



Ресурсосберегающие нанотехнологии в водоочистке

О.Н. Борисова* , И.Г. Доронкина , В.М. Феоктистова 

Российский государственный университет туризма и сервиса, г. Москва, Россия

*Контакты: e-mail: borisova-on@bk.ru

РЕЗЮМЕ: В работе рассмотрено перспективное направление развития нанотехнологий в области водоочистки и водоподготовки. Во **введении** показано, проблема в России заключается не в нехватке воды, а в ее качестве, очистка воды необходима для предотвращения загрязнения водных объектов, методы самоочищения не способны справиться с большими нагрузками загрязняющих веществ, многие из которых неизвестны для процессов естественного воспроизводства. Уровень очистки воды зависит от того, насколько она загрязнена и какие вещества в ней содержатся. Использование нанотехнологий в процессах нейтрализации сточных вод (СВ) позволит устранить нерастворимые осадки, отходы химической промышленности и вредные микроорганизмы. **Методы и материалы.** В настоящей работе применены аналитические методы использования нанотехнологий, все чаще в водоочистке используются нанофильтрационные и мембранные методы. Для получения углеродных нанотрубок используются такие методы, как дуговой заряд, абляция и газофазное осаждение. **Результаты.** Приведены перспективные углеродные наноматериалы, для создания мембран для очистки/обеззараживания/опреснения воды. Показано новое поколение мембран для фильтрации, дезинфекции, опреснения: графен и углеродные нанотрубки – эти элементы являются абсолютно новыми представителями класса наноматериалов. **Обсуждение.** Установлено, что такие мембраны характеризуется не только высокой скоростью пропускания воды, но и исключительной селективностью. Такие мембраны особенно перспективны для биомедицины, поскольку большие мембраны необходимы для процессов нанофильтрации или опреснения. **Выводы.** Рассмотрены новые экологические, ресурсосберегающие технологии, которые приведут к совершенствованию научно-технической, производственной и коммерческой деятельности, которая через практическое использование идей и изобретений приведет к созданию и внедрению лучших продуктов, технологий и любых технических организационных решений. Одним из наиболее перспективных направлений развития нанотехнологий в области водоочистки и водоподготовки является мембранная технология с использованием инновационных наноматериалов: графена и углеродистых нанотрубок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водоочистка, нанофильтрация, технология, наномембраны, графен, углеродистые нанотрубки.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Борисова О.Н., Доронкина И.Г., Феоктистова В.М. Ресурсосберегающие нанотехнологии в водоочистке // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Том 13, № 2. – С. 124–130. – DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-2-124-130.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших глобальных задач является обеспечение жителей нашей планеты качественной питьевой водой.

Вода – самое распространенное вещество в природе (на гидросферу приходится 71% поверхности Земли). Без воды существование живых организмов невозможно в принципе. Особую роль играют пресные воды Земли, общий объем которых не-

велик – всего 2,5% от массы океанских вод (примерно 30 млн км³). Самые большие запасы пресной воды приходятся на Байкал – около 23 тысяч км³. Подавляющее большинство пресной воды для людей в повседневной жизни труднодоступно, так как связано с полярными льдами и подземными водоносными горизонтами. Поэтому задачей первоочередной важности является предотвращение загрязнения водных объектов как источников пресной воды[1].

Человек интенсивно использует природную воду, после ее необходимой очистки и подготовки в своей хозяйственной деятельности — в быту, в промышленности, в сельскохозяйственном производстве, для ряда отраслей промышленности (пищевая промышленность, производство полупроводников и люминофоров, ядерные технологии), а также для медицинских целей, для проведения химических анализов и т. д.

Мировой технический прогресс, основанный на использовании природных ресурсов в качестве сырья и создании техносферы, представляющей собой территорию, занятую городами и поселками с соответствующей инфраструктурой, закономерно привел к тому, что существование человека стало экологически опасным, прежде всего из-за образования и накопления огромного количества отходов производства и потребления, из-за негативного воздействия на окружающую среду хозяйственной и бытовой деятельности, из-за истощения природных ресурсов — прежде всего, пресной воды.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Примерно половина потребляемой человечеством воды превращается в сточные воды, которые после очистки сбрасываются в водоемы.

Сточные воды (СВ) — это воды, бывшие в хозяйственном или технологическом использовании и загрязненные различными веществами, а также ливневые (атмосферные) воды, вредные вещества, поступающие в атмосферу с промышленными выбросами, они возвращаются с атмосферными осадками на Землю, загрязняя водоемы и почву [2, 3].

Бытовые сточные воды удаляются из мест образования канализационной системой на городские очистные сооружения. Ливневая вода поступает в собственную канализацию и после механической очистки сбрасывается в поверхностные водные объекты; в сеть ливневой канализации могут поступать также очищенные сточные воды малых промышленных предприятий — автомоек, гальванопокрытий и др. После глубокой очистки полигоны крупных промышленных предприятий также могут сбрасываться в поверхностные водные объекты [4].

Можно констатировать: вследствие негативного воздействия на окружающую среду выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, сбросов загрязняющих веществ в водные объекты, попадания токсичных фильтратов в грунтовые воды (образующиеся на объектах захоронения твердых бытовых отходов) водосборные площади и водные объекты (поверхностные и подземные) интенсивно загрязняются. Следовательно, актуальной задачей сегодняшнего дня является усиление кон-

троля за качеством воды в реках и водохранилищах и одновременно создание современных очистных сооружений, использование современных технологий очистки сточных вод [5].

Проблема в России не в нехватке воды, а в ее качестве. Почти все города, а их в России более тысячи, снабжаются водой не из колодцев, а с поверхностного водосбора. Около 75% городских квартир потребляют водопроводную воду очень низкого качества, и не исключено, что опасные микроорганизмы, а также токсичные вещества, которые широко используются в промышленности и неизбежно попадают сначала в водопровод, а затем и в систему водоснабжения. Обычная городская система очистки воды не способна нейтрализовать такие воды. Примерно 30% населения России потребляет воду, которая вообще не была очищена, что очень опасно для здоровья. В таких регионах Российской Федерации, как Белгородская и Курская области, Адыгея, Бурятия и Тыва, очищается не более 10% воды [6].

Россия катастрофически отстает от стран ЕС в плане контроля за водоснабжением. В соответствии с законодательством Российской Федерации вода должна проверяться по 54 показателям (в большинстве регионов из-за отсутствия оборудования это правило соблюдается только на бумаге). Для сравнения: в Великобритании вода контролируется по 70 показателям, при этом ежегодно проводится около 100 тысяч тестов. Пробы воды, не соответствующие стандартам, в Великобритании составляют 0,01%, а в России — более 40%, что свидетельствует о питьевой непригодности такой воды. Например, вода в Волге относится к так называемому третьему (низшему) классу питьевой воды, а очистные сооружения большинства волжских городов, потребляющих воду из реки, рассчитаны на работу с первым — высшим классом. Содержание фенолов, нефтепродуктов, солей меди и цинка в волжской воде превышает ПДК в 5–12 раз [7].

В странах ЕС для очистки воды используются УФ-технологии, в России для очистки воды в основном используется хлор (на Рублёвской водопроводной станции в Москве для очистки воды используется озон).

По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), инвестирование 1 доллара в развитие водоснабжения может сэкономить от 4 до 12 долларов в системе здравоохранения.

В настоящее время в России доля полигонов, проходящих очистку, не превышает 65%. В связи с этим особую роль играет инженерная охрана окружающей среды, а именно решение технологических задач водоподготовки, оборотного водоснабжения, предотвращение загрязнения водных объектов и их

истощения. Очистка СВ является неотъемлемой частью экологической инженерии, экосистемных услуг и объектов охраны окружающей среды [8–13].

Водоочистка необходима для предотвращения загрязнения водных объектов, процессы самоочищения которых не способны справиться с большими нагрузками загрязняющих веществ, многие из которых неизвестны для процессов естественного воспроизводства. Уровень очистки воды зависит от того, насколько она загрязнена и какие вещества в ней содержатся. Применение нанотехнологий в процессах обезвреживания СВ помогут устранить нерастворимые осадки, отходы химической промышленности и вредные микроорганизмы [12–14].

Термины «наночистка» и «наночисточная мембрана» появились только в конце 1980-х годов в связи с бурным развитием нанотехнологий. Обычно предполагается, что эффективный размер пор наночисточной мембраны составляет несколько нанометров, хотя этот диапазон иногда расширяется до 100 нанометров (обычно предполагается, что нанотехнологические объекты хотя бы в одном измерении составляют менее 100 нанометров). Эти мембраны занимают промежуточное положение между ультрачисточной и обратным осмосом по степени очистки - они не пропускают через себя большинство органических молекул, почти все вирусы и два (или более) валентных иона. Все три типа пленок работают на наночисточном уровне. Поэтому можно сказать, что нанотехнологии начали использоваться для очистки воды и водоочистки задолго до появления этого термина. Сейчас их использование расширяется в России и других странах. В Швейцарии, например, установки ультрачисточной, наночисточной и обратного осмоса обеспечивают жителей качественной питьевой водой из озер и карстовых подземных источников [15].

Наночисточные и мембранные методы все чаще используются для очистки воды. Мембранные методы разделения жидких (и газовых) смесей основаны на использовании полупроницаемых перегородок (мембран) молекулярных размеров (толщиной не более 100 нанометров), обладающих избирательной проницаемостью. Свойствами полупроницаемости обладает большинство тканей организмов.

Нанотехнология определяется как совокупность методов и приемов, позволяющих контролируемым образом создавать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм (хотя бы в одном измерении) и в результате приобретающие принципиально новые качества. Исследования, проведенные во многих лабораториях мира, показывают, что такие свойства синтезируемых наноматериалов, как большая удельная поверхность, высокая проницаемость, каталитическая активность, устойчивость

к биообращению, возможность функционализации и др., позволяют эффективно использовать их для получения чистой воды.

Наночастицы серебра используются для обеззараживания воды в местах потребления и уменьшения биообращения мембран. Нано-TiO₂ характеризуется высокой фотокаталитической активностью, на его основе разработаны промышленные продукты очистки сточных вод от органических примесей.

Для контроля качества воды предлагаются датчики, использующие магнитные, оптические и электронные свойства наночастиц (nano-Au, - SiO₂, - CdSe и др.) и наночисточных (имеются коммерческие продукты). Все эти наноматериалы не могут быть рассмотрены в одной статье. Здесь будут представлены две аллотропные модификации углерода – наночисточка и графен, перспективные для создания мембран и фильтров нового поколения и обладающие принципиально новыми качествами.

Новое поколение мембран для чисточной, дезинфекции и опреснения представляет собой мембрану на основе графена и углеродных наночисточек, характеризующуюся высоким коэффициентом пропускания воды, отличной селективностью, устойчивостью к биообращению и сильными антибактериальными свойствами [16]. Пока что лишь небольшой процент таких мембран и фильтров находится на стадии пилотных испытаний в мире, но их коммерциализация вполне реальна в связи с бурным ростом производства графена.

Графен представляет собой двумерный кристалл, состоящий из одного слоя атомов углерода. Его можно представить в виде одной плоскости графита, отделенной от кристалла. Углеродные наночисточки (УНТ) представляют собой бесшовные цилиндры из одного или нескольких слоев графена диаметром от 0,7 до 100 нм и длиной до нескольких сантиметров с открытыми или закрытыми концами (рис. 1).

Считается, что впервые углеродные наночисточки обнаружили и описали в начале 1990-х гг. [17]. Вскоре были продемонстрированы их уникальные электрические, механические, оптические и другие свойства. От лабораторных исследований довольно быстро перешли к внедрению. Объем производства УНТ с 2006 по 2012 гг. вырос, по меньшей мере, в 10 раз [18]. Углеродные наночисточки в виде пленок, покрытий в составе композитов используются в микроэлектронике, автомобильной, аэрокосмической и оборонной промышленности, в производстве спецодежды, спортивного снаряжения и медицинских товаров. По прогнозам специалистов, новая важная сфера применения – очистка воды. Экспертами проекта «РОСНАНО» по использованию нанотехнологий в водоочистке углеродные наночисточки выделены как перспективный материал [19].

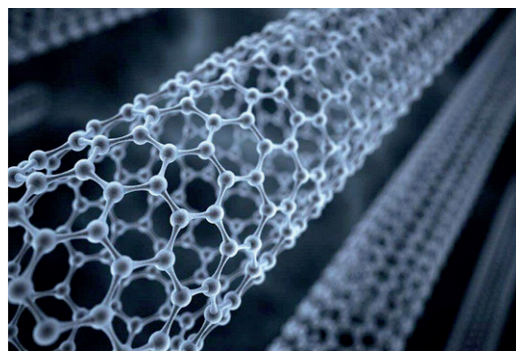
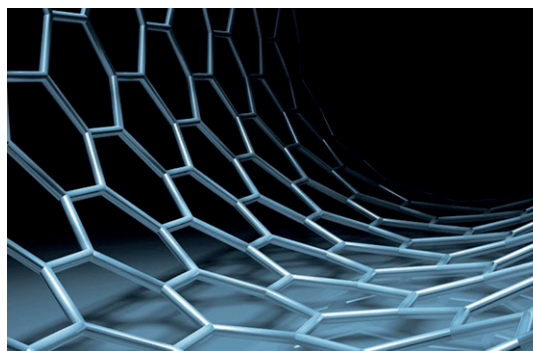


Рис. 1. Графен, углеродная нанотрубка

На сегодняшний день существуют следующие методы получения углеродных нанотрубок: дуговой заряд, абляция и газофазное осаждение.

Электрический дуговой разряд. Получение (углеродные нанотрубки описаны в этой статье) электрического заряда в плазме, которая горит с использованием гелия. Этот процесс может быть осуществлен с помощью специального технического оборудования для производства фуллеренов. Однако этот метод использует другие режимы горения дуги.

Горенье. Например, уменьшается плотность тока, а также используются катоды огромной толщины. Чтобы создать атмосферу гелия, необходимо увеличить давление этого химического элемента. Углеродные нанотрубки получают методом распыления. Чтобы увеличить их количество, необходимо ввести катализатор в графитовый стержень. Чаще всего это смесь различных групп металлов. Далее происходит изменение давления и способа распыления. Таким образом, получается катодный осадок, в котором образуются углеродные нанотрубки. Готовые изделия растут перпендикулярно катоду и собираются в пучки. Они имеют длину 40 микрон.

Абляция. Этот метод был изобретен Ричардом Смолли. Его суть заключается в испарении различных графитовых поверхностей в реакторе, работающем при высоких температурах. Углеродные нанотрубки образуются в результате испарения графита на дне реактора. Они охлаждаются и собираются с помощью охлаждающей поверхности. Если в первом случае количество элементов было равно 60%, то при таком способе показатель увеличился на 10%. Стоимость лазерного метода отпущения грехов дороже всех остальных. Как правило, однослойные нанотрубки получают за счет изменения температуры реакции.

Осаждение из газовой фазы. Метод осаждения паров углерода был изобретен в конце 50-х годов. Но никто даже не предполагал, что его можно использовать для производства углеродных нанотрубок. Итак, сначала нужно подготовить поверхность

с катализатором. В качестве него могут служить мелкие частицы различных металлов, например, кобальта, никеля и многих других. Из слоя катализатора начинают появляться нанотрубки. Их толщина напрямую зависит от размера катализирующего металла. Поверхность нагревается до высоких температур, а затем происходит подача газа, содержащего углерод. Среди них – метан, ацетилен, этанол и др. В качестве дополнительного технического газа используется аммиак. Этот способ получения нанотрубок является наиболее распространенным. Сам процесс протекает на различных промышленных предприятиях, так что на производство большого количества труб тратится меньше финансовых ресурсов. Еще одним преимуществом этого метода является то, что вертикальные элементы могут быть получены из любых металлических частиц, которые служат катализатором. Производство (углеродные нанотрубки описаны со всех сторон) стало возможным благодаря исследованиям Суоми Иидзимы, который наблюдал их появление под микроскопом в результате синтеза углерода.

Мембраны, состоящие из прямых, открытых, вертикальных нанотрубок в плотной матрице, позволяют использовать уникальные транспортные свойства этих углеродных наноматериалов.

Как правило, нанотрубки выращивают на подложке, например, методом химического осаждения из паровой фазы (CVD), затем зазоры между ними заполняют так, чтобы поток воды проходил только по каналам нанотрубок. Иногда УНТ синтезируются в макропорах подложки (например, из оксида алюминия). Используются также подходы к самосборке. По оценкам авторов [20], мембраны с 0,03% нанотрубками в плотной матрице могут быть более эффективными, чем все существующие системы обратного осмоса для опреснения морской воды. Сольватированные ионы, которые больше внутреннего диаметра нанотрубки, останутся в морской воде. Прохождение более мелких ионов может быть предотвращено функционализацией УНТ. Напри-

мер, мембраны из нанотрубок диаметром около 2 нм в нитриде кремния, синтезированные авторами [21], из-за функционализации УНТ при фильтрации раствора не пропускали 91% ионов размером 0,95 нм. Расчеты молекулярной динамики подтверждают эффективность использования УНТ для опреснения морской воды [22].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Перспективным углеродным наноматериалом для создания мембран для очистки/обеззараживания/опреснения воды является графен и углеродные нанотрубки. Эти элементы являются абсолютно новым представителем класса наноматериалов. Они имеют каркасную структуру, которая отличается по своим свойствам от графита или алмаза. Именно поэтому они используются гораздо чаще, чем другие материалы.

В течение многих лет в научных исследованиях используются углеродные нанотрубки, применение которых не ограничивается одной конкретной отраслью. Этот материал имеет слабые позиции на рынке, так как есть проблемы с крупносерийным производством. Еще одним важным моментом является высокая стоимость углеродных нанотрубок, которая составляет около 120 долларов за грамм такого вещества.

Графеновые наномембраны и фильтры можно использовать для очистки воды на всех уровнях – от места получения воды из природных источников до места потребления. Это новое поколение мембран для фильтрации, дезинфекции, опреснения. Чрезвычайно низкое сопротивление при прохождении воды через нанотрубки и капилляроподобные эффекты в графене позволяют ожидать снижения ресурсо- и энергопотребления. Мембраны устойчивы к биообрастанию, обладают антимикробными свойствами, которые могут быть дополнительно усилены функционализацией наночастицами Ag или TiO₂ или антибиотиками. С помощью функционализации УНТ можно создавать аналоги «водных каналов» аквапоринов. Благодаря высокой скорости пропускания воды в сочетании с исключительной селективностью графеновые наномембраны могут эффективно извлекать пресную воду из моря.

Лишь небольшая часть графеновых мембран и фильтров в настоящее время находится на стадии пилотных испытаний. Информации о коммерческом использовании практически нет. Одним из немногих исключений являются фильтры Seldon Nanomesh ТМ. По словам производителей, фильтрующий материал включает в себя углеродные нанотрубки, активированный уголь и волокна. Фильтры удаляют 99,999% бактерий, 99,99% вирусов, красители,

свинец и кадмий, пестициды и гербициды, Ce137 и т. д. Они используются для очистки воды в жилых районах и в портативных устройствах для армии или гуманитарной помощи.

ОБСУЖДЕНИЕ

Как известно, в 2004 году будущие Нобелевские лауреаты А. Гейм и К. Новоселов получили инновационный материал, отделив слой от обычного графита лентой. Премия «за передовые эксперименты с двумерным материалом – графеном» была присуждена им в 2010 году. К этому времени многие лаборатории по всему миру получили результаты, свидетельствующие об уникальных электронных, оптических, механических, тепловых и других свойствах графена. В последнее время на основе графена были получены уникальные мембраны.

Авторы работы [23] создали поры диаметром 0,4 нм (плотность пор 1012/см²) в графене методом ионной бомбардировки и последующего травления и впервые продемонстрировали селективный быстрый перенос ионов в мембране одноатомной толщины. Проницаемость в 50 раз больше, чем у обычных мембран, используемых для опреснения воды. Авторы считают, что их мембраны особенно перспективны для биомедицины, поскольку большие мембраны необходимы для процессов наночистоты или опреснения. Проблема масштабирования может быть решена путем использования так называемого оксида графена вместо графена, который легко получается путем расслоения предварительно окисленного графита на отдельные листы.

Авторы [24] создали мембрану толщиной в микрон, состоящую из слоев оксида графена, соединенных друг с другом наподобие многослойной структуры из перламутра. Такая мембрана непроницаема для всех газов, паров и жидкостей, но вода проходит через нее беспрепятственно. Исследователи связывают это с образованием сетки графеновых наночастиц внутри слоев оксида графена. Диффузия других молекул блокируется сужением капилляров при низкой влажности и / или заполнением их водой. В новой работе [25] показано, что такая мембрана характеризуется не только высокой скоростью пропускания воды, но и исключительной селективностью. Гидратированные ионы с радиусом более 0,45 нм не могут проникнуть через него, а более мелкие ионы поглощаются в капилляры с очень высокой эффективностью (по данным авторов [26–28], явления соответствуют давлению на ионы > 50 атм). Дальнейшая задача исследователей – уменьшить размер капилляров, чтобы такие мембраны можно было использовать для опреснения морской воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Углеродные нанотрубки играют важную роль в инновационных технологиях. Многие эксперты прогнозируют рост этой отрасли в ближайшие годы. Произойдет значительное увеличение производственных мощностей, что приведет к снижению себестоимости продукции. С удешевлением нанотрубки будут пользоваться большим спросом и станут незаменимым материалом для многих приборов и оборудования.

К сожалению, приходится признать, что в России, несмотря на замечательные научные достижения, производство графена, УНТ и новых материалов на их основе весьма ограничено, и говорить о внедрении мембран нового поколения пока рано.

Причина – как технические трудности, так и высокая стоимость. Но это временные препятствия – достаточно вспомнить историю развития полимерных мембран, первые лабораторные образцы которых появились в нашей стране около 50 лет назад. В течение нескольких лет ассортимент мембран и мембранных элементов расширился, и благодаря целенаправленным и скоординированным действиям ученых, технологов и государственных структур началось бурное развитие мембранных технологий. Хочется верить, что это произойдет и с мембранными нанотехнологиями. В то же время нельзя забывать и о важных вопросах,

связанных с безопасностью использования наноматериалов. Конечно, вероятность того, что углеродные нанотрубки или графеновые нанопластинки попадут в окружающую среду при использовании мембран, крайне мала, но это может произойти при производстве, переработке, транспортировке и утилизации. Необходимо использовать уникальные свойства синтезированных наноматериалов, чтобы избежать возможных токсических эффектов.

Разработка новых экологических ресурсосберегающих технологий приведет к улучшению научно-технических, производственных и коммерческих мероприятий, которые посредством практического использования идей и изобретений приводят к созданию и внедрению лучших продуктов, технологий и любых технических организационных решений. Одним из наиболее перспективных направлений развития нанотехнологий в области водоочистки и водоподготовки является мембранная технология с использованием инновационных наноматериалов. Увеличение использования нанотехнологий в этой области неизбежно приведет к увеличению содержания наноматериалов в природной водной среде. В связи с этим разработка аналитических методов определения наночастиц становится самостоятельной проблемой. Предлагаемые в настоящее время методы обычно сложны, очень дорогостоящи и подвержены ряду ограничений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисова О. Классификации сточных вод по разным критериям и методы их очистки // Водоочистка. – 2019. – № 3. – С. 57–61.
2. Шубов Л.Я., Борисова О.Н., Доронкина И.Г. Технология сточных вод. Контроль качества окружающей среды // Учебное пособие по дисциплине «Инженерная защита окружающей среды при обращении с отходами производства и потребления». – специальность «Инженерная защита окружающей среды»: электронное издание. – Москва, 2013. – № 0321401109.
3. Шубов Л.Я., Борисова О.Н., Доронкина И.Г. Технологии сточных вод (инженерная защита гидросферы) // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. – 2010. – № 6. – С. 2–128.
4. Шубов Л.Я., Борисова О.Н., Доронкина И.Г. Повышение экоэффективности технологии очистки сточных вод // Водоочистка. – 2016. – № 11. – С. 26–32.
5. Доронкина И.Г., Борисова О.Н. Эколого-экономическая эффективность технологических процессов очистки сточных вод // Сервис в России и за рубежом. – 2015. – Т. 9, № 4 (60). – С. 112–121.
6. Шубов Л.Я., Борисова О.Н., Доронкина И.Г. Повышение экоэффективности технологии очистки сточных вод // Сервис в России и за рубежом. – 2014. – № 1 (48). – С. 153–162.
7. Доронкина И.Г., Борисова О.Н. Очистка сточных вод современного города / Славянский форум. – 2020. – № 2 (28). – С. 146–158.
8. Шайтура С.В. Гибридные системы // Интеллектуальные системы и технологии Шайтура С.В. – Бургас: Институт гуманитарных наук, экономики и информационных технологий. – 2016. – С. 63–82.
9. Шайтура С.В. Миссия выполнима // Славянский форум. – 2012. – № 1 (1). – С. 47–52.
10. Шайтура С.В. Нейронные сети / Интеллектуальные системы и технологии Шайтура С.В. – Бургас: Институт гуманитарных наук, экономики и информационных технологий. – С. 47–62.
11. Шайтура С.В. Природоохранные технологии – основа сдельного технологического уклада // Конструкторское бюро. – 2017. – № 3 (128). – С. 12–14
12. Kremena Stereva, Shaytura S.V. Using The Terrestrial Laser Scanning Technology For Detection Of Cracks In Rock Massifs. *Slavic Forum*. 2021;1(31):241-247.

13. Stereva Kremena, Postolovski A., Shaytura S.V. Using Mobile Laser Scanning In Road Safety Repair And Audit. *Slavic Forum*. 2021;1(31):248–257.
14. Bokareva E.V., Silaeva A.A., Borisova O.N., Doronkina I.G., Sokolova A.P. Analysis of the world and russian e-commerce market: development trends and challenges. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*. 2018;7(4.38):387–392.
15. Borisova O.N., Silayeva A.A., Saburova L.N., Belokhvostova N.V., Sokolova A.P. Talent management as an essential element in a corporate personnel development strategy. *Academy of Strategic Management Journal*. 2017;16(S1):31–46.
16. Доронкина И.Г., Борисова О.Н. Ионообменные технологии очистки сточных вод с использованием ионитов // Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология–2020): материалы XVI Международной научно-технической конференции. – Уфа. – 2020. – С. 291–296.
17. Иванов Л.А., Борисова О.Н., Муминова С.П. Изобретения в области нанотехнологий, направленные на решение практических задач. Часть I // Нанотехнологии в строительстве. – 2019. – Т. 11, № 1. – С. 91–101. – DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-1-91-101.
18. Иванов Л.А., Капустин И.А., Борисова О.Н., Писаренко Ж.В. Изобретения, основанные на использовании нанотехнологий, позволяют получить принципиально новые технические результаты. Часть II // Нанотехнологии в строительстве. – 2020. – Т. 12, № 2. – С. 71–76. – DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-2-71-76.
19. Baumgartner H. Nanopores for clean drinking water. *Environment. Nanotechnology*. 2010;3:18–20.
20. Каграманов Г., Свитцов А., Каширина О. Нереализованный потенциал. Мембранная технология в мире и в России // Вода Magazine, 2013, № 11.
21. De Volder M. F. L., Tawfik S. H., Baughman R. H., Hart A. J. Carbon nanotubes: present and future commercial applications. *Science*. 2013;339:535–539.
22. Вигдорович В.И., Мищенко С.В., Ткачев А.Г. Наноструктурированные материалы и технологии. Современное состояние, проблемы и перспективы // Вестник ТГТУ. – 2007. – Т. 13, № 4, Препринт № 22, Рубрика 02. – С. 1–40.
24. Fornasiero F., Park H. G., Holt J. K., Stadermann M., Grigoropoulos C. P., Noy A. and Bakajin O. Ion exclusion by sub-2-nm carbon nanotube pores. *P. Natl. Acad. Sci. USA*. 2008;105:17250–17255.
25. Corry B. Water and ion transport through functionalised carbon nanotubes: applications for desalination technology. *Energy Environ. Sci*. 2011;4:751–759.
26. O’Hern S.C., Boutilier M.S., Idrobo J.-C., Song Y., Kong J., Laoui T., Atieh M., Karnik R. Selective ionic transport through tunable subnanometer pores in singlayer graphene membranes. *Nano Lett*. 2014;14:1234–1241.
27. Nair R.R., Wu H.A., Jayaram P.N., Grigorieva I.V., Geim A.K. Unimpeded permeation of water through helium-leak-tight graphene-based membranes. *Science*. 2012;335:442–444.
28. Joshi R.K., Carbone P., Wang F.C., Kravets V.G., Su Y., Grigorieva I.V., Wu H.A., Geim A.K., Nair R.R. Membranes precise and ultrafast molecular sieving through graphene oxide. *Science*. 2014;343:752–754.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Борисова Оксана Николаевна, доцент, к.т.н., доцент Высшей школы сервиса Российского государственного университета туризма и сервиса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7391-6170>, e-mail: borisova-on@bk.ru

Доронкина Ирина Геннадиевна, к.т.н., доцент, директор департамента спорта Российского государственного университета туризма и сервиса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7354-4293>, e-mail: dora1096@yandex.ru

Феоктистова Валентина Михайловна, доцент, к.т.н., доцент Высшей школы сервиса Российского государственного университета туризма и сервиса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8880-8941>, e-mail: vfeoktistova@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию: 04.03.2021.

Статья поступила в редакцию после рецензирования: 29.03.2021.

Статья принята к публикации: 02.04.2021.