

АНАЛИТИЧЕСКИЕ
ЛАБОРАТОРИИ

УДК 542,543

ОТДЕЛ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА ИМ. А.П. АЛЕКСАНДРОВА

© 2022 г. Л. Н. Москвин^а, *, И. А. Буряков^а, А. И. Горшков^а,
А. А. Ефимов^а, В. Т. Мацаев^а, И. В. Мирошниченко^а, О. Ю. Пыхтеев^а

^аНаучно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова
Копорское шоссе, 72, Ленинградская обл., Сосновый Бор, 188540 Россия

*e-mail: moskvinln@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.05.2021 г.

После доработки 22.06.2021 г.

Принята к публикации 23.06.2021 г.

В созданном в г. Сосновый Бор Ленинградской области Научно-технологическом институте имени его создателя академика А.П. Александрова основным научным подразделением является Отдел химико-технологических исследований (ОХТИ), внесший большой вклад в решение проблем автоматизации химико-аналитического и радиохимического контроля водных и воздушных сред. К числу важнейших разработок Отдела относится развитие аналитического направления непрерывной двумерной хроматографии, открытие жидкостно-газовой хроматографии, создание спектрометров ионной подвижности для определения взрывчатых веществ в воздухе и еще целый ряд уникальных методических и инструментальных разработок. Коллектив Отдела сформировался под руководством его организатора и руководителя в течение нескольких лет проф. Л.Н. Москвина преимущественно из молодых специалистов, выпускников химического факультета, тогда еще ЛГУ, ЛТИ им. Ленсовета и УПИ. За годы существования ОХТИ в нем подготовлено более 30 кандидатов и 6 докторов наук. Несмотря на кадровые потери 90-х годов, численность ОХТИ в настоящее время составляет около 10 человек и в нем продолжают работы по важнейшим из отмеченных в статье направлений.

Ключевые слова: отдел, атомная энергетика, химико-аналитический контроль, автоматизация, водные и воздушные среды, хроматография.

DOI: 10.31857/S0044450222030070

Научно-исследовательский технологический институт (НИТИ) им. А.П. Александрова в г. Сосновый Бор Ленинградской области основан в 1962 г. по инициативе академика А.П. Александрова как филиал Института атомной энергии им. И.В. Курчатова для испытаний и отработки новых ядерных энергетических установок (ЯЭУ) транспортного назначения. Согласно проекту в структуру НИТИ, помимо технологических подразделений, ориентированных на эксплуатацию и проведение ресурсных испытаний перспективных ЯЭУ, были включены научные подразделения и в их числе радиохимическая лаборатория. В ее задачи входило методическое руководство лабораториями химико-технологического и радиохимического контроля в составе технологических подразделений института, которые в дальнейшем были объединены в единый Отдел химико-технологических исследований (ОХТИ).

В подборе кадров для института активное участие принимали специалисты ИАЭ им. И.В. Курчатова. В частности, по рекомендации одного из

ведущих радиохимиков этого института Б.В. Курчатова в НИТИ был приглашен из Радиевого института АН СССР Л.Н. Москвин, незадолго до этого защитивший кандидатскую диссертацию по радиохимии, на должность старшего научного сотрудника с обязательством организовать и возглавить радиохимическую лабораторию. Дата его перехода в НИТИ 09.06.1969 г. в дальнейшем была принята за точку отсчета периода формирования в НИТИ научного подразделения, занимавшегося радиохимической, аналитической и химико-технологической проблематикой – ОХТИ.

Выбору направлений исследовательской деятельности института и стратегии его развития большое внимание уделял А.П. Александров. На первом заседании научно-технического совета института он отметил, что научно-производственная деятельность института имеет специфический циклический характер: напряженные периоды монтажа и проведения испытаний новых ЯЭУ сменяются периодами вынужденного простоя, связанного с демонтажем и заменой оборудования. Таким об-



Фото. 1. Л.Н. Москвин, заслуженный деятель Науки РФ, докт. хим. наук. Руководитель ОХТИ 1969–1983 гг.



Фото. 2. А.А. Ефимов, докт. техн. наук. Руководитель ОХТИ 1993–2011 гг.

разом, каждое научное подразделение должно найти для себя направления научной деятельности на эти периоды времени, не обязательно связанные с основной деятельностью института. Условия для научной деятельности предопределили выбор ее направлений сначала в радиохимической лаборатории, а потом и в созданном на ее основе ОХТИ, поскольку они полностью совпадали с личными планами их руководителя. Основными направлениями научной деятельности радиохимической лаборатории, а потом ОХТИ стали начатые еще в РИАН исследования по созданию непрерывных методов разделения. Сначала это была непрерывная двумерная хроматография (НДХ), а позднее – экстракционные мембраны. Опираясь на опыт создания экстракционно-хроматографических двумерных хроматографов, в которых вращающийся слой носителя экстрагента выполнен из моноблочного пористого политетрафторэтилена (ПТФЭ) [1], в ОХТИ были разработаны композиционные блочные сорбенты [2], адсорбционной основой которых служил мелкодиспергированный активированный уголь, а пористой основой – тот же пористый ПТФЭ. Эти сорбенты явились предшественниками ныне широко распространенных монолитных сорбентов. На их основе был разработан двумерный газовый хроматограф [3] для непрерывного выделения радиоактивных изотопов благородных газов, что позволило исследо-

вать динамику их выхода из тепловыделяющих элементов активной зоны ЯЭУ [4]. Эти хроматографы явились первой инструментальной аналитической разработкой, выполненной в ОХТИ.

В дальнейшем блочные сорбенты позволили найти еще ряд методических и инструментальных решений, важнейшим из которых явилось создание нового радиоаналитического метода: экспрессного хроматографического радиохимического анализа (ЭХРА) [5]. Основная идея метода заключалась в совмещении операций выделения радионуклидов из анализируемого раствора и приготовления источников излучения для определения их радиоактивности. Это достигалось за счет использования для выделения радионуклидов- γ -излучателей селективных сорбентов и (или) экстрагентов, включенных в структуру пористых носителей в форме блоков фиксированной геометрии, которые в определенной последовательности устанавливаются в разборной хроматографической колонке. Идея метода ЭХРА, обеспечившего возможность экспрессного определения γ -излучающих радионуклидов, для которых самопоглощение излучения в применяемых для их выделения сорбентах является несущественным и им можно пренебречь, нашла развитие в методе экспрессного мембраносорбционного радиохимического анализа (ЭМРА). В этом случае для выделения радионуклидов и приготовления источников излучения используются



Фото. 3. Коллектив ОХТИ НИТИ им. А.П. Александрова.

импрегнированные селективными сорбентами тонкие пористые мембраны, в которых самопоглощение β - и α -излучения сведено к минимуму; такие мембраны позволяют определять выделенные на них радионуклиды по соответствующим видам радиоактивных излучений. Например, были разработаны методики определения ^{210}Po по α -излучению [6] на мембранах, импрегнированных мелкодисперсным элементарным серебром, и изотопов трансурановых элементов на мембранах, импрегнированных гидроксидом Mn(IV) [7]. Опыт разработки экспрессных методов радиохимического анализа и создания инструментальных средств его автоматизации – установок радиохимического анализа (УРАН), а также систем автоматизированного радиохимического контроля на их основе, обобщен в работе [8].

В области радиохимического анализа оригинальным решением явилось создание расчётно-экспериментального реперного метода определения радиоактивных аэрозолей в воздушных выбросах АЭС [9], обеспечившего рекордно низкие пределы обнаружения всех находящихся в выбросах радионуклидов при минимальном времени их определения.

В то же время продолжались работы в области расширения возможностей НДХ. В частности, был разработан двумерный хроматограф на принципах ионообменной хроматографии, позволив-

ший непрерывно разделять рубидий и цезий [10]. Для непрерывного газохроматографического анализа в качестве альтернативы сложным по конструкции и технологии изготовления двумерным хроматографам с блочными сорбентами были разработаны многоколоночные хроматографы, в которых процесс разделения во вращающемся цилиндрическом слое сорбента имитировался последовательным разделением аналитов на системе однотипных хроматографических колонок, размещённых по периметру цилиндра [11].

Помимо перечисленных направлений, тематика поисковых работ Отдела расширялась за счет поручений А.П. Александрова и его заместителя в ИАЭ им. И.В. Курчатова академика В.А. Легасова. Александров дал два важных и интересных поручения. Во-первых, построенная по соседству с НИТИ Ленинградская атомная станция (ЛАЭС) и другие АЭС с аналогичными энергоблоками нуждались в средствах аналитического контроля теплоносителя в части определения в нем микроконцентраций хлорид-ионов (на уровне 4 мкг/л). Эта величина была включена в регламент контроля на основании теоретических расчетов и не учитывала отсутствие адекватных средств аналитического контроля. На тот момент еще не существовала ионная хроматография и отсутствовали другие методы определения настолько низких концентраций хлорида.



Фото. 4. И.В. Мирошниченко, канд. техн. наук. Руководитель ОХТИ с 2011 г. по настоящее время.

Поиски решения были сосредоточены в области потенциометрии. Они закончились созданием принципиально нового типа потенциометрического датчика – пористого металлического серебряного электрода (ПМСЭ), который в случае прямых потенциометрических измерений позволил определять в воде содержание хлоридов, начиная с 1 мкг/л. На его основе был разработан хлоридомер, обеспечивающий контроль концентрации хлорид-ионов в необходимом для атомной энергетики диапазоне концентраций [12, 14].

Следующим оригинальным достижением исследовательских работ в ОХТИ явилось установление существования аквагидроксопероксокомплексов железа(III) [15]. Это во многом способствовало объяснению механизма образования оксидных пленок на поверхности сталей.

Наконец, третьим оригинальным результатом выполненных в ОХТИ поисковых исследований явилось доказательство возможности осуществления процесса жидкостно-газовой хроматографии – последнего из принципиально возможных методов хроматографического разделения веществ [16]. Этот метод позволил предложить нестандартное решение проблемы определения газов, растворенных в воде [17].

Одновременно с перечисленными выше направлениями исследований в отделе продолжались поиски новых мембранных методов разделения. Здесь первым и важнейшим направлением являлись процессы разделения на жидких экстракционных мембранах (ЖЭМ), рассматриваемых как искусственные аналоги клеточных мембран [18, 19].

Исследования процесса электродиализа хлоридных комплексов платиновых металлов в то время не имели аналогов в мире [20].

При изучении процесса электродиализа через ЖЭМ, импрегнированные на пористом носителе из ПТФЭ, было замечено проявление попутного эффекта электроосмотического переноса (ЭОП) воды через пористый носитель ЖЭМ [21]. Наблюдение за процессом ЭОП позволило обнаружить ранее не описанное явление, заключающееся в том, что проходящая через мембрану вода очищается от примесных ионов, имеющих заряд, противоположный с зарядом поверхности мембраны [22]. В случае мембран из ПТФЭ с отрицательно заряженной поверхностью наблюдалось отделение анионов, а при включении в структуру мембраны оксида алюминия, поверхность которого при контакте с водой приобретает положительный заряд, обеспечивает в процессе ЭОП выделение катионных форм примесей [23]. Обнаруженное явление позволило предложить новый метод концентрирования электроразряженных микропримесей, находящихся в ионных и(или) коллоидных формах, из водных растворов, представляющий интерес как для аналитических [24], так и для препаративных целей [25].

Изучение транспортных характеристик ЖЭМ потребовало параллельного поиска экстракционных систем, которые представляли бы интерес для использования в мембранном варианте. В качестве объектов исследования были выбраны платиновые металлы, задачи разделения которых относятся к числу наиболее сложных. Важнейшим результатом явилось обоснование эффективности экстракции платиновых металлов кислородсодержащими экстрагентами в форме хлоридных комплексов из смешанных соляносернокислых растворов [26]. Основное внимание было уделено экстракции трибутилфосфатом, при этом были получены рекордные значения коэффициентов распределения платиновых металлов. Следует отметить, что эта экстракционная система явилась универсальным решением для всей группы платиновых металлов, включая осмий [27]. Обратимость экстракции кислородсодержащими экстрагентами позволила решить проблему их экстракционно-хроматографического разделения [28]. По сравнению с экстракцией трибутилфосфатом еще большую эффективность обеспечил триоктилфосфиноксид [29]. Однако эти исследования не получили развития в связи с рядом проблем.

Одними из наиболее сложных задач методологии разделения веществ явились поручения академиком А.П. Александрова и В.А. Легасова в области разделения изотопов. Первый поручил найти методическое решение проблемы выделения изотопов трития из тяжеловодного теплоносителя для строившегося исследовательского реактора

“ПИК”. Для решения этой задачи был предложен оригинальный метод разделения, в котором использовался синергетический эффект суммирования коэффициентов разделения при электролизе и диффузии изотопов водорода через мембраны из палладия, функционирующие как биполярные электроды [30, 31].

Поручение, а точнее пожелание, академика В.А. Легасова касалось поиска технологии разделения изотопов лития, которая могла бы явиться альтернативой амальгамной технологии, применение которой приводит к существенным загрязнениям окружающей среды ртутью. Оригинальное решение было найдено при попытках воспроизвести схему противоточного электромиграционного разделения. При этом была установлена причина предыдущих неудач. Она заключалась в том, что все авторы, пытавшиеся реализовать процесс противоточного электромиграционного разделения, осуществляли его в потенциостатическом режиме, исключая выход системы на стационарный режим противоточного разделения. В качестве альтернативы был предложен саморегулируемый гальваностатический режим разделения ионов щелочных металлов [32], при котором на разделительной колонке высотой всего 4 мм, наполненной в качестве стабилизатора потока катионитом КУ-2 с размером частиц 0.05–0.07 мм в 2 М растворе ацетата лития, был достигнут интегральный коэффициент разделения ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$, равный 1.32, т.е. открывалась перспектива увеличения масштабов процесса и создания электромиграционной технологии, но в связи со смертью академика В.А. Легасова эти работы были прекращены.

Разработка метода разделения изотопов лития потребовала соответствующего аналитического сопровождения. И если до этого ОХТИ формировался практически полностью из молодых специалистов, в этот раз в отдел был приглашен уже сформировавшийся специалист в области изотопной масс-спектрометрии Л.Л. Чилипенко. Под его руководством была решена проблема уменьшения дискриминационных эффектов при масс-спектральном изотопном анализе лития [33]. С этой работы началось формирование в ОХТИ еще одной научной группы со своими научными направлениями. Помимо преодоления дискриминационных эффектов при изотопном анализе лития на серийном масс-спектрометре, в результате научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы этой группы был разработан высокоточный, высокопроизводительный масс-спектрометрический анализатор “Лимит”, функционирующий на принципах поверхностной ионизации и магнитного масс-спектрометра на постоянных магнитах, который обеспечивал погрешность измерения 0.1% и производительность до 50 проб за смену. Существовавшее до этого серийное оборудо-

дование обеспечивало проведение анализа не более трех проб за смену. Технические решения, реализованные в данном приборе, были защищены девятью авторскими свидетельствами СССР. Эти устройства были поставлены на Новосибирский завод химконцентратов и во ВНИИТФ им. Е.И. Забахина (г. Снежинск).

Следующим инициативным направлением деятельности группы Л.Л. Чилипенко явилась спектроскопия ионных подвижностей (СИП). Развитию этой тематики во многом способствовало приглашение в НИТИ из Сибирского отделения РАН авторитетного ученого, ведущего специалиста в области СИП докт. физ.-мат. наук И.А. Бурякова. Первым результатом работы с его участием стала разработка времяпролетного спектрометра ионной подвижности АИП-4Т и создание автоматического стационарного обнаружителя взрывчатых веществ (ОВВ) “ЧУБ”, предназначенного для контроля на пунктах массового прохода персонала на режимных объектах. В 2011–2013 гг. по государственному контракту с ФСБ РФ был разработан ОВВ “Шельф-ТИ” на основе методов лазерной десорбции и спектрометрии приращения ионной подвижности. Работа выполнена в рамках Комплексной программы обеспечения безопасности населения на транспорте, утвержденной распоряжением Правительства РФ. Опытные образцы ОВВ “Шельф-ТИ” были успешно опробованы на олимпийских объектах г. Сочи. Конструкторская документация на ОВВ “Шельф-ТИ” была передана в Научно-технический центр “Ядерно-физические исследования” ГК “Росатом” для серийного производства. В последние годы перечень разработок этой группы пополнился ОВВ “Кратос” с качественно новыми аналитическими и эксплуатационными характеристиками, с большими чувствительностью и производительностью, повышенной защищенностью от целенаправленного противодействия функционированию прибора.

По совокупности аналитических и эксплуатационных характеристик все описанные ОВВ превосходят отечественные и зарубежные аналоги, обеспечивая автоматический режим работы, широкий диапазон условий эксплуатации, высокую чувствительность, минимальное время однократного измерения. Как показал опыт эксплуатации данных приборов, они способны обеспечить производительность 200–300 тысяч обследований за один год и более одного миллиона обследований за ресурсный срок службы, составляющий пять лет. Технические решения, реализованные в данных устройствах, защищены 14-тью патентами, полезными моделями и программами ЭВМ. К настоящему времени изготовлено и эксплуатируется службами безопасности предприятий Российской Федерации несколько сотен обнаружителей взрывчатых веществ “ЧУБ”, “Шельф-ТИ” и “Кратос”.

Сведения об этих разработках можно найти в публикациях [34–37].

Среди направлений химико-технологических исследований в ОХТИ важнейшими являются исследования коррозионных процессов и обеспечивающие их проведение аналитические разработки. Среди решений коррозионных проблем для тепловой и атомной энергетики важнейшим является установление закономерностей формирования фазового состава и структуры твердофазных форм продуктов коррозии, образующихся в объеме водных теплоносителей и на поверхностях внутриконтурного оборудования. При выполнении этих исследований в ОХТИ было сделано два важных открытия. Во-первых, было установлено, что образование на поверхности сталей оксидных пленок – это результат взаимодействия растворенных форм железа(III) с атомами железа в поверхностном слое стали [38]. Соответственно фазовый состав и структура пленок зависят от химического состава растворенных форм железа(III), находящихся в водной среде, контактирующей со сталью. Вторым важнейшим результатом работ в этом направлении явилось установление того факта, что химический и радионуклидный составы образующихся в теплоносителях первых контуров ЯЭУ взвесей продуктов коррозии зависят от состава прекурсоров их образования – полимерных форм продуктов гидролиза железа(III). Для установления этих закономерностей потребовались методы вещественного анализа для идентификации форм существования железа как в растворах, так и в твердотельном состоянии. Аналитические возможности гель-хроматографии [39] позволили разработать гель-хроматографические методики анализа продуктов гидролиза железа(III) [40, 41]. Основной методических решений для исследования твердотельных форм железа(III) явились работы группы, занимающейся мессбауэровской спектроскопией, кафедры аналитической химии СПбГУ [42]. Метод мессбауэровской спектроскопии нашел развитие в НИТИ в прикладном плане для объектов атомной энергетики [43, 44]. Сотрудниками ОХТИ методом мессбауэровской спектроскопии был установлен фазовый состав различных форм существования твердофазных продуктов коррозии (взвесей в теплоносителе, рыхлых и плотнофиксированных отложений в контурах ЯЭУ с реакторами кипящего типа (РБМК-1000 и 1500) и водо-водяными реакторами с водой под давлением (ВВЭР-440, 1000)).

В результате автоклавных исследований, моделирующих химические превращения в контурах ЯЭУ, установлены общие схемы химического преобразования ионных форм продуктов коррозии, образующихся на начальной стадии общей коррозии сталей, вплоть до образования конечных твердофазных форм взвесей (шлама), рыхлых отложений и оксидных пленок на металле в

условиях эксплуатации ЯЭУ с водным теплоносителем, что широко используется для оптимизации технологий отмычки и дезактивации оборудования ЯЭУ различного назначения, а также для выбора оптимальных способов пассивации поверхности сталей.

Учитывая научные достижения ОХТИ, А.П. Александров в свое время способствовал назначению института головным по химико-аналитической и радиоаналитической проблематике в атомной энергетике. Это требовало отслеживать появление новых аналитических методов, которые можно было бы адаптировать для решения атомноэнергетических проблем. Первым из таких методов явилась ионная хроматография. Знакомство с методом и его освоение, помимо литературных источников, началось в 1986 г. с появлением в ОХТИ ионного хроматографа “Biard”. С этого момента в отделе начались исследования по оценке возможностей ионной хроматографии для аналитического контроля высокочистых технологических сред ЯЭУ.

Освоение ионной хроматографии в НИТИ способствовало появлению отечественных ионных хроматографов. В 1997 г. по техническому заданию НИТИ фирмой “Аквилон” (Москва) был изготовлен специализированный ионный хроматограф “Стайер А” для анализа высокочистых сред АЭС. Проведенные в НИТИ испытания хроматографа подтвердили его высокую надежность и, после внесения в Госреестр средств измерений РФ он был рекомендован для использования на атомных электростанциях. Этими хроматографами были оснащены все российские АЭС, а также ряд АЭС Украины.

Важной частью работ по внедрению ионохроматографического анализа на объектах ядерной энергетики явилась разработка методического обеспечения. В 2001–2002 гг. по заданию концерна “Росэнергоатом” в НИТИ был разработан и аттестован “Сборник методик химического анализа на АЭС с ВВЭР” [45], включавший методики ионохроматографического анализа, разработанные специалистами отдела. Работы по совершенствованию методик ионохроматографического анализа и подготовке их новых версий по-прежнему проводятся в НИТИ [46–48].

Особенностью аналитического контроля на АЭС является необходимость во многих случаях проводить анализ радиоактивных сред. При этом одной из важнейших задач, стоящих перед разработчиками аналитических средств контроля, является минимизация дозовых нагрузок на персонал при проведении подобных анализов. В этом плане перспективным представляется использование автоматизированных ионохроматографических систем.

Ионные хроматографы для анализа на пробоотборных линиях высокочистых водных сред в режиме онлайн в настоящее время выпускают фирмы “Dionex” (США) и “Metrohm” (Швейцария). В качестве импортозамещения потребовались отечественные решения для ионохроматографического анализа онлайн. Для оперативного контроля параметров водно-химического режима наземного стендового комплекса транспортной ЯЭУ совместными усилиями НИТИ и фирмы “Аквилон” был разработан и изготовлен экспериментальный измерительный канал на базе ионного хроматографа “Стайер А”, обеспечивающий анионный и катионный анализ радиоактивных водных сред в условиях защитной камеры в режиме онлайн. При этом реализован новый подход к выбору структуры ионохроматографического анализатора [49]. В системах аналитического контроля онлайн все элементы жидкостного тракта хроматографа, контактирующие с радиоактивной средой, скомпонованы в едином модуле и установлены в помещении ограниченного доступа (защитной камере). Остальные элементы – хроматографические насосы, блоки питания, емкости с растворами, компьютер – расположены в обычном лабораторном помещении. Подобный подход к реализации автоматизированной схемы ионохроматографического анализа радиоактивных сред оказался полностью адекватным решаемой задаче. В этом случае при проведении анализов полностью снимаются проблемы радиационного облучения персонала, так как обеспечивается безопасный доступ оператора к соответствующим узлам ионохроматографического анализатора. Результаты многолетней эксплуатации ионных хроматографов, подключенных к пробоотборным линиям онлайн, показали, что разработанная ионохроматографическая система может быть использована для анализа радиоактивных проб на предприятиях ядерной энергетики, в том числе и для контроля нормируемых показателей качества теплоносителей в первых контурах АЭС с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР). В отличие от хроматографических анализаторов, предлагаемых упомянутыми выше зарубежными фирмами, значительная часть элементов разработанного ионного хроматографа находится в свободном доступе и может обслуживаться без радиационного облучения персонала.

Опыт успешной эксплуатации в НИТИ отечественного специализированного ионного хроматографа для анализа радиоактивных сред, а также разработка и испытания ряда новых научно-технических решений позволили подготовить в 2017 г. техническое задание на изготовление модернизированного ионохроматографического анализатора, в котором учтены все выявленные в ходе начального этапа эксплуатации его первой версии недостатки, а также предложены новые технические решения, позволяющие обеспечить более

надежную и комфортную эксплуатацию прибора. Предложенные решения позволяют:

- обеспечить генерацию щелочного элюента непосредственно в линии хроматографа, решая проблему влияния на анионный анализ атмосферного углекислого газа [50];

- упростить процедуру градуировки прибора в области микроконцентраций, используя в соответствии с ГОСТ Р ИСО 11095-2007 одноточечную градуировку анализатора, и одновременно реализовать проверку правильности результатов анализа в режиме онлайн методом стандартных добавок. Последнее, помимо всего прочего, решает проблему периодической поверки хроматографа в соответствии с действующим законодательством в области метрологии непосредственно на линии без демонтажа прибора или изменения схемы анализа.

Еще одним аналитическим направлением, развиваемым в ОХТИ, явился проточно-инжекционный анализ (ПИА), позволивший ввести измерительный канал для онлайн определения борной кислоты – нормируемого параметра в системе аналитического контроля на ВВЭР нового поколения [51]. В дальнейшем работы в области автоматизации химического анализа на принципах проточных методов нашли в ОХТИ свое развитие при решении задач создания автоматизированных средств аналитического контроля теплоносителей первых контуров ЯЭУ [52, 53], а также методик и средств аналитического контроля жидких радиоактивных отходов [54, 55].

Необходимо также отметить достижения ОХТИ в подготовке высококвалифицированных специалистов. За годы существования отдела подготовлено 30 кандидатов химических, технических и физико-математических наук, преимущественно специализирующихся в области аналитической химии и радиохимии, а организатор отдела Л.Н. Москвин (фото 1), ныне Заслуженный деятель науки РФ, пятеро его учеников защитили докторские диссертации. Первым из них был И.С. Орленков, получивший ученую степень доктора технических наук по результатам защиты кандидатской диссертации. В настоящее время он является одним из ведущих специалистов в отрасли в области контроля герметичности оболочек теплоделяющих элементов. В области радиохимического анализа ведущий специалист в радиохимии транспортных ЯЭУ – доктор химических наук Виталий Николаевич Епи́махов, много сделавший для развития и внедрения на объектах атомной энергетики экспрессного радиохимического анализа. Признанным химиком-аналитиком, внесшим большой вклад в решение проблемы разделения изотопических ионов и автоматизации ионохроматографического анализа, является доктор химических наук В.С. Гурский. Наконец,

многие достижения в решении химико-технологических проблем атомной энергетики связаны с научной деятельностью докторов технических наук Б.А. Гусева и А.А. Ефимова (фото 2). Б.А. Гусев является создателем метода высокоградиентной магнитной фильтрации водных сред от взвесей ПК [56]. А.А. Ефимов внес решающий вклад в установление механизма процессов образования коррозионных пленок на поверхности сталей и закономерностей формирования фазового и радионуклидного состава взвесей ПК, образующихся в первых контурах ЯЭУ [38]. Кроме того, к числу заслуг А.А. Ефимова относится сохранение ОХТИ в трудные 90-е годы, когда он занимал пост начальника отдела после перехода Л.Н. Москвина в СПбГУ. Нельзя не отметить его педагогическую деятельность, им подготовлен и много лет читался курс “Водно-химические процессы и коррозия на АЭС” в Институте ядерной физики (филиал СПбГПУ Петра Великого в г. Сосновый Бор).

Список докторов наук, работающих в ОХТИ, включает уже упоминавшегося докт. физ.-мат. наук И.А. Бурякова, который, в отличие от остальных сотрудников, получил докторскую степень еще на предыдущем месте работы, а в НИТИ способствовал расширению работ в области спектроскопии ионной подвижности.

Общая численность сотрудников ОХТИ в 80-ые годы прошлого века достигала 125 человек. Спустя сорок лет, в связи с выводом из эксплуатации в НИТИ ряда стендов-прототипов транспортных ЯЭУ и снижением объема научно-прикладных исследований, численность отдела понизилась. В настоящее время ОХТИ состоит из 97 человек, включая 12 кандидатов наук и 7 докторов: три доктора химических наук, одного доктор физико-математических наук и трех докторов технических наук (фото 3). Состав отдела формируется в основном выпускниками химического факультета СПбГУ и СПбГТУ (Технологический институт). В штатную структуру ОХТИ входят шесть производственно-исследовательских аналитических лабораторий:

– лаборатория химико-технологического контроля и исследований ВХР ЯЭУ, заведующий лабораторией – канд. техн. наук А.А. Змитродан;

– лаборатория инструментальных методов исследования ВХГР ЯЭУ, начальник лаборатории – Е.Е. Щербаков;

– лаборатория радиохимических технологий, заведующий лабораторией – докт. хим. наук В.Н. Епимахов;

– лаборатория метрологического обеспечения аналитического контроля начальник лаборатории – И.В. Чистяков;

– лаборатория методов, средств и систем радиационного и химического контроля, начальник лаборатории – В.Ф. Киреев;

– лаборатория оценки воздействия ЯЭУ на окружающую среду, заведующий лабораторией – канд. техн. наук Е.Б. Панкина.

В настоящее время основной тематикой ОХТИ является выполнение комплекса работ по химико-технологическому сопровождению экспериментальной отработки перспективных транспортных ядерных энергетических установок по следующим направлениям:

– исследования и отработка водно-химических и газовых режимов стендовых и объектовых ЯЭУ, выполнение химического, газового и радиохимического контроля технологических сред наземных стендов-прототипов, объектовых ЯЭУ и АЭС;

– разработка и совершенствование методик радиохимического анализа, химических и радиохимических технологий водоподготовки и водоочистки на объектах атомной и тепловой энергетики, обращения с радиоактивными отходами;

– разработка, конструирование, изготовление и испытания технических средств и методического обеспечения аналитического контроля водных и газовых сред на принципах хроматографии, электрохимии, масс-спектрометрии, спектрометрии ионной подвижности, проточного анализа, атомно-эмиссионной спектрометрии;

– обеспечение спектрометрического контроля и исследований ресурсных характеристик активных зон, процессов разгерметизации оболочек твэлов, массопереноса радиоактивных примесей по контурам стендовых ЯЭУ и АЭС, разработка и совершенствование методов и программно-технических средств радиационного контроля;

– коррозионно-химические исследования, материаловедческие испытания конструкционных материалов стендовых ЯЭУ, выполнение сертификационных и других технических анализов для нужд института;

– разработка и изготовление технических средств метрологического обеспечения контроля технологических сред на стендовых и объектовых ЯЭУ, проведение первичной и периодической поверки средств физико-химических измерений в соответствии с областью аккредитации;

– выполнение экологического мониторинга и оценки радиационного и химического воздействия ЯЭУ на окружающую среду, радиоэкологические исследования в соответствии с областью аккредитации;

– выполнение входного контроля веществ и материалов, технических анализов и испытаний, контроль химической загрязненности общепромышленных сбросов, воздуха на рабочих местах

Таблица 1. Полученные в Отделе химико-технологических исследований НИТИ им. А.П. Александрова оригинальные результаты

Результат	Литература, год первой публикации
Принципиально новый тип потенциометрического индикаторного электрода с хлоридной функцией (ПМСЭ), обеспечивающий рекордно низкие пределы определения хлоридов в воде	[12], 1978
Доказательство существования в водных растворах аквагидроксопероксокомплексов железа(III), обеспечивающих образование защитных коррозионных пленок из магнетита на поверхности сталей при их контакте с пероксидсодержащими водными растворами железа(III)	[15], 1979
Экспериментальное доказательство возможности осуществления процесса жидкостно-газовой хроматографии (ЖГХ), что в теоретическом плане явилось последним доказательством универсальности хроматографического способа осуществления процесса межфазного распределения, независимо от агрегатного состояния фаз, участвующих в нем, а в прикладном позволило реализовать наиболее эффективную схему пробоподготовки при анализе газов, растворенных в воде	[16], 1982
Методы электроосмотического концентрирования электрoзаряженных форм примесей из маломинерализованной воды и электроосмотической деионизации воды, что обеспечило возможность безреагентного концентрирования электрoзаряженных форм аналитов из маломинерализованных водных сред, а также их деионизации	[27], 1977
Метод разделения изотопов водорода на биполярном палладиевом электроде, позволяющий получить рекордно высокие коэффициенты разделения изотопов водорода	[30], 1987
Метод противоточного электромиграционного разделения ионов щелочных металлов, включая изотопические ионы лития в саморегулируемом режиме, что открыло возможность создания технологии разделения изотопов лития, альтернативной экологически опасной амальгамной технологии	[34], 1987

предприятия в соответствии с областью аккредитации;

– обеспечение функционирования системы управления качеством химического и радиохимического анализа, контроль за применением стандартизованных и аттестованных методик выполнения измерений, используемых в отделе для аналитического контроля.

Итоги научной деятельности ОХТИ НИТИ им. А.П. Александрова обобщены в табл. 1 и 2. В табл. 1 приведен перечень полученных оригинальных результатов с оценкой их значимости. В табл. 2 перечислены сформировавшиеся в ОХТИ научные направления.

Аналитический контроль и исследования водно-химического и газового режимов ядерных энергетических установок, радиационно-технологический и радиохимический анализ, решение задач реакторного материаловедения подразумевают оснащение лабораторий ОХТИ современным аналитическим оборудованием. Техническая оснащенность отдела представлена как собственными оригинальными разработками, так и серийными отечественными и зарубежными приборами. Не останавливаясь на перечислении распространенного общелабораторного оборудования, можно

выделить наиболее значимые средства измерений, формирующие аналитический парк ОХТИ.

С целью исследования состава водных сред и влияния следовых количеств примесей теплоносителей используется комплекс хроматографического оборудования, включающий ионные хроматографы “ICS 3000” (Dionex, США), “Стайер” (Аквилон, Россия), “JETchrom” (Портлаб, Россия) с кондуктометрическими и спектрофотометрическими детекторами.

Для анализа сложных смесей органических соединений используется хромато-масс-спектрометр “Shimadzu LCMS-2020”, состоящий из включенных последовательно высокоэффективного жидкостного хроматографа, диодно-матричного детектора (УФ-детектор), октопольно-квадрупольного масс-спектрометра с электроспреей ионизацией (ESI) и масс-селективным детектором, объединенных общим программным обеспечением. Комплекс “Shimadzu LCMS-2020” позволяет осуществить хроматографическое разделение смеси исследуемых веществ с УФ- и МС-детектированием индивидуальных компонентов (3D УФ-хроматограмма в диапазоне от 190 до 800 нм, масс-спектр в диапазоне от 10 до 2000 m/z).

Таблица 2. Новые научные направления, сформировавшиеся и развивающиеся в Отделе химико-технологических исследований НИТИ им. А.П. Александрова

Научные направления, сформировавшиеся за годы существования ОХТИ (1969–2021 гг.)	Литература, год первой публикации
Разработка монолитных композиционных блочных сорбентов	[2], 1974
Аналитическое направление непрерывной двумерной хроматографии на хроматографах с монолитным слоем сорбента на многоколоночных хроматографах	[3], 1975, [8], 1974, [9], 1981
Экспрессный радиохимический анализ, включающий ЭХРА и ЭМРА	[5], 1979
Расчетно-экспериментальный реперный метод определения радионуклидов в газоаэрозольных выбросах АЭС, обеспечивающий рекордно низкие пределы определения и рекордно малые временные затраты на проведение анализов	[8], 1981
Экстракционное выделение и разделение хлоридных комплексов платиновых металлов в экстракционных системах соляносерноокислые растворы—кислородсодержащие экстрагенты	[27], 1981
Пионерские исследования в области методов диализа и электродиализа через жидкие экстракционные мембраны	[17, 18], 1974
Изотопная масс-спектрометрия лития с нивелированием дискриминационных эффектов	[37], 1991
Новые инструментальные разработки на принципах СИП, включающие создание нескольких типов ОВВ	[38], 2011
Методы вещественного анализа:	[44], 1999
1. – гель-хроматографический анализ продуктов гидролиза железа(III) в водных средах;	[47], 2005
2. – фазовый анализ твердофазных форм ПК методом мессбауэровской спектроскопии,	
3. – обеспечившие автоклавное моделирование коррозионных процессов в замкнутых системах: сталь–водный раствор	
Исследования процесса высокоградиентной магнитной фильтрации для очистки водных сред от взвесей ПК, позволившие обосновать возможность создания высокоэффективных магнитных фильтров на основе постоянных магнитов	[60], 1988

Одними из наиболее информативных аналитических инструментов, применяемых как при оперативном контроле качества теплоносителей, так и в исследовательских целях, являются атомно-эмиссионные спектрометры с индуктивно связанной плазмой – модели “ICAP 4200” и “ICAP 6500” (Thermo Scientific, США). В арсенал лаборатории инструментальных методов исследований ВХР также входят анализаторы общего углерода и азота ТОС-V_{вр}, ТОС-L, TMN-L (Shimadzu, Япония), флуориметрические анализаторы жидкости “Флюорат-02-5М” производства ООО “Люмекс-АХК” (Россия).

Исследования состава газовых сред на содержание гелия, неона, аргона, криптона, ксенона, водорода, кислорода, азота, оксидов углерода, предельных, непредельных и ароматических углеводородов проводят с помощью хроматографических программно-аппаратных комплексов “Кристалл-2000М”, “Кристалл-5000” и хроматографа “Кристалл-Газохром-2000” производства ЗАО СКБ “Хроматэк” (Йошкар-Ола). Хроматографы укомплектованы детекторами: по теплопроводности (ДТП), пламенно-ионизационным

(ПИД) и термохимическим (ДТХ). Для оперативного контроля используются отечественные стационарные и переносные анализаторы кислорода “АКПМ” и водорода “АВП” (Альфа-Бассенс), газоанализаторы Ангарского приборостроительного завода “Оникс”, “Свет”.

Для решения задач материаловедения и исследования состава конструкционных материалов ОХТИ оснащен двумя растровыми электронными микроскопами – Hitachi TM-1000 и FEI Nova NanoSEM 450. В микроскопе TM-1000 исследуемый образец сканируется в условиях высокого вакуума сфокусированным пучком электронов, полученных при ускоряющем напряжении 15 кВ. Кратность увеличения микроскопа составляет от ×20 до ×10000. Фактически достигаемое разрешение 200 нм. Специальное программное обеспечение микроскопа TM-1000 позволяет создать трехмерное изображение поверхности для измерений параметров шероховатости и исследований рельефа. Микроскоп оснащен системой для рентгеноспектрального микроанализа Swift ED-TM EDX Oxford Instruments. Данная система позволяет качественно и количественно определять содержа-

ние в твердых образцах химических элементов в диапазоне от натрия до урана.

Микроскоп Nova NanoSEM 450 предназначен для получения электронно-микроскопических снимков поверхности твердых образцов с разрешением 1.0 нм. Рабочий диапазон увеличений микроскопа составляет от $\times 50$ до $\times 300000$. Микроскоп оснащен системами для проведения рентгено-спектрального и фазового микроанализа поверхности фирмы “Bruker” (США), а именно: системой энергодисперсионного рентгеновского микроанализа Quantax 400 на основе детектора XFlash 6/30, системой анализа дифракции отраженных электронов CrystAlign 400, волно-дисперсионным спектрометром XSense XS100-6S-36. Система микроанализа обеспечивает определение содержания в твердых образцах химических элементов в диапазоне от бериллия до америция, включая легкие элементы – углерод, азот и кислород. Система CrystAlign 400 позволяет в совокупности с результатами рентгеноспектрального микроанализа идентифицировать тип кристаллической структуры, её симметрию и распределение по поверхности на основе анализа карт дифракции отраженных электронов с использованием баз данных кристаллографической информации.

Металлографические исследования макро- и микроструктуры конструкционных материалов выполняются с использованием лазерного конфокального сканирующего микроскопа Olympus LEXT OLS-4000, оптического-эмиссионного спектрометра Oxford Instruments PMI-Master, волнодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализатора СПЕКТРОСКАН МАКС-GVM (НПО “Спектрон”, Россия), стереоскопического микроскопа Olympus SZX16.

Для проведения радиохимического контроля и исследований радионуклидного состава используются спектрометры альфа-, бета- и гамма-излучения, в том числе: полупроводниковый альфа-спектрометр ОСТЕТЕ-Plus (ORTEC, США), гамма-спектрометр на базе коаксиального ОЧГ-детектора Model GEM30P4 и процессора цифрового DSPec Plus, альфа-бета радиометр малофононовый УМФ-2000 (НПО “Доза”, Россия), альфа-бета радиометр спектрометрический TRI-CARB 2900 (Pribori Oy, Финляндия), спектрометр энергии гамма-излучения полупроводниковый ГАММА-1П (АО “АСПЕКТ”, Россия).

Говоря об оценке заслуг коллектива ОХТИ, необходимо отметить, что наивысшей наградой явилось решение Анатолия Петровича Александрова о назначении НИТИ в качестве головной организации в отрасли по проблемам химического и радиохимического контроля, что подтвердило высокий уровень и значимость выполненных в Отделе исследований для российской науки в атомной энергетике.

Признанием заслуг отдела явилось присуждение в 2003 г. группе его ведущих специалистов премии Правительства РФ за “Комплексное решение проблем радиоэкологической безопасности объектов атомной энергетики, промышленности и флота”. В состав коллектива исполнителей этой работы дополнительно вошли академик Б.Ф. Мясоедов, д. х. н. А.П. Новиков, представлявшие ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН, а также на то время технический директор Росэнергоатома Н.М. Сорокин. Наконец, в 2020 г. за достигнутые результаты по созданию и отработке перспективных транспортных ЯЭУ присуждена премия Правительства РФ начальнику Отдела к. т. н. И.В. Мирошниченко (фото 4). Аналогичным косвенным признанием заслуг Отдела явились награды его организатора Л.Н. Москвина – ордена “Трудового Красного Знамени” (1991 г.) и “Александра Невского” (2013 г.), а кроме того, присужденная в 2016 г. отраслевая награда Госкорпорации “Росатом” – нагрудный знак “Академик А.П. Александров”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москвин Л.Н., Царицына Л.Г. Непрерывное хроматографирование микрокомпонентных смесей веществ в жидко-жидкостной распределительной хроматографии // Радиохимия. 1968. Т. 10. № 6. С. 770.
2. Москвин Л.Н., Гумеров М.Ф., Горшков А.И., Ефимов А.А. Исследование блочных сорбентов для газо-адсорбционной хроматографии // Журн. прикл. химии. 1974. Т. 4. № 7. С. 1973.
3. Москвин Л.Н., Гумеров М.Ф., Горшков А.И. Непрерывный анализ состава неконденсирующихся газов в ядерных реакторах // Атомная энергия. 1975. Т. 39. № 1. С. 118.
4. Москвин Л.Н., Орленков И.О., Гумеров М.Ф., Горшков А.И., Леонтьев Г.Г. Непрерывное определение содержания газообразных продуктов деления в первом контуре ядерного реактора // Атомная энергия. 1977. Т. 43. № 3. С. 204.
5. Москвин Л.Н., Мирошников В.О., Мельников В.А. Экспрессный хроматографический радиохимический анализ // Радиохимия. 1979. Т. 21. № 2. С. 311.
6. Moskvina L.N., Yepimakhov V.N., Amosova O.A. Determination of polonium in aqueous media using metal-containing membranes // J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett. 1993. V. 175. № 6. P. 455.
7. Химические проблемы атомной энергетики. Т. 2. Методы радиохимического контроля и радиохимические технологии / Под ред. Москвина Л.Н. СПб: ВВМ, 2013.
8. Епимахов В.Н., Четвериков В.В., Москвин Л.Н. Радиохимический контроль водных и воздушных сред в атомной энергетике // Радиохимия. 2011. Т. 53. № 1. С. 3.
9. Москвин Л.Н., Леонтьев Г.Г., Некрестьянов С.Н. Комплексный оперативный контроль радиоактивных аэрозолей в выбросах АЭС // Атомная Энергия. 1981. Т. 51. № 4. С. 232.

10. Москвин Л.Н., Мельников В.А. Непрерывное двухмерное хроматографическое разделение рубидия и цезия // Атомная энергия. 1974. Т. 36. С. 420.
11. Горшков А.И., Гумеров М.Ф., Москвин Л.Н. Многоколочный газовый хроматограф непрерывного действия. Авт. свид. СССР № 817581. Оpubл. 1981.
12. Москвин Л.Н., Красноперов В.М., Вилков Н.Я., Годон Н.П., Омелянова С.Б., Фокина Р.Б. Хлоридная функция пористого металлического серебряного электрода // Электрохимия. 1978. Т. 14. № 9. С. 1415.
13. Москвин Л.Н., Вилков Н.Я., Красноперов В.М. Прямой потенциометрический контроль содержания хлорид-ионов в водном теплоносителе ядерных реакторов // Теплоэнергетика. 1979. № 9. С. 36.
14. Москвин Л.Н., Вилков Н.Я., Красноперов В.М., Годон Н.П., Омелянова С.Б. Прямой потенциометрический метод определения микроконцентраций хлорид-ионов в водных растворах // Журн. аналит. химии. 1981. Т. 36. № 4. С. 691.
15. Москвин Л.Н., Ефимов А.А., Томилов С.Б., Бредихин З.П., Горшков А.И. Влияние перекиси водорода на формы существования железа в водных растворах // Теплоэнергетика. 1979. № 5. С. 45.
16. Москвин Л.Н., Горшков А.И., Гумеров М.Ф. Жидкостно-газовая распределительная хроматография // Докл. АН СССР. 1982. Т. 265. № 2. С. 378.
17. Москвин Л.Н., Горшков А.И., Гумеров М.Ф., Леонтьева Е.И. Хроматографическое определение газов, растворенных в воде // Журн. аналит. химии. 1986. Т. 41. № 1. С. 146.
18. Москвин Л.Н., Красноперов В.М., Черешкевич Ю.Л. Электродиализный перенос хлоридных комплексов PdII, PtIV, RhIII, IrIV через трибутилфосфатную мембрану // Изв. Сиб. Отд. АН СССР, сер. Хим. 1974. № 2. С. 53.
19. Москвин Л.Н., Красноперов В.И., Григорьев Г.Л. Разделение урана и продуктов деления с помощью жидкой экстракционной мембраны // Радиохимия. 1976. Т. 18. № 6. С. 251.
20. Москвин Л.Н., Шматко А.Г., Красноперов В.М. Механизм электродиализного переноса ионов через жидкую экстракционную мембрану // Электрохимия. 1986. Т. 22. № 8. С. 1109.
21. Москвин Л.Н., Калинин Н.Н., Годон Л.А. Политетрафторэтиленовые мембраны и их электрокинетические свойства // Журн. прикл. химии. 1973. Т. 45. № 16. С. 1468.
22. Москвин Л.Н., Калинин Н.Н., Годон Л.А. Электроосмотическое концентрирование ионов из маломинерализованных вод // Журн. аналит. химии. 1977. Т. 32. С. 1809.
23. Москвин Л.Н., Гурский В.С., Епимахова Л.В. Электроосмотическое концентрирование катионов и анионов для анализа воды высокой чистоты // Журн. аналит. химии. 1992. Т. 47. № 7. С. 1265.
24. Москвин Л.Н., Епимахова Л.В., Красноперов В.М., Гурский В.С. Безреагентное электроосмотическое концентрирование для ионохроматографического определения анионов // Журн. аналит. химии. 1989. Т. 44. № 11. С. 1995.
25. Москвин Л.Н., Годон Л.А., Епимахова Л.В. Глубокая очистка воды электроосмотическим методом // Журн. прикл. химии. 1986. № 3. С. 527.
26. Москвин Л.Н., Григорьев Г.Л., Красноперов В.М. Экстракция платины IV и палладия II трибутилфосфатом из смешанных солянокисло-сернокислых растворов // Докл. АН СССР. 1981. Т. 257. № 5. С. 1183.
27. Москвин Л.Н., Григорьев Г.Л., Красноперов В.М. Экстракция осмия IV трибутилфосфатом из солянокисло-сернокислых растворов // Журн. неорг. химии. 1983. Т. 28. № 12. С. 3119.
28. Москвин Л.Н., Григорьев Г.Л., Красноперов В.М. Экстракционно-хроматографическое выделение Pt(IV) и Pd(II) // Журн. аналит. химии. 1982. Т. 37. № 5. С. 942.
29. Москвин Л.Н., Григорьев Г.Л., Мозжухин А.В., Орлов А.М. Экстракция Pd(II) и Pt(IV) концентрированными растворами триоктилфосфиноксида из солянокислосернокислых растворов // Докл. АН СССР. 1987. Т. 292. № 4. С. 884.
30. Москвин Л.Н., Гурский В.С. Перенос изотопов водорода через биполярный диффузный электрод в щелочных растворах // Электрохимия. 1985. Т. 20. № 5. С. 620.
31. Москвин Л.Н., Гурский В.С. Перенос изотопов водорода через биполярный водородопроницаемый электрод // Радиохимия. 1987. Т. 29. № 5. С. 686.
32. Москвин Л.Н., Катрузов А.И., Гурский В.С. Электромиграционное разделение изотопических ионов в саморегулируемом противоточном режиме // Радиохимия. 1987. Т. 29. № 4. С. 515.
33. Чилипенко Л.Л., Мацаев В.Т., Мирошниченко И.В. Влияние дискриминационных эффектов в источнике с поверхностной ионизацией на погрешность масс-спектрометрического анализа // Журн. аналит. химии. 1991. Т. 46. № 3. С. 485.
34. Буяков И.А. Обнаружение взрывчатых веществ методом спектрометрии ионной подвижности // Журн. аналит. химии. 2011. Т. 66. № 8. С. 788.
35. Буяков И.А., Буяков Т.И., Мацаев В.Т. Масс-чувствительные микро- и наносенсоры для обнаружения паров взрывчатых и сопутствующих им веществ // Журн. аналит. химии. 2014. Т. 69. № 4. С. 339.
36. Буяков И.А., Буяков Т.И., Мацаев В.Т. Оптические химические сенсоры для обнаружения взрывчатых и сопутствующих им веществ // Журн. аналит. химии. 2014. Т. 69. № 7. С. 683.
37. Буяков И.А., Буяков Т.И., Мацаев В.Т. Электрические, электрохимические и термометрические сенсоры для обнаружения взрывчатых веществ // Журн. аналит. химии. 2016. Т. 71. № 3. С. 246.
38. Efimov A.A., Moskvina L.N., Rykhteev O.Yu. Oxidation of steel surfaces in water solution // J. Corrosion. 2005. V. 61. № 4. P. 317.
39. Калямин А.В., Москвин Л.Н. Гель-фильтрационная хроматография в неорганическом анализе // Журн. аналит. химии. 1990. Т. 45. № 2. С. 213.
40. Пыхтеев О.Ю., Ефимов А.А., Москвин Л.Н. Гидролиз аквакомплексов железа(III) // Журн. прикл. химии. 1999. Т. 72. № 1. С. 11.

41. *Пыхтеев О.Ю., Ефимов А.А., Москвин Л.Н.* Ультрадисперсные гидролитические полимеры железа(III) – предшественники коррозионных отложений в контурах АЭС с РБМК // Теплоэнергетика. 2001. № 8. С. 9.
42. *Москвин Л.Н., Ефимов А.А., Пыхтеев О.Ю., Семенов В.Г.* Вещественный анализ продуктов коррозии сталей в водных теплоносителях тепловых и ядерных энергетических установок // Журн. аналит. химии. 2005. Т. 60. № 12. С. 1308.
43. *Семенов В.Г., Москвин Л.Н., Ефимов А.А.* Аналитические возможности мёссбауэровской спектроскопии // Успехи химии. 2006. Т. 75. № 4. С. 354.
44. *Ефимов А.А., Семенов В.Г., Москвин Л.Н., Гусев Б.А.* Расширение возможностей мёссбауэровской спектроскопии в исследовании коррозии сталей на объектах атомной энергетики // Радиохимия. 2011. Т. 53. № 1. С. 20.
45. Лабораторный химический анализ водных сред атомных электростанций с водо-водяным энергетическим реактором. Методики выполнений измерений. 2014. СТО 1.1.1.07.003.0727-2014.
46. *Харитонова Е.Ю., Гурский В.С.* Ионохроматографическое определение следовых количеств анионов с прямым вводом проб // Журн. аналит. химии. 2000. Т. 55. № 10. С. 1086.
47. *Воробьева И.С., Харитонова Е.Ю., Гурский В.С.* Определение анионов в теплоносителе 1 контура АЭС с борным регулированием методом ионной хроматографии // Заводск. лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 6. С. 21.
48. *Харитонова Е.Ю., Гурский В.С.* Ионохроматографическое определение моноэтаноламина и морфолина в водных средах атомных электростанций // Заводск. лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79 № 9. С. 15.
49. *Харитонова Е.Ю., Гурский В.С.* Методические и метрологические аспекты обеспечения ионохроматографического определения микроконцентраций аналитов // Технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ. 2017. № 2(8). С. 40.
50. *Гурский В.С., Куртова О.Ю.* Генерация гидроксидного элюента в ионной хроматографии // Аналитика и контроль. 2013. № 1. С. 76.
51. *Харитонова Е.Ю., Гурский В.С.* Проточно-инжекционное определение борной кислоты с кондуктометрическим детектированием // Заводск. лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 12. С. 20.
52. *Мирошниченко И.В., Пыхтеев О.Ю., Москвин Л.Н.* Методика проточно-инжекционного турбидиметрического определения хлорид- и сульфат-ионов в водных теплоносителях ядерных энергетических установок // Заводск. лаборатория. Диагностика материалов. 2011. Т. 77. № 4. С. 4.
53. *Мирошниченко И.В., Москвин Л.Н., Пыхтеев О.Ю., Костин М.М.* Методика проточного определения урана в технологических средах ЯЭУ // Вестник Санкт-Петербургского ун-та. Сер. 4. 2012. Вып. 2. С. 96.
54. *Мирошниченко И.В., Москвин Л.Н.* Совершенствование химико-аналитического контроля жидких радиоактивных сред на принципах проточно-инжекционного анализа // Научное приборостроение. 2011. Т. 21. № 2. С. 120.
55. *Мирошниченко И.В., Пыхтеев О.Ю.* Контроль химического состава жидких радиоактивных отходов в местах базирования ВМФ / Научно-технический сборник “Экология и атомная энергетика”. Сосновый Бор: Изд. ЛАЭС, 2003. Вып. 1. С. 65.
56. *Гусев Б.А., Ефимов А.А., Ларина Р.С., Михайлов Н.Н., Москвин Л.Н., Смирнова М.Н., Черемных П.А.* Исследование высокоградиентных магнитных фильтров для очистки воды от парамагнитных частиц // Атомная энергия. 1988. Т. 64. № 1. С. 69.