



Таукеев Батыржан Бакытжанович, Выпускник,
Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II
Taukeev Baturzhan Bakytzhanovich

Кожухов Юрий Владимирович,
Кандидат технических наук, доцент образовательного центра
“Энергоэффективные инженерные системы”, Университет ИТМО
Kozhukhov Yury Vladimirovich

**ГАЗОВЫЕ ГИДРАТЫ –
КАК НОВЫЙ ВИД ТРАНСПОРТИРОВКИ ГАЗА
GAS HYDRATES AS A NEW FORM OF GAS TRANSPORTATION**

Аннотация: В данной статье отображены результаты исследования газовых гидратов как новый вид транспортировки природного газа. В исследовании оценивается проект судна-перевозчика гидрат метана, анализ рисков транспортировки гранул гидратов, энергетический и экономический анализ транспортировки.

Abstract: This article presents the results of a study on gas hydrates as a new form of natural gas transportation. The study evaluates the feasibility of a methane hydrate carrier ship project, analyzes the risks associated with transporting hydrate granules, and examines the energy and economic aspects of transportation.

Ключевые слова: транспортировка газа, газовые гидраты, газогидраты, новый вид транспортировки газа.

Keywords: gas transportation, gas hydrates, gas hydrates, a new form of gas transportation.

Введение

Еще в 1986 году Дэвидсон сообщил об удивительно медленном разложении гидратов природного газа из Мексиканского залива при



атмосферном давлении и температуре -20°C . Позже, в 1992 году, Якушев и Истомин сообщили, что гидраты метана демонстрируют скорости диссоциации на несколько порядков ниже, чем ожидалось из экстраполяции кинетики диссоциации при более низких температурах в температурном окне, немного ниже точки плавления воды и при атмосферном давлении, таким образом, далеко за пределами области стабильности гидрата метана. Гудмундссон из Норвежского университета науки и технологий (NTNU) в Тронхейме предположил, что этот эффект, который сегодня называют “самосохранением” или “аномальным сохранением”, открывает ряд новых сценариев применения в области хранения и транспортировки природного газа. Начиная с 1997 года, технология получила дальнейшее развитие в NTNU Trondheim в сотрудничестве с Aker Engineering и несколькими нефтегазовыми компаниями сосредоточив внимание на утилизации попутного нефтяного газа и транспортировке охлажденного гидратно-нефтяного шлага.

Еще одна передовая программа исследований и разработок в области транспортировки природного газа с помощью гидратно-водной суспензии была инициирована BG Group (ранее British Gas) в начале 1990-х годов. В сотрудничестве с компанией Advantica Technologies (ранее BG Technology) были проведены обширные лабораторные испытания процесса производства гидрата метана, проектирование опытной установки и экономическая оценка технологии. В качестве основного приложения, использование, соответственно, был идентифицирован транспорт попутного нефтяного газа в виде гидратной суспензии. Коммерциализация была запланирована на 2006 год, однако, согласно фактическому состоянию дел, деятельность по добыче газогидратов была прекращена как BG Group, так и Advantica Technologies в настоящее время.

В настоящее время в области современных технологий гидрата метана для транспортных целей доминируют японские компании, в частности Mitsui Engineering & Shipbuilding (MES) и партнеры, и они называются NGH



(Технология гидрата природного газа). Эти мероприятия намного превосходят лабораторные испытания и привели к строительству и эксплуатации демонстрационных установок на электростанции Янай (стендовая установка, производительностью 5000 кг гидрата метана в сутки). В целях приобретения опыта эксплуатации в настоящее время в Японии проводятся полевые испытания технологии производства, транспортировки и регазификации метана и гидрата природного газа для производства электроэнергии и бытового отопления. Согласно презентациям компании MES, коммерциализация технологии для морских применений запланирована на период с 2015 по 2025 год.

Что касается экономической целесообразности газогидратного подхода для транспортировки природного газа из морских резервуаров, выше упомянутые исследования обычно указывают на то, что гидратная технология имеет преимущества перед существующими технологиями, такими как транспортировка по трубопроводу или сжиженного природного газа (СПГ), особенно в граничных условиях небольших производственных мощностей (обычно называемых застрявший газ) и небольшие и средние расстояния транспортировки. Эти условия обычно применимы к ожидаемым условиям морских газогидратных коллекторов, которые в основном находятся на континентальных склонах на глубине от 400 до 2000 метров.

В 2008 году в Германии был начат совместный проект Submarine Gas Hydrate Resources (SUGAR) для разработки новых технологий разведки и эксплуатации подводных ресурсов газогидратов, а также концепций транспортировки метана, соответственно, природного газа из гидратных резервуаров. В этих рамках консорциум партнеров из научных кругов и промышленности повторно исследовал потенциал цепочки транспортировки газогидратов. В следующих разделах представлены результаты проекта по фундаментальным аспектам инфраструктуры гидрата метана, в частности, технологии производства гидратных гранул и конструкции танкеров. Впервые



была проведена всесторонняя оценка риска, связанного с морской перевозкой гранул гидрата метана. На основе общих результатов проекта и соответствующих сценариев применения была проведена оценка энергоэффективности и экономичности транспортировки природного газа с помощью гидрата метана и проведено сравнение с транспортировкой по трубопроводу, СПГ и сжатого природного газа (КПГ) из морского резервуара на береговой терминал

Конструкционный проект судна-перевозчика гидрата метана

Танкер является одним из основных звеньев в потенциальной технологической цепочке производства гидрата метана, начиная с извлечения газообразного метана из пласта, за которым следует производство гранул гидрата и транспортировка на береговой терминал для дальнейшей переработки или сбыта. Ограничены свойствами перевозимого товара, ожидаемой эксплуатацией на континентальных склонах в районах с бурным морем, определенной сценарием грузоподъемностью 20 000 м³ гранул гидрата метана, а также соображениями безопасности, а также экологическими соображениями, был концептуально разработан танкер, включающий систему обработки и хранения грузов.

В связи с тем, что транспортировка природного газа с помощью гранул гидрата метана представляет собой инновационный подход, окончательных кодов для носителей гидрата газа пока не существует. Поэтому в рамках данного исследования при проектировании гидратного судна были приняты во внимание Международный газовый кодекс (IGC) в целом и “Проект временных руководящих принципов по строительству и оборудованию судов, перевозящих гранулы гидрата природного газа (NGHP) наливом” в частности. носитель и его подсистемы.

Чтобы оценить требования потенциальных районов эксплуатации (например, континентальный склон в Северной Атлантике) и необходимость круглогодичной эксплуатации, насколько это разумно возможно, MEYER



WERFT работал в тесном сотрудничестве с экспертами из Технического университета Берлина и специалистами с морской стороны. Кроме того, независимый Гамбургский судомодельный бассейн HSVA (Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt) был привлечен к работе для проведения соответствующих модельных испытаний для получения реалистичных показателей мореходных характеристик судов в плохую погоду. Результаты показывают, что использование плавучей установки для производства, хранения и разгрузки (FPSO) для производства, буферизации и передачи груза (твердого материала, без газа и жидкости) на носитель на довольно коротком, но контролируемом расстоянии от 40 до 70 метров до установки для производства гранул в так называемом “тандемная конфигурация” является наилучшим вариантом и возможна при разумных погодных условиях. Кроме того, для танкера должны быть гарантированы выдающиеся возможности по удержанию в море, а также возможности позиционирования. Чтобы соответствовать этим требованиям, были выбраны эффективные и мощные двигательные установки, а также специально разработанная система динамического позиционирования и оптимизированная конструкция судна. Чтобы соответствовать требованиям использования выкипающего газа при диссоциации газогидрата, была выбрана концепция двухтопливного двигателя. Эта мера также способствует соблюдению более строгих стандартов выбросов вблизи береговых линий и в гаванях. Полученные в результате основные характеристики носителя гранул обобщены в таблице 1, а конструкционный чертеж приведен на рисунке 1

Таблица 1

Основные характеристики танкера

Общая длина	m	176.60
Ширина		30.6
Высота	m	16,90
Максимальная осадка	m	8,4
Грузоподъемность	t	16,650

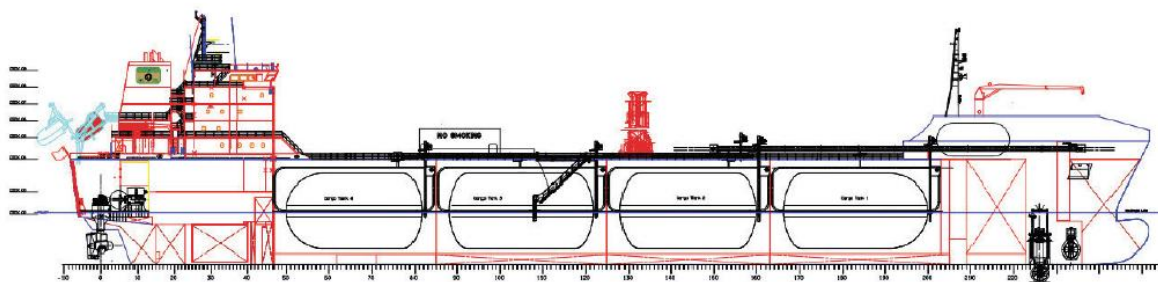


Рисунок 1. Чертеж конструкции танкера[3]

Для безопасного распределения и погрузки разгрузки гранул гидрата метана была разработана специальная система удержания груза с оборудованием для обработки грузов в соответствии с рисунком 2 Система защитной оболочки состоит из восьми цилиндрических грузовых резервуаров, расположенных горизонтально и установленных на шарнирах, каждый из которых имеет приемную емкость 2500 м³. При вращении резервуара исключается слипание гранул гидрата метана во время транспортировки на судне, поскольку этот эффект сильно усложнил бы процесс разгрузки. Резервуары распределены в четырех изолированных и активно охлаждаемых грузовых отсеках. Разработка и спецификация системы обработки грузов были выполнены в тесном сотрудничестве с производителем транспортного оборудования DD Dove, Вильгельмсхафен/Германия. В основном он состоит из цепной конвейерной системы производительностью около 160 м³ гранул гидрата метана в час. Полная система герметизации, включая систему цепного конвейера, рассчитана на температуру -20°С и давление до 2 бар. Эти условия жизненно важны для стабилизации груза гранул в режиме самоконсервации для эффективной транспортировки и должны поддерживаться в процессе погрузки, а также на этапах транспортировки и разгрузки.

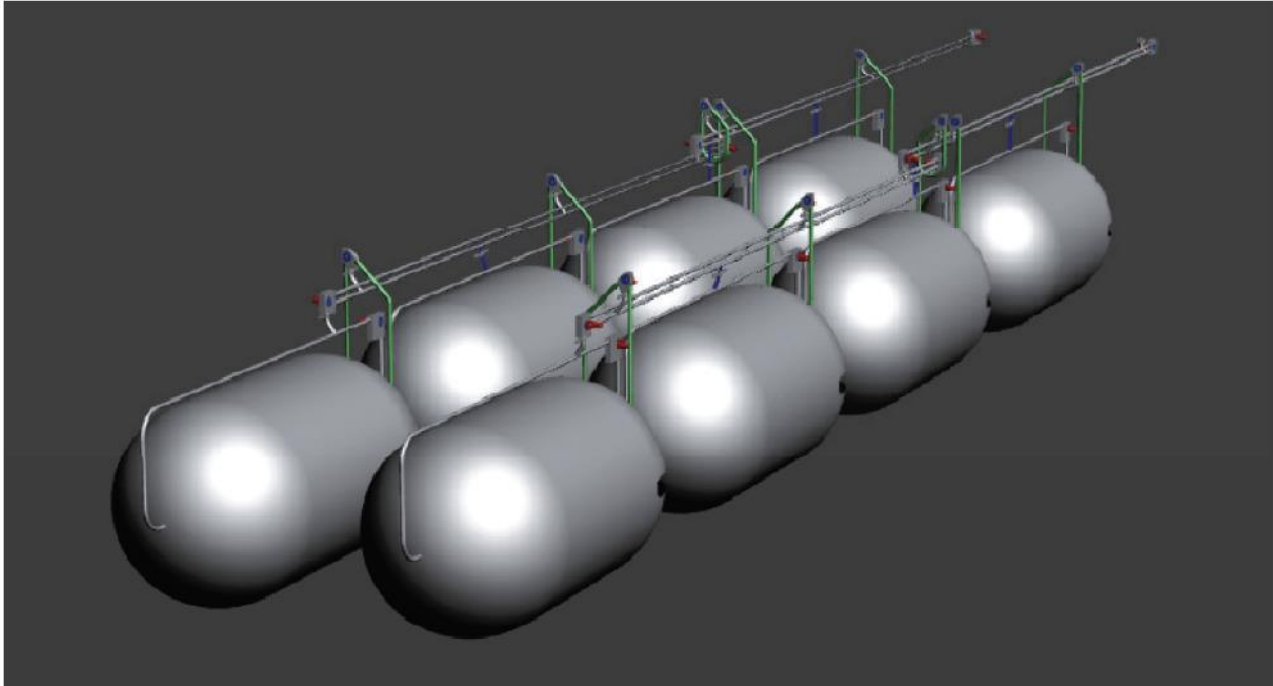


Рисунок 2 Проект горизонтально-поворотных
цилиндрических резервуаров.[3]

По сравнению с набросками проекта судна NGH, опубликованными MES до сих пор, грузовая система является более сложной, что является следствием ограничений, выявленных в рамках проекта (инженерный анализ и анализ рисков), и частично дополнительно подтверждается новыми результатами из литературы по физическим свойствам газовых гидратов. Концепция обработки грузов также основывается на результатах испытаний, проведенных по работе HSVA, которые показали, что поведение судов (FPSO и перевозчика) во время плохой погоды и сильного волнения не позволяет осуществлять непрерывную обработку грузов, что означает, что погрузку танкера придется прерывать на определенные периоды. Для производственной установки это привело к необходимости наличия достаточной емкости для хранения произведенных гранул, в то время как загрузка невозможна, что является одной из сильных сторон FPSO.[3] Для перевозчика требование состоит в том, чтобы принимать груз по высоким ставкам в относительно короткие сроки, чтобы обеспечить безопасную погрузку в течение ограниченных временных интервалов хорошие



погодные условия. Активное охлаждение и замкнутая, слегка перегруженная система защитной оболочки обеспечивают оптимальные условия для поддержания и максимального увеличения свойств самосохранения. Использование отходящего газа также играет важную роль с точки зрения безопасности. Поворотные резервуары являются дополнительным элементом для снижения риска слипания, который в настоящее время определен как основная проблема технологии в результате недавнего детального исследования гидратов, проведенного Университетом Хоккайдо.

Анализ рисков транспортировки гранул гидрата метана

Морская транспортировка природного газа в виде гидрата метана - это новый технологический подход. Внедрение новых технологий всегда сопряжено с возможностью введения новых рисков или - в случае альтернатив уже существующим техническим решениям - более высоких рисков, связанных с человеческими, экологическими или имущественными. Сегодня регулирующие органы морской отрасли - государства флага и Международная морская организация (ИМО), специализированное учреждение Организации Объединенных Наций, - требуют активной оценки новых морских технологий с точки зрения их воздействия на безопасность людей и окружающую среду до их утверждения. Как правило, такая оценка проводится с использованием анализа рисков.

В целях выявления так называемых препятствий для технологии транспортировки гидрата метана в море уже на этапе проектирования, которые могут препятствовать внедрению новой технологии или привести к неоправданно высоким затратам на совершенствование проекта, на этой ранней стадии разработки был проведен анализ рисков.

Анализ рисков состоит из следующих этапов:

- Идентификация опасности (HazId);
- Ранжирование опасностей;



- Разработка модели риска;
- Оценка риска (количественная оценка риска).

Для перевозчика гидрата метана HazId был основан на двух колонках: экспертных сессиях "мозгового штурма" и оценке анализа рисков для типов судов, используемых для сопоставимых целей, то есть для перевозки сжиженного природного газа (СПГ) и танкера с сырой нефтью.

В экспертных сессиях для идентификации опасности применялся анализ режимов отказов, последствий и критичности (FMECA). С целью ранжирования выявленных опасностей вероятность возникновения и тяжесть последствий были оценены с использованием индексных таблиц. Эти таблицы для индекса частоты (FI) и индекса серьезности (SI) основаны на логарифмической градации частоты инцидентов и последствий. Ранжирование проводилось на основе индекса риска (RI), который представляет собой суммирование FI и SI. Этот подход полностью согласуется с предложениями, содержащимися в руководящих принципах Официальной оценки безопасности (FSA) ИМО. Однако этот подход отличается от подхода, используемого в других отраслях, например, в автомобильной промышленности.

Для проекта SUGAR были проведены три сессии FMECA, посвященные морскому путешествию, погрузке и выгрузке, сопровождая разработку контейнера для гранул. Для участия в этих сессиях были привлечены эксперты в области военно-морской архитектуры, основных свойств гидрата метана, судового оборудования, проектирования газовозов и использования газа в качестве судового топлива.

Самые высокие RI, связанные с безопасностью людей, были получены при столкновении, контакте, пожаре и отказах защитного оборудования (предохранительных клапанов). Что касается окружающей среды, самые высокие риски были выявлены при отказах защитного оборудования (предохранительных клапанов), столкновении, слишком сильном выкипании и разрушении конструкции корпуса или резервуара.



На основе этого HazId и дополнительного изучения анализа рисков, связанных с танкерами для сжиженного природного газа и танкерами для сырой нефти, представленных ИМО за последние годы была разработана модель риска с учетом к несчастным случаям относятся столкновение, заземление и случайный выброс метана из-за отказа оборудования (например, трубопроводов, клапанов и резервуаров). Для этих категорий аварий были разработаны так называемые последовательности событий высокого уровня, которые составляют основу деревьев событий.

В количественной модели риска абсолютные и зависимые вероятности используются для расчета вероятности всех сценариев, инициированных рассматриваемой аварией. Перевозчик метановых гранул представляет собой новую концепцию транспортировки, и, следовательно, данные, необходимые для определения входных данных для модели риска, отсутствуют. Как правило, для решения этой проблемы используется экспертное заключение. Для настоящего исследования были использованы данные, предоставленные FSAS (танкеры для перевозки сжиженного природного газа и танкеры для сырой нефти), и, насколько это возможно, обновлены последними доступными данными по этим типам судов.

Например, первоначальная частота аварий была определена на основе флота, подверженного риску (активные суда), и аварий за период с 1995 по 2010 год. Оценка риска была определена с использованием базы данных IHS-Fairplay, а количество жертв - с помощью IHS-Fairplay и аварий, перечисленных в FSAs. На основе этих источников первоначальная частота аварий при столкновении была определена в $1,6 \times 10^{-3}$ на судно в год, а при посадке на мель - в $5,2 \times 10^{-4}$ на судно в год. Однако из-за относительно небольшой выборки (флот СПГ) и небольшого числа аварий неопределенность в отношении начальной частоты аварий относительно высока, поэтому для столкновения 95% (т.е. 95% вероятность того, что частота аварий ниже этого значения) составляет $4,6 \times 10^{-3}$ и для заземления $2,9 \times 10^{-3}$. [1]



Зависимые вероятности пробития корпуса (в случае столкновения или посадки на мель), а также пробития грузовых танков были оценены с использованием соответствующей части модели оттока нефти MARPOL, которая позволяет рассчитать вероятность места и глубины пробития.[1]

Последствия сосредоточены на безопасности человека и окружающей среды, то есть на смертельных исходах и загрязнении окружающей среды, которое в данном случае представляет собой выброс парникового газа метана. Основываясь на информации о поведении гидрата метана, предполагалось, что гидрат метана не будет выделяться внезапно, когда защитная оболочка повреждена при столкновении или авариях на земле, даже если произойдет попадание воды, потому что газ не находится под давлением или находится под очень умеренным давлением, связанный в кристаллической сети ячеек, изготовленных из воды молекул, и разложение происходит в высокой степени эндотермически. Возгорание возможно, но ожидалось, что такой пожар будет ограничен грузовым помещением. Таким образом, смертельные случаи связаны с затоплением судна в случае столкновения и посадки на мель. Предполагается, что численность экипажа составляет 25 человек, а коэффициент смертности установлен равным 50% на случай, если судно затонет. Предполагаемое количество выделяющегося метана зависит от емкости затронутого участка трубы или резервуара и возможности обнаружения утечки и отделения рассматриваемого участка.

Энергетический и экономический анализ транспортировки гранул гидрата метана

Следует отметить, что проблема определения «экономических ниш» применения ГПГ, довольно актуальная. Обсуждение проводится в контексте технологических возможностей освоения шельфовых месторождений, отдаленных от действующих газопроводов, или же средних или малых газовых месторождений на суше, разработка которых с использованием трубопроводной



транспортировки природного газа является нерентабельной по причине высоких капитальных и операционных затрат. В англоязычной литературе для определения природного газа таких месторождений используются специальные термины: «stranded» – труднодоступный; «marginal» – «малопродуктивный», или «маргинальный». Доставка такого газа на рынки представляет определенную проблему и требует разработки новых технологических решений в области его транспортировки и хранения. В качестве технологий доставки газа рассматривались танкерная перевозка КПГ и СПГ, а также технология англ. «gas to liquid» (GTL) – переработка газа в синтетическое жидкое топливо (СЖТ). Что касается транспортировки гидратов природного газа, то первоначально обсуждалась технологическая возможность танкерной их перевозки в виде жидкой гидратоводяной массы (льдо-гидратной водяной шуги, англ. slurry). Впоследствии был предложен более технологичный способ транспортировки покрытых оболочкой льда гранул, основывающийся на эффекте «самоконсервации» гидратов при отрицательных по Цельсию температурах. В качестве конкретных примеров рассматривались варианты транспортировки газа с месторождений норвежского сектора Баренцева моря на европейский рынок и с месторождений Индонезии на газовый рынок Японии. Естественной технологией для сравнения явилась технология СПГ. По результатам расчетов, капитальные затраты ГПГ-проекта оказались на 24 % ниже, чем СПГ-проекта той же производительности. Оценка капитальных затрат для локальных ценовых условий газотранспортных цепочек ГПГ с годовыми производительностями, эквивалентными производительности цепочек СПГ, проведена совместно независимыми группами исследователей из Норвегии (судоостроительная компания Aker Kvaerner) и Японии (генерирующая компания J-Power). Полученные норвежскими исследователями данные о зависимости капитальных затрат от дальности транспортировки природного газа при реализации технологий СПГ, ГПГ, СЖТ и трубопроводного транспорта представлены на рис. 3.[7]

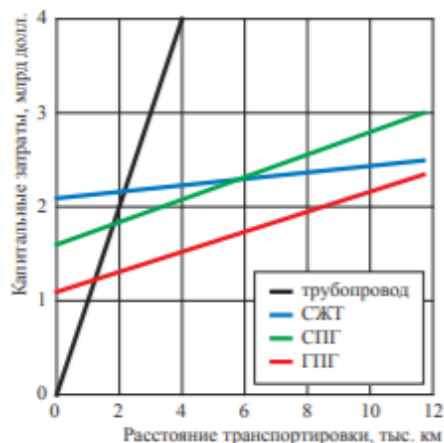


Рис. 3. Капитальные затраты на проекты транспортировки газа в зависимости от расстояния[7]

Специалисты японской судостроительной корпорации Mitsui Engineering & Shipbuilding провели сравнительную оценку капитальных затрат на производство, транспортировку и регазификацию танкерных поставок ГПГ и СПГ. Также оценивалась себестоимость перевозки ГПГ и СПГ для двух газотранспортных проектов с внутренней нормой доходности (ВНД) 10%. Исследователи пришли к выводам, что себестоимость природного газа, поставляемого в виде ГПГ, меньше по сравнению с СПГ и ГПГ-поставки газа в объемах менее 1 млн т в год в СПГ-эквиваленте являются более эффективными по сравнению с поставками СПГ для приемных терминалов малой производительности. По мнению специалистов Mitsui, ГПГ-транспортировка перспективна для разработки малых и средних по запасам газовых месторождений Юго-Восточной Азии, а также для поставок газа этих месторождений малым потребителям, в особенности генерирующим компаниям и коммунальным предприятиям, расположенным в прибрежной зоне. Специалистами Mitsui выполнена также сравнительная экономическая оценка проектов (срок – 20 лет, норма дисконта – 10%) морской ГПГ-, СПГ- и КПГ-транспортировки 1 млн т газа в СПГ-эквиваленте по общим затратам на проект в сумме капитальных затрат CAPEX (от англ. capital expenditures) и операционных расходов OPEX (от англ. operating expenses) (рис. 4).[1]

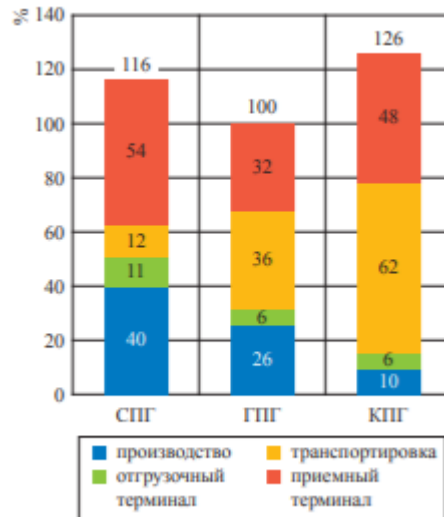


Рис. 4 Сравнение затрат жизненного цикла поставок
СПГ, КПГ и ГПГ[1]

ВЫВОД

Физика эффекта самосохранения, как ключевого процесса транспортировки газа в виде гидратных гранул, к настоящему времени в основном не раскрыта. Лежащий в основе эффект защиты от льда является сложным следствием образования льда на границе гидрата и последующего отжига. Поскольку оба эффекта определяются температурой и давлением, контроль обоих параметров во время производства и хранения является предпочтительным. Необходимы дальнейшие исследования для технического применения, в частности, в отношении влияния состава газа на самосохранение и адаптации пути p - T в процессе производства и извлечения для оптимизации скоростей диссоциации и механических свойств гидратных гранул.

На основе фундаментальных знаний об образовании гидрата метана и аномальном эффекте самосохранения была разработана концептуальная схема процесса получения и гранулирования гидрата метана. Насколько это возможно, в качестве инструментария для решения отдельных технологических задач использовались проверенные и хорошо известные технологии, однако данное приложение потребовало нескольких модификаций и допущений. Основная часть процесса имеет рабочее давление 70 бар, поэтому для большинства компонентов в технической реализации потребуется высокая толщина стенок



или корпуса, устойчивые к давлению. Кроме того, можно ожидать, что герметизация движущихся частей и обработка гранул в атмосфере метана под высоким давлением являются сложными задачами. Функциональность и долгосрочная работоспособность ключевого технологического оборудования, фильтры роторно-барабанного типа и горизонтальные матричные прессы, в суровых морских условиях должны быть доказаны и разработаны соответствующие спецификации. Несмотря на эти неопределенности, концепция процесса представляет собой надежное инженерное решение и может быть охарактеризована фундаментальными энергетическими и экономическими данными в тесном сотрудничестве с производителями оборудования.

Конструкция носителя газогидрата с учетом современного понимания свойств груза и предполагаемого режима работы во время погрузки и разгрузки требует множества новых технологических подходов. В частности, необходимость активного охлаждения, а также возможные меры по смягчению спекания и минимизации механических нагрузок на гидратные гранулы в состоянии самосохранения были проблемами для концепции системы защитной оболочки. Однако представленная в этом сообщении конструкция носителя, частично разработанная в сотрудничестве с производителями оборудования, представляет собой надежное судовое технологическое решение. Оценка рисков, связанных с транспортировкой гранул газогидрата в море, не выявила каких-либо препятствий для этой технологии. Фактически, предполагаемый сниженный риск пожара по сравнению с транспортировкой СПГ или сырой нефти дает потенциальные преимущества.

Для сравнительной оценки вариантов транспортировки природного газа из морского резервуара на наземный терминал были синтезированы технологические цепочки для трубопроводов, маршрутов СПГ, КПГ и гидрата метана и определены соответствующие сценарии применения. В качестве критериев были применены энергоэффективность и общая удельная стоимость, т.е. капитальные и эксплуатационные затраты на единицу веса газа,



подаваемого в наземную трубопроводную сеть. Модельные расчеты привели к выводу, что предлагаемая инфраструктура гидрата метана не имеет ни энергетической, ни экономической выгоды по сравнению с существующими технологиями транспортировки по трубопроводу и СПГ, соответственно, транспортировка СПГ как инновационный подход для небольших мощностей и малых и средних расстояний. Этот результат объясняется ожидаемыми высокими инвестиционными затратами на производство гидрата метана и процесс гранулирования, а также высокими затратами на фрахт и топливо, связанными с транспортировкой судном гранул гидрата метана с низкой плотностью энергии.

Таким образом, существует несколько преимуществ технологии получения газогидратов, таких как неотъемлемая безопасность от воспламенения и неконтролируемого горения или устойчивость процесса получения гидрата метана к воздействию воды, тяжелых углеводородов и двуокиси углерода. Однако работа, представленная в этом сообщении, выявила серьезные недостатки транспортировки гидрата метана с точки зрения энергоэффективности и экономии. Кроме того, обработка и транспортировка твердого сыпучего материала в сложных морских условиях представляется довольно сложной задачей по сравнению с обработкой и транспортировкой жидкой или газовой фазы. На основе нашего анализа не удалось определить сценарий, при котором технология транспортировки газогидрата могла бы конкурировать с хорошо зарекомендовавшими себя или появляющимися технологиями транспортировки газа из морских источников на сушу.

Список литературы:

1. С.И. Долгаев, В.Г. Квон, В.А. Истомина, Ю.А. Герасимов, А.А. Тройникова Сравнительные экономические характеристики гидратной транспортировки природного газа // НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК ВЕСТИ ГАЗОВОЙ НАУКИ. – 2018. - №1. - С. 100-116
2. В.Д. Лапшин, А.Н. Гульков, С.Г. Гулькова, Н.А. Майсс Морская транспортировка природного газа в газогидратной форме. – 2013. – С. 28-29



3. Gregor Rehder, Robert Eckl, Markus Elfggen, Andrzej Falenty, Rainer Hamann, Nina Kähler, Werner F. Kuhs, Hans Osterkamp and Christoph Windmeier Methane Hydrate Pellet Transport Using the Self-Preservation Effect: A Techno-Economic Analysis // *Energies* 2012. – 2012. - 5. – С. 2499-2523
4. Kwon, M., Lee, J.-W., and Lee, H. (2014). Temperature-Dependent Structural Transitions in Methane-Ethane Mixed Gas Hydrates. *J. Phys. Chem. C* 118
5. Subramanian, S., Ballard, A. L., Kini, R. A., Dec, S. F., and Sloan, E. D. (2000). Structural Transitions in Methaneethane Gas Hydrates - Part I: Upper Transition point and Applications. *Chem. Eng. Sci.* 55 (23), 5763–5771.
6. Ильин А. В. Газогидраты севера тюменской области как новый объект изучения геофизическими методами. автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. юрид. наук (25.00.10) / Ильин Алексей Владимирович; «ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет» – Екатеринбург , 2012г – С. 3.
7. Кэндзи, И. Станет ли гидрат метана национальным энергоресурсом Японии? / Кэндзи, И // *Современный взгляд на Японию.* – 2015. – С. 2