

УДК 677.499

DOI 10.47367/0021-3497\_2021\_1\_73

**НОВЫЕ НЕТКАНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ  
ДЛЯ АНАЛИЗА И ЗАЩИТЫ ОТ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ\***

**NEW NONWOVENS AND THEIR APPLICATION  
FOR ANALYSIS AND PROTECTION AGAINST RADIOACTIVE AEROSOLS**

*В.С. БЕЛГОРОДСКИЙ, А.К. БУДЫКА, Е.С. БОКОВА, И.А. КАПУСТИН,  
Ю.Н. ФИЛАТОВ, И.Ю. ФИЛАТОВ, Л.А. ИВАНОВ, Ю.Н.МАРТЫНИУК,  
В.С. АСТАХОВ, А.А. ЕКИДИН*

*V.S. BELGORODSKI, A. K. BUDYKA, E.S. BOKOVA, I.A. KAPUSTIN,  
YU.N. FILATOV, I.Y. FILATOV, L.A. IVANOV, YU.N. MARTYNYUK,  
V.S. ASTAKHOV, A.A. EKIDIN*

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство),

Госкорпорация "Росатом",  
ООО «Научно-производственный центр "Электроспиннинг",  
ООО Технологии электроформования,  
Российская инженерная академия,  
ООО "Доза",  
ООО "Респираторный комплекс",  
Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН)

(Russian state University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art),  
State Corporation "Rosatom",  
Research and Production Center "Electrospinning",  
LLC Electroforming Technologies,  
Russian Academy of Engineering,  
LLC "Doza",  
LLC "Respiratory Complex",  
Institute of Industrial Ecology of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences)

E-mail:esbokova@ya.ru

*В работе рассмотрены методы электроформования и их применение для производства микро- и нановолокнистых фильтрующих материалов нового поколения. Описаны разработанные аналитические нановолокнистые фильтрующие материалы для систем обнаружения вредных веществ, в том числе радиоактивных; высокоэффективные электретенные фильтрующие материалы для средств индивидуальной защиты; высокоэффективные фильтрующие материалы для систем очистки выбросов. Приведены области их применения и основные потребители.*

\* Авторы выражают благодарность руководителям Госкорпорации "Росатом", Концерна Росэнергоатом, всем российским АЭС, и другим организациям за содействие в проводимой работе и высокую оценку ее результатов.

*The paper considers electroforming methods and their application for the production of micro - and nanofiber filter materials of a new generation. The developed analytical thin-fiber filter materials for detection systems of harmful substances, including radioactive ones; high-performance electret filter materials for personal protective equipment; high-performance filter materials for emission cleaning systems are described. The areas of their application and main consumers are given.*

**Ключевые слова:** электроформование, нетканые материалы, микроволокна, нановолокна, фильтрация, аэрозоли, респираторы, приборы.

**Keywords:** electroforming, non-woven materials, microfibers, nanofibers, filtration, aerosols, respirators, devices.

Одним из критериев оценки конкурентоспособности промышленных отраслей и фактором экономической независимости страны является уровень современного производства и эффективность использования передовых технологий и инновационных материалов. Одной из таких отраслей является атомная энергетика, которая в настоящее время, несмотря на резонансные аварии (Чернобыль –1986 г., "Фукусима" – 2011 г.), переживает период устойчивого развития, о чем свидетельствует стратегия развития МАГАТЭ на период до 2050 г. [1], [2].

Несмотря на неоспоримые преимущества ядерной энергетике, ее развитие сопряжено с рядом объективных трудностей, среди которых высокие риски негативного влияния на экологию, жизнедеятельность гражданского населения и обслуживающего персонала. Это требует постоянных системных комплексных мероприятий по мониторингу выбросов, их очистке, а также применению высокоэффективных средств индивидуальной защиты персонала предприятий и населения.

Решить вышеперечисленные задачи позволило тесное сотрудничество текстильной промышленности, в рамках которой были разработаны и произведены высокоэффективные аналитические фильтрующие материалы нового поколения, и приборостроительной отрасли, где с использованием этих материалов были спроектированы и внедрены новые приборы и установки аэрозольного контроля.

Результаты настоящей работы широко используются на предприятиях: ГК "Росатом", в том числе АО "Концерн Росэнерго-

атом" (10 атомных станций РФ), ОАО "ТВЭЛ", ФГУП "ГНЦ РФ - ФЭИ", ЗАО "Атомстрой экспорт", ФГБУ "НИЦ "Курчатовский институт", ФГУП "РФЯЦ-ВНИИТФ", АО Объединенная судостроительная корпорация, ФГУП "Атомфлот", ФГУП "Горно-Химический Комбинат", службы специального контроля Министерства обороны РФ, МЧС, Росгидромет и др. А также на АЭС Бушер (Иран), АЭС Куданкулам (Индия), Белорусская АЭС, Армянская АЭС (Армения), АЭС Козлодуй (Болгария), Игналинская АЭС (Литва), Тяньваньская АЭС (Китай). Среднегодовой экономический эффект от внедрения разработанных материалов и приборов составляет 850 млн. руб. в год.

*Применение технологии электроформования для разработки высокоэффективных фильтрующих материалов*

Все материалы, представленные в работе, получены методом электроформования волокон, который, начиная с 50-х годов XX века, использовался в бывшем СССР для выпуска фильтрующих материалов под торговым названием ФП (Фильтры Петрянова). Это были материалы на основе микроволокон с диаметром от 0,5 до 10 мкм, разработанные в лаборатории аэрозолей Физико-химического института имени Л.Я. Карпова [3], промышленное производство которых осуществлялось на заводе в г. Силламяэ (Эстония) [4]. Одной из наиболее емких областей применения ФП был радиохимический, радиографический и радиометрический анализ, а также анализ спектров радиоактивных аэрозолей.

Прогресс в развитии ядерной энергетики, направленный, в том числе, на ужесточение требований к радиационному контролю и минимизацию выбросов техногенных радиоактивных аэрозолей в атмосферу, которые в настоящее время находятся на уровне фоновых значений [1], [2], [5], поставил перед разработчиками и производителями фильтрующих материалов новые задачи. Прежде всего это повышение эффективности фильтрации и точности аналитических измерений при обеспечении высокой производительности материалов и оборудования.

Ответом на этот вызов явились разработанные за последнее десятилетие качественно новые аналитические фильтрующие материалы, основу которых составляют полимерные волокна наноразмерного ряда, полученные методом электроформования. В основу разработок были положены фундаментальные закономерности технологии электроформования, а также ее новые возможности, связанные с современными разновидностями метода и возможностями применения нового оборудования. Сравнительный анализ различных промышленных методов электроформования, таких как электрокапиллярный, электроаэродинамический, электроцентробежный и Nanospider, в совокупности с применением широкого круга полимеров (полиамид-6/66, хлорированный поливинилхлорид с добавкой полиметилметакрилата, фторопласт Ф-42 и др.), подбором растворителей и модификаторов (смесь этиловый спирт/ пропионовая кислота/уксусная кислота/вода; диметилформамид; толуол; смеси диметилформамид/толуол; диметилформамид/этилацет; диметилформамид/бутилацетат и др.), варьированием технологических параметров процесса электроформования позволили на практике реализовать принципы направленного структурообразования для получения материалов с прогнозируемой структурой и свойствами для конкретных областей применения [6...11].

Перечисленные методы электроформования и их сочетание в различных комбинациях, применительно к конкретным прядильным растворам, позволили создать ряд

высокоэффективных аналитических нановолокнистых фильтрующих материалов и систем обнаружения вредных веществ, в том числе радиоактивных; высокоэффективные электретенные фильтрующие материалы для изготовления средств индивидуальной защиты; высокоэффективные фильтрующие материалы для систем очистки выбросов.

*Нановолокнистые нетканые материалы для анализа техногенных аэрозолей, в том числе радиоактивных*

Аналитические нано- и микроволокнистые материалы условно можно разделить на материалы для радиометрического анализа радиоактивных частиц в системах непрерывного и периодического контроля; материалы для оценки эффективности очистки фильтрующих систем вентиляции; материалы для мониторинга атмосферных аэрозолей и проведения радиационно-технических обследований объектов атомной промышленности; а также материалы для спектроскопического анализа  $\alpha$ -активных частиц.

Весь указанный спектр материалов явился предметом проведенных исследований, в рамках которых были разработаны качественно новые аналитические фильтрующие материалы.

Одними из таких материалов являются материал ЛФАБ, содержащий в своем составе нановолокна диаметром порядка 150 нм, и его усовершенствованная версия материал АФА-РМВ на основе нановолокон диаметром менее 100 нм, предназначенные для объемной фильтрации. Отличительной особенностью обоих материалов является многослойная структура, включающая слои из микроволокон (внешние) и слои из волокон наноразмерного ряда (внутренние). Такая морфология, в совокупности с содержанием в материале электростатически заряженных микроволокон, обеспечивает эффективность фильтрации не менее 99,5 % по наиболее проникающим частицам для материала ЛФАБ и 99,95 % для материала АФА-РМВ. Последний полностью соответствует требованию Ростехнадзора, согласно которому для оценки эффективности фильтрующих систем вентиляции на

атомных станциях необходимо использовать аналитические материалы с эффективностью фильтрации аэрозолей не менее 99,95 % по наиболее проникающим частицам [5].

Применение нановолокон в аналитических средствах контроля позволило совершить качественный научно-технический скачок в исследовании  $\alpha$ -активных аэрозолей, где основным принципом работы нетканого материала является поверхностная фильтрация, эффективность которой зависит от способности материала улавливать основное количество аэрозольных частиц в очень тонком фильтрующем слое ( $\leq 10$  мкм), когда поглощение излучения является не столь существенным, чтобы приводить к ошибкам при анализе проб [3].



Рис. 1

Для этих целей разработано новое поколение аналитических материалов ЛФС и ЛФАС, содержащих в фильтрующем слое волокна диаметром порядка 80...100 нм, нанесенных на нетканую подложку из волокон диаметром порядка 5...10 мкм, не имеющих электростатического заряда (рис. 1 – нетканый материал ЛФАС на основе нановолокнистого слоя, нанесенного на микроволокнистую подложку). Эффективность фильтрации частиц диаметром 0,3 мкм составляет более 99 % в диапазоне скоростей от 1 до 170 см/с. Уменьшение диаметра волокон рабочего слоя более чем в 5 раз, по сравнению с ранее используемыми аналогами (ЛФС-2), позволяет снизить тол-

щину фильтрующего слоя до 2...3 мкм и значительно повысить точность анализа [7], [8], [12].

В целом, в рамках работы, создана линейка аналитических фильтрующих материалов нового поколения с применением нановолокон: для мониторинга атмосферных аэрозолей, в том числе радиоактивных, (фильтрующий материал ФПС-ВГ, сорбционно-фильтрующий материал СФМ-2И-ПС); для радиометрического анализа радиоактивных частиц (материалы АФА-РМП, НЭЛ, ЛФАБ); для оценки эффективности фильтрующих систем вентиляции (АФА-РМВ); для спектрометрического анализа альфа-активных частиц (АФА-РСП, ЛФС, ЛФАС) [7...10], [13...19]. Результаты работы были апробированы и внедрен 450,0 млн. руб.

*Использование нетканых материалов для приборно-методического обеспечения комплексной системы мониторинга выбросов радионуклидов на предприятиях Госкорпорации Росатом.*

Фильтрующие материалы нового поколения, содержащие нановолокна, позволили осуществить проектирование и производство ряда приборов и установок с принципиально новыми возможностями. В рамках выполненной работы ООО "Научно-производственное предприятие Доза" (г. Зеленоград) создало более 600 рабочих мест. Были разработаны и внедрены в производство ряд комплексных решений по мониторингу выбросов радионуклидов на предприятиях Госкорпорации "Росатом".

Ниже приведен ряд приборов и установок, оснащенных разработанными неткаными материалами.

На рис. 2 показаны установки радиометрические УДА-1АБ и УДИ -1АБ: а) - внешний вид установки УДА-1АБ; б) - аналитическая лента ЛФАС-4-50; в) - внешний вид установки УДА-1АБ; г) - йодная кассета с сорбирующим материалом СФЛ-2И.

Установка радиометрическая УДА-1АБ (рис. 2-а) для измерения объемной активности аэрозолей с функцией разделения естественных и техногенных радионуклидов, широко используемая на предприятиях

топливного цикла и АЭС. Установка оснащена аналитической лентой ЛФАС-4-50 (рис. 2-б) [7], [12]. Выпущено более 1500

шт., для более чем 140 объектов ГК "Росатом".

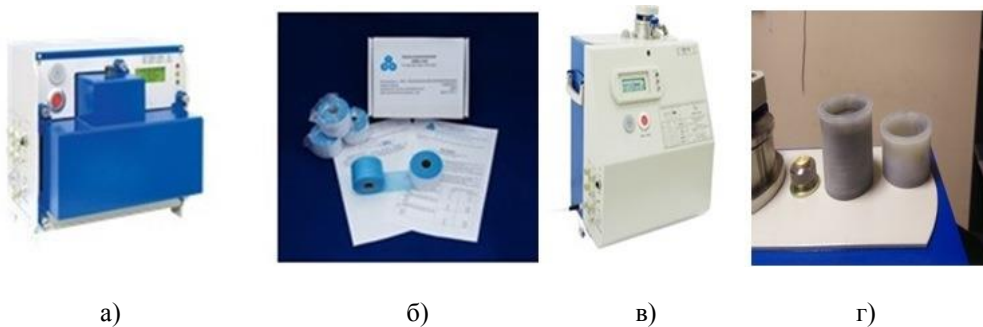


Рис. 2

Установка радиометрическая УДИ-1Б (рис. 2-в) для измерения объемной активности всех форм радиоактивного йода, широко используемая на АЭС. Установка оснащена йодной кассетой, в состав которой входит сорбирующий материал СФЛ-2И

(рис. 2-г), предназначенный для улавливания газообразной фракции радиоактивного йода. Выпущено более 120 шт. для всех российских АЭС, а также АЭС Бушер (Иран), АЭС Куданкулам (Индия).



Рис. 3

На рис. 3: а) – установка радиометрическая УДИ-2, снабженная йодной кассетой на основе материала СФЛ-2И; б) – пороговый сигнализатор радиоактивных аэрозолей ИРАА-01Д, снабженный новым поколением фильтров АФА-РСП-20; в) – индивидуальный пробоотборник воздуха ИПВ-01Д, снабженный новым поколением фильтров АФА-РСП-20.

Установка радиометрическая УДИ-2 (рис. 3-а) для измерения объемной активности всех форм радиоактивного йода, используемая на всех российских АЭС для аварийного контроля. Оснащена сорбирующим материалом СФЛ-2И-50. Выпущено более 30 шт. для всех российских АЭС для улавливания аэрозолей, а также газообразной фракции радиоактивного йода.

Пороговый сигнализатор радиоактивных аэрозолей ИРАА-01Д (рис. 3-б), предназначенный для измерения объемной активности аэрозолей, содержащих изотопы урана в воздухе рабочей зоны и сигнализации о превышении порогов. Оснащается новым поколением фильтров АФА-РСП-20, предназначенных для использования в приборах для отдельного измерения  $\alpha$ -радиоактивных элементов и изотопов методами спектрометрии  $\alpha$ -излучения уловленного осадка. Выпускаются различных типовых размеров (3, 10, 20, 40 см<sup>2</sup>).

Индивидуальный пробоотборник воздуха ИПВ-01Д (рис. 3-в), предназначенный для контроля поступления активности в легкие человека. Оснащается новым поколением фильтров АФА-РСП-20 и АФА-СИ-

20 для отбора проб воздуха и контроля объемной активности аэрозолей и содержания йода в воздухе рабочей зоны. Выпущено более 100 шт.

Разработанное приборно-методическое обеспечение комплексной системы мониторинга выбросов радионуклидов позволило решить и проблему нормирования выбросов с атомных станций. [20], [21]. Разработка отечественных приборов контроля радиоактивных аэрозолей и газов нового поколения, основанных на применении аналитических фильтрующих нановолокнистых материалов, позволила занять свою нишу на рынке РФ, а также вести успешную конкурентную борьбу на международных рынках.

Экономический эффект от внедрения новых комплексных систем мониторинга аэрозолей за 2011 - 2019 гг. составил более 5,0 млрд. руб.

*Высокоэффективные электретенные фильтрующие материалы и респираторы на их основе*

Как показали последние события, связанные с пандемией коронавируса COVID-19, для населения должны производиться и

быть доступными портативные средства индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) в виде облегченных респираторов, имеющих более низкое сопротивление дыханию, чем промышленные респираторы и противогазы.

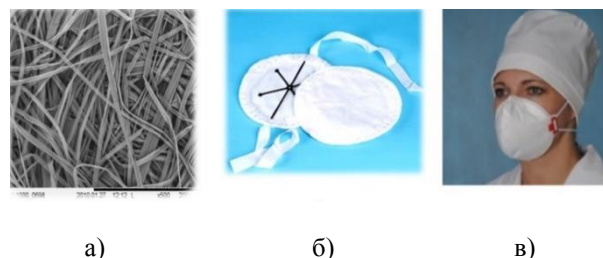


Рис. 4

В настоящей работе разработан новый высокоэффективный респираторный материал ФПК-70-08 (рис. 4-а), который представляет собой усовершенствованную версию серийного выпускаемого материала ФПП-15-1,5 для респиратора "Лепесток" (рис. 4-б, в) и отличается от последнего меньшим аэродинамическим сопротивлением и более высоким коэффициентом фильтрующего действия (табл.1) [22], [23]

Таблица 1

Показатель эффективности	ФПП-15-1,5	ФПК-70-08
Эффективность фильтрации (DOP 0,4 мкм-6,3 см/с),%	99,7	99,7
Аэродинамическое сопротивление при 1см/с, ПА	18,5	8,0
Коэффициент фильтрующего действия, мм вод.ст. <sup>-1</sup>	1,9	3,0

Отличительными особенностями материала является использование для его производства волокон с большим поверхностным электростатическим зарядом, что улучшает эффективность фильтрации за счет механизма электростатического притяжения частиц без увеличения перепада давления и обеспечивает высокую эффективность фильтрации при низком сопротивлении воздуха; выбор электроцентрированной технологии электроформования, а также увеличение диаметра волокон до 7–10 мкм [24], [25...27].

Технология получения респираторного фильтрующего материала была внедрена в ОАО "ЭХМЗ им. Н.Д. Зелинского" (г. Электросталь Московской области) и в АО "Сорбент" (г. Пермь Пермского края). В

настоящее время производство респираторов на основе разработанного материала осуществляется в АО "Сорбент" (г. Пермь Пермского края), ООО "Респираторный комплекс" (г. Санкт-Петербург), АО "Кимрская фабрика имени Горького" (г. Кимры Тверской области).

*Высокоэффективные нановолокнистые фильтрующие материалы и системы очистки выбросов на их основе*

В рамках проекта были разработаны высокоэффективные фильтрующие материалы для оснащения фильтров очистки промышленных выбросов, в том числе содержащих радиоактивные отходы. Применение в материалах нановолокон и бесепараторных технологий при сборке фильтров позволило сократить объем фильтрующего

материала при увеличении эффективности фильтрации и уменьшении сопротивления потока воздуха в заданных габаритных объемах фильтра. Это дало возможность оснащать фильтры различными дополнительными ступенями очистки.

В одном случае это может быть ступень предварительной фильтрации воздуха, оснащенная нетканым фильтрующим материалом с диаметром волокон 15...40 мкм, что позволяет увеличить ресурс аэрозольного фильтра в 3...4 раза и получить значительный экономический эффект для эксплуатирующих предприятий. В другом случае для нужд атомной промышленности фильтр может быть оснащен сорбционной ступенью, что позволяет проводить очистку выбросов от газообразных продуктов радиоактивного йода, значительно снижает дозовую нагрузку на население РФ, проживающее вблизи объектов атомной промышленности [28].

Результаты работы были апробированы и внедрены в производство фильтров очистки воздуха на основе высокоэффективных фильтрующих материалов, содержащих нановолокна, на ООО "Аэрофильтр" (г. Обнинск Калужской области) и АО "Фильтр" (г. Товарково Калужской области).

Кроме вышеперечисленного разработанные нано- и микроволокнистые материалы и системы очистки выбросов на их основе применяются в различных областях, таких как медицина, биотехнология, авиационная промышленность, строительство [29...33].

В настоящее время потребителями разработанных фильтров являются все атомные станции концерна Росэнергоатом (10), Армянская АЭС (Армения), АЭС Козлодуй (Болгария), Игналинская АЭС (Литва), АЭС Бушер (Иран), Тяньваньская АЭС (Китай), ОАО "ТВЭЛ", ФГУП "ГНЦ РФ - ФЭИ", ЗАО "Атомстрой экспорт", ФГБУ "НИЦ "Курчатовский институт", ФГУП "РФЯЦ-ВНИИТФ", АО Объединенная судостроительная корпорация, ФГУП "Атомфлот", ФГУП "Горно-Химический Комбинат" и еще более 20 предприятий РФ.

Экономический эффект от внедрения фильтров нового поколения составляет более 300,0 млн. руб. в год.

## ВЫВОДЫ

В работе приведены результаты научных исследований и практического применения высокоэффективных нановолокнистых фильтрующих материалов, полученных методом электроформования из широкого круга полимеров. Показан вклад структурных особенностей разработанных материалов в эффективность их применения, повышение точности анализа радиоактивных аэрозолей и коэффициента фильтрации. Представлены материалы, предназначенные для радиометрического анализа радиоактивных частиц в системах непрерывного и периодического контроля; материалы для мониторинга атмосферных аэрозолей и проведения радиационно-технических обследований объектов атомной промышленности; материалы для спектроскопического анализа альфа-активных частиц в системах непрерывного и периодического контроля, высокоэффективные электреты фильтрующие материалы для изготовления средств индивидуальной защиты, а также материалы для оценки эффективности очистки фильтрующих систем вентиляции. Внедрение новых разработок имеет важное стратегическое, народно-хозяйственное значение, позволяет значительно снизить вредные радиоактивные выбросы, а также минимизировать их влияние на экологическую ситуацию и сбережение здоровья населения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. International Atomic Energy Agency, 'Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050: 2018 Edition', [www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/13412/Energy-Electricity-and-Nuclear-Power-Estimates-for-the-Period-up-to-2050](http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/13412/Energy-Electricity-and-Nuclear-Power-Estimates-for-the-Period-up-to-2050)
2. International Atomic Energy Agency, 'New IAEA Energy Projections See Possible Shrinking Role for Nuclear Power' 10 Sept 2018, <http://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/new-iaea-energy-projections-see-possible-shrinking-role-for-nuclear-power>

3. Будака А.К., Борисов Н.Б. Волокнистые фильтры для контроля загрязнения воздушной среды. – М.: ИздАт, 2008.
4. Филатов Ю.Н. Электроформование волокнистых материалов (ЭФВ-процесс)/ Под ред. В.Н. Кириченко. – М.: Нефть и газ, 1997.
5. Капустин И.А., Филатов Ю.Н., Филатов И.Ю., Рагуткин А.В. Особенности мониторинга радиоактивных аэрозолей и газов. Тенденции развития аналитических фильтрующих материалов // Вопросы радиационной безопасности. – 2016, № 3. С.37...42.
6. Филатов И.Ю., Иванов Л.А., Бокова Е.С., Смольская М.А., Филатов Ю.Н., Капустин И.А. Сравнение различных методов электроформования нановолокон // Дизайн и технологии. – 2019, №72 (114). С.16...22.
7. Филатов Ю.Н., Филатов И.Ю., Капустин И.А. Фильтрующий материал, способ его получения и применение. Патент на изобретение RU 2477165 С1, 10.03.2013. Заявка № 2012109488/05 от 14.03.2012.
8. Филатов Ю.Н., Филатов И.Ю., Капустин И.А. Фильтрующий материал. Патент на изобретение RU 2414950 С1, 27.03.2011. Заявка № 2009126033/05 от 09.07.2009.
9. Филатов Ю.Н., Будака А.К., Мартынюк Ю.Н., Филатов И.Ю. Фильтрующий материал. Патент на изобретение RU 2284846 С2, 10.10.2006. Заявка №2004137318/15 от 21.12.2004.
10. Капустин И.А., Филатов И.Ю., Филатов Ю.Н., Архипов С.Ю., Огородников Б.И., Будака А.К. Фильтрующий материал и способ его получения. Патент на изобретение RU 2349369 С1, 20.03.2009. Заявка № 2007139574/15 от 26.10.2007.
11. Капустин И.А. Разработка технологии электроформования волокнистых материалов с пониженной температурой деструкции для анализа атмосферы: Дис....канд. техн. наук. – М., 2014.
12. Филатов И.Ю., Филатов Ю.Н., Будака А.К., Мамагулашвили В.Г., Мартынюк Ю.Н. Нановолокнистый материал ФП для контроля радиоактивных аэрозолей. Анри. – 2009, № 3. С. 38...41.
13. Kapustin I.A., Filatov I.Y., Filatov Y.N. Development of production technology for non-woven filtering materials for monitoring atmospheric aerosols at RF radionuclide stations // Fibre Chemistry. – V. 44, № 5, 2013. P. 299...303.
14. Kapustin I.A., Filatov I.Y., Filatov Y.N. Thermal destruction of nonwoven filter materials from polystyrene and polymethyl methacrylate // Fibre Chemistry. – V. 44, № 6, 2013. P. 377...380.
15. Budyka, A.K., Ogorodnikov B.I., Skitovich V.I. Filter pack technique for determination of aerosol particle sizes // J. Aerosol Sci – Vol. 24. Suppl/ 1, 1993. P.205...206.
16. Ekidin A.A., Vasyanovich M.E., Antonov K.L., Markov D.V., Markova Z.D., Kapustin I.A., Filatov I.Y. Control of aerosol and gaseous compounds of iodine isotopes in the ventilation system of the IVV-2M reactor facility // Physics of Atomic Nuclei. – V. 81, № 10, 2018. P. 1494...1498.
17. Ekidin A.A., Антонов К.Л., Васянович М.Е., Капустин И.А., Филатов И.Ю. Поступление радиоактивного йода в атмосферу при нормальной эксплуатации АЭС // Радиохимия. – 2019, № 3. С.251...262.
18. Ekidin A.A., Vasyanovich M.E., Markov D.V., Bil'danov R.G., Filatov Y.N., Kapustin I.A. Determination of the physicochemical forms of iodine isotopes in the IVV-2M reactor ventilation system // Atomic Energy. – V. 121, № 4, 2017. P. 308...311.
19. Ekidin A.A., Васянович М.Е., Капустин И.А., Филатов И.Ю. Совершенствование методов контроля йода-131 в выбросах атомных станций // Вопросы радиационной безопасности. – 2016, № 3 (83). С. 17...24.
20. Vasyanovich M.E., Ekidin A.A., Vasilyev A.V., Kryshev A.I. et al. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population // Journal of Environmental Radioactivity. – Vol. 208-209, 2019. 106006.
21. Vasyanovich M.E., Vasilyev A.V., Ekidin A.A., Kapustin I.A. et al. Special monitoring results for determination of radionuclide composition of Russian NPP atmospheric releases // Nuclear Engineering and Technology. – Vol. 51 (4), 2019. P. 1176...1179.
22. Филатов Ю.Н., Филатов И.Ю., Заболоцкая Р.Д. Фильтрующий материал, способ его получения и респиратор. Патент на изобретение RU 2376053 С1, 20.12.2009. Заявка № 2008143743/15 от 07.11.2008.
23. Пестун А.Ф., Соловьев С.Н., Филатов Ю.Н., Филатов И.Ю., Щербакова О.А. Фильтрующий материал для респираторов и респиратор. Патент на изобретение RU 2363519 С1, 10.08.2009. Заявка №2008115635/15 от 23.04.2008.
24. Астахов С.В., Гуменюк В.И., Филатов Ю.Н. Разработка высокоэффективного фильтрующего материала, для применения в средствах индивидуальной защиты органов дыхания // В сб. науч. тр. VIII Всероссийск. научн.-практ. конф.: Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – 2016. С. 63...75.
25. Астахов С.В., Гуменюк В.И., Филатов Ю.Н. Разработка высокоэффективного фильтрующего материала на основе хлорированного полиэтилена // В сб.: Неделя науки СПбПУ (материалы научного форума с международным участием). Лучшие доклады / Ответственные редакторы: В.Э. Гасумянц, Д.Д. Каров. – 2016. С. 377...381.
26. Капустин И.А., Филатов И.Ю., Филатов Ю.Н. Разработка технологии получения фильтрующих нетканых материалов для контроля атмосферных аэрозолей на радионуклидных станциях РФ // Химические волокна. – 2012, №5. С. 37...40.
27. Kapustin I.A., Filatov I.Y., Filatov Y.N. Thermal destruction of nonwoven filter materials from polystyrene and polymethyl methacrylate // Fibre Chemistry. – V. 44, № 6, 2013. P. 377...380.
28. Катухин Л.Ф., Филатов Ю.Н., Корниенко В.Н., Ларичев М.А., Кадомцев Г.М., Иванов В.Д., Руб-



цов П.Л., Ягодкин И.В., Аванесян В.М. Сорбционно-фильтрующий многослойный материал и содержащий его фильтр. Патент на изобретение RU 2487745 C1, 20.07.2013. Заявка №2011148990/05 от 02.12.2011.

29. Афанасов И.М., Юданова Т.Н., Брусов С.С., Филатов И.Ю., Перминов Д.В. Многослойный материал с хитозановым слоем из нано- и ультратонких волокон с антибиотиком. Патент на изобретение RU 2604410 C2, 10.12.2016. Заявка № 2015117161/15 от 06.05.2015.

30. Филатов Ю.Н., Филатов И.Ю., Капустин И.А., Смольская М.А. Фильтрующий термостойкий нановолокнистый материал и способ его получения. Патент на изобретение RU 2524936 C1, 10.08.2014. Заявка № 2012156709/05 от 26.12.2012.

31. *Ivanov LA., Razumeev K.E., Bokova E.S., Muminova S.R.* The inventions in nanotechnologies as practical solutions. Part V. Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. – 2019, Vol. 11, №6. P. 719...729. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-6-719-729.

32. *Ivanov LA., Bokova E.S., Muminova S.R., Katuhin L.F.* Nanotechnologies: a review of inventions and utility models. Part I. Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2020, Vol. 12 (1) DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-1-27-33

33. *Ivanov LA., Kapustin I.A., Borisova O.N., Pisarenko Zh.V.* Nanotechnologies: a review of inventions and utility models. Part II Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2020, Vol. 12(2).

## REFERENCES

1. International Atomic Energy Agency, 'Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050: 2018 Edition', [www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/13412/Energy-Electricity-and-Nuclear-Power-Estimates-for-the-Period-up-to-2050](http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/13412/Energy-Electricity-and-Nuclear-Power-Estimates-for-the-Period-up-to-2050)

2. International Atomic Energy Agency, 'New IAEA Energy Projections See Possible Shrinking Role for Nuclear Power' 10 Sept 2018, <http://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/new-iaea-energy-projections-see-possible-shrinking-role-for-nuclear-power>

3. Budyka A.K., Borisov N.B. Voloknistye fil'try dlya kontrolya zagryazneniya vozduшной среды. – М.: Izdat, 2008.

4. Filatov Yu.N. Elektroformovanie voloknistykh materialov (EFV-protsess)/ Pod red. V.N. Kirichenko. – М.: Neft' i gaz, 1997.

5. Kapustin I.A., Filatov Yu.N., Filatov I.Yu., Ragutkin A.V. Osobennosti monitoringa radioaktivnykh aerorozley i gazov. Tendentsii razvitiya analiticheskikh fil'truyshchikh materialov // Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti. – 2016, № 3. S.37...42.

6. Filatov I.Yu., Ivanov L.A., Bokova E.S., Smul'skaya M.A., Filatov Yu.N., Kapustin I.A. Sravnenie razlichnykh metodov elektroformovaniya nanovolonok // Dizayn i tekhnologii. – 2019, №72 (114). S.16...22.

7. Filatov Yu.N., Filatov I.Yu., Kapustin I.A. Fil'truyshchiy material, sposob ego polucheniya i primeneniya. Patent na izobretenie RU 2477165 C1, 10.03.2013. Zayavka № 2012109488/05 ot 14.03.2012.

8. Filatov Yu.N., Filatov I.Yu., Kapustin I.A. Fil'truyshchiy material. Patent na izobretenie RU 2414950 C1, 27.03.2011. Zayavka № 2009126033/05 ot 09.07.2009.

9. Filatov Yu.N., Budyka A.K., Martynyuk Yu.N., Filatov I.Yu. Fil'truyshchiy material. Patent na izobretenie RU 2284846 C2, 10.10.2006. Zayavka №2004137318/15 ot 21.12.2004.

10. Kapustin I.A., Filatov I.Yu., Filatov Yu.N., Arkhipov S.Yu., Ogorodnikov B.I., Budyka A.K. Fil'truyshchiy material i sposob ego polucheniya. Patent na izobretenie RU 2349369 C1, 20.03.2009. Zayavka № 2007139574/15 ot 26.10.2007.

11. Kapustin I.A. Razrabotka tekhnologii elektroformovaniya voloknistykh materialov s ponizhennoy temperaturoy destrukttsii dlya analiza atmosfery: Dis...kand. tekhn. nauk. – М., 2014.

12. Filatov I.Yu., Filatov Yu.N., Budyka A.K., Magulashvili V.G., Martynyuk Yu.N. Nanovolonkisty material FP dlya kontrolya radioaktivnykh aerorozley. Anri. – 2009, № 3. S. 38...41.

13. Kapustin I.A., Filatov I.Y., Filatov Y.N. Development of production technology for non-woven filtering materials for monitoring atmospheric aerosols at RF radionuclide stations // Fibre Chemistry. – V. 44, № 5, 2013. P. 299...303.

14. Kapustin I.A., Filatov I.Y., Filatov Y.N. Thermal destruction of nonwoven filter materials from polystyrene and polymethyl methacrylate // Fibre Chemistry. – V. 44, № 6, 2013. P. 377...380.

15. Budyka, A.K., Ogorodnikov B.I., Skitovich V.I. Filter pack technique for determination of aerosol particle sizes // J. Aerosol Sci – Vol. 24. Suppl/ 1, 1993. P.205...206.

16. Ekin A.A., Vasyanovich M.E., Antonov K.L., Markov D.V., Markova Z.D., Kapustin I.A., Filatov I.Y. Control of aerosol and gaseous compounds of iodine isotopes in the ventilation system of the IVV-2M reactor facility // Physics of Atomic Nuclei. – V. 81, № 10, 2018. P. 1494...1498.

17. Ekin A.A., Antonov K.L., Vasyanovich M.E., Kapustin I.A., Filatov I.Yu. Postuplenie radioaktivnogo ioda v atmosferu pri normal'noy ekspluatatsii AES // Radiokhimiya. – 2019, № 3. S.251...262.

18. Ekin A.A., Vasyanovich M.E., Markov D.V., Bil'danov R.G., Filatov Y.N., Kapustin I.A. Determination of the physicochemical forms of iodine isotopes in the IVV-2M reactor ventilation system // Atomic Energy. – V. 121, № 4, 2017. P. 308...311.

19. Ekin A.A., Vasyanovich M.E., Kapustin I.A., Filatov I.Yu. Sovershenstvovanie metodov kontrolya yoda-131 v vybrosakh atomnykh stantsiy // Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti. – 2016, № 3 (83). S. 17...24.

20. Vasyanovich M.E., Ekin A.A., Vasilyev A.V., Kryshev A.I. et al. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population // Journal of Environmental Radioactivity. – Vol. 208-209, 2019. 106006.

21. Vasyanovich M.E., Vasilyev A.V., Ekidin A.A., Kapustin I.A. et al. Special monitoring results for determination of radionuclide composition of Russian NPP atmospheric releases // Nuclear Engineering and Technology. – Vol. 51 (4), 2019. P. 1176...1179.
22. Filatov Yu.N., Filatov I.Yu., Zabolotskaya R.D. Fil'truyushchiy material, sposob ego polucheniya i respirator. Patent na izobretenie RU 2376053 C1, 20.12.2009. Zayavka № 2008143743/15 ot 07.11.2008.
23. Pestun A.F., Solov'ev S.N., Filatov Yu.N., Filatov I.Yu., Shcherbakova O.A. Fil'truyushchiy material dlya respiratorov i respirator. Patent na izobretenie RU 2363519 C1, 10.08.2009. Zayavka №2008115635/15 ot 23.04.2008.
24. Astakhov S.V., Gumenyuk V.I., Filatov Yu.N. Razrabotka vysokoeffektivnogo fil'truyushchego materiala, dlya primeneniya v sredstvakh individual'noy zashchity organov dykhaniya // V sb. nauch. tr. VIII Vserossiysk. nauchn.-prakt. konf.: Bezopasnost' v chrezvychaynykh situatsiyakh. Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii universitet Petra Velikogo. – 2016. S. 63...75.
25. Astakhov S.V., Gumenyuk V.I., Filatov Yu.N. Razrabotka vysokoeffektivnogo fil'truyushchego materiala na osnove khlorirovannogo polietilena // V sb.: Nedelya nauki SPbPU (materialy nauchnogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem). Luchshie doklady / Otvetsvennye redaktory: V.E. Gasumyants, D.D. Karov. – 2016. S. 377...381.
26. Kapustin I.A., Filatov I.Yu., Filatov Yu.N. Razrabotka tekhnologii polucheniya fil'truyushchikh netkanykh materialov dlya kontrolya atmosferykh aerozoley na radionuklidnykh stantsiyakh RF // Khimicheskie volokna. – 2012, №5. S. 37...40.
27. Kapustin I.A., Filatov I.Y., Filatov Y.N. Thermal destruction of nonwoven filter materials from polystyrene and polymethyl methacrylate // Fibre Chemistry. – V. 44, № 6, 2013. P. 377...380.
28. Katukhin L.F., Filatov Yu.N., Kornienko V.N., Larichev M.A., Kadomtsev G.M., Ivanov V.D., Rubtsov P.L., Yagodkin I.V., Avanesyan V.M. Sorbtionno-fil'truyushchiy mnogoslownyy material i soderzhashchiy ego fil'tr. Patent na izobretenie RU 2487745 C1, 20.07.2013. Zayavka №2011148990/05 ot 02.12.2011.
29. Afanasov I.M., Yudanov T.N., Brusov S.S., Filatov I.Yu., Perminov D.V. Mnogoslownyy material s khitozanovym sloem iz nano- i ul'tratonkikh volokon s antibiotikom. Patent na izobretenie RU 2604410 C2, 10.12.2016. Zayavka № 2015117161/15 ot 06.05.2015.
30. Filatov Yu.N., Filatov I.Yu., Kapustin I.A., Smul'skaya M.A. Fil'truyushchiy termostoykiy nanovoloknistyy material i sposob ego polucheniya. Patent na izobretenie RU 2524936 C1, 10.08.2014. Zayavka № 2012156709/05 ot 26.12.2012.
31. Ivanov L.A., Razumeev K.E., Bokova E.S., Muminova S.R. The inventions in nanotechnologies as practical solutions. Part V. Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. – 2019, Vol. 11, №6. P. 719...729. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-6-719-729.
32. Ivanov L.A., Bokova E.S., Muminova S.R., Katuhin L.F. Nanotechnologies: a review of inventions and utility models. Part I. Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2020, Vol. 12 (1) DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-1-27-33
33. Ivanov L.A., Kapustin I.A., Borisova O.N., Pisarenko Zh.V. Nanotechnologies: a review of inventions and utility models. Part II Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2020, Vol. 12(2).

Рекомендована кафедрой химии и технологии полимерных материалов и нанокomпозитов РГУ имени А.Н. Косыгина. Поступила 07.06.20.