

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСУШКИ И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ОТРАБОТАВШИХ ИОНООБМЕННЫХ СМОЛ БЕЗ ВКЛЮЧЕНИЯ В МАТРИЦУ ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ

В. Т. Сорокин<sup>1</sup>, Н. А. Прохоров<sup>1</sup>, Р. М. Гатауллин<sup>2</sup>, А. Н. Бабкин<sup>2</sup>,  
А. В. Березовский<sup>2</sup>, Д. И. Павлов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>АО «Атомэнергoproject», Санкт-Петербург

<sup>2</sup>АО «345 МЗ», Балашиха, Московская область

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский филиал АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» – «ВНИПИЭТ», Санкт-Петербург

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2022 г.

*В публикации [1] рассмотрены технические вопросы кондиционирования отработавших ионообменных смол (ОИОС) среднего и низкого уровня активности методом термовакуумной сушки с получением упаковок, отвечающих критериям приемлемости для захоронения в приповерхностных пунктах захоронения. Настоящая статья является продолжением публикации [1], в которой представлены результаты исследования процесса осушки ионообменных смол (ИОС) и предложения по оптимизации кондиционирования с использованием контейнеров НЗК-150-1,5П. Определены оптимальные параметры подготовки и кондиционирования осушенных смол для безопасного хранения и захоронения. Представлены расчеты допустимого внутреннего давления, при котором сохраняется прочность контейнера. Разработанная технология подготовки и кондиционирования ОИОС к захоронению может быть рекомендована для промышленного использования.*

**Ключевые слова:** отработавшие ионообменные смолы, сушка, железобетонный контейнер, захоронение, радиоактивные отходы.

### Введение

Несмотря на многочисленные исследования в области обращения с ОИОС, на сегодняшний день не существует готовых к тиражированию технологических установок для решения этой задачи.

В работе [2] рассмотрены технологии цементирования, битумизации, остекловывания, заключения в полимерные матрицы, глубокой дезактивации, термической переработки ОИОС, а также методы обращения, сочетающие вышеперечисленные способы переработки отработавших ионитов.

Краткий анализ исследуемых подходов обращения с ОИОС приведен ниже.

Методы глубокой дезактивации ОИОС, а также их растворения приводят к образованию жидких отходов, которые требуется отверждать одним из известных способов. Технологии, связанные с термическим разрушением их органической составляющей, требуют сложных систем газоочистки, в том числе и от канцерогенов, и, как правило, предусматривают отверждение зольных остатков. Включение ОИОС в матрицу (битум, цемент, полимер и др.) приводит к

существенному увеличению объема и соответствующему увеличению затрат на захоронение. Кроме того, для отвержденных отработавших смол отсутствуют системные исследования по безопасности длительного хранения и захоронения упаковок с ними, что могло бы обосновать необходимость включения их в битум, цементную или полимерную матрицу.

Осушка ОИОС центрифугированием или термовакуумной обработкой с получением твердого продукта с содержанием свободной влаги менее 3% является наиболее простым и экономичным способом подготовки смол к длительному хранению и захоронению, поскольку не требует матричного материала и не приводит к увеличению объема отходов.

Ранее в публикации [1] был представлен метод кондиционирования ОИОС путем термовакуумной сушки на опытно-демонстрационной установке производительностью 25 дм<sup>3</sup>/ч и размещения осушенной смолы в соответствующий классу отходов железобетонный или полимерный контейнер.

Было показано, что упаковки осушенных среднеактивных ОИОС на базе железобетонного контейнера НЗК-150-1,5П с металлической или полимерной вставкой отвечают современным критериям приемлемости отходов для захоронения в приповерхностных пунктах захоронения. Для хранения и захоронения осушенных низкоактивных ОИОС было рекомендовано использовать полимерные контейнеры, отвечающие требованиям к упаковкам 4 класса.

В числе вопросов, требующих дополнительных исследований, оставались проблемы сохранения прочности контейнера при возникновении внутреннего давления за счет набухания ОИОС в случае проникновения воды в упаковку.

### Исследования процесса термовакуумной сушки ОИОС

Отработавшие ионообменные смолы поступают на подготовку к кондиционированию в максимально набухшем состоянии. Задачей подготовки ОИОС к хранению и захоронению является их осушка до гарантированного содержания свободной влаги менее 3%.

Известно, что при уменьшении влажности смолы происходит снижение ее объема, а при повторном набухании он возвращается к исходным значениям. При нахождении смолы в ограниченном объеме контейнера может возникать избыточное давление набухшей смолы на стенки и крышку контейнера.

На опытно-демонстрационном стенде были исследованы плотность, удельный объем и кратность изменения объема смолы в зависимости от ее влажности, а также динамика изменения ее влажности в процессе сушки [3]. Результаты данных экспериментов представлены на рис. 1.

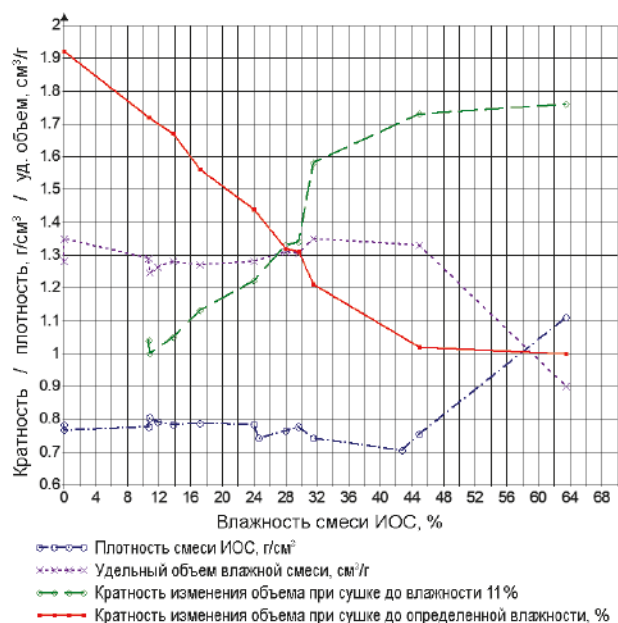


Рис. 1. Характеристики высушенной смеси ОИОС в зависимости от конечной влажности

Для испытаний применялись следующие материалы:

- анионит АВ-17х8чс (ГОСТ 20301-74) и катионит КУ-2х8чс (ГОСТ 20298-74);
- исходные иониты в Н<sup>+</sup> и ОН<sup>-</sup> формах. При проведении эксперимента иониты также переводились в солевую форму замачиванием на 24 часа в растворе 15 г/л Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>.

Для предлагаемой технологии сушки принято изначально, как обязательное условие, полное отсутствие газообразных (токсичных) отходов, поэтому максимальные температуры обращения с материалом не превышали 110 °С.

Исследования показывают, что максимальное уменьшение объемов ионитов без разрушения материала составляет 1,7–1,9 раз при их остаточной влажности от 0 до 12%.

Для определения динамики удаления воды из пульпы ОИОС был проведен специальный эксперимент. По результатам непосредственных измерений выполнены расчеты параметров, которые выполнялись по балансу воды и приведены в табл. 1. В них учтены имеющиеся потери воды с паром при работе вакуумного насоса в количестве 1,5 кг. Потери равномерно распределены на весь период его работы.

Таблица 1. Скорость удаления воды и влажность пульпы ОИОС в специальном эксперименте

Слив воды трансп.	Нагрев пульпы ИОС	Время с начала процесса, мин									
		30	45	75	120	180	240	300	360	420	480
0	30	45	75	120	180	240	300	360	420	480	540
Удалено воды из пульпы, кг											
28	0	0	22	29	34	37,5	41	43	45	47	47,5
Потери воды с паром, кг											
-	-	-	-	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5
Всего удалено воды, кг											
28	0	0	22	29,1	34,3	38	41,7	43,9	46,1	48,3	49,0
Осталось воды в пульпе, кг											
52,69	52,69	52,69	30,69	23,69	18,39	14,69	11	8,79	6,59	4,39	3,69
Текущая масса пульпы, кг											
85,91	85,91	85,91	63,91	56,81	51,61	47,91	44,21	42,01	39,81	37,61	36,91
Расчетная влажность пульпы, масс. %											
61,3	61,3	61,3	54	41,5	35,6	30,7	24,9	20,9	16,6	11,7	10

На рис. 2 показаны динамика удаления воды и текущая влажность пульпы ИОС в процессе термовакуумной сушки [3]. После слива 28 кг воды транспортирования (продолжительность слива — 30 минут) и нагрева пульпы за то же время, слито 22 кг межзерновой воды.

После начала вакуумирования процесс сушки выходит на экспоненциальный режим. Его эффективность зависит от равномерности прогрева пульпы нагревателями и от продолжительности процесса. Скорость удаления воды экспоненциально падает с 9,5 до 1 кг/ч.

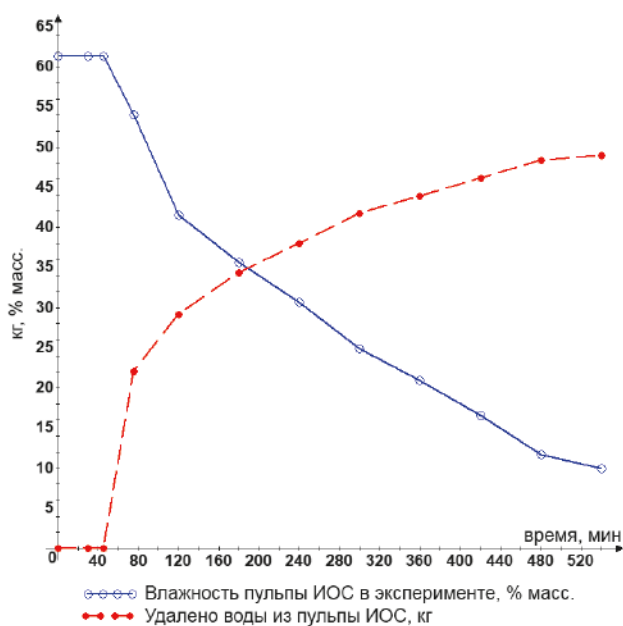


Рис. 2. Динамика удаления воды и текущая влажность пульпы ИОС в процессе термовакуумной сушки (после слива воды гидротранспорта), масс. %

Исследования на термовакуумной установке показали, что при принятом режиме осушки ОИОС от 2 до 3 часов начальная влажность с 61,3% уменьшается до 41,5% и 30,7% соответственно. Через 480 минут (8 часов) влажность пульпы ионитов достигает 12%, что достаточно для осуществления эффективной выгрузки самотеком и удовлетворяет критериям приемлемости радиоактивных отходов для захоронения.

Важно отметить, что невысокая скорость сушки позволяет легко управлять процессом и получать смолу в заданном диапазоне влажности.

Полученные результаты соответствуют данной установке, и при использовании сушилки другой конструкции, а также иных способов и условий нагрева кинетика процесса может измениться.

Важными итогами проведенных исследований являются подтверждение эффективности процесса термовакуумной сушки, получение экспериментальных данных на практически промышленной установке, определение зависимостей, которые могут быть использованы при работе на других установках.

### Кондиционирование осушенных ОИОС

Для кондиционирования среднеактивных ОИОС (класс 3) необходимо использовать железобетонный контейнер типа НЗК-150-1,5П с металлической или полимерной вставкой (рис. 3).

Для кондиционирования низкоактивных ОИОС (класс 4) целесообразно использовать металлический контейнер КРАД-1,36 или полимерный контейнер КПС-1,4 (рис. 4).



Рис. 3. Контейнер НЗК-150-1,5П и вкладыши: слева – металлический типа СМ-1,3, справа – полимерный типа ВПС-1,3 (подлежит разработке)



Рис. 4. Контейнеры для низкоактивных ОИОС: слева – контейнер КРАД-1,36; справа – контейнер КПС-1,4 (подлежит разработке)

Для исключения чрезмерного внутреннего давления за счет набухания ОИОС при возможном проникновении воды в контейнеры необходимо определить оптимальный объем смолы, учитывающий влажность и коэффициент набухания.

В табл. 2 представлен объем ОИОС с различной влажностью, размещаемый в металлический вкладыш контейнера НЗК-150-1,5П, при котором с учетом набухания габариты смолы не превысят размеры вкладыша, что исключит возникновение избыточного давления.

Так, для контейнера НЗК-150-1,5П с металлической вставкой объемом  $1,3 \text{ м}^3$  количество

**Таблица 2. Объем осушенной смолы в зависимости от влажности и коэффициента набухания**

Полный объем НЗК с вкладышем, $\text{м}^3$	Влажность ОИОС, %	Коэффициент набухания	Объем ОИОС в НЗК с вкладышем, $\text{м}^3$	Коэффициент заполнения НЗК, %
1,3	20	1,50	0,87	0,67
1,3	25	1,42	0,92	0,71
1,3	30	1,30	1,00	0,77
1,3	40	1,10	1,18	0,91
1,3	45	1,02	1,27	0,98

осушенной смолы с влажностью 40% и коэффициентом набухания 1,1, принятым по данным графика (рис. 1), должно быть равно  $1,18 \text{ м}^3$ . Для смол с другой влажностью объем засыпаемой в контейнер осушенной смолы представлен в табл. 2.

Анализ табл. 2 позволяет сделать вывод о том, что наиболее оптимальная влажность осушенной ОИОС составляет 40%. При этом исключаются затраты на пересушку, достигается оптимальное заполнение объема контейнера ( $K_3 = 0,91$ ) и обеспечивается необходимая сыпучесть смолы для заполнения НЗК.

### Прочность контейнера при внутреннем давлении ОИОС

Известно, что для ионообменных смол с влажностью 20% (массовых) давление набухания в замкнутом пространстве составляет  $0,57 \text{ МПа}$  [4].

При незначительных отклонениях от оптимальных параметров сушки и кондиционирования ОИОС, описанных выше, возможно возникновение незначительного избыточного давления. Рассчитаем допустимое внутреннее давление на контейнер НЗК-150-1,5П.

Контейнер (рис. 5) состоит из армированного корпуса и крышки с пробкой. Шов между корпусом и крышкой заполняется герметизирующей смесью. Отверстие в крышке с пробкой заполняется герметизирующей смесью.

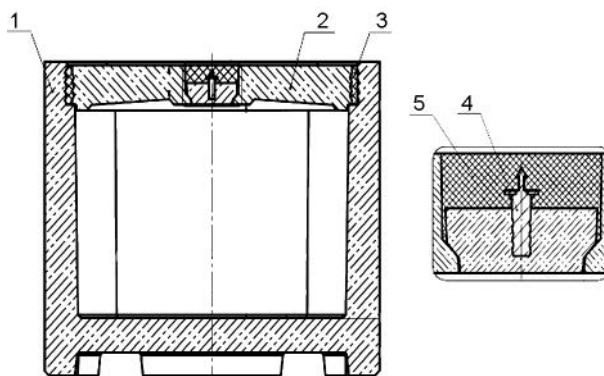


Рис. 5. Общий вид контейнера (вид в разрезе): 1 – корпус контейнера; 2 – крышка; 3 – герметизирующая смесь; 4 – пробка; 5 – герметизирующая смесь пробки

Основной конструкционный материал контейнера – тяжелый бетон класса В50 (М650), ГОСТ 10178-85. Материал арматуры – сталь арматурная 8-А-III ГОСТ 5781-82 или А500С (ГОСТ 34028 или ТУ 14-1-5580-2009). Материал швов – смесь для герметизации ТУ 5745-001-07630224-2019.

Контейнер относится к классу безопасности 3 по НП-001-15. Классификационное обозначение – 3Н. Климатическое исполнение



и категория размещения при эксплуатации — УХЛ-3, тип атмосферы — II по ГОСТ 15150-69.

При отрицательной температуре значения пределов прочности и текучести для материалов контейнера выше, чем при нормальных условиях, а с ее увеличением они уменьшаются. В связи с этим в качестве расчетной принята максимальная температура +70 °С, при которой прочностные характеристики материалов контейнера будут минимальными.

### Механические характеристики материалов и допускаемые напряжения

Оценка прочности в настоящем расчете для конструкции контейнера выполнена по допускаемым напряжениям: для бетона — по максимальным главным напряжениям сжатия, для арматуры — по нормальным напряжениям растяжения-сжатия в сечениях, для герметизирующего шва — по напряжениям сжатия и изгиба.

Допускаемое напряжение сжатия  $[\sigma]$  для герметизирующей смеси контейнера определяется по формуле:

$$[\sigma] = R_c / n = 38, \quad (1)$$

где  $R_c$  — проектная прочность смеси на сжатие, МПа;  $R_c = 50$  (в возрасте 28 суток согласно ТУ 5745-001-07630224-2019);  $n$  — коэффициент запаса прочности ( $n = 1,3$  по СП 63.13330.2012).

Допускаемое напряжение изгиба  $[\sigma]_{и}$ , МПа, для герметизирующей смеси контейнера определяется по формуле:

$$[\sigma]_{и} = R_{и} / n = 6,9, \quad (2)$$

где  $R_{и}$  — проектная прочность смеси на изгиб, МПа, ( $R_{и} = 9$  в возрасте 28 суток согласно ТУ 5745-001-07630224-2019).

Физико-механические свойства бетона В50 (М650) в конструкции контейнера приведены в табл. 3.

Таблица 3. Физико-механические свойства бетона

Характеристика	Значение
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	2450
Модуль упругости $E$ , Па	42·10 <sup>9</sup>
Коэффициент Пуассона $\nu$	0,2
Предел прочности при сжатии $R_c$ , МПа, не менее	50
Допускаемое напряжение сжатия $[\sigma]$ для тяжелого бетона В50 согласно СП 63.13330.2012, МПа	36

Оценка прочности металлической арматуры НЗК в настоящем расчете выполнена в соответствии с требованиями норм ПНАЭ Г-7-002-86 по допускаемым напряжениям. Номинальное

допускаемое напряжение  $[\sigma]$  для материала арматуры при расчетной температуре определяется как минимальное из двух величин:

$$[\sigma] = \min\{R_m^T / n_m, R_{p0,2}^T / n_{0,2}\} \quad (3)$$

где  $R_m^T$  — минимальное значение временного сопротивления, МПа;  $R_{p0,2}^T$  — минимальное значение предела текучести, МПа;  $n_m$  — коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению;  $n_{0,2}$  — коэффициент запаса прочности по пределу текучести.

В соответствии с ПНАЭ Г-7-002-86 принято  $n_m = 2,6$ ;  $n_{0,2} = 1,5$ .

Условия прочности выполняются, если приведенные напряжения, определяемые по суммам составляющих общих или местных мембранных и общих изгибных напряжений, не превышают допускаемые.

Физико-механические характеристики материала арматуры при расчетной температуре и величины допускаемых напряжений приведены в табл. 4, где  $E$  — модуль упругости, МПа.

Таблица 4. Характеристики применяемой стали

Марка стали	$E \cdot 10^{-5}$ , МПа	$R_m$ , МПа	$R_{p0,2}$ , МПа	$[\sigma]$ , МПа
Сталь 8-A-III ГОСТ 5781-82	2,1	400	250	153

### Определение допустимого внутреннего давления из условий прочности контейнера

Допустимое давление  $P_{\max}$  определяется из условия, что максимальные расчетные напряжения в элементах конструкции (корпус, крышка, армокаркас, швы) не превышают возможные значения для соответствующих материалов (бетон, сталь, герметизирующая смесь).

Расчетная аналитическая оценка прочности герметизирующего шва в зависимости от величины внутреннего давления

Прочность герметизирующего шва может быть оценена по упрощенной схеме для квадратной плиты, защемленной по всем сторонам и нагруженной расчетным давлением  $P$ . Максимальные изгибные напряжения  $\sigma_{и}$  в этом случае реализуются на контуре плиты в серединах сторон и равны [5]:

$$\sigma_{и} = 0,308 \cdot P \cdot (a/h)^2, \quad (4)$$

где  $P$  — расчетное давление, МПа;  $h$  — толщина пластины (плиты), мм,  $h = 175$ ;  $a$  — длина стороны пластины (плиты), мм,  $a = 1380$ .

Результаты расчета изгибных напряжений в герметизирующем шве, выполненного по упрощенной схеме, в зависимости от величины внутреннего давления показаны на рис. 6.

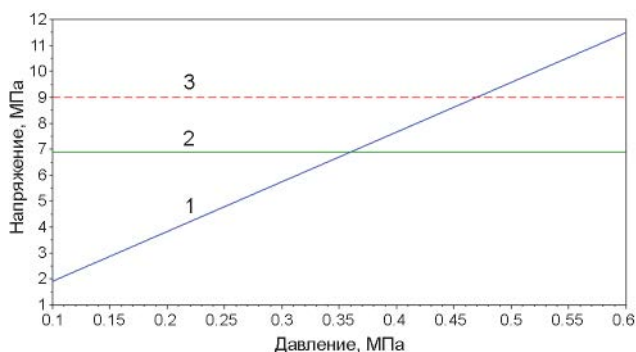


Рис. 6. Расчетные изгибные напряжения в герметизирующем шве в зависимости от величины внутреннего давления: 1 – изгибные напряжения в герметизирующем шве по формуле (6); 2 – допустимые изгибные напряжения в материале шва (с коэффициентом запаса 1,3); 3 – проектная прочность материала шва на изгиб

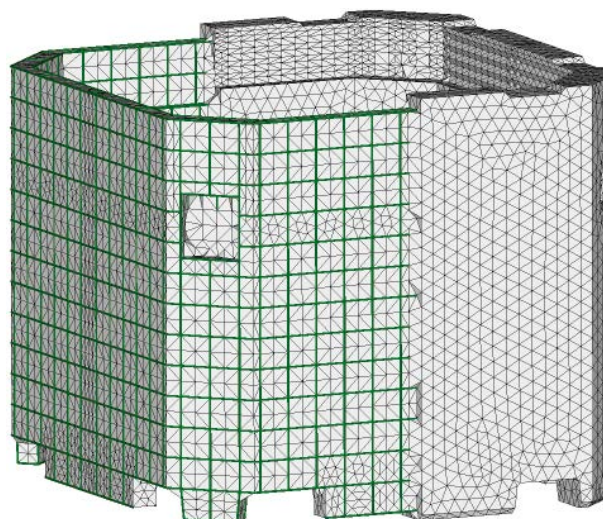


Рис. 7. Расчетная КЭ модель корпуса с арматурой (часть стенок не показана)

Как следует из результатов расчета, допустимое давление по условиям прочности герметизирующего шва составляет  $P \approx 0,36$  МПа.

Приближенная оценка не учитывает изменение толщины крышки, ее армирование, срезы углов и другие особенности конструкции и является расчетной снизу.

Уточненный расчет допустимого давления проводится методом конечных элементов с воспроизведением геометрии и особенностей конструкции НЗК.

*Расчет прочности контейнера в зависимости от величины внутреннего давления методом конечных элементов*

Допустимое давление из условий прочности контейнера определяется следующим образом:

$$P_{\max} = \min \left\{ \frac{[\sigma]_j}{\sigma_{\max j}} \right\} \cdot P, \quad (5)$$

где  $P$  – расчетное давление, МПа, ( $P=0,5$ );  $\sigma_{\max j}$  – максимальное напряжение в  $j$ -м элементе конструкции при действии расчетного давления  $P$ , МПа;  $[\sigma]_j$  – допускаемое напряжение для  $j$ -го элемента конструкции, МПа.

Поверочный расчет контейнера на действие внутреннего избыточного давления  $P=0,5$  МПа выполнен методом конечных элементов [6, 7] с помощью программного комплекса «Зенит-95» [8]. Трехмерная модель контейнера создана согласно сборочному чертежу АТ-15-00.00.00.000-02 СБ (рис. 7).

Расчетная модель конструкции НЗК состоит из набора конечных элементов (КЭ), связанных между собой в узлах. Система всех взаимосвязанных узлов образует сетку, отражающую геометрический образ силовой расчетной схемы

исследуемой конструкции. Геометрия модели задается координатами узлов.

Корпус, крышка, пробка и герметизирующие швы контейнера НЗК промоделированы объемными твердотельными элементами, узлы которых обладают тремя поступательными степенями свободы, арматура корпуса и крышки – стержневыми элементами. Для расчета принято граничное условие: запрет вертикальных перемещений в основании опор контейнера.

Результаты поверочного расчета контейнера на действие собственного веса и внутреннего избыточного давления  $P=0,5$  МПа показаны на рис. 8–10 в виде распределения напряжений в элементах конструкции, а прочности элементов конструкции контейнера приведены в табл. 5.

На основании табл. 5 допустимое давление по условиям прочности контейнера в соответствии с формулой (5) составляет 0,42 МПа (4,2 атм.)

**Таблица 5. Результаты расчета прочности при действии внутреннего избыточного давления  $P=0,5$  МПа**

Элемент конструкции	Расчетная величина напряжений, МПа	Допускаемая величина напряжений, МПа	Коэффициент запаса по допускаемым напряжениям
Корпус	23	36	1,56
Крышка	42	36	0,85
Арматура	107	153	1,43
Герметизация пробки	22	38	1,72
Герметизирующий шов корпуса	6,1	6,9	1,13

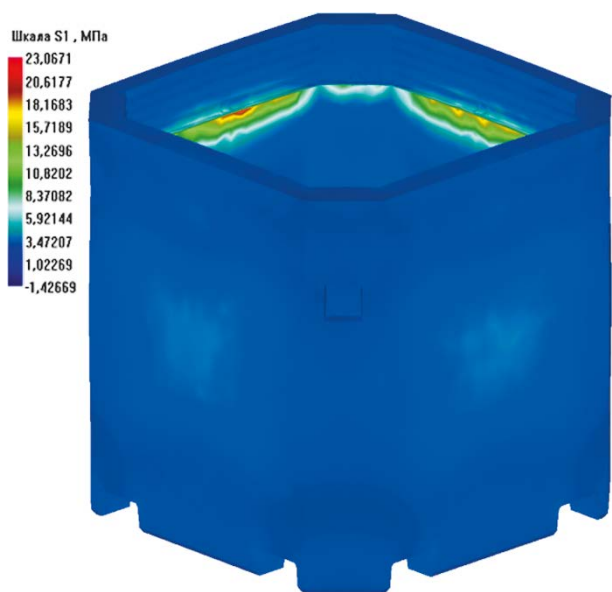


Рис. 8. Распределение максимальных главных напряжений  $\sigma_1$  в корпусе



Рис. 9. Распределение максимальных главных напряжений  $\sigma_1$  в герметизированной пробке

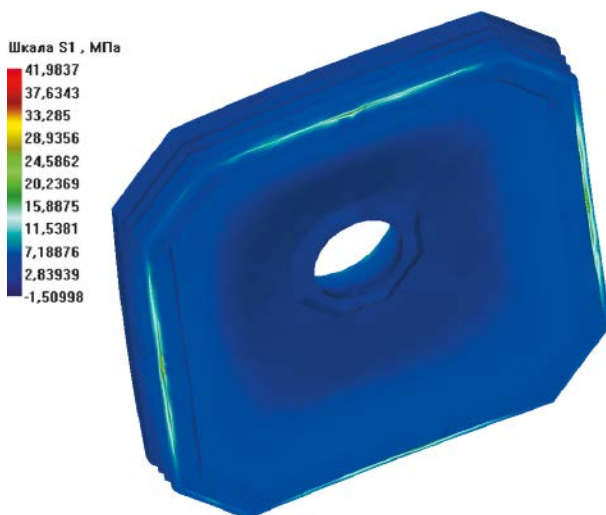


Рис. 10. Распределение максимальных главных напряжений  $\sigma_1$  в крышке

#### Поверочный расчет прочности контейнера при допустимом давлении

Результаты расчета прочности элементов конструкции контейнера при действии внутреннего

избыточного давления  $P_{\max} = 0,42$  МПа приведены в табл. 6 и подтверждают его прочность.

**Таблица 6. Результаты расчета прочности при действии внутреннего избыточного давления  $P_{\max} = 0,42$  МПа**

Элемент конструкции	Расчетная величина напряжений, МПа	Допускаемая величина напряжений, МПа	Коэффициент запаса по допускаемым напряжениям
Корпус	19	36	1,89
Крышка	35	36	1,02
Арматура	91	153	1,68
Герметизация пробки	19	38	2,00
Герметизирующий шов корпуса	5,2	6,9	1,32

#### Обсуждение результатов и выводы

Определение оптимальных условий осушки и кондиционирования ОИОС было проведено на опытно-демонстрационной установке по производительности отвечающей потребности одноплодной АЭС с РУ ВВЭР-1200.

Данные исследования показали, что наиболее оптимальная влажность осушенной ОИОС должна составлять 40%. При этом исключаются затраты на пересушку, достигается оптимальное заполнение объема контейнера и обеспечивается необходимая сыпучесть смолы для заполнения НЗК.

Для кондиционирования ОИОС 3 класса необходимо использовать железобетонные контейнеры НЗК-150-1,5П с вкладышем СМ 1,3 (исполнение АТ-9-00.00.00.000.01) или НЗК-150-1,5П (В) с вкладышем (исполнение АТ-4-00.00.000.01) [9].

Объем осушенной ОИОС, засыпаемой в контейнер с вкладышем, должен составлять 1,18 м<sup>3</sup>. При таких параметрах и в условиях заполнения контейнеров, даже при полном набухании ОИОС, ее объем не превысит объема вкладыша, то есть исключается возникновение избыточного внутреннего давления на стенки и крышку контейнера.

Выполненные расчеты показали, что контейнер НЗК-150-1,5П сохраняет прочность и герметичность при действии внутреннего избыточного давления  $P_{\max} = 0,42$  МПа.

Полученные результаты исследований с учетом анализа соответствия упаковок ОИОС требованиям безопасности, рассмотренным в публикации [1], показывают, что упаковки с осушенной смолой, подготовленные по разработанной технологии, отвечают всем требованиям нормативных документов.



Это позволяет сделать вывод, что технология кондиционирования и подготовки к захоронению ОИОС методом термовакуумной сушки с получением продукта с внутризерновой влажностью 40% и размещением осушенной смолы в контейнер НЗК-150-1,5П с металлической вставкой в количестве 1,18 м<sup>3</sup> может быть рекомендована для промышленного использования на АЭС.

### Литература

1. Сорокин В. Т., Прохоров Н. А., Павлов Д. И. Технология кондиционирования отработавших ионообменных смол методом термовакуумной сушки // Радиоактивные отходы. 2021. № 2 (15). С. 39–48. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-39-48.
2. Смольников М. И., Марков В. Ф., Маскаева Л. Н. и др. Проблемы утилизации отработанных ионообменных смол атомных электростанций: обзор / Интернет-конференция «Бутлеровские чтения». — URL: <http://butlerov.com/readings/> (дата обращения 01.02.2022).
3. Создание демонстрационного образца установки для термовакуумной сушки отработавших ионообменных смол. Инвестиционный проект 0.24. Этап 1 календарного плана 2016 года.

Проведение испытаний установки, отработка режимов эксплуатации : Отчет о НИР / АО «АТОМ-ПРОЕКТ»; рук. Прохоров Н. А. — Санкт-Петербург, 2016. 106 с. Инв. № 16-02555.

4. Осташкина Е. Е., Савкин А. Е., Слатенников Ю. Т., Суменко А. В. Опытное-промышленное кондиционирование отработавших ионообменных смол // Сборник докладов четвертого научно-технического семинара «Проблемы переработки и кондиционирования радиоактивных отходов». — Санкт-Петербург, Свое издательство, 2021. 110 с.
5. Калманок А. С. Расчет пластинок. Справочное пособие. — М. : Госстройиздат, 1959. 212 с.
6. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М. : Мир, 1975. 271 с.
7. Бате К., Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. — М. : Стройиздат, 1982. 448 с.
8. Программа расчета конструкций методом конечных элементов «Зенит-95». Версия 6.6.16.5. Руководство пользователя. Основные алгоритмы. Библиотека элементов. Подготовка исходных данных. НТП «ДИП», Санкт-Петербург, 2018.
9. Оборудование для обращения с радиоактивными отходами на предприятиях ГК «Росатом». Каталог АО «345 МЗ». 2021.

---

### Информация об авторах

Сорокин Валерий Трофимович, доктор технических наук, главный технолог, АО «Атомэнергопроект» (197183, Санкт-Петербург, ул. Савушкина, д. 82, лит. А), e-mail: vsorokin@atomproekt.com.

Прохоров Николай Александрович, кандидат технических наук, начальник отдела, АО «Атомэнергопроект» (197183, Санкт-Петербург, ул. Савушкина, д. 82, лит. А), e-mail: prokhorov@atomproekt.com.

Гатауллин Рустам Мухтарович, доктор технических наук, генеральный директор, АО «345 МЗ» (143900, Московская обл., Балашиха, Западная промзона, ш. Энтузиастов, д. 7), e-mail: mail@345mz.ru.

Бабкин Алексей Николаевич, начальник отдела, АО «345 МЗ» (143900, Московская обл., Балашиха, Западная промзона, ш. Энтузиастов, д. 7), e-mail: mail@345mz.ru.

Березовский Андрей Валерьевич, кандидат технических наук, главный специалист, АО «345 МЗ» (143900, Московская обл., Балашиха, Западная промзона, ш. Энтузиастов, д. 7), e-mail: mail@345mz.ru.

Павлов Дмитрий Игоревич, начальник технологического отдела по обращению с РАО, Санкт-Петербургский филиал АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» — «ВНИПИЭТ» (197183, Санкт-Петербург, ул. Дибуновская, д. 55), e-mail: dipavlov@eleron.ru.

### Библиографическое описание статьи

Сорокин В. Т., Прохоров Н. А., Гатауллин Р. М., Бабкин А. Н., Березовский А. В., Павлов Д. И. Исследование сушки и оптимизация кондиционирования отработавших ионообменных смол без включения в матрицу для захоронения // Радиоактивные отходы. 2022. № 2 (19). С. 25–34. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-25-34.



## STUDY ON SPENT ION EXCHANGE RESIN DRYING AND OPTIMIZATION OF ITS CONDITIONING PROCESS WITH NO INCLUSION INTO THE DISPOSAL MATRIX

Sorokin V. T.<sup>1</sup>, Prohorov N. A.<sup>1</sup>, Gataullin R. M.<sup>2</sup>, Babkin A. N.<sup>2</sup>, Berezovskiy A. V.<sup>2</sup>, Pavlov D. I.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>JSC Atomenergoproekt, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>JSC “345 MZ”, Balashikha, Moscow region, Russia

<sup>3</sup>Saint-Petersburg branch of JSC FCS&HT “SNPO “Eleron” – “VNIPIET”, Saint-Petersburg, Russia

Article received on February 24, 2022

The publication [1] discusses technical issues faced during the conditioning of intermediate- and low-level spent ion exchange resins by thermal vacuum drying to obtain packages that would meet waste acceptability criteria for near-surface disposal facilities. This article is a continuation of another publication [1] which elaborated on a study of ion-exchange resin drying process and provided some proposals on the conditioning optimization using NZK-150-1.5 P containers. It specifies optimal parameters for the pre-disposal treatment and conditioning of dried resins providing their safe storage and disposal. The study presents calculated permissible internal pressure providing adequate strength of the containers. The proposed pre-disposal ion exchange resin treatment and conditioning method can be recommended for industrial use.

**Keywords:** spent ion exchange resins, drying, reinforced concrete container, disposal, radioactive waste.

### References

1. Sorokin V. T., Prohorov N. A., Pavlov D. I. Tekhnologiya kondicionirovaniya otrabotavshih ionoobmennyyh smol metodom termovakuumnoy sushki [Spent Ion Exchange Resin Conditioning Technology Based on Thermal Vacuum Drying Method]. *Radioaktivnye otkhody – Radioactive Waste*, 2021, no. 2 (15), pp. 39–48. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-39-48.
2. Smol'nikov M. I., Markov V. F., Maskaeva L. N. et al. Problemy utilizatsii otrabotannykh ionoobmennyyh smol atomnykh elektrostancij: obzor. Internet-konferenciya “Butlerovskie chteniya” [Challenges associated with the disposition of spent ion-exchange resins from nuclear power plants: review. Internet Conference Butlerov Readings]. — URL: <http://butlerov.com/readings/> (accessed on 01.02.2022).
3. Sozdanie demonstracionnogo obrazca ustanovki dlya termovakuumnoy sushki otrabotavshih ionoobmennyyh smol. Investicionnyj proekt 0.24. Etap 1 kalendar'nogo plana 2016 goda. Provedenie ispytaniy ustanovki, obrabotka rezhimov ekspluatatsii : otchet o NIR / AO “ATOMPROEKT” [Development of a demonstration thermal vacuum drying unit for spent ion-exchange resins. Investment project 0.24. Stage 1 of the calendar plan 2016. Testing the installation, testing operating modes: R&D report / JSC ATOMPROEKT]; responsible officer Prohorov N. A. — Saint-Petersburg, 2016. 106 p.
4. Ostashkina E. E., Savkin A. E., Slastennikov Yu. T., Sumenko A. V. Opytno-promyshlennoe kondicionirovanie otrabotavshih ionoobmennyyh smol [Pilot-industrial conditioning of spent ion-exchange resins]. Sbornik dokladov chetvertogo nauchno-tekhnicheskogo seminar’a “Problemy pererabotki i kondicionirovaniya radioaktivnykh otkhodov” [Proceedings of the fourth scientific and technical seminar Problems of Radioactive Waste Processing and Conditioning]. — Saint-Petersburg, Svoe izdatel'stvo Publ., 2021. 110 p.
5. Kalmanok A. S. Raschet plastinok. Spravochnoe posobie [Plate calculation. Reference Manual]. Moscow, Gosstroizdat Publ., 1959. 212 p.
6. Zienkiewicz O. C. Metod konechnyyh elementov v tekhnike [Finite element method in engineering science]. Moscow, Mir Publ., 1975. 271 p.
7. Bathe K., Wilson E. Chislennyye metody analiza i metod konechnyyh elementov [Numerical methods in finite element analysis]. Moscow, Strojizdat Publ., 1982. 448 p.
8. Programma rascheta konstrukcij metodom konechnyyh elementov “Zenit-95”. Versiya 6.6.16.5. Rukovodstvo pol'zovatelya. Osnovnyye algoritmy. Biblioteka elementov. Podgotovka iskhodnykh dannykh. NTP “DIP” [Program for the calculation of structures by the finite element method Zenit-95. Version 6.6.16.5. User guide. Basic algorithms. Library of elements. Preparation of initial data. NTP DIP], Saint-Petersburg, 2018.
9. Oborudovanie dlya obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami na predpriyatiyah GK “Rosatom” [Equipment for radioactive waste management at the enterprises of the State Corporation Rosatom]. Catalogue JSC 345 MZ, 2021.

### Information about the authors

*Sorokin Valery Trofimovich*, Ph.D, Chief Technology, JSC Atomenergoproekt (82-A, Savushkina st., Saint-Petersburg, 197183, Russia), e-mail: vsorokin@atomproekt.com.

*Prohorov Nikolai Alexandrovich*, Ph.D, Head of the Department of Chemical Technologies, JSC Atomenergoproekt (82-A, Savushkina st., Saint-Petersburg, 197183, Russia), e-mail: prokhorov@atomproekt.com.

*Gataullin Rustam Muhtarovich*, Ph.D, general director, JSC “345 MZ” (7, Enthusiasts road, Western industrial zone, Balashikha, Moscow region, 143900, Russia), e-mail: mail@345mz.ru.

*Babkin Aleksey Nikolaevich*, Head of Department, JSC “345 MZ” (7, Enthusiasts road, Western industrial zone, Balashikha, Moscow region, 143900, Russia), e-mail: mail@345mz.ru.

*Berezovskiy Andreiy Valer'evich*, Ph.D, chief specialist, JSC “345 MZ” (7, Enthusiasts road, Western industrial zone, Balashikha, Moscow region, 143900, Russia), e-mail: mail@345mz.ru.

*Pavlov Dmitriy Igorevich*, Head of radioactive waste management department, Saint-Petersburg branch of JSC FCS&HT “SNPO “Eleron” – “VNIPIET” (55, Dibunovskaya st., Saint-Petersburg, 197183, Russia), e-mail: dipavlov@eleron.ru.

### Bibliographic description

Sorokin V. T., Prohorov N. A., Gataullin R. M., Babkin A. N., Berezovskiy A. V., Pavlov D. I. Study on Spent Ion Exchange Resin Drying and Optimization of Its Conditioning Process with No Inclusion into the Disposal Matrix. *Radioactive Waste*, 2022, no. 2 (19), pp. 25–34. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-25-34. (In Russian).