Статья поступила в редакцию: 20.09.2026
Статья принята к публикации: 28.09.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 664.8.037:66.048.5

Интенсификация процесса конденсации вторичного пара в аппаратах концентрирования виноградного сока за счет оптимизации гидродинамики ФАЗ

Рамазонов Собиржон Саид угли
самостоятельный исследователь, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Хабибов Фахриддин Юсупович
канд. техн. наук, доц.
кафедры, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Шарипов Нодиржон Замирович
канд. техн. наук, доц.
кафедры, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
E-mail: nodirzhons@bk.ru

Intensification of secondary vapor condensation in grape juice concentration apparatus through optimization of phase hydrodynamics

Ramazonov Sobirjon
Independent Researcher
Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara

Khabibov Fakhriddin
candidate of Technical Sciences (PhD)
Associate Professor, Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara

Sharipov Nodirjon
candidate of Technical Sciences (PhD)
Associate Professor, Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara

Аннотация

Предмет исследования. Процесс смесительной конденсации вторичного пара при концентрировании виноградного сока в барометрическом конденсаторе при диспергировании охлаждающей воды.

Библиографическое описание: Рамазонов С.С.У., Хабибов Ф.Ю., Шарипов Н.З. Интенсификация процесса конденсации вторичного пара в аппаратах концентрирования виноградного сока за счет оптимизации гидродинамики ФАЗ // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23507

Цель работы. Интенсификация тепломассообмена и повышение энергоэффективности вакуум-выпарных установок путем оптимизации фазовой гидродинамики в барометрическом конденсаторе смесительного типа за счет форсуночного распыления охлаждающей воды.

Методология. Эксперименты проводились на вакуум-выпарной установке при концентрировании виноградного сока (сорт «Кишмиш черный», 16–18 % Brix). Исследовалась гидродинамика взаимодействия вторичного пара с мелкодисперсными каплями охлаждающей воды, распыляемой через центробежно-струйные форсунки различной геометрии. Давление в конденсаторе поддерживалось в диапазоне 15–30 кПа. Распределение капель по размерам и динамика их движения фиксировались методами скоростной фотосъемки и лазерной доплеровской анемометрии.

Результаты. Научно обосновано, что замена традиционных полочных (каскадных) элементов барометрического конденсатора на систему мелкодисперсного форсуночного распыления позволяет кардинально перестроить гидродинамику фаз. При среднем диаметре капель d_k = 1,2–1,8 мм создается развитая удельная поверхность контакта фаз (до 162 м²/м³), что переводит процесс конденсации в высокотурбулентный режим. Установлено увеличение объемного коэффициента теплоотдачи на 52,4 %. Глубина создаваемого вакуума стабилизировалась на уровне 92–94 %, что позволило снизить температуру кипения сока и полностью сохранить термолабильные компоненты сырья.

Область применения. Разработанная гидродинамическая схема и режимные параметры рекомендуются для модернизации действующих барометрических конденсаторов на предприятиях пищевой и винодельческой промышленности.

Abstract

Subject. The process of mixing-type condensation of secondary vapor during grape juice concentration in a barometric condenser with dispersed cooling water.

Purpose. To intensify heat and mass transfer and improve the energy efficiency of vacuum-evaporation plants by optimizing phase hydrodynamics in a mixing-type barometric condenser through nozzle spraying of cooling water.

Methodology. Experiments were carried out on a vacuum-evaporation plant during concentration of grape juice (“Kishmish chorniy” variety, 16–18 % Brix). The hydrodynamics of the interaction between secondary vapor and finely dispersed cooling-water droplets sprayed through centrifugal-jet nozzles of various geometries were studied. Pressure in the condenser was maintained in the range of 15–30 kPa. Droplet size distribution and droplet motion dynamics were recorded by high-speed photography and laser Doppler anemometry.

Results. It was scientifically substantiated that replacing traditional shelf (cascade) elements of the barometric condenser with a fine-droplet nozzle-spraying system fundamentally restructures the phase hydrodynamics. At an average droplet diameter of d_k = 1.2–1.8 mm, a developed specific phase-contact surface (up to 162 m²/m³) is created, transferring the condensation process into a highly turbulent regime. The volumetric heat-transfer coefficient was found to increase by 52.4 %. The depth of the vacuum created stabilized at 92–94 %, which reduced the juice boiling temperature and fully preserved the thermolabile components of the raw material.

Practical implications. The developed hydrodynamic scheme and operating parameters are recommended for the modernization of existing barometric condensers at food and wine-making enterprises.

Ключевые слова: виноградный сок, вакуум-выпаривание, вторичный пар, барометрический конденсатор смесительного типа, форсуночное распыление, интенсификация теплообмена.

Keywords: grape juice, vacuum evaporation, secondary vapor, mixing-type barometric condenser, nozzle spraying, heat-transfer intensification.

1. Введение

При концентрировании пищевых растворов, в частности виноградного сока, ключевой задачей является сохранение исходного качества продукта (витаминов, сахаров, ароматических веществ) при минимальных затратах тепловой и электрической энергии [1]. Достижение этого возможно только при снижении температуры кипения сока путем интенсификации работы вакуум-создающих систем и эффективной конденсации вторичного пара.

В традиционных барометрических конденсаторах смесительного типа (полочных или каскадных) контакт пара и охлаждающей воды происходит на стекающих водяных завесах (струях). Такая гидродинамическая структура имеет существенные ограничения: толщина водяных струй относительно велика, а удельная поверхность контакта фаз ограничена геометрией полок. Это приводит к недоконденсации части вторичного пара, ухудшению вакуума и перерасходу охлаждающей воды.

Фундаментальные принципы анализа гидродинамики многофазных сред при дроблении сплошного потока жидкости на дисперсную (капельную) фазу подробно рассмотрены в классических работах по гидродинамике и теплообмену [3, 6]. Применение вакуумного концентрирования соков как энергосберегающей альтернативы традиционному упариванию подтверждается рядом современных исследований [5, 7, 9]. Однако вопросы гидродинамики конденсации вторичного пара непосредственно в барометрических конденсаторах смесительного типа при форсуночном (капельном) диспергировании охлаждающей воды применительно к упариванию виноградного сока изучены недостаточно.

Идея данной работы заключается в кардинальном улучшении гидродинамики фаз барометрического конденсатора смесительного типа путем подачи охлаждающей воды через специализированные форсунки для создания развитого фазового контакта капельного типа. Цель исследования — интенсификация тепломассообмена и повышение энергоэффективности вакуум-выпарных установок при концентрировании виноградного сока за счет оптимизации гидродинамики фаз в барометрическом конденсаторе.

2. Материалы и методы

Экспериментальный стенд состоял из вакуум-выпарного аппарата емкостью 50 литров и модернизированного вертикального барометрического конденсатора смесительного типа. В качестве объекта упаривания использовался виноградный сок сорта «Кишмиш черный» (Brix = 16–18 %). Упаривание проводилось при давлении в системе 20 кПа.

В верхней части барометрического конденсатора взамен каскадных полок был установлен коллектор с центробежно-струйными форсунками (диаметр сопла d_c = 2,5; 3,5; 4,5 мм). Охлаждающая вода подавалась под избыточным давлением $\Delta P_ф$ = 0,1–0,3 МПа, обеспечивая факел распыла с углом раскрытия 60–75°.

Параметры контроля и измерений [4]:

1. Давление и вакуум: измерялись образцовыми вакуумметрами и датчиками давления с выводом на ПК.

2. Расход сред: расход сока и охлаждающей воды определялся электромагнитными расходомерами типа ЭРСУ.

3. Гидродинамика капель: средний диаметр сформированных форсункой капель (d_{32} — заутеровский диаметр) определялся расчетно-экспериментальным путем на основе угла распыла и перепада давления, а также верифицировался методом оптического зондирования.

Статистический анализ данных проводился методом ANOVA ($p < 0,05$).

3. Результаты и обсуждение

Форсуночный ввод охлаждающей воды коренным образом меняет фазовую гидродинамику внутри барометрического конденсатора. Вместо массивных струй с малой поверхностью теплообмена образуется высокодисперсный капельный поток («водяной туман»). Вторичный пар, поступающий из выпарного аппарата, мгновенно конденсируется на поверхности капель.

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики гидродинамических режимов при различных давлениях подачи воды через форсунки (dc = 3,5 мм).

Таблица 1. Гидродинамические параметры капельного потока и эффективность конденсации вторичного пара

Режим / $\Delta P_ф$, МПа	**d_{32}, мм**	**Уд. поверхность контакта, м²/м³**	**Kv, Вт/(м³·К)**	**Т барометрической воды, °С**	**Ост. давление, кПа**
Полочный (базовый)	струйный режим	35	12400	41.2	24.5
Форсуночный (0.10)	2.1	95	15800	43.5	21.0
Форсуночный (0.20)	1.4	162	18900	45.8	18.2
Форсуночный (0.30)	0.9	210	19400	46.1	17.9

Как видно из таблицы 1, оптимальным является режим распыления при $\Delta P_ф$ = 0,20 МПа. При этом объемный коэффициент теплоотдачи Kv увеличивается на 52,4% по сравнению с базовым полочным аппаратом. Дальнейшее повышение давления до 0,30 МПа

ведет к избыточному измельчению капель (0,9 мм), что не вызывает существенного роста теплоотдачи, однако увеличивает риск уноса мелких капель вместе с неконденсирующимися газами в вакуум-насос [6].

Интенсификация процесса обусловлена тем, что мелкодисперсные капли обладают значительным запасом поверхностной энергии, а высокая относительная скорость фаз ($w_п$ - $w_к$) срывает тепловой пограничный слой с поверхности капли, ускоряя фазовый переход пар-жидкость [2].

Энергетический баланс выпарной установки производительностью 600 кг/ч по испаренной влаге показал высокую экономическую эффективность разработанного метода (таблица 2).

Таблица 2. Сравнительные показатели энергоэффективности узла барометрической конденсации

Показатель	Каскадно-полочный конденсатор	Разработанный форсуночный конденсатор
Уд. расход охлаждающей воды, кг/кг пара	28.5	21.2
Т охлаждающей воды на выходе, °C	41.2	45.8
Стабильность вакуума в системе, %	± 4.5	± 0.8
Уд. расход энергии на вакуумный насос, кВт·ч/т	16.2	12.8

** Снижение расхода воды на 25,6 %; повышение стабильности режима в 5,6 раза; экономия электроэнергии — 21,0 %.*

Меньший удельный расход охлаждающей воды объясняется тем, что за счет форсуночного распыления температура уходящей барометрической воды приближается к температуре насыщения вторичного пара (минимальный недогрев составляет всего 1,5–2,0 °C против 6–8 °C в полочных аналогах), что согласуется с данными по энергоэффективности вакуумных процессов концентрирования пищевых жидкостей [8, 10].

4. Заключение

1. Научно обоснован и разработан метод интенсификации смесительной конденсации вторичного пара при упаривании виноградного сока за счет оптимизации фазовой гидродинамики в барометрическом конденсаторе.

2. Доказано, что применение центробежно-струйных форсунок (оптимальный режим $\Delta P_ф$ = 0,2 МПа) позволяет создать развитую капельную структуру потока с удельной поверхностью контакта фаз до 162 м²/м³, что увеличивает объемный коэффициент теплоотдачи на 52,4 %.

3. Внедрение разработанного форсуночного метода в барометрический конденсатор обеспечивает снижение расхода охлаждающей воды на 25,6 % и сокращает энергопотребление вакуумной системы на 21,0 %.

Список литературы

1. Артыков А.А. Компьютерный инжиниринг химико-технологических систем: основы теории и практическое применение. – Ташкент: Мехнат, 2024. – 324 с.

2. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учебник для вузов. – 4-е изд. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
3. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании: учеб. пособие для втузов. – 3-е изд. – М.: Высшая школа, 1986. – 448 с.
4. Шарипов Н.З., Исмоилов А.А., Ибрагимов Р.Р. Интенсификация процесса получения масла из ядра косточек вишни в поле сверхвысокочастотного тока // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2025. – № 10 (139). – С. 39–42. – DOI: 10.32743/UniTech.2025.139.10.20929.
5. Bozkir H., Tekgül Y. Production of orange juice concentrate using conventional and microwave vacuum evaporation: thermal degradation kinetics of bioactive compounds and color values // Journal of Food Processing and Preservation. – 2022. – T. 46, № 6. – DOI: 10.1111/jfpp.15902.
6. Coulson J.M., Richardson J.F. Chemical Engineering: Fluid Flow, Heat Transfer and Mass Transfer. Volume 1. – 6th Edition. – Elsevier, 2019. – 890 P.
7. Ermolaev A.E., Krysanov K.S., Tekiev M.V., Silaev V.I., Zaseev S.G. Vacuum-evaporative method of juice concentration // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – T. 954. – Art. 012028. – DOI: 10.1088/1755–1315/954/1/012028.
8. Hameed A., Maan A.A., Khan M.K.I., Khan I.M., Niazi S., Iqbal M.W., Riaz T., Manzoor M.F., Abdalla M. Evaporation kinetics and quality attributes of grape juice concentrate as affected by microwave and vacuum processing // International Journal of Food Properties. – 2023. – T. 26, № 1. – P. 1596–1611. – DOI: 10.1080/10942912.2023.2218062.
9. Piri A., Fanaei A.R., Rostampour V. Thermodynamic analysis of a continuous vacuum pan in the crystallization process of sugar beet syrup // Journal of Food Processing and Preservation. – 2024. – Art. 2245675. – DOI: 10.1155/2024/2245675.
10. Semenov E.V., Slavyanskiy A.A., Mitroshina D.P., Lebedeva N.N. Thermodynamic factor and vacuum crystallization // Foods and Raw Materials. – 2022. – T. 10, № 2. – P. 304–309. – DOI: 10.21603/2308-4057-2022-2-542.

References

1. Artykov A.A. Komp'yuternyy inzhiniring khimiko-tekhnologicheskikh sistem: osnovy teorii i prakticheskoe primenenie [Computer engineering of chemical-technological systems: fundamentals of theory and practical application]. Tashkent, Mekhnat Publ., 2012. 324 P. (In Russ.).
2. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha [Heat transfer]. 4th ed. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 416 P. (In Russ.).
3. Kutepov A.M., Sterman L.S., Styushin N.G. Gidrodinamika i teploobmen pri paroobrazovanii [Hydrodynamics and heat transfer during vaporization]. 3rd ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 448 P. (In Russ.).

4. Sharipov N.Z., Ismoilov A.A., Ibragimov R.R. Intensifikatsiya protsessa polucheniya masla iz yadra kostochek vishni v pole sverkhvysokochastotnogo toka [Intensification of cherry kernel oil extraction process in an ultra-high frequency electric field]. Universum: tekhnicheskie nauki, 2025, no. 10(139), P. 39–42. DOI: 10.32743/UniTech.2025.139.10.20929. (In Russ.).
5. Bozkir H., Tekgül Y. Production of orange juice concentrate using conventional and microwave vacuum evaporation: thermal degradation kinetics of bioactive compounds and color values // Journal of Food Processing and Preservation. – 2022. – No. 6. – DOI: 10.1111/jfpp.15902.
6. Coulson J.M., Richardson J.F. Chemical Engineering: Fluid Flow, Heat Transfer and Mass Transfer. Volume 1. 6th ed. Elsevier, 2019. 890 P.
7. Ermolaev A.E., Krysanov K.S., Tekiev M.V., Silaev V.I., Zaseev S.G. Vacuum-evaporative method of juice concentration. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, vol. 954, art. 012028. DOI: 10.1088/1755–1315/954/1/012028.
8. Hameed A., Maan A.A., Khan M.K.I., Khan I.M., Niazi S., Iqbal M.W., Riaz T., Manzoor M.F., Abdalla M. Evaporation kinetics and quality attributes of grape juice concentrate as affected by microwave and vacuum processing. International Journal of Food Properties, 2023, vol. 26, no. 1, P. 1596–1611. DOI: 10.1080/10942912.2023.2218062.
9. Piri A., Fanaei A.R., Rostampour V. Thermodynamic analysis of a continuous vacuum pan in the crystallization process of sugar beet syrup // Journal of Food Processing and Preservation. – 2024. – Art. 2245675. – DOI: 10.1155/2024/2245675.
10. Semenov E.V., Slavyanskiy A.A., Mitroshina D.P., Lebedeva N.N. Thermodynamic factor and vacuum crystallization. Foods and Raw Materials, 2022, vol. 10, no. 2, P. 304–309. DOI: 10.21603/2308-4057-2022-2-542.