

УДК 621.039.73  
© 2007

## ОБОСНОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ОЧИСТКЕ ВОДЫ ТЕЧЕНСКОГО КАСКАДА ВОДОЕМОВ

*О.М. Слюнчев, П.В. Козлов, С.И. Ровный, Б.В. Солдатов*

*Россия, г. Озерск, ФГУП "ПО "Маяк"*

*В.А. Кичик, А.В. Манакова*

*Россия, г. Москва, ООО "Гидротех"*

*О.Ф. Парилова*

*Россия, г. Москва, АО "Энергокаскад"*

Рассмотрены 4 варианта схем очистки воды ТКВ мембранными и сорбционными методами. Проведены их опытные испытания, в результате которых переработано 330 м<sup>3</sup> ЖРО ТКВ. Все схемы обеспечивают требуемое качество очистки, при котором объемная активность воды не превышает I уровня вмешательства (менее 5 Бк/л по <sup>90</sup>Sr). Согласно результатам испытаний и предварительной технико-экономической оценки оптимальной является схема ультрафильтрация – обратный осмос – сорбция. Себестоимость очистки воды составит около 15 руб./м<sup>3</sup>. Проведены исследования по локализации вторичных отходов сорбционной стадии очистки в цементные матрицы, определены характеристики полученного компаунда и его количество для различных сорбентов.

Развитие предприятий ядерно-топливного цикла в значительной мере сдерживается экологическими проблемами, в частности, обращением с радиоактивными отходами. На предприятиях Росатома имеются загрязненные радионуклидами территории общей площадью 480 км<sup>2</sup>, из которых 104 км<sup>2</sup> приходится на водоемы. Основную потенциальную опасность представляют водоемы-хранилища жидких радиоактивных отходов. Подавляющая часть водоемов-хранилищ ЖРО (~90 км<sup>2</sup>) находится на территории ФГУП "ПО "Маяк", из которых около 70 км<sup>2</sup> приходится на Теченский каскад водоемов (ТКВ). В настоящее время в водоемах ТКВ накоплено ~400 млн. м<sup>3</sup> жидких НАО с суммарной активностью ~ 200 тыс. Ки.

Искусственные водоемы В-3, В-4, В-10 и В-11, образующие Теченский каскад водоемов, были созданы путем перекрытия речного стока р.Теча земляными плотинами. Водоемы В-3 (Кокшаровский пруд) и В-4 (Метлинский пруд) существовали до образования ПО "Маяк", водоемы В-10 и В-11 были созданы в верховьях

р. Теча в 1950–60-х гг. в рамках первого этапа радиационной реабилитации р.Теча, а также с целью локализации и хранения больших объемов жидких НАО.

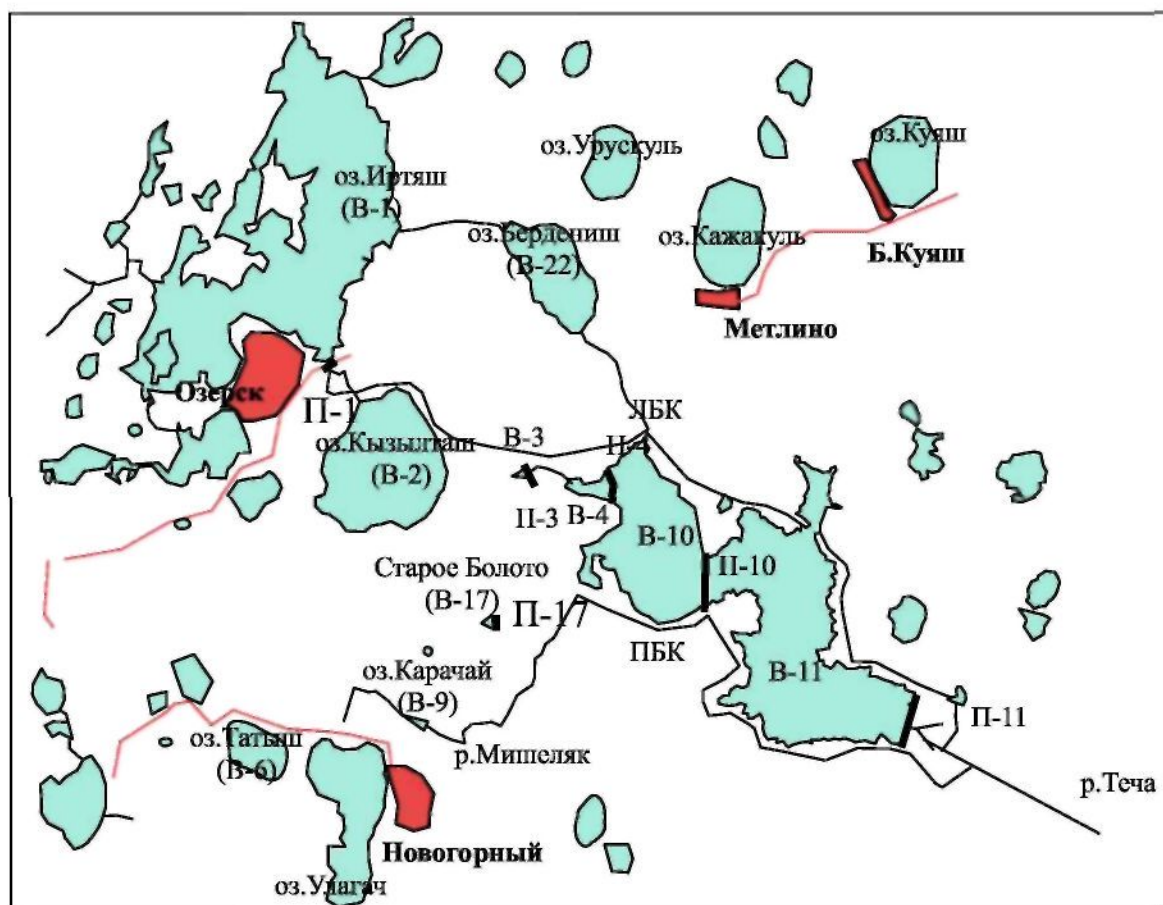
Для перехвата поверхностного стока и снижения подземной фильтрации вдоль правого и левого берегов водоемов В-10 и В-11 проложены нагорные каналы (левобережный – ЛБК и правобережный – ПБК) протяженностью соответственно 40 и 19 км. Каналы впадают в р. Теча ниже замыкающей каскад плотины П-11, формируя тем самым исток реки. Схема промышленных водоемов-хранилищ ФГУП "ПО "Маяк" и основных гидротехнических сооружений (плотин) приведена на рис. 1. Основные морфометрические параметры водоемов ТКВ приведены в табл. 1.

Гидрологический режим промышленных водоемов относится к искусственно зарегулированному. Помимо естественных составляющих (осадки, испарение, поверхностный и подземный сток, фильтрационные потери) в водном балансе промводоемов присутствуют сбросы сточных вод

Таблица 1

Общая характеристика водоемов ТКВ

| Параметры, единицы измерения   | Водоемы          |                  |                  |                  |
|--|------------------|------------------|------------------|------------------|
|  | 3                | 4                | 10               | 11               |
| Год начала эксплуатации  | 1951             | 1949             | 1957             | 1964             |
| Уровень воды в водоеме:<br>– максимальный разрешенный<br>– фактический на 19.06.2007 | 223.19<br>223.11 | 220.20<br>220.21 | 219.92<br>220.02 | 217.32<br>216.98 |
| Площадь водоема, км <sup>2</sup>   | 0,8              | 1,5              | 18,6             | 46,2             |
| Объем водоема, млн. м <sup>3</sup>   | 0,9              | 4,7              | 83,3             | 250,0            |



V-1-V-22 – водоемы: П-1-П-17 – плотины: ЛБК, ПБК – обводные каналы

Рис. 1. План-схема расположения водоемов-хранилищ ТКВ

(В-3 и В-4) и перетоки через плотины водоемов В-3, В-4 и В-10. Эксплуатацией промводоемов занимается специальная служба предприятия, контролирующая их гидрологический режим.

Изменение климатических условий в последние 10 лет привело к повышению водности в регионе и способствовало увеличению уровня каскада водоемов. Дальнейший рост уровня ТКВ может привести к переполнению каскада и аварийному сбросу радиоактивно загрязненных вод в открытую гидросеть.

Для устранения угрозы переполнения каскада и обеспечения его безопасной эксплуатации необходимо провести комплекс организационно-технических и научных работ. Одним из направлений исследований является разработка технологий очистки вод ТКВ, позволяющих осуществить сброс очищенной воды в открытую гидросеть или использовать ее для водоснабжения предприятия и стабилизировать (регулировать) уровень каскада.

При выборе и разработке технологий очистки вод ТКВ необходимо учитывать химический и радиохимический состав водоемов (см. табл. 2).

Из табл. 2 видно, что активность воды водоемов В-10 и В-11 практически полностью определяется парой  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ . Удельная активность бета-излучающих нуклидов в воде В-11 в

2–3 раза ниже, чем в остальных водоемах ТКВ. Активность альфа-излучающих нуклидов не превышает 0,5 Бк/л. Химический состав водоемов определяется сульфатами (45–50 %), натрием (15 %), кальцием (10 %) и магнием (5 %).

Важной характеристикой водоемов, которую необходимо учитывать при разработке технологии очистки вод ТКВ, является их биологическая продуктивность. Численность клеток фитопланктона составляет 1 млн. клеток/л в В-3, 11 млн. клеток/л в В-4, 3 млн. клеток/л в В-10, и всего 0,2 млн. клеток/л в В-11. Влияние данного показателя может оказаться очень значительным, поскольку наличие микроорганизмов и водорослей определяет в значительной степени параметры и эффективность предварительной подготовки воды. При выборе площадки для станции водоочистки необходимо учитывать особенности акватории водоемов и возможности организации водозабора. Для водоемов В-3 и В-4 прибрежная водная растительность занимает значительную часть акватории, а малые глубины создадут дополнительные проблемы для организации водозабора. Акватория же водоемов В-11 и В-10 имеет глубины 10–15 м, что позволит организовать водозабор без захвата донных отложений.

Анализ морфометрических параметров водоемов, схемы их расположения, биологической

Таблица 2

Радионуклидный и химический состав воды ТКВ в 2006 г.

| Водоем | Удельная активность бета-излучающих нуклидов, Бк/л |                         |                   |                  |                  | Максимальная численность ФП, млн. кл./л | Объем, млн. м <sup>3</sup> |      |
|--------|--|-------------------------|-------------------|------------------|------------------|---|----------------------------|------|
|        | $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$                     | $^{137}\text{Cs}$       | $^{134}\text{Cs}$ | $^{60}\text{Co}$ | $\Sigma\beta$    |   |                            |      |
| № 3    | 6240   | 1140                    | 2                 | 200              | 7580             | 0,9                                     | 0,9                        |      |
| № 4    | 7640   | 400                     | < 0,1             | 30               | 8070             | 11,1                                    | 4,7                        |      |
| № 10   | 6160   | 20                      | < 0,1             | 2                | 6180             | 2,9                                     | 83,3                       |      |
| № 11   | 2920   | 1                       | –                 | < 0,7            | 2920             | 0,2                                     | 250,0                      |      |
| Водоем | pH   | Химический состав, мг/л |                   |                  |                  |   |                            |      |
|        |  | Na <sup>+</sup>         | Ca <sup>2+</sup>  | Mg <sup>2+</sup> | Sr <sup>2+</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>           | Cl <sup>-</sup>            | С.О. |
| № 3    | 7,9  | 86                      | 42                | 30               | 0,3              | 61                                      | 52                         | 493  |
| № 4    | 8,1  | 71                      | 44                | 30               | 0,3              | 68                                      | 51                         | 468  |
| № 10   | 8,0  | 138                     | 81                | 43               | 0,5              | 381                                     | 74                         | 956  |
| № 11   | 8,0  | 160                     | 91                | 61               | 0,6              | 478                                     | 80                         | 1164 |

Примечание: С.О. – сухой остаток; ФП – фитопланктон.

продуктивности, химического и радиохимического составов показывает, что наиболее подходящим для переработки загрязненной воды является водоем В-11.

При выборе перспективных технических решений по очистке вод ТКВ помимо высоких коэффициентов задержания руководствовались объемом вторичных отходов, образующихся в результате переработки. Анализ литературных данных и опыт многочисленных исследований, проведенных на предприятии [1–2], показал, что таким критериям отвечают мембранные и сорбционные технологии, а также их сочетание.

По результатам аналитической работы была предложена схема (см. рис. 2), согласно которой вода водоема непрерывно циркулирует через блок предварительной и основной очистки. Очищенная на первых технологических ступенях вода передается на блок дополнительной очистки для гарантированного обеспечения качества воды.

Предложенная схема организации процесса обеспечивает эффективную очистку вод ТКВ от радионуклидов при минимизации объема вторичных отходов.

В рамках решения задачи по разработке технологий очистки вод ТКВ в 2005–2006 гг. на предприятии был создан стенд производительностью по очищенной воде до 1 м<sup>3</sup>/ч и

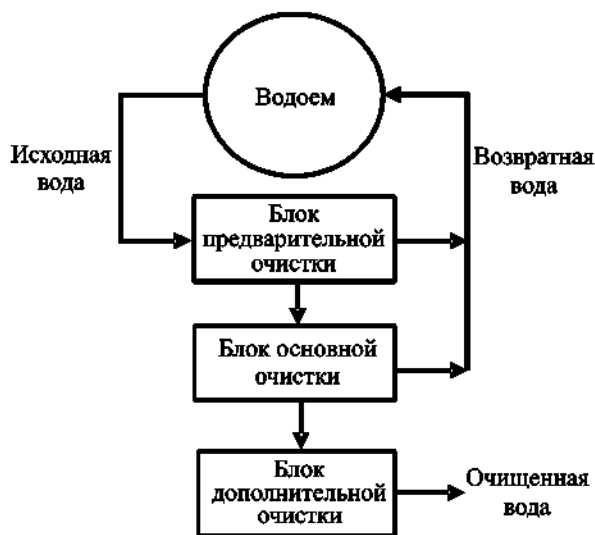


Рис. 2. Принципиальная схема очистки вод ТКВ

проведены опытные работы по перспективным техническим решениям. Внешний вид стенда представлен на рис. 3.

В ходе опытных работ исследовалось четыре принципиальные технологические схемы:

- Предварительная очистка + Обратный осмос;
- Предварительная очистка + Обратный осмос + Сорбция;
- Предварительная очистка + Обратный осмос + Обратный осмос;
- Предварительная очистка + Обратный осмос + Обратный осмос + Сорбция.

В качестве блока предварительной очистки использовали последовательную фильтрацию через кварцевый песок и микрофильтр (~5 мкм), блока основной очистки – обратный осмос, а блока дополнительной очистки – обратный осмос или сорбционную очистку. Сорбционную очистку воды исследовали на ионообменных смолах (КУ-2-8 и АН-31), фитосорбенте ФС-728, неорганических сорбентах МДМ и ИСМ-S (на основе модифицированного диоксида марганца).

Принципиально новым является применение для доочистки воды второй ступени обратного осмоса. Известно, что эффективность обратного осмоса пропорциональна солесодержанию раствора и для низкосолевых растворов с концентрацией 5–10 мг/л она заметно снижается. Как правило, в этом случае применяются сорбционные технологии. Новизна предложенного технического решения заключается в том, что для дополнительной очистки низкосолевых растворов от радионуклидов стронция и иттрия, концентрация которых в растворе составляет сотые доли микрограмма, предлагается метод обратного осмоса. Сведения подобного рода в литературе отсутствуют.

По первой схеме переработано более 300 м<sup>3</sup> реальных вод ТКВ, по остальным трем – более 100 м<sup>3</sup> [3]. Параметры исходной воды в ходе экспериментов изменялись незначительно: удельная активность бета-излучающих нуклидов лежала в пределах от 2460 до 3100 Бк/л, сухой остаток – от 1110 до 1300 мг/л (см. рис. 4).

Высокое содержание в воде водоема В-11 сульфатов, кальция и магния вносит определенные ограничения на режимы работы оборудования из-за опасности отложений CaSO<sub>4</sub> и CaCO<sub>3</sub>.

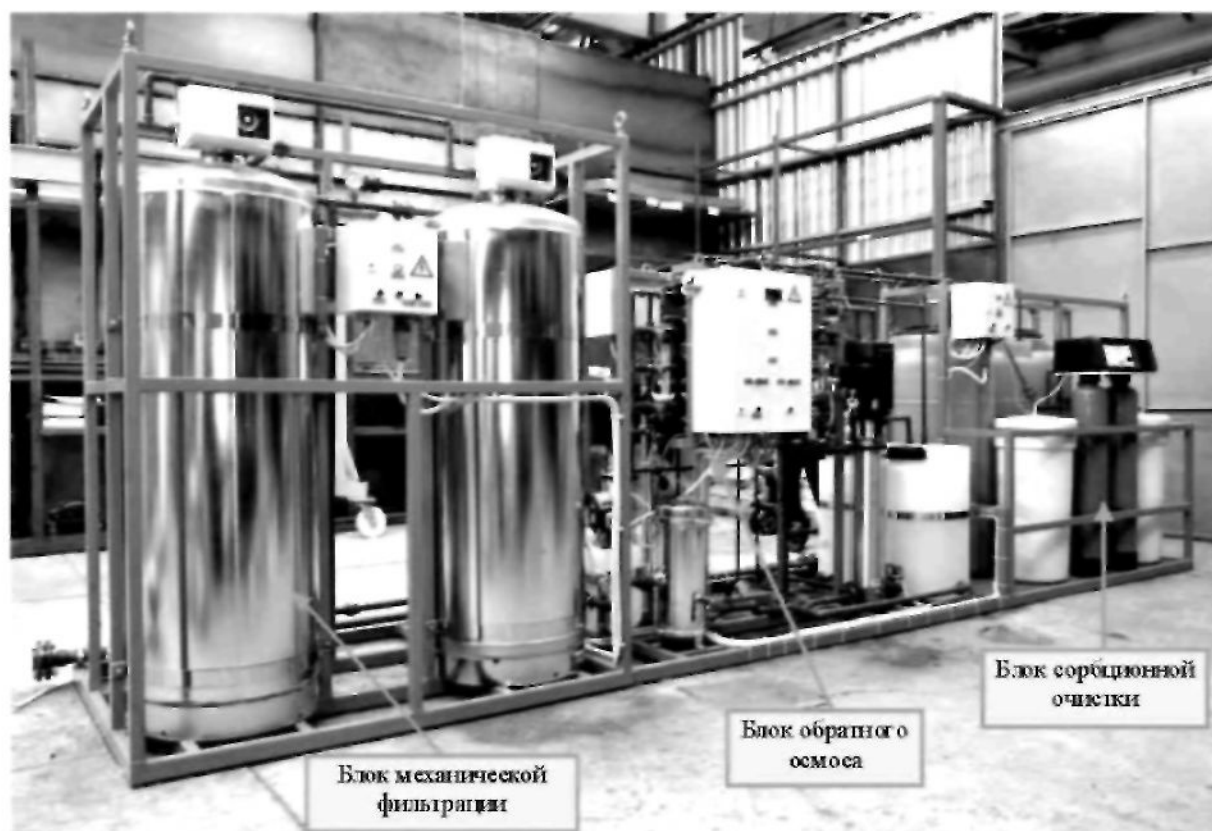


Рис. 3. Внешний вид стенда очистки вод ТКВ

Отложения этих осадков на поверхности мембран приводит к резкому падению их производительности, снижению качества очистки и даже выходу фильтрующих элементов из строя. Для предотвращения этих явлений в мембранных технологиях практикуется подкисление (для удаления карбонатов), ограничение степени концентрирования и применение антискалантов (соединений, предотвращающих осадкообразование на мембранах за счет образования водорастворимых комплексов). В опытных работах по очистке вод ТКВ применили два последних технических приема: ограничили отбор очищенной воды 20 % и применили антискалант марки ЭнергоСофт™, разработанный Проектно-конструкторской фирмой "Энерго", с дозировкой 0,3–0,4 мг/л. Согласно данным работы [4] этот антискалант демонстрирует высокую эффективность на уровне лучших

импортных аналогов. Антискалант вводили на I ступени обратного осмоса, где наиболее вероятно осадкообразование на мембранах.

Основная часть работ по переработке 330 м<sup>3</sup> проведена с 20 % отбором очищенной воды на I ступени обратного осмоса и отсутствием рецикла концентрата на второй ступени. Данная схема позволяет эксплуатировать мембраны в наиболее "падающем" режиме, однако характеризуется пониженным отбором очищенной воды.

На рис. 5 представлены результаты измерения производительности I и II ступеней обратноосмотической установки, а также рабочего давления в ходе эксперимента. Производительность I ступени обратного осмоса лежала в пределах от 450 до 800 л/ч, II ступени – от 80 до 200 л/ч. Рабочее давление на I ступени варьировалось в диапазоне от 7,7 до 14,0 атм, на II – от 7,0 до 10,6 атм. Из ри-

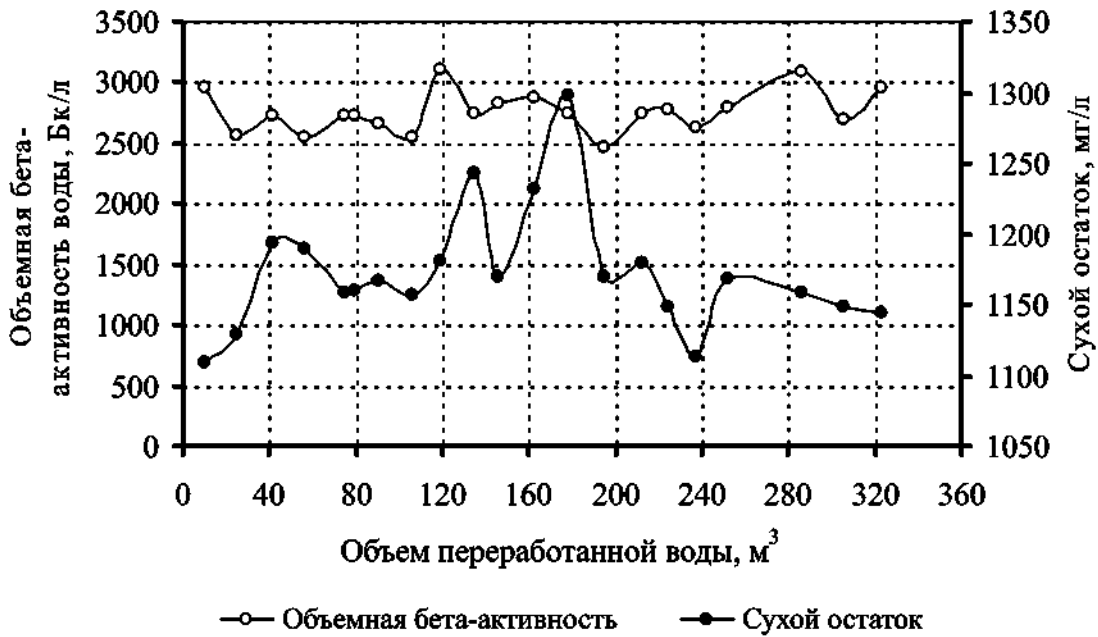


Рис. 4. Изменение объемной бета-активности и сухого остатка в исходной воде в зависимости от объема переработки

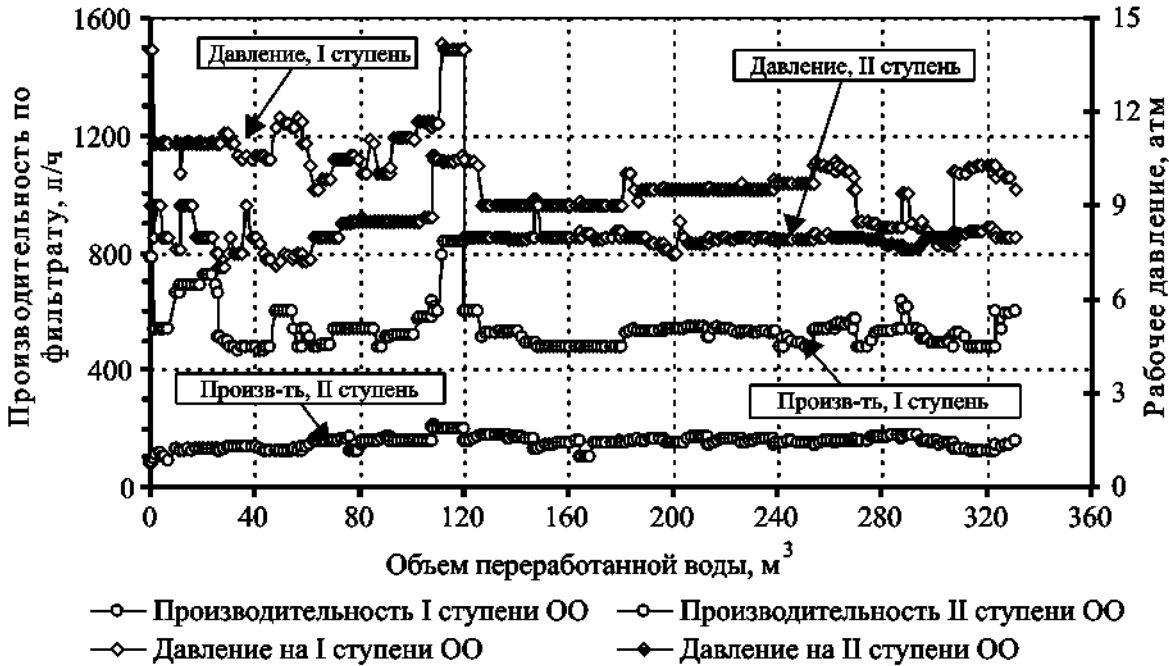


Рис. 5. Изменение производительности и рабочего давления I и II ступеней обратного осмоса в ходе эксперимента

сунка видно, что производительность на обеих ступенях обратного осмоса четко коррелирует с рабочим давлением. Этот факт в совокупности с данными по качеству полученной очищенной воды говорит о сохранении эксплуатационных характеристик мембранных элементов и установки в целом в ходе проведенных ресурсных испытаний.

В рамках оптимизации процесса переработки на заключительном этапе работ проведены операции с 35 % отбором очищенной воды на I ступени обратного осмоса и работой в режиме концентрирования на II ступени обратного осмоса. Объем переработанных ЖРО по данной схеме составил 12 м<sup>3</sup>. На II ступени обратного осмоса коэффициент концентрирования составил около 10, при этом солесодержание концентрата не превышало 100 мг/л, а бета-активность – 70 Бк/л, что указывает на возможность дальнейшего увеличения концентрирования.

Исследования по оптимизации работы обратноосмотической очистки воды ТКВ проводились также ООО «Гидротех» [5]. По итогам исследований установлено, что коэффициент очистки от пары <sup>90</sup>Sr+<sup>90</sup>Y иттрий снижается с 200 до 30 при уменьшении солесодержания с 1090 до 6 мг/л. Однако степень очистки низко-солевых растворов методом обратного осмоса достаточна при использовании его на стадии доочистки.

Коэффициент задержания стронция и иттрия не зависел от степени отбора фильтрата во всем изученном диапазоне его значений (от 25 % до 80 %). Влияние данного параметра заметно в некоторой степени только в отношении однозарядных катионов (например натрия), для которых коэффициенты задержания снижаются до 96–97 %.

Работа на воде с повышенным содержанием основных химических компонентов (в 1,4–2,3 раза) с высокой степенью отбора фильтрата (до 80 %) без антискаланта приводит к падению производительности мембраны до 30 % от исходной за счет отложения осадков. Промывка установки раствором трилона-Б с концентрацией 5 г/л и рН=10 в течение 5 ч приводит к полному восстановлению работоспособности мембраны. Использование антискаланта марки ЭнергоСофт™ с дозирова-

ной 0,3 мг/л при аналогичном режиме работы обеспечивает стабильную работу мембранного элемента без значимого уменьшения производительности.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности повышения степени отбора фильтрата на первой ступени обратноосмотической очистки вод ТКВ до 70–80 % с использованием антискаланта без снижения производительности мембранных элементов из-за образования на их поверхности отложений малорастворимых соединений. Полученный на данной стадии фильтрат может быть эффективно доочищен до необходимого уровня второй ступенью обратного осмоса.

Следует отметить, что для окончательного подтверждения работоспособности мембранных элементов требуется проведение длительных ресурсных испытаний на опытных установках с реальной водой ТКВ.

Результаты опытных испытаний по очистке воды В-11 представлены в табл. 3. Для схем с сорбционной стадией очистки разброс показателей объясняется применением 4 различных типов сорбентов, работающих с разной эффективностью.

Из данных табл. 3 видно, что уже I ступень обратного осмоса обеспечивает достаточно эффективную очистку воды водоема. Коэффициент очистки от бета-излучающих нуклидов изменялся в пределах от 200 до 1000 и в среднем за весь период испытаний составил порядка 280.

В процессе испытаний удельная бета-активность очищенной воды после I ступени обратного осмоса снижалась с 13 Бк/л до величин (4–8 Бк/л), при которых, согласно НРБ-99 [6], вода может быть сброшена в открытую гидросеть без ограничения (для пары <sup>90</sup>Sr+<sup>90</sup>Y равновесная активность должна быть менее 9,1 Бк/л). Сухой остаток очищенной воды составил в среднем 18 мг/л. Полученные данные позволяют рассчитывать, что уже на I ступени обратного осмоса можно получить воду, качество которой позволит осуществить ее сброс в открытую сеть без ограничений.

Схемы с дополнительным блоком очистки позволяют получить очищенную воду питьевого стандарта даже в случае каких-либо сбоях на I ступени обратного осмоса. Применение сор-

Таблица 3

Результаты опытных испытаний мембранно-сорбционных методов очистки

| Показатель                                  | Обратный осмос    | Обратный осмос + Сорбция | Обратный осмос + Обратный осмос | Обратный осмос + Обратный осмос + Сорбция |
|---|-------------------|--------------------------|---------------------------------|---|
| $\Sigma\beta$ , Бк/л:                       |                   |                          |                                 |   |
| Исходная вода                               | $2,63 \cdot 10^3$ | $2,63 \cdot 10^3$        | $2,63 \cdot 10^3$               | $2,63 \cdot 10^3$                         |
| Очищенная вода                              | 0,9–12,8          | 0,5–12,0                 | 0,5–1,5                         | 0,3–2,3                                   |
| $^{90}\text{Sr}$ , Бк/л:                    |                   |                          |                                 |   |
| Исходная вода                               | $1,32 \cdot 10^3$ | $1,32 \cdot 10^3$        | $1,32 \cdot 10^3$               | $1,32 \cdot 10^3$                         |
| Очищенная вода                              | 0,5–6,4           | 0,3–6,0                  | 0,3–0,8                         | 0,2–1,0                                   |
| Сухой остаток, мг/л:                        |                   |                          |                                 |   |
| Исходная вода                               | 1157              | 1157                     | 1157                            | 1157                                      |
| Очищенная вода                              | 3,0–32,0          | 2,6–10,4                 | 0,7–1,3                         | 0,2–1,0                                   |
| Коэффициент очистки:                        |                   |                          |                                 |   |
| $\Sigma\beta$                               | 205–2922          | 219–5260                 | 1750–5200                       | 1143–8767                                 |
| Сухой остаток                               | 36–386            | 110–450                  | 890–1653                        | 1157–5785                                 |
| Доля очищенной воды (от объема исходной), % | 35                | 35                       | 30                              | 30  |

бционной доочистки позволяет снизить удельную активность воды по  $^{90}\text{Sr}$  до  $(1,5 \pm 0,5)$  Бк/л, а дополнительная ступень обратного осмоса – до активности менее 1 Бк/л. Сухой остаток очищенной воды изменялся в пределах от 2 до 10 мг/л в случае сорбционной очистки и от 2 до 4 мг/л для обратноосмотической. Результаты измерений активности очищенной воды в зависимости от объема переработки представлены на рис. 6.

Схема, которая предусматривала совместное применение обратноосмотической и сорбционной доочистки, показала, что сорбционный блок является излишним и не влияет на качество очищенной воды. Сухой остаток очищенной воды составлял от 0,1 до 0,5 мг/л, а удельная активность по  $^{90}\text{Sr}$  – от 0,15 до 1,0 Бк/л.

Полученные результаты позволяют говорить об успешном проведении испытаний. Оборудование работало устойчиво. Снижения производительности мембранных элементов и значимого ухудшения качества очищенной воды не отмечено [3].

Показатели сорбционной очистки фильтрата I ступени обратного осмоса представлены в табл. 4.

Фильтроцикл на сорбционной стадии очистки составил для ионообменных смол и сорбента МДМ более 9600 к.о., для ИСМ-S – более 9200 к.о., для фитосорбента ФС-728 – 1700 к.о. Окончанием фильтроцикла считали превышение удельной активности бета-излучающих нуклидов уровня 9,1 Бк/л. Подробные результаты сорбционной очистки приведены на рис. 7. Анализ данных показывает, что наиболее высокое качество очистки показывают неорганические сорбенты. Ионообменные смолы на начальном этапе (400 к.о.) характеризуются недостаточной эффективностью очистки, что, впрочем, характерно для этого класса сорбентов. Согласно экспериментальным данным для марганцевых сорбентов и ионообменных смол окончание фильтроцикла не достигнуто.

Что касается очистки воды от химических компонентов, то удаление анионов обеспечиваются фактически только ионообменные смолы – общая их массовая концентрация не превышает 2,3 мг/л, что обусловлено наличием анионита, в то время, как остальные сорбенты являются только катионообменниками и в большинстве случаев лишь загрязняют фильтрат анионами, оставшимися в них после синтеза.



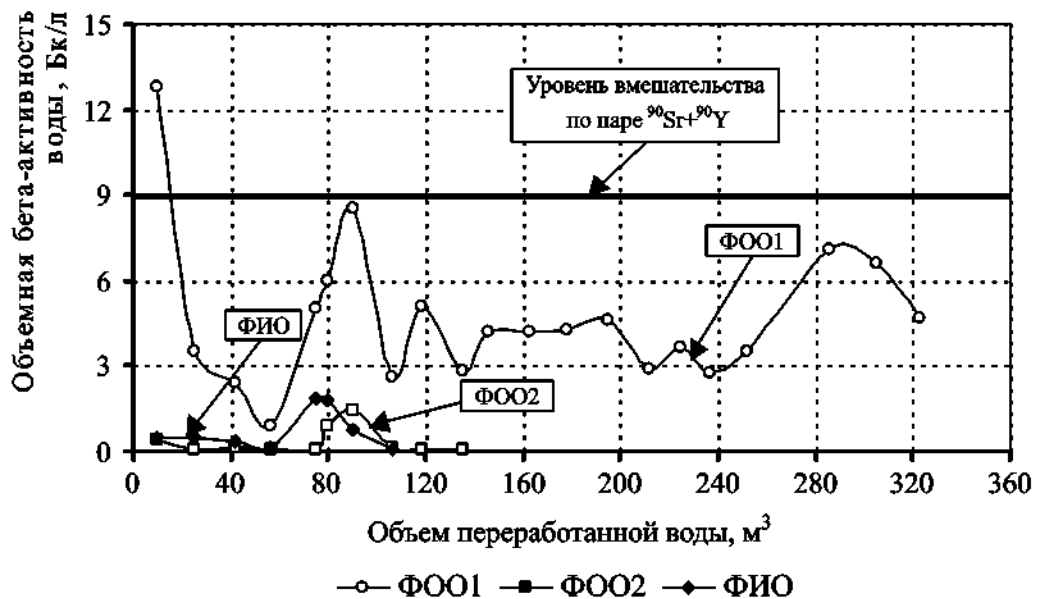


Рис. 6. Изменение активности бета-излучающих нуклидов в фильтрате I и II ступеней обратного осмоса (ФОО1 и ФОО2) и ионного обмена (ФИО) в зависимости от объема переработки

Таблица 4

Результаты сорбционной очистки различными материалами

| Тип сорбента                       | Фильтроцикл, к.о. | $\Sigma\beta$ , Бк/л | Ж, ммоль/л | Cl <sup>-</sup> , мг/л | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/л | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/л | pH      |
|------------------------------------|-------------------|----------------------|------------|------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------|
| Фильтрат обратного осмоса          |                   |                      |            |                        |                                      |                                     |         |
| —                                  | —                 | 27                   | 0,08       | 0,83                   | 2,2                                  | 0,21                                | 7,1     |
| Фильтрат после сорбционной очистки |                   |                      |            |                        |                                      |                                     |         |
| КУ-2-8 +АН-31                      | > 9600            | 1,1–8,6              | 0,05       | 0,08–1,40              | 0,03–0,70                            | 0,03–0,60                           | 4,5–7,2 |
| МДМ                                |                   | 1,0–3,2              | 0,05       | 0,5–2,4                | 0,9–9,5                              | 0,1–5,4                             | 6,5–8,0 |
| ИСМ-S                              | > 9200            | 0,5–5,2              | 0,06       | 0,5–2,4                | 0,7–8,4                              | 0,02–1,40                           | 6,6–8,1 |
| ФС-728                             | 1700              | 1,2–12,0             | 0,05–0,20  | 0,7–2,9                | 2,4–11,0                             | 0,2–2,9                             | 6,7–7,7 |

На основании результатов опытных испытаний проведено сравнение перспективных схем переработки с традиционными методами (упаривание, ионный обмен), предусматривающими отверждение концентратов. В табл. 5 приведены сравнительные показатели для различных схем очистки воды водоема 11.

Из данных табл. 5 видно, что предложенные перспективные технические решения имеют очевидные преимущества в сравнении с традиционными схемами водоочистки. Полученные в результате опытных испытаний данные могут быть использованы для проектирования станции водоочистки. Однако, для окончательного

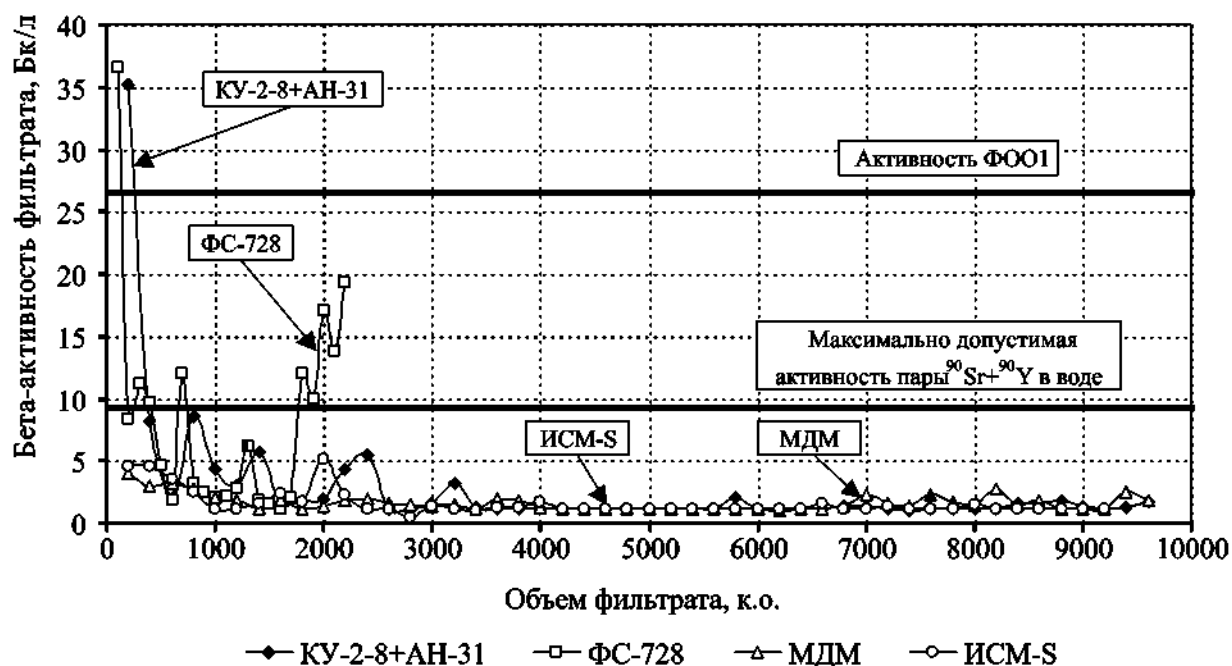


Рис. 7. Зависимость активности очищенной воды от фильтроцикла

Таблица 5

Основные показатели технологий переработки воды ТКВ (5 млн. м<sup>3</sup>/год)

| Наименование процесса                     | Коэффициент очистки | Фильтрат               |                     | Количество вторичных отходов, т | Количество отверженных отходов, т |
|---|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
|   |                     | <sup>90</sup> Sr, Бк/л | Сухой остаток, мг/л |                                 |                                   |
| Упаривание                                | 100000              | 0,01                   | 0,01                | 6000                            | 30000                             |
| Ионный обмен                              | 100–200             | 5–10                   | 5–10                | 18000                           | 90000                             |
| Обратный осмос                            | 200–500             | 2–5                    | 7                   | –                               | –                                 |
| Обратный осмос + Сорбция                  | 500–1000            | 1–2                    | 5                   | 60                              | 300                               |
| Обратный осмос + Обратный осмос           | 1000–5000           | 0,2–1                  | 3                   | –                               | –                                 |
| Обратный осмос + Обратный осмос + Сорбция | 1000–5000           | 0,2–1                  | 1                   | 5–10                            | 25–50                             |

выбора технологии очистки вод ТКВ необходима оптимизация работы отдельных узлов оборудования и проведение ресурсных испытаний.

Полученные за время опытных испытаний результаты были использованы для первичной технико-экономической оценки схем очистки [7]. В табл. 6 представлены результаты оценки

стоимости станции очистки вод ТКВ производительностью 5 млн. м<sup>3</sup>/год по схемам ультрафильтрация + обратный осмос + обратный осмос (ионный обмен) в различном техническом исполнении. В табл. 7 приведены аналогичные показатели для схем с механической фильтрацией в качестве блока предочистки.

Реализация самого дорогостоящего варианта исполнения схемы УФ+ОО+ОО оценивается в 61 млн. €. Самый доступный вариант исполнения схемы МФ+ОО+ИО – 26 млн. €.

Данные, представленные в табл. 6 и 7, относятся к вариантам исполнения схем с автоматической системой управления. В случае ручной системы управления итоговые цифры могут быть снижены примерно на 5 млн. €.

На стоимость технологии существенно влияет стадия предварительной подготовки воды. Ультрафильтрация почти в два раза дороже механической фильтрации. Вклад данной стадии составит от 25 до 50 % общей стоимости схемы. Оценка капитальных затрат была произведена, исходя из степени отбора фильтрата на I ступени обратного осмоса 20 %. В ходе опытно-промышленных испытаний была показана возможность

Таблица 6

Ориентировочная стоимость установок очистки вод ТКВ

| Наименование                       | Стоимость, млн. € |             |             |             |
|------------------------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
|                                    | УФ+ОО+ОО          |             | УФ+ОО+ИО    |             |
|                                    | Н/С               | Полимер     | Н/С         | Полимер     |
| Установка ультрафильтрации         | 27,7              | 26,4        | 22,5        | 21,4        |
| Установка обратного осмоса, I ст.  | 12,5              | 11,0        | 10,0        | 8,8         |
| Установка обратного осмоса, II ст. | 7,2               | 6,3         | –           | –           |
| Установка ионного обмена           | –                 | –           | 1,5         | 1,4         |
| Емкостное и насосное оборудование  | 2,6               | 2,6         | 2,0         | 2,0         |
| Монтаж                             | 7,1               | 3,6         | 8,3         | 4,1         |
| Пуско-наладка                      | 0,3               | 0,3         | 0,3         | 0,3         |
| Строительство                      | 1,8               | 1,8         | 2,4         | 2,4         |
| Проект                             | 1,8               | 1,8         | 1,5         | 1,5         |
| <b>ИТОГО</b>                       | <b>61,0</b>       | <b>53,8</b> | <b>48,5</b> | <b>41,9</b> |

Примечание. Н/С – нержавеющая сталь.

Таблица 7

Ориентировочная стоимость установок очистки вод ТКВ

| Наименование                       | Стоимость, млн. € |             |             |             |
|------------------------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
|                                    | МФ+ОО+ОО          |             | МФ+ОО+ИО    |             |
|                                    | Н/С               | Полимер     | Н/С         | Полимер     |
| Установка механической фильтрации  | 13,3              | 12,8        | 9,9         | 9,5         |
| Установка обратного осмоса, I ст.  | 12,5              | 11,0        | 10,0        | 8,8         |
| Установка обратного осмоса, II ст. | 7,2               | 6,3         | –           | –           |
| Установка ионного обмена           | –                 | –           | 1,5         | 1,4         |
| Емкостное и насосное оборудование  | 2,4               | 2,4         | 1,9         | 1,9         |
| Монтаж                             | 9,0               | 4,5         | 10,3        | 5,1         |
| Пуско-наладка                      | 0,3               | 0,3         | 0,3         | 0,3         |
| Строительство                      | 3,1               | 3,1         | 3,5         | 3,5         |
| Проект                             | 1,8               | 1,8         | 1,6         | 1,6         |
| <b>ИТОГО</b>                       | <b>49,6</b>       | <b>42,2</b> | <b>39,0</b> | <b>32,1</b> |

Примечание. Н/С – нержавеющая сталь.

повышения степени отбора фильтрата до 35 %, а по результатам работ ООО "Гидротех" – до 70–80 % без ухудшения качества очищенной воды. Таким образом, существует возможность снижения затрат на этой стадии в 3–4 раза. Экономия при этом может достигать до 18–20 млн. €.

Возможность подобной оптимизации процесса в сторону увеличения степени отбора фильтрата на первой ступени обратного осмоса должна быть подтверждена в ходе длительных ресурсных испытаний.

Себестоимость очищенной воды по предварительным расчетам составляет от 0,4 до 0,8 €/м<sup>3</sup> (14–28 руб./м<sup>3</sup>).

Применение мембранных методов оправдывается резким снижением объема вторичных отходов. Количество ТРО в мембранных схемах очистки для производительности 5 млн. м<sup>3</sup>/год составляет около 30 т, использование на стадии подготовки воды механической фильтрации увеличивает эту цифру до (165±25) т/год за счет отработанного зернистого фильтрующего материала. Использование же сорбционных технологий на стадии доочистки добавляет вторичных отходов в виде отработанных сорбентов или регенератов.

Проведенные эксперименты по отверждению вторичных отходов в матрицы на основе порландцемента и доменного шлака показали, что наилучшим образом включаются в цементные матрицы сорбенты на основе диоксида марганца (степень включения достигает 36 %), зола от сжигания фитосорбентов (до 30 %) и регенераты катионита, упаренные до состояния сухих солей (до 25 %). Прочность полученных компаундов на сжатие лежит в пределах от 100

до 310 кг/см<sup>2</sup>, что превышает требования нормативных документов [8]. По морозостойкости нормативные требования обеспечиваются для компаундов с марганцевым сорбентом и регенератом ионообменных смол. Скорость выщелачивания <sup>90</sup>Sr и <sup>90</sup>Y для компаундов с перечисленными отходами не превышает нормативно установленную величину 1·10<sup>-3</sup> г/см<sup>2</sup>·сут [8].

Результаты расчетов показывают, что количество отвержденных вторичных отходов после сорбционной доочистки 5 млн. м<sup>3</sup>/год фильтрата первой ступени обратного осмоса составит следующие величины: для фитосорбентов – 100 м<sup>3</sup>/год, для сорбентов на основе диоксида марганца – 550 м<sup>3</sup>/год, для регенератов катионита – 130 м<sup>3</sup>/год (табл. 8).

Следует отметить, что для ионообменных смол и сорбентов на основе диоксида марганца фильтроцикл не исчерпан, и полученные цифры по количеству отходов могут быть скорректированы в сторону уменьшения.

К недостаткам фитосорбентов и сорбентов на основе диоксида марганца следует отнести необходимость создания крупнотоннажного их производства вследствие отсутствия возможности (для фитосорбентов) либо недостаточной отработанности (для марганцевых сорбентов) процесса регенерации. На данный момент более обоснованным является использование ионообменных смол с последующей регенерацией и отверждением регенератов. Расход ионитов в данном случае минимален, количество отвержденных отходов невелико, эффективность очистки высока, а все стадии процесса сорбции и обращения с отходами достаточно хорошо отработаны.

Таблица 8

Количество отвержденных вторичных отходов, образующихся при сорбционной очистке 5 млн. м<sup>3</sup>/год

| Тип сорбента | Тип отходов               | Фильтроцикл, к.о. | Объем отходов, м <sup>3</sup> | S, % | M <sub>компл.</sub> , т | Объем компаунда, м <sup>3</sup> |
|--------------|---------------------------|-------------------|-------------------------------|------|-------------------------|---------------------------------|
| ФС-728       | Зола от сжигания сорбента | 1700              | 2940                          | 30   | 190                     | 100                             |
| ИСМ-S        | Сорбент                   | 10000             | 500                           | 36   | 1110                    | 550                             |
| КУ-2-8       | Регенераты                | 10000             | 2500                          | 25   | 260                     | 130                             |

Примечание: S – степень наполнения компаунда сорбентом или регенератом; M<sub>компл.</sub> – масса цементного компаунда.

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

Проведены опытные испытания 4 вариантов мембранно-сорбционной схемы очистки. Переработано 330 м<sup>3</sup> реальных вод ТКВ. Все рассмотренные схемы обеспечивают необходимое качество очистки воды. Оптимальной технологией по результатам испытаний и технико-экономической оценки следует признать схему ультрафильтрация – обратный осмос – сорбция.

Согласно предварительным технико-экономическим оценкам себестоимость очищенной воды составит от 14 до 28 руб./м<sup>3</sup>, а стоимость установки производительностью 1 млн. м<sup>3</sup>/мес. составит от 40 до 50 млн. €. Стоимость установки может быть снижена примерно на 20 % в случае оптимизации режима работы обратного осмоса. Исследования по локализации вторичных радиоактивных отходов показали, что по предварительным оценкам для схемы ультрафильтрация – обратный осмос – ионный обмен количество цементного компаунда составит около 130 м<sup>3</sup>/год.

Планируется продолжение работ по оптимизации режимов работы отдельных узлов и схемы в целом, а также проведение полномасштабных ресурсных испытаний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Опытная проверка мембранно-сорбционной схемы переработки сточных вод спецканализации: Отчет / ФГУП "ПО "Маяк"; Исполн. О.М.Слюнчев, Д.Е.Резчиков, П.В. Козлов. – Инв. № ЦЛ/6788. – Озерск, 2003. – 66 с.
2. Опытная проверка мембранно-сорбционной схемы переработки сточных вод спецканализации: Отчет / ФГУП "ПО "Маяк"; Исполн. О.М. Слюнчев, П.В. Козлов. – Инв. № ЦЛ/7030. – Озерск, 2003. – 50 с.
3. Отработка технологии очистки жидких низкоактивных отходов мембранными и сорбционными методами на опытном стенде: Отчет / ФГУП "ПО "Маяк"; Исполн. О.М. Слюнчев, П.В. Козлов. – Инв. № 8165. – Озерск, 2006. – 59 с.
4. Судиловский П.С., Кичик В.А. Новый антискалант – эффективная защита от осадкообразования на мембранах в установках обратного осмоса // Вода и экология. – 2005. – № 3. – С. 55–59.
5. Изучение возможности применения антискалантов и комплексонов для очистки вод Теченского каскада водоемов: Отчет НИР / ООО "Гидротех"; Исполн. В.А. Кичик, П.С. Судиловский, А.В. Манакова. – Инв. № 8187. – Москва, 2006. – 56 с.
6. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы. – М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999. – 116 с.
7. Отчет по выполненным научно-исследовательским работам по теме "Разработка концептуальных технических решений станции водоочистки ТКВ. Расчет технико-экономических показателей процесса" / ЗАО "Энергокаскад"; Исполн. М.В. Минаев, О.Ф. Парилова. – М., 2006. – 74 с.
8. ГОСТ Р 51883–2002. Отходы радиоактивные цементированные. Общие технические требования.