой пар как более легкий компонент удаляется через верхний штуцер, а упаренная (сконцентрированная) жидкость – через нижний штуцер сепаратора Б. Для обеспечения непрерывного проведения процесса давление вторичного пара с помощью теплового насоса 2 повышается до параметров греющего пара в греющей камере аппарата 1, куда он подается для повторного использования в качестве греющего пара.

Вакуумный насос 3, предусмотренный в схеме установки, обеспечивает возможность работы вы-

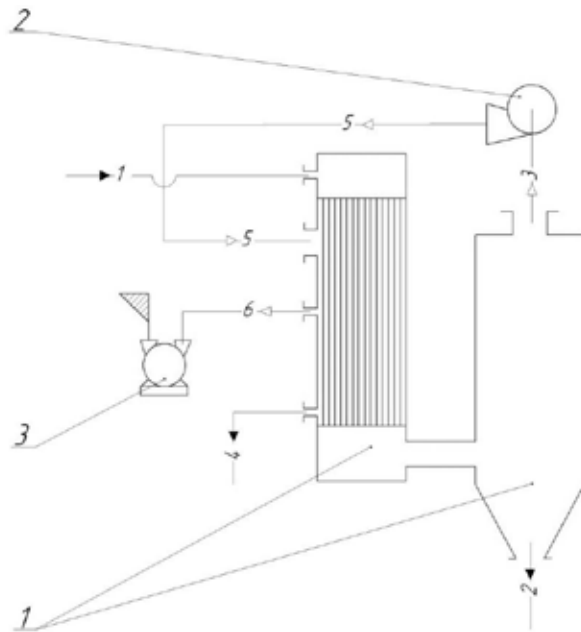


Рис. 1. Схема однокорпусной выпарной установки с тепловым насосом.

Установка: 1 – выпарной аппарат; 2 – тепловой насос; 3 – вакуумный насос.

Коммуникации: 1 – исходный слабоконцентрированный раствор; 2 – упаренный раствор; 3 – вторичный пар; 4 – конденсат греющего пара; 5 – греющий пар; 6 – неконденсирующиеся газы

Fig. 1. Scheme of single-hull evaporator with heat pump.

Installation: 1 – evaporator; 2 – heat pump; 3 – vacuum pump.

Communications: 1 – initial weakly concentrated solution; 2 – evaporated solution; 3 – secondary steam; 4 – steam condensate; 5 – heating steam; 6 – noncondensing gases

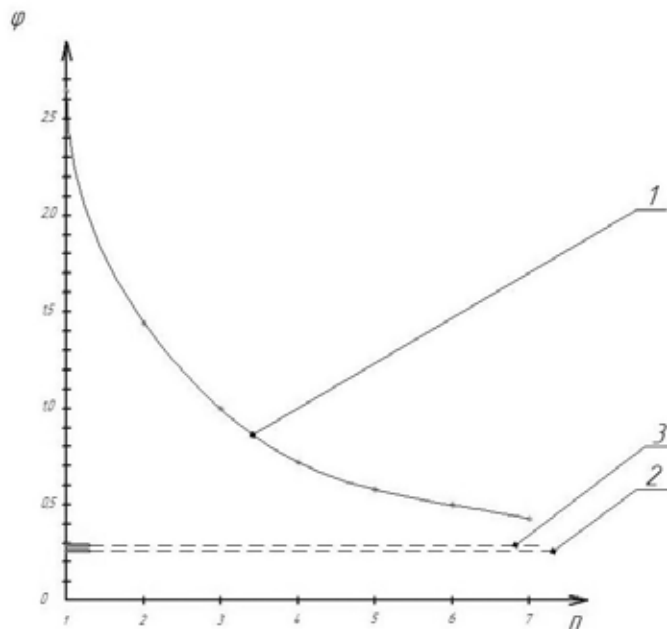


Рис. 2. Результаты численного анализа сравнительной энергетической эффективности сопоставляемых методов концентрирования пищевых сред.

1 – многокорпусные установки; 2 – мембранные установки; 3 – однокорпусные установки с тепловым насосом

Fig. 1. Results of numerical analysis of the comparative energy efficiency of the comparative methods of concentrating food.

1 – multi-hull installation; 2 – membrane plants; 3 – single-hull evaporators with heat pump

парного аппарата под вакуумом, т. е. при пониженных температурах кипения выпариваемого раствора. Назначение этого насоса – удаление неконденсирующихся газов из греющей камеры и поддержание в ней требуемого вакуума.

Схема, представленная на рис. 1, свидетельствует, что в установке, по существу, обеспечивается процесс самовыпаривания поступающего раствора, т. е. путем использования тепловой энергии вторичного пара, полученного при его выпаривании. Это дости-

гается за счет повышения давления вторичного пара до параметров греющего пара с помощью специального компрессорного устройства 2. Такое устройство, которое обеспечивает перекачивание вторичного пара и повышение его теплового потенциала до параметров греющего пара, по сути представляет собой тепловой насос. Его работа обеспечивается за счет внешней энергии, подведенной к двигателю этого насоса.

#### **Результаты исследования**

Результаты численного исследования эффективности известных способов концентрирования, включающих многокорпусные выпарные установки, мембранные установки и рассматриваемые в настоящей работе выпарные установки с тепловым насосом, позволили провести их сопоставление по величине удельной затраты энергии на выпаривание  $\varphi$ . Результаты этого анализа представлены на рис. 2.

Как видно из результатов сопоставления, предложенный метод концентрирования, как и мембранная технология, обладают удельными затратами энергии на концентрирование значительно меньшими, чем затраты энергии при многокорпусном выпаривании. Эти показатели эффективности для сравниваемых методов сближаются лишь при большом числе корпусов выпарной установки, которые резко повышают металлоемкость оборудования и значительно усложняют управляемость процессом концентрирования.

#### **Выводы. Рекомендации**

Таким образом, проведенный численный анализ показывает, что однокорпусные выпарные установки с тепловым насосом оказываются высокоэкономичными и эффективными. Однако их практическое внедрение требует проведения специальных исследований на натуральных моделях по отработке режимов их использования и запуска.

#### **Литература**

1. Ащеулов А. С. Исследование кинетики потоков в роторно-пленочном выпарном аппарате // *Техника и технология пищевых производств*. 2016. № 3. С. 98–103.
2. Магомедов Г. О. Разработка установки для производства концентрированных паст из фруктово-овощного сырья / Г. О. Магомедов и др. // *Вестник Воронежского гос. университета инженерных технологий*. 2015. № 3. С. 13–16.
3. Вобликова Т. В. Процессы и аппараты пищевых производств : учеб. пособие / Т. В. Вобликова, С. Н. Шлыков, А. В. Пермяков. СПб. : Лань, 2017. 204 с.
4. Бредихин С. А. Процессы и аппараты пищевой технологии : учеб. пособие / С. А. Бредихин и др. СПб. : Лань, 2014. 544 с.
5. Минухин Л. А. Тепловое варочное оборудование предприятий пищевых производств и общественного питания : учеб. пособие / Л. А. Минухин, С. В. Шихалев. Екатеринбург, 2014. 34 с.
6. Тимкин В. А., Минухин Л. А., Гальчак И. П., Лазарев В. А. Разработка баромембранной технологии переработки молочной сыворотки // *Аграрный вестник Урала*. 2013. № 7.
7. Тимкин В. А. Баромембранные процессы в молочной промышленности // *Аграрный вестник Урала*. 2017. № 6.
8. Тимкин В. А., Горбунова Ю. А. Исследование процессов микро- и ультрафильтрации в производстве творога // *Пища. Экология. Качество : мат. XIII междунар. науч.-практ. конф.* Красноярск, 2016.
9. Минухин Л. А., Меньшенин Г. А. Исследование возможности создания высокоэффективных выпарных установок // *Аграрное образование и наука*. 2013. № 4. С. 5.
10. Гуревич П. Ю., Маньков А. В., Минухин Л. А. Экспериментальная вакуум-выпарная установка с тепловым насосом с возможностью полной автономной работы // *Молодежь и наука : междунар. аграрный науч. журн.* 2017. № 3.

#### **References**

1. Ashcheulov A. S. Investigation of flow kinetics in a rotary-film evaporator // *Equipment and technology of food production*. 2016. No. 3. P. 98–103.
2. Magomedov G. O. Development of a plant for the production of concentrated pastes from fruit and vegetable raw materials // *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2015. No. 3. P. 13–16.
3. Voblikova T. V. Processes and devices of food production : tutorial. SPb. : Lan, 2017. 204 p.
4. Bredikhin S. A. Processes and devices of food technology : tutorial. SPb. : Lan, 2014. 544 p.
5. Minukhin L. A. Thermal boiling equipment of food production enterprises and public catering enterprises : tutorial / L. A. Minukhin, S. V. Shikhalev. Ekaterinburg, 2014. 34 p.
6. Timkin V. A., Minukhin L. A., Gal'chak I. P., Lazarev V. A. Development of baromembrane technology for processing whey // *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2013. No. 7.
7. Timkin V. A. Baromembrane processes in the dairy industry // *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2017. No. 6.
8. Timkin V. A., Gorbunova Yu. A. Research of micro- and ultrafiltration processes in the production of cottage cheese // *Food. Ecology. Quality : materials of XIII International scientific-practical conf.* Krasnoyarsk, 2016.
9. Minukhin L. A., Menshenin G. A. Investigation of the possibility of creating highly efficient evaporators // *Agricultural education and science*. 2013. No. 4. P. 5.
10. Gurevich P. Yu., Mankov A. V., Minukhin L. A. Experimental vacuum-evaporator unit with heat pump with the possibility of full autonomous operation // *Youth and Science : international agrarian scientific journal*. 2017. No. 3.