

ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ/TECHNOLOGY OF INORGANIC SUBSTANCES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.32>

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВХОДЯЩИХ ПОТОКОВ НА РАСЧЕТ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОМБИНИРОВАННОГО ВЫПАРНОГО АППАРАТА АГРЕГАТОВ АС-72, АС-72 М

Научная статья

Почиталкина И.А.^{1,*}, Непряхин В.Ю.²

^{1,2} Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (pochitalkina[at]list.ru)

Аннотация

Варьируя исходной концентрацией аммиачной селитры в диапазоне 89–93% масс. и давлением греющего пара в диапазоне 1,3–1,6 МПа, поступающих в комбинированный выпарной аппарат агрегатов большой единичной мощности АС-72, АС-72М, рассчитаны основные характеристики тепло- и массообменного процесса: полезная разность температур, коэффициент теплоотдачи и теплопередачи, рабочая теплообменная поверхность аппарата. Критический анализ полученных данных позволил обосновать выбор оптимальной исходной концентрации аммиачной селитры для эффективного процесса выпаривания, и оценить ее влияние на основные габариты выпарного аппарата. Дополнительно, в результатах расчетно-аналитического исследования показаны рабочие поверхности аппаратов F_{ap} и обоснован выбор оптимального значения.

Ключевые слова: аммиачная селитра, комбинированный выпарной аппарат, ресурсоэффективность, греющий пар, поверхность теплопередачи.

THE INFLUENCE OF INPUT RATE PARAMETERS ON THE CALCULATION OF THE WORKING SURFACE OF THE COMBINED EVAPORATOR OF AS-72 AND AS-72 M UNITS

Research article

Pochitalkina I.A.^{1,*}, Nepriakhin V.Y.²

^{1,2} Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (pochitalkina[at]list.ru)

Abstract

By varying the initial concentration of ammonium nitrate in the range of 89–93% by mass and the pressure of the heating steam in the range of 1.3–1.6 MPa entering the combined evaporator of the AS-72 high-capacity units, AS-72M, the main characteristics of the heat and mass transfer process are calculated: useful temperature difference, heat transfer coefficient, and working heat exchange surface of the unit. A critical analysis of the obtained data made it possible to substantiate the choice of the optimal initial concentration of ammonium nitrate for an effective evaporation process and to evaluate its influence on the main parameters of the evaporation apparatus. In addition, the results of the computational and analytical study show the working surfaces of the F_{ap} apparatus and substantiate the choice of the optimal value.

Keywords: ammonium nitrate, combined evaporator, resource efficiency, heating steam, heat transfer surface.

Введение

Концентрирование относится к числу самых энергозатратных процессов химической технологии и является важнейшей стадией производства аммиачной селитры — крупнотоннажного продукта основного неорганического синтеза. Отличительные особенности аммиачной селитры (АС) в сравнении с другими азотсодержащими продуктами карбамидом и сульфатом аммония заключаются, в частности, в термической нестабильности и взрывоопасности при точечном подведении тепла. В целях безопасных условий производства процесс концентрирования аммиачной селитры проводят в специальных одноходовых выпарных аппаратах. Работа в пленочном режиме обеспечивается посредством использования распределительных устройств, создающих тонкую нисходящую пленку раствора на внутренней поверхности трубчатой части аппарата. Здесь осуществляется первая ступень выпаривания раствора с получением плава 99% масс, который на второй ступени в концентрационной части аппарата достигает концентрации 99,7–99,8% масс. NH_4NO_3 , после чего из практически безводного плава в соответствии с требованиями ГОСТ (0,02% масс. H_2O) получается гранулированный продукт АС [1]. На основе АС с использованием кондиционирующих и модифицирующих добавок получают ассортимент продуктов, которые в зависимости от марки и добавки модifikatora могут содержать 0,03–0,06% масс. воды [1], [2], [3].

Актуальным направлением развития действующих схем является повышение энергоэффективности процесса концентрирования, что достигается за счет оптимизации технологических параметров, конструкции и габаритов выпарного аппарата, в частности, высоты, диаметра и длины труб греющей части [2], [3], [5].

Настоящее расчетно-аналитическое исследование является продолжением работы [6] и показывает влияние концентрации раствора аммиачной селитры и давления греющего пара, поступающих в аппарат, на рабочую поверхность теплопередачи.

Расчетная часть и обсуждение результатов

Ключевые характеристики выпарного аппарата подбирались согласно расчетам материального и теплового балансов трубчатой части комбинированного выпарного аппарата (КВА), задаваясь производительностью 2500 т/сут. по исходному поступающему раствору.

В ходе расчета КВА, используемого в агрегатах АС-72 и АС-72М, варьировали давлением теплоносителя—греющего пара, в качестве которого выступал насыщенный водяной пар [2], [3], [6] и оценивали влияние исходной концентрации АС при изменении давления греющего пара в диапазоне 1,3-1,6 МПа ($P_{\text{г.п.}}$) с шагом 0,1 МПа на истинную рабочую поверхность теплопередачи (F) КВА.

По результатам балансовых расчетов КВА, выполненных в соответствии с известным алгоритмом [6], [8], [10], определено количество растворителя (W), удаляемого из раствора АС до достижения требуемой концентрации (99% масс.). Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Расход выпариваемой воды (W) из трубчатой части

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.32.1>

Исходная концентрация АС, x_n масс. %	Расход выпариваемой воды, W , кг/с	Конечный расход АС на выходе из трубчатой части, G_k , кг/с
89	2,92	26,01
91	2,35	26,58
93	1,75	27,18

По мере увеличения концентрации поступающего раствора NH_4NO_3 уменьшается количество упариваемой воды (таблица 1) и снижается потребление пара (D), что приводит к уменьшению удельной тепловой нагрузки аппарата ($Q_{\text{ап.}}$). Это подтверждается результатами расчета (таблица 2), в соответствии с которыми мы видим практически прямую пропорциональную зависимость значения $Q_{\text{ап.}}$ от D . Следует отметить, что с увеличением давления насыщенного водяного пара при постоянной концентрации поступающего раствора NH_4NO_3 , тепловая нагрузка не изменяется, что согласуется с работой [6].

Изменение $Q_{\text{ап.}}$ в зависимости от концентрации поступающего раствора NH_4NO_3 в исследуемом диапазоне (рис. 1), свидетельствует, что эффективность процесса выпаривания АС повышается при использовании раствора более высокой концентрации (близкой к 93% масс.). Ее достижение обеспечивается на стадии нейтрализации путем оптимизации технологических параметров исходных реагентов аммиака и азотной кислоты [2], [3], [11], [15]. Поскольку $Q_{\text{ап.}}$ является одним из ключевых параметров, необходимым для расчета рабочей поверхности (F), то уменьшение ее величины позволит снизить материалоемкость выпарного аппарата.

Таблица 2 - Изменение $Q_{\text{ап.}}$, D при различных x_n и $P_{\text{г.п.}}$

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.32.2>

Давление греющего пара, МПа	Концентрация раствора, x_n , масс. %	Тепловая нагрузка аппарат, $Q_{\text{ап.}}$, кВт	Расход пара, D , кг/с
1,30	89	6853	3,442
	91	5548	2,786
	93	4242	2,131
1,40	89	6853	3,464
	91	5548	2,804
	93	4242	2,144
1,50	89	6853	3,486
	91	5548	2,822
	93	4242	2,158
1,60	89	6853	3,506
	91	5548	2,838
	93	4242	2,170

Расчет выпарного аппарата осуществлялся через основное уравнение теплопередачи, и включал в себя вычисление коэффициента теплопередачи (K) и движущей силы процесса — полезной разности температур ($\Delta t_{\text{пол.}}$). Результаты вычислений $\Delta t_{\text{пол.}}$ при различных x_n и $P_{\text{г.п.}}$ представлены в таблице 3.

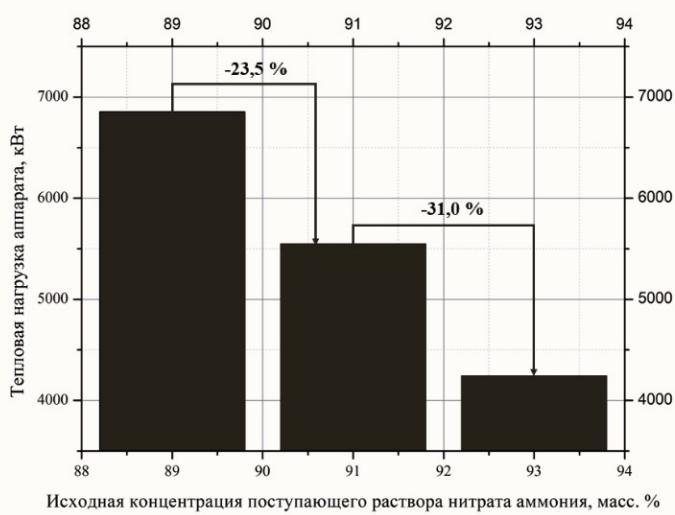


Рисунок 1 - Изменение тепловой нагрузки аппарата при увеличении исходной концентрации раствора
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.32.3>

Таблица 3 - Полезная разность температур при различных давлениях греющего пара и начальных концентрациях АС
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.32.4>

Давление греющего пара, МПа	Температура греющего пара, °C	Начальная концентрация раствора, масс. %	Полезная разность температур, °C
1,30	191,56	89	1,53
		91	-2,64
		93	-9,03
1,40	194,99	89	4,96
		91	0,79
		93	-5,6
1,50	198,27	89	8,24
		91	4,07
		93	-2,32
1,60	201,33	89	11,3
		91	7,13
		93	0,74

Для повышения эффективности процесса концентрирования целесообразно использование раствора АС с минимально возможной концентрацией и максимально высокой температурой греющего теплоносителя в сравнении с температурой кипения раствора АС. Вследствие особенностей расчета пленочных аппаратов, температура кипения раствора АС принималась равной средней концентрации раствора (x_{cp}) на входе и выходе из трубчатой части выпарного аппарата, благодаря этому допущению, движение раствора в аппарате соответствует модели идеального вытеснения (МИВ) [6], [7], [14], [15].

Отрицательные значения $\Delta t_{пол}$, полученные в результате расчета, указывают на то, что при данных $P_{г.п.}$ и x_n , заданная концентрация не достигается. Анализ формулы (1) указывает на нецелесообразность использования в дальнейших расчетах $\Delta t_{пол} < 1$, т.к. по мере уменьшения этого значения существенно увеличивается рабочая поверхность аппарата, материоемкость и капиталозатраты (1).

$$F_{ап} = \frac{Q_{ап}}{K \times \Delta t_{пол}}. \quad (1)$$

где $F_{ап}$ — рабочая поверхность нагрева, m^2 ; K — коэффициент теплопередачи, $Bt/(m^2 \times K)$; $Q_{ап}$ — тепловая нагрузка аппарата, kW .

Коэффициент теплопередачи является функцией 2-х основных параметров - коэффициента теплоотдачи от пара к стенке (α_1) и от стенки к кипящей пленке (α_2). По мере роста $P_{г.п.}$, коэффициент α_1 практически не изменяется в интервале давлений 1,3–1,6 МПа, а существенный вклад вносит его истинное значение (α_1^*), используемое в алгоритме

расчета [6]. Учитывая первое и второе приближение в расчетах аппарата, а также сложную функциональную зависимость α_1^* от физико-химических свойств насыщенного водяного пара, поступающего раствора АС, задаваемых параметров рабочих труб аппарата и коэффициента α_2 , значение последнего определяли по формулам (2, 3) [6]:

$$Nu_2^* = \frac{\alpha_2}{\lambda_2} \times \left(\frac{v_2^2}{g} \right)^{1/3} \quad (2)$$

$$Nu_2^* = \left(0,152 - \frac{0,778}{Pr_2 + 5,47} \right) \times (0,25 \times Re_{пл})^{0,231} \quad (3)$$

где λ_2 , v_2 — коэффициент теплопроводности и кинематическая вязкость кипящей пленки; g — ускорение свободного падения; Pr_2 , $Re_{пл}$ — критерии Прандтля и Рейнольдса кипящей пленки; Nu_2^* — модифицированный критерий Нуссельта.

Nu_2^* , так же как и α_1^* , является функцией многих параметров, основный вклад в изменение которого вносят физико-химические свойства поступающего раствора АС, как показано в таблице 4 и на графике рис. 2 [2], [6].

Таблица 4 - Физико-химические свойства АС при различных x_{cp}

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.32.5>

Средняя концентрация кипящей пленки, x_{cp} , масс. %	Динамическая вязкость, μ_2 , мПа·с	Плотность, ρ_2 , кг/м ³	Теплопроводность, λ_2 , Вт/(м·К)	Теплоемкость, c_{2p} , Дж/(кг·К)
94	2,880	1386,5	0,2866	2214
95	2,975	1394,5	0,2785	2205
96	3,030	1402,0	0,2704	2196

Согласно данным таблицы и рисунку 2, наблюдается практически линейное увеличение Pr_2 , основной вклад в изменение которого вносят μ_2 , λ_2 по сравнению с теплоемкостью (c_{2p}), которая изменяется незначительно в данном диапазоне усредненных концентраций.

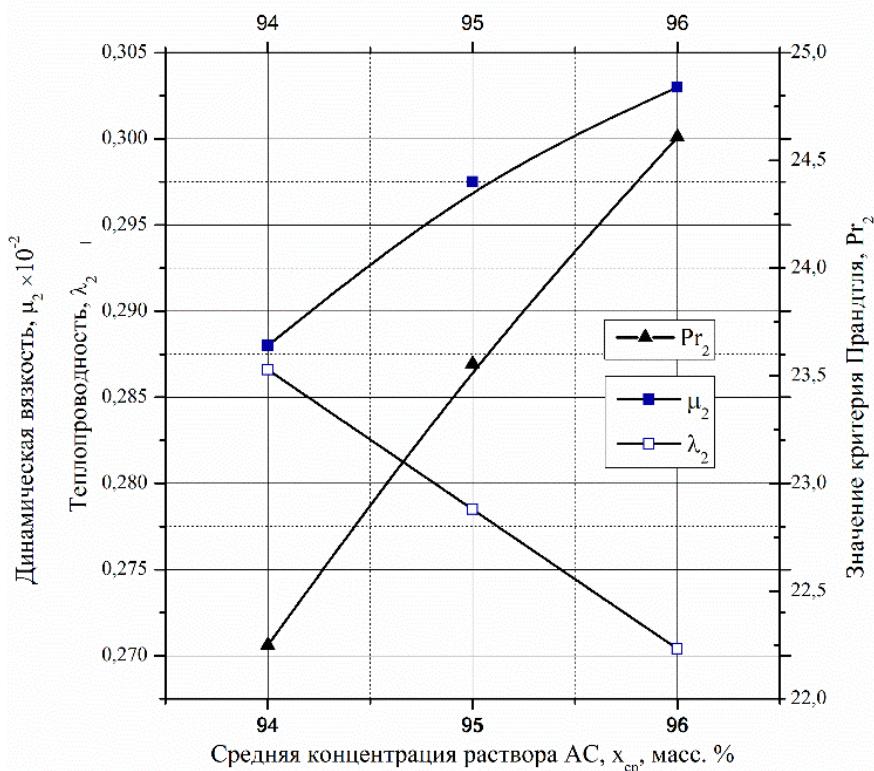


Рисунок 2 - Влияние физико-химических свойств АС на критерий Прандтля (Pr) при различных x_{cp}
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.32.6>

Критерий Прандтля (Pr_2) рассчитывался с использованием основного уравнения [6]. Расчет критерия Рейнольдса ($Re_{пл}$) проводился по формуле (4), содержащей новый параметр — линейную плотность орошения (Γ), которая является const, поскольку зависит только от задаваемых размеров рабочих труб и производительности установки (G_h). В связи с этим можно считать, что критерий $Re_{пл}$, зависит от единственной переменной — динамической вязкости, которая, согласно формуле (4), будет уменьшать его значение.

$$Re_{пл} = \frac{4 * \Gamma}{\mu_2} \quad (4)$$

Имея противоположный характер полученных критериальных зависимостей ($Re_{пл}$ и Pr_2), оцениваем их вклад в конечное значение критерия Nu_2^* . Последний растет при увеличении x_{cp} , так как более значительный вклад в ее составляющую вносит критерий Pr_2 , в отличие от степенной зависимости критерия $Re_{пл}$. Поскольку суммарный эффект в значение коэффициента α_2 вносят физико-химические свойства раствора АС (таблица 4) и значения критерия Nu_2^* , можно считать, что α_2 является сложной нелинейно убывающей функцией.

Итоговые расчетные значения критериев α_1^* , α_2 , Ки ГПри изменении x_h и $P_{г.п.}$ представлены в таблице 5. Выбранный диапазон $P_{г.п.}$ соответствовал таковому в действующих выпарных аппаратах агрегатов АС-72 и АС-72М [2], [3].

Таблица 5 - Результаты расчета выпарного аппарата при различных давлениях насыщенного водяного пара и концентрациях аммиачной селитры

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.32.7>

$P_{г.п.}$, МПа	x_h , масс. %	α_1^* , Вт/($m^2 \times K$)	α_2 , Вт/($m^2 \times K$)	Δt_1 , °C	K, Вт/($m^2 \times K$)	F, m^2
1,30	89	17795	1629	0,0796	702	6381
1,40	89	12133	1629	0,3696	689	2005
	91	22315	1559	0,0323	694	10118
1,50	89	10304	1629	0,7135	682	1219
	91	13062	1559	0,2763	679	2007
1,60	89	9314	1629	1,0726	678	895
	91	10898	1559	0,5724	672	1158
	93	23015	1506	0,0288	684	8383

Мы видим, что увеличение x_h и $P_{г.п.}$ приводит к значительному увеличению F, достигающей при $P_{г.п.}=1,4$ Мпа и $x_h=91\%$ масс максимального значения $10000 m^2$. Согласно ГОСТ [16], F выпарных аппаратов не превышает $3000 m^2$.

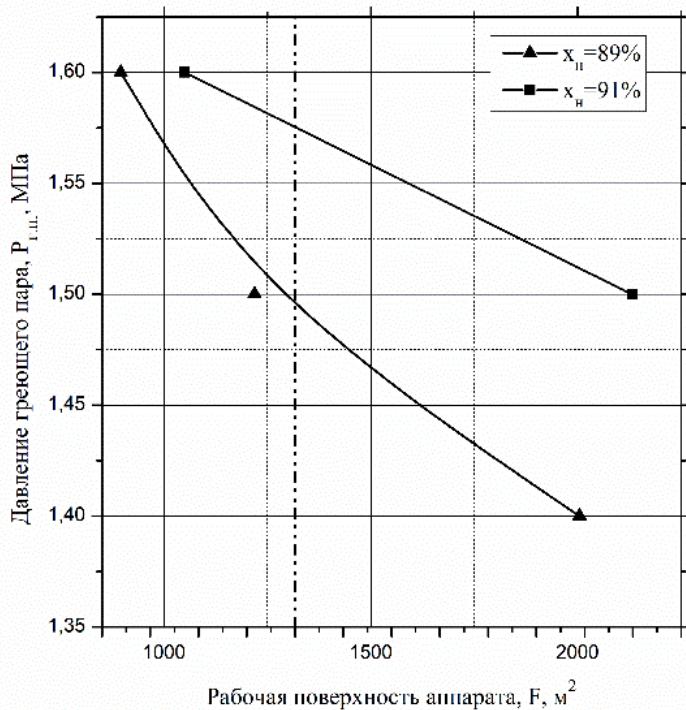


Рисунок 3 - Изменение рабочей поверхности аппарата в зависимости от $P_{\text{г.п.}}$ и x_h
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.32.8>

Главным ограничением использования растворов АС высокой концентрации (x_h) является температура насыщенного водяного пара, усложняющей процесс выпаривания из-за проблем создания минимально возможной тонкой пленки раствора, распределенной по расчетному количеству труб, равномерно обогреваемых греющим агентом.

Таким образом, для получения раствора АС концентрацией 99,8% масс. оптимальная рабочая поверхность аппарата КВА $F < 1400 \text{ м}^2$ с учетом 20–30% запаса находится левее пунктирной линии (рисунок 3), что в соответствии с литературными источниками сопоставимо с КВА агрегатов АС-72, АС-72 М. Большая компактность и меньшая материалоемкость КВА возможна при использовании труб меньшей длины [17].

Заключение

По результатам расчетно-аналитического исследования установлено, что выпарные аппараты агрегатов АС-72, АС-72 М с рабочей поверхностью $F < 1400 \text{ м}^2$ и параметрами процесса концентрирования раствора АС $P_{\text{г.п.}} = 1,6 \text{ МПа}$; $x_h = 89\%$ обеспечивают максимальную эффективность.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

- ГОСТ 2-2013. Селитра аммиачная. Технические условия. — Введ. 2014-07-01. — Москва: Стандартинформ, 2014. — С. 29.
- Иванов М.Е. Производство аммиачной селитры в агрегатах большой единичной мощности / М.Е. Иванов, В.М. Олевский, Н.Н. Поляков [и др.]; под. ред. В.М. Олевского. — Москва: Химия, 1990. — 288 с.
- Иванов М.Е. Технология аммиачной селитры / М.Е. Иванов, В.М. Олевский, Н.Н. Поляков [и др.]; под. ред. В.М. Олевского. — Москва: Химия, 1978. — С. 310.
- Дыбина П.В. Расчеты по технологии неорганических веществ / П.В. Дыбина, А.С. Соловьева, Ю.И. Вишняк; под. ред. П.В. Дыбиной. — Москва: Высш. Школа, 1967. — С. 524.

5. Позин М.Е. Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей, окислов и кислот) / М.Е. Позин. — Москва: Химия, 1974. — Ч. 2. — С. 1501.
6. Почиталкина И.А. Расчетно-аналитические исследования процесса концентрирования NH_4NO_3 , как инструмент увеличения его производительности / И.А. Почиталкина, В.Ю. Непряхин, Г.В. Мазурок // Химическая промышленность сегодня. — 2023. — № 4. — С. 51–57.
7. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессы и аппараты химической технологии. Учебное пособие для вузов / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков; под. ред. П.Г. Романкова. — Ленинград: Химия, 1987. — С. 576.
8. Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебн. пос. для высш. учеб. завед / Г.С. Борисов, В.П. Брыков, Ю.И. Дытнерский [и др.]; под ред. Ю.И. Дытнерского. — Москва: Химия, 1991. — С. 495.
9. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учеб. пособ. для высш. учеб. завед / А.Г. Касаткин. — Москва: Химия, 2005. — С. 753.
10. Тананайко Ю.М. Методы расчета и исследования пленочных процессов / Ю.М. Тананайко, Е.Г. Воронцов. — Киев: Техника, 1975. — С. 310.
11. Петропавловский И.А. Технология основных минеральных удобрений / И.А. Петропавловский, И.А. Почиталкина. — Москва: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2020. — 101 с.
12. Амелин А.Г. Общая химическая технология / А.Г. Амелин, А.И. Малахов, И.Е. Зубова [и др.]; под ред. А.Г. Амелина. — Москва: Химия, 1977. — С. 399.
13. Жаворонков Н.М. Справочник азотчика / Н.М. Жаворонков, В.В. Харламов, Е.Я. Мельников [и др.]; под ред. Е.Я. Мельникова. — Москва: Химия, 1987. — С. 463.
14. Кутепов А.М. Общая химическая технология / А.М. Кутепов, Т.И. Бондарева, М.Г. Беренгартен. — Москва: Высш. Шк., 1990. — С. 520.
15. Общая химическая технология / Под. ред. И.П. Мухленова. — Москва: Высш. Школа, 1977. — Т. 2. — С. 288.
16. ГОСТ 11987–81. Аппараты выпарные трубчатые стальные. Типы, основные параметры и размеры. — Введ. 1981–02–03. — Москва: Изд. стандартов, 1981. — С. 18.
17. Почиталкина И.А. Влияние геометрических параметров греющей поверхности комбинированного выпарного аппарата на коэффициент теплоотдачи / И.А. Почиталкина, В.Ю. Непряхин — 2023. — С. 50–51.

Список литературы на английском языке / References in English

1. GOST 2-2013. Selitra ammiachnaya. Tekhnicheskie usloviya [GOST 2-2013. Ammonium nitrate. Technical specifications]. — Intr. 2014-07-01. — Moscow: Standartinform, 2014. — P. 29. [in Russian]
2. Ivanov M.E. Proizvodstvo ammiachnoi selitri v agregatakh bolshoi yedinichnoi moshchnosti [Production of ammonium nitrate in large single-unit capacity units] / M.E. Ivanov, V.M. Olevskii, N.N. Polyakov [et al.]; ed. by V.M. Olevsky. — Moscow: Khimiya, 1990. — 288 p. [in Russian]
3. Ivanov M.E. Tekhnologiya ammiachnoi selitri [Ammonium nitrate technology] / M.E. Ivanov, V.M. Olevskii, N.N. Polyakov [et al.]; ed. by V.M. Olevsky. — Moscow: Khimiya, 1978. — P. 310. [in Russian]
4. Dibina P.V. Raschety po tekhnologii neorganicheskikh veshchestv [Calculations for inorganic substances technology] / P.V. Dibina, A.S. Soloveva, Yu.I. Vishnyak; ed. by P.V. Dibina. — Moscow: Higher School, 1967. — P. 524. [in Russian]
5. Pozin M.E. Tekhnologiya mineralnikh solei (udobrenii, pestitsidov, promishlennikh solei, okislov i kislot) [Mineral salt technology (fertilisers, pesticides, industrial salts, oxides and acids)] / M.E. Pozin. — Moscow: Khimiya, 1974. — Pt. 2. — P. 1501. [in Russian]
6. Pochitalkina I.A. Raschetno-analiticheskie issledovaniya protsessa kontsentrirovaniya NH_4NO_3 , kak instrument uvelicheniya yego proizvoditelnosti [Calculational and analytical studies of the NH_4NO_3 concentration process as a tool for increasing its productivity] / I.A. Pochitalkina, V.Yu. Neprakhin, G.V. Mazurok // Khimicheskaya promishlennost segodnya [Chemical Industry Today]. — 2023. — № 4. — P. 51–57. [in Russian]
7. Pavlov K.F. Primeri i zadachi po kursu protsessi i apparati khimicheskoi tekhnologii. Uchebnoe posobie dlya vuzov [Examples and exercises from the course on chemical technology processes and equipment. A textbook for universities.] / K.F. Pavlov, P.G. Romankov, A.A. Noskov; ed. by P.G. Romankov. — Leningrad: Khimiya, 1987. — P. 576. [in Russian]
8. Ditnerskii Yu.I. Osnovnie protsessi i apparati khimicheskoi tekhnologii: uchebn. pos. dlya vissh. ucheb. zaved [Basic processes and apparatus of chemical technology: textbook for universities] / G.S. Borisov, V.P. Brikov, Yu.I. Ditnerskii [et al.]; ed. by Yu.I. Ditnersky. — Moscow: Khimiya, 1991. — P. 495. [in Russian]
9. Kasatkin A.G. Osnovnie protsessi i apparati khimicheskoi tekhnologii: ucheb. posob. dlya vissh. ucheb. zaved [Basic processes and apparatus of chemical technology: textbook for universities] / A.G. Kasatkin. — Moscow: Khimiya, 2005. — P. 753. [in Russian]
10. Tananaiko Yu.M. Metodi rascheta i issledovaniya plenochnikh protsessov [Methods for calculating and investigating film processes] / Yu.M. Tananaiko, Ye.G. Vorontsov. — Kyiv: Tekhnika, 1975. — P. 310. [in Russian]
11. Petropavlovskii I.A. Tekhnologiya osnovnikh mineralnikh udobrenii [Technology of basic mineral fertilisers] / I.A. Petropavlovskii, I.A. Pochitalkina. — Moscow: RATU named after D.I. Mendeleev, 2020. — 101 p. [in Russian]
12. Amelin A.G. Obshchaya khimicheskaya tekhnologiya [General chemical technology] / A.G. Amelin, A.I. Malakhov, I.E. Zubova [et al.]; ed. by A.G. Amelin. — Moscow: Khimiya, 1977. — P. 399. [in Russian]
13. Zhavoronkov N.M. Spravochnik azotchika [Nitrogen fertilizer reference book] / N.M. Zhavoronkov, V.V. Kharlamov, Ye.Ya. Melnikov [et al.]; ed. by Ye.Ya. Melnikov. — Moscow: Khimiya, 1987. — P. 463. [in Russian]
14. Kutepov A.M. Obshchaya khimicheskaya tekhnologiya [General chemical technology] / A.M. Kutepov, T.I. Bondareva, M.G. Berengarten. — Moscow: Higher School, 1990. — P. 520. [in Russian]
15. Obshchaya khimicheskaya tekhnologiya [General chemical technology] / Ed. by I.P. Mukhlenov. — Moscow: Higher School, 1977. — Vol. 2. — P. 288. [in Russian]

16. GOST 11987–81. Apparati viparnie trubchatie stalnie. Tipi, osnovnie parametri i razmeri [Steel tube evaporators. Types, main parameters and dimensions]. — Intr. 1981–02–03. — Moscow: Standard Publishing House, 1981. — P. 18. [in Russian]
17. Pochitalkina I.A. Vliyanie geometricheskikh parametrov greyushchei poverkhnosti kombinirovannogo viparnogo apparata na koeffitsient teplootdachi [Influence of geometric parameters of the heating surface of a combined evaporator on the heat transfer coefficient] / I.A. Pochitalkina, V.Yu. Nepryakhin — 2023. — P. 50–51. [in Russian]