

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/340909644>

Materials for development of Arctic territories: challenges and solutions

Article · January 2020

DOI: 10.32757/2619-0923.2020.1.11.98.107

CITATIONS

0

READS

76

2 authors, including:



N.I. Vasilevich

Laboratory and Production magazine

26 PUBLICATIONS 2 CITATIONS

SEE PROFILE

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ АРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ – ВЫЗОВЫ И РЕШЕНИЯ

УДК 620.1
БАК 05.16.09

Бузник В.М., академик РАН, ВИАМ, Институт химии ДВО РАН, bouzник@ngs.ru
Василевич Н.И., к.х.н., ООО "ЛабПро Медиа", nvasile2003@yahoo.com

В России особое отношение к Арктике. Перефразируя слова Евтушенко, можно сказать: "Арктика для России – больше, чем Арктика". Освоение арктических территорий и морей жизненно важно для экономического и государственного развития страны, причем под термином "арктическая зона" следует подразумевать не только Арктику как географическое понятие, но и холодные континентальные регионы, каковых в России много. Освоение Арктики во многом определяется наличием материалов, которые необходимы при создании технических устройств и сооружений, а также обеспечивающих комфортные условия пребывания и работы в суровых климатических условиях.

Настоящий обзор посвящен истории развития и анализу современных тенденций развития арктических материалов, т.е. веществ, которые создаются, адаптируются, исследуются, испытываются и применяются при освоении Арктики. Статья написана по материалам доклада на XXI Менделеевском съезде, Санкт-Петербург, сентябрь 2019 года [1].

ВАЖНОСТЬ ОСВОЕНИЯ АРКТИКИ ДЛЯ РОССИИ

Понимание значения Арктики для России пришло очень давно. Широко известны слова М.В.Ломоносова: "Российское могущество прирастать будет Сибирью и Северным океаном и достигнет до главных поселений европейских в Азии и в Америке". Это заключительная фраза из его письма "Краткое описание разных путешествий по северным морям и показание возможного проходу Сибирским океаном в Восточную Индию", где он доказывает необходимость и возможность установления регулярного морского сообщения между Архангельском и акваторией Тихого океана. Известно, что Ломоносов горячо поддерживал проведение Великих Северных экспедиций для изучения и последующего освоения огромных северных территорий [2]. В последние годы жизни он занимался научным обоснованием и организационным обеспечением большой морской экспедиции под командованием В.Я.Чичагова. И хотя экспедиция и не достигла главной своей цели – прохода к Тихому океану, она была важнейшей вехой на пути освоения Севера.

Поскольку доклад делался на Менделеевском съезде и был посвящен 150-летию открытия Периодической таблицы элементов, то заманчиво было посмотреть, как другой великий русский ученый, Д.И.Менделеев, относился к освоению Арктики. Он подчеркивал: "В нашем морском деле – для его успешного и верного движения вперед – лучше всего на один из первых планов поставить завоевание Ледовитого океана" [3]. Будучи разносторонним человеком, Дмитрий Иванович задумывался о проектах воздушных аппаратов, подводных лодок и ледоколов, способных работать в условиях Арктики. Освоению Крайнего

Севера ученый посвятил 36 научных работ. Для преодоления ледовых торосов он предлагал использовать взрывчатую смесь из "жидкого воздуха с небольшой подмесью угля". Вместе с адмиралом С.О.Макаровым он разработал технические условия для спущенного на воду в 1897 году первого ледокола "Ермак". "Мощный ледокол будет сильно содействовать процветанию русской торговли, так как продлит на несколько недель навигацию и свяжет порты в устьях Енисея и Лены с северными портами Европейской России", – предрекал Менделеев. В знак заслуг в науке, включая арктическую, именами Ломоносова и Менделеева названы два подводных хребта в Северном Ледовитом океане.

Сегодня Северный морской путь (СМП) – главная и важнейшая магистраль российского судоходства в Арктической зоне. Его функционирование в холодное время года обеспечивает самый крупный ледокольный флот РФ. Использование СМП существенно сокращает расстояние между акваториями Атлантического и Тихого океанов. Протяженность маршрута Роттердам-Иокогама через Суэцкий канал составляет 12,8 тыс. морских миль, СМП существенно короче и равен 5,7 тыс. морских миль, а это ведет к экономии времени перехода и топлива. Объем грузоперевозок в 2014 году составил 3,982 млн т, в 2015 году – 5,431 млн т, в 2016 году – 7,26 млн т, а в 2017 году – 9,932 млн т [4]. При этом, если в 1986 г. грузопоток был полностью сформирован за счет внутренней перевозки, то в 2014 г. международный транзит составил уже 42%.

Нынешнее внимание России к Арктике обусловлено рядом причин, одна из которых – безопасность: 30% государственной границы и 50% морской границы лежит на территории Арктики. Другая причина – экономическая. История

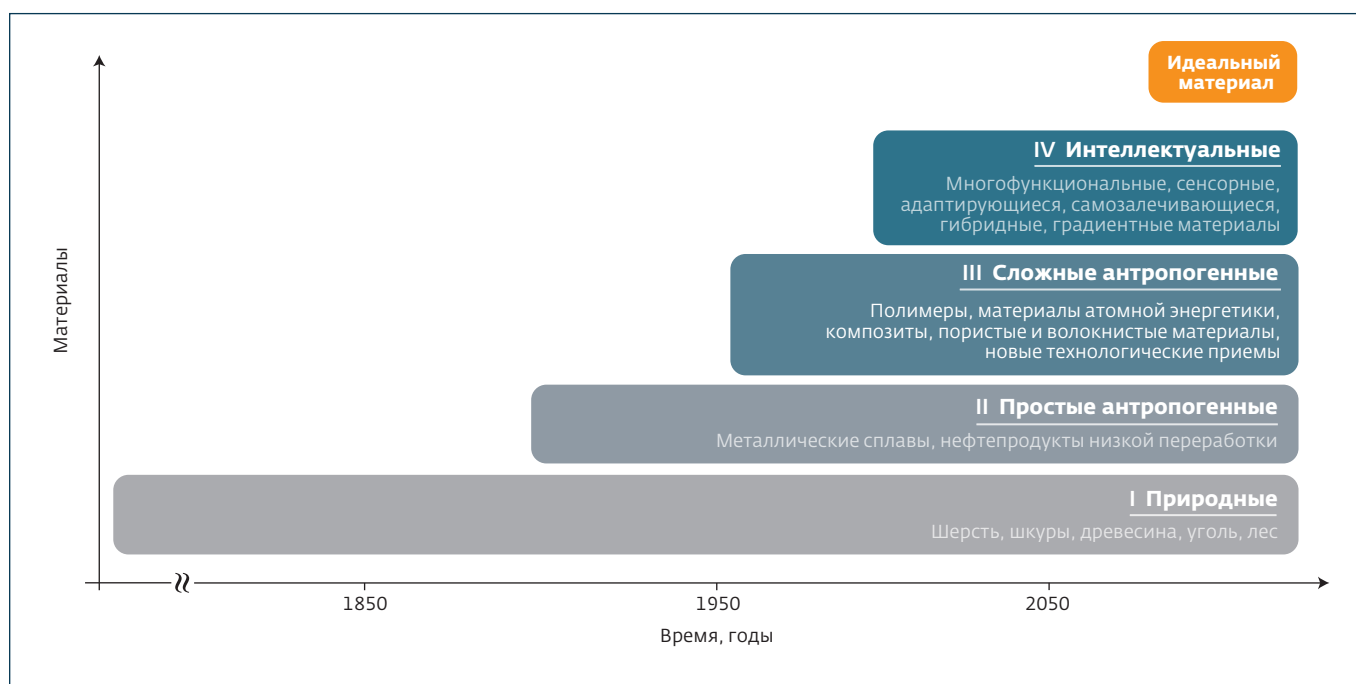


Рис.1. Эволюция арктического материаловедения

доказывает, что освоение арктических территорий всегда сопровождается экономическим эффектом: достаточно вспомнить "златокипящую" Мангазею и Аляску с золотой лихорадкой. Наиболее значимым и результативным в освоении Арктики стал советский период, когда создавались крупные промышленные производства по добыче и переработке полезных ископаемых и, соответственно, города: в Норильске – цветных и редких металлов, в Воркуте – угля, в Ухте – нефти, в Уренгое – газа, на Колыме – золота, в Мирном – алмазов.

Сегодня во всем мире наблюдается рост спроса на углеводородное сырье. По оценке экспертов Национального нефтяного Совета США (National Petroleum Council) в 2015 г., на Арктику приходится до 25% всех неразведанных традиционных ресурсов углеводородного сырья планеты. Потенциальные ресурсы этого региона оцениваются в 525 млрд бнэ (эквивалент барреля нефти), из них только 25% месторождений располагаются на суше, а 75% – на шельфе арктических морей. Доля России в запасах углеводородов арктической зоны, по разным данным, колеблется от 52% до 73%. Так, согласно сведениям упомянутого Национального нефтяного Совета США, на долю России приходится 316 млрд бнэ (60%) потенциальных ресурсов углеводородов Арктики [5].

Площадь российской Арктики составляет 9 млн кв. км, площадь арктического континентального шельфа Российской Федерации – 4 млн кв. км. На ней проживают 2 млн 392 тыс. человек: 2,2% населения России – 80% мирового населения Арктики. При этом Арктика обеспечивает 20%

ВВП России, 22% общероссийского экспорта, в ней добывается 90% никеля и кобальта, 60% меди, 96% платиноидов, 100% баритов и апатитов. Очевидно, что эти показатели будут только возрастать [5, 6].

Освоение арктической зоны РФ сопровождается рядом вызовов, связанных с природными, экономическими, военными, глобально-политическими, научно-техническими и социальными факторами.

Для арктической зоны (АЗ) характерны жесткие климатические условия (долгий период воздействия низких температур; значительная сезонная разница температур (от –60 до +40°С); неоднократные переходы через температуру замерзания воды и таяния льда, сопровождаемые обледенениями и налипанием снега; высокие механические нагрузки под действием ветра и волн, обледенения; высокая влажность и солнечная радиация), диктующие особые требования к арктическим материалам. Непростая ситуация с логистикой, она напоминает освоение космоса – все необходимо завозить с материка: людей, материалы, топливо, оборудование и пр. Причем, если доставка грузов в космос не ограничена сезоном, то завоз в Арктику возможен только во время навигации.

Исходя из сказанного, арктические материалы должны надежно и долговечно функционировать в составе технических устройств и сооружений в арктических условиях, где даже незначительные поломки могут обернуться катастрофами. Следует отметить, что арктический материал должен обладать требуемой совокупностью свойств, а не только



Рис.2. Основные типы арктических материалов, отмеченных в опросе [7]

одним, даже выдающимся, качеством. Еще один специфический момент – чрезвычайно хрупкая экология АЗ. Природа АЗ имеет низкую экологическую устойчивость и чувствительна к антропогенному воздействию: след от вездехода в тундре может сохраняться десятки лет. А поэтому важны материалы, минимизирующие антропогенную нагрузку на окружающую среду.

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ АРКТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

Хотя освоение Арктики длится не одно столетие, арктическое материаловедение как наука в современном понимании развивается только на протяжении последних 50 лет. На рис.1 изображен условный график развития арктического материаловедения [7]. По горизонтальной оси отложена временная шкала, обозначающая периоды применения материалов, а по вертикальной – степень их технологической обработки. Следует подчеркнуть, что появление мате-

риалов более высокого уровня передела не исключает применение материалов нижних уровней.

На начальной стадии использовались исключительно материалы природного происхождения: древесина, шерсть, кожа, уголь, лед. В XIX в. (второй этап) начали применяться антропогенные материалы с невысокой степенью обработки, например, металлы и сплавы, жидкие нефтепродукты и др. К середине прошлого столетия (третий этап) простые антропогенные материалы исчерпали свои возможности, и материаловеды направили усилия на создание веществ с расширенными и синергетичными свойствами – материалов третьего уровня. К таким материалам относятся полимеры, пористые материалы и волокна, композиты, материалы для ядерной энергетики. Для этого этапа характерно использование новых технологических приемов получения материалов и изделий из них. К таковым можно отнести аддитивные, лазерные технологии и технологии сверхкритических флюидов. И наконец, в последние десятилетия наступил этап умных материалов, способных адаптироваться к внешним воздействиям, обладающих многофункциональностью и гибридной структурой. Примером могут служить очки-хамелеоны, меняющие светопропускание при изменении радиационного светового излучения.

АРКТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Арктические материалы по большей части универсальны и могут использоваться в разных климатических зонах в составе технических устройств и сооружений, но они обязательно должны функционировать в суровых арктических условиях. В работе [7] приведены результаты опроса по приоритетным арктическим материалам среди участников Всероссийской конференции "Материалы для технических устройств и конструкций, применяемых в Арктике", проведенной в ВИАМ в 2015 году. К основным арктическим материалам респонденты отнесли металлы и высокомолекулярные соединения, а также композиты на их основе (рис.2).

Следует отметить, что первые два типа материалов наиболее уязвимы в условиях Севера: сталь – основной конструкционный материал – на морозе становится ломкой и имеет тенденцию к растрескиванию, а высокомолекулярные соединения теряют эластичность вследствие кристаллизации и стеклования и делаются хрупкими, теряя функциональные свойства.

Причина хладноломкости стали многофакторна: внешние механические воздействия, особенности строения и свойств разных кристаллографических фаз железа, размеры и морфология зерен, качество стали, наличие примесей, углерода и др. [8]. В начале 2000-х годов сформировалась научно обоснованная система повышенных требований к характеристикам вязкости и трещиностой-

кости сталей и сварочных материалов. С применением специального легирования и термомеханической обработки были созданы хладостойкие марки, удовлетворяющие условиям Арктики – стали Агс-класса [9]. Многие исследовательские организации занимались решением этой проблемы, но главный вклад внес ЦНИИ КМ "Прометей" им. И.В.Горынина из Санкт-Петербурга. Основным конструкционным материалом для крупногабаритных конструкций шельфа, судов, ледоколов, магистральных трубопроводов продолжают оставаться низколегированные стали, имеющие оптимальное соотношение стоимости, технологичности и эксплуатационных свойств. Для достижения этих параметров потребовалось существенно усовершенствовать технологии производства. На базе одного состава, варьируя технологические режимы, удастся сформировать различные комплексы свойств и характеристик.

Разработанные стали были запущены на крупных металлургических производствах: ПАО "Северсталь" и ПАО "Магнитогорский металлургический комбинат", специально построен Ижорский трубный завод. Крупнейшими объектами внедрения новых марок стали послужили морская ледостойкая платформа "Приразломная" и самоподъемная плавучая платформа "Арктическая". В последней для основных несущих элементов использована высокопрочная сталь толщиной до 130 мм, обладающая высоким уровнем трещиностойкости при температурах до -60°C [10].

Другая серьезная проблема, связанная с применением металлов при освоении Арктики, – обледенение и налипание снега на корпуса самолетов и морских судов, на линии электропередач и другие сооружения. Перспективный химический способ борьбы с обледенением – придание металлическим поверхностям супергидрофобных свойств. Работы в этом направлении ведутся в ряде организаций, можно отметить Институт физической химии и электрохимии им. Фрумкина РАН (Москва) и Институт химии ДВО РАН (Владивосток). Супергидрофобные материалы обладают рядом уникальных функциональных свойств: водонепроницаемостью, стойкостью к коррозии, устойчивостью к биообрастанию, к неорганическим, а в ряде случаев и к органическим, загрязнениям, но главное: они не смачиваются водой, что снижает вероятность их обледенения. Благодаря особенностям функциональных свойств, создание супергидрофобных материалов и покрытий выделилось в отдельное направление современного материаловедения.

Для создания супергидрофобности необходимы два фактора: специальный рельеф поверхности и гидрофобные свойства материала. В ИФХЭ РАН микротекстурирование поверхности осуществляют воздействием на поверхность нано- или фемтосекундного лазера, а затем наносят покрытия, придающие поверхности гидрофобность. Угол

смачивания полученного материала составляет $171\text{--}174^{\circ}$, что близко к максимально возможному углу 180° . Небольшие капельки воды практически не смачивают поверхность и остаются на ней в форме шариков, которые легко скатываются при наклоне поверхности даже $2\text{--}3^{\circ}$ [11]. В ИХ ДВО РАН микрошероховатость получают плазменным электролитическим окислением металлической поверхности, после чего на развитую поверхность наносят супергидрофобные покрытия, как правило, из фторполимеров. Это обеспечивает значения угла смачивания капли воды $164\text{--}166^{\circ}$ и угла скатывания $7,0\pm 0,5^{\circ}$ [12]. Отмеченные подходы дополняют друг друга, расширяя возможности практического применения супергидрофобных материалов.

Более 30% аварий технических устройств в холодном климате связаны с потерей эластичности эластомерными продуктами при низких температурах. Ведется поиск оптимальных составов высокомолекулярных соединений и наполнителей, которые обеспечат повышение морозостойкости материалов и изделий и тем самым улучшат их эксплуатационные характеристики. Системные и успешные исследования морозостойких эластомеров проводятся в Волгоградском государственном техническом университете, в Институте проблем нефти и газа СО РАН и в Северо-Восточном федеральном университете, где уже разработаны и запущены в опытные производства изделия с оригинальной рецептурой резин, перспективной для применения в холодном климате. Основой морозостойких эластомеров служат неполярные каучуки: натуральные, изопреновые, бутадиеновые, бутильные, а также их сополимеры, с температурой стеклования до -60°C . Для улучшения морозостойкости в них вводят определенные наполнители [13].

Эластомеры, созданные в ВолгГТУ, обладают гарантированной работоспособностью в температурном интервале -60°C до $+200^{\circ}\text{C}$, кроме того, они устойчивы к воздействию нефтепродуктов. В качестве базового каучука выбраны гидрированные бутадиен-нитрильные сополимеры, наполнителем служат активные марки технического углерода. Для снижения температуры стеклования разработчики добавляют сложноэфирные пластификаторы: дибутилфталат, дибутилсебацат, диоктиладипинат [14].

Системные исследования в области создания морозостойких эластомеров проводятся в ИПНГ СО РАН, а разработанные рецептуры резиновых смесей активно внедряются в промышленность через опытное производство в ООО "Нордэласт". Исследователями института разработаны и запатентованы резины на основе бутадиен-нитрильных каучуков с нанодисперсными твердыми наполнителями, например, терморасширенным графитом или цеолитами. Такие наполнители обеспечивают максимальное структурирование полимерной матрицы на различных уровнях орга-

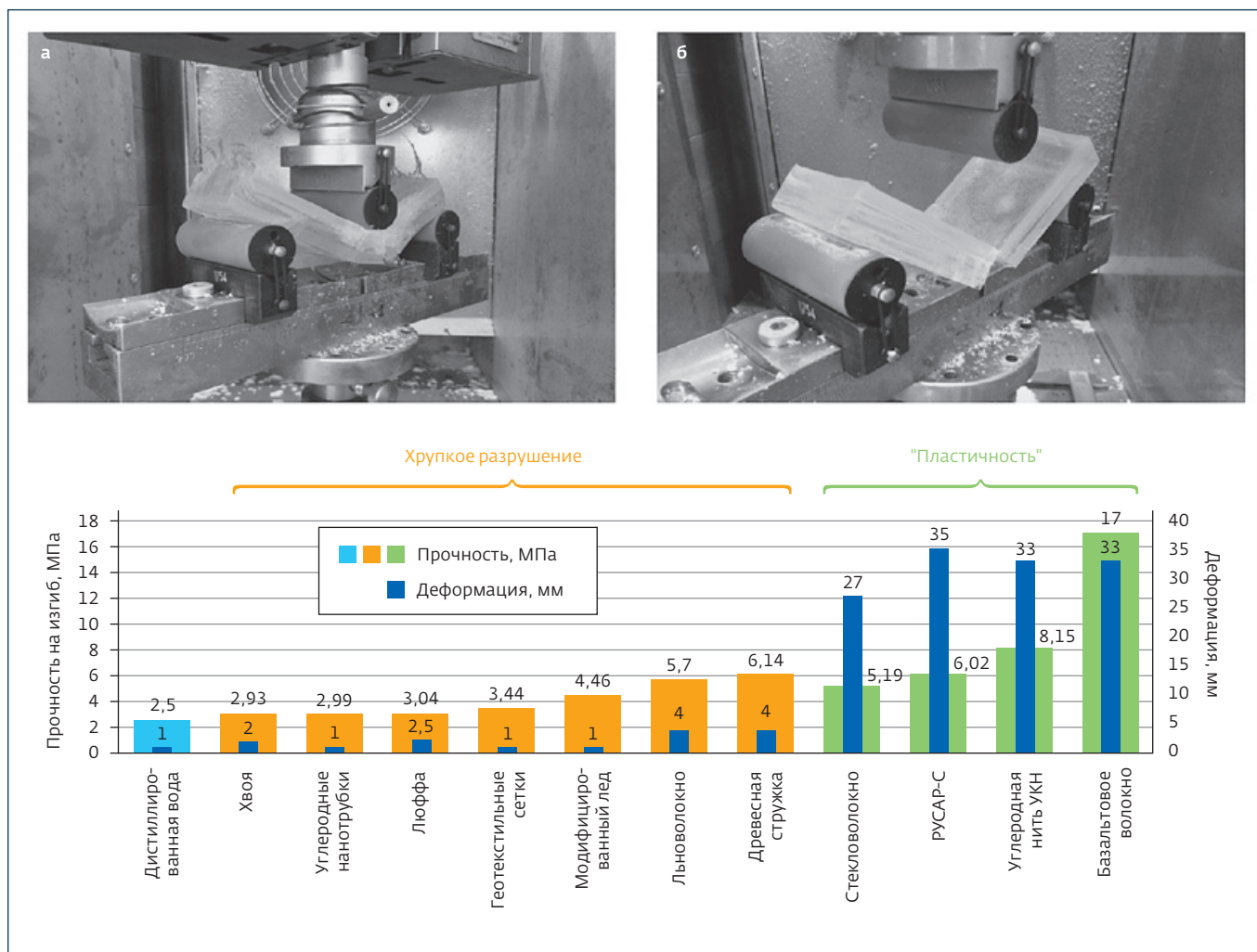


Рис.3. Поведение при нагрузке композита с ледовой матрицей (а) и дистиллятного льда (б). Сравнительная характеристика композиционных материалов с ледовой матрицей с разными наполнителями (в)

низации и позволяют получить материалы со свойствами, зачастую недостижимыми для традиционных материалов [15, 16]. Добавка к бутадиен-нитрильным каучукам БНКС-18 сверхвысокомолекулярного полиэтилена позволила создать эластомеры, сочетающие морозостойкость с высокими триботехническими и агрессивностойкими свойствами.

Хорошей альтернативой традиционно используемому каучуку может служить пропиленоксидный каучук, его высокая морозостойкость (-74°C) связана не с присутствием пластификатора, а с эластомерной основой. Однако этот каучук имеет серьезные недостатки – низкую маслостойкость и высокую остаточную деформацию сжатия. Разработанные на основе природного цеолита наполнители позволили создать эластомер, эксплуатационные свойства которого остаются на высоком уровне после 2 лет экспозиции в нефти при температурах окружающей среды г. Якутска [17].

Изучением работоспособности морозостойких резин занимаются в Северо-Восточном федеральном университете им. М.К.Аммосова, Якутск. Их патент "Морозостойкая резина на основе пропиленоксидного каучука и природных бентонитов", полученный совместно с ИПНГ СО РАН, вошел в список "100 лучших изобретений России" [18].

МАТЕРИАЛЫ НА ЛЕДОВОЙ ОСНОВЕ

Учитывая высокую стоимость материалов, завозимых в Арктику с материка, перспективно использование льда в качестве конструкционного материала для дорог, переправ, взлетно-посадочных полос, разгрузочных площадок и других сооружений. Однако лед обладает ограниченным температурным интервалом эксплуатации и низкими прочностными показателями – он мгновенно растрескивается при достижении критического нагружения, и нередко случаи, когда техника проваливается под лед. В ВИАМ развер-

нуты системные исследования способов упрочнения льда различными наполнителями, включая волокна искусственного и природного происхождения [19, 20].

Введение армирующих добавок существенно изменяет поведение льда при испытаниях на изгиб. На рис.3 показано, что образец дистиллятного льда разрушается при прогибе деформации около 1 мм и приложенном напряжении 1,95 МПа, тогда как композит, армированный двумя слоями органических волокон вдоль образца, сохраняет свою целостность даже при растрескивании ледяной матрицы. Деформация композита достигает 32 мм при приложенном усилии 6,23 МПа [19]. Существенным образом меняется характер растрескивания – в композитах оно становится многоступенчатым и сильно отличается от разлома ледяного дистиллята по числу и характеру трещин, композит сохраняет целостность даже после разлома ледяной матрицы. На рис.3 приведена гистограмма характеристик прочностных свойств композиционных материалов с ледяной матрицей, армированных различными наполнителями (полимерные, минеральные и углеродные волокна), включая биологические материалы (опилки, стружка, хвойные иголки, льняные волокна), с различной морфологией (дисперсные, волокнистые), с разной архитектурой армирующих конструкций, с варьируемым соотношением матрица/арматура. Оптимальные характеристики продемонстрировали композиты, армированные базальтовыми волокнами, они почти в 7 раз прочнее и в 30 раз более деформируемые льда из дистиллята при изгибном воздействии. При сжатии ледяного цилиндра он крошится на столбики, которые рассыпаются, тогда как композит, армированный древесными стружками, сжимается без растрескивания, увеличиваясь в диаметре на 40%.

Важное и интересное достоинство армированного льда – то что его, в отличие от обычного льда, можно подвергнуть механической обработке и придать определенную форму. Например, пайкерит, содержащий 15% опилок, в 4 раза прочнее льда, обладает ковкостью и оказывает примерно такое же сопротивление взрыву, как бетон [21]. Армирование можно сопровождать модифицированием структуры льда, добавляя в замораживаемый раствор различные высокомолекулярные вещества, используемые при заливке льда спортивных сооружений. Тип наполнителя, его концентрация существенно влияют на зернистую структуру льда, а следовательно, и на прочностные, эксплуатационные свойства [22]. Сочетание армирования и модифицирования может привести к синергизму, улучшающему физико-механические и другие свойства ледяного композита.

В настоящее время определились тенденции создания арктических материалов с элементами интеллекту-

альности. Ведутся исследования композитов на ледяной основе с вмороженным оптоволокном, имеющим брэгговские решетки. Частота световой волны, проходящей по этим волокнам, чувствительна к деформации ледяной матрицы, что позволяет проводить мониторинг деформации образца при внешнем механическом и температурном воздействиях. Используя возможность фиксировать накопление деформации при циклическом нагружении ледяного образца, можно прогнозировать разрушение ледяных сооружений и предупреждать аварийные ситуации [23].

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Арктика – одна из самых хрупких экосистем на Земле. В то же время этот регион формирует климат нашей планеты, поэтому решение вопросов, связанных с состоянием ее окружающей среды, носит глобальный характер. Россия раньше других стран приступила к хозяйственному освоению и интенсивному использованию природных ресурсов Арктики, которые часто протекали без учета уязвимости естественных экосистем к техногенным воздействиям. В результате во многих районах Арктики возникли экологические "зоны бедствия", где масштабы деградации окружающей среды достигли опасных значений, а уровни загрязнения существенно превысили допустимые нормы.

В проекте ЮНЕП/ГЭФ "Российская Федерация – Поддержка Национального плана действий по защите арктической морской среды" выделено 12 импактных регионов, т.е. регионов, где в результате антропогенного воздействия произошли негативные изменения природной среды, приведшие к появлению и развитию острых экологических ситуаций (табл.1) [24, 25].

Как видно из таблицы, загрязнение носит разнообразный характер, степень остроты экологических проблем разнится от проблемной до критической. Среди экологических проблем Арктического региона остро стоит вопрос загрязнения вод северных морей аварийными разливами нефтепродуктов, ситуация будет усугубляться с возрастанием добычи углеводородного сырья и активизацией грузопотока по СМП. Поэтому актуален поиск технологий ликвидации аварийных разливов на местах добычи, переработки и транспортировки.

Существует несколько методов ликвидации разлива нефти в открытой воде: механический, термический или выжигание, физико-химический с использованием диспергентов и сорбентов и биологический. Исследователи Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) им. И.М.Губкина объединили последние два метода и создали новые биокомпозитные материалы [26, 27]. Предложенный подход основан на способности микро-

Табл.1. Импактные районы российской Арктики

Импактный район	Источник загрязнения	Приоритетные загрязняющие вещества	Оценка остроты экологической ситуации
Западно-Кольский	Цветная металлургия, горнодобывающая промышленность	Диоксид азота, пыль, тяжелые металлы (Cu, Ni, Co), фтористый углерод	Кризисная
Центрально-Кольский	Цветная металлургия, горнодобывающая промышленность, АЭС, транспорт	Диоксиды серы и азота, пыль, тяжелые металлы (Cu, Ni, Co, Pb, Cr), Sr, P, радионуклиды	Кризисная (катастрофическая в случае аварии на АЭС)
Карельский	Целлюлозно-бумажная промышленность, лесопромышленный комплекс	Диоксиды углерода, серы и азота, метилмеркаптан, лигносульфаты, метанол, ртуть, фурфурол, фенолы	Напряженная
Архангельский	Целлюлозно-бумажная промышленность, лесопромышленный комплекс, машиностроение, теплоэнергетика, транспорт	Диоксиды углерода, серы и азота, тяжелые металлы, метилмеркаптан, лигносульфаты, фенолы, формальдегид, метанол, ПАУ	Критическая
Тимано-Печорский	Добыча и транспортировка углеводородного сырья	Нефтепродукты, диоксиды углерода, серы и азота, тяжелые металлы, ПАУ	Критическая
Воркутинский	Горнодобывающая промышленность, теплоэнергетика, стройиндустрия	Пыль, тяжелые металлы, ПАУ, сажа, углеводороды	Критическая
Новоземельский	Военные объекты, затопление ядерных установок и радиоактивных отходов	Радионуклиды, тяжелые металлы	Критическая (потенциально кризисная)
Нижне-Обский	Добыча и транспортировка углеводородного сырья	Нефтепродукты, диоксиды углерода, серы и азота, тяжелые металлы, ПАУ	Критическая
Норильский	Цветная металлургия, горнодобывающая промышленность	Диоксиды серы и азота, пыль, тяжелые металлы, мышьяк, формальдегид, сажа	Кризисная
Яно-Индигирский	Горнодобывающая промышленность	Пыль, тяжелые металлы, механические нарушения геосистем	Напряженная
Западно-Чукотский	Горнодобывающая промышленность, АЭС	Тяжелые металлы, пыль, радионуклиды	Напряженная (катастрофическая в случае аварии на АЭС)
Восточно-Чукотский	Горнодобывающая промышленность	Тяжелые металлы, пыль, ПАУ, углеводороды, сажа	Напряженная

организмов использовать вещества-загрязнители в качестве продукта питания в процессе своей жизнедеятельности. В полимерную нетканую матрицу из сополимера акрилонитрила и метилметакрилата, полученную методом аэродинамического формования, внедряют биологический

материал, который комплементарен бактериям, способным питаться нефтью. Такими материалами могут быть свекольный жом, ламинария, сфагнум, ряска или комбикорм. Иммобилизацию углеводородокисляющих микроорганизмов осуществляют погружением нетканого полимера

в суспензию клеток. Этот процесс происходит при температуре 18–26°C в течение 1–2 суток. Как только в среде, где находится биокомпозит, появляется нефть или другие углеводороды, бактерии их активно перерабатывают и быстро размножаются. В модельном эксперименте морская вода очищалась от нефти на 98% на 25-е сутки. Проблема состоит в том, что большинство углеводородокисляющих бактерий обладают недостаточной активностью в холодных арктических водах. Поэтому учеными биологического факультета МГУ были культивированы особые микробные сообщества Nsk1, Nsk2 и Csha2, способные осуществлять биодеструкцию нефти в воде с температурой +4°C [28]. Количественный анализ показал, что степень расщепления средне- ($C_{12}-C_{23}$) и высококипящих ($C_{20}-C_{32}$) фракций наиболее активным сообществом Csha2 составляет 76,8% и 71,9% соответственно.

Развивается и другой интересный подход – так называемые "пастухи нефти". При разливе нефти в открытом водоеме пятно распространяется по поверхности воды очень тонким слоем, кроме того, происходит эмульгирование нефти в воде. В то же время для сжигания нефти необходимо поддерживать определенную толщину пленки на протяжении всего процесса горения. Для уменьшения площади пятна и обеспечения необходимой толщины применяют химические агенты, называемые "пастухами". Нефть собирается в пятно ограниченной площади благодаря разнице в поверхностных натяжениях углеводорода и окружающего его вещества "пастуха". В настоящее время применяют два агента: OP-40 на основе силикона и TS6535 на основе углеводородов. В модельном эксперименте среднего масштаба, проведенном в большом водохранилище (20 м²×1 м) при различных температурах и с разными марками нефти, было продемонстрировано, что "пастух" OP-40 способен обеспечить толщину нефтяного пятна, достаточную для воспламенения и последующего распространения пламени. Кроме того, он может повторно собирать остатки нефти после тушения пламени [29].

НАУКОМЕТРИЯ АРКТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Сегодня интерес к Арктике наблюдается во всем мире, исследования в области арктического материаловедения ведутся даже в тех странах, которые географически далеки от нее, и потому интересен библиометрический анализ публикаций, связанных с арктическим материаловедением. Анализ проводился по данным опроса экспертов и библиометрическим выборкам из базы данных Chemical Abstracts Plus (CAPlus) сервиса Chemical Abstracts Service (CAS, США) [30]. На первый взгляд библиометрический анализ, дающий численную информацию, кажется более корректным по сравнению с опросами экспертов, однако, как показали исследования, его достоверность сильно зависит от выбора контролируемых терминов публикаций, по кото-

рым осуществляется выборка. Было проведено несколько выборок. В первой использовались термины, касающиеся характеристик материалов, которые в принципе могут применяться в Арктике (Cold-resistant materials; Heat-resistant materials; Impact-resistant materials; Fire-resistant materials; Chemically resistant materials; Water-resistant materials; Oil-resistant materials; Corrosion-resistant materials; Abrasion-resistant materials; Light-resistant materials; и др.). Из найденных 4327 документов патенты составляют 3854, журнальные статьи – 434. Иными словами, исследования материалов носят явно выраженный прикладной характер. Но материал в условиях Арктики будет использован лишь в том случае, если он обладает совокупностью свойств, а не одним из них. Поэтому была проведена вторая выборка: сначала проводился отбор по контролируемому термину Arctic, затем отобрано 669 документов, которые классифицируются как материаловедческие в соответствии с рубриками базы данных (CA Section Titles). В этом случае выбираются материалы, реально работающие в арктических условиях, и их в 6 раз меньше, чем в выборке потенциально перспективных материалов.

Отечественные эксперты определили Россию ведущей страной в изучении арктических материалов, назвав наиболее исследуемыми материалами металлические сплавы. По библиометрическим показателям первой выборки доминируют Япония и Китай, такой показатель объясняется высоким уровнем материаловедения в этих странах. Интересно отметить, что, широко культивируя статейные публикации на английском языке, эти страны в подавляющем большинстве делают патенты на родных языках.

Несмотря на обширность арктических территорий в России и высокую заинтересованность в их освоении, доля российских публикаций составляет лишь 5%, что явно мало для признанного лидера промышленного и социального освоения Арктики. Основные исследуемые материалы – высокомолекулярные соединения, в силу их большого разнообразия и широкого применения.

Если посмотреть график количества публикаций по годам (рис.4), то очевидно, что системные исследования по публикациям стали появляться с 70-х годов прошлого века, хотя освоение Арктики ведется столетиями. То есть арктическое материаловедение является молодой наукой в ее современном понимании.

Библиометрические показатели по второй выборке существенно отличаются. Показатели первой тройки таковы: СССР/РФ – 175 (61+114), США – 123, Япония – 101; иное соотношение между журнальными публикациями и патентами – 428/116, т.е. изучение в большей степени носит исследовательский, чем прикладной характер; наиболее изучаемыми материалами являются металлические материалы – 406, тогда как показатель материалов на основе



Рис.4. Динамика мировых публикаций и патентов на арктические материалы. База данных CAPlus (апрель 2016 г., июль 2019 г.)

высокомолекулярных соединений – 105. Такие показатели согласуются с данными опроса экспертов, а позиция ответственного арктического материаловедения выглядит предпочтительной.

Арктическое материаловедение – молодая наука в современном понимании, хотя освоение Арктики ведется столетиями и носит явно прикладной характер. Интерес к арктическому материаловедению в последние годы резко усилился во всем мире.

Российское арктическое материаловедение представлено рядом университетских, академических, отраслевых научных организаций, которые имеют успехи в отдельных направлениях, однако в целом исследования представляются разрозненными, бессистемными, без кооперации и координации, что сильно снижает общую результативность. Для исправления ситуации необходимы конкретные организационные действия,

ЛИТЕРАТУРА

1. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Материалы для освоения Арктики и холодных территорий // XXI Менделеевский съезд, Санкт-Петербург, сентябрь 2019 г. С. 19.
2. Огородов С.А., Романенко Ф.А., Соломатин В.И. М.В.Ломоносов и освоение Северного морского пути // Вестн. Моск. ун-та сер. 5. География. 2011. № 5. С. 11–17.
3. Добротин Р.Б., Карпило Н.Г. Летопись жизни и деятельности Д. И. Менделеева. Л.: Наука, 1984. 532 с.

в первую очередь со стороны сообщества арктических материаловедов и государственных структур, ответственных за развитие научных исследований и освоение Арктики.

В развитии арктического материаловедения очевидны тенденции, характерные для материаловедения в целом: стремление к разработке материалов, сложных по химическому составу и строению, переход от простых к композиционным и далее к интеллектуальным материалам. Это сопровождается ростом многофункциональности материалов. Поскольку большинство арктических материалов может применяться во многих климатических зонах и в самых разных устройствах, то достижения арктического материаловедения могут стать импульсом развития материаловедения в целом.

Авторы благодарят Российский научный фонд за финансовую поддержку исследований по арктическим материалам (проекты №14-33-0032, №18-13-00392).

4. Жуковина М.Г. Северный морской путь: история, экономика, экология. URL: <https://goarctic.ru/work/severnnyy-morskoy-put-istoriya-ekonomika-ekologiya>.
5. Arctic potential: realizing the promise of US Arctic oil and gas resources // Committee on Arctic Research Rex W. Tillerson, Chair. National Petroleum Council 2015. URL: https://www.npcarcticreport.org/pdf/AR-Executive_Summary-Final.pdf.
6. Медовников Д.С., Виньков А.В., Имамутдинов И.Н., Механик А.Г. и др. Приоритеты России в Арктике // Специальный

- доклад к Международному форуму технологического развития "Технором-2016". Новосибирск, 2016. URL: <http://www.instrategy.ru/pdf/334.pdf>.
7. **Бузник В.М., Каблов Е.Н.** Состояние и перспективы арктического материаловедения // Вестник Российской академии наук. 2017. Т. 87, № 9. С. 827–839.
 8. **Коротовская С.В., Орлов В.В., Хлусова Е.И.** Управление процессами структурообразования при термомеханической обработке судостроительных и трубных сталей унифицированного химического состава // Металлург. 2014. № 5. С. 71–78.
 9. **Голосиенко С.А., Сошина Т.В., Хлусова Е.И.** Новые высокопрочные хладостойкие стали для арктического применения // Производство проката. 2014. № 2. С. 17–24.
 10. **Ильин А.В.** Хладостойкие конструкционные стали для морских технических средств освоения шельфа и судов ледового плавания // Отчет о работе научного совета РАН по материалам и наноматериалам. М., 2017. С. 15–19.
 11. **Boinovich L.B., Emelyanenko A.M., Modestov A.D., Domantovsky A.G., Emelyanenko K.A.** Not simply repel water: the diversified nature of corrosion protection by superhydrophobic coatings // Mendeleev Communications. 2017. V. 27. N 3. P. 254–256.
 12. Патент РФ на изобретение № 2567776. **Гнеденков С.В., Егоркин В.С., Вялый И.Е., Емельяненко А.М., Синебрюхов С.Л., Бойнович Л.Б.** Способ получения защитных супергидрофобных покрытий на сплавах алюминия.
 13. **Елисеев О.А., Чайкун А.М., Бузник В.М., Соколова М.Д., Попов С.Н.** Основные принципы построения рецептур морозостойких резин для изделий, эксплуатируемых в условиях арктического климата // Перспективные материалы. 2015. № 11. С. 5–18.
 14. **Новиков И.А., Демидов Д.В., Гаджимурадов Р.А., Востриков Д.С., Ваниев М.А.** Исследование низкотемпературных свойств и маслостойкости резин, предназначенных для арктического применения // Известия ВолгГТУ. 2016. № 183. С. 143–16.
 15. Патент РФ на изобретение № 2326903. **Адрианова О.А., Биклибаева Р.Ф., Ларионова М.Л., Морова Л.Я., Попов С.Н., Соколова М.Д.** Цеолитосодержащая морозостойкая резиновая смесь.
 16. Патент РФ на изобретение № 2356918. **Барнаков Ч.Н., Биклибаева Р.Ф., Ларионова М.Л., Морова Л.Я., Соколова М.Д.** Морозостойкая резиновая смесь с терморасширенным графитом.
 17. Патент РФ на изобретение № 2294341. **Биклибаева Р.Ф., Петрова Н.Н., Портнягина В.В., Федорова А.Ф.** Морозостойкая резиновая смесь на основе пропиленоксидного каучука.
 18. Патент РФ на изобретение № 2493183. **Петрова Н.Н., Портнягина В.В.** Морозостойкая резина на основе пропиленоксидного каучука и природных бентонитов.
 19. **Buznik V.M., Landik D.N., Erasov V.S., Nuzhnyi G.A., Cherepanin R.N., Novikov M.M., Goncharova G.Yu., Razomasov N.D., Razomasova T.S., Ustyugova T.G.** Physical and mechanical properties of composite materials on the basis of an ice matrix // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. V. 8, N 4. P. 618–625. DOI: 10.1134/S2075113317040050.
 20. **Бузник В.М., Василевич Н.И.** Пористые волокнистые материалы – новые подходы // Лаборатория и производство. 2018. № 4. С. 122–130.
 21. **Ковалев О.В., Андреев М.Н., Райс В.В.** Пайкерит – льдокомполит Второй мировой войны // Лед и Снег. 2016. Т. 56, № 1. С. 119–127.
 22. **Архаров И.А., Гончарова Г.Ю.** Экспериментальное исследование ледовых структур, модифицированных полимерами // Холодильная техника. 2010. № 11. С. 46–50.
 23. **Махсидов В.В., Кашарина Л.А., Нужный Г.А., Разомасов Н.А., Гончарова Г.Ю., Бузник В.М.** Применение интегрированных волоконных брэгговских решеток для оценки деформации льда // Материаловедение. 2019. № 5. С. 3–8.
 24. Проект ЮНЕП/ГЭФ "Российская Федерация – Поддержка Национального плана действий по защите арктической морской среды". Горячие точки Севера России (Мурманская обл., Республика Карелия, Архангельская обл., Ненецкий АО, Республика Коми, Ямало-Ненецкий АО, север Красноярского края, Республика Саха, Чукотский АО). Прибрежные морские импактные районы Российской Арктики. М., 2008.
 25. **Лукин Ю.Ф.** "Горячие точки" российской Арктики // Арктика и север. 2013. № 11. С. 4–38.
 26. **Дедов А.Г., Иванова Е.А., Санджиева Д.А., Лобакова Е.С., Кашеева П.Б., Кирпичников М.П., Ишков А.Г., Бузник В.М.,** Новые материалы и экология: биокомпозитные материалы для ремедиации акваторий // Химическая технология. 2016. Т. 17. № 6. С. 272–288.
 27. **Дедов А.Г., Джабраилова Х.С., Зайцева Ю.Н., Иванова Е.А., Идиатулов Р.К., Кузнецова О.В., Лобакова Е.С., Санджиева Д.А., Шапиро Т.Н.** Биокомпозитные материалы для очистки водных сред, загрязненных углеводородами // Нефтехимия. 2019. Т. 59. № 3. С. 297–303.
 28. **Федоренко В.Н., Серезкин И.Н., Ламова Я.А., Князюк М.К., Нетрусов А.И., Шестаков А.И.** Свойства естественных углеводородокисляющих микробных сообществ для утилизации нефтяных загрязнений в Северных регионах // Биотехнология. 2015. № 6. С. 72–78.
 29. **Rojas-Alva U., Andersen B.S., Jomaas G.** Chemical herding of weathered crude oils for in-situ burning // Journal of Environmental Management. 2019. V. 250. 109470.
 30. **Бузник В.М., Бурковская Н.П., Зибарева И.П., Черепанин Р.Н.** К вопросу построения дорожной карты отечественного арктического материаловедения (Часть I) // Материаловедение. 2017. № 4. С. 8–16.