

УДК 532.542 + 621.6

СПГ: перспективные сферы применения и проблемы транспортировки на большие расстояния

Ю.А. Кузма-Кичта¹, В.В. Глазков¹, Ю.В. Иванов², К.Е. Мякшина¹, Ямагучи Сатару²

¹ НИУ «МЭИ», Москва, 112250, Россия

² Chubu University, Kasugai, Aichi, Japan

e-mail: VVGlazkov@gmail.com; kuzma@itf.mpei.ac.ru

Поступила в редакцию 27.02.2019

После доработки 04.03.2019

Принята к публикации 08.03.2019

Рассмотрены проблемы транспортировки СПГ на большие расстояния морским и железнодорожным транспортом, а также по трубопроводам. Обсуждается возможность перекачки СПГ на большие расстояния по каналам системы охлаждения криогенных сверхпроводящих кабелей. Описаны методы снижения гидравлического сопротивления таких каналов как за счет модификации поверхности каналов, так и за счет изменения свойств прокачиваемой жидкости. Рассмотрены сферы применения СПГ, в первую очередь на транспорте и в авиации.

Ключевые слова: СПГ, транспортировка, криогенный кабель, гидравлическое сопротивление, модификация поверхности, противотурбулентные присадки, шуга, волокна.

Введение

Первые попытки крупнотоннажного ожижения природного газа были осуществлены в начале XX века. В 1912 г. в США получили первый сжиженный газ, но эта технология получила развитие годами позже. Промышленные масштабы сжижения газа были достигнуты лишь к середине 1940-х гг. Одновременно с этим возник вопрос о транспортировке полученного продукта. С тех пор были предложены различные варианты транспортировки и морским, и сухопутным путем.

1. Транспортировка СПГ морским транспортом

Одним из самых используемых и доступных способов доставки является морской транспорт. Главное преимущество – возможность транспортировки СПГ в любую точку мира. Однако сжижение представляет собой высокотехнологичный, энергоемкий и достаточно дорогой процесс. Он требует разработки газовых месторождений, строительства криогенных станций, терминалов по регазификации, грузовых терминалов, хранилищ, емкостей танкеров. Поэто-

му только к 1950-м гг. при интенсивном развитии сопутствующих технологий стали возможны первые морские поставки СПГ на большие расстояния. Первым судном для перевозки сжиженного природного газа стал переоборудованный сухогруз «Marlin Hitch» постройки 1945 г., в котором использовались алюминиевые танки с внешней теплоизоляцией из бальсы. Сухогруз был переименован в «Methane Pioneer» и в 1959 г. совершил свой первый рейс с 5000 м³ груза из США в Великобританию.

Первое же специализированное судно было построено в Англии, на нем было запланировано осуществлять перевозку СПГ из Алжира в Великобританию. Газовоз (рис. 1) получил название «Methane Princess» и имел вместительность 34 500 м³ метана.

За 60 лет развития отрасли условия транспортировки и конструкции газовозов значительно изменились, вместительность увеличилась с 27 500 до 125 000 м³ и вскоре возросла до 216 000 м³. При этом важным аспектом являлся выбор конструкции емкости. Самые первые суда имели грузовые танки типа Conch, которые представляли собой призматические цистерны из алюминия с бальсовой изоляцией. Наибольшую



Рис. 1. Первый танкер для перевозки СПГ



Рис. 2. Современный газовоз с мембранными танками

популярность получили танки типа MOSS, которые, в свою очередь, были заимствованы у судов, которые специализировались на доставке нефтяных газов. Сферические цистерны имеют мембраны, а в качестве вторичной изоляции используются панели из стеклопластика, разделенные листами алюминия. На сегодняшний день также распространены суда, имеющие встроенные танки мембранного типа, модели Q-Max (рис. 2). Танкеры устроены таким образом, что в случае аварии и повреждении первичной изоляции вторичная оболочка должна предотвратить возможные утечки и взрывы. Все виды грузовых судов имеют тепловую защиту, но большая разность температур внешней среды и перевозимого газа все же вызывает кипение и переход небольшой части газа из жидкой фазы в газообразную. Средний процент отпарного газа от общего объема перевозимого сжиженного газа составляет от 0.1% до 0.15%.

На сегодняшний день насчитывается более четырехсот танкеров, оборудованных для транспортировки сжиженного газа. По оценкам специалистов их число может увеличиться до пятисот в ближайшие три года.

Для развития рынка СПГ важным вопросом является рост числа морских судов, использующих сжиженный газ в качестве топлива. В эксплуатацию введены три модели СПГ-двигателей: двигатели с искровым зажиганием, использующие только природный газ, двухтопливные двигатели с запальным дизельным топливом и рабочим газом высокого или низкого давления, что позволяет осуществлять совместную работу судна на СПГ, дизеле и мазуте. Это предоставит возможность осуществлять перевозки по всему миру, переходя на тот или иной

вид топлива в зависимости от потребностей и соответствовать требованиям зон Emission Control Area (ECA), которые осуществляют контроль процентного содержания вредных составляющих в используемом топливе.

2. Железнодорожный транспорт СПГ

Сухопутная транспортировка цистерн с СПГ осуществляется железнодорожными перевозками. Данный способ не имеет существенных отличий от автомобильных перевозок, но имеет ряд преимуществ: постоянные поставки больших объемов сжиженного газа на расстояния более 400 км по железной дороге экономически более выгодны, железнодорожные перевозки не имеют жесткой географической привязки в отличие от морских перевозок. В мире, особенно в США, железнодорожные перевозки СПГ используются довольно широко, освоено производство железнодорожных цистерн для перевозки СПГ объемом 129 м³. Вакуумная теплоизоляция цистерн (рис. 3) удовлетворяет



Рис. 3. Цистерна для железнодорожной транспортировки СПГ

требованиям железных дорог, срок бездренажного хранения доведен до 40 суток.

Представляется, что преимущества железнодорожного транспорта СПГ в России в настоящее время являются существенно недооцененными. Так, транспортировка 55 млрд м³ природного газа в год (мощность проекта «Северный поток-2») потребует от железной дороги дополнительно пропускать не более 20 пар поездов с СПГ в сутки. Это соответствует пропускной способности всего лишь одной однопутной ветки железной дороги. Таким образом, в отличие от дорогостоящей прокладки морских трубопроводов железнодорожная перевозка СПГ не потребует значительных финансовых и временных затрат на модернизацию инфраструктуры, являясь несоизмеримо более гибкой и не зависящей от политической конъюнктуры.

3. Транспортировка СПГ в универсальных контейнерах-цистернах

Особенно перспективной является бурно развивающаяся в настоящее время перевозка СПГ в универсальных контейнерах-цистернах (рис. 4). Контейнер-цистерна для СПГ может быть использована для транспортировки железнодорожным, морским, речным и автомобильным транспортом, обеспечивая полную сохранность продукта. Использование универсальных контейнеров-цистерн позволяет доставлять СПГ непосредственно потребителю, минуя ста-



Рис. 4. Универсальные контейнеры-цистерны для перевозки СПГ

дию регазификации, которая для большинства потребителей не является необходимой. Использование универсальных контейнеров-цистерн позволит осуществлять свободный маневр экспортом газа по направлениям север–юг и запад–восток, в зависимости от политической и экономической конъюнктуры.

Удельная стоимость универсальных контейнеров-цистерн колеблется в диапазоне 500–1500 USD/м³ полезного объема. Таким образом, парк контейнеров-цистерн для СПГ для осуществления перевозок в объеме планируемых поставок газа по «Северному потоку-2» обойдется в 1.5–3 млрд USD. Даже с учетом необходимости модернизации железнодорожной инфраструктуры результирующие затраты будут заметно меньше, чем прокладка газовой трубы по морскому дну (оценивается в 9 млрд USD). Следует заметить, что в 2018 г. Россия экспортировала по железной дороге в Западную Европу около 100 млн т только одного угля. Таким образом, перевозка дополнительных 25 млн т СПГ по железной дороге в действительности не потребует сколько-нибудь радикальной модернизации железнодорожной инфраструктуры.

4. Применение СПГ на автомобильном и железнодорожном транспорте

Одним из главных достоинств СПГ как топлива является сниженный коэффициент выбросов в окружающую среду, также по сравнению с бензином СПГ снижает коррозию и повышает износостойкость деталей двигателя внутреннего сгорания. В связи с этим во всем мире очень активно ведутся работы по внедрению газовых двигателей в наземный транспорт. Примером внедрения газомоторных двигателей в автомобильный транспорт является проект компании КамАЗ: на данный момент первая партия автомобилей данного типа завершает заводские испытания. Особенно актуально использование газомоторного топлива на общественном транспорте. Несмотря на то, что перевод всего автопарка возможен только постепенно, так как требует создания соответствующей инфраструктуры по хранению и заправке СПГ, перспективы улучшения экологических и экономических

показателей без потерь мощности двигателей являются более значимыми.

В сфере же железнодорожного транспорта в настоящее время в мире происходит постепенный переход на использование СПГ в качестве топлива. Если говорить о России, то первый серийный российский локомотив, работающий на сжиженном газе, – магистральный газотурбовоз ГТ1h-002 (рис. 5) – прошел все испытания и показал хорошие результаты. Основное преимущество газотурбовоза относительно других типов локомотивов – возможность развивать значительную скорость при сравнительно небольших размерах и массе. Газотурбовозы принципиально экологичнее распространенных дизельных локомотивов. Показатели выхлопа газотурбинного двигателя соответствуют европейскому экологическому стандарту Евро-5, а уровень внешнего шума укладывается в действующие санитарные нормы Российской Федерации.

5. Использование СПГ в качестве топлива в авиации

Еще одним чрезвычайно перспективным направлением развития СПГ-технологий является внедрение СПГ в качестве топлива на авиационном транспорте. Первые разработки по внедрению газовых топливных систем в конструкции как грузовых, так и пассажирских самолетов начинаются с 50-х гг. прошлого века.

Уже в 1980-х гг. авиационное бюро «Туполев» разработало проект криогенного самолета, который базировался на пассажирском лайнере Ту-154. У лайнера был модифицирован топливный отсек, где поддерживалась температура ниже $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Первым двигателем самолета являлся прототип двигателя НК-88. Первая опытная модель носила название Ту-155 (рис. 6), в качестве криогенного топлива использовался жидкий водород. Было осуществлено четыре



Рис. 5. ГТ1h-002, первый газотурбовоз в России

полноценных экспериментальных полета на жидком водороде. Новая версия Ту-156 содержала три двигателя НК-89 с разделенными топливными системами: штатная (для керосина) и криогенная. Позже разработчики стали использовать вместо водорода СПГ как более простой в эксплуатации вид криогенного топлива. По итогам экспериментальных полетов было получено, что расход топлива уменьшается почти на 15%, что находится вполне в соответствии с ростом теплотворной способности СПГ по сравнению с керосином. Учитывая, что СПГ еще и дешевле авиационного керосина на 30–50%, это делает даже относительно старый авиалайнер, переоборудованный на СПГ, экономически выгодным. К этому следует добавить, что СПГ в случае нештатной ситуации (экстренный слив топлива при аварийной посадке и др.) является более безопасным, чем авиационный керосин.

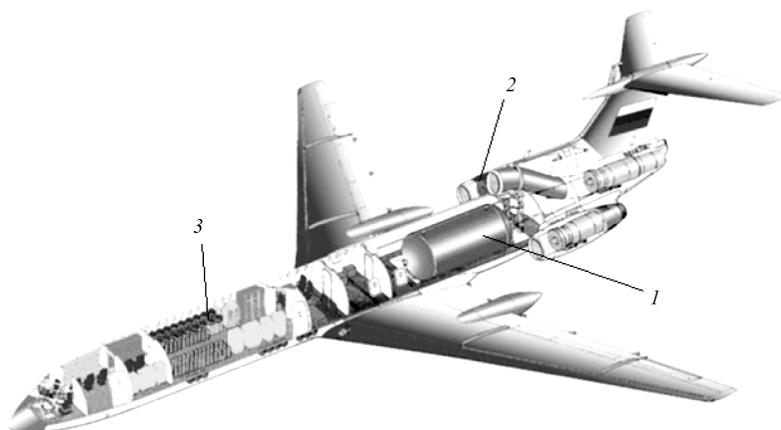


Рис. 6. Компоновочная схема ТУ-155: 1 – криогенный топливный бак; 2 – криогенный двигатель; 3 – контрольное и вспомогательное оборудование

Недостатком СПГ по сравнению с авиационным керосином (плотность 780 кг/м^3) является его меньшая плотность (410 кг/м^3), что, соответственно, требует большего на 80% объема топливных баков. Однако, как показывает анализ существующих узкофюзеляжных реактивных пассажирских самолетов, имеется возможность устанавливать дополнительные топливные баки в багажные отсеки. Это позволяет без существенной переделки конструкции увеличивать суммарный объем баков как минимум на 80–90%. Таким способом фирма Boeing, например, для модели Boeing 737 BBJ увеличивает вместимость топливных баков авиалайнера с 20 800 кг до 37 721 кг.

К началу 2000-х гг. в РФ были разработаны проекты вертолетов и самолетов, использующих СПГ, и имела возможность стать лидером в данной области. Конструкции летательных аппаратов не нуждаются в значительных изменениях, достаточно лишь заменить топливную систему, улучшив ее теплоизоляцию. Однако по ряду субъективных обстоятельств данные работы были фактически заморожены. В настоящее время в России на СПГ летает всего один вертолет Ми-8, который, по утверждению авторов разработки, является единственным в мире.

6. Трубопроводный транспорт СПГ на большие расстояния и гибридная схема транспортировки СПГ совместно с передачей электроэнергии по сверхпроводящим кабелям

Устойчивый рост потребления электроэнергии со времен Эдисона требует постоянного совершенствования систем передачи и распределения электроэнергии. Ожидается, что в первой

половине XXI века произойдет качественный скачок при внедрении технических решений, основанных на использовании высокотемпературных сверхпроводников (high-temperature superconductors, HTS) в энергосистеме.

Преимущества технологий HTS для сетей постоянного тока (DC) будут полностью проявляться только при создании линии электропередачи длиной в сотни километров [1]. В настоящее время в мире существует несколько десятков экспериментальных HTS линий переменного и постоянного тока, некоторые из которых включены в коммерческие сети [2].

Однако максимальная длина экспериментальных линий электропередачи составляет всего 1 км, а прокладка в России линии длиной 2.5 км будет завершена примерно через два года [3, 4]. Разумеется, это очень короткий участок по сравнению с той целью, которую планируется достичь. Основной проблемой является необходимость держать сверхпроводящий кабель при низкой температуре, поддерживая циркуляцию хладагента по всей длине трассы кабеля.

Тепло, генерируемое в сверхпроводящем кабеле и проходящее через тепловую изоляцию, нагревает хладагент. Это означает, что необходимо строить станции охлаждения по всему маршруту HTS-кабеля.

Существует несколько конструкций криостатов для HTS-кабеля, охлаждаемого жидким азотом (LN₂). В простейшем случае кабель устанавливается внутри трубы, по которой течет жидкий азот. Последний возвращается по специальной возвратной трубе, замыкая цикл циркуляции (рис. 7). Трубы могут быть размещены как внутри отдельных вакуумных трубчатых оболочек, так и находиться внутри общей одной оболочки, как показано на рис. 8, а, б соответственно.

Очевидно, что интервал между станциями охлаждения HTS-кабеля зависит от качества его теплоизоляции. Однако также следует принимать во внимание и дополнительные ограничения, накладываемые на систему достаточно высоким гидравлическим сопротивлением криогенных каналов. Если теп-

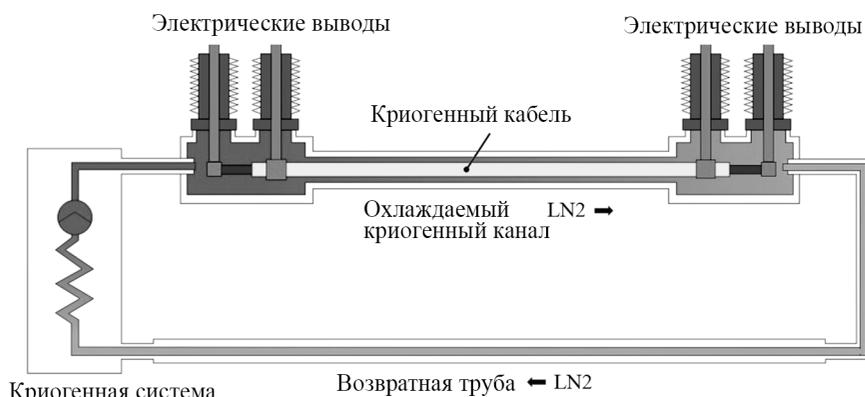


Рис. 7. Эскиз простейшей HTS линии электропередачи

ловые протечки являются существенными, расходы на строительство и эксплуатацию могут оказаться чрезмерно высокими. Расстояние между станциями охлаждения HTS-кабеля может быть несколько увеличено путем перераспределения поступающего в систему тепла между хладагентом, текущим по рубашке охлаждения кабеля, и хладагентом, текущим по возвратной трубе, таким образом, что большая часть теплового потока будет поглощена возвратным LN2.

Увеличение разницы температур на возвратном трубопроводе не является сколь угодно значащим фактором, в то время как снижение градиента температуры вдоль трубы, окружающей кабель, будет создавать благоприятные условия для эксплуатации HTS-кабеля. Технически это может быть достигнуто путем защиты трубы, окружающей кабель, радиационным экраном, охлаждаемым возвратным LN2 (см. рис. 8, в). Эта конструкция была протестирована на кабеле HTS DC в Исикари, Япония [5, 6]. В результате были достигнуты рекордно малые тепловые потоки 0.034 Вт/м в трубу, окружающую кабель [7]. Уместно отметить, что обычно эти потоки тепла составляют 1–2 Вт/м.

Существует также более широкий подход к передаче энергии, он включает в себя совместную транспортировку электроэнергии по HTS-кабелю и параллельную транспортировку химической энергии в виде сжиженного газа по трубопроводу, окружающему кабель. Гибридные системы такого типа позволяют значительно снизить капитальные затраты. Как правило, в подобных проектах рассматривается сочетание криогенного трубопровода со сверхпроводящим кабелем MgB₂, который непосредственно охлаждается перекачиваемым жидким водородом (LH2) [8, 9], как показано на рис. 8, г.

Однако нам представляется, что сочетание HTS-кабеля и трубопровода сжиженного природного газа будет экономически оправдано, принимая во внимание значительные расходы

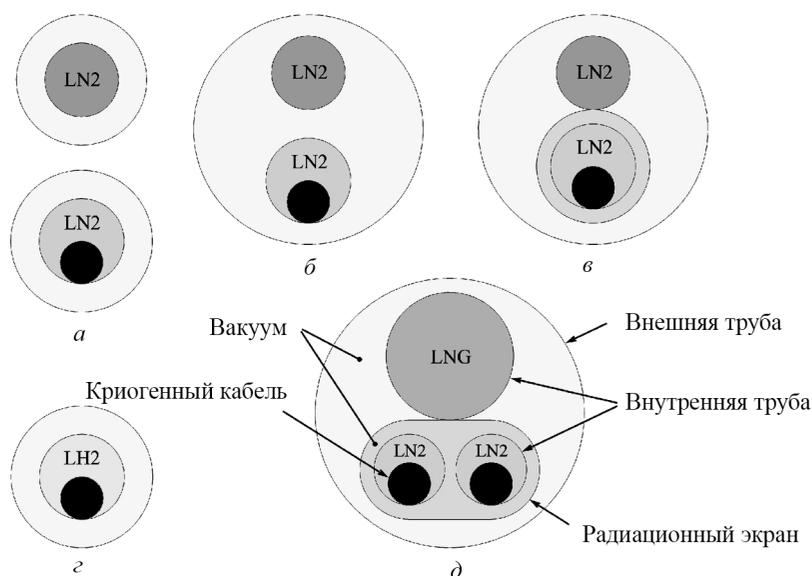


Рис. 8. Схематический рисунок конфигураций криогенных труб, которые могут быть использованы в сверхпроводящих линиях электропередачи различных типов. HTS-кабель, охлаждаемый LN2: а – с индивидуальной вакуумной изоляцией; б – с общей вакуумной изоляцией; в – с радиационным экраном. Гибридные системы: г – кабель HTS MgB₂, охлаждаемый LH2; д – HTS-кабель, охлаждаемый LN2 с защитным радиационным экраном, охлаждаемым СПГ

на производство, сжижение и последующую регазификацию СПГ. Несмотря на тот факт, что температура СПГ является слишком высокой, чтобы непосредственно поддерживать кабель в сверхпроводящем состоянии, СПГ может использоваться для охлаждения защитного радиационного экрана. В этом случае тепловой поток от охлаждаемой LN2 трубы, внутри которой находится сверхпроводящий кабель, уменьшится, по крайней мере, в десять раз по сравнению со случаем отсутствия радиационного экрана [10]. На рис. 8, д представлен эскиз соответствующей сверхпроводящей линии электропередачи.

Радиационная защита снижает тепловые потоки, но не позволяет полностью решить проблему охлаждения длинных сверхпроводящих кабелей. Большая относительная длина криогенных кабелей требует большого расхода СПГ для охлаждения радиационного экрана. В то же время гидравлическое сопротивление криогенных каналов приводит к тому, что требуются большие затраты энергии на прокачку [11].

Таким образом, из-за высокой стоимости криогенного оборудования уменьшение гидравлического сопротивления становится серьезной проблемой для длинных криогенных трубопроводов, работающих совместно со сверхпроводящими криогенными кабелями.

Гидравлическое сопротивление при течении жидкости в каналах является результатом, в первую очередь, процесса трения, возникающего между текущей по каналу жидкостью и стенками канала. Существуют два основных режима течения жидкости – ламинарный и турбулентный. Гидравлические потери давления при ламинарном течении, как правило, не могут быть изменены без изменения физических свойств перекачиваемой жидкости. Современные методы снижения гидравлического сопротивления (drag reduction methods, DRM) являются эффективными только для турбулентных течений, так как они влияют в первую очередь непосредственно на переносные характеристики турбулентности.

7. Методы уменьшения гидравлического сопротивления

Методы снижения гидравлического сопротивления можно разделить на две группы:

- модификация свойств поверхности трубы;
- изменение свойств прокачиваемой по трубе жидкости.

В основном эффект достигается за счет введения в поток специальных противотурбулентных присадок, позволяющих снизить гидравлическое сопротивление (drag-reducing agents, DRA). DRA-присадки приводят к ламинаризации, полной или частичной, исходно турбулентного течения. В первую очередь этот метод основан на снижении гидравлического сопротивления (турбулентного трения) при транспортировке жидкостей с добавлением высокомолекулярных полимеров, так называемый эффект Томса. Такого рода присадки широко используются при трубопроводной перекачке нефти и нефтепродуктов. Противотурбулентные присадки можно несколько условно разделить на три категории: полимерные и биологические добавки; взвеси твердых частиц; поверхностно активные вещества (ПАВ).

7.1. Модификация свойств поверхности трубы

7.1.1. Снижение гидравлического сопротивления с помощью микро- и наномасштабных интенсификаторов

Капельки воды скатываются с листьев лотоса при наклоне даже на чрезвычайно маленький угол из-за специфики рельефа поверхности листа. Структура поверхности листьев лотоса со-

стоит из комбинации рельефа двух масштабов: один – 10 нм, другой – 100 нм. Кроме того, лист лотоса покрыт воском.

Сочетание специфического рельефа поверхности и воскового покрытия придает листу лотоса ультра-гидрофобные свойства (рис. 9). Так как ультра-гидрофобные поверхности могут использоваться в различных приложениях, то прогресс в разработке ультра-гидрофобных покрытий в настоящее время идет очень активно [12].

В работе [13] исследовалось гидравлическое сопротивление потока воды в канале с поверхностью, покрытой шероховатостью с ультрамалой двойной кривизной [13] (рис. 10). Поверхность была подготовлена с помощью литографии и ионного травления и имела покрытие.

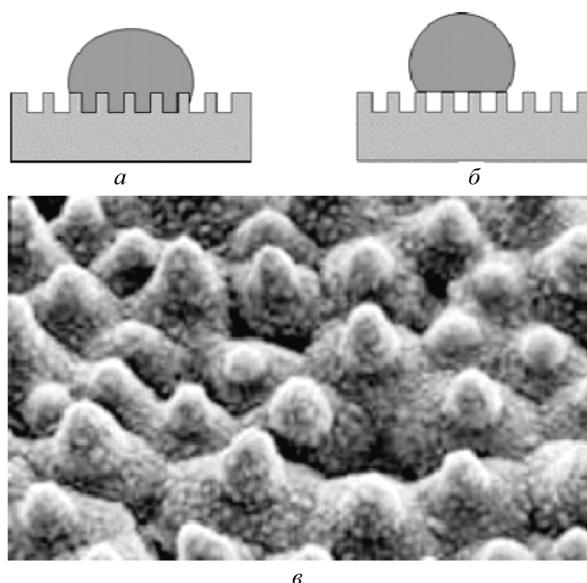


Рис. 9. Различные виды взаимодействия жидкости с поверхностью (а), (б); в – рельеф листьев лотоса, состоящий из комбинации двух масштабов: 10 нм и 100 нм, лист покрыт воском

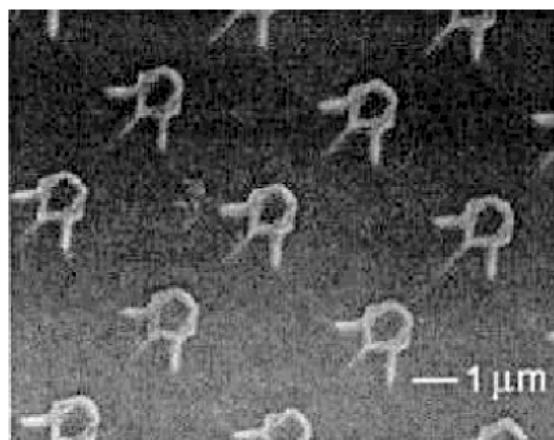


Рис. 10. Поверхность с шероховатостью, имеющей ультрамалую двойную кривизну [13]

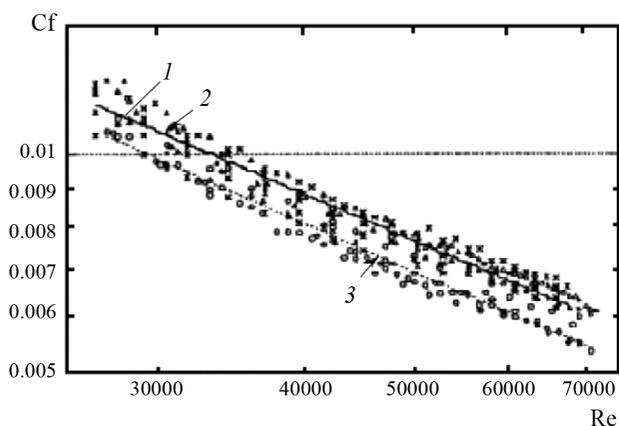


Рис. 11. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от Re для гладкой поверхности и поверхности с микронеровностью двойной кривизны с покрытием и без покрытия [13]: 1 – экспериментальные точки; 2 – аппроксимирующая кривая для поверхности без покрытия; 3 – аппроксимирующая кривая для поверхности с покрытием

Рис. 11 демонстрирует зависимость коэффициента гидравлического сопротивления при течении воды в трубе от числа Рейнольдса для гладкой поверхности и поверхности с микронеровностью, имеющей двойную кривизну, как с покрытием, так и без него. Было установлено, что коэффициент гидравлического сопротивления для труб с такой микронеровностью и покрытием меньше, чем для гладких труб. Для поверхностей с высотой рельефа 5 мкм и покрытием гидравлическое сопротивление уменьшалось на 10% при $Re = 65\ 000$.

В работе [14] было исследовано влияние микро- и нанорельефа поверхности на контактный угол. Были изучены различные виды рельефов: микролинейный, микростолбчатый и наностолбчатый (рис. 12). В работе было показано,

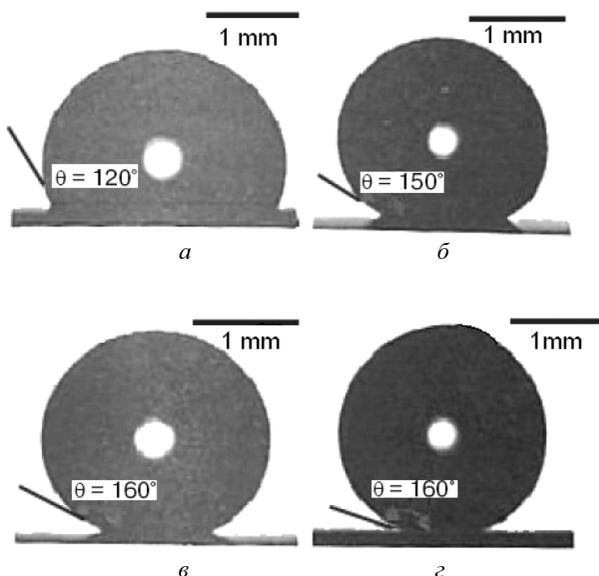


Рис. 13. Контактный угол на поверхности с различным микрорельефом [14]: а – тефлон; б – микро-линейный рельеф; в – микро-столбчатый рельеф; г – нано-столбчатый рельеф

что на поверхности с наностолбчатым рельефом краевой угол возрастал более чем на 90%. Увеличение краевого угла на микролинейном рельефе достигало 30–60% и 60% – на поверхности с микростолбчатым рельефом (рис. 13).

В качестве попытки создания гидрофобных поверхностей в [15] был предложен метод создания плотно упакованных молекулярных слоев ПАВ на внутренней поверхности трубы. Формирование молекулярных слоев проводилось за счет адсорбции поверхностно-активных веществ на поверхности металла из водных растворов, как показано на рис. 14. Результаты измерения гидравлического сопротивления в трубе с адсорбированными на внутренней поверхности ПАВ

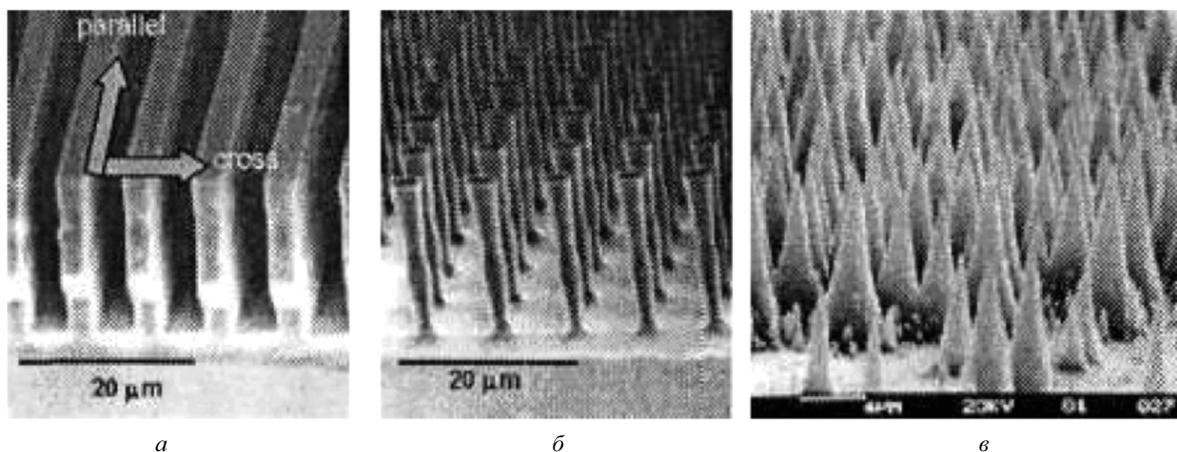


Рис. 12. Микролинейный (а), микростолбчатый (б) и наностолбчатый (в) рельефы поверхности [14]

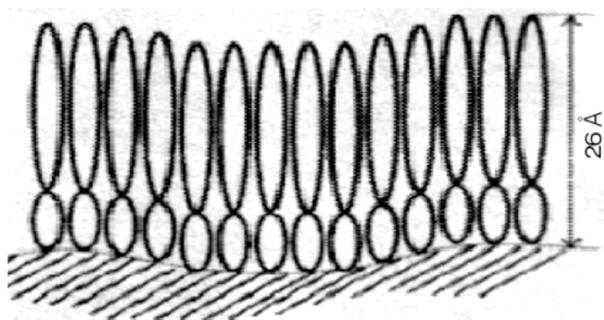


Рис. 14. Плотнo упакованные упорядоченные молекулярные слои ПАВ на внутренней поверхности трубы [15]

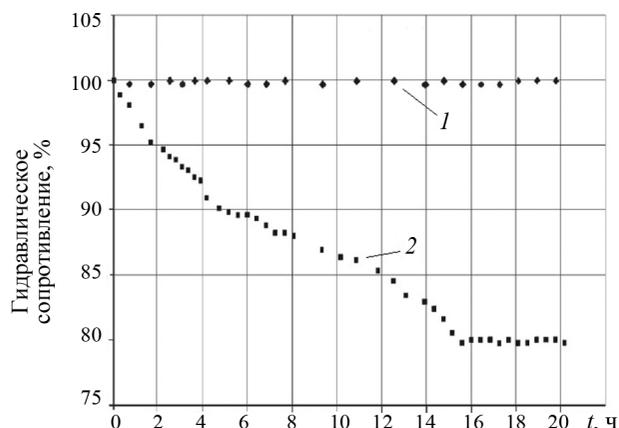


Рис. 15. Изменение со временем гидравлического сопротивления трубопровода, по которому перекачивается вода: 1 – поток воды без добавок ПАВ; 2 – поток с добавлением ПАВ, на внутренней поверхности трубопровода происходит сорбция ПАВ [15]

представлены на рис. 15. Изменение во времени относительной величины гидравлического сопротивления является результатом сорбции молекул ПАВ на поверхности трубы, как показано в работе. Верхняя кривая на рис. 15 соответствует изменению гидравлического сопротивления трубопроводов без добавки ПАВ, нижняя кривая – в присутствии молекул ПАВ в потоке.

Таким образом, полученные данные указывают на резкое снижение гидравлического сопротивления трубопровода при сорбции ПАВ на ее внутренней поверхности. Согласно работе [15], сорбция происходит вплоть до появления на поверхности упорядоченных слоев ПАВ, сопоставимых по толщине со шероховатостью исходной поверхности. Этот метод делает возможным уменьшить гидравлическое сопротивление трубопроводов более чем на 20%, являясь простым и экономически выгодным.

В работах [16, 17] рассматривалось взаимодействие потока жидкости с профилированной стенкой (рис. 16). Было показано, что при обтекании микропрофилированной поверхности



Рис. 16. Взаимодействие потока жидкости с профилированной гидрофобной стенкой [16]

возможно возникновение эффекта местного скольжения на стене.

Использование микрорельефа может уменьшить гидравлические потери до 40% [19]. Газовые полости, остающиеся в микрорельефе, приводят к местному проскальзыванию скорости на стенке [18]. Однако тут возникают две проблемы: необходимо поддерживать присутствие газа, захваченного микрорельефом [20], и обеспечивать устойчивость потока, обтекающего структурированную поверхность [21, 22].

7.1.2. Снижение гидравлического сопротивления за счет демпфирующих свойств поверхности

Морские млекопитающие обладают на удивление малым коэффициентом гидравлического сопротивления. Этот эффект хотя бы отчасти обусловлен особым строением их кожного покрова (рис. 17). Наблюдения М. Крамера [23, 24] над дельфинами привели его к созданию демпфирующих покрытий, обладающих способностью поглощать энергию турбулентных пульсаций в пограничном слое жидкости. По утверждению М. Крамера такие покрытия позволяли снижать гидравлическое сопротив-

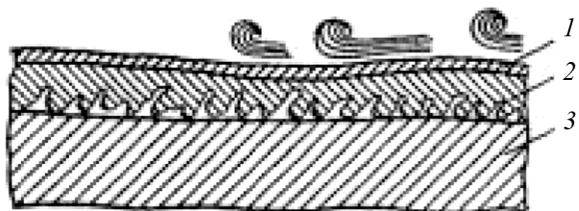


Рис. 17. Структура кожи дельфина: 1 – внешний эластичный слой (0.5 мм); 2 – внутренний эластичный слой (1 мм), пронизанный каналами, заполненными жидким жиром; 3 – слой волокнистой кожи (6 мм)

ление на 60%. Типичное демпфирующее покрытие, по идее М. Крамера, состояло из эластичного внешнего покрытия, внутренней диафрагмы и ребер жесткости, сделанных из мягкой резины. Полости между внешним и внутренним покрытиями заполнялись высоковязкой демпфирующей жидкостью. Как показали эксперименты, снижение гидравлического сопротивления было вызвано задержкой ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое у поверхности. Работы по созданию и использованию демпфирующих покрытий претерпевали свои подъемы и спады, однако в настоящее время с их помощью удастся добиться снижения гидравлического сопротивления до 50% [25].

7.1.3. Снижение гидравлического сопротивления за счет микрорельефа, копирующего биологические системы

Высокая скорость, которую при плавании развивают акулы, в большой мере обусловлена структурой ее кожи, покрытой риблетами (riblet), продольными, ориентированными по потоку ребрами или бороздками на поверхности. Последние оказывают влияние на структуру турбулентного течения и обеспечивают снижение сопротивления трения в турбулентном пограничном слое (рис. 18). В настоящее время делаются попытки воссоздать такие структуры искусственно [26, 27]. Эксперименты на искусственных риблетах показывают снижение гидравлического сопротивления максимум на 10%. Эта величина, по всей видимости, не предел и в настоящее время ведутся поиски оптимальной геометрии риблетов.

7.2. Изменение свойств прокачиваемой жидкости

7.2.1. Снижение гидравлического сопротивления в трубах с помощью полимерных добавок

Снижение гидравлического сопротивления с помощью добавок, которые снижают турбулентность в трубе, фактически является наиболее успешным и интенсивно используемым методом. Чаще всего этот метод используется при транспортировке нефти и нефтепродуктов, а также технической воды по трубопроводам. Противотурбулентные присадки можно разделить на три группы: полимерные и биологические добавки; взвеси твердых частиц; поверхностно активные вещества ПАВ [29]. Рис. 19 иллюстрирует эффективность противотурбулентных присадок [28].

люстрирует эффективность противотурбулентных присадок [28].

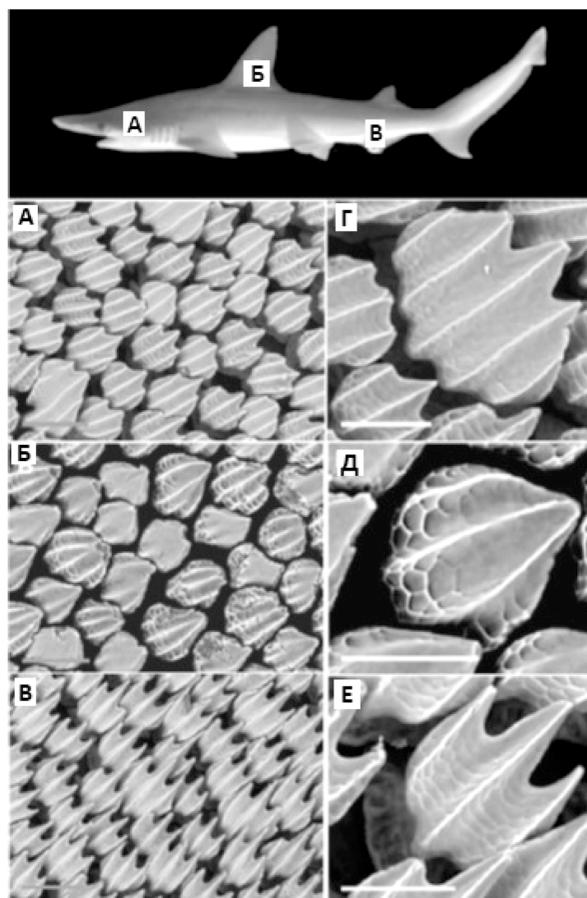


Рис. 18. Изображение поверхности кожи акулы (*Sphyrna tiburo*), полученное на сканирующем электронном микроскопе. Образцы кожи взяты из области головы (А), передней кромки спинного плавника (Б) и из области анального плавника (В), как указано на общем верхнем рисунке. Г, Д, Е – снятые с большим увеличением изображения поверхности кожи из областей А, Б, В соответственно. Когда акула плавает, направление потока жидкости вдоль поверхности слева – направо, от основания зубчиков на риблетах к их вершинам [26]

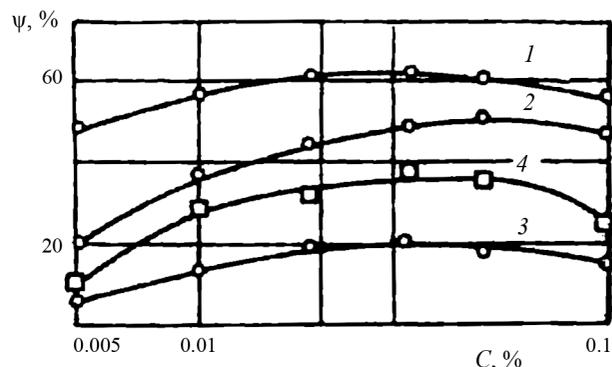


Рис. 19. Зависимость снижения коэффициента гидравлического сопротивления для течения реактивного топлива ТС-1 от концентрации противотурбулентной присадки (полибутадиен, молекулярная масса $1.2 \cdot 10^6$ (кривые 1, 2, 3); $0.66 \cdot 10^6$ (кривая 4)): 1 – $Re = 11\,000$; 2, 4 – $Re = 8\,000$; 3 – $Re = 6\,000$ [28]

Хотя влияние противотурбулентных присадок на гидравлическое сопротивление бесспорно и широко используется, однако общепринятого объяснения их действия в настоящее время нет. В работах [29, 30] перечислены как минимум шесть наиболее популярных теорий, объясняющих наблюдаемое воздействие полимерных добавок.

7.2.2. Снижение гидравлического сопротивления в суспензиях волокон

Растворы, содержащие волокна с аспектным соотношением $l/d \sim 25-35$, показали снижение гидравлического сопротивления при достаточно большом содержании волокон [32, 33]. Как показали эксперименты [32], для существенного уменьшения гидравлического сопротивления необходимы концентрации волокон вплоть до нескольких процентов. С увеличением аспектного соотношения и уменьшением диаметра волокон эффект возрастал [32–34]. Смеси, содержащие как волокна, так и полимерные добавки, показали снижение гидравлического сопротивления до 95% [35, 36]. Эта величина выше, чем достигаемая с помощью полимерных добавок и волокон по отдельности. Интересно, что полимерные добавки в таких смесях менее склонны к деградации.

В водных растворах полимерные волокна являются механически и химически стабильными и могут использоваться в широком диапазоне температур [32, 37]. В настоящее время нет общепринятого объяснения эффективности добавок волокон для подавления турбулентности в потоке. В работе [34] было высказано предположение, что волокна вызывают подавление интенсивности турбулентных вихрей в ядре потока. Однако использование волокон ограничивается тем недостатком, что они могут вызывать закупорку и абразивную эрозию трубопроводов при высокой концентрации волокон.

8. Специфические особенности проблемы снижения гидравлического сопротивления для длинных криогенных трубопроводов

8.1. Изменение свойств внутренней поверхности трубопровода

Основные способы снижения гидравлического сопротивления за счет микрорельефа для

криогенных жидкостей аналогичны решениям, используемым при более высоких температурах.

8.2. Изменение свойств прокачиваемых по трубопроводу криогенных жидкостей

Низкий уровень температур в криогенных системах приводит к тому, что ввод полимерных и биологических добавок в криогенные жидкости исключен. Добавки просто замерзают. Полимерные же нити при криогенных температурах теряют свою гибкость. Это, однако, не значит, что свойства криогенной жидкости нельзя изменить малыми добавками каких-либо веществ.

8.2.1. Снижение гидравлического сопротивления в потоках криогенной шуги

Снижение гидравлического сопротивления в потоках криогенной шуги (смеси кристаллов с жидкой фазой) [38–40] было открыто сравнительно недавно. Эксперименты по измерению гидравлических потерь и коэффициента теплоотдачи проводились в потоках криогенной азотной шуги в горизонтальной трубе квадратного сечения. Скорость потока варьировалась в диапазоне от 1.0 до 4.9 м/с, объемное содержание твердой фракции в потоке изменялось от 6 до 26%, плотность теплового потока составляла 0, 10 и 20 кВт/м². Уменьшение гидравлических потерь становилось заметным при достижении потоком скорости выше 2.5 м/с с максимальным падением на 12% по сравнению с прокачкой чисто жидкого азота. Влияния нагрева на снижение гидравлических потерь выявлено не было. Снижение коэффициента теплоотдачи становилось заметным при скорости потока выше 1.0 м/с, достигая 16 и 21% для 10 и 20 кВт/м² соответственно.

8.2.2. Снижение гидравлического сопротивления в криогенных потоках с волокнами

Как уже отмечалось ранее, растворы, содержащие волокна с аспектным соотношением $l/d \sim 25-35$, показали снижение гидравлического сопротивления. В криогенных потоках полимерные волокна также являются механически и химически стабильными и поэтому могут использоваться в широком диапазоне температур. Если гипотеза, высказанная в [34] верна, то волокна должны снижать гидравлическое сопро-

тивление и в криогенных потоках. Так как потоки криогенной шуги показывают эффект снижения гидравлического сопротивления, это представляется одним из подтверждений данной гипотезы. Если это так, то можно ожидать, что создание криогенной шуги из ледяных иглолок с аспектным соотношением l/d в диапазоне 25–35 позволит добиться наиболее оптимального результата.

Заключение

Рассмотрены проблемы транспортировки СПГ на большие расстояния морским и железнодорожным транспортом, а также и по трубопроводам.

Высказано мнение, что преимущества железнодорожного транспорта СПГ в России в настоящее время являются существенно недооцененными. Так, транспортировка 55 млрд м³ (25 млн т) природного газа в год (мощность проекта «Северный поток-2») потребует от железной дороги дополнительно пропускать не более 20 пар поездов с СПГ в сутки. Это соответствует пропускной способности всего лишь одной однопутной ветки железной дороги. В реальности перевозка дополнительных 25 млн т СПГ по железной дороге не потребует сколько-нибудь радикальной модернизации железнодорожной инфраструктуры.

Оценена стоимость парка криогенных контейнеров-цистерн, необходимого для перевозки 25 млн т СПГ. Она примерно в три раза меньше стоимости прокладки трубопровода «Северный поток-2».

Рассмотрены перспективные сферы применения СПГ, в первую очередь, на транспорте и в качестве авиационного топлива. Показано, что переход на СПГ делает даже относительно старый авиалайнер, переоборудованный на СПГ, экономически выгодным.

Обсуждается возможность создания гибридных энергетических систем при перекачке СПГ по каналам системы охлаждения криогенных сверхпроводящих кабелей.

Описаны известные методы снижения гидравлического сопротивления таких каналов, позволяющие прокачивать СПГ на значительные расстояния.

Сделан вывод, что при криогенных температурах не может быть применен широко исполь-

зуемый при перекачке нефтепродуктов реакгентный метод. Последний заключается в добавлении в поток незначительного количества длинных полимерных молекул (противотурбулентных присадок).

Сделан вывод, что для криогенных температур может оказаться эффективным добавление в поток тонких волокон, а также добавление в поток жидкости кристаллов льда СПГ (образование криогенной шуги). По своему действию эти добавки аналогичны используемым при более высоких температурах противотурбулентным присадкам.

Высказано предположение, что наиболее эффективным будет являться перекачка СПГ в виде криогенной шуги, содержащей ледяные иглолки с аспектным соотношением l/d в диапазоне 25–35.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Romashov M.A., Sytnikov V.E., Shakarian Y.G., Ivanov Y.V. Prospects of long-distance HTS DC power transmission systems // J. Phys. Conf. Ser. 2014. N 507. P. 032037.
2. Thomas H., Marian A., Chervyakov A., Stückrad S., Salmieri D., Rubbia C. Superconducting transmission lines – Sustainable electric energy transfer with higher public acceptance? // Renew. Sustain. Energy Rev. 2016. V. 55. P. 59–72.
3. Sytnikov V.E., Bemert S.E., Kopylov S.I., Romashov M.A., Ryabin T.V., Shakaryan Y.G., Lobyntsev V.V. Status of HTS cable link project for St. Petersburg grid // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2015. V. 25. N 3. P. 5400904.
4. Sytnikov V.E., Bemert S.E., Krivetsky I.V., Karpov V.N., Romashov M.A., Shakarian Yu.G., Nosov A.A., Fetisov S.S. The test results of AC and DC HTS cables in Russia // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2016. V. 26. N 3. P. 5401304.
5. Yamaguchi S., Koshizuka H., Hayashi K., Sawamura T. Concept and design of 500 meter and 1000 meter DC superconducting power cables in Ishikari, Japan // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2015. V. 25. N 3. P. 5402504.
6. Chikumoto N., Watanabe H., Ivanov Y.V., Takano H., Yamaguchi S., Koshizuka H., Hayashi K., Sawamura T. Construction and the circulation test of the 500-m and 1000-m DC superconducting power cables in Ishikari // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2016. V. 26. N 3. P. 5402204.
7. Watanabe H., Ivanov Y.V., Chikumoto N., Takano H., Inoue N., Yamaguchi S., Ishiyama K., Oishi Z., Koshizuka H., Watanabe M., Masuda T., Hayashi K., Sawamura T. Cooling and liquid nitrogen circulation of the 1000 m class superconducting DC power transmission system in Ishikari // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2017. V. 27. N 4–2. P. 5400205.
8. Morandi A. HTS dc transmission and distribution: concepts, applications and benefits // Supercond. Sci. Technol. 2015. V. 28. N 12. P. 123001.

9. **Kostyuk V.V., Blagov E.V., Antyukhov I.V., Firsov V.P., Vysotsky V.S., Nosov A.A., Fetisov S.S., Zanezin S.Y., Svalov G.G., Rachuk V.S., Katorgin B.I.** Cryogenic design and test results of 30-m flexible hybrid energy transfer line with liquid hydrogen and superconducting MgB₂ cable // *Cryogenics*. 2015. V. 66. P. 34–42.
10. **Panel session «The Asian Energy Ring. Are Politicians and Energy Companies Ready?»** // Eastern Economic Forum. Vladivostok, Russia, Sept. 6–7. 2017.
11. **Romashov M.A., Sytnikov V.E., Shakarian Y.G., Ivanov Y.V.** Prospects of long-distance HTS DC power transmission systems // *J. Phys. Conf. Ser.* 2014. V. 507. P. 032037.
12. **Li X.-M., Reinhoudt D., Crego-Calama M.** What do we need for superhydrophobic surface? A review on the recent progress in the preparation of superhydrophobic surfaces // *J. Chem. Soc. Rev.* 2007. V. 36. N 8. P. 1350–1368. DOI 1:10.1039/b602486f
13. **Kaneko K., Hasegawa M., Matsumoto S., Ozaki K., Nariai H., Maki H., Yabe A.** Drag reduction on ultra small-scale concave-convex surface // *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers B*. 2000. V. 66. P. 1085–1090. DOI 10.1299/kikaib.66.1085
14. **Kim J., Kim, C.-J.** Nanostructured surfaces for dramatic reduction of flow resistance in droplet-based microfluids // *Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*. 2002. P. 479–482.
15. **Рыженков В.А., Седлов А.С., Рыженков А.В.** О возможности снижения гидравлического сопротивления трубопроводов систем теплоснабжения // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2007. № 5 (49). С. 22–26.
16. **Choi C.-H., Johan K., Westin A., Breuer K.S.** Apparent slip flows in hydrophilic and hydrophobic microchannels // *Phys. Fluids*. 2003. V. 15. N 10. P. 2897–2902. DOI: 10.1063/1.1605425
17. **Ou J., Rothstein J. P.** Direct velocity measurements of the flow past drag-reducing ultrahydrophobic surfaces // *Phys. Fluids*. 2005. V. 17. P. 103606.
18. **Karatay E., Haase A.S., Visser C.W, Sun C., Lohse D., Tsai P.A., Lammertnik R.G.H.** Control of slippage with tunable bubble mattresses // *Proc. Nat. Acad.Sci.* 2013. V. 110. P. 8422–8426.
19. **Rothstein J.P.** Slip on superhydrophobic surfaces // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2010. V. 42. P. 89–109.
20. **Byun D., Kim J., Ko H.S., Park H.C.** Direct measurement of slip flows in superhydrophobic microchannels with transverse grooves // *Phys. Fluids*. 2008. V. 20. N 11. P. 113601.
21. **Ajaev V.S., Gatapova E.Y., Kabov O.A.** Rupture of thin liquid films on structured surfaces // *Phys. Rev. E*. 2011. V. 84. N 4. P. 041606.
22. **Ketelaar C.** Stability of electrolyte films on structured surfaces // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. 2014. V. 2. N 2. P. 181–198. DOI:10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2014011671
23. **Kramer M.O.** Boundary layer stabilization by distributed damping // *J. Aeron. Sci.* 1957. V. 24. N 6. P. 459–460.
24. **Kramer M.O.** The dolphins' secret // *New Sci.* 1960. V. 7. N 181. P. 1118–1120.
25. **Truong V.-T.** Drag Reduction Technologies. Maritime Platforms Division Aeronautical and Maritime Research Laboratory. DSTO-GD-0290. Commonwealth of Australia 2001 AR-011-925. June 2001.
26. **Li Wen, Weaver J.C., Lauder G.V.** Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function // *The Journal of Experimental Biology*. 2014. V. 217. N 10. P. 1656–1666. DOI:10.1242/jeb.097097
27. **Dean B., Bhushan B.** Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow // *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2010. V. 368. Iss. 1929. P. 4775–4806. DOI:10.1098/rsta.2010. 0201
28. **Белоусов Ю.П.** Противотурбулентные присадки для углеводородных жидкостей. М.: Наука, 1986. 144 с.
29. **Grabowski D.W.** Drag reduction in pipe flows with polymer additives. PhD Thesis. Rochester Institute of Technology. 1990.
30. **Tandon P.N., Kulshreshtha A.K., Agarwal R.** Rheological study of laminar-turbulent transition in drag-reducing polymeric solutions // *Slippage and Drag Phenomena*. 1988. P. 460–461.
31. **Virk P-S.** Drag reduction fundamentals // *AIChE J.* 1975. V. 21. N 4. P. 625–656.
32. **Radin I.** Solid-fluid Drag Reduction. Ph.D. thesis. University of Missouri-Rolla, 1974.
33. **Radin I., Zakin J.L., Patterson G.K.** Drag reduction in solid-fluid systems // *AIChE Journal*. 1975. V. 21. N 2. P. 358–371.
34. **Lee P.F. W., Duffy G.G.** Relationships between velocity profiles and drag reduction in turbulent fiber suspension flow // *AIChE Journal*. 1976. V. 22. N 4. P. 750–753.
35. **Lee W.K., Vaseleski R.C., Metzner G.B.** Turbulent drag reduction in polymeric solutions containing suspended fibers // *AIChE Journal*. 1974. V. 20. N 1. P. 128–133.
36. **Kale D. D., Metzner A. B.** Turbulent drag reduction in fiber polymer systems: specificity considerations // *AIChE Journal*. 1974. V. 20. N 6. P. 1218–1219.
37. **Shenoy A.V.** A review on drag reduction with special reference to micellar systems // *Colloid & Polymer Science*. 1984. V. 262. N 4. P. 319–337.
38. **Ohira K.** Development of a high-efficiency hydrogen transportation and storage system using slush hydrogen // *Proc. ICEC 23-ICMC 2010*. Wroclaw. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej. 2011. P. 269–274.
39. **Ohira K.** Pressure drop reduction phenomenon of slush nitrogen flow in a horizontal pipe // *Cryogenics*. 2011. V. 51. N 7. P. 389–396. doi.org/10.1016/j.cryogenics. 2011.04.001
40. **Ohira K, Nakagomi K, Takahashi N.** Pressure-drop reduction and heat-transfer deterioration of slush nitrogen in horizontal pipe flow // *Cryogenics*. 2011. V. 51. N 10. P. 563–574. doi.org/10.1016/j.cryogenics.2011.07.008
41. **Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta Yu.A., Leontiev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P.** Intensification of heat and mass transfer on macro-, micro-, and nanoscales. Begell. 2016. 630 p.

LNG: promising areas of application and problems of transportation over long distances

Yu.A. Kuzma-Kichta¹, V.V. Glazkov¹, K.E. Miakshina¹,
Yu.V. Ivanov², Satarou Yamaguchi²

¹ *Moscow Power Engineering Institute (MPEI), Moscow, 112250 Russia*

² *Center of Applied Superconductivity and Sustainable Energy Research,
Chubu University, Kasugai, Aichi, Japan*

e-mail: VVGlazkov@gmail.com; kuzma@itf.mpei.ac.ru

The problems of LNG transportation over long distances by sea and rail, as well as by pipeline are examined. The opinion was advanced that currently the LNG railway transport advantages in Russia are substantially undervalued. Thus, transportation of 55 billion cubic meters (25 million tons) of natural gas per year (the power of the Nord Stream-2 project) would require the railways let pass additionally no more than 20 LNG train pairs per 24 hours. It corresponds to the throughput of only one single track railway. In reality, transportation of the additional 25 million tons of LNG by the railway would not require any radical railway infrastructure modernization. The authors estimated the cost of cryogenic containers-cisterns, required for 25 million tons of LNG transportation. It is three times less than the cost of «Nord Stream-2» pipeline laying. The article considers prospective areas for the LNG employing, primarily, for transport and as an aircraft fuel. It was demonstrated that transition to the LNG makes even rather old airliner, adapted to the LNG, economically beneficial. The prospects of creating hybrid energy systems when pumping LNG through cryogenic cooling channels of superconducting cables are discussed. The well-known methods for hydraulic resistance reduction of such cryogenic channels, allowing pumping LNG over considerable distances are described. The conclusion was made that adding thin fibers to the flow, as well as adding ice crystals to the liquid flow (cryogenic ice gruel) might be effective for the cryogenic temperatures. These additives are similar to the anti-turbulent admixtures used at higher temperatures. It is concluded that at cryogenic temperatures drag reducing agents usually used in petroleum pipelines cannot be used. A suggestion was made that pumping of LNG in the form of cryogenic gruel, containing ice needles with aspect ratio (l/d) within the range of 25–35 would be most effective.

Keywords: LNG, transportation, cryogenic cable, hydraulic resistance, surface modification, anti-turbulent additives, gruel, fibers.

REFERENCES

1. Romashov M.A., Sytnikov V.E., Shakarian Y.G., Ivanov Y.V. Prospects of long-distance HTS DC power transmission systems. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2014, no. 507, paper 032037.
2. Thomas H., Marian A., Chervyakov A., Stückrad S., Salmieri D., Rubbia C. Superconducting transmission lines – Sustainable electric energy transfer with higher public acceptance? *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2016, vol. 55, pp. 59–72.
3. Sytnikov V.E., Bemert S.E., Kopylov S.I., Romashov M.A., Ryabin T.V., Shakaryan Y.G., Lobytsev V.V. Status of HTS cable link project for St. Petersburg grid. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2015, vol. 25, no. 3, paper 5400904.
4. Sytnikov V.E., Bemert S.E., Krivetsky I.V., Karpov V.N., Romashov M.A., Shakarian Yu.G., Nosov A.A., Fetisov S.S. The test results of AC and DC HTS cables in Russia. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2016, vol. 26, no. 3, paper 5401304.
5. Yamaguchi S., Koshizuka H., Hayashi K., Sawamura T. Concept and design of 500 meter and 1000 meter DC superconducting power cables in Ishikari, Japan. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2015, vol. 25, no. 3, paper 5402504.
6. Chikumoto N., Watanabe H., Ivanov Y.V., Takano H., Yamaguchi S., Koshizuka H., Hayashi K., Sawamura T. Construction and the circulation test of the 500-m and 1000-m DC superconducting power cables in Ishikari. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2016, vol. 26, no. 3, paper 5402204.
7. Watanabe H., Ivanov Y.V., Chikumoto N., Takano H., Inoue N., Yamaguchi S., Ishiyama K., Oishi Z., Koshizuka H., Watanabe M., Masuda T., Hayashi K., Sawamura T. Cooling and liquid nitrogen circulation of the 1000 m class superconducting DC power transmission system in Ishikari. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2017, vol. 27, no. 4-2, paper 5400205.
8. Morandi A. HTS dc transmission and distribution: concepts, applications and benefits. *Supercond. Sci. Technol.*, 2015, vol. 28, no. 12, paper 123001.

9. **Kostyuk V.V., Blagov E.V., Antyukhov I.V., Firsov V.P., Vysotsky V.S., Nosov A.A., Fetisov S.S., Zanezin S.Y., Svalov G.G., Rachuk V.S., Katorgin B.I.** Cryogenic design and test results of 30-m flexible hybrid energy transfer line with liquid hydrogen and superconducting MgB₂ cable. *Cryogenics*, 2015, vol. 66, pp. 34–42.
10. **Panel session** «The Asian Energy Ring. Are Politicians and Energy Companies Ready?». Eastern Economic Forum. Vladivostok, Russia, Sept. 6–7, 2017.
11. **Romashov M.A., Sytnikov V.E., Shakarian Y.G., Ivanov Y.V.** Prospects of long-distance HTS DC power transmission systems. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2014, vol. 507, paper 032037.
12. **Li X.-M., Reinhoudt D., Crego-Calama M.** What do we need for superhydrophobic surface? A review on the recent progress in the preparation of superhydrophobic surfaces. *J. Chem. Soc. Rev.*, 2007, vol. 36, no. 8, pp. 1350–1368. DOI: 10.1039/b602486f
13. **Kaneko K., Hasegawa M., Matsumoto S., Ozaki K., Nariyai H., Maki H., Yabe A.** Drag reduction on ultra small-scale concave-convex surface. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers B*, 2000, vol. 66, pp. 1085–1090. DOI: 10.1299/kikaib.66.1085
14. **Kim J., Kim C.J.** Nanostructured surfaces for dramatic reduction of flow resistance in droplet-based microfluidics. *Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 2002, pp. 479–482. DOI: 10.1109/MEMSYS.2002.984306
15. **Ryzhenkov V.A., Sedlov, A.S., Ryzhenkov A.V.** O vozmozhnosti snizheniya gidravlicheskogo so protivleniya truboprovodov sistem teplosnabzheniya [A way of reducing the hydraulic resistance of pipelines of the heat supply systems]. *Energoberezhenie i Vodopodgotovka – Energy Saving and Water Treatment*, 2007, no. 5(49), pp. 22–26. In Russ.
16. **Choi C.-H., Johan K., Westin A., Breuer K.S.** Apparent slip flows in hydrophilic and hydrophobic microchannels. *Phys. Fluids*, 2003, vol. 15, no. 10, pp. 2897–2902. DOI: 10.1063/1.1605425
17. **Ou J., Rothstein J. P.** Direct velocity measurements of the flow past drag-reducing ultrahydrophobic surfaces. *Phys. Fluids*, 2005, vol. 17, paper 103606.
18. **Karatay E., Haase A.S., Visser C.W, Sun C., Lohse D., Tsai P.A., Lammertnik R.G.H.** Control of slippage with tunable bubble mattresses. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 2013, vol. 110, pp. 8422–8426.
19. **Rothstein J.P.** Slip on superhydrophobic surfaces. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2010, vol. 42, pp. 89–109.
20. **Byun D., Kim J., Ko H.S., Park H.C.** Direct measurement of slip flows in superhydrophobic microchannels with transverse grooves. *Phys. Fluids*, 2008, vol. 20, no. 11, p. 113601.
21. **Ajaev V.S., Gatapova E.Y., Kabov O.A.** Rupture of thin liquid films on structured surfaces. *Phys. Rev. E*, 2011, vol. 84, no. 4, p. 041606.
22. **Ketelaar C.** Stability of electrolyte films on structured surfaces. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 181–198. DOI:10.1615/InterfacPhenom-HeatTransfer.2014011671
23. **Kramer M.O.** Boundary layer stabilization by distributed damping. *J. Aeron. Sci.*, 1957, vol. 24, no. 6, pp. 459–460.
24. **Kramer M.O.** The dolphins' secret. *New Sci.*, 1960, vol. 7, no. 181, pp. 1118–1120.
25. **Truong V.-T.** *Drag Reduction Technologies*. Maritime Platforms Division Aeronautical and Maritime Research Laboratory. DSTO-GD-0290. Commonwealth of Australia 2001 AR-011-925. June 2001.
26. **Li Wen, Weaver J.C., Lauder G.V.** Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function. *The Journal of Experimental Biology*, 2014, vol. 217, no. 10, pp. 1656–1666. DOI:10.1242/jeb.097097
27. **Dean B., Bhushan B.** Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2010, vol. 368, iss. 1929, pp. 4775–4806. DOI:10.1098/rsta.2010.0201
28. **Belousov Yu.P.** *Protivoturbulentnye prisadki dlya uglevodorodnykh zhidkostej* [Anti-turbulent additives for hydrocarbon fluids]. Moscow: Nauka, 1986. 144 p. In Russ.
29. **Grabowski D.W.** *Drag reduction in pipe flows with polymer additives*. PhD Thesis. Rochester Institute of Technology. 1990.
30. **Tandon P.N., Kulshreshtha A.K., Agarwal R.** Rheological study of laminar-turbulent transition in drag-reducing polymeric solutions. *Slippage and Drag Phenomena*, 1988, pp. 460–461.
31. **Virk P-S.** Drag reduction fundamentals. *AIChE J.*, 1975, vol. 21, no. 4, pp. 625–656.
32. **Radin I.** *Solid-fluid Drag Reduction*. Ph.D. thesis. University of Missouri-Rolla, 1974.
33. **Radin I., Zakin J.L., Patterson G.K.** Drag reduction in solid-fluid systems. *AIChE Journal*, 1975, vol. 21, no. 2, pp. 358–371.
34. **Lee P.F.W., Duffy G.G.** Relationships between velocity profiles and drag reduction in turbulent fiber suspension flow. *AIChE Journal*, 1976, vol. 22, no. 4, pp. 750–753.
35. **Lee W.K., Vaseleski R.C., Metzner G.B.** Turbulent drag reduction in polymeric solutions containing suspended fibers. *AIChE Journal*, 1974, vol. 20, no. 1, pp. 128–133.
36. **Kale D.D., Metzner A.B.** Turbulent drag reduction in fiber polymer systems: specificity considerations. *AIChE Journal*, 1974, vol. 20, no. 6, pp. 1218–1219.
37. **Shenoy A.V.** A review on drag reduction with special reference to micellar systems. *Colloid & Polymer Science*, 1984, vol. 262, no. 4, pp. 319–337.
38. **Ohira K.** Development of a high-efficiency hydrogen transportation and storage system using slush hydrogen. Proc. ICEC 23-ICMC 2010, Wroclaw; Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej. 2011, pp. 269–274.
39. **Ohira K.** Pressure drop reduction phenomenon of slush nitrogen flow in a horizontal pipe. *Cryogenics*, 2011, vol. 51, no. 7, pp.389–396. doi.org/10.1016/j.cryogenics.2011.04.001
40. **Ohira K, Nakagomi K, Takahashi N.** Pressure-drop reduction and heat-transfer deterioration of slush nitrogen in horizontal pipe flow. *Cryogenics*, 2011, vol. 51, n. 10, pp. 563–574. doi.org/10.1016/j.cryogenics.2011.07.008
41. **Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta Yu.A., Leontiev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P.** *Intensification of Heat and Mass Transfer on Macro-, Micro-, and Nanoscales*. Begell, 2016. 630 p.