

Разработка технологии защиты подземных вод от ^{137}Cs на территории реакторной установки БН-350

© К. Ж. Буленова^а, Е. Н. Панова^а, П. А. Блынский^{а*}, И. Л. Яковлев^б, К. А. Жаксыбекова^б

^а Институт высоких технологий, Казахстан, Алматы, ул. Богенбай-батыра, д. 168, * e-mail: p.blynskiy@iht.kz

^б ТОО «МАЭК-Казатомпром», Казахстан, Актау, промзона, а/я 248

^б Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, Алматы, пр. аль-Фараби, д. 71

Получено 15.03.2017

УДК 546.36

Исследованы сорбционные свойства клиноптилолита Чанканайского месторождения по отношению к ^{137}Cs из грунтовых вод и жидких радиоактивных отходов реакторной установки БН-350 на территории ТОО «МАЭК-Казатомпром» в Казахстане. Результаты опытно-промышленных испытаний демонстрируют эффективность применения клиноптилолита в качестве реактивного материала геохимического барьера для предотвращения миграции радионуклидов в грунтовые воды при протечках емкостей хранения жидких радиоактивных отходов. Предложена конструкция геохимического барьера.

Ключевые слова: радиоактивность, жидкие радиоактивные отходы, клиноптилолит, цезий, геохимический барьер, сорбция.

Деятельность, связанная с функционированием и выводом из эксплуатации радиационно-опасных объектов, влияет на безопасность жизни людей, их последующих поколений и сохранность окружающей среды. Одним из значимых радиационно-опасных объектов Казахстана является реакторная установка БН-350 (далее – РУ БН-350), расположенная на территории ТОО «МАЭК-Казатомпром». В процессе функционирования и вывода из эксплуатации РУ БН-350 были наработаны жидкие радиоактивные отходы (ЖРО), хранящиеся в специальных резервуарах в здании 157 (хранилище жидких радиоактивных отходов, далее – ХЖРО). Общий объем ЖРО превышает 3000 м^3 . Основной вклад в активность ЖРО вносит ^{137}Cs .

В настоящее время амортизационный срок службы материалов, из которых изготовлены резервуары в ХЖРО, исчерпан, что обуславливает достаточно высокую вероятность их разгерметизации и попадания искусственных радионуклидов в грунтовые воды, создавая угрозу загрязнения Каспийского моря.

Одним из эффективных способов предотвращения миграции радионуклидов в окружающую среду является применение природных сорбционных материалов, характеризующихся высокой селективностью к радионуклидам. Подтверждением этому является всемирная практика использования проницаемых геохимических барьеров (далее – ГХБ) [1, 2]. ГХБ представляют собой траншеи, вырытые перпендикулярно потоку подземной или грунтовой воды, заполненные подходящим проницаемым реактивным материалом. Загрязненная грунтовая вода протекает через реактивную среду, в которой происходит ее обработка, при этом резко уменьшается интенсивность миграции токсичных или радиоактивных компонентов. Барьеры остаются проницаемыми для воды и ее природных компонентов, т.е. в них

искусственным образом воспроизводятся или дополняются природные защитные процессы. Создание ГХБ относится к группе пассивных способов защиты природной среды и может быть значительно дешевле и эффективнее, чем другие известные способы [3, 4].

Ключевыми этапами, определяющими эффективность создания ГХБ, являются подбор реактивных материалов, исследование их физико-химических свойств (в том числе сорбционных), оценка защитного действия.

В литературе описаны различные типы реактивных материалов, используемых в барьерах [1, 2, 5], в том числе природные и модифицированные цеолиты, для удаления загрязнителей различной природы [6, 7], включая долгоживущие опасные (токсичные) радиоактивные изотопы – ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{226}Ra [8].

Нами [9] были исследованы фазовый и химический составы клиноптилолитсодержащего туфа Чанканайского месторождения (далее – КЛТ) и его аммонийной формы, а также определена полная катионообменная емкость (ПКОЕ) для различных фракций КЛТ. Согласно работе [9], фракции КЛТ, содержащие большее количество собственно клиноптилолита (37.7–40.6%), имеют более высокую обменную емкость.

По результатам ранее проведенных исследований [10] ион Cs^+ хорошо сорбируется из растворов различной минерализации как на природном, так и на активированном ионом аммония КЛТ. Его коэффициенты распределения изменяются в интервале от $2 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^4$ мл/г в зависимости от минерализации раствора, причем на природном КЛТ коэффициенты распределения цезия несколько выше, чем на аммонийной форме.

В исследованиях, проведенных ГЕОХИ РАН

Таблица 1. Химический состав грунтовой воды из скважины N 25

Компонент, показатель	Содержание в 1 л		Компонент, показатель	Содержание в 1 л	
	мг	мг-экв		мг	мг-экв
Катионы			СО ₂ свободная	–	–
NH ₄ ⁺	6.15	0.34	СО ₂ агрессивная	Отсутствует	Отсутствует
Na ⁺ + K ⁺	3203.48	114.44	Жесткость общая	1400.0	70.0
Ca ²⁺ + Mg ²⁺	1400.0	70.0	Жесткость карбонатная	153.0	2.55
Fe ²⁺	0.04	0.001	Окисляемость перманганатная	–	–
Σкатионов	4609.67	184.78	Фенолы	–	–
Анионы			Нефтепродукты	–	–
Cl [–]	4342.63	122.5	Сероводород H ₂ S	Отсутствует	Отсутствует
SO ₄ ^{2–}	2515.7	52.41	pH	6.1	6.1
HCO ₃ [–]	306.0	5.02	Прочие ионы		
CO ₃ ^{2–}	153.0	2.55	F [–]	–	–
NO ₃ [–]	142.8	2.3	PO ₄ ^{3–}	–	–
Σанионов	7460.13	184.78	Cu ²⁺	–	–
Σкатионов и анионов	14920.26	369.56	Zn ²⁺	–	–
Сухой остаток	16745.0		Pb ²⁺	–	–

им. В. И. Вернадского [11], была также построена физическая и математическая модель сорбции цезия на КЛТ, основой для которой послужили экспериментальные данные (изотермы обмена и выходные кривые). Установлено, что кинетика процесса определяется внешней диффузией. Было подсчитано, что при скорости движения грунтовых вод на территории ХЖРО, равной $2 \cdot 10^{-4}$ м/сут, и активности цезия 6000 Бк/л фильтр из КЛТ толщиной 2 мм будет работать более 50 лет.

В данной работе представлены результаты лабораторных исследований сорбционной способности природной формы КЛТ при извлечении цезия из реальных растворов – грунтовой воды и растворов ЖРО. Приведены также результаты опытно-промышленных испытаний КЛТ как реактивного материала ГХБ. Образцы КЛТ были предоставлены ТОО «Таза Су» (Алматы).

Экспериментальная часть

Лабораторные исследования сорбционной способности КЛТ на реальных растворах

Для исследования сорбции ¹³⁷Cs был взят образец КЛТ фракции 0.5–1.0 мм, имеющий следующий минеральный состав:

Компонент	Содержание, %
Клиноптилолит	40.6
Нонтронит	16.8
Альбит	12.3
Кварц	10.1
Авгит	8.1
Ломонтит	7.2
Карбонат кальция	4.2
Винчит	0.7

Пробу грунтовой воды (табл. 1) отбирали из расположенной рядом с ХЖРО пьезометрической сква-

жины N 25, в которой на протяжении ряда лет устойчиво фиксируется повышенная β-активность на уровне 5000–6000 Бк/л. Пробу ЖРО (табл. 2) отбирали из емкости хранения N Б-02/3. Дополнительно были приготовлены модельные растворы при соотношениях объемов ЖРО и грунтовой воды 1 : 10 и 1 : 100. Данные растворы моделируют возможные варианты разбавления ЖРО при попадании их в грунтовые воды.

Исследование сорбции ¹³⁷Cs на КЛТ проводили в динамических условиях. Перед началом опыта в нижнюю часть стеклянной колонки помещали стекловату, наливали дистиллированную воду, засыпали КЛТ, который предварительно 3 ч находился в дистиллированной воде, пропускали воду для уплотнения слоя КЛТ, затем спускали воду над сорбентом до его уровня.

Исходный раствор из большой бутылки подавали через шланг напрямую в колонку. Скорость регулировали с помощью крана. Исходя из геометрических размеров колонки и фильтрующей способности КЛТ была задана объемная скорость фильтрации для грунтовой воды 1.8, для модельных растворов 4.5 см³/мин. При смене приемной тары (через каждые 2 ч) измеряли отклонения от заданной величины и регулировали скорость подачи раствора с помощью крана. Раствор, прошедший через колонку в течение каждых 2 ч эксперимента, собирали в отдельную емкость, измеряли объем и удельную активность.

Опытно-промышленные испытания КЛТ

Опытно-промышленные испытания КЛТ в качестве реактивного материала ГХБ проводили в пьезометрической скважине N 25 на территории здания ХЖРО, ТОО «МАЭК-Казатомпром». Было изготов-

Таблица 2. Состав ЖРО из емкости хранения N Б-02/3

Место отбора пробы	Химический состав ЖРО										Удельная активность ^{137}Cs ($\pm 30\%$)	
	сухой остаток, г/л	щелочность, г-экв/л	жесткость, г/л	хлориды, г/л	нитраты, г/л	окисляемость, г/л	сульфаты, г/л	кремнекислота, г/л	оксалаты, г/л	СПАВ, г/л	Ки/л	МБк/л
Зеркало	136.0	0.02	0.01	24.8	60.3	Отсутствует	15.4	0.33	45.0	0.13	$1.12 \cdot 10^{-3}$	41.20
Средний уровень	138.0	0.02	0.02	21.3	63.7	» »	15.4	0.33	28.0	0.03	$1.17 \cdot 10^{-3}$	43.30
Нижний уровень	144.0	0.02	0.02	15.9	66.7	» »	15.7	28.8	0.09	Отсутствуют	$1.28 \cdot 10^{-3}$	47.30

лено погружное устройство в виде перфорированного цилиндра высотой 1 м с наружным диаметром 100 мм, закрученного с торцов крышками с отверстиями (рис. 1). В цилиндре прорезаны отверстия и щели общей площадью 25%. Погружное устройство было заполнено КЛТ массой 9.8 кг с размером зерна 1.25 мм. В крышке смонтирован захват с тросиком, предназначенный для подъема и удержания погружного устройства. Параметры погружного устройства позволяют обеспечить естественную циркуляцию в скважине и фильтрацию воды через слой сорбента. При опускании погружного устройства в скважину зазор между дном цилиндра и дном скважины составлял примерно 100–150 мм.

Результаты и обсуждение

Лабораторные исследования сорбционной способности КЛТ на реальных растворах

Результаты исследования сорбции ^{137}Cs на природной форме КЛТ из грунтовой воды и модельного раствора ЖРО (1 : 100) в динамических условиях представлены в виде выходных кривых (рис. 2, 3). Отсутствие плавного вида у выходных кривых обусловлено периодическими перерывами в фильтрации растворов от 16 до 64 ч. После перерыва в фильтрации КЛТ активнее проявляет сорбционные свойства, заметно понижая удельную активность исследуемого раствора, что связано с кинетическими особенностями КЛТ – двухстадийной кинетикой сорбции [12]. Кинетические особенности КЛТ объ-

**Рис. 1.** Погружное устройство после извлечения.

ясняются тем, что ион цезия во время перерыва диффундирует в более глубокие полости, освобождая доступные позиции, расположенные вблизи или на поверхности сорбента. Появление свободных активных участков способствует сорбции извлекаемого компонента на поверхности КЛТ. В то же время сорбция протекает медленно, и равновесное состояние устанавливается долго.

Если снизить скорость фильтрации раствора, максимально приблизившись к значению реальной скорости фильтрации грунтовой воды $2 \cdot 10^{-4}$ м/сут, увеличив тем самым время контакта раствора и сорбента, глубина очистки загрязненных цезием растворов может быть значительно повышена.

Удельная активности проб сорбента после завершения опытов по сорбции ^{137}Cs составляет (Бк/кг): при сорбции из грунтовой воды (скважина 25) – $1.05 \cdot 10^7$, из модельного раствора ЖРО (1 : 100) – $5.57 \cdot 10^7$, из модельного раствора ЖРО (1 : 10) – $3.27 \cdot 10^{10}$.

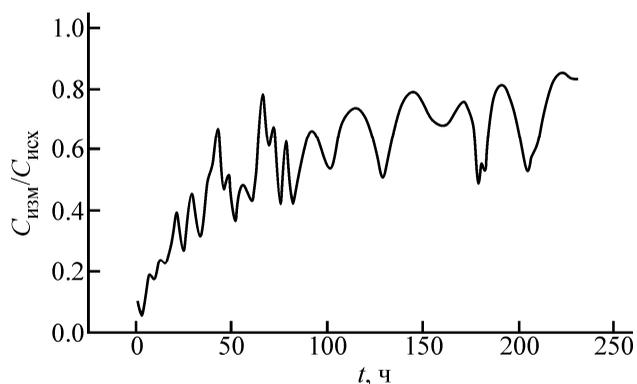
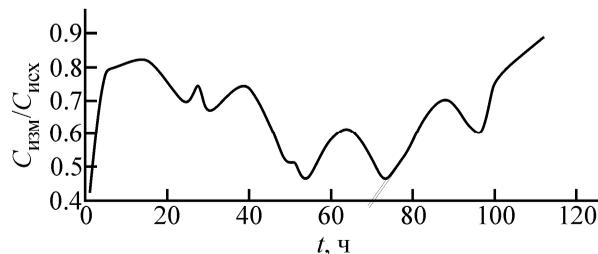
**Рис. 2.** Выходная кривая сорбции цезия на КЛТ из грунтовой воды. Концентрация цезия в исходном растворе $2.94 \cdot 10^{-9}$ г/л, линейная скорость $V = 0.038$ см/с.**Рис. 3.** Выходная кривая сорбции цезия из модельного раствора ЖРО (1 : 100). Концентрация цезия в исходном растворе $0.148 \cdot 10^{-6}$ г/л, линейная скорость $V = 0.0955$ см/с.

Таблица 3. Значения равновесной концентрации Cs^+ в сорбенте

Исследуемый раствор	Концентрация в растворе, Бк/л	Концентрация в сорбенте, Бк/кг
Грунтовая вода	$9.40 \cdot 10^3$	$2.26 \cdot 10^7$
Модельный раствор ЖРО (1 : 100)	$4.73 \cdot 10^5$	$1.14 \cdot 10^9$
Модельный раствор ЖРО (1 : 10)	$2.32 \cdot 10^6$	$5.55 \cdot 10^9$

С увеличением концентрации Cs^+ в исследуемом растворе возрастает сорбция данного радионуклида на КЛТ. При сорбции из высокоактивных растворов емкость КЛТ достигает практически 1 Ки/кг сорбента.

В табл. 3 приведены расчетные данные по максимальной концентрации цезия в сорбенте после контакта с исследуемым раствором при достижении равновесия, полученные исходя из значений исходной концентрации цезия в растворе и коэффициента распределения иона цезия ($2.4 \cdot 10^3$ мл/г) на природной форме КЛТ.

Из этих расчетов следует, что КЛТ даже при невысоком разбавлении ЖРО грунтовой водой в условиях реальных скоростей фильтрации может обеспечить эффективную дезактивацию грунтовой воды.

Опытно-промышленные испытания КЛТ

Геологическое строение участка в зоне размещения здания ХЖРО представлено неогеновыми отложениями, в состав которых входят песчаные известняки и мергели-ракушечники, перекрытые сверху насыпным грунтом.

Испытания КЛТ в пьезометрической скважине N 25 проводили в течение 4 месяцев. Отбор грунтовой воды на анализ производили еженедельно. Результаты γ -спектрометрического анализа проб воды из скважины представлены на рис. 4.

После окончания эксперимента через 4 месяца погружное устройство извлекали из скважины, из объема сорбента брали три пробы (верхняя, средняя и нижняя часть, рис. 5). Результаты γ -спектрометрического анализа проб КЛТ (удельная активность ^{137}Cs , Бк/кг) представлены ниже.

Верхняя часть (наружная поверхность)	$5.210 \cdot 10^6$
Верхняя часть (общая)	$3.886 \cdot 10^5$
Средняя часть	$5.569 \cdot 10^5$
Нижняя часть (наружная поверхность)	$1.574 \cdot 10^6$
Нижняя часть (общая)	$8.230 \cdot 10^5$
Объединённая проба	$1.178 \cdot 10^6$

Результаты испытаний свидетельствуют о приемлемости конструкции погружного устройства и эффективности применения КЛТ. Максимальная активность сорбента, наблюдаемая в верхнем слое, составила $5.21 \cdot 10^6$ Бк/кг, усредненная – $1.18 \cdot 10^6$ Бк/кг. Общая активность сорбента составляет примерно $9.5 \cdot 10^6$ Бк. Эти данные согласуются с результатами

сорбции радионуклидов из проб грунтовой воды, где была достигнута активность сорбента примерно в $1 \cdot 10^7$ Бк/кг. Преимущественно загрязнены верхние слои грунтовых вод, о чем свидетельствует наибольшая активность пробы сорбента, отобранной из верхней части погружного устройства.

Конструкция ГХБ, ее обоснование

Результаты лабораторных и опытно-промышленных испытаний природной формы КЛТ демонстрируют, что применение данного сорбента в качестве реактивного материала ГХБ для очистки грунтовых вод от техногенных радионуклидов на территории здания ХЖРО является эффективным.

Предлагается конструкция ГХБ в виде сети скважин, расположенных в два ряда в шахматном порядке вдоль здания ХЖРО. В каждую скважину

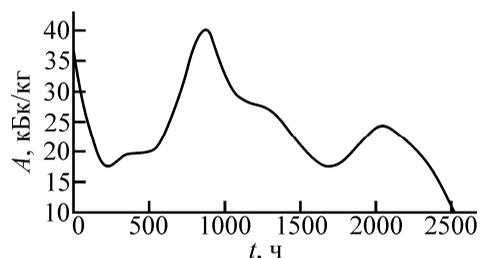


Рис. 4. Изменение активности грунтовой воды при сорбции из нее цезия.



Рис. 5. Погружное устройство и сорбент.

опускают описанное выше погружное устройство.

Для расчета количества КЛТ, необходимого для создания ГХБ, приняты следующие начальные условия: емкость КЛТ по ^{137}Cs $1.0 \cdot 10^9$ Бк/кг (с учетом разбавления ЖРО грунтовыми водами); активность ЖРО $4 \cdot 10^8$ Бк/л [13]; характер течи – «большая», с вытеканием ЖРО из емкости в приемки ХЖРО; объем одной емкости 385 м^3 [13].

Для расчета количества ЖРО, попавших в грунтовые воды, рассмотрим следующий гипотетический сценарий развития течи: резкая, быстрая разгерметизация емкости с образованием трещины; раскрытие трещины и течь с максимальным расходом 10 л/мин; при снижении уровня ЖРО в емкости на 20% сигнал тревоги и принятие противоаварийных мер; включение насосов и перекачка как вытекших, так и оставшихся ЖРО в другие емкости.

При таком сценарии количество ЖРО, попавших в грунтовые воды через несплошности в бетонном поддоне, составит около 5% ЖРО, вытекших в приемки ХЖРО (около 3.85 м^3). Активность ^{137}Cs , попавшего в грунтовые воды, при этом составляет $1.54 \cdot 10^{12}$ Бк. Масса КЛТ, необходимая для сорбции данного количества ^{137}Cs , равна 1540 кг.

При допущении, что цезий равномерно распределится в потоке грунтовой воды, медленно просачивающейся в сторону Каспийского моря, ширина потока будет примерно равна ширине здания (около 70 м). При скважинном устройстве ГХБ, шахматном расположении скважин в два ряда и шаге между скважинами в одном ряду 2.5 м общее число скважин составит 58. Количество КЛТ в одной скважине составит 26.55 кг.

В пьезометрических скважинах высота столба грунтовой воды составляет около 7 м. Конструкция скважин для ГХБ предполагается аналогичной существующим пьезометрическим скважинам. Высота столба сорбента при диаметре скважины 140 мм и средней насыпной плотности КЛТ 1.245 г/см^3 составит 1.39 м.

Конструктивно погружное устройство для каждой скважины предлагается выполнить из извлекаемого кольцевого цилиндра наружным диаметром 130 и внутренним – 110 мм. Внутренний объем вкладыша позволит проводить контроль активности грунтовых вод и оценивать пригодность КЛТ и необходимость его замены. Должна быть предусмотрена регулярная замена КЛТ по мере выработки ресурса.

На основании результатов опытно-промышленных испытаний можно сделать следующие прогнозы по времени защитного действия ГХБ.

1. При небольших протечках ЖРО, которые наблюдаются в настоящее время, срок действия барьера до замены вкладышей с сорбентом составит не менее 6 месяцев.

2. При аварийных течах, аналогичным рассмотренной выше, срок защитного действия барьера будет ограничен одной неделей. Это время сильно зависит от места течи и преимущественного направления распространения.

3. При отсутствии протечек срок действия барьера допустимо установить в 5 лет при условии контроля активности воды во внутреннем объеме вкладыша.

Следует отметить, что создание ГХБ является одним из локализирующих мероприятий по уменьшению последствий в случае «больших течей» ЖРО, который следует применять в комплексе с другими мероприятиями, такими как откачка грунтовых вод из пьезометрических скважин, тампонирование пьезометрических скважин, замена или разбавление (засыпка) грунта вокруг ХЖРО. Отличительной особенностью создания ГХБ является то, что его реализация позволит постепенно удалить радионуклиды из почвы вследствие эксплуатационных событий и гарантирует устранение (смягчение) последствий в случае «течей и проливов ЖРО» в районе хранилища жидких радиоактивных отходов.

В целом результаты исследования сорбции ^{137}Cs из грунтовой воды и модельных растворов ЖРО на природной форме КЛТ в динамических условиях позволяют прогнозировать высокую степень извлечения цезия из грунтовой воды в естественных природных условиях при медленной скорости фильтрации. Результаты опытно-промышленных испытаний ГХБ подтверждают приемлемость конструкции погружного устройства и эффективность исследованного сорбента.

Список литературы

- [1] Puls R. W., Paul C., Powell R. M. // Appl. Geochem. 1999. Vol. 14. P. 989.
- [2] Xendis A., Moirou A., Paspaliaris I. // Miner. Wealth. 2002. Vol. 123. P. 35–38.
- [3] Сергеев В. И., Степанова Н. Ю. и др. // Матер. 2-й Всерос. конф. «Экология, проблемы охраны природы и пути их решения». Ульяновск, 2004. С. 208–218.
- [4] Сергеев В. И., Степанова Н. Ю. и др. // Научно-технические технологии. 2005. N 1. С. 57–64.
- [5] Степанова Н. Ю. Защита подземных вод от загрязнения в районах захоронения радиоактивных отходов: Дис. ... к.т.н. М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2006.
- [6] Bowman R. S. // Micropor. Mesopor. Mater. 2003. Vol. 61. P. 43–56.
- [7] Sullivan E. J., Bowman R. S., Legiec I. A. // J. Environ. Qual. 2003. Vol. 32. P. 2387–2391.
- [8] Ергожин Е. Е., Акимбаева А. М. Органоминеральные сорбенты и полифункциональные системы на основе природ-

ного алюмосиликатного и угольно-минерального сырья. Алматы, 2007. 376 с.

- [9] Буленова К. Ж., Никашина В. А., Серова И. Б. и др. // 7-я Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы урановой промышленности». Алматы, 25–27 сентября 2014 г. С. 413–421.
- [10] Никашина В. А., Серова И. Б., Кац Э. М. и др. // 7-я Всерос. цеолитная конф. Звенигород, 16–18 июня 2015 г. С. 258–259.
- [11] Никашина В. А., Серова И. Б., Кац Э. М. и др. Моделиро-

вание процесса сорбции радионуклидов (Cs) на клиноптилолите Чанканайского месторождения и оценка времени защитного действия барьера в зависимости от различных условий: Закл. отчет по Договору N 252-ИВТ. Алматы, 2014. 34 с.

- [12] Thompson P. W., Tassopoulos M. A. // Zeolites. 1986. Vol. 6, N 1. P. 12–20.
- [13] Техническая справка о состоянии емкостей ХЖРО РУ БН-350 зд. 157 и ЖРО в емкостях на 01.05.2013 N 02-05-02/470 от 21.06.2013.

Борису Яковлевичу Зильберману – 80 лет

Зильберману Борису Яковлевичу – доктору технических наук, профессору, главному научному сотруднику Отделения прикладной радиохимии Радиевого института им. В. Г. Хлопина – исполнилось 80 лет. Стаж Бориса Яковлевича в институте без малого 60 лет.

Главное направление научной деятельности Б. Я. Зильбермана связано с разработкой и совершенствованием комплексных технологий переработки ОЯТ с различным содержанием делящихся элементов и продуктов деления на базе экстракционных, сорбционных и выпарных процессов на основании системного подхода к этим процессам.

Б. Я. Зильберман родился в 1937 г. в Ленинграде. Отец – Зильберман Яков Ильич (1901–1969) – научный работник, с 1946 г. – начальник отдела по проектированию радиохимических заводов Ленинградского отраслевого проектного института (ГСПИ-11, впоследствии ВНИПИЭТ); мать – Левина Берта Наумовна (1905–1984) – актриса, режиссер. Учился Борис Яковлевич в Ленинграде, закончив среднюю школу в 1954 г. и ЛТИ им. Ленсовета [в настоящее время СПбТИ(ТУ)] в 1959 г.

С 1959 по 2006 г. Б. Я. Зильберман проработал в лаборатории Радиевого института, основанной М. Ф. Пушленковым, где последовательно занимал должности старшего лаборанта (1959–1962), младшего (1962–1969) и старшего (1969–1986) научного сотрудника и начальника лаборатории (1986–2006). С апреля 2006 г. занимает должность главного научного сотрудника Отделения прикладной радиохимии. В 1964 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности «Радиохимия», в 1984 г. – диссертацию на соискание степени доктора технических наук по специальности «Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов». В 1971 г. получил ученое звание старшего научного сотрудника по специальности «Радиохимия», а в 1998 г. – профессора по кафедре технологии редких и рассеянных элементов СПбТИ(ТУ).

Особо плодотворным периодом творческой дея-

тельности Б. Я. Зильбермана было время, когда он возглавлял группу специалистов Радиевого института по разработке и внедрению на ПО «Маяк» одноклочной экстракционно-сорбционной схемы переработки урановых блоков, облученных в промышленных реакторах, включая упаривание растворов с регенерацией компонентов рабочей среды. Позднее была продемонстрирована перспектива использования этой технологии для переработки ОЯТ АЭС, затем разработана новая технология комплексной экстракционной переработки ОЯТ АЭС, реализованная в проекте завода РТ-2. Дальнейшим совершенствованием стал процесс «Суперпурекс», удовлетворяющий требованиям нераспространения делящихся материалов, обеспечивающий минимизацию органических отходов и предназначенный для дальнейшей модернизации технологии переработки ОЯТ.

В настоящее время Б. Я. Зильберман работает над проблемами оптимизации всей технологической цепи переработки ОЯТ АЭС, включающей разнородные технологические процессы в рамках концепции замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ). Также Борис Яковлевич осуществляет научное руководство Рабочей группой по продвижению перспективной технологии и ЗЯТЦ в целом с использованием так называемого РЕМИКС-топлива, соавтором которой он является.

Отдельно следует отметить систематические научные исследования под руководством Б. Я. Зильбермана в области гетерофазных равновесий с участием водных растворов (экстракционных, выпарных и кристаллизационных) в цепочке переработки ОЯТ и их описание на основе представлений о мультреакционном подходе, позволяющем рассчитывать экстракционные каскады с произвольным числом компонентов. Эти статьи легли в основу цикла статей, отмеченных премиями издательства «МАИК «Наука–Интерпериодика» и журнала «Радиохимия» в 2003 и 2016 гг.

Б. Я. Зильберман активно участвует в подготовке научных кадров, фактически являясь продолжателем и главой признанной научной школы Радие-

вого института в области химии и технологии экстракционных и выпарных процессов переработки ОЯТ. В течение 10 лет он совмещал основную работу с преподаванием на кафедре Технологии редких и рассеянных элементов СПбГТИ в качестве доцента, а затем профессора. Им подготовлены 7 кандидатов наук и 1 доктор наук; под его руководством готовятся еще 2 кандидатские диссертации, а также выполняются дипломные работы на упомянутой кафедре СПбГТИ. Возглавляемая им научная школа официально зарегистрирована Советом вузов Санкт-Петербурга.

В исследовательской и общественно-научной деятельности проявились его трудолюбие, организаторские способности, научная прозорливость, добросовестность и забота о научной молодежи. По результатам работ 2016 г. Б. Я. Зильберман как научный руководитель «команды» с разработкой «Технология выделения ^{99}Mo медицинского назначения» номинирован на конкурс Госкорпорации «Росатом» «человек года» в номинации «На шаг впереди».

Б. Я. Зильберман – автор более 150 статей в российских и зарубежных журналах, около 200 докладов на российских (всесоюзных) и международных конференциях, опубликованных в отечественных и зарубежных реферируемых изданиях, 55 патентов и изобретений, из которых 4 были внедрены на ПО «Маяк», 4 учебных пособий и двух курсов лекций.

Борис Яковлевич награжден орденом «Дружба народов» (1982 г.) и медалью «Ветеран труда» (1986 г.), в 2006 г. ему присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки РФ», в 2016 г. он в соавторстве с Ю. С. Федоровым и С. Н. Калмыковым стал лауреатом премии им. В. Г. Хлопина РАН. Б. Я. Зильберман отмечен знаками «Изобретатель СССР» (1981 г.) и «Ветеран атомной энергетики и промышленности» (1998 г.), награжден отраслевым орденом Курчатова 2-й степени, имеет грамоты с благодарностью руководителя отрасли в 1997, 2005 и 2012 гг.



Б. Я. Зильберман (сидит в центре) с учениками. Слева направо: А. А. Наумов, Д. Н. Кухарев, Н. Д. Голецкий, Н. Е. Мишина, Е. А. Пузиков, А. С. Кудинов.

Б. Я. Зильберман является членом Межведомственного научного совета по радиохимии при президиуме РАН и Росатоме, Комиссии по экстракции Совета по химии и химической технологии РАН, заместителем председателя Координационного совета по ториевому топливному циклу Росатома, экспертом Росатома и МАГАТЭ, а также членом диссертационного совета Д 201.007.01 при Радиевом институте.

Б. Я. Зильберман имеет широкие научные связи в нашей стране и за рубежом в научных учреждениях и на промышленных предприятиях. Среди его соратников и учеников целый ряд известных ученых и специалистов.

Вышесказанное о Борисе Яковлевиче Зильбермане было бы не полным без характеристики его как личности. Несмотря на годы, он полон сил и энергии, научных инициатив, по-прежнему окружен благодарными учениками и соратниками.

Примите, уважаемый Борис Яковлевич, искренние и сердечные поздравления с юбилеем от Ваших коллег в родных стенах Радиевого института и за его пределами. Здоровья Вам и дальнейших творческих успехов на долгие годы!

Коллеги, друзья