УДК 543.3.05/.06:66.081.6

ПОДГОТОВКА МОДЕЛЬНОГО РАСТВОРА МЕТОДОМ ОБРАТНОГО ОСМОСА

С. М. Молчанов, Д. Д. Десятов

Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Проведен обзор современных методов очистки воды, показаны их основные преимущества и недостатки. Была проведена работа по очистке водопроводной воды методами обратного осмоса и выпаривания для получения деминерализованной воды. Солесодержание в результате очистки в среднем составило: для дистилляции – 4,21 мг/л; для обратного осмоса – 3,16 мг/л. Средняя солепроницаемость после первого цикла составила 15,00 %, а селективность мембран – 85,00 %, после второго цикла средняя солепроницаемость – 17,56 %, селективность мембран – 82,44 %. На основе полученных проб подготовлено четыре варианта модельного раствора, содержащего природный радионуклид K-40 с ожидаемой удельной активностью в пробах, равной 81,5 Бк/г, а также продемонстрирована высокая сходимость результатов очистки с помощью двух различных процессов.

Ключевые слова: вода; раствор; обратный осмос; солесодержание; пермеат; концентрат; очистка воды; дистилляция; гидросфера; радионуклиды.

1. Введение

Нормальная эксплуатация объектов использования атомной энергии сопровождается контролируемым поступлением радиоактивных веществ в окружающую среду [1–5]. Обоснование и выполнение нормативов сбросов и выбросов радионуклидов гарантирует соблюдение приемлемых радиационных рисков для населения и окружающей среды. Инструментальное подтверждение содержания контролируемых радионуклидов как в источниках выброса и сброса, так и в объектах окружающей среды – ключевой момент подтверждения соблюдения установленных нормативов сбросов и выбросов. Прецизионные методы определения радиоактивных веществ в газоаэрозольных средах нашли свое применение при выполнении радиационно-технических обследований и представлены в работе [6].

Радионуклидный состав сбросов специфичен для каждого вида деятельности, в ходе которой они образуются. В случае использования известных радиоактивных веществ, не участвующих в ядерных превращениях, радионуклидный состав и его активность могут быть оценены по балансу исходной активности, активности продукта и отходов. В случае контроля сбросов радиоактивных веществ, сформированных в результате ядерных превращений в виде продуктов деления и продуктов активации, для предварительной оценки состава могут применяться модели поведения радиоактивных веществ в жидких средах ядерных установок [7, 8]. Достоверное подтверждение основывается только на результатах инструментальных измерений. Для подтверждения соблюдения приемлемых радиационных рисков при контролируемых сбросах радиоактивных веществ в условиях нормальной эксплуатации объектов атомной энергии требуется предварительно определить перечень радионуклидов в сбросах, формирующих 99 % радиационного воздействия. Сложность задачи заключается в том, что необходимо учитывать 94 радионуклида, подлежащих государственному регулированию [9]. При этом Международное агентство по атомной энергии в числе наиболее важных (с точки зрения воздействия сбросов АЭС на окружающую среду) рассматривает только 31 радионуклид [10], что

почти в 3 раза меньше количества радионуклидов, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в России. Применяемые приборы и методы должны обеспечить количественное определение активности рассматриваемых радионуклидов. В случае содержания радионуклида ниже порога обнаружения выполняется требование учета неидентифицированного радионуклида с активностью 0,5 от нижнего порога измерения и дальнейшее включение такого радионуклида в программу радиационного контроля.

Для ядерных энергетических установок тритий – один из характерных доминирующих радионуклидов в сбросах [1]. Современные приборы и методы способны достоверно определять активность трития как в источниках сброса, так и в воде поверхностных водных объектов, принимающих сбросы. Наряду с тритием в сбросах реакторных установок могут присутствовать продукты ядерного деления (радиоактивные изотопы стронция, йода, цезия [4]) и продукты активации коррозии (изотопы Mn-54, Co-58, Fe-59, Co-60, Cr-51, Ni-63, Ag-110m, Sb-122, Sb-124, Sb-125). Чаще всего для определения указанных радионуклидов подготовка счетного образца для определения активности включает стадию концентрирования, осуществляемого выпариванием, соосаждением, сорбцией, баромембранным методом, ионным обменом и электродиализом [11, 12].

Преимущества баромембранного метода концентрирования [13]:

- возможность снизить объем исследуемой пробы в 30–40 раз;
- уменьшение времени на пробоподготовку;
- уменьшение энергозатрат на процесс концентрирования.

В работе представлен обзор современных методов очистки воды, алгоритм подготовки модельного раствора на примере хлорида калия (KCl) и представлены результаты очистки водопропроводной воды и расчета характеристик циклов очистки.

2. Обзор современных методов очистки воды

На сегодняшний день для получения деминерализованной воды в основном используют следующие четыре метода очистки:

- выпаривание;
- очистку ионным методом;
- обратный осмос;
- электродиализ.

2.1. Выпаривание

Данный метод можно разделить на три этапа: кипячение, конденсацию и сбор.

Кипячение. Вода, содержащая примеси, переливается в рабочую емкость, затем нагревается до температур свыше 100 ℃, достигая точки кипения. После этого вода, содержащая примеси, начинает испаряться. При кипячении воды удаляется множество микроорганизмов и вредных примесей. Но все же вода испаряется раньше, чем большинство загрязняющих элементов, а значит, они остаются.

Конденсация. После кипячения пар поднимается по трубке в конденсатор, снижая свою температуру, это приводит к образованию мелких капель воды. После конденсации удается избавиться от множества примесей и загрязнений. В случае масштабного производства система может быть оснащена мощным вентилятором, позволяющим ускорить процесс охлаждения и быстрее преобразовывать пар в воду.

Сбор. После конденсации капли воды проходят через угольные постфильтры, которые позволяют удалить дополнительные загрязнители, не отделившиеся в процессе конденсации.

Преимущества метода:

- отсутствие специфических химических веществ;
- эффективность очистки от нелетучих твердых веществ;

– доступность.

Недостатки метода:

– основная проблема использования дистиллятора воды заключается в том, что эта система потребляет значительное количество энергии, поскольку эти системы должны постоянно кипятить и конденсировать воду, т. е. система постоянно использует энергию;

– медленный процесс очистки.

2.2. Очистка ионным обменом

Ионный обмен – процесс обмена между ионами, находящимися в растворе, и ионами, присутствующими на поверхности твердой фазы – ионитами [14]. Ионитами называют вещества, способные в эквивалентных количествах обменивать свои ионы на ионы, содержащиеся в растворе. В зависимости от знака заряда обменивающихся ионов иониты делятся на катиониты, аниониты и амфолиты. Катиониты обмениваются растворами с катионами, аниониты – анионами, а амфолиты в зависимости от условий могут обмениваться либо катионами, либо анионами (рис. 1) [15].

Характерная особенность ионитов – их обратимость, т. е. возможность проведения реакции в обратном направлении. Данный процесс позволяет проводить регенерацию ионитов.

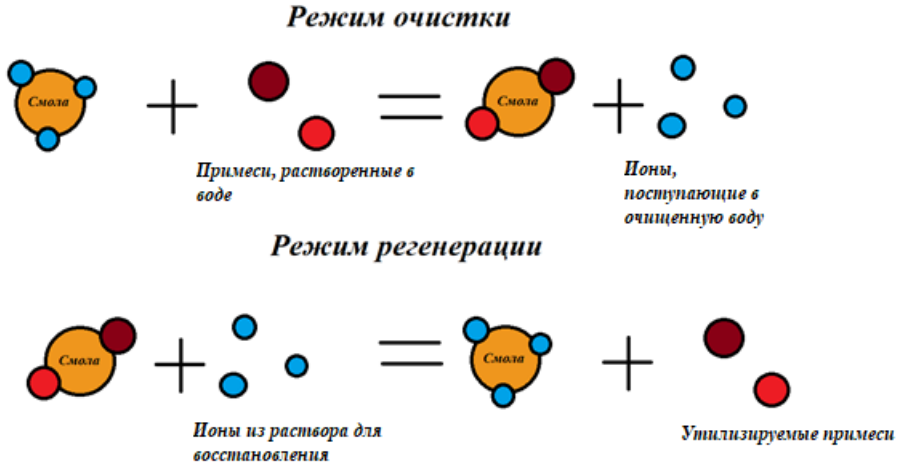


Рис. 1. Иллюстрация ионного обмена

Преимущества метода:

– высокое качество очистки воды;

– нет влияния на химический состав воды;

– простая эксплуатация.

Недостатки метода:

– необходимость периодических промывок;

– большой расход реагентов-восстановителей;

– невысокая скорость процесса очистки.

– необходима предварительная фильтрация – удаление органических соединений, железа, образующего на ионите трудноудаляемую пленку, а также твердых и взвешенных веществ.

2.3. Обратный осмос

Обратный осмос основан на разделении под высоким давлением растворов различной концентрации через полупроницаемую мембрану (рис. 2). Данный процесс характеризуется использованием мембран с минимальным размером пор (0,5–2,0 нм),

соизмеримым с размером одиночных ионов, поэтому извлекаются все растворенные ионы и органические молекулы.

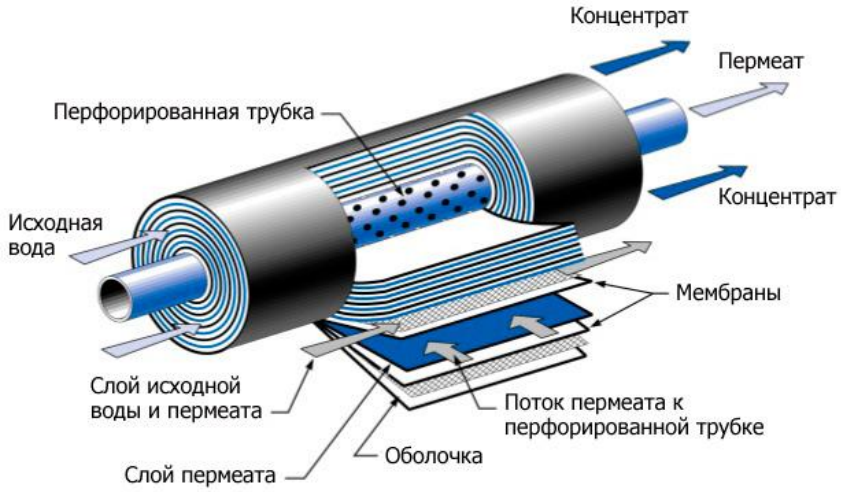


Рис. 2. Устройство работы осмотической мембраны

Обратноосмотическая фильтрация дополнительно очищает воду и от растворенных органических примесей, что повышает эффективность очистки воды от радионуклидов, связанных с этими примесями [16].

Технологическая цепочка очистки состоит из трех ступеней мембран: ультрафильтрация – обратный осмос – обратный осмос [17]. Данная комбинация мембран позволяет добиться оптимальной очистки раствора.

Преимущества метода:

- высокая степень очистки;
- экономичность;
- низкая энергоемкость;
- мобильность.

Недостатки метода:

- необходимость применения большого ручного труда при очистке или замене загрязненных мембран;
- образование концентрата, требующего утилизации.

2.4. Электродиализ

Электродиализ – процесс переноса ионов при помощи селективных мембран, осуществляемый под действием силы электрического тока. Скорость переноса ионов может изменяться подбором соответствующей силы тока [18].

Электродиализатор разделен чередующимися катионитовыми и анионитовыми мембранами, образующими концентрирующие и обессоливающие камеры. Под воздействием постоянного тока катионы, двигаясь к катоду («–»), проникают через катионитовые мембраны, но задерживаются анионитовыми, а анионы, двигаясь в направлении анода («+»), проходят через анионитовые мембраны, но задерживаются катионитовыми (рис. 3). В результате этого из одного ряда камер ионы обоих знаков выводятся в смежный ряд камер [14].

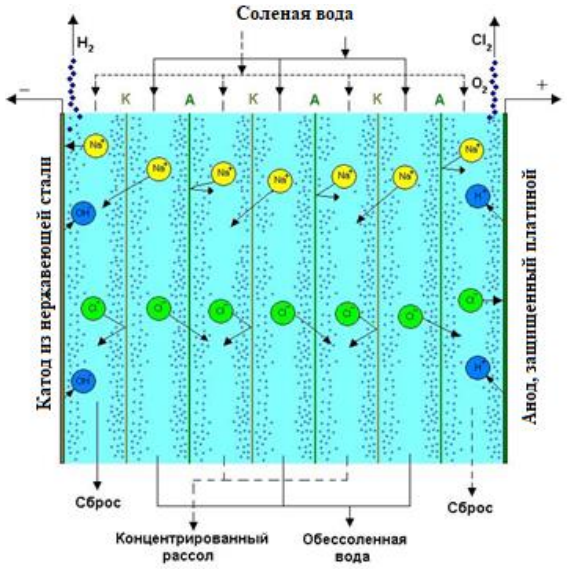


Рис. 3. Процесс электродиализа

При электродиализе взвешенные твердые частицы, которые несут положительные или отрицательные электрические заряды, могут резко увеличить сопротивление мембраны, оседая на поверхности мембраны. Однако данная проблема может быть устранена путем изменения полярности приложенного электрического потенциала через определенные промежутки времени, что приводит к удалению заряженных частиц, осажденных на мембранах [19].

Преимущества метода:

- низкая электроемкость;
- минимальные требования к исходной воде;
- отсутствие реагентов;
- минимальные потери воды;
- высокая надежность установок.

Недостатки метода:

- неспособность удалять микроорганизмы и органические загрязнители;
- недостаточная эффективность при низком содержании электролитов;
- за пределами определенной плотности тока диффузия ионов через мембраны больше не линейна в зависимости от приложенного напряжения, а приводит к диссоциации воды (расщеплению воды на ионы H^+ и OH^-) и снижению эффективности системы.

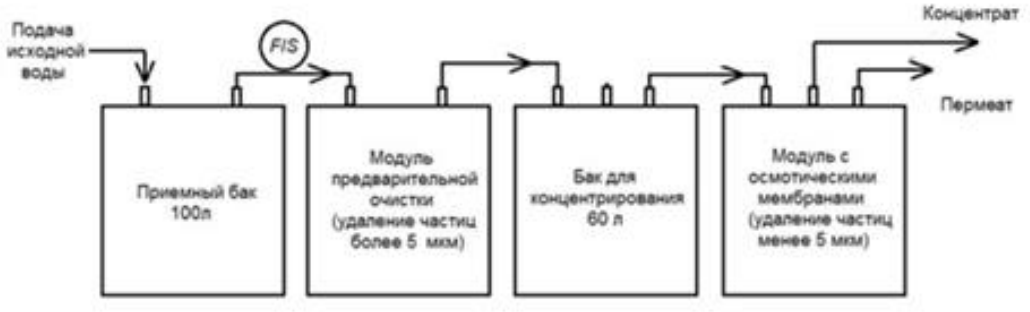
3. Материалы и методы

Эксперимент состоял из трех этапов: подготовки воды – очистки методом обратного осмоса; получения дистиллята традиционным методом; подготовки модельного раствора для сравнения результатов очистки проб воды методом обратного осмоса и упариванием. Модельный раствор состоит из обессоленной воды и растворенного в ней соединения KCl. Выбор KCl обусловлен содержанием в данном соединении природного радионуклида K-40. Минимально значимая удельная активность (МЗУА) K-40 по НРБ-99/2009 равна 100 Бк/г [20]. Работа с модельным раствором не требует специальных мер по радиационной безопасности, т. к. удельная активность K-40 в растворе не превысит МЗУА, но достаточна для его идентификации.

3.1 Очистка воды методом обратного осмоса

В ходе эксперимента в исходную емкость набирали водопроводную воду (для первого цикла очистки) объемом 70 л. Затем с помощью насоса подавали воду на блок

ультрафильтрации для предварительной очистки от крупных взвешенных частиц, после этого она поступала в емкость для концентрирования и на блок обратного осмоса. Блок-схема и вид экспериментальной установки представлены на рис. 4а и 4б.



(а)

(б)

Рис. 4. Блок-схема (а) и вид экспериментальной установки (б) [21]

Две установленные мембраны обратного осмоса разделяют поток на две составляющие: концентрат и пермеат (очищенная вода). Вода подается на выход через две трубки, отвечающие за свой определенный тип разделения.

Измерения солесодержания проводили с помощью кондуктометра «Анион 7000» (рис. 5).

Рис. 5. Кондуктометр «Анион 7000»

Измерения проб осуществлялись двумя способами: дискретным и интегральным.

Дискретный – после запуска установки в измерительные цилиндры отбирались пробы пермеата и концентрата объемом в 1 л.

Интегральный – измерения фиксировались после переработки 10 л воды из исходной емкости.

Данные способы фиксирования позволяют проследить за тенденциями изменения солесодержания с увеличением объема воды в емкости.

В основе всего механизма очистки – две основные характеристики – селективность и солепроницаемость. Расчеты данных характеристик приведены в результатах.

Селективность – способность полупроницаемой мембраны задерживать примеси, содержащиеся в воде. Селективность представляет собой отношение разности концентраций примеси в исходной воде и в пермеате (фильтрате) к ее концентрации в исходной воде, выраженное в процентах:

$$R = \frac{C_{\text{исх}} - C_{\text{фил}}}{C_{\text{исх}}} \cdot 100\ \%, \quad (1)$$

где R – селективность полупроницаемой мембраны, %;

$C_{\text{исх}}$ – концентрация примеси в исходной воде, мг/л;

$C_{\text{фил}}$ – концентрация примеси в пермеате (фильтрате), мг/л.

Солепроницаемость – количество солей, прошедших через мембрану:

$$SP = \frac{C_{\text{фил}}}{C_{\text{исх}}} \cdot 100\ \%, \quad (2)$$

где SP – солепроницаемость полупроницаемой мембраны, %.

3.2 Получение дистиллята традиционным методом

Выпаривание выполнялось в соответствии с методом, описанным в п. 2.1.

3.3 Подготовка модельного раствора для сравнения результатов очистки проб воды методом обратного осмоса и упариванием

Необходимые материалы и средства

Материалы:

- соль KCl в твердом виде (20 г);
- пермеат (3 л);
- дистиллированная вода (1 л).

Средства измерения:

- мерная колба на 1 л;
- весы для взвешивания навески массой 0,2 г;
- кондуктометр.

Вспомогательные средства:

- пластиковая емкость на 1 л – 4 шт.;
- стеклянная палочка для размешивания;
- бугельные баночки (рис. 6) – 21 шт.;
- воронка.

Рис. 6. Бугельная баночка

Подготовка эксперимента:

1. В мерную колбу набрали 1 л воды, затем проба была перелита в пластиковую емкость. Процедура была проведена трижды для пермеата и один раз для дистиллята.
2. В каждой емкости трижды измеряли солесодержание (${}_i^0S_j$, мг/л) кондуктометром.
3. Среднее фоновое значение было рассчитано по формуле:

$$\overline{{}_i^0S} = \frac{1}{3}\sum_{j=1}^{3} {}_i^0S_j. \quad (3)$$

С помощью кондуктометра была измерена температура жидкости.

4. В бугельную баночку было отобрано 20 г KCl.

Выполнение эксперимента:

1. В каждой емкости развели по одной навеске (m_i^1, мг) KCl. Каждая навеска на протяжении эксперимента составляла 200 мг (рис. 7).

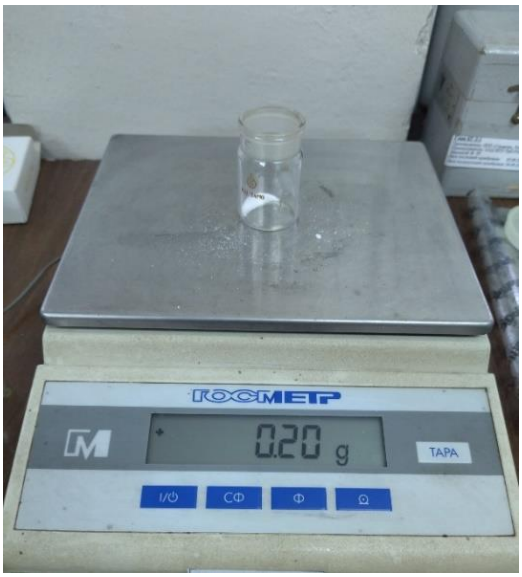


Рис. 7. Отбор навески KCl

2. В каждой емкости трижды измеряли солесодержание (${}_i^1S_j$, мг/л) кондуктометром.
3. Рассчитаны и записаны средние значения солесодержания в каждой емкости после растворения первой навески KCl массой m_i^1, мг:

$$\overline{{}_i^1S} = \frac{1}{3}\sum_{j=1}^{3} {}_i^1S_j. \quad (4)$$

4. В каждую емкость с разведенной навеской m_i^1 KCl была добавлена и разведена навеска m_i^2 KCl.

5. Рассчитаны и записаны средние значения солесодержания в каждой емкости (C_1) после растворения первой навески массой m_i^1 и первой навески массой m_i^2,:

$$\overline{{}_i^2S} = \frac{1}{3}\sum_{j=1}^{3} {}_i^2S_j. \quad (5)$$

Действия п. 4, 5 с добавлением и растворением последовательных навесок (m_i^n, мг) и определением средних значений солесодержания были проведены до достижения солесодержания 5 гр/л.

4. Результаты

4.1. Первый цикл очистки

На данном этапе эксперимента в качестве исходной пробы воды использовали водопроводную воду комнатной температуры. Давление на мембранах равнялось 7,5 бар, а отношение расхода концентрат-пермеат установили 2:1.

Было подготовлено 600 л пермеата первого цикла. Полученные объемы пермеата распределили на 18 емкостей (бочки объема от 40 до 60 л). Результаты представлены в виде графиков (рис. 8–11). Сплошными линиями определены верхний и нижний пределы значений солесодержания в воде первого цикла очистки.

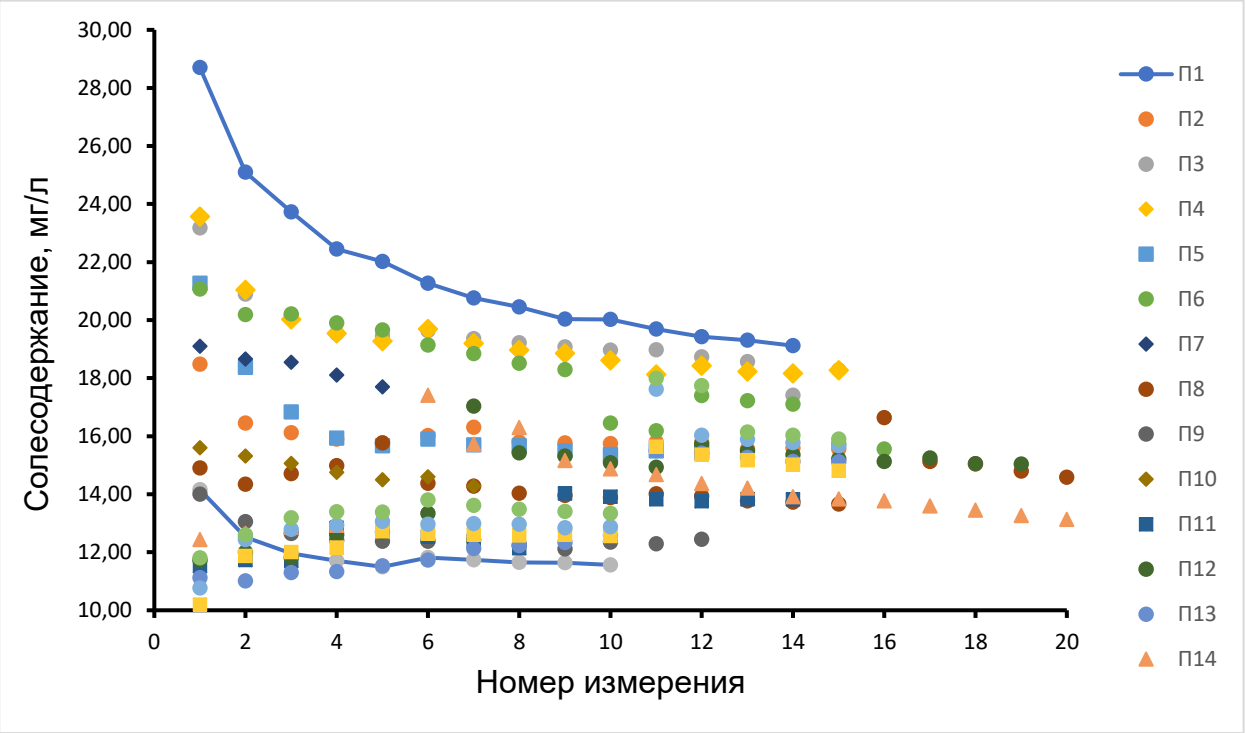


Рис. 8. Интегральные значения очистки первого цикла

Интегральные значения солесодержания для первой набранной емкости – наибольшие, т. к. до этого момента установка не была активно использована. Впоследствии после регулярной эксплуатации показания заметно улучшились. Также на значение солесодержания пермеата большое влияние оказывало солесодержание в исходной емкости.

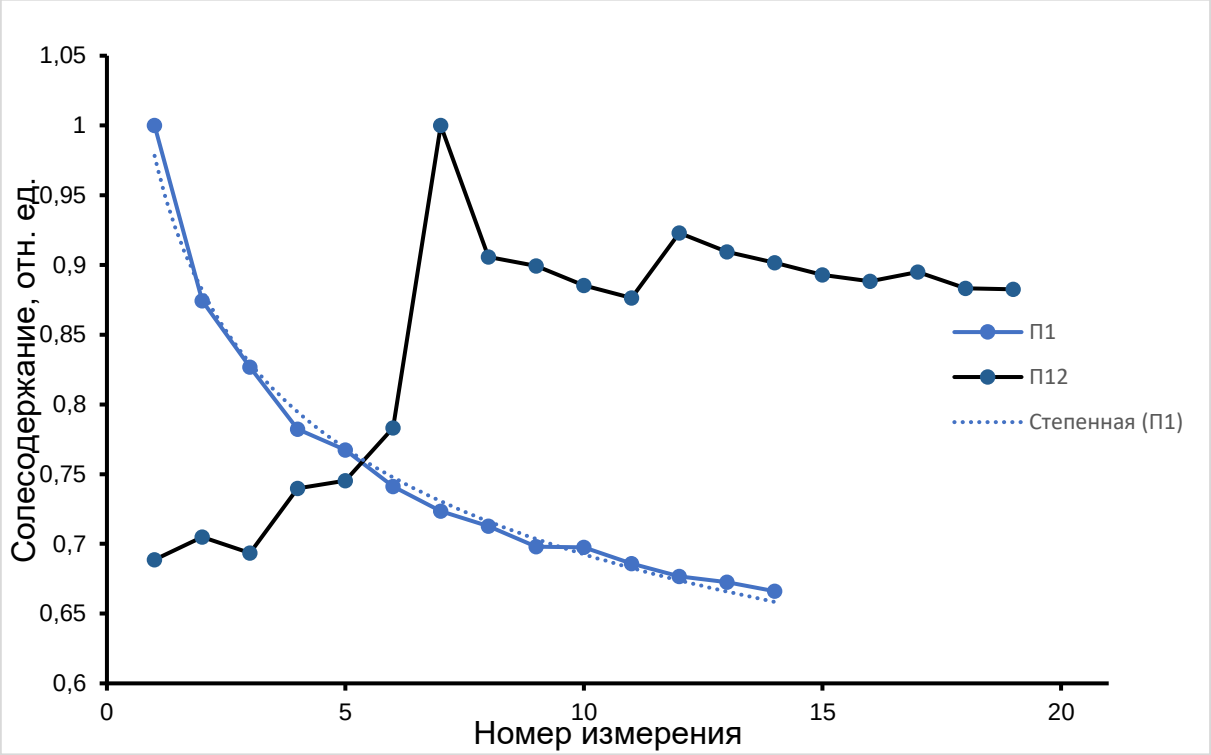


Рис. 9. Интегральные значения очистки первого цикла в отн. ед.

На рис. 9 в качестве примера приведены только две тенденции (для пермеата из бочек 1 и 12), наглядно иллюстрирующие изменения солесодержания –монотонное убывание и скачкообразный рост. При непрерывном режиме работы значения солесодержания последовательно уменьшались, в то время как при возникающих паузах между запусками установок показания концентрации резко возрастали. Степенная функция, описывающая концентрацию соли, принимает вид:

$$y = kx^b. \quad (6)$$

Так, для первой пробы пермеата получили уравнение: $y = 0{,}9783x^{-0{,}15}$ с достоверностью аппроксимации 0,99.

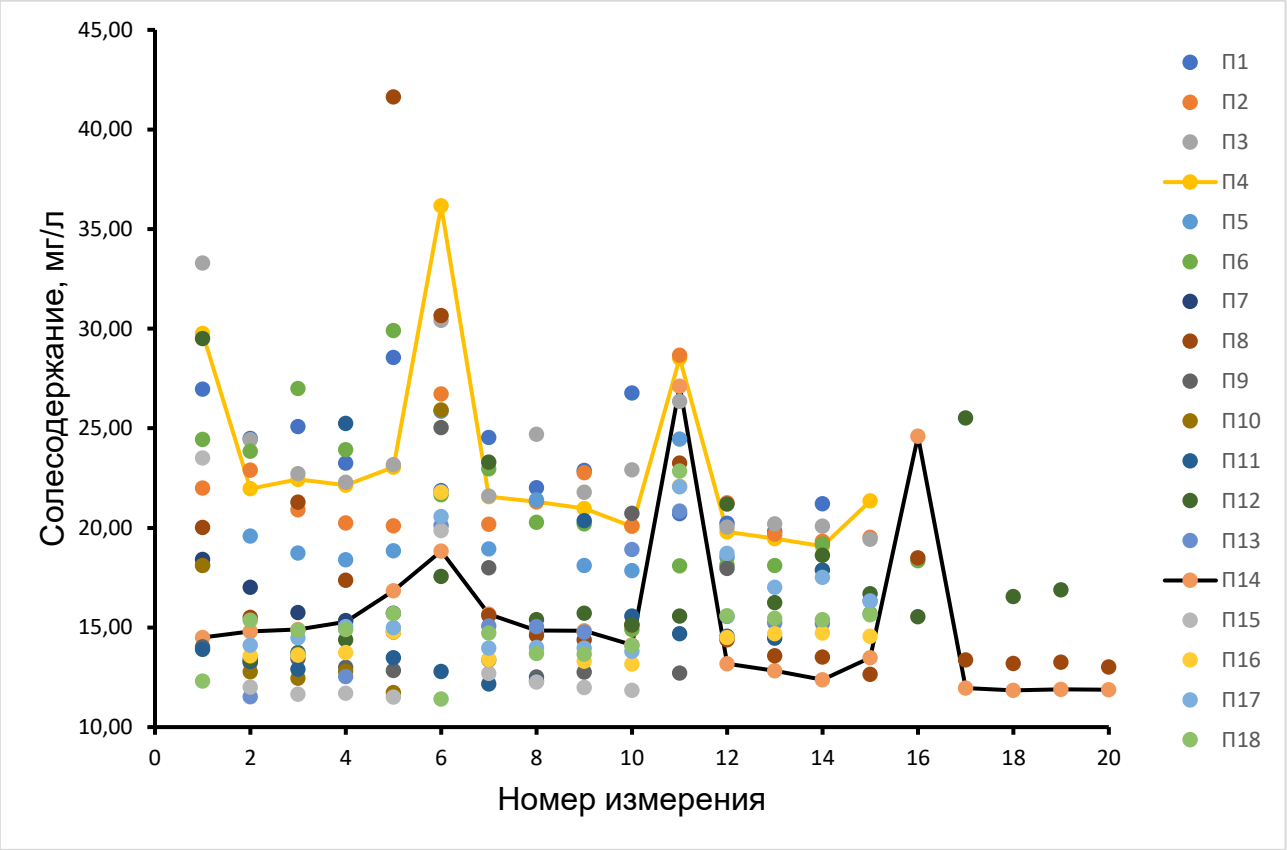


Рис. 10. Дискретные измерения солесодержания в пермеате

На рис. 10 дискретные измерения показывают изменение концентрации при запуске установки. Каждый пик обусловлен паузами на восполнение исходной емкости, затем значения становятся примерно равными с интегральными до возникновения следующей паузы. Значения солесодержания для четвертой набранной емкости – наибольшие, для четырнадцатой – наименьшие. Это связано с продолжительностью работы: при первом запуске значения солесодержания всегда выше, затем при непрерывной работе концентрация снижалась. Выбросы на графике возникли из-за непредвиденных пауз в работе, после чего возникала десорбция (физический процесс, при котором молекулы или ионы, затравленные в порах или на поверхности материала, высвобождаются и возвращаются в газовую или жидкую фазу) на очистительных мембранах.

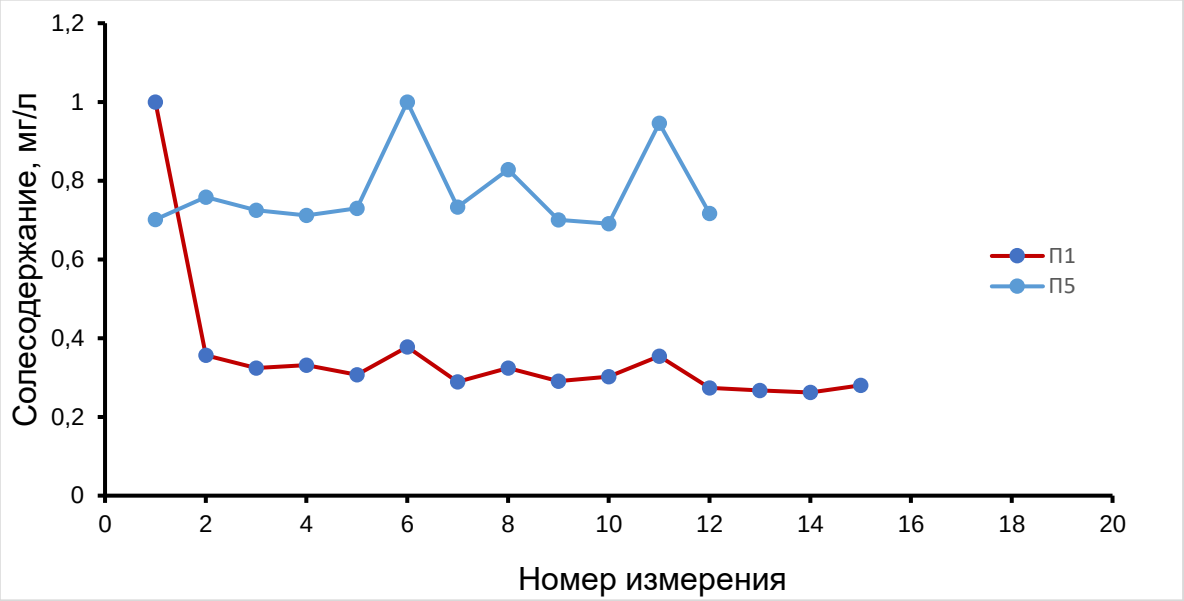


Рис. 11. Дискретные измерения солесодержания в отн. ед.

На рис. 11 приведены тенденции при дискретных измерениях солесодержания. Можем наблюдать, что первый результат измерения при первом запуске установки всегда значительно отличается от последующих (П1), в то время как результаты после длительной работы равны, за исключением возникающих пиков после пауз (П5).

Результаты очистки первого цикла представлены в табл 1. Используя формулы (1, 2), рассчитали солепроницаемость и селективность.

Таблица 1. Результаты очистки первого цикла

Номер бочки	Исходное солесодержание	Солесодержание пермеата	Солепроницаемость, %	Селективность, %
1	110,83	19,12	17,25	82,75
2	107,70	15,56	14,44	85,56
3	112,96	18,28	16,19	83,81
4	109,94	18,26	16,61	83,39
5	112,38	15,44	13,74	86,26
6	104,42	15,56	14,90	85,10
7	108,73	17,70	16,28	83,72
8	103,25	14,58	14,12	85,88
9	96,50	12,45	12,90	87,10
10	95,57	14,27	14,93	85,07
11	100,22	13,82	13,79	86,21
12	99,81	15,03	15,06	84,94
13	94,73	15,11	15,95	84,05
14	95,40	13,13	13,76	86,24
15	87,51	11,57	13,22	86,78
16	97,97	14,81	15,12	84,88
17	100,08	15,67	15,66	84,34
18	98,91	15,90	16,08	83,92

По результатам первого цикла средняя солепроницаемость составила 15,00 %, а селективность мембран – 85,00 %. Итоговое солесодержание в пермеате зависело от следующих факторов:

– продолжительности пауз между запусками установки;

– значений солесодержания в исходной пробе воды (чем выше солесодержание, тем хуже селективность мембран).

4.2. Второй цикл очистки

Во втором цикле очистки исходная емкость наполнялась пермеатом первого цикла. Температура проб исходной воды оставалась равной комнатной, расход также остался в соотношении 2:1, но рабочее давление на мембранах снизили до 5 бар, т. к. исходное солесодержание снизилось примерно в 5–6 раз. На рис. 12–15 представлены результаты второго цикла очистки.

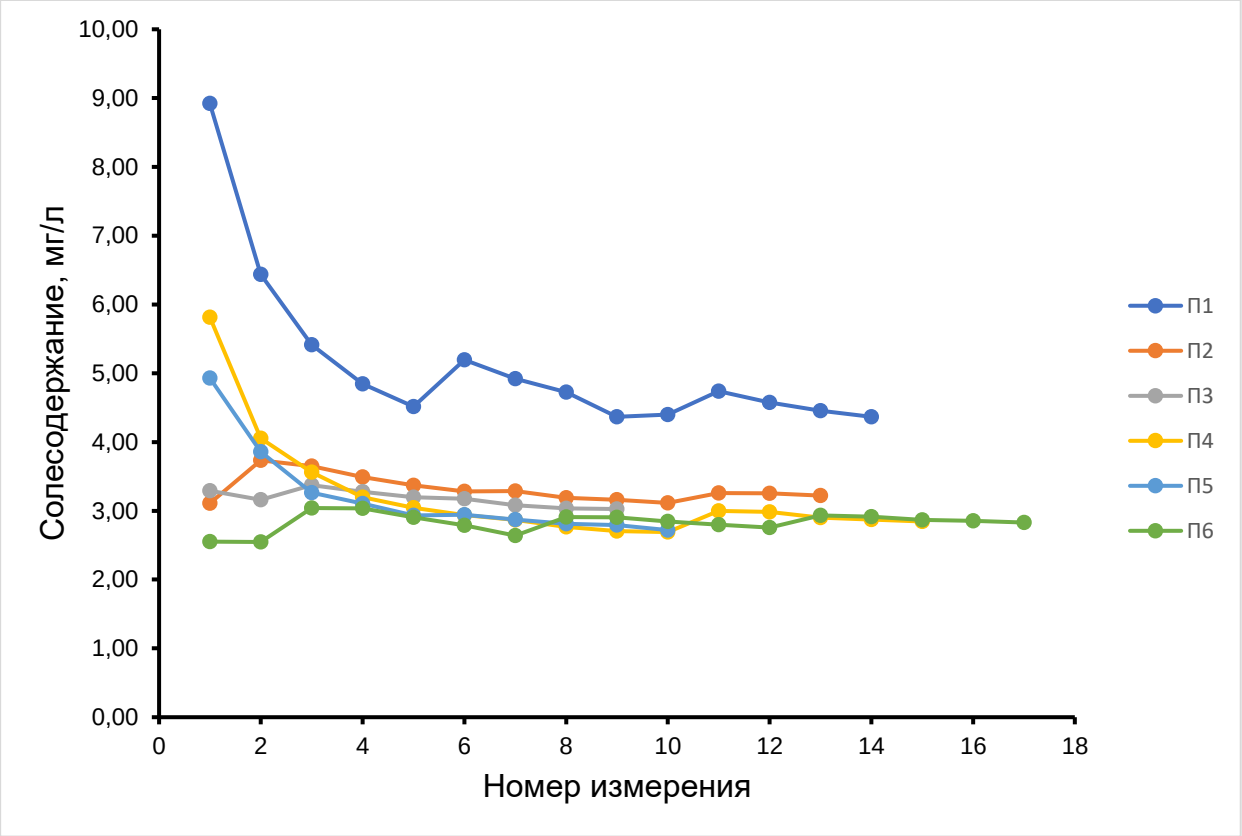


Рис. 12. Интегральные измерения солесодержания в пермеате второго цикла

На рис. 12 интегральные значения солесодержания для первой емкости с пермеатом второго цикла очистки имеют повышенную концентрацию, т. к. для цикла были взяты пробы с наибольшим солесодержанием среди всех проб первого этапа. Последующие значения были приблизительно равны друг другу.

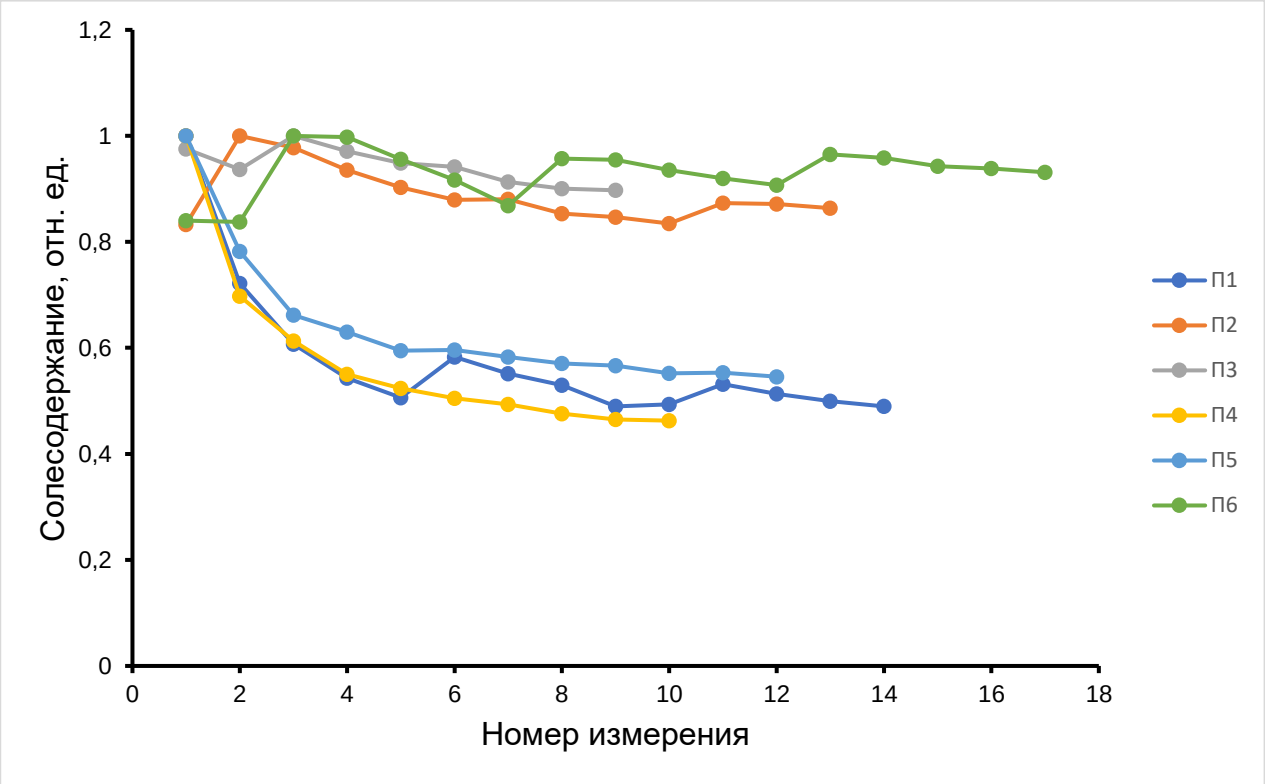


Рис. 13. Интегральные измерения солесодержания в пермеате второго цикла в отн. ед.

На рис. 13 можно наблюдать те же две тенденции изменения солесодержания, зависящие от режима работы – первоначальный запуск и непрерывный режим.

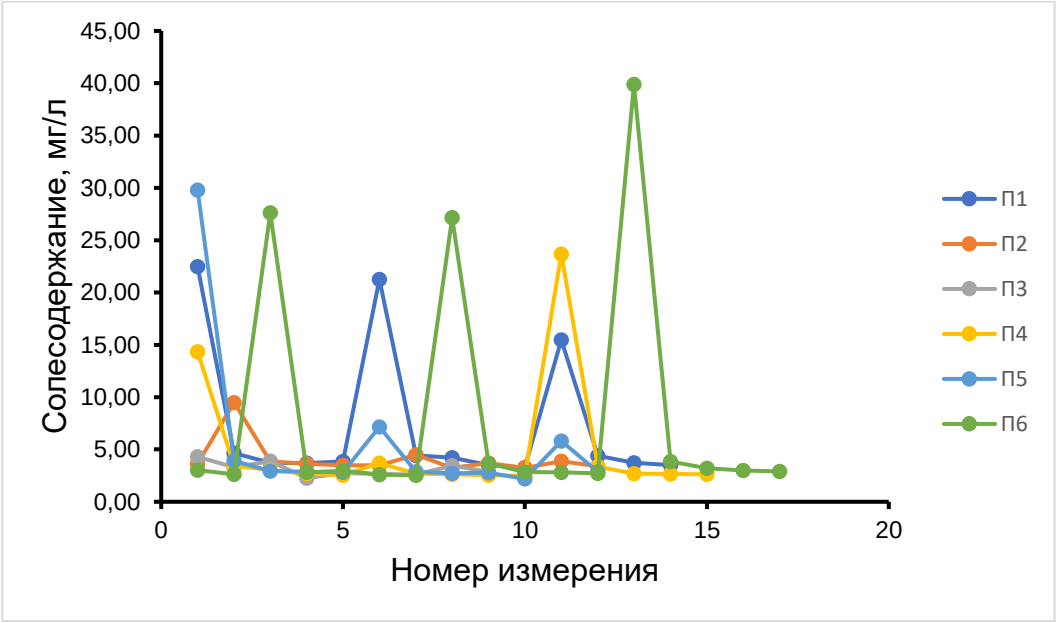


Рис. 14. Дискретные измерения солесодержания в пермеате второго цикла

На рис. 14 можем наблюдать как сильно влияют паузы в работе установки на получаемые концентрации. Продолжительная остановка может вызвать десорбцию, которая увеличивает концентрацию в 10 раз, но, увеличивая продолжительность работы мембран, солесодержание опускалось до требуемой степени очистки.

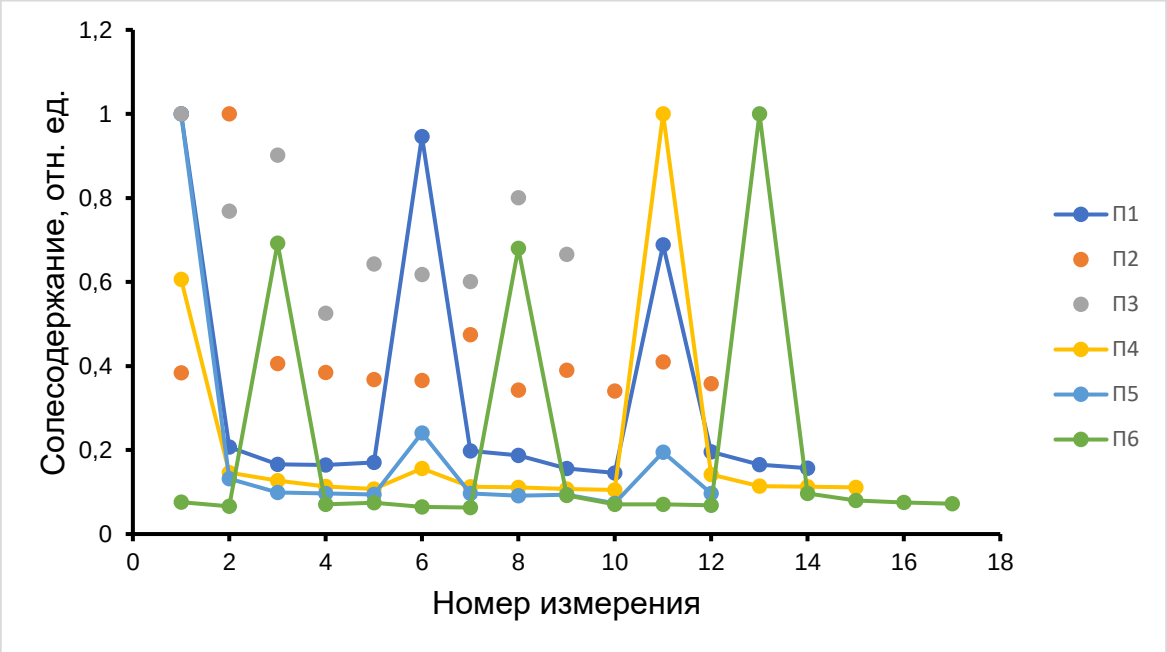


Рис. 15. Дискретные измерения солесодержания в пермеате второго цикла в отн. ед.

На рис. 15 приведены результаты дискретных измерений в относительных единицах, показывающие во сколько раз увеличивается солесодержание пробы во время остановок эксперимента.

В табл. 2 представлены расчеты характеристик второго цикла очистки.

Таблица 2. Результаты расчета характеристик второго цикла очистки

Номер бочки	Исходное солесодержание	Солесодержание пермеата	Солепроницаемость, %	Селективность, %
1	20,38	4,37	21,42	78,58
2	19,70	3,22	16,36	83,64
3	16,01	3,03	18,90	81,10
4	16,01	2,84	17,76	82,24
5	18,13	2,69	14,84	85,16
6	17,61	2,83	16,07	83,93

По результатам второго цикла средняя солепроницаемость составила 17,56 %, а селективность мембран – 82,44 %. Данный результат показывает, что уменьшение давления на мембранах, вызванное снижением солесодержания исходных проб, приводит к увеличению проницаемости соли в пермеат.

4.3. Сравнение полученных результатов очистки методом обратного осмоса с традиционным методом дистилляции

В результате упаривания, выполненного по методике в 3.2, была получена дистиллированная вода объемом 300 л с концентрацией 4,21 мг/л. Также был подготовлен пермеат с минимально возможным (после двух циклов очистки) солесодержанием. Данное значение больше для дистиллята (по методике 3.2), чем у полученного нами пермеата (по методике 3.1). Можно сделать вывод: двух циклов очистки водопроводной воды достаточно для деминерализации.

На полученных графиках (рис. 16–19) выведены эмпирические формулы, позволяющие определить отношение показаний прибора к массе растворенной соли.

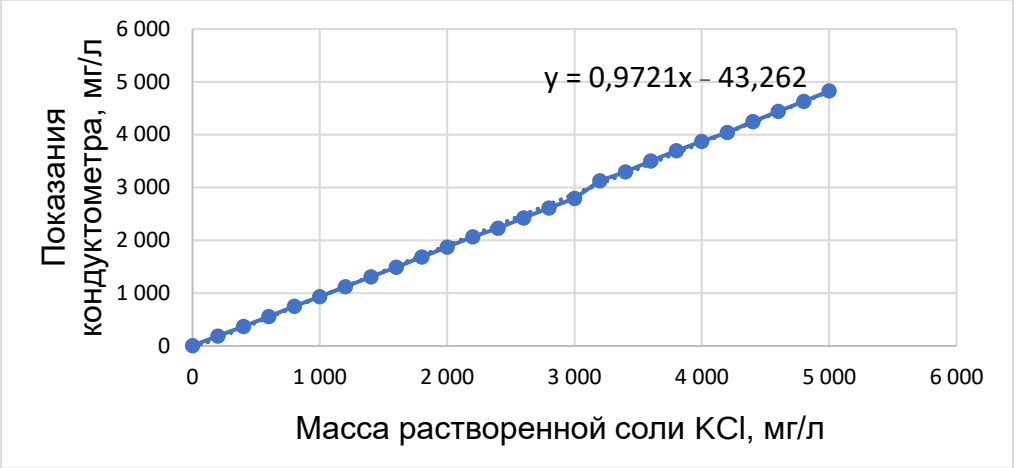


Рис. 16. Градуировочная кривая (дистиллированная вода)

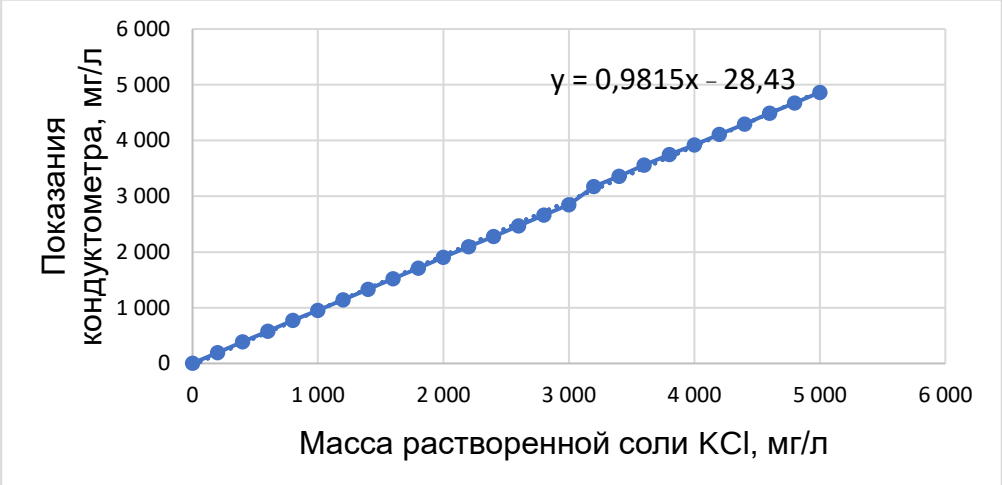


Рис. 17. Градуировочная кривая для пермеата первой пробы

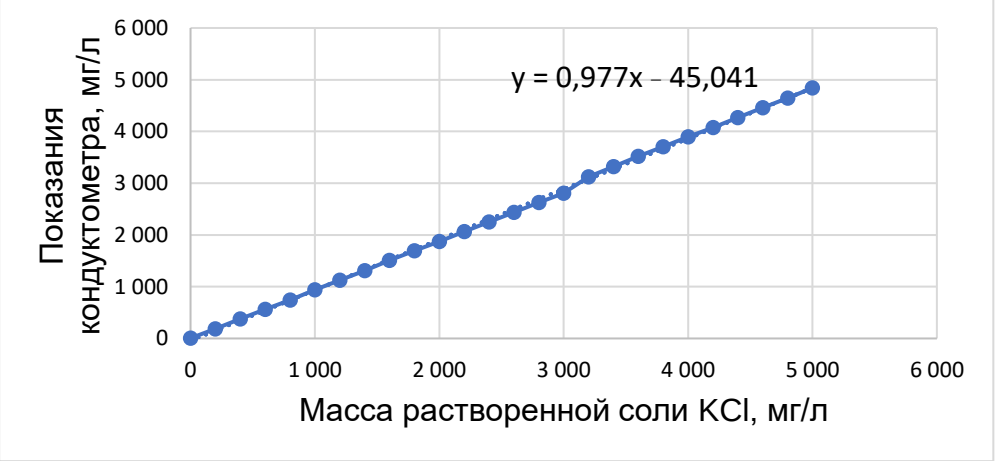


Рис. 18. Градуировочная кривая для пермеата второй пробы

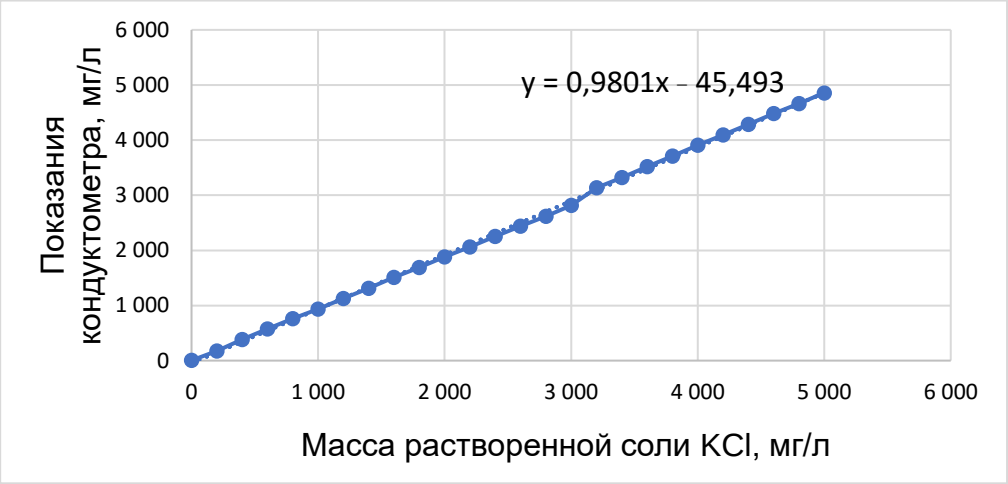


Рис. 19. Градуировочная кривая для пермеата третьей пробы

По полученным градуировочным кривым можно сделать вывод: динамика изменения солесодержания в пробах с пермеатом второго цикла, полученным в ходе эксперимента, совпадает с изменением солесодержания в дистиллированной воде.

Был проведен расчет сходимости между всеми пробами по формуле [22]:

$$p = 2 \cdot \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2} \cdot 100\ \%, \quad (6)$$

где A_1 – больший результат из параллельных измерений;

A_2 – меньший результат из параллельных измерений.

В табл. 3 представлены результаты сходимости, а также ожидаемая удельная активность радионуклида K-40 из расчета, что удельная активность K-40 в хлориде калия составляет около 16,3 Бк/г [23, 24].

Таблица 3. Полученные сходимости результатов

Количество растворенного KCl, мг/л	Сходимость, %	Ожидаемая удельная активность K-40, Бк/л
0	30,47	0
200	**12,33**	3,26
400	5,68	6,52
600	3,75	9,78
800	4,44	13,04
1 000	2,19	16,30
1 200	2,09	19,56
1 400	1,87	22,82
1 600	2,12	26,08
1 800	1,53	29,34
2 000	1,70	32,60
2 200	1,64	35,86
2 400	2,25	39,12
2 600	1,93	42,38
2 800	2,02	45,64
3 000	1,90	48,90
3 200	1,69	52,16
3 400	2,00	55,42
3 600	1,70	58,68
3 800	1,43	61,94
4 000	1,37	65,20

Окончание табл. 3

4 200	1,64	68,46
4 400	1,01	71,72
4 600	1,12	74,98
4 800	1,00	78,24
5 000	0,76	81,50

Ожидаемая удельная активность K-40 в растворе не превышает 100 Бк/л, что в пересчете на массовую активность не превышает МЗУА (100 Бк/г, или 100 000 Бк/кг). Воспользуемся таблицей значений сходимости [22] для растворенных макрокомпонентов.

Таблица 4. Сходимость для растворенных компонентов [22]

Содержание растворенных компонентов, мг/л	Сходимость, %
Более 10	До 10
От 10 до 1	От 10 до 15
От 1 до 0,01	От 15 до 25
Менее 0,01	30

Можем наблюдать сходимость практически всех значений, кроме одного (при растворенных 200 мг KCl). Это может быть обусловлено неполной растворенностью соли в одной из проб на момент измерения. Близость полученных результатов позволяет утверждать о высокой степени деминерализации водопроводной воды сопоставимой с дистиллятом, что позволяет нам использовать ее в качестве основы для модельных растворов.

5. Обсуждение

В ходе работы был проведен обзор современных методов очистки воды, показаны их основные преимущества и недостатки. Было проведено два цикла очистки водопроводной воды методом обратного осмоса, вследствие чего был получен пермеат с более низким, по сравнению с традиционным методом упаривания, солесодержанием. Это говорит о том, что двух циклов очистки достаточно для подготовки модельного раствора.

Для работы с установкой требуется непрерывный режим, т. к. при возникающих паузах на мембранах возникает десорбция, оказывающая негативное влияние на результаты.

Было подготовлено четыре вида модельных растворов, содержащих KCl (три раствора с пермеатом и один – с дистиллятом, полученным традиционным способом). Проведено сравнение полученных модельных растворов и сходимость результатов для растворенных компонентов. Близость полученных результатов солесодержания позволяет нам утверждать, что полученный пермеат может использоваться в качестве основы для модельных растворов в дальнейших экспериментах. Временные затраты на полученный с помощью метода обратного осмоса пермеат были значительно меньше, чем на те же объемы с помощью традиционного метода выпаривания.

В дальнейшем необходимо провести исследования потерь радионуклидов в пермеате и промывочном растворе, на мембранах и внутренних поверхностях конструкции установки. Для валидации результатов необходимо провести выпаривание и сопоставить результаты. Для выполнения эксперимента требуется порядка 500 л воды с минимальным содержанием примеси и однородной по своему составу. Покупка готового дистиллята экономит время, но не дает гарантии однородности состава. Подготовка таких объемов возможна дистиллированием, что требует огромного количества времени и энергоресурсов, или осмотической очисткой,

позволяющей сократить затраты времени и энергии на выпаривание сотен литров воды [21].

6. Выводы

1. Из исходного объема 900 л было получено 300 л пермеата второго цикла очистки. Солесодержание в результате очистки в среднем составило: для дистилляции – 4,21 мг/л; для обратного осмоса – 3,16 мг/л.
2. По результатам первого цикла средняя солепроницаемость составила 15,00 %, а селективность мембран 85,00 %, после второго цикла средняя солепроницаемость – 17,56 %, селективность мембран – 82,44 %.
3. Уменьшение давления в мембранах, вызванное снижением солесодержания исходных проб, приводит к увеличению проницаемости соли в пермеат.
4. Полученный в результате двух циклов очистки пермеат имеет более низкое солесодержание, чем полученный традиционным методом дистиллят.
5. Динамика изменения солесодержания в пробах с пермеатом второго цикла, полученным в ходе эксперимента, совпадает с изменением солесодержания в дистиллированной воде.
6. Получена высокая сходимость результатов растворенных макроэлементов в пробах пермеата и дистиллята.
7. Полученный с помощью метода обратного осмоса пермеат может использоваться в дальнейших экспериментах, в т. ч. для применения в модельных растворах.

7. Благодарности

Исследование выполнено за счет субсидий Минобрнауки РФ на выполнение научной темы FUMN-2024-0001.

Авторы выражают благодарность за сотрудничество ООО «Агентству экологической безопасности «Альфа-Х91», а также химико-аналитическому центру ИПЭ УрО РАН за помощь в пробоподготовке и проведении эксперимента.

8. Список литературы

1. *Десятов, Д. Д.* Вклад АЭС с различным типом реакторных установок в глобальное поступление трития в окружающую среду / Д. Д. Десятов, А. А. Екидин, Д. А. Власов // Атомная энергия. – 2024. – Т. 137, №. 3–4. – С. 175–180.
2. *Назаров, Е. И*. Оценка поступления углерода-14 в атмосферу, обусловленного выбросами АЭС / Е. И. Назаров, А. А. Екидин, А. В. Васильев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2018. – Т. 61, №. 12-2. – С. 67–73.
3. *Назарович, А. В.* Поступление радиоактивного йода в атмосферу при нормальной эксплуатации АЭС / А. В. Назарович, М. Д. Пышкина, Д. Д. Десятов [и др.] // Двадцать шестая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых. ВНКСФ–26.—Уфа, 2020. – ООО «Альтаир», 2020. – С. 419–420.
4. *Десятов, Д. Д.* Поступление радиоактивного цезия в окружающую среду при нормальной эксплуатации АЭС / Д. Д. Десятов, А. А. Екидин, С. Г. Голибородa // Атомная энергия. – 2023. – Т. 134. – №. 1–2. – С. 85–91.
5. *Пышкина, М. Д.* Определение основных дозообразующих нуклидов в выбросах АЭС PWR и ВВЭР / М. Д. Пышкина // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2017. – №. 2. – С. 98–-107.
6. Определение радионуклидного состава и оценка доз облучения населения за счет атмосферных выбросов российских АЭС/ А. А. Екидин, М. Е. Васянович, А. В. Васильев [и др.] // Траектория исследований – человек, природа, технологии. – 2022. – №. 2. – С. 53–64.
7. Оценка вклада техногенных радионуклидов в суммарную активность сбросов АЭС на основе имитационной модели / А. А. Екидин, Г. П. Малиновский, М. А. Рогозина [и др.] // Атомная энергия. – 2015. – Т. 119, № 4. – С. 219–221. – EDN SOFNZC.

8. *Грачев, В. А.* Распределение трития между первым контуром и связанными системами энергоблока АЭС с реактором ВВЭР / В. А. Грачев, А. Б. Сазонов, О. С. Быстрова // Атомная энергия. – 2024. – Т. 137, № 1–2. – С. 44–51. – EDN TFSDGI.
9. Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды: распоряжение Правительства РФ от 20.10.2023, № 2909-р (ред. от 05.06.2024). Москва, 2024. [Электронный ресурс]. – URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=473026. (дата обращения: 01.04.2025).
10. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact of Stressors : INPRO Manual. Vienna : IAEA, 2016, 94 p. (IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-3.15).
11. *Мясоедов, Б. Ф.* Методы разделения и концентрирования в решении актуальных проблем радиохимии / Б. Ф. Мясоедов // Российский химический журнал. – 2005. – Т. 49. – №. 2. – С. 64–67.
12. *Томилин Ю. А.* Концентрирование радионуклидов в пробах воды с помощью аквадистиллятора / Ю. А. Томилин, Н. В. Винцукевич // Гигиена и санитария. – 1986. – №. 9. – С. 72, 73.
13. Analysis of ultra-low radionuclide concentrations in water samples with baromembrane method / M. Vasyanovich, A. Ekidin, A. Trapeznikov, A. Plataev // Nuclear Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 53, No. 1. – P. 253–257. – DOI 10.1016/j.net.2020.06.014. – EDN KSFKXR.
14. Канализация: учеб. для вузов / С. В. Яковлев, Я. А. Карелин, А. И. Жуков [и др.] – М. : Стройиздат, 1975. – 632 с.
15. Ярошевский А. Б. и др. Технология очистки сточных вод. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2016. – 84 с.
16. *Слюнчев, О. М.* Баромембранные методы очистки ЖРО / О. М. Слюнчев // Вопросы радиационной безопасности. – № 3(71). – 2013. – С. 49–64.
17. Применение мембранной фильтрации для переработки жидких низкоактивных отходов радиохимического производства / П. А. Бобров, О. М. Слюнчев, А. С. Акинцев [и др.] // Вопросы радиационной безопасности, Научно-практический журнал ФГУП «Производственное объединение «МАЯК». – № 3 (87). – 2017. – 38 с.
18. Сравнительная оценка процессов электродиализа и электродеионизации / М. Р. Яковлева [и др.] // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2024. – Т. 16, №. 4. – С. 61–68.
19. *Зидан, О. Д.* Анализ эффективности применения электродиализа и обратного электродиализа в промышленности / О. Д. Зидан // Современная наука и молодые ученые. – 2022. – С. 30.
20. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)». Утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 7 июля 2009 г. Зарегистрировано в Минюсте РФ, 2009.
21. Баромембранный метод подготовки счетных образцов воды для измерения ультранизких концентраций радионуклидов / М. Е. Васянович, А. А. Екидин, А. В. Трапезников, А. П. Платаев // Морской биологический журнал. – 2020. – Т. 5, № 3. – С. 11–22. – DOI 10.21072/mbj.2020.05.3.02. – EDN RKOAFJ.
22. *Аксенов, В. И.* Химия воды: Аналитическое обеспечение лабораторного практикума: учеб. пособие / В. И. Аксенов, Л. И. Ушакова, И. И. Ничкова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 140 с.
23. *Ибрагимов, Ш. З.* Ядерная геофизика: пособие для самостоятельного изучения лекционного курса слушателей курсов повышения квалификации специальности «Геофизика» / Ш. З. Ибрагимов. – Казань : Казанский государственный университет, 2008. – 90 с.
24. *Головин, К. Б.* Ядерная геофизика / К. Б. Головин, Б. А. Головин, М. А. Калинникова. – Саратов : Саратовский государственный университет, 2014. – 141 с.

Сведения об авторах:

Молчанов Сергей Михайлович, инженер лаборатории ООО «Агентство экологической безопасности «Альфа-Х91», г. Екатеринбург, Россия. Инженер-исследователь Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия Эл. почта: molchanov.2001@bk.ru.

Десятов Денис Дмитриевич, м. н. с. Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

MODEL SOLUTION PREPARATION BY REVERSE OSMOSIS METHOD

S. M. Molchanov [1, 2], D. D. Desyatov [2]

[1] *AES Alfa-X91 LLC, Ekaterinburg, Russian Federation*
[2] *Institute of Industrial Ecology of UB RAS, Ekaterinburg, Russian Federation*

A review of modern water purification methods is carried out, their main advantages and disadvantages are shown. Operation on the municipal water purification by reverse osmosis and evaporation methods in order to obtain demineralized water was carried out. The average salinity as a result of purification was: for distillation – 4.21 mg/l; for reverse osmosis – 3.16 mg/l. The average salt permeability and membrane selectivity after the first cycle was equal 15,00 % and 85,00 %, and after the second cycle parameters deteriorated to values 17,56 % and 82,44 %. Based on the obtained samples four variants of a model solution were prepared containing natural radionuclide K-40 with an expected specific activity in samples equal to 81.5 Bq/l, and a high convergence of purification results was demonstrated using two different processes.

Key words: water; solution; reverse osmosis; salinity; permeate; concentrate; water purification; distillation; hydrosphere; radionuclides.

References

1. *Desyatov D.D.* Contribution of nuclear power plants with different types of reactor installations to the global supply of tritium to the environment / D. D. Desyatov, A. A. Ekidin, D. A. Vlasox // Atomic Energy. – 2024. – V. 137, №. 3–4. – P. 175–180.
2. *Nazarov E. I*. Assessment of the atmospheric carbon-14 caused by npp emissions / E. I. Nazarov, A. A. Ekidin, A. V. Vasiljev // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika. – 2018. – vol. 61, № 12-2, pp. 67-73
3. *Nazarovich, A. V.* Release of radioactive iodine in the atmosphere during normal operation of a npp / A. V. Nazarovich, M. D. Pyshkina, D. D. Desyatov [et al.] // The twenty-sixth All-Russian Scientific Conference of Physics Students and Young Scientists. VNKSF–26. — Ufa, 2020. Altair LLC, 2020. — pp. 419–420.
4. *Desyatov D. D.* Release of radioactive cesium to the environment during standard npp operations / D. D. Desyatov, A. A. Ekidin, S. G. Goliboroda // Atomic Energy. – 2023. – V. 134. – №. 1–2. – P. 85–91.
5. *Pyshkina, M. D.* The determination of main dose-forming nuclides in npp pwr and vver releases / M. D. Pyshkina // Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii. – 2017. – №. 2. – P. 98–107. [In Russian]
6. Determination of the radionuclide composition and assessment of dose of population exposure due to atmospheric emissions from russian npps / A. A. Ekidin, M. E. Vasyanovich, A. V. Vasilyev [et al.] // Research Trajectory – Human, Nature, Technology. – 2022. – № 2. – P.53–64.
7. Evaluation of the contribution of technogenic radionuclides to the total activity of npp emissions on the basis of a simulation model / A. A. Ekidin, G. P. Malinovskii, M. A. Rogozina // Atomic Energy. – 2015. – V. 119, №. 4. – P. 219–221. – EDN SOFNZC.
8. *Grachev V. A.* Distribution of tritium between primary circuit and related systems in a unit of the nuclear power plant with vver / V. A. Grachev, A. B. Sazonov, O. S. Bystrova // Atomic Energy. – 2024. – V. 137, № 1–2. – P. 44–51. – EDN TFSDGI.
9. List of pollutants subject to state regulation measures in the field of environmental protection: Decree of the Government of the Russian Federation dated 10/20/2023, № 2909-r (red. ot 05.06.2024). Moscow, 2024. [Electronic resource]. URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=473026. (accessed:: 01.04.2025). [In Russian]
10. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact of Stressors : INPRO Manual. Vienna : IAEA, 2016, 94 p. (IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-3.15).
11. *Myasoedov B. F*. Methods of separation and concentration in solving urgent problems of radiochemistry / B. F. Myasoedov // Russian Chemical Journal. – 2005. – vol. 49. – №2. – P. 64–67.

12. *Tomilin Y. A.* Koncentrirovanie radionuklidov v probah vody s pomoshch'yu akvadistillyatora / Yu. A. Tomilin, N. V. Vincukevich // Gigiena i sanitariya. – 1986. – №. 9. – P. 72, 73.
13. Analysis of ultra-low radionuclide concentrations in water samples with baromembrane method / M. Vasyanovich, A. Ekidin, A. Trapeznikov, A. Plataev // Nuclear Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 53, No. 1. – P. 253–257. – DOI 10.1016/j.net.2020.06.014. – EDN KSFKXR.
14. Kanalizaciya: study guide for universities / S. V. Yakovlev, Ya. A. Karelin, A. I. Zhukov [et al.] – M. : Stroyizdat, 1975. – 632 p. [in Russian].
15. Yaroshevskij A. B. [et al.]. Tekhnologiya ochistki stochnyh vod. – Kazan: Kazan national research technological university, 2016. – 84 p. [in Russian].
16. *Slyunchev O. M.* Baromembrane methods of liquid radwaste purification / O. M. Slyunchev // Radiation safety issues. – № 3 (71). – 2013. – P. 49–64.
17. Using membrane filtration in reprocessing liquid low-level waste at radiochemical / P. A. Bobrov, O. M. Slyunchev, A. S. Akintsev [et al.] // Radiation safety issues. – № 3 (87). – 2017. – P. 38.
18. Comparative Assessment of Electrodialysis and Electrodeionization Processes / M. R. Yakovleva [et al.] // Food Industry: Science and Technology. – 2024 – vol. 16, №. 4. – P. 61–68 [In Russian]
19. *Zidane O. D.* Analysis of the application of electrodialysis and reverse electrodialysis in industry / O. D. Zidane // O. D. Zidane // Sovremennaya nauka i molodye uchyonye. – 2022. – P. 30. [In Russian]
20. SanPiN 2.6.1.2523-09 «Normy radiacionnoj bezopasnosti (NRB-99/2009)» Utverzhdeny Postanovleniem Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha Rossijskoj Federacii ot 7 iyulya 2009 g. Registrared in the Ministry of Justice RF, 2009. [in Russian].
21. Baromembrane method for analysis of ultra-low concentrations of radionuclides in water samples / M. E. Vasyanovich, A. A. Ekidin, A. V. Plataev A., P. Trapeznikov // Marine biological journal – 2020. – vol. 5, № 3. – P. 11–22. – DOI 10.21072/mbj.2020.05.3.02. – EDN RKOAFJ.
22. *Aksenov, V. I.* Water Chemistry: Analytical support for laboratory practice: textbook / V. I. Aksenov, L. I. Ushakova, I. I. Nichkova – Pub. Ural University, 2014. – 140 p.
23. Ibragimov S. Z. Nuclear geophysics: a manual for self-study of the lecture course for students of advanced training courses in the specialty "Geophysics" / S. Z. Ibragimov; Kazan: Kazan Federal University, 2008. – 90 p.
24. *Golovin K. B.* Nuclear geophysics / K. B. Golovin, B. A. Golovin, M.A. Kalinnikova. – Saratov : Saratov Federal University, 2014. – 141 p.