

# МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ПЕРМЕАТА НАНОФИЛЬТРАЦИИ, ОЧИЩЕННОГО ОБРАТНЫМ ОСМОСОМ\*

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

**Алексей Викторович Гавриш**, инженер центра биотехнологического инжиниринга

E-mail: [gavrish@mokostav.com](mailto:gavrish@mokostav.com)

**Виталий Александрович Кравцов**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник центра биотехнологического инжиниринга

**Георгий Сергеевич Анисимов**, канд. техн. наук, директор центра биотехнологического инжиниринга

**Мария Евгеньевна Косенко**, младший научный сотрудник центра биотехнологического инжиниринга

**Дмитрий Сергеевич Мамай**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пищевых технологий и инжиниринга Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь

Молочная промышленность отличается высоким потреблением воды на единицу массы готовой продукции. Поэтому рациональное использование воды и поиск эффективных решений для сокращения объема сточных вод остаются приоритетными задачами в отрасли. Одним из перспективных подходов является повторное использование очищенных стоков. Особый интерес в этой связи представляют отходы, относительно легко поддающихся очистке, такие как пермеат нанофильтрации молочного сырья, который может быть очищен с хорошим выходом в одну стадию путем фильтрации через обратноосмотические мембраны. Цель исследования заключалась в моделировании условий хранения пермеата обратного осмоса, полученного из нанофильтрационного пермеата, и оценке его микробиологических параметров. Для выработок на пилотной установке обратного осмоса использовали нанофильтрационный пермеат, полученный из пермеатов ультрафильтрации молока или подсырной сыворотки. В продукте обратноосмотической очистки анализировали микробиологические показатели непосредственно после получения, а также через 24 и 72 ч хранения при комнатной температуре. Кроме того, моделировали производственные условия хранения продукта очистки с охлаждением в течение 7 суток и анализировали смывы с поверхности емкостей. Развитие микрофлоры в обратноосмотическом пермеате было незначительным после 24 ч. Через 72 ч КМАФАнМ увеличилось на два порядка – с 4,42 до 6,48 lg(KOE/мл). Анализ смывов с поверхности емкостей по прошествии 7 суток хранения выявил КМАФАнМ 2,85 lg(KOE/мл). Для предотвращения роста микробной обсемененности рекомендуется ежедневная мойка оборудования (при отсутствии охлаждения) или мойка не реже одного раза в 7 суток (при условии соблюдения холодного температурного режима). Полученные результаты позволяют оптимизировать потребление воды на предприятиях, вырабатывающих молочные ингредиенты. Однако перед промышленным внедрением важно провести подробную экономическую оценку технологии очистки, учитывающую расходы на оборудование, его обслуживание, энергоресурсы, моющие средства и пр.

**Ключевые слова:** микробиология, нанофильтрация, обратный осмос, водоочистка, биопленки

**Для цитирования:** Микробиологическая стабильность пермеата нанофильтрации, очищенного обратным осмосом / А. В. Гавриш, В. А. Кравцов, Г. С. Анисимов [и др.] // Молочная промышленность. 2025. № 2. с. 78–83. <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2025-2-36>

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме: «Создание первого в России высокотехнологичного производства пребиотика лактулозы и функциональных молочных ингредиентов для импортозамещения в медицине, ветеринарии, детском питании, производстве лечебно-профилактических продуктов для людей и животных» (Соглашение о предоставлении из федерального бюджета субсидии на развитие кооперации государственного научного учреждения и организации реального сектора экономики в целях реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства № 075-11-2022-021 от 07.04.2022 г.) в рамках Постановления Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218 на базе ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет».



Источник изображения: freepik.com

## ВВЕДЕНИЕ

Молочное производство отличается большим потреблением воды – предприятие может использовать до 10 литров чистой воды на литр переработанного молока в зависимости от ассортимента выпускаемой продукции<sup>1</sup>. Вода используется при мойке технологических емкостей, трубопроводов и агрегатов, в качестве тепло- и хладоносителя, для хозяйственных нужд, растворения сухих ингредиентов, как компонент рецептур и т. д. Существенная часть потребленной воды переходит в промышленные стоки, очистка которых требует специальных, зачастую дорогостоящих инженерных решений.

Для очистки промышленных сточных вод активно используются мембранные технологии. Несколько работ, посвященных очистке сточных вод молочных предприятий, продемонстрировали успешную реализацию мембранных методов: ультрафильтрация [1], нанофильтрация [2], обратный осмос [3–5]. Очищенная вода может быть использована повторно в различных процессах – это зависит от исходного состава стоков и способа их очистки.

На предприятиях, перерабатывающих молочную сыворотку, существенный вклад в общий объем сточных вод вносит нанофильтрация. При концентриро-

вании молочного сырья (сыворотки, ультрафильтрационного пермеата) посредством нанофильтрации 60–80 % объема сырья переходит в нанофильтрационный пермеат. Низкое содержание сухих веществ (менее 1 %) в нанофильтрационном пермеате делает нерентабельным его валоризацию. С другой стороны, его использование в качестве замены сетевой или артезианской воде также невозможно без дополнительной очистки. Наиболее эффективным мембранным процессом для очистки нанофильтрационного пермеата является обратный осмос, который обеспечивает задержание большинства низкомолекулярных компонентов на 98–99 %. Ранее была продемонстрирована возможность получения из нанофильтрационного пермеата воды путем одностадийного обратного осмоса [6]. Полученная вода по ряду показателей качества не уступала воде централизованного водоснабжения,

Остаточное содержание органических веществ «молочного» происхождения в пермеате после обратноосмотической очистки (обратноосмотическом пермеате) создает риск развития микрофлоры. Потенциальный рост микрофлоры не означает, что использование обратноосмотического пермеата недопустимо, однако может ограничивать область его применения или создавать дополнительные требования к условиям хранения.

<sup>1</sup>Prasad, P. Eco-efficiency for the Dairy Processing Industry / P. Prasad [et al.]. – Environmental Management Centre, The University of Queensland, St Lucia, 2019. – 181 p.



Источник изображения: Geerik.com

**Целью работы** было моделирование хранения обратноосмотического пермеата, полученного при очистке нанофильтрационного пермеата, и определение его микробиологических параметров в процессе резервирования.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обратноосмотический пермеат получали из нанофильтрационного пермеата, выработанного на промышленном оборудовании при концентрировании ультрафильтрационных пермеатов молока и молочной сыворотки. Для нанофильтрации использовали мембранные элементы Sani-Pro SR3D (Koch Filtration Systems, США) с отсечкой по молекулярной массе 200 Да<sup>2</sup> [8]. Параметры процесса нанофильтрации и полученного пермеата приводятся в таблицах 1–2.

**Таблица 1. Параметры процесса нанофильтрации**

Наименование показателя	Циркуляционный контур	
	I	II
Температура, °С	14 ± 1	16 ± 1
Скорость потока через мембранный элемент, м <sup>3</sup> /ч	2,9 ± 0,3	0,7 ± 0,1
Давление, бар	28 ± 1	
Содержание сухих веществ в сырье, г/100 г	5,6 ± 0,7	
Содержание сухих веществ в ретентате, г/100 г	22,1 ± 1,4	

**Таблица 2. Примерный состав и свойства нанофильтрационного пермеата молочного сырья**

Наименование показателя	Содержание
Содержание сухих веществ, г/100 г	0,2–0,4
pH	6,0–6,4
Удельная электропроводность, мСм/см	2,6–3,8
Титруемая кислотность, °Т	5,0–13,0
Зола, г/100 г	0,09–0,17
Натрий, мг/кг	80–200
Калий, мг/кг	250–450
Магний, мг/кг	1–3
Кальций, мг/кг	2–10
Хлорид, мг/кг	280–520
Фосфор (в пересчете на фосфат), мг/кг	90–150
Общий азот, мг/кг	60–100
Лактоза, мг/л	1500–2600
Галактоза, мг/л	0–400
Глюкоза, мг/л	0–600

<sup>2</sup>Sani-Pro SR3D Nanofiltration Elements [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kovalus.com/wp-content/uploads/2020/10/sani-pro-nf-elements.pdf> (дата обращения 19.11.2024)

Обратный осмос проводили на установке мембранной фильтрации TestUnit M20, оснащенной единственным спиральным полимерным элементом RO98pHt-2517/48 (Alfa Laval, Швеция). Схема установки представлена на рисунке 1.

Обратноосмотическую обработку нанофильтрационного пермеата осуществляли в периодическом режиме при скорости циркуляции 28 л/мин и давлении 40 бар. Температура фильтрации составляла 15–19 °С. По мере отделения пермеата сырье добавляли в емкость установки с ретентатом; в течение фильтрации контролировали содержание сухих в ретентате. Процесс останавливали по достижении сухих веществ 3,0 г/100 г (через 2–3 ч с момента начала фильтрации), что соответствовало фактору концентрирования  $6,8 \pm 1,4$ . По завершении фильтрации отбирали образцы обратноосмотического пермеата для анализа и моделирования хранения.

В обратноосмотическом пермеате определяли содержание сухих веществ, титруемую кислотность и рН. Показатели полученного обратноосмотического пермеата представлены в таблице 3.

Отобранный обратноосмотический пермеат разделяли на три порции. В них определяли КМАФАНМ по ГОСТ 10444.11-2013, БГКП по ГОСТ 32901-2014, дрожжей и плесеней по ГОСТ 33566-2015. В первом образце микробиологическое исследование проводилось немедленно, во втором – после

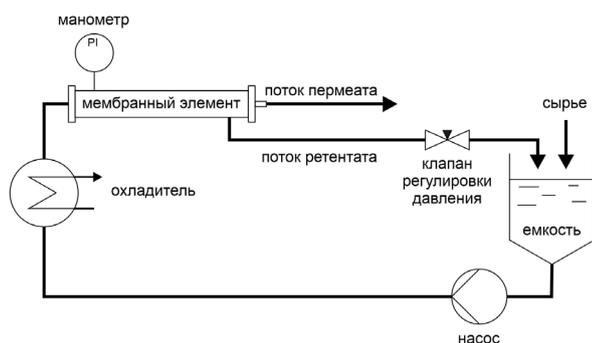


Рисунок 1. Схема установки обратного осмоса

Таблица 3. Физико-химические показатели обратноосмотического пермеата

Наименование показателя	Содержание
Сухие вещества, мг/кг	82 ± 6
Удельная электропроводность, мкСм/см	113,1 ± 22,5
Активная кислотность, ед. рН	4,96 ± 0,17
Титруемая кислотность, °Т	0,39 ± 0,09

суточного резервирования при температуре 25 °С, в третьем – после 72 ч в аналогичных условиях. Условия эксперимента были выбраны таким образом, чтобы моделировать резервирование в промышленной емкости без регулирования температуры. Схема проведения эксперимента представлена на рисунке 2.

При помощи лабораторной модели дополнительно исследовали образование биопленки при резервировании обратноосмотического пермеата в промышленном емкостном оборудовании. Две герметично закрывающиеся теплоизолированные емкости из нержавеющей стали (SUS304) с полированной внутренней поверхностью объемом 1 л обрабатывали спиртовым раствором, высушили и заполнили на 2/3 охлажденными до температуры 4 °С обратноосмотическим пермеатом и обратноосмотической водой, полученной из сетевой воды на промышленной установке. Емкости закрывали и хранили при температуре 4 °С в течение 7 суток. Ежедневно содержимое емкостей сливали и заменяли свежими обратноосмотическим пермеатом и обратноосмотической водой, заранее охлажденными до температуры резервирования.

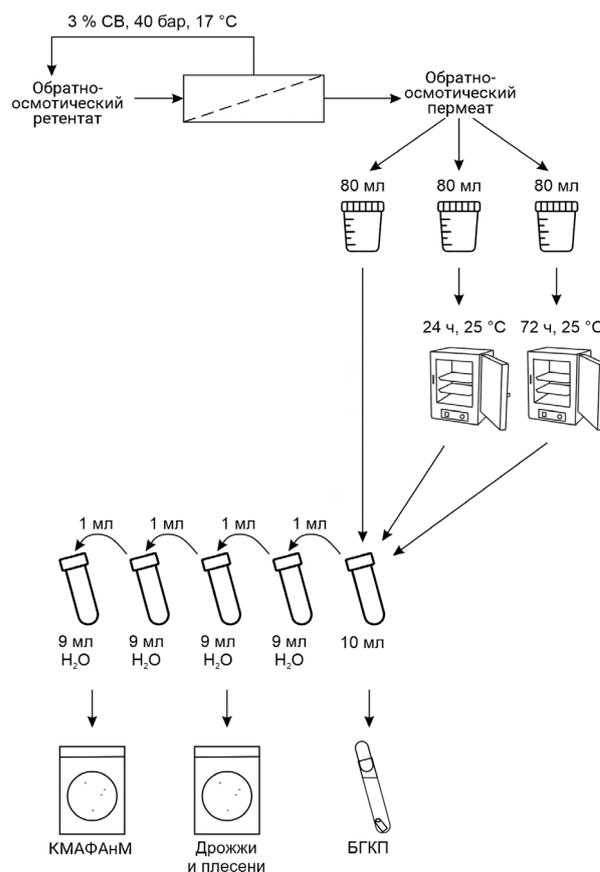


Рисунок 2. Схема получения обратноосмотического пермеата и проведения микробиологического исследования



Источник изображения: freerik.com

Такая процедура воспроизводит эксплуатацию промышленной емкости без мойки, во время которой она периодически опорожняется и наполняется свежеполученным обратноосмотическим пермеатом. По окончании 7-суточного периода были взяты смывы с внутренней поверхности емкостей для определения микробиологических показателей в соответствии с МР 4.2.0220-20 «Методы санитарно-бактериологического исследования микробной обсемененности объектов внешней среды».

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа обратноосмотического пермеата через 24 и 72 ч после выработки приводятся в таблице 4.

Значимого развития микрофлоры через 24 ч инкубирования не наблюдалось. Однако через 72 ч резервирования обратноосмотического

пермеата выявлен рост КМАФАНМ на 2 порядка, в обоих повторностях определялись БГКП в 0,1 мл и дрожжи в количестве более  $10^2$  КОЕ/мл. Единственным микробиологическим показателем, не показавшим роста на протяжении эксперимента, было количество плесневых грибов.

Помимо обсемененности самой воды, важное значение имеет микробиологическая чистота емкости, в которой она резервируется. Существует риск формирования на емкостном оборудовании биопленки, не поддающейся удалению при мойке по стандартным протоколам. Эта биопленка в дальнейшем становится источником систематического загрязнения воды [6, 7]. Результаты анализа смывов с поверхности емкостей, полученных после модельного резервирования обратноосмотического пермеата с охлаждением, представлены в таблице 5.

Таблица 4. КМАФАНМ, количество БГКП, дрожжей и плесеней в обратноосмотическом пермеате

Время резервирования, ч	КМАФАНМ, lg(КОЕ/мл)	БГКП, наличие или отсутствие в объеме, 1 повт. / 2 повт.		Дрожжи, КОЕ/мл, 1 повт. / 2 повт.	Плесени, КОЕ/мл
		1,0 мл	0,1 мл		
0	4,42 ± 0,54	+ / -	- / -	4 / 0	Не обнаружены
24	4,46 ± 0,20	- / -	- / -	0 / 35	Не обнаружены
72	6,48 ± 0,40	+ / +	+ / +	256 / 770	Не обнаружены

Таблица 5. Микробиологическая обсемененность поверхности емкостей из нержавеющей стали с обратноосмотическим пермеатом и обратноосмотической водой после 7 суток, lg(КОЕ/мл)

Микробиологические показатели	Обратноосмотическая вода	Обратноосмотический пермеат	Смывы с поверхности	
			Обратноосмотическая вода	Обратноосмотический пермеат
КМАФАНМ	3,16	Не обнаружены в 0,01 мл	2,48	2,85
Дрожжи	1,50	0,60	1,49	2,70
Плесени	1,02	Не обнаружены в 1,00 мл	0,78	0,48

Несмотря на практически полное отсутствие в обратноосмотическом пермеате мезофильных микроорганизмов, плесеней и низкое содержание дрожжей после 7 суток резервирования, в смывах обнаружены все исследованные группы микроорганизмов.

Микробиологическое исследование показало, что резервирования обратноосмотического пермеата в течение 72 ч в комнатной температуре достаточно для развития основных групп микроорганизмов. После резервирования обратноосмотического пермеата при температуре 4 °С смывы с поверхности емкости показали наличие прикрепленных бактерий и микроскопических грибов спустя 7 суток даже при регулярном обновлении обратноосмотического пермеата. ледовательно, мойка емкостного оборудования, где резервируется обратноосмотический пермеат, должна проводиться не реже одного раза в 7 суток, при условии соблюдения температурного режима и ежедневной замены обратноосмотического пермеата.

## ВЫВОДЫ

Результаты настоящего исследования подтвердили возможность безопасного использования обратноосмотического пермеата, полученного из нанофильтрационного пермеата на молочном производстве, при одном из двух условий. Необходимо обеспечить либо ежедневную мойку емкостного оборудования, либо охлаждать обратноосмотический пермеат (4 °С). Однако даже при низкой температуре риск образования биопленки на поверхности емкостного оборудования сохраняется.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности оптимизации потребления воды на предприятиях, вырабатывающих молочные ингредиенты. Однако перед промышленным внедрением важно провести подробную экономическую оценку технологии очистки, учитывающую расходы на оборудование, его обслуживание, энергоресурсы, моющие средства и пр. ■

Поступила в редакцию: 18.12.2024  
Принята в печать: 05.02.2025

## MICROBIOLOGICAL STABILITY OF NANOFILTERED PERMEATE AFTER REVERSE OSMOSIS

Alexei V. Gavrish, Vitalii A. Kravtsov, Georgy S. Anisimov, Maria E. Kosenko, Dmitry S. Mamay  
North-Caucasus Federal University, Stavropol

ORIGINAL ARTICLE

The dairy industry consumes a lot of water per unit of final product. Sustainable water consumption needs effective solutions to reduce wastewater. Wastewater treatment and reuse is a promising approach because dairy nanofiltration permeates are easily filtered with reverse osmosis. The article introduces a storage model and microbiological profile for reverse osmosis permeate obtained by nanofiltration. The pilot-scale reverse osmosis involved nanofiltration permeate derived from ultrafiltered milk or cheese whey. The microbiological indicators were analyzed immediately after processing and then after 24 and 72 h of room temperature storage. The analysis included a simulation of industrial storage conditions during 7 days with cooling, as well as biofilm samples from container surface. After 24 h, the reverse osmosis permeate demonstrated negligible microflora. After 72 h, the total microbial count increased by two orders of magnitude, i.e., from 4.42 to 6.48 lg(CFU/mL). After 7 days of storage, the analysis of surface swabs from the containers revealed a total microbial count of 2.85 lg(CFU/mL). To prevent microbial contamination, equipment should be washed daily for room-temperature storage or at least once every 7 days for cold storage. The data obtained may help to optimize water use by dairy facilities, but industrial implementation requires a detailed economic assessment of the purification technology, including the costs of equipment, maintenance, resources, cleaning agents, etc.

**Keywords:** microbiology, nanofiltration, reverse osmosis, water treatment, biofilms

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brião, V. B. Pore blocking mechanism for the recovery of milk solids from dairy wastewater by ultrafiltration / V. B. Brião [et al.] // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2012. Vol. 29(2). P. 393–407. <http://doi.org/10.1590/S0104-66322012000200019>
2. Andrade L. H. Nanofiltration as tertiary treatment for the reuse of dairy wastewater treated by membrane bioreactor / L. H. Andrade [et al.] // Separation and Purification Technology. 2014. Vol. 126. P. 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.01.056>
3. Гавриш, А. В. Обратноосмотическая очистка пермеатов, полученных при нанофильтрации молочного сырья / А. В. Гавриш, Г. С. Анисимов, В. А. Кравцов [и др.] // Молочная промышленность. 2023. № 5. С. 16–18. <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2023-5-2>; <https://www.elibrary.ru/ndsqmk>
4. Al-Obaidi, M. Wastewater Treatment by Reverse Osmosis Process / M. Al-Obaidi [et al.]. – Boca Raton, 2020. – P. 58–63.
5. Vourch, M. Treatment of dairy industry wastewater by reverse osmosis for water reuse / M. Vourch [et al.] // Desalination. 2008. Vol. 219(1-3). P. 190–202. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.05.013>; <https://www.elibrary.ru/jdzjt看>
6. Teh, G. K. Biofilms in the dairy industry / G. K. Teh [et al.]. – Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. – 288 p.
7. Ryu, J. H. Attachment and biofilm formation on stainless steel by Escherichia coli O157:H7 as affected by curli production / J. H. Ryu, [et al.] // Letters in applied microbiology. 2004. Vol. 39(4). P. 359–362. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2004.01591.x>