

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ И ПОДГОТОВКИ ПЛАСТОВЫХ ВОД

О.В. Савенок, Л.В. Поварова, Д.А. Березовский

Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар

Проведен детальный анализ существующих методов очистки и подготовки пластовых вод нефтегазовых месторождений и детально рассмотрены наиболее высокотехнологичные методы. Показана перспективность использования пластовых вод в качестве технологического резерва повышения эффективности разработки нефтегазовых месторождений. Отмечено, что методы физико-химического и математического моделирования могут быть эффективно использованы для совершенствования электромембранных технологий. Вместе с тем многие вопросы теоретического характера требуют дальнейшего, более глубокого изучения.

Ключевые слова: пластовые воды, методы очистки пластовых вод нефтегазовых месторождений, методы подготовки пластовых вод, повышение эффективности разработки, электромембранные процессы, физико-химическое моделирование

Prospects for the Use of Physico-Chemical and Mathematical Modeling for the Development of Highly Efficient Integrated Technology for the Treatment and Preparation of Produced Waters

O.V. Savenok, L.V. Povarova, D.A. Berezovsky

Kuban State Technological University, 350072 Krasnodar, Russia

A detailed analysis of the existing methods of cleaning and preparation of produced waters of oil and gas fields has been carried out and the most high-tech methods have been considered in detail. The prospects for the use of produced water as a technological reserve for increasing the efficiency of oil and gas field development are shown. It is noted that the methods of physico-chemical and mathematical modeling can be effectively used to improve the electromembrane technologies. At the same time, many theoretical questions require further, deeper study.

Key words: produced waters; methods of purification of produced waters of oil and gas fields; produced water preparation methods; increase development efficiency; electromembrane processes; physical and chemical modeling

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-03-66-71

Нефтегазовая отрасль — одна из самых экологически опасных отраслей хозяйствования. Химические реагенты, применяемые при бурении скважин, добыче и подготовке нефти, а также добываемые углеводороды и примеси к ним являются вредными веществами для растительного и животного мира, а также для человека. Источники загрязнения на нефтепромыслах присутствуют в той или иной мере на любом участке технологической схемы от скважины до нефтяных ре-

зервуаров нефтеперерабатывающих заводов. Так, основными загрязнителями окружающей среды при технологических процессах нефтедобычи являются нефть и нефтепродукты, сернистые и сероводородсодержащие газы, минерализованные пластовые и сточные воды нефтепромыслов и бурения скважин, шламы бурения, нефте- и водо-подготовки и химические реагенты, применяемые для интенсификации процессов нефтедобычи, бурения и подготовки нефти, газа и воды.

В связи с этим разработка высокоэффективной комплексной технологии очистки и подготовки пластовых вод нефтегазовых месторождений остается важной проблемой, требующей дальнейшего многостороннего неотлагательного изучения и решения.

Анализ существующих методов подготовки и очистки пластовых вод нефтегазовых месторождений

Пластовые воды — высокоминерализованные системы. Анализ их химического состава

показывает, что они могут быть отнесены к хлоридно-кальциевому типу хлоридной группы. Сопоставление составов и характеристик пластовых вод различных месторождений показывает, что они значительно отличаются в пределах одного месторождения от скважины к скважине.

Состав извлекаемых и удаляемых из вод компонентов следующий: твёрдые частицы (песок и др.); удаляемые токсичные вещества (тяжелые металлы, галогены, радиоактивные элементы) и водонефтяные эмульсии, ПАВ; извлекаемые ценные химические элементы и соединения.

Для обработки столь сложных и разнообразных систем необходимо использование широкого спектра методов и технологий. К основным методам подготовки и очистки пластовых вод относятся: механические (используются решетки, сита, песколовки, отстойники, нефтеловушки и фильтры различного типа); физико-химические (сорбция, экстракция, дегазация, ионный обмен, электрофлотация, электролиз и др.); химические (химическая очистка, нейтрализация, окисление); биологические (аэробные и анаэробные методы, основанные на жизнедеятельности микроорганизмов) и доочистка (сорбционные методы, фильтрование в зернистой и плавающей загрузке, дезинфекция, дезодорация, кондиционирование, насыщение кислородом) [1–3].

На рис. 1 приведена многоступенчатая схема переработки пластовых вод с целью извлечения ценных компонентов [4].

Для подготовки и очистки пластовых вод используется следующая аппаратура: отстойники и нефтеловушки; гидроциклоны; жидкостные фильтры; коалесцирующие фильтры; электрокоагуляторы; электролизеры; электромагнитные фильтры; флотаторы; зернистые фильтры [1, 2].

Перспективы использования пластовых вод, прошедших очистку и водоподготовку

Создание технологии комплексной переработки пластовых вод весьма актуально, особенно для месторождений с падающей добычей, где обводнен-



Рис. 1. Комплексная технологическая схема переработки и очистки пластовых вод месторождений углеводородов

Fig. 1. Complex technological scheme of processing and purification of formation waters of hydrocarbon deposits

ность продукции скважин превышает 80 %, поскольку позволяет решить целый комплекс важных проблем:

- очистка пластовых вод в экологических целях [1];
- извлечение гидроминерального сырья (дефицитной и высококачественной химической продукции).
- модернизация и использование пластовых жидкостей для повышения эффективности нефтегазовых месторождений [1, 4].

Воздействие на пластовые жидкости проводится с целью:

- подготовки пластовой воды для системы поддержания пластового давления [7];
- переработки и модернизации пластовых жидкостей для повышения эффективности нефтегазовых месторождений в условиях активизации осложнений.

Пластовые воды и горные породы — взаимосвязанные и взаимозависимые системы.

В работах [4–7] выявлены наиболее значимые системные

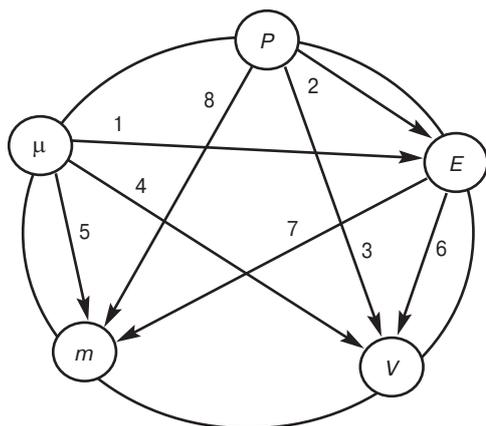


Рис. 2. Явления переноса в электромембранных и баромембранных процессах:

E – напряженность электрического поля; μ – вязкость; *V* – скорость переноса жидкости; *P* – давление; *m* – масса; 1 – мембранный потенциал; 2 – потенциал потока; 3 – гидродинамическая проницаемость (водопроницаемость); 4 – осмос; 5 – диффузия; 6 – электроосмос; 7 – миграционный поток; 8 – конвективный поток растворенного вещества

Fig. 2. Transport phenomena in electromembrane and baromembrane processes:

E – the electric field strength; μ – the viscosity; *V* – the fluid transfer rate; *P* – pressure; *m* – the mass; 1 – membrane potential; 2 – flow potential; 3 – hydrodynamic permeability (water permeability); 4 – osmosis; 5 – diffusion; 6 – electroosmosis; 7 – migration flow; 8 – convective solute flow

факторы, относящиеся к породам-коллекторам.

Показано, что горные породы — высоконеоднородные дисперсные системы, в которых к признакам неоднородности относятся многообразие элементов строения, состава и свойств, трещиноватости, анизотропии, наличия сложного поля начальных напряжений.

В то же время в физико-химических и химических методах увеличения нефтеотдачи (МУН) в недостаточной степени учитываются факторы особенностей горных пород, что приводит к существенному снижению их эффективности. С помощью физико-химических методов можно целенаправленно воздействовать на состояние пород и управлять эффективностью систем разработки нефтегазовых месторождений.

Один из методов, позволяющих управлять характеристиками пород, заключается в регулировании интенсивности химического растворения блокирующих коллоидных агрегатов под действием пластовой жидкости [8]. При этом пластовая жидкость в результате взаимодействия с породой также меняет свой состав и характеристики:

- обогащается минеральной дисперсной фазой и переходит в состояние суспензии в результате пескопроявления;

- изменяет химический состав вследствие растворения микроструктурных элементов породы (глинистой связки в песчаниках, микрокомпонентов и др.);

- при определенных условиях (состав, концентрации компонентов пластовой жидкости, характеристики породы, температура и др.) происходят процессы конденсации микроэлементов из жидкости в породу.

Таким образом, система "порода — пластовая жидкость" представляет собой среду с активными физико-химическими и химическими взаимодействиями, через которые можно управлять составом и характеристиками как пород-коллекторов, так и пластовой жидкости.

Высокотехнологичные методы подготовки пластовых вод

В связи с постоянным усложнением задач подготовки пластовых вод в последние годы особое внимание привлекают высокотехнологичные методы, использование которых помогает комплексно решить многоплановые задачи — глубокое удаление солей, избирательное извлечение отдельных компонентов, коррекция состава и физико-химических свойств воды и др.

В указанной группе особое внимание привлекают различные варианты электрохимических (электродиализных) методов и технологий [9, 10].

Электрохимические методы упрощают технологические схемы очистки, вместе с тем они экологически чисты, поскольку не приносят вторичное загрязнение воды анионными и катионными остатками, что имеет место в случае реагентных методов.

В работе [9] указано на использование электрохимических методов для очистки технологических нефтесодержащих вод от нефтепродуктов, металлов и органических загрязнений.

Электрохимические методы в сочетании с ионно-плазменным воздействием на минерализованную пластовую воду в системе заводнения нефтяных пластов

позволяют получать активные водные растворы с необходимыми щелочными или кислотными свойствами без дополнительной обработки химическими реагентами, одновременно повышая экологическую безопасность технологий и обеспечивая защиту оборудования от коррозионного воздействия [10].

Однако электрохимические методы энергоемки и требуют высокого уровня научной, методической и технологической обработки.

Электромембранные методы представляют собой один из вариантов электрохимических методов и имеют хорошие перспективы при решении задач по подготовке и очистке пластовых вод.

В [11] указано, что решение экспериментальных, теоретических и особенно прикладных задач мембранной электрохимии связано с необходимостью учета конвективного движения раствора вследствие изменяющихся закономерностей развития диффузионных пограничных слоев. Теоретические подходы при описании течения раствора в межмембранном пространстве с использованием уравнений гидродинамики позволяют отразить разнообразные аспекты сложных физико-химических явлений в мембранных системах.

Предложено описание процессов конвективной электродиффузии и "облегченной" диффузии в мембранных системах с помощью сложных нелинейных взаимодействий концентрационного, гидродинамического и электрического полей.

Разработана теоретическая модель облегченного транспорта нейтральных аминокислот через катионообменную мембрану.

Таким образом, авторами [11, 12] показано, что методы физико-химического и математического моделирования могут быть эффективно использованы при разработке электромембранных технологий. Вместе с тем целый ряд вопросов теоретического характера требует дальнейшего изучения.

Физико-химическое моделирование электромембранных процессов

Цель моделирования электромембранных систем — исследование механизмов процессов,

которые в них происходят, и создание на их основе высокоэффективных и многофункциональных систем управления составом и характеристиками водных сред, позволяющих реализовать их эффективную очистку и водоподготовку.

Принципы моделирования электромембранных процессов должны быть основаны на системном представлении о характере и механизме явлений в электромембранных системах. Анализ данных, приведенных выше, указывает на многоступенчатость и сложность данных явлений, поэтому для их исследования перспективна междисциплинарная методология, объединяющая такие подходы, как физико-химическое, физическое, электрохимическое, гидродинамическое и математическое моделирование.

Для математического моделирования необходимо выполнение ряда условий, таких как формулирование предпосылок и начальных условий, а также целей моделирования. Одна из задач математического моделирования в электромембранных системах — выбор оптимальных режимов работы и конструкций аппаратов [13].

Электромембранные системы можно рассматривать как сложную техническую систему, определив состав подсистем и характер связи между ними. В этом случае методология моделирования электромембранных систем сводится к выделению отдельного элемента (подсистемы) с указанием степени упрощения и дальнейшему системному междисциплинарному исследованию выделенного элемента.

Однако к настоящему времени данная методология моделирования практически не применяется, а решаются только некоторые частные задачи, описываемые ниже.

В [14] указано, что при моделировании явлений переноса рассматриваются преимущественно узкоспециализированные задачи для стационарных режимов на основе базовых уравнений Нерста-Планка, Навье-Стокса, неразрывности потока, уравнения, вытекающего из модели растворения — диф-

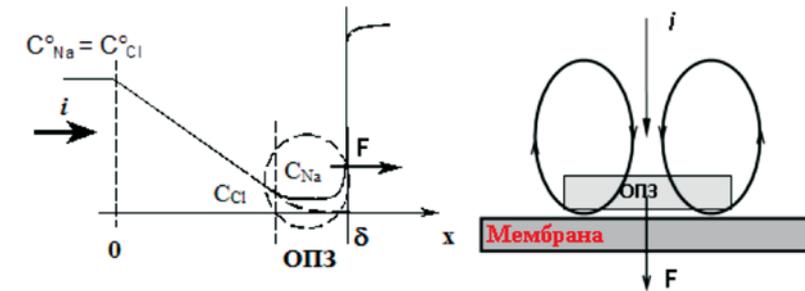


Рис. 3. Механизм возникновения электроконвекции: ОПЗ – область пространственного заряда; F – электрическая сила

Fig. 3. The mechanism of electroconvection: SCR – space charge region; F – electric power

фузии термодинамики необратимых процессов и др. С использованием указанных уравнений получают математические модели, устанавливающие взаимосвязь между параметрами переноса в элементарных мембранных ячейках.

Авторы [15] предложили упрощённое описание молекулярных явлений переноса в электромембранных и баромембранных процессах в виде цикла (рис. 2).

Методам моделирования электромембранных систем посвящено большое число работ различных авторов, в том числе и [16], где показано, что при исследовании механизма электроконвекции в электромембранных системах может быть эффективно использована физическая модель электроконвекции (рис. 3).

Указано, что механизм электроконвекции в электромембранных системах аналогичен "электрическому ветру" в газах и может быть объяснен следующим образом. Неоднородность электрического поля, возникающая, например, вследствие неоднородной поверхности мембраны, вызывает появление пространственной электрической (кулоновской) силы. Эта электрическая сила воздействует на пространственный заряд, локализованный вблизи межфазной границы "раствор — мембрана". В результате этого в области пространственного заряда возникает избыточное давление, выталкивающее раствор.

Выполненное математическое моделирование позволило установить следующие закономерности:

- электроконвекция приводит к существенному уменьше-

нию эффективной толщины диффузионного слоя;

- электроконвективные вихри имеют макроскопический размер.

Существенно, что результаты математического моделирования сопоставлены с опытными данными, что позволяет оценить достоверность расчетных значений (рис. 4).

Один из базовых факторов в электромембранных системах связан со структурными и микроструктурными особенностями строения мембранных и ионообменных материалов. В связи со значительным прогрессом в области создания новых материалов открываются широкие возможности создания многофункциональных эффективных электромембранных систем. В частности, для использования в качестве мембранных и ионообменных материалов создаются новые композиционные материалы с заданными свойствами.

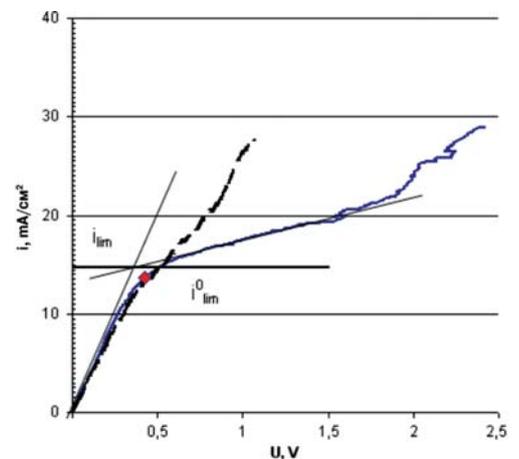


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика мембранной системы (сплошная линия – экспериментальные данные, штриховая линия – расчетные значения)

Fig. 4. Volt-ampere characteristic of the membrane system (solid line – experimental data, dashed line – calculated values)

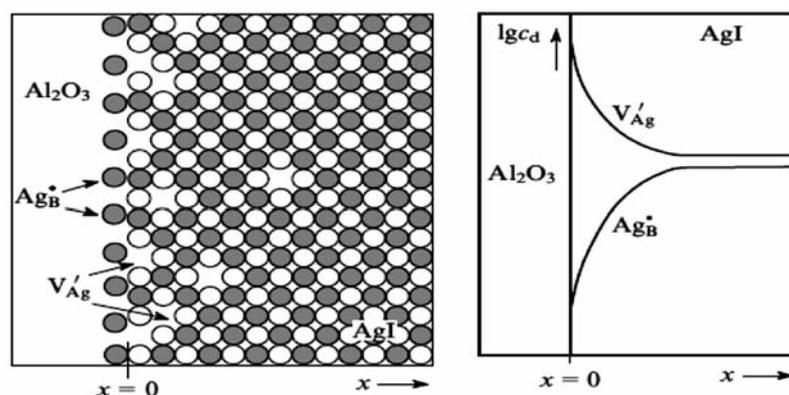


Рис. 5. Схема формирования дефектов на границе раздела AgI – Al₂O₃ (а) и изменение концентрации дефектов вблизи границы раздела (б) (V_{Ag}' и Ag_B' – катионные вакансии в кристаллической решетке)
Fig. 5. Diagram of the formation of defects at the AgI – Al₂O₃ interface (a) and the change in the concentration of defects near the interface (b) (V_{Ag}' and Ag_B' – cationic vacancies in the crystal lattice)

В связи с этим большое значение приобретают методы описания явлений переноса через эти материалы.

На рис. 5 приведен пример модели поверхности на границе AgI – Al₂O₃.

Рис. 5 иллюстрирует эффект аномального увеличения на несколько порядков ионной проводимости низкотемпературной модификации иодида серебра в контакте с тонкодисперсным оксидом алюминия, что связано с возникновением дефектов в поверхностном слое оксида алюминия. Использование такого рода

эффектов позволяет управлять параметрами переноса в электромембранных системах.

Работа [17] посвящена актуальной задаче тестирования различных математических моделей с целью поиска эффективной для конкретного процесса модели. Применялся метод лазерной интерферометрии, позволяющий проводить *in situ* локально-распределительный анализ многокомпонентных систем для исследования явлений переноса на разных стадиях поляризации ионообменных мембран.

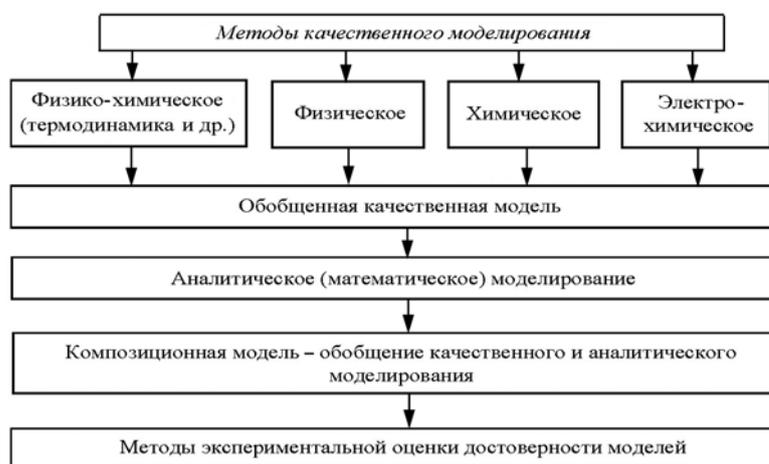


Рис. 6. Общая структура методов моделирования электромембранных систем
Fig. 6. General structure of methods for modeling electro-membrane systems

Литература

1. Литвиненко В.И. Эколого-технологические основы комплексной переработки пластовых вод нефтяных месторождений (на примере Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции). Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2000. 355 с.

References

1. Litvinenko V.I. Ekologo-tekhnologicheskie osnovy kompleksnoi pererabotki plastovykh vod neftyanykh mestorozhdenii (na primere Timano-Pechorskoii neftegazonosnoi provintsii). Dis. ... d-ra tekhn. nauk. M., 2000. 355 s.

С использованием упомянутого метода выделены этапы в процессе формирования и развития концентрационных полей в секции обессоливания в зависимости от степени поляризации электромембранной системы.

На основании обобщения данных, изложенных выше, разработана общая структура методов моделирования электромембранных систем (рис. 6).

Таким образом, детальный анализ существующих методов очистки и подготовки пластовых вод нефтегазовых месторождений показывает, что задача создания технологии комплексной переработки пластовых вод весьма актуальна, особенно для месторождений с падающей добычей, поскольку позволяет решить целый комплекс важных проблем:

- очистка пластовых вод в экологических целях;
- извлечение гидроминерального сырья, являющегося дефицитной и высококачественной химической продукцией;
- глубокое удаление солей;
- избирательное извлечение отдельных компонентов;
- коррекция и управление составом и физико-химическими характеристиками как пластовой жидкости, так и пород-коллекторов;
- создание новой эффективной технологии разработки нефтегазовых месторождений, предусматривающей применение модернизированных пластовых жидкостей.

Разработана общая структура методов моделирования электромембранных систем с выделением следующих групп:

- методы качественного моделирования;
- аналитическое (математическое) моделирование;
- композиционное моделирование;
- методы экспериментальной оценки достоверности моделей.

2. **Поварова Л.В.** Анализ методов очистки нефте-содержащих сточных вод. Научный журнал Наука. Техника. Технологии. (политехнический вестник). Краснодар, ООО "Издательский Дом-Юг", 2018. № 1. С. 189–205.
3. **Назаров М.В.** Очистка природных и сточных вод с применением электрохимических методов. Дис. ... канд. тех. наук. Уфа, 2008. 175 с.
4. **Ланина Т.Д., Литвиненко В.И., Варфоломеев Б.Г.** Процессы переработки пластовых вод месторождений углеводородов. Ухта, УГТУ, 2006. 172 с.
5. **Савенок О.В.** Оптимизация функционирования эксплуатационной техники для повышения эффективности нефтепромысловых систем с осложненными условиями добычи. Краснодар, Издательский Дом-Юг, 2013. 336 с.
6. **Савенок О.В.** Повышение эффективности базовых и информационно-управляющих технологий при разработке месторождений углеводородов с трудноизвлекаемыми запасами. Дис. ... д-ра техн. наук. М., Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, 2013. 432 с.
7. **Буслаев Е.С.** Разработка технологии очистки нефтепромысловых вод с использованием коалесцирующих материалов. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Бугульма, 2011. 25 с.
8. **Булатов А.И., Волощенко Е.Ю., Кусов Г.В., Савенок О.В.** Экология при строительстве нефтяных и газовых скважин. Краснодар, Просвещение-Юг, 2011. 603 с.
9. **Вайншток П.Н.** Очистка сточных вод нефтехимического комплекса электрохимическими методами. Дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2014. 193 с.
10. **Курамшин Ю.Р.** Разработка технологии интенсификации добычи нефти на основе электрохимического и ионно-плазменного воздействий на минерализованные воды. Дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2007. 152 с.
11. **Григорчук О.В.** Конвективная диффузия в электромембранных системах. Автореф. ... дис. д-ра хим. наук. Воронеж, 2007. 331 с.
12. **Уртенев К.М.** Моделирование тепломассопереноса в электролизных аппаратах водоподготовки для парогенераторов ТЭС и АЭС. Дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 2011. 210 с.
13. **Лазарев С.И.** Методы электробаромембранного разделения растворов. Тамбов, Изд. Тамбовского гос. тех. ун-та, 2007. 84 с.
14. **Ярославцев А.Б., Никоненко В.В., Заболотский В.И.** Ионный перенос в мембранных и ионообменных материалах. Успехи химии. 2003. № 72. С. 438–447.
15. **Васильева В.И.** Концентрационные поля и явления переноса в электромембранных системах. Дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2008. 475 с.
16. **Лаврентьев А.В., Письменский А.В., Уртенев М.Х.** Математическое моделирование переноса в электромембранных системах с учетом конвективных течений. Краснодар, ФГБОУ ВПО "КубГТУ", 2006. 147 с.
17. **Лаврентьев А.В., Сеидова Н.М., Уртенев М.Х.** Математические модели некоторых сопряженных эффектов в электрохимических системах. Краснодар, ФГБОУ ВПО "КубГТУ", 2005. 158 с.
2. **Povarova L.V.** Analiz metodov ochistki nefte-soderzhashchikh stochnykh vod. Nauchnyi zhurnal Nauka. Tekhnika. Tekhnologii. (politekhniceskii vestnik). Krasnodar, OOO "Izdatel'skii Dom-Yug", 2018. № 1. S. 189–205.
3. **Nazarov M.V.** Ochistka prirodnykh i stochnykh vod s primeneniem elektrokhimicheskikh metodov. Dis. ... kand. tekh. nauk. Ufa, 2008. 175 s.
4. **Lanina T.D., Litvinenko V.I., Varfolomeev B.G.** Protssesy pererabotki plastovykh vod mestorozhdenii uglevodorodov. Ukhta, UGTU, 2006. 172 s.
5. **Savenok O.V.** Optimizatsiya funktsionirovaniya ekspluatatsionnoi tekhniki dlya povysheniya effektivnosti neftepromyslovykh sistem s oslozhnennymi usloviyami dobychi. Krasnodar, Izdatel'skii Dom-Yug, 2013. 336 s.
6. **Savenok O.V.** Povyshenie effektivnosti bazovykh i informatsionno-upravlyayushchikh tekhnologii pri razrabotke mestorozhdenii uglevodorodov s trudnoizvlekaemyimi zapasami. Dis. ... d-ra tekhn. nauk. M., Institut mashinovedeniya imeni A.A. Blagonravova RAN, 2013. 432 s.
7. **Buslaev E.S.** Razrabotka tekhnologii ochistki neftepromyslovykh vod s ispol'zovaniem koalest-siruyushchikh materialov. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Bugul'ma, 2011. 25 s.
8. **Bulatov A.I., Voloshchenko E.Yu., Kusov G.V., Savenok O.V.** Ekologiya pri stroitel'stve neftyanykh i gazovykh skvazhin. Krasnodar, Prosveshchenie-Yug, 2011. 603 s.
9. **Vainshtok P.N.** Ochistka stochnykh vod neftekhimicheskogo kompleksa elektrokhimicheskimi metodami. Dis. ... kand. tekhn. nauk. Ufa, 2014. 193 s.
10. **Kuramshin Yu.R.** Razrabotka tekhnologii intensifikatsii dobychi nefiti na osnove elektrokhimicheskogo i ionno-plazmennogo vozdeistvii na mineralizovannye vody. Dis. ... kand. tekhn. nauk. Ufa, 2007. 152 s.
11. **Grigorchuk O.V.** Konvektivnaya diffuziya v elektromembrannykh sistemakh. Avtoref. ... dis. d-ra khim. nauk. Voronezh, 2007. 331 s.
12. **Urtenov K.M.** Modelirovanie teplomassoperenosa v elektrodializnykh apparatakh vodopodgotovki dlya parogeneratorov TES i AES. Dis. ... kand. tekhn. nauk. Krasnodar, 2011. 210 s.
13. **Lazarev S.I.** Metody elektrobaromembrannogo razdeleniya rastvorov. Tambov, Izd. Tambovskogo gos. tekhn. un-ta, 2007. 84 s.
14. **Yaroslavtsev A.B., Nikonenko V.V., Zabolotskii V.I.** Ionnyi perenos v membrannykh i ionoobmennyykh materialakh. Uspekhi khimii. 2003. № 72. S. 438–447.
15. **Vasil'eva V.I.** Kонтсентратсионные поля и явления переноса в электромембранных системах. Дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2008. 475 с.
16. **Lavrent'ev A.V., Pis'menskii A.V., Urtenov M.Kh.** Matematicheskoe modelirovanie perenosa v elektromembrannykh sistemakh s uchedom konvektivnykh techenii. Krasnodar, FGBOU VPO "KubGTU", 2006. 147 s.
17. **Lavrent'ev A.V., Seidova N.M., Urtenov M.Kh.** Matematicheskie modeli nekotorykh sopryazhennykh effektivnostei v elektrokhimicheskikh sistemakh. Krasnodar, FGBOU VPO "KubGTU", 2005. 158 s.

O.V. Savenok – д-р техн. наук, профессор, Кубанский государственный технологический университет, 350072 Россия, г. Краснодар, ул. Московская 2, e-mail: olgasavenok@mail.ru • Л.В. Поварова – канд. хим. наук, доцент, e-mail: larisvp08@gmail.com • Д.А. Березовский – аспирант, e-mail: daberezovskiy-gaz@rambler.ru

O.V. Savenok – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kuban State Technological University, 350072 Russia, Krasnodar, Moskovskaya Str. 2, e-mail: olgasavenok@mail.ru • L.V. Povarova – Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, e-mail: larisvp08@gmail.com • D.A. Berezovsky – Post-graduate Student, e-mail: daberezovskiy-gaz@rambler.ru