



**Радиевый институт
имени В.Г. Хлопина**

ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»



Открытое
акционерное
общество



“Радиевый институт имени В.Г. Хлопина”

194021, Санкт-Петербург,
2-ой Муринский проспект, 28.

Тел. (812) 297-56-41; факс (812) 297-57-81
тел/факс (812) 297-57-00 (канцелярия)

www.khlopin.ru; e-mail: radium@khlopin.ru

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу БУКИНА АЛЕКСЕЯ НИКОЛАЕВИЧА на тему «Оптимизация процесса детритизации газов с относительной влажностью меньше 100% методом фазового изотопного обмена», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.02 – технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов

Диссертационная работа А.Н. Букина посвящена разработке нового метода удаления паров тритированной воды из вентиляционных и технологических газовых потоков предприятий и организаций, осуществляющих работу с тритием и тритированными соединениями. В настоящее время наибольшее распространение для решения задачи удаления тритированных паров воды из газов получила адсорбционная технология, заключающаяся в осушке газов с использованием различных молекулярных сит. В последние годы в России была предложена новая технология детритизации газов со 100% относительной влажностью, основанная на удалении из него тритированных паров воды в противоточном процессе фазового изотопного обмена (ФИО) с водой, не содержащей трития. Эта технология имеет большие преимущества по сравнению с адсорбционной как с точки зрения энергетических затрат, так и по простоте аппаратного оформления и объему оборудования. На практике, однако, подлежащий детритизации поток газа, как правило, не имеет 100% относительной влажности, т.е. содержит неравновесное количество паров воды. При контакте с жидкой водой в колонне ФИО газ должен насыщаться до равновесного давления, а процесс в целом будет сопровождаться изменением как температуры, так и потоков жидкой воды и ее паров в газе. Учитывая, что задача детритизации таких газовых потоков практически значима, особенно с учетом активно разрабатываемых в настоящее время в России новых методов переработки облученного ядерного топлива, работа, посвященная оптимизации условий проведения процесса детритизации ненасыщенных газовых потоков, безусловно, является **своевременной и актуальной**.

Диссертационная работа А.Н. Букина изложена на 159 страницах машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения, выводов и списка цитируемой литературы, включающем 97 источников. Работа содержит 35 таблиц и 43 рисунка.

Научная новизна работы заключается в установлении факта независимости массообменных характеристик процесса ФИО – высоты единицы переноса (ВЕП) и высоты теоретической ступени (ВЭТС) – от температуры в диапазоне температур 6-20⁰С, экспериментальной демонстрации уникальных гидрофильных свойств насадки Sulzer CY-типа, изготовленной из оксидированной меди и сохраняющей развитую поверхность контакта фаз пар-жидкость при экстремально малой плотности орошения, составляющей 0,5% от предельной, а также демонстрации отсутствия коэффициента масштабного перехода для исследованной насадки в диапазоне диаметров колонны 32-110 мм.

Практическая значимость работы заключается в разработке метода удаления тритированных паров воды из газовых потоков с любой относительной влажностью в колонне ФИО, *работающей в адиабатических условиях*, и получении базы физико-химических данных, достаточной для проектирования новых установок детритизации газов в широком диапазоне их производительности.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечены использованием современного аналитического и контрольно-измерительного оборудования, традиционной для классических массообменных экспериментов методикой проведения опытов, подробным анализом погрешностей, возможных на всех стадиях эксперимента, и их учете при анализе результатов.

Диссертационная работа оформлена качественно, ее построение логично вытекает из поставленной цели работы. В автореферате диссертации, изложенном на 16 стр. текста, адекватно отражены основные результаты, полученные в работе. По результатам работы опубликовано 8 печатных работ, в числе которых 4 статьи (2 - из Перечня ВАК), 1 патент, тезисы 3-х докладов на конференциях

Во **Введении** обращается внимание на растущий объем разнообразных тритийсодержащих газовых потоков на различных объектах ядерного и термоядерного назначения при одновременном ужесточении требований по выбросам трития в окружающую среду в разных странах мира. Это вызывает необходимость использования эффективных методов и технологий детритизации этих газовых потоков. С учетом этого формулируется цель работы, а также приводятся основные полученные научные результаты и их практическая значимость.

В первой главе проводится подробный литературный обзор существующих методов обращения с твердыми, жидкими и газообразными тритийсодержащими отходами. Наибольшее внимание в обзоре уделяется различным методам обращения с газообразными отходами с учетом их достоинств, недостатков и предпочтительных областей использования. Рассматриваются масштабные комплексные технологии детритизации газов, используемые на тритиевом заводе европейского термоядерного реактора JET и принятые при проектировании международного термоядерного реактора ITER. В этих технологиях все тритийсодержащие соединения каталитически переводятся в воду, а пары воды сорбируются на молекулярных ситах. Далее в обзоре сравнивается стадия адсорбции паров воды с предложенным в России новым процессом удаления паров тритированной воды – ФИО – и констатируются достоинства последнего. После анализа специфики использования процесса ФИО для очистки газов, ненасыщенных парами воды до относительной влажности RH=100% и выводов из литературного обзора, формулируются задачи работы.

Вторая глава посвящена изложению методикам проведения экспериментов, изотопного анализа, расчета массообменных характеристик (ВЕП, ВЭТС, коэффициент массопередачи K_G) и оценки погрешности в них. Все эксперименты проведены в противоточных колоннах, заполненных регулярной насадкой Sulzer CY-типа. Высота

насадочного слоя могла изменяться от 16 до 212 см, диаметр колонн – от 32 до 110 мм. Основной объем результатов получен на колонне диаметром 62 мм. Большое внимание в этой части работы уделено методике получения газового потока, содержащего тритированные пары воды при заданном значении RH. Значительную часть главы (и, пожалуй, избыточную) занимает анализ различных погрешностей, возможных при проведении эксперимента и при изотопном анализе проб.

Третья глава посвящена результатам предварительных опытов по изучению тепло- и гидродинамического режима работы колонны. В этих опытах решались несколько задач. Первая из них – исследование эффективности процесса теплообмена и достижения газом с $RH < 100\%$ равновесных температур и давления паров воды. Показано, что основное влияние на теплообмен при насыщении газа оказывает газовая фаза. При этом при подаче в теплоизолированную и не обогреваемую колонну ненасыщенного воздуха с малой величиной RH ($RH = 10\%$ при $T = 298\text{K}$) на высоте насадки 96 см достигается 100% насыщение газа, а стационарная температура газового потока, выходящего из колонны, составляет $12,3^\circ\text{C}$. Время достижения стационарного режим работы колонны не превышает 2ч. Отсюда автор делает вывод о том, что при детритизации газового потока с $RH < 100\%$ в колоннах ФИО высотой значительно больше 1 м только нижняя часть колонны будет работать при переменных температуре и потоках жидкой воды и пара, а в остальной части колонны процесс детритизации будет проходить в равновесных условиях при температуре ниже комнатной. Второй целью экспериментов, описанных в этой главе, было исследование различных режимов запуска колонны ФИО: с сухой насадкой в ней, с предварительным затоплением насадки и при сохранении в колонне насадки во влажном состоянии. Из общих соображений ясно, что лучший способ запуска – предварительное затопление насадки, но применительно к процессу детритизации это будет приводить к появлению большого количества вторичных радиоактивных отходов. Сравнительные эксперименты, проведенные при использовании в колонне медной оксидированной и стальной насадок Sulzer CY-типа продемонстрировали особую пригодность насадки из оксидированной меди для проведения процесса детритизации при экстремально низких потоках орошающей колонну воды. Если для стальной насадки различие в ВЕП в случае использования сухой и затопленной насадок составляет примерно 60 раз, то для медной оксидированной – только 1,3 раза. В заключительной части той главы приведены данные по динамической задержке медной оксидированной насадки в зависимости от температуры, потока газа, способа запуска колонны и высоты насадочного слоя в ней, и показано, что эта величина зависит только от плотности орошения колонны потоком жидкой воды: $\sum L [\text{кг/м}^3] = 5,45 \cdot L^{0,37} [\text{кг/м}^2\text{ч}]$.

Четвертая глава посвящена изложению результатов по сравнительному изучению различных вариантов проведения процесса детитизации газа с $RH < 100\%$. Для анализа были выбраны три основных варианта условий работы колонны: адиабатический вариант и два режима с компенсацией тепла, затрачиваемого на испарение при насыщении газа в колонне. При использовании первого варианта основная часть колонны будет работать при температурах ниже комнатной, и температура газа на выходе из колонны в зависимости от его исходной влажности будет изменяться от 6°C до комнатной. Второй и третий варианты работы колонны позволяют в колонне (за исключением ее нижней части, где будет проходить процесс насыщения газа) устанавливать любую рабочую температуру. В качестве целевых критериев, по которым сравнивались выбранные режимы работы, использовались достигаемые в колонне фиксированной высоты степени детритизации газа (отношение содержания трития в газе на входе и выходе из колонны) и количество вторичных радиоактивных отходов в виде тритированной жидкой воды, выходящей из

колонны. Результаты работы этой главы позволили автору сделать обоснованный вывод о том, что с точки зрения выбранных параметров *оптимальным является адиабатический режим работы* колонны. С точки зрения оппонента, этот результат является в работе одним из самых главных, поскольку еще в большей степени повышает конкурентоспособность метода ФИО по сравнению с адсорбцией из-за минимизации необходимых энергетических затрат.

В пятой главе проводится поиск оптимизация процесса детритизации применительно к очистке ненасыщенного газа. В ней исследованы следующие зависимости:

- от соотношения потоков пара в газе и жидкой воды. Показано, что степень детритизации газа в сопоставимых условиях для газа с $RH < 100\%$ превышает аналогичную величину для газа с $RH = 100\%$, при уменьшении соотношения потоков степень детритизации растет, но одновременно увеличивается количество вторичных радиоактивных отходов;
- от температуры в колонне при детритизации газа с $RH = 100\%$. В диапазоне температур 8-25⁰С показано, что в при одинаковых соотношениях потоков значения ВЕП и ВЭС одинаковы, что представляет собой дополнительный экспериментальный довод в пользу адиабатического режима работы колонны, когда основная ее часть (за исключением нижней) должна работать при пониженной температуре;
- от величины газового потока. Наибольший интерес в этой части работы представляет результат эффективной работы колонны диаметром 62 мм при потоке орошения, составляющем 0,05 м³/мин (поток газа 1 м³/ч) и при этом ВЭС в 2 раза меньше, чем при потоке орошения в 10 раз большем. Это результат еще раз подтверждает уникальные свойства медной оксидированной насадки применительно к процессу детритизации;
- от диаметра колонны. Результат этого раздела работы позволил сделать вывод о том, что эффективность процесса детритизации не зависит от диаметра колонны ФИО в диапазоне от 32 до 110 мм.

По результатам работы можно сделать ряд замечаний.

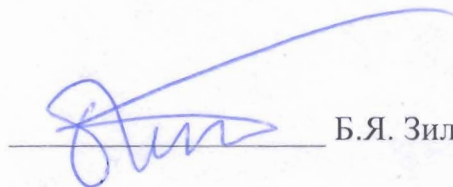
1. Оппоненту представляется излишне подробным анализ экспериментальных погрешностей в экспериментальной части работы. Он содержит большое количество общеизвестных соотношений, без описания которых можно было бы обойтись, сразу оценивая возможные величины погрешностей в своей работе.
2. В работе А.Н. Букин ссылается на возможное крупномасштабное применение результатов, например, применительно к реактору ИТЭР. Однако потоки газов, которые должны быть очищены в ИТЭР, составляют 1400-1600 м³/ч, а диаметр колонн ФИО – 600-700 мм. Оппоненту представляется, что при значительном увеличении диаметра колонн полное отсутствие коэффициента масштабного перехода для регулярной насадки в условиях экстремально малых плотностей орошения маловероятно и, следовательно, полученных для диапазона диаметров 32-110 мм данных для этого вывода недостаточно. В то же время, предложение о секционировании с установкой батареи колонн автором не рассмотрено.
3. С точки зрения оппонента представляет интерес проведение более подробных исследований закономерностей распределения жидкости по поверхности насадки для того чтобы можно было дать объяснение необычным зависимостям, найденным в работе, например, росту ВЕП и ВЭС при увеличении потока жидкости при фиксированном потоке газа. Возможно, мы имеем дело с явлением молекулярной абсорбции тритированной воды монослоем (нанослоем) флегмы, как бы адсорбированной поверхностью насадки, тогда как при большем потоке флегмы происходит сплошное смачивание насадки, и процесс переходит в обычную диффузионную стадию.

4. Как и во всякой работе, в тексте диссертации имеются опечатки и неудачные выражения.

Сделанные замечания, скорее, носят характер пожеланий и ни в коей мере не изменяют общей высокой оценки работы, в которой решается важная практическая задача. Диссертация А.Н. Букина охватывает основные вопросы поставленной научной проблемы и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, непротиворечивой методологической платформы, концептуальности подхода и взаимосвязи выводов. По своему содержанию диссертация отвечает паспорту специальности 05.17.02 – технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов в части Формулы специальности "Создание и совершенствование технологических схем, ресурсо-, энергосбережения, охраны окружающей природной среды в технологии редких и радиоактивных элементов", и Области исследования "Способы утилизации техногенного и вторичного сырья".

Оппонент считает, что диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, которая направлена на решение задачи, имеющей значение для развития важной для ядерной отрасли России технологии, обеспечивающей безопасное обращение с тритием и содержащим тритий облученным ядерным топливом. По актуальности, новизне, практической значимости диссертация соответствует требованиям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Автор этой работы – Алексей Николаевич Букин – заслуживает присвоения ему искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.02 – технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов.

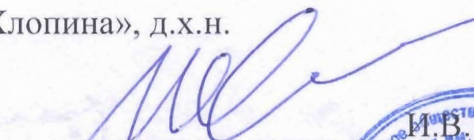
Официальный оппонент,
главный научный сотрудник отд. 910
ОАО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина»,
д.т.н., профессор

 Б.Я. Зильберман

194021, Санкт-Петербург, 2-ой Мушинский проспект, 28
тел. +7 921 2366484, e-mail: zby@mail.ru

Подпись главного научного сотрудника ОАО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина»,
доктора технических наук, профессора Б.Я. Зильбермана заверяю,

Ученый секретарь ОАО «Радиевый ин-т им. В.Г. Хлопина», д.х.н.


20.10.2014

