

## ОТЗЫВ

официального оппонента **Громова Сергея Львовича** на диссертационную работу **Смирнова Александра Александровича** «Повышение эффективности установок обратного осмоса», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.15. Мембраны и мембранная технология (технические науки)

**Актуальность темы диссертации.** Представленная диссертация нацелена на разработку подходов к снижению количества обратноосмотического концентрата при одновременном повышении надежности и экономичности установок обессоливания воды.

Технологии мембранного разделения и, прежде всего, обратный осмос нашли широкое применение для целей деминерализации воды во многих отраслях экономики. В то же время объемы обратноосмотического концентрата, генерируемого в процессе обработки исходной воды, в некоторых случаях являются фактором, ограничивающим возможность применения обратного осмоса для решения практических задач.

Поэтому тематика диссертации Смирнова А.А., направленной на повышение эффективности использования обратноосмотических установок при получении обессоленной воды, является актуальной на современном этапе.

**Научная новизна** диссертации заключается в следующем:

1. Разработан новый комплексный подход, позволяющий минимизировать поток концентрата в обратноосмотических установках при обработке вод с содержанием до 2 г/л, основанный на поддержании минимально необходимого потока воды над мембраной, оценке предельной степени концентрирования труднорастворимых веществ и оценке пригодности воды по коллоидной нагрузке математически обоснованным способом.

2. Впервые разработана математическая модель методики определения коллоидного индекса, на основе которой введено понятие обобщенного коллоидного индекса.

3. Для комбинированных систем обессоливания воды, включающих технологию обратного осмоса и противоточного ионного обмена, установлены неочевидные отличительные особенности работы фильтров ионного обмена на доочистке пермеата обратного осмоса.

4. Разработан новый комплексный подход к построению системы двухступенчатого обратного осмоса с двухступенчатым удалением углекислоты на основе комбинации физического и химического способов.

### **Теоретическая и практическая значимость работы состоит в следующем:**

1. Разработан простой и экономически эффективный способ увеличения степени извлечения фильтрата установок обратного осмоса непрерывного типа; определены факторы, лимитирующие степень извлечения фильтрата и определены пути преодоления их влияния.
2. Разработан и апробирован новый метод определения качества и пригодности исходной воды для подачи на обратноосмотические мембраны по содержанию в ней коллоидных частиц – обобщенный коллоидный индекс.
3. Установлены важные для эксплуатации систем водоподготовки отличия процесса регенерации катионообменных фильтров, в которых они являются второй ступенью обессоливания воды после одноступенчатых установок обратного осмоса, и разработаны рекомендации по эксплуатации таких систем водоподготовки.
4. Разработана методика и представлен высокоэффективный способ улучшения качества фильтрата двухступенчатых установок обратного осмоса, основанный на применении сочетания физического и химического способов удаления углекислоты из воды в мембранных установках.

### **Основное содержание работы**

Диссертация включает введение, пять глав, заключение, список литературы из 117 источников и приложение. Работа изложена на 144 страницах машинописного текста и содержит 40 рисунков, 14 таблиц и Акт о внедрении результатов работы.

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, содержится общая характеристика работы, излагаются ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость, формулируются цели и задачи исследований.

**В первой главе** изложены применяемые способы снижения количества концентрата установок обратного осмоса. Рассмотрены реагентные методы, а также мембранные технологии HERO, FO/DO, PAFO, OARO, SBRO, CCRO, VSEP.

**Во второй главе** содержатся результаты математического и компьютерного моделирования, положенные в основу предложенного способа уменьшения количества концентрата обратноосмотических установок; определены границы применимости разработанного способа и приведены оценки его экономической эффективности.

**В третьей главе** рассмотрено влияние коллоидных частиц, поступающих в установку обратного осмоса с рулонными мембранными элементами; проанализированы показатели SDI, MFI и их модификации; предложена математическая модель, описывающая процесс аккумуляции коллоидов на мембранной поверхности;

разработана экспериментальная установка и приведены результаты исследований, позволившее сформулировать понятие «обобщенного коллоидного индекса».

**Четвертая глава** посвящена анализу работы комбинированных схем обессоливания воды, в которых обратноосмотический пермеат проходит финишную очистку на установках с раздельным Н-ОН ионированием; выявлены отличительные особенности показателей качества пермеата по сравнению с фильтратом после первой ступени традиционной ионообменной установки; разработаны рекомендации по проведению регенерации фильтров с сильнокислотным катионитом при их использовании для обработки обратноосмотического пермеата.

**В пятой главе** уделено внимание проблематике свободной углекислоты в обратном осмосе и способам ее удаления из обрабатываемой воды; представлены результаты экспериментальных исследований и промышленной апробации предложенного способа снижения содержания углекислого газа сочетанием физического и химического метода воздействия.

**В заключении** диссертационной работы сформулированы основные выводы и результаты проведенных научных исследований.

**Особо заслуживают быть отмеченными следующие обстоятельства:**

1. Применение автоматизированного оборудования (глава 3) для проведения экспериментов, что не только «облегчает жизнь» исследователю, но, в первую очередь, позволяет повысить степень достоверности полученных данных.

2. Нацеленность на практические результаты (например, стремление усовершенствовать существующие подходы к определению влияния коллоидной компоненты в исходной воде на показатели стабильности эксплуатации обратноосмотических установок).

3. Необходимость отказа от традиционных воззрений на идентичность показателей качества фильтрата после первой ступени ионообменного обессоливания и обратноосмотического пермеата (глава 4).

Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Результаты работы неоднократно докладывались на международных конференциях. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts.

**Конечно, нельзя не отметить и имеющиеся в диссертационной работе недостатки, а также вопросы, нуждающиеся в уточнении.**

1. В обзорной части работы приводится широко распространенное, но некорректное утверждение о том, что термические методы обессоливания являются

безреагентными – ни одна промышленная выпарная/испарительная установка не обходится без применения реагентов при проведении периодических промывок в процессе эксплуатации.

2. Содержащиеся в обзоре утверждения о неприменении реагентов в рабочем цикле промышленных установок обратного осмоса и об отсутствии дополнительных (по сравнению с исходной водой) компонентов в стоках после мембранного оборудования не соответствуют действительности.

3. Применение 2-х ступенчатого обратного осмоса всегда приводит к росту капитальных и эксплуатационных (через статью амортизации) затрат на водоподготовительной установке, которые перекрывают любую экономию от снижения потребления воды на собственные нужды и удешевления предподготовки.

4. Словосочетание «математическая модель методики» лингвистически ущербно.

5. Строго говоря, природа реакций ионного обмена отличается от механизмов сорбции – десорбции.

6. При описании процесса HERO акцент сделан на сопутствующих эффектах, а не на запатентованных положениях разработки компании Aquatech.

7. При рассмотрении CCRO упущены из виду патент компании «Гидротех» от 2019 г. и то обстоятельство, что именно в полупериодическом режиме функционировали экспериментальные/пилотные установки, эксплуатировавшиеся отечественными исследователями в 70-е годы прошлого века.

8. Допущено некорректное описание принципов и параметров работы оборудования для вибрационного мембранного разделения в обзорной части. Неверно указаны значение резонансной амплитуды колебаний модулей, обеспечиваемые показатели доли отбора пермеата, отвергнуто применение метода фильтрования из тангенциального потока.

9. Принятая для анализа процесса осадкообразования на поверхности мембран в качестве рабочей гипотезы модель кристаллизации, сочетающая объемные и поверхностные эффекты, не только не согласуется с классическими представлениями о характере этого процесса, но и игнорирует различия в природе кристаллизующихся соединений, а также влияние свойств сжимаемости высокодисперсных осадков.

10. Утверждение об ограничении нижнего предела потока концентрата в рулонных обратноосмотических элементах типоразмера 8040 значением расходной характеристики не менее  $5,1 \text{ м}^3/\text{ч}$ , не получило должного обоснования (как теоретического

плана, так и экспериментального характера), чтобы считаться справедливым не только для конкретных условий выполненных исследований, но и для общего случая.

11. В качестве недостатка общего плана можно отметить, что значительную долю в содержании работы занимают, по сути, литературные обзоры отдельных аспектов рассматриваемой проблематики. (При этом, ради справедливости, надо отметить, что без такого подхода задача исследования из-за ее комплексного характера и зависимости от широкого спектра факторов реализовать бы не удалось).

**По диссертационной работе имеются следующие вопросы:**

1. В чем смысл корреляции, представленной на Рис. 13 ((зависимость солесодержания пермеата после второй ступени от доли отбора (СИФ) на первой ступени), если далее Вы абсолютно справедливо указываете на зависимость солесодержания пермеата от минерализации раствора, поступающего на соответствующую ступень установки обратного осмоса?

2. Почему Вы прибегли к использованию параметра «скорости перемешивания при кристаллизации» вместо «интенсивности перемешивания»? И что Вы подразумеваете под ее (скорости) «высоким» и «низким» значениями?

3. Почему, несмотря на многочисленные недостатки, Вы выбрали именно SDI (а не MFI или индекс на базе UF) в качестве базы сравнения с ОКИ?

4. Хотелось бы узнать Ваше мнение относительно причин, по которым мембранный фильтр продемонстрировал максимальную производительность при работе на ОО-пермеате, дважды пропущенном через микрофильтр 0,45 мкм? И что содержится в ОО-пермеате такого (какие загрязнения/примеси/структуры/компоненты), которые удаляются микрофльтрацией с рейтингом 0,45 мкм, но при этом не задерживаются обратноосмотической мембраной?

5. В чем проявляются «трудоемкость обслуживания и ремонта» пленочных декарбонизаторов и по сравнению с чем они (трудоемкость ремонта и обслуживания) «повышенные»?

6. Что Вы имеете в виду под «недостаточной гидродинамикой» пленочных декарбонизаторов? Какая гидродинамика является «достаточной»?

Указанные недостатки носят частный характер и не могут повлиять ни на результаты и выводы, сделанные диссертантом, ни на общую положительную оценку выполненной им работы, представляющей собой завершённое исследование.

Практическая значимость подтверждается актом внедрения результатов диссертации в деятельность АО «НПК Медиана-Фильтр».

По своему содержанию диссертационная работа Смирнова А.А. соответствует паспорту научной специальности 2.6.15. Мембраны и мембранная технология в части:

п. 3. «Разработка принципов функционирования мембран различного назначения (обратноосмотических, нано-, ультра-, микрофильтрационных, первапорационных, ионообменных, газоразделительных) при мембранном разделении компонентов жидких и газовых смесей, в том числе в мембранных контакторах и мембранном катализе»;

п. 4. «Технологические схемы с применением мембранных процессов, их экономическое и экологическое обоснование»; п. 5. «Мембранные процессы очистки, извлечения (кондиционирования) жидких и газообразных энергоносителей из смесей их содержащих природного, биогенного и техногенного происхождения. Комбинированные и гибридные процессы мембранной технологии (сочетание мембранных процессов с другими процессами химической технологии: абсорбцией, адсорбцией, ректификацией, дистилляцией)»; п. 7. «Методы расчета и оптимизация режимов работы мембранных аппаратов и систем с целью улучшения конструкции аппаратов, мембранных модулей и повышения эффективности их работы. Изучение особенностей мембранных систем, таких как концентрационная поляризация, засорение и старение мембран, и методов борьбы с этими явлениями».

Диссертация Смирнова А. А. представляет собой научно-квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные технологические решения задачи создания современных эффективных обратноосмотических установок обессоливания воды, внедрение которых позволит получить значительный экономический и экологический эффект.

По актуальности, новизне, теоретической и практической значимости диссертация Смирнова Александра Александровича на тему «Повышение эффективности установок обратного осмоса» соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденного приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103 ОД, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, **Смирнов Александр Александрович**, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.15. Мембраны и мембранная технология.

**Официальный оппонент:**

Кандидат технических наук (05.17.08 Процессы и аппараты химической технологии), старший научный сотрудник, доцент кафедры Теоретических основ теплотехники им. М.П. Вукаловича Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

“10\_” июня\_ 2026 г.

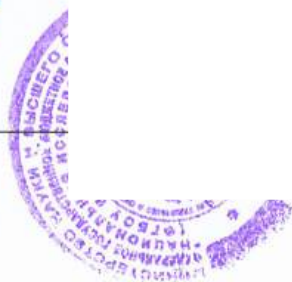
Громов Сергей Львович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», РФ, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14 с.1; <https://mpei.ru/Pages/default.aspx>

Тел.: +7(9) \_\_\_\_\_;

E-mail: [sl\\_\\_\\_\\_\\_@mpei.ru](mailto:sl_____@mpei.ru)

ВЕРНО  
УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
УЧЕНОГО СОВЕТА  
НИУ «МЭИ»



*Громов С.Л.*