



Предупреждение аварий

УДК: 622.692.4.07

DOI: 10.25514/CHS.2025.1.28007

Тенденции инновационных решений для снижения рисков при транспортировке водорода с использованием трубопроводов Обзор

Р.А. Исмаилова¹✉, Э.Н. Алиев¹, С.А. Герайбейли²

¹Научно-исследовательский институт «Геотехнологические проблемы нефти, газа и Химия»
Баку, Азербайджан, e-mail: ruqiyya.ismailova@mail.ru

²Азербайджанский Государственный университет Нефти и Промышленности
Баку, Азербайджан

Поступила в редакцию: 18.03.2025 г.; после доработки: 16.05.2025 г. принята в печать: 20.05.2025 г.

Аннотация — Сегодня водород, полученный из возобновляемых ресурсов, это не только перспективный энергоноситель, снижающий зависимость от ископаемого топлива, но и важный фактор в борьбе с глобальным потеплением, сокращающий вредные выбросы в атмосферу. Успешность масштабного использования водорода зависит от способа его передачи потребителям. Общеизвестным и приоритетным является трубопроводная транспортировка. Предложенная статья представляет собой аналитический обзор инновационных решений, направленных на обеспечение безопасности транспортировки водорода по трубопроводу. Приведен механизм водородной хрупкости металлов, которая ухудшает их механические свойства, что приводит к утечке водорода в стальных трубопроводах. Рассмотрены созданные технические решения, способные обеспечить безопасную транспортировку водорода, среди которых новые функциональные материалы для производства стальных и полимерных трубопроводов. Показана возможность транспортировки водорода совместно с природным газом с использованием как стальных, так и полимерных трубопроводов. Уделено внимание вопросу контроля утечки и накопления водорода при эксплуатации магистрального трубопровода.

Ключевые слова: транспортировка водорода, водородная хрупкость, стальные трубы, полимерные трубы, транспортировка смешанной энергии; контроль утечки водорода.

Chemical accident/incident prevention

UDC: 622.692.4.07

DOI: 10.25514/CHS.2025.1.28007

Trends in innovative solutions to reduce risks hydrogen transportation using – a review

Rugiya A. Ismailova¹✉, Elshan N. Aliyev¹, and Samira A. Garaybeyli²

¹Scientific Research Institute of Geotechnological Problems of Oil, Gas and Chemistry, Baku, Republic of Azerbaijan, e-mail: ruqiyya.ismailova@mail.ru

²Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Republic of Azerbaijan

Abstract – Today, hydrogen obtained from renewable resources is not only a promising energy source that reduces dependence on fossil fuels, but also an important factor in the fight against global warming, reducing harmful emissions into the atmosphere. The success of large-scale use of hydrogen depends on its delivery to consumers, the priority type of which is pipeline transport. The proposed article is an analytical review of innovative solutions aimed at ensuring the safety of hydrogen transportation by pipeline. The mechanism of hydrogen embrittlement of metals is given, which is a key factor, deteriorating their mechanical properties, leading to hydrogen leakage in steel pipelines. The created technical solutions capable of ensuring safe transportation of hydrogen are considered, including new functional materials for the production of steel and polymer pipelines. The possibility of transporting hydrogen together with natural gas using both steel and polymer pipelines is shown. Attention is paid to the issue of monitoring leakage and accumulation of hydrogen during operation of the main pipeline.

Key words: hydrogen transportation, hydrogen embrittlement, steel pipes, polymer pipes; transportation the mixed energy; hydrogen leakage control.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время использование водорода приобрело разнообразное применение во многих отраслях промышленности. Помимо традиционного использования водорода для получения энергии, возросли темпы роста его использования в развивающихся отраслях. К примеру, за последние три года в нефтеперерабатывающей промышленности использование водорода возросло до 42%, металлургической промышленности до 5% от общего спроса на водород для промышленного использования [1].

В качестве источника энергии водород может обеспечивать до 20% всех энергетических нужд, в частности, покрывать от 20% до 50% потребностей в транспортном секторе и от 5% до 20% потребностей промышленности [2].

Не менее важно использование 10% мировых запасов водорода как топливо для двигателей внутреннего сгорания, ракетных двигателей, охлаждающей жидкости электрогенераторов [3].

Такие характерные особенности как высокая температура сжигания и отсутствие образования углекислого газа при его использовании позволяют рассматривать водород как альтернативу перспективного производства топливных ресурсов, развивая новое направление энергетической области – «водородная энергетика» [4].

Обладая огромным потенциалом для решения мировых энергетических потребностей, связанных как с промышленным, так и с бытовым сектором, возможностью обеспечить нулевые выбросы углерода, водородная энергетика не лишена проблем, одной из которых является передача и распределение H_2 .

Существующие наземные и морские транспортные средства для транспортировки сжатого водорода ограничены вместимостью и требуют больших затрат, связанных с переводом водорода в жидкое состояние при температуре -253°C , а также наличие специальных криогенных резервуаров для минимизации потерь водорода. Транспортировка водорода потребителю с использованием носителей, вступающих с ним во взаимодействие, несмотря на

уменьшение утечки, требует наличия установок, перерабатывающих образовавшиеся соединения с получением исходного водорода [5].

В настоящее время для доставки водорода на дальние расстояния магистральная транспортировка считается коммерчески предпочтительной, тем более что использование транспортировки посредством трубопровода сопровождается наименьшим выбросом парниковых газов. Строительство новых трубопроводов, а также использование трубопроводов природного газа для транспортировки водорода, приобретает огромное значение в энергетических системах многих стран. По прогнозу возросший спрос на «чистый» водород приведет к росту рынка водородных трубопроводов, доведя его до 25,7 млрд долларов США к 2030 году при среднегодовом темпе роста 16,0% с 2023 по 2030 [6].

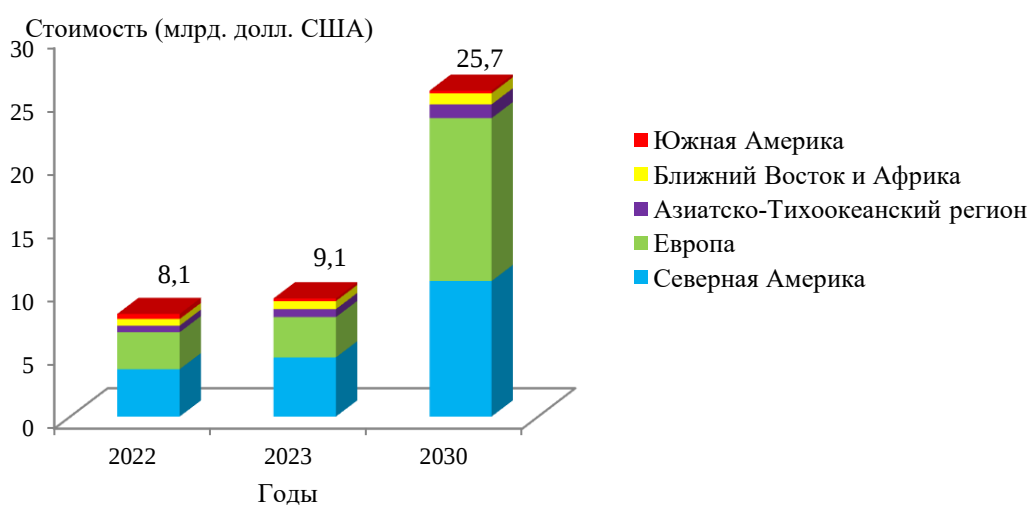


Рис.1. Рынок водородных трубопроводов.

Fig. 1. Hydrogen pipeline market.

В перспективе сегмент стационарных трубопроводов будет демонстрировать наиболее высокие темпы роста среди существующих средств водородных коммуникаций мирового рынка. Трубопроводы изготавливаются из прочных материалов, таких как сталь или пластик. Играя ключевую роль в транспортировке водорода от производственных площадок к различным конечным пользователям, включая промышленные предприятия и нефтеперерабатывающие заводы, фиксированные трубопроводы становятся практичным и жизнеспособным выбором, особенно в регионах, ожидающих значительного роста спроса на водород.

Такой прогнозируемый масштабный всплеск рынка водородных трубопроводов потребует обеспечения эффективной транспортировки водорода от объектов его производства до потребителя. Выбор способа транспортировки зависит от расстояния между производителем и потребителем водорода, от объемов поставок, возможностей проникновения на рынок и т.д.

Однако водород является одним из самых воспламеняемых элементов с широким диапазоном взрывоопасности:

- Концентрационный предел воспламеняемости в воздухе 4–74% (у природного газа 5,3–15%).
- Энергия воспламенения 0,02 МДж.
- Концентрационный предел взрываемости 18,3–59%.

Утечки водорода могут привести к образованию взрывоопасных смесей водорода и воздуха, для воспламенения которых достаточно искры или статического разряда. Это свойство может сдерживать рост рынка водородных трубопроводов и требует самых высоких стандартов безопасности. Кроме того, при эксплуатации трубопроводного транспорта под большим давлением водород может воздействовать на материал трубопровода, вызывая так называемую водородную хрупкость [7].

Чтобы обеспечить широкое и безопасное применение водородных трубопроводов, исследователи активно работают над решением проблемы утечки водорода. Эти усилия сосредоточены на следующих ключевых направлениях:

- Создание высокопрочных сплавов с применением таких технологий как термомеханическая обработка, ускоренное охлаждение и прямая закалка, введение легирующих элементов.
- Микроструктурные ловушки для водорода. Эти устройства эффективно снижают коэффициент диффузии водорода, что позволяет уменьшить его утечку.
- Смешение водорода с другими газами. Добавление специальных газов помогает пассивировать поверхность стальной трубы, препятствуя адсорбции водорода и уменьшая его поглощение.

Основная цель работы – предоставить исследователям возможность ознакомиться с современным уровнем техники в области трубопроводного транспорта водорода. Ознакомление с предоставленной в обзорной статье информацией может выявить недостатки достигнутых исследований, способствовать возникновению новых идей, служить ориентиром для будущих направлений исследований.

СТАЛЬНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ

Выбор материала трубопровода для транспортировки любого газа должен учитывать его устойчивость к длительному воздействию сжатого газа для сохранности структурной целостности трубопровода в течение длительного срока эксплуатации. Традиционно используемые для транспортировки водорода стальные трубопроводы подвержены воздействию молекул водорода, что приводит к водородной хрупкости, т.е. к снижению прочности трубопровода и безопасности его эксплуатации.

1. Механизм деградации стального трубопровода

Несмотря на то, что водород является универсальным и чистым энергоносителем, существуют значительные риски его транспортировки по трубопроводу. Помимо высокой огне- и взрывоопасности, взаимодействие

водорода в условиях рабочей среды с металлом трубопровода приводит к ухудшению механических свойств металла.

Проникновение водорода в материал состоит из двух отдельных этапов: адсорбция и абсорбция (поглощение). [8]. Адсорбция (взаимодействие газ-металл) включает механизмы физической адсорбции и хемосорбции, прежде чем в конечном итоге произойдет абсорбция и/или десорбция. Эти два процесса отличаются друг от друга с точки зрения энергии связи с поверхностью.

Когда молекула H_2 приближается к поверхности металла, слабые силы притяжения Ван-дер-Ваальса (менее 0,5 эВ) становятся более ощутимыми между молекулой H_2 и поверхностными атомами и приводят к небольшому минимуму на энергетической кривой (рис. 2а). В этой точке нет обмена или переноса электронов между молекулой H_2 и поверхностью металла. Удержание молекулярного водорода на поверхности металла требует большого количества энергии. Этот процесс упрощается, когда молекулы диссоциируют на атомы, которые по отдельности притягиваются к поверхности силами хемосорбции, что иллюстрируется глубоким минимумом энергии на кривой (рис. 2а). Хемосорбция происходит в результате химического взаимодействия с образованием ковалентной связи между молекулой адсорбента (H_2) и поверхностным атомом металла. Схематичное изображение физической сорбции, хемосорбции и абсорбции водорода металлом показано на рисунке 2б [8].

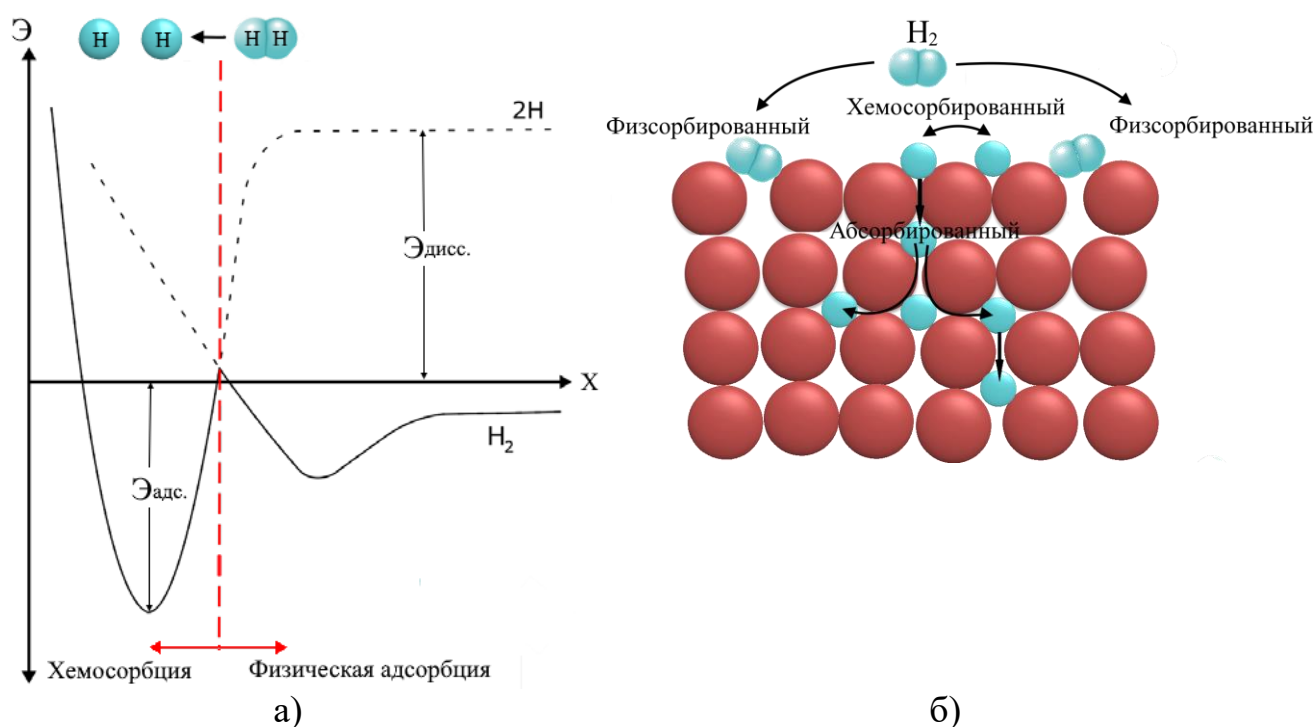


Рис. 2. а) Диаграмма потенциальной энергии для адсорбции водорода при приближении к поверхности металла на расстоянии X . б) Схема процесса хемосорбции и физической адсорбции.

Fig. 2. a) Potential energy diagram for hydrogen adsorption when approaching the metal surface at a distance X . б) Schematic diagram of the chemisorption and physical adsorption process.

Процесс адсорбции сильно зависит от давления, температуры и состояния поверхности металла, причем давление играет главенствующую роль для диффузии атомов водорода в объеме материала. Захват атомов металла во время диффузии может происходить несколькими способами, изображенными на рисунке 3 [9].

Атом водорода проникает в интерстициальные (междоузельные) либо вакантные участки кристаллической решетки металла, накапливаясь в структуре металла в максимально возможных концентрациях. Накопление водорода в кристаллической решетке приводит к их перемещению в различные микроструктуры, например, границы зерен, пустоты, которые служат потенциальными ловушками для водорода, вызывая расширение трещины. Возможно также взаимодействие накопленного водорода с другими компонентами кристаллической решетки, изменяя напряжение и состав материала трубопровода. Перераспределение водорода существенно зависит от очень сложной эволюции микроструктуры, локальных напряженных состояний и дефектов в металле, вызванных деформацией.

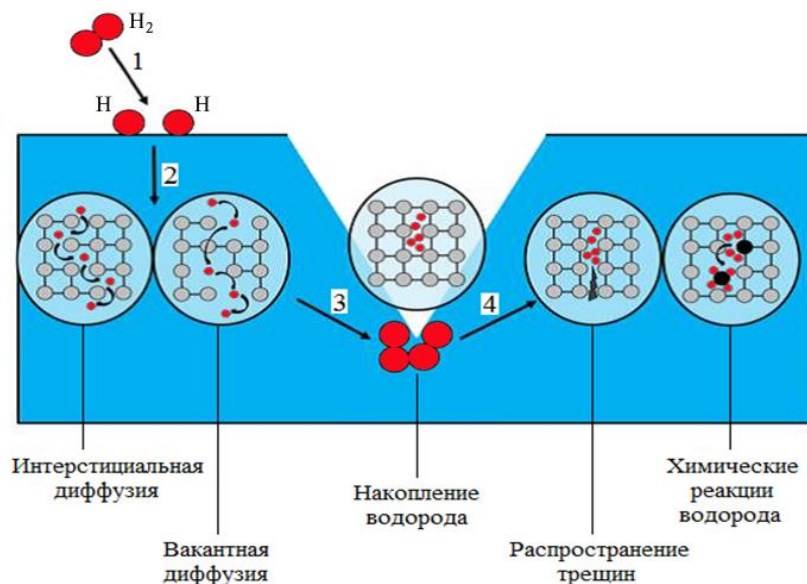


Рис. 3. Схематичное изображение взаимодействий между атомами водорода и кристаллической решеткой металла.

Fig. 3. Schematic representation of the interactions between hydrogen atoms and the metal crystal lattice.

Водородная хрупкость приводит к уменьшению пластичности металлов и зависит от синергического воздействия многих факторов [9]. К первой группе определяющих факторов относятся факторы окружающей среды: давление, температура и чистота водорода. Ко второй группе факторов водородной хрупкости относятся такие характеристики металла, как кристаллическая структура, химический состав, размер зерна, наличие микроструктурных дефектов, фазовая стабильность, неоднородность, уровень прочности, поверхностные условия и др. [10]. На рисунке 4 схематически представлена взаимозависимость факторов, влияющих на восприимчивость промышленного оборудования к водородной хрупкости.

При взаимодействии водорода с металлом трубопровода температура оказывает влияние на растворимость водорода, диффузию и улавливание, при этом диффузия и растворимость сильно зависят от материала системы. Влияние температуры объясняется моделью захвата водорода, в которой атомы водорода, диффундируя через решетку металла, захватываются дефектами микроструктуры. При увеличении температуры подвижность водорода увеличивается, что способствует высвобождению захваченных атомов водорода дефектами микроструктуры.

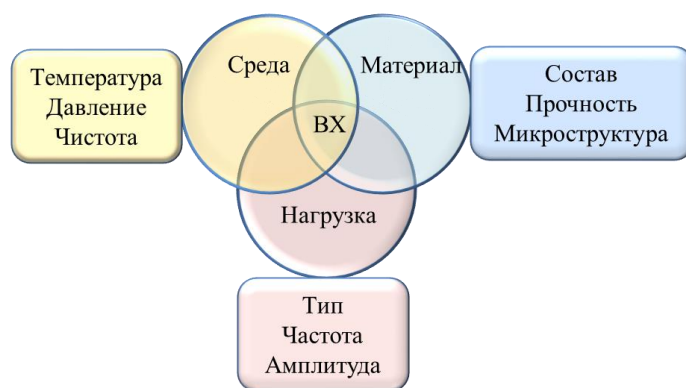


Рис. 4. Факторы, влияющие на восприимчивость к водородной хрупкости. ВХ – водородная хрупкость.

Fig. 4. Factors of susceptibility to hydrogen embrittlement. ВХ – hydrogen embrittlement.

Важным параметром окружающей среды, оказывающим влияние на величину деградации водорода, является парциальное давление водорода. Несмотря на то, что высокое давление водорода увеличивает концентрацию атомов водорода в кристаллической решетке металла, эксплуатацию трубопровода вынуждены осуществлять при высоком давлении для преодоления проблемы низкой плотности водорода [10].

Относительно чистоты водорода в литературе приведены примеры ее влияния на поглощение водорода металлом. Добавление небольших количеств определенных газов может уменьшить либо увеличить, либо сохранить предрасположенность к водородной хрупкости неизменной. Таким образом, примеси определенных газов могут выступать в роли ингибиторов водородной хрупкости, уменьшая поверхностные реакции поглощения [11].

Третий важный фактор проявления водородной хрупкости представлен полем напряжений, учитывающий:

- тип нагрузки (монотонная или циклическая),
- частоты приложенного напряжения,
- наличие остаточного напряжения.

Высокие уровни растягивающих напряжений, возникающие при изготовлении или эксплуатации материала (сплава), способствуют повышению его уязвимости к водородной хрупкости. При статической либо динамической нагрузке на сплавы может наблюдаться коррозионное растрескивание [12].

Механизм проявления водородной хрупкости, включающий растворимость протонов водорода в ловушках, существующих в микроструктуре стали, включая вакансии, границы зерен, дислокации, трещины и т. д., подтверждает важность микроструктурного фактора, условий изготовления и химического контроля стали. В этой связи в задачу исследователей входит создание марок сталей с низким содержанием примесей и потенциальным микролегированием для понижения чувствительности стали к водородной хрупкости.

2. Инновационные технологии производства стальных трубопроводов

Составы стали для труб. При значительном расстоянии от места производства водорода под давлением до пункта его назначения, важными характеристиками материала для изготовления труб является высокие прочность, свариваемость и устойчивость к водородной хрупкости.

Таковыми свойствами обладает свариваемая низколегирующая высокопрочная сталь, содержащая, % мас.:

C 0,02–0,2	Mn 0,8–4,0	Al 0,01–0,2	Si 0,05–0,5
Ni 0,8–2,5	Cr 0,3–1,0	Mo 0,3–1,0	B 0,0005–0,005

микролегирующие элементы $\leq 0,2\%$, остальное – Fe и неизбежные элементы-примеси. Среди неизбежных элементов-примесей $S \leq 0,01\%$, $P \leq 0,02\%$ и $N \leq 0,02\%$, $C 0,02–0,2\%$ [13]. Свариваемая низколегирующая высокопрочная сталь имеет превосходную износостойкость, прочность на растяжение 800 МПа и низкую чувствительность к водородной хрупкости.

Безопасность трубопровода при транспортировке водорода под большим давлением обеспечивается использованием труб из листовой аустенитной нержавеющей стали с высоким содержанием Mn, которая имеет следующий состав, масс. %:

C 0,040–0,090	Si 0,01–0,50	Mn 1,50–2,50
P 0,002–0,020	S 0,0002–0,0020	Al 0,010–0,080
Nb 0,005–0,080	Ti 0,005–0,050	N 0,0020–0,0080

Для обеспечения высокой прочности стальной лист может содержать дополнительно к вышеупомянутым элементам хотя бы один или несколько элементов из ряда: Cu, Cr, Ni, V, Mo, Ca, Mg, Fe и O [14].

Изготовление высокопрочного стального листа включает нагрев стальной заготовки вышеуказанного состава, горячую прокатку при температуре 1000–1250°C, водяное охлаждение готового листа в температурном интервале 250 до 550°C. Предпочтительная толщина стального листа должна составлять 15–35 мм. Компонентный состав в рекомендуемом диапазоне и условия изготовления стального листа позволили довести предел прочности на разрыв до порядка 600 МПа, обеспечивая высокую вязкость разрушения при транспортировке водорода под давлением 21 МПа.

Обработка внутренней поверхности труб. Повысить надежность использования стальных труб в условиях высоких температур и давления при транспортировке водорода позволит специальная обработка внутренней поверхности труб, включающая несколько этапов [15]. Первоначально

внутреннюю поверхность трубы подвергают пескоструйной обработке для образования микропор. Затем на подготовленную поверхность наносят термопластическую заготовку при нормальном давлении, нагревают трубу до температуры плавления термопласта, вращая ее с последующим охлаждением до 100°C. Возможно нанесение термопласта напылением. Второй этап включает заполнение полости трубы водой, нагрев до 70–100°C для создания давления в полости не более 10 МПа, обеспечивающего плотное прижатие высокоэластичного пластика к внутренней поверхности трубы. Наружная поверхность стальной трубы формируется методом напыления пластика, толщина напыления составляет не менее 0,1 мм.

Предлагается металлическая трехслойная композитная стальная труба, содержащая базовую трубу из низкоуглеродистой стали, на внутренней поверхности которой последовательно расположен слой сплава с высоким содержанием никеля и керметный слой оксида алюминия [16].

Базовую стальную трубу из низкоуглеродистой стали нагревают до 200–1250°C и при вращении осуществляют напыление внутренней стенки порошком самофлюсующегося сплава на основе никеля, содержащего: $C \leq 0,3\%$, $Cr \leq 5\%$, $B \leq 5\%$, $Fe \leq 5\%$ и $Si \leq 4,5\%$. Далее в трубу помещают термитный порошок, содержащий элементарный $Al \geq 85\%$ и $SiO_2 \leq 15\%$. При вращении центрифуги с большой скоростью при высокой температуре протекает термитная реакция с образованием керметного слоя расплавленного триоксида алюминия. Двойное покрытие внутренней поверхности трубы позволит улучшить показатели безопасности трубопроводов, снизить экологические риски.

Для предотвращения диффузии атомов водорода в стальную корпус трубопровода (1), на внутреннюю поверхность трубы (2) распылением нанесено нанокompозитное покрытие, представляющее собой W/ZnAl либо керамическое покрытие, представляющее собой Al/Al_2O_3 или TiN/AlN [17].

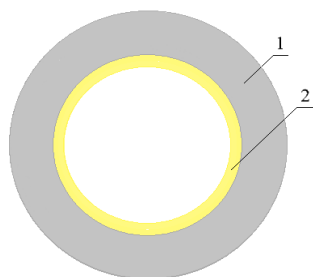


Рис. 5. Трубопровод с внутренним нанокompозитным покрытием.

Fig. 5. Pipeline with internal nanocomposite coating.

За счет плотности нанокompозитного покрытия обеспечивается его прочная связь с внутренней поверхностью корпуса, способствуя высокой термостойкости, предотвращению диффузии атомов водорода через корпус и устранению водородной хрупкости стального материала. Толщина стального корпуса трубы не превышает 10 мм.

Следующий вариант композитного стального трубопровода для транспортировки водорода содержит внутреннюю трубу 1, слой армирования 2 и внешний защитный слой 9. Внутренняя тонкостенная труба 1 из нержавеющей стали 316 имеет четырехслойную структуру с покрытием из Al_2O_3 на внутренней поверхности. Внешняя поверхность стальной трубы 1 покрывается поочередно слоями полиэтилена высокой плотности 3, полиамидной смолы 4, термостойкого антистатического полиэтилена 5. Армирующий слой 6 состоит из двух слоев проволоки 7, 8 из аустенитной нержавеющей стали, намотанных один вправо, а другой влево, образуя сетчатую структуру. Внешний защитный слой 9 изготовлен из полиэтилена высокой плотности смешанного с антипиренами и проводящими агентами, позволяющими улучшить огнезащитные и антистатические свойства трубопровода [18].

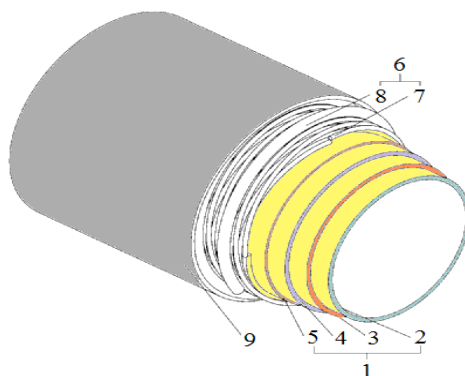


Рис. 6. Композитный стальной трубопровод для транспортировки водорода.

Fig. 6. Composite steel pipeline for hydrogen transportation.

Первый слой получают с помощью технологии трехслойной совместной экструзии. После охлаждения и формования наносят термоплавкий клей и помещают внешнюю сторону нагретого полиэтиленового слоя к внешней поверхности стальной трубы для плотного прилегания. Для нанесения покрытия Al_2O_3 на трубу из нержавеющей стали используют технологию реактивного магнетронного распыления. Представленная конструкция трубы обеспечивает достаточно надежные водородные барьерные характеристики трубопровода, а устойчивость трубопровода к давлению придает армирующий слой из стальной проволоки.

Предложенные составы сплавов, а также использованные технологии их получения направлены на снижение водородной хрупкости и обеспечения механической прочности стальных труб.

ПОЛИМЕРНЫЕ ТРУБЫ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ВОДОРОДА

Использование полимеров для производства трубопровода для транспортировки водорода связано с тем, что полимеры значительно меньше подвержены коррозии, по сравнению с трубами, изготовленными из стали. Однако, обладая высокой долговечностью, полимеры имеют и высокую проницаемость по H_2 , что приводит к поступлению водорода в окружающую среду, создавая экологические проблемы.

Полиэтилен высокой плотности. Для предотвращения попадания водорода в воздух в качестве барьерной облицовки внутренней поверхности трубы предложен полимерный композит, представляющий собой матрицу полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) с молекулярной массой в диапазоне от 50000 до 300000 а.е.м. (атомных единиц массы), включающую 1,2–15% от веса полимерной матрицы восстановленный оксид графена (ВОГ), содержащий от 0,1 до 50 масс. % кислорода.

Композитный материал может содержать бис(салицилато)борат лития (БСБЛ), а также, в дополнение к восстановленному оксиду графена, наноглину в количестве 90–110 масс.% от массы оксида графена. Проверена возможность использования в композитном материале наночастиц глины (НЧГ), в состав которой могут входить минеральные силикаты, например, монтмориллонит или бентонит. Зависимость проницаемости водорода от концентрации добавок, введенных в матрицу полимера, приведена на рисунке 7 [19].

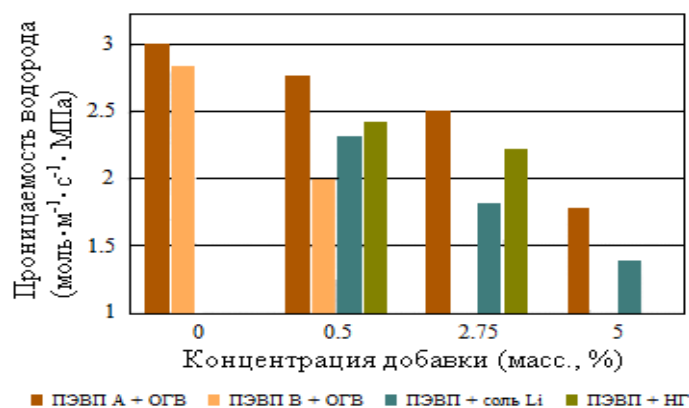


Рис. 7. Зависимость проницаемости водорода от состава материала.

Fig. 7. Dependence of hydrogen permeability on the composition of the material.

Для обработки предложенного композитного материала возможно использование одного из стандартных методов, например, выдувного формования и/или экструзии. Повышение концентрации оксида графена выше 15%, несмотря на уменьшение проницаемости водорода, будет затруднять обработку материала.

Для улучшения барьерных свойств полиэтиленовых труб для транспортировки водорода используют смесь мультимодального полиэтилена высокой плотности (ПЭВП), имеющего скорость течения расплава в диапазоне от 0,19 до 0,3 г/10мин, с зародышеобразователем стеаратом цинка и 1,2-циклогександикарбоной кислотой, а в качестве наполнителя соль кальция. Как вариант в качестве полимера возможно использование сополимера ПЭВП с 1-бутеном [20]. Испытания труб, двух видов, изготовленных экструзией из ПЭВП и сополимера с 1-бутеном для контрольных полимеров и зародышеобразователем, проведены при температуре 23°C при высоком рабочем давлении 6,3 бар в течение 21 дня. Результаты показали снижение скорости проникновения водорода в составах, содержащих от ~0,10% до ~0,30% зародышеобразователя, по сравнению с составами без него.

Наблюдаемая значительная разница между двумя типами труб объясняется влиянием на проницаемость полимера таких факторов как ориентация цепи, присутствие наполнителей и сложность боковой цепи, а также наличием наполнителей, сокращающих свободный объем в матрице, уменьшая молекулярную диффузию водорода. Улучшенные барьерные свойства газообразного водорода могут быть достигнуты при хорошей дисперсии и однородности зародышеобразованного полиэтилена в матрице.

При изготовлении композитной трубы, содержащей внешний и внутренний слой, в качестве основного материала используют ПЭВП, с содержанием углерода менее 0,25%. Внешняя поверхность внутреннего слоя армирована переплетенной стальной проволокой с алюминиевым или медным покрытием, толщиной 20 мкм или более. Проволока изготовлена из нержавеющей стали, содержащей Ni от 10,00% до 14,00%, Cr от 16,00% до 19,00% и Mo от 1,80% до 2,50% [21]. На рисунке 8 показана схема композитной трубы [21].

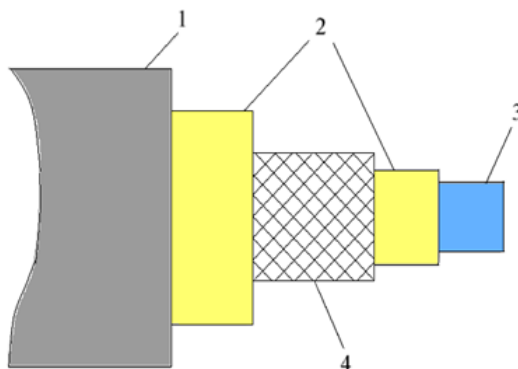


Рис. 8. Схема композитной трубы. Внешняя труба – 1, термоплавкий клей – 2, внутренняя труба – 3, обмотка проволокой – 4.

Fig. 8. Composite pipe diagram. Outer pipe – 1, hot melt adhesive – 2, inner pipe – 3, wire wrap – 4.

По сравнению с обычной стальной трубой для транспортировки чистого водорода предложенная композитная труба обладает гибкостью, обеспечивая стойкость к водородной хрупкости.

Полиэфирэфиркетон, полиэфиркетонэфиркетон, полифениленсульфид, поливинилиденфторид, полиамид, полипропилен. Предложена композитная труба, на внешней поверхности которой имеется накладка, причем сама труба 1 и накладка 2 могут быть выполнены как из одного и того же, так и из разных материалов, представляющие собой термопластичную полимерную матрицу в которую внедрены волокна длиной от 0,05 мм до 10 мм. Полимерная матрица композитной трубы содержит полимер, выбранный из полиэфирэфиркетона (ПЭЭК), полиэфиркетонэфиркетона, полифениленсульфида, поливинилиденфторида, полиамида, полипропилена, полиэтилена или их смесей [22]. Встроенные в полимерную матрицу волокна изготовлены из материала, выбранного из ряда: углерод, арамид, базальт, стекло и их смеси. Труба 1 была сформирована вокруг вкладыша 3, изготовленного из ПЭЭК. Выполненная в виде ленты композитная накладка наматывается вокруг трубы под углом близким к

90°. Затем наматывают дополнительные слои, каждый из которых сплавляется с предыдущим, достигая требуемой толщины накладки. На конце трубы, изображенной на рисунке 9 [22], предусмотрено заполнение 4.

Такое конструктивное решение, помимо снижения водородной проницаемости, позволит значительно снизить вероятность растрескивания из-за термического напряжения во время производства и колебания температуры во время эксплуатации трубы.

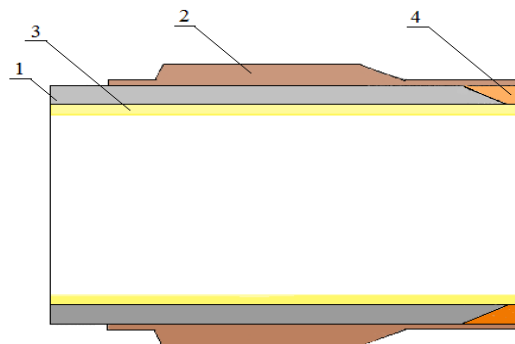


Рис.9. Полимерная композитная труба.

Fig. 9. Polymer composite pipe.

Сополимер этилена с виниловым спиртом. Хорошо известные превосходные свойства сополимера этилена с виниловым спиртом уменьшать водородную проницаемость [23] позволили разработать многослойную структуру трубопровода для транспортировки водорода с минимальным числом слоев равным трем [24]. Внутренний и внешний слой трубы могут быть выполнены из полимеров с разными или одинаковыми химическими составами, причем в первом случае во внешнем слое скорость прохождения паров воды должна быть больше скорости прохождения внутреннего слоя. Средний слой выполнен из сополимера этилена и винилового спирта (СЭВС), подвергнутого омылению. Для обеспечения термической стабильности средний слой модифицируют солью щелочного металла или соединениями бора. Разработанная многослойная структура помимо улучшения барьерных свойств водорода повышает механическую прочность.

Полиэтилен с защитой инертным газом. Разработана рабочая труба для транспортировки водорода, изготовленная из полиэтилена с многослойным армированием внешней поверхности [25]. На внешнюю поверхность рабочей трубы наносится клейкий слой, на который наматывается алюминиевая фольга. Затем наносят второй клейкий слой с последующим обертыванием трубы несколькими слоями лентой из стекловолокна под углом 55° при температуре экструзии стекловолокна 160–200°С для гарантии хорошего уровня сжатия армирующего слоя. На внешнем армирующем слое из стекловолокна крепятся ребра жесткости, позволяющие образовать с внешней полиэтиленовой трубой пространство, заполненное инертным газом. Состав используемой алюминиевой фольги, % мас.:

Si – 0,25 Fe – 0,35 Cu – 0,05 Mn – 0,03 Mg – 0,03 Ti – 0,03 Al – 99,26
Конструкция предложенной трубы представлена на рисунке 10[25].

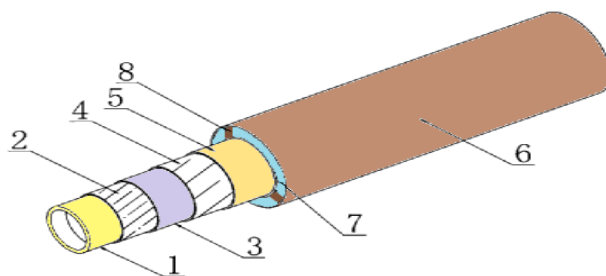


Рис. 10. Полиэтиленовая труба для транспортировки водорода: полиэтиленовая рабочая труба – 1; первый связующий клейкий слой – 2; слой алюминиевой фольги – 3; второй связующий клейкий слой – 4; армирующий слой намотки стекловолоконной ленты – 5; ребра жесткости – 6; защитный слой инертного газа – 7; внешняя полиэтиленовая защитная труба – 8.

Fig. 10. Polyethylene pipe for transporting hydrogen: polyethylene working pipe – 1; first adhesive bonding layer – 2; aluminum foil layer – 3; second adhesive bonding layer – 4; reinforcing layer of fiberglass tape winding – 5; stiffening ribs – 6; protective layer of inert gas – 7; outer polyethylene protective pipe – 8.

Используемая алюминиевая фольга не только обеспечивает защиту от коррозии, но и способствует предотвращению утечки водорода.

Пенополиуретан и ПЭПВ. Оптимизацией конструкции полимерного трубопровода является трехслойная композитная структура, представляющая собой полиэтиленовую трубу с нанесенными на внешнюю поверхность последовательно слоями пенополиуретана и полиэтилена высокой плотности, изображенная на рисунке 11 [26].

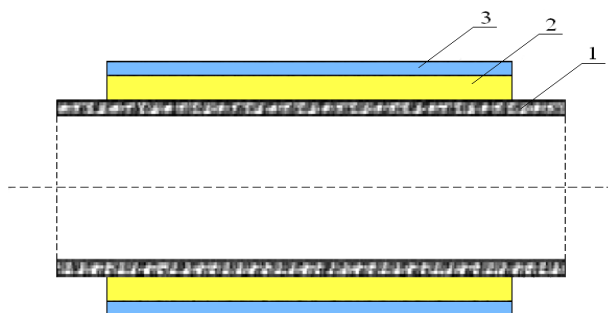


Рис. 11. Конструкция полимерного трубопровода: 1 – полиэтиленовая рабочая труба, 2 – слой пенополиуретана, 3 – слой полиэтилена высокой плотности.

Fig. 11. Construction of a polymer pipeline: 1 – polyethylene working pipe, 2 – layer of polyurethane foam, 3 – layer of high-density polyethylene.

Каждый слой конструкции выполняет свою функцию. Слой пенополиуретана приготавливают вспениванием полиэфира и дифенилметандиизоцианата. Обладая большой пористостью, за счет вспенивания полиуретан поглощает и предотвращает диффузию водорода в наружный слой. Внешний защитный полиуретановый слой, имеющий толщину

от 4 до 10 мм, защищает трубопровод от механических повреждений, обеспечивает гидроизоляцию и предотвращает коррозию. Полиэтиленовая рабочая труба выдерживает высокое давление потока водорода, обладая хорошей гибкостью и коррозионной стойкостью.

Многослойная конструкция трубы. Для обеспечения газонепроницаемости трубопровода водорода разработана многослойная армированная труба, схема которой представлена на рисунке 12 [27].

Защитный слой из полиамида-12, нанесенный на внешнюю поверхность трубы, обладает высокой стойкостью к растрескиванию под нагрузкой, истиранию и абразивному износу. Внешний и внутренний слои трубы выполнены из полимерного материала (например, полифениленсульфида, полиэтилена, сополимера пропилена, и т.п.). Поперечноармирующий слой может содержать металлические ленты, металлические проволоки, полимерные ленты и полимерные нити в любом сочетании или состоять только из одного такого армирующего элемента. Материалом разделительного слоя должен быть высокоплавкий полимер, например, полиэтилентерефталат. Продольноармирующий слой выполнен из высокопрочной оцинкованной стальной проволоки. Для уменьшения взаимодействия оцинкованной стальной проволоки между собой экструзией нанесен предохранительный слой, выполненный из полимера, обладающего высокой текучестью расплава, например, полипропилена, полиэтилена, полиэтилентерефталата, поливинилхлорида и др.

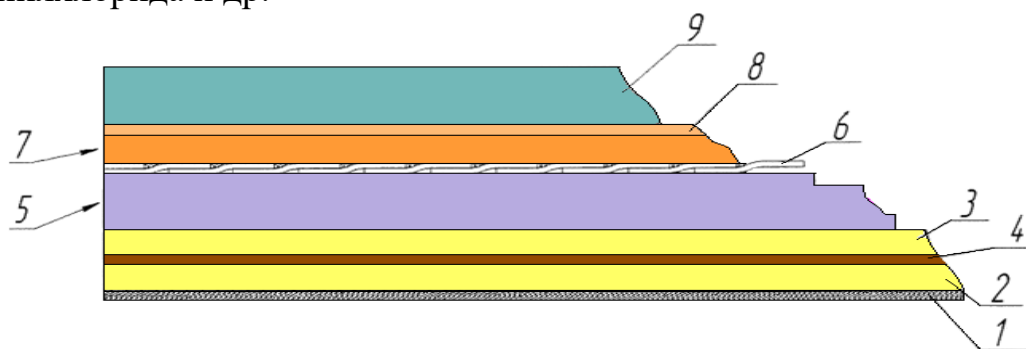


Рис. 12. Гибкая полимерная труба содержит: флюидозащитный слой, внешняя поверхность трубы 2, внутренняя поверхность трубы 3, газозащитный слой 4, поперечноармирующий слой 5, разделительный слой 6, продольноармирующий слой 7, предохранительный слой 8 и оболочку 9.

Fig. 12. Flexible polymer pipe contains: fluid-protective layer 1, outer surface of the pipe 2, inner surface of the pipe 3, gas-protective layer 4, transverse reinforcement, separating layer 6, longitudinal reinforcing layer 7, protective layer 8 and shell 9.

Приведенные примеры демонстрируют возможность использования как стальных, так и полимерных трубопроводов для транспортировки водорода.

Инновационные подходы в решении вопроса транспортировки водорода направлены на снижение негативных проявлений, создание надежных технологий, позволяющих избежать утечек водорода и снизить риски для окружающей среды, а также содействовать развитию водородной энергетики.

Трубопроводный транспорт для смешанных энергоносителей

Транспортировка природного газа совместно с водородом является развивающейся отраслью и сопряжена с высокими факторами риска, на снижение которых направлены разработанные инновационные решения. С учетом проблем, возникающих при транспортировке водорода в смеси с природным газом по стальному трубопроводу, усилия исследователей в первую очередь направлены на создание материала, позволяющего уменьшить проникновение атомов водорода в кристаллическую решетку стали, вызывающее образование трещин и повышение хрупкости.

Разработанный материал для трансмиссионной транспортировки водорода с природным газом имеет следующий химический состав, масс. %:

C 0,08~0,09	Mo 0,10~0,11	P < 0,010
Si 0,32~0,33	Cr 0,18~0,20	S < 0,003
Mn 0,96~0,98	Ti 0,014~0,017	Pb < 0,001

остальное Fe и неизбежные примеси [28]. Трубы из такого материала обладают хорошей устойчивостью к HCl и стойкостью к водородной хрупкости.

Технология производства труб включает следующие стадии:

- предварительное обессеривание расплавленного чугуна до содержания S–0,04%, P–0,10%;
- конвертерную плавку с температурой выпуска стали ≥ 1620 °C;
- низкотемпературное рафинирование с содержанием Al в расплавленной стали около 0,050%, CaO/SiO₂ поддерживают на уровне 3,5–4,5%. Время удерживания белого шлака ≥ 18 мин. Вакуумную обработку проводят при ≤ 67 МПа в течение ≥ 20 мин. Время мягкой продувки ≥ 15 мин.

Интересным представляется передача смешанных энергоносителей, в частности, водорода и природного газа с использованием гибридного трубопровода. Трубопровод включает изнутри наружу последовательно расположенные внутреннюю трубу для передачи водорода, слой связующей смолы, первый барьерный и защитный слои, армирующий слой, второй защитный слой, внешнюю трубу для передачи природного газа, второй барьерный слой, третий защитный слой [29].

Труба для передачи водорода может быть выполнена из полиэтилена, полипропилена, политетрафторэтилена или полиамида, труба для передачи природного газа выполнена из сополимера этилена и винилового спирта. Все защитные слои представлены полиэтиленом. В качестве первого барьерного слоя использована алюминиевая трубка, для армирования которой используют ленту из стекловолокна, намотанную в два ряда соответственно по часовой стрелке и против нее под углом 30–60°.

Для смешанной транспортировки природного газа и водорода по трубопроводу предложено смесительное устройство, включающее наружную трубу 1, в которой установлен эластичный сильфон 2 из нержавеющей стали марки AISI 304 (аналог по ГОСТ — 08X18H10), представленное на рисунке 13. На концах наружной трубы 1 закреплены фланцы 8. На верхнем конце эластичного сильфона 2 закреплено соединительное фланцевое кольцо 9, разъемно - фиксированное на фланце 8. На нижнем конце эластичного

сильфона закреплено поршневое кольцо 4, касающееся внутренней поверхности трубы 1, в которое встроена демпфирующая перегородка 5 с множеством отверстий на нижней конической части перегородки. Нижний конец наружной трубы 1 внутренней резьбой соединен с блокирующим кольцом 7, образующий с поршневым кольцом 4 полость самовозбуждающихся колебаний. В образованной полости расположен узел распределения водорода 6, соединенный с двух сторон с трубами подвода водорода 3 снаружи наружной трубы 1. Узел распределения водорода 6 включает спирально расположенный фитинг V-образной формы адаптированный к форме конической секции демпфирующей перегородки 5. На нижней торцевой поверхности фитинга имеется множество отверстий для перелива водорода [30].

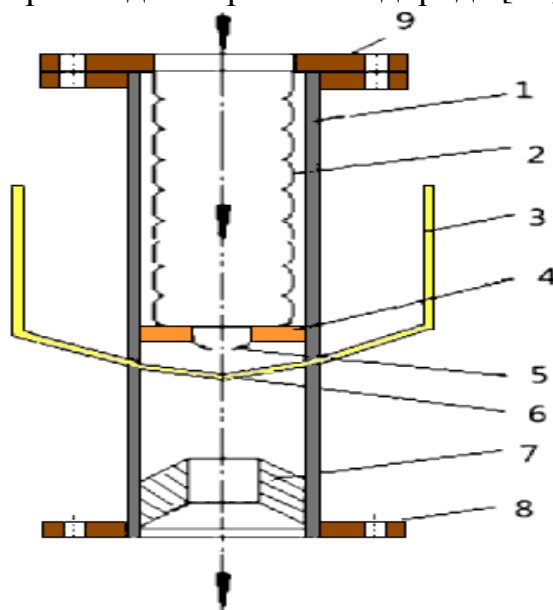


Рис. 13. Смесительное устройство для транспортировки природного газа совместно с водородом.

Fig. 13. Mixing device for transporting natural gas together with hydrogen.

Конструкция узла распределения водорода выполняет роль диспергатора потока и разрезает пузырьки природного газа, способствуя равномерному смешиванию водорода и природного газа и распылению их в режиме импульсного потока, обеспечивая безопасность и надежность транспортировки.

В настоящее время помимо создания новых материалов для изготовления трубопроводов и конструктивного решения совместной транспортировки водорода с природным газом, рассматривается возможность использования существующих трубопроводов природного газа. Поскольку эти трубопроводы изготовлены из высококачественной стали чувствительной к водороду, концентрация водорода является ключевым фактором для обеспечения безопасной транспортировки смеси. Для предотвращения локального накопления водорода в трубопроводе необходимо иметь надежную систему перемешивания подаваемого водорода с природным газом.

Решение этой задачи можно достигнуть совокупностью систем, включающих мониторинг и управление, высокоэффективное смешение газов и

аварийный сброс [31]. Система мониторинга (А) содержит блок обнаружения магистрального потока природного газа, оповещающий его режим в реальном времени, установленный вне трубопровода, и блок управления, подключенный к трубопроводу. Блок смешения газов (С) установлен непосредственно на магистральном трубопроводе и соединен с блоком подачи водорода (В), осуществляющий его подачу точечным впрыскиванием. Система мониторинга показана на рисунке 14[31].

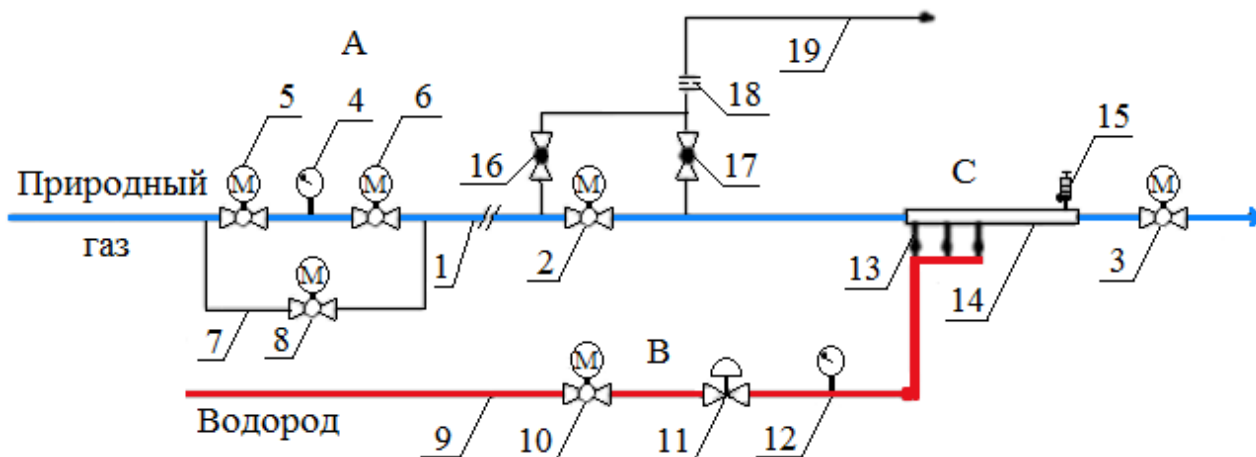


Рис. 14. Мониторинг, управление и аварийный сброс при транспортировке водорода совместно с природным газом.

Fig. 14. Monitoring, control and emergency release during transportation of hydrogen together with natural gas.

На магистральном трубопроводе (1) со стационарными клапанами (2) и (3) на входе и выходе трубопровода, в системе мониторинга установлен датчик расхода (4) на входе и выходе которого установлен первый и второй запорные клапаны (5, 6), байпас (7) с запорным клапаном (8), используемый для соединения входного и выходного трубопроводов подачи природного газа при капитальном ремонте датчика расхода (4). На трубопроводе подачи водорода (9) последовательно расположены запорный клапан (10), регулирующий клапан (11), датчик расхода водорода (12). Один конец трубопровода водорода (9) подсоединен к источнику водорода, а второй к системе смешивания газов, содержащей минимум три патрубка для впрыскивания водорода (13), трубопровод смешения (14), расположенный на линии магистрального трубопровода 1, трубопровод отбора проб смеси газов (15). Трубопровод смешения (14) соединен с магистральным трубопроводом (1). Система аварийного выпуска природного газа включает клапан (16), клапан сброса (17) на отводе магистрального трубопровода, ограничительное отверстие (18) на выпускном трубопроводе (19). Разработанная система предназначена для выполнения дистанционного обнаружения потока на трубопроводе природного газа, обеспечения достаточного времени управления входным потоком водородного трубопровода, гарантии концентрации водорода в смешанном газе на безопасном уровне.

Учитывая возросший в последнее время спрос на водородную энергетику, транспортировка смеси водорода и природного газа в странах с крупномасштабной сетью трубопроводов обеспечит возможность транспортировки природного газа по имеющейся сети трубопроводов.

КОНТРОЛЬ БЕЗОПАСНОСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

Возросший рост замены традиционного использования нефти в качестве источника энергии использованием водородной энергетики повлек за собой увеличение сети трубопроводного транспорта. При транспортировке водорода по магистральным трубопроводам утечка и накопление водорода может привести к серьезным последствиям, в частности к возгоранию и взрыву.

Создана система обнаружения утечки водорода при транспортировке по трубопроводу (1), содержащему внутреннюю транспортную трубу (2) и внешний защитный слой (3) (рис. 16). Внутренняя труба может включать транспортный внутренний слой из полимерного материала, такого как полиэтилен, полипропилен или полиамид, блокирующий слой из материала с низкой проницаемостью водорода (этиленвиниловый спирт, либо такие металлы как Al, Cu, Pb) и адгезивный слой. Вокруг внутреннего слоя расположен слой армирования 4 для обеспечения стойкости к давлению, создаваемому сжатым водородом при транспортировке и может быть сформирован из армированного волокнами пластика. Самый внешний защитный слой 5 может включать полимерный материал и служить буфером против внешнего удара. Наружная поверхность внешнего защитного слоя из полиэтилена высокой плотности или полиамида, спирально обмотана лентой 6 из оптического волокна в продольном направлении по всей длине трубопровода, изображенного на рисунке 15[32].

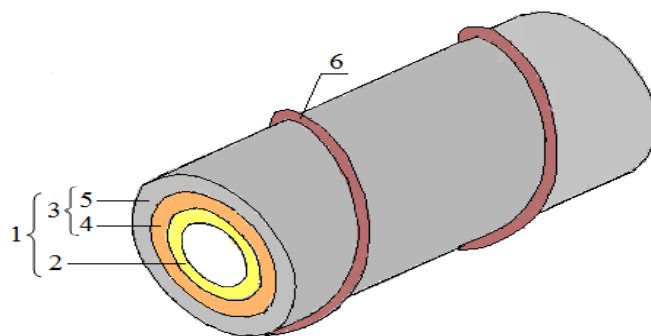


Рис. 15. Трубопровод для транспортировки водорода.

Fig. 15. Hydrogen transportation pipeline.

Сама система обнаружения утечки 8 содержит оптический волоконный блок 9, генератор оптических сигналов 10, блок обнаружения оптических сигналов 11. Сигналы с блока обнаружения через блок связи передают последовательно на внешнее устройство, блок отображения информации, блок управления и хранения сигналов нормального состояния оптического волокна и отклонения оптических характеристик для определения объема утечки

водорода, а также распознавания места положения утечки. Блок обнаружения водорода показан на рисунке 16 [32].

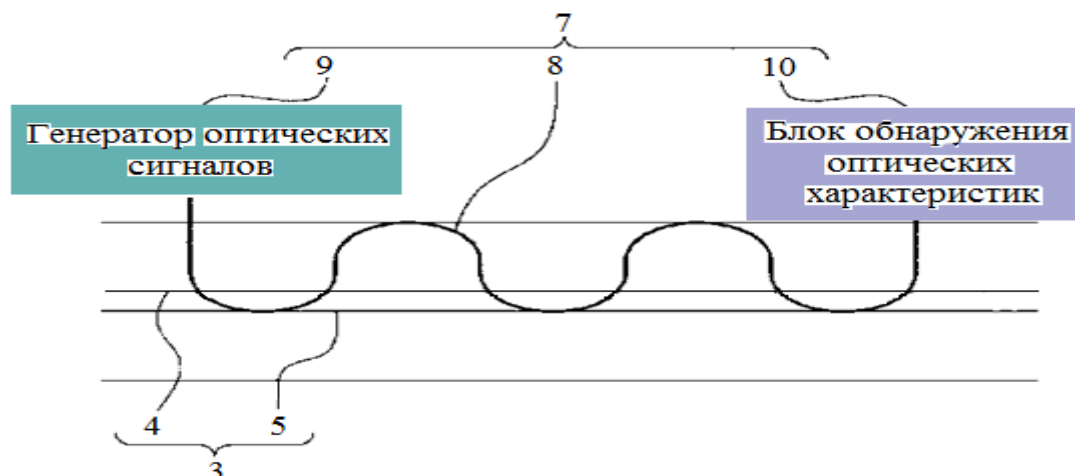


Рис. 16. Система обнаружения утечки водорода в трубопроводе.

Fig. 16. Hydrogen leak detection system in pipeline.

Для предупреждения утечки водорода посредством магистрального трубопровода предусмотрена система мониторинга безопасности оборудования, включающая устройство генерации импульса обнаружения; эластичную трубную решетку в качестве защитного покрытия оборудования, покрытую материалом чувствительным к водороду, например, композитным материал Pt/WO_3 , которая осуществляет прием импульса обнаружения и отражение сигнала; фотодетектор, используемый для приема сигнала отражения от покрытия и демодуляции информации о температуре, концентрации водорода и вибрации; усилитель на основе легированного эрбием волокна для усиления сигнала импульса обнаружения, подключенный к первому ответвлению; циркулятор, подключенный к усилителю и к решетке. Система мониторинга безопасности оборудования для транспортировки водорода может также содержать память, процессор и компьютерную программу [33].

Для исключения прямого попадания водорода в воздух и предупреждения детонации, предложен трубопровод по типу труба в трубе, в котором внутренняя труба 1 предназначена для транспортировки водорода, а внешняя для транспортировки природного газа 2[34]. При таком конструктивном решении, водород в случае утечки выходит из трубопровода водорода, попадая в трубопровод транспортировки природного газа. Транспортировка смешенного газа помимо требования к материалу трубопровода требует поддержания содержания водорода в трубопроводе природного газа на уровне, не превышающем порог безопасности.

Для решения проблем безопасности транспортировки водорода в рассматриваемом трубопроводе, система контроля содержит первый датчик определения концентрации водорода 3, установленный в трубе транспортировки природного газа 1, насос природного газа 4, расположенный

на входе трубопровода, запорный клапан 5 заборника природного газа 6, контролер 7. При обнаружении превышения заданной концентрации водорода в трубопроводе природного газа 1, контролер 7 регулирует подачу природного газа изменением скорости вращения насоса 4 для понижения концентрации водорода в смеси до заданного уровня. Система контроля представлена на рисунке 17 [34].

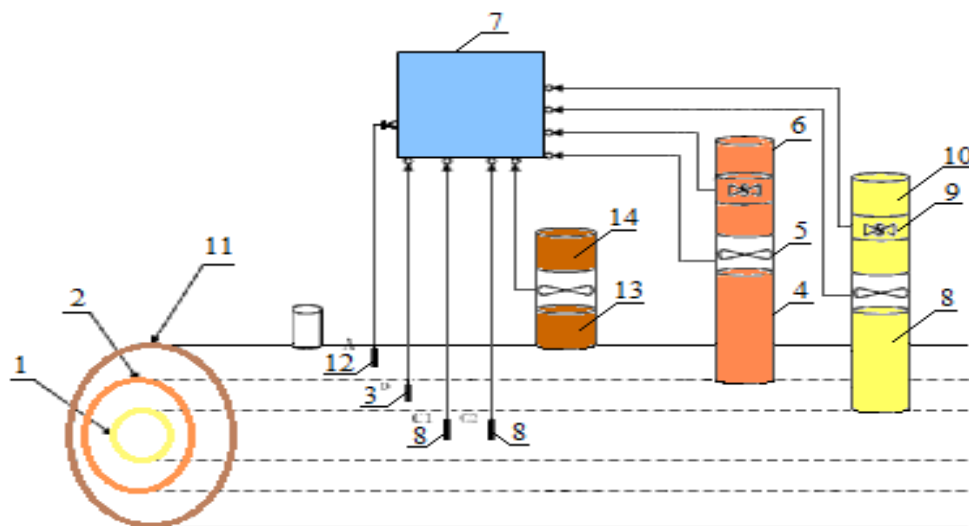


Рис. 17. Система контроля концентрации водорода при транспортировке в смеси с природным газом.

Fig. 17. Hydrogen concentration control system during transportation in a mixture with natural gas.

Система контроля также содержит датчик давления водорода 8, установленный во внутреннем трубопроводе 2. Контролер 7 при обнаружении концентрации водорода в трубопроводе транспортировки водорода 1, превышающем заданное давление, регулирует скорость вращения водородного насоса 8 клапаном 9 заборника водорода 10. Датчиков давления водорода, установленных во внутренней трубе 2, может быть множество для контроля давления водорода по всей длине трубопровода в режиме реального времени.

Во время эксплуатации трубопровода возможно повреждение трубопровода транспортировки природного газа, например в результате образования ржавчины. В этом случае накопившийся водород может выделиться в атмосферу, создавая угрозу взрыва. Для обеспечения безопасности вокруг трубопровода природного газа предусмотрена воздушная труба 11, внутри которой расположен второй датчик давления водорода 12 для определения концентрации водорода в воздушной трубе в режиме реального времени и вывода сигнала обнаружения водорода на контроллер 7. При повышении концентрации выше заданной, контролер 7 подает сигнал воздушному насосу 13 для подачи воздуха из воздухозаборника 14 в воздушную трубу 11 для снижения концентрации водорода до допустимого значения.

Примером безопасной транспортировки водорода может служить конструкция трубопровода и системы контроля для предупреждения рисков транспортировки, представленные на рисунке 18 [35].

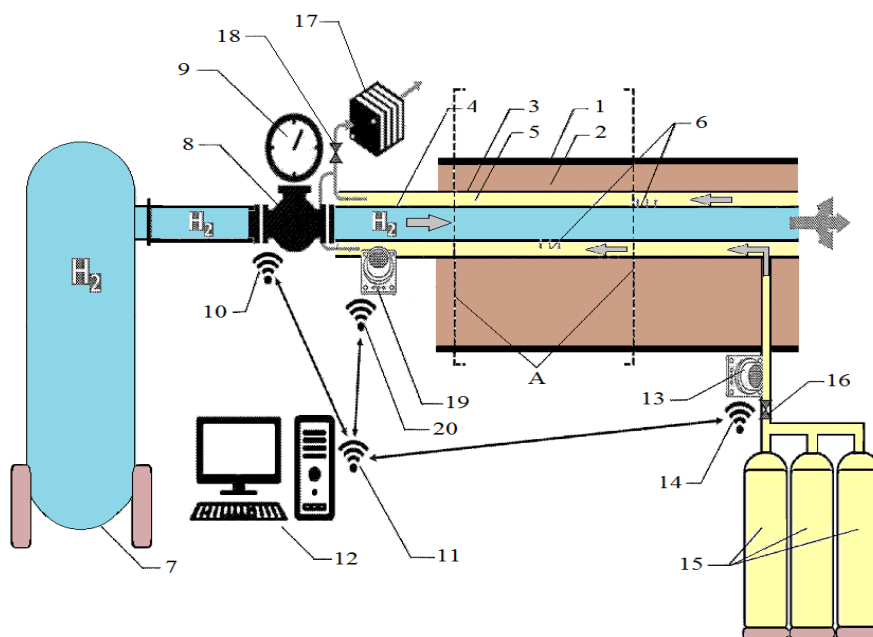


Рис. 18. Система транспортировки и контроля утечки водорода.

Fig. 18. Hydrogen transportation and leakage control system.

В трубопроводе 1 со своей структурой 2, установлена предохранительная труба 3, внутри которой расположена линия транспортировки водорода 4 (стальная труба), между наружной поверхностью которой и внутренней поверхностью трубопровода образуется канал (линия очистки от водорода) 5 для вывода водорода из системы при обнаружении утечки в местах 6 [35].

Пунктирными линиями выделен участок А, на котором осуществляют контроль утечки водорода. Предохранительная труба 3 может быть выполнена из материала, совместимого с водородом, а также с очистительным газом, проходящим по каналу 5, например, из металла, пластика либо композита. Пунктирными линиями выделен участок А, на котором осуществлен контроль и предотвращение утечки водорода в окружающую среду. От источника производства водорода 7 по линии подачи через впускной клапан 8 впрыскивают в трубу 4. Манометром 9 контролируют давление водорода до и после подачи в систему и через приемопередатчики 10 и 11 подают на активную систему мониторинга 12 для записи, анализа и принятия мер при необходимости. С помощью датчика водорода 13, приемопередатчик 14 через приемопередатчик 11 к мониторингу 12, контролируют содержание водорода в канале 5, оповещают оператора о необходимости подачи газа-очистителя из резервуара 15, открыв клапан 16, для вытеснения водорода из канала предохранительной трубы 3 в рекомбинатор 17, открыв клапан 18, для извлечения и вторичного использования водорода. Система может дополнительно содержать датчик 19 для контроля уровня водорода в линии

газа-очистителя и беспроводное соединение 20 для связи с компьютером для мониторинга 12 .

Имея значительную протяженность трубопроводов, не исключена возможность их пролегания через населенные пункты, поэтому наличие систем контроля утечки водорода является особо важным мероприятием в инфраструктуре трубопроводного транспорта.

ВЫВОДЫ

Возросшая потребность в водороде связана с его миссией в решении энергетических потребностей общества, а также с большим потенциалом для декарбонизации многих промышленных процессов. Успех обеспечения потребности в водороде зависит от эффективности его транспортировки от производителя до потребителя. Рассмотренные в данном обзоре технические решения позволяют иметь представление о том, что будущее безопасного существования инфраструктуры трубопроводного транспорта зависит от синергетического воздействия нескольких факторов.

Инновационными решениями, направленными на смягчение воздействия водородной хрупкости, приводящей к утечке водорода, предлагается использование низколегированных и аустенитных нержавеющей сталей с суммарным многофункциональным воздействием компонентного состава. Для повышения надежности использования стальных труб при высоких температурах и давлении созданы технологии специальной обработки внутренней поверхности труб и нанесения однослойного или многослойного покрытия. Такие решения в итоге позволят создание микроструктур стали, позволяющих увеличить сопротивление растрескиванию, обеспечить свариваемость и высокую прочность.

Альтернативным решением борьбы с водородной хрупкостью выступают предложенные решения по использованию полимерных труб. С учетом высокой проницаемости водорода, для исключения его попадания в окружающую среду и предотвращения экологических последствий, предложен большой выбор полимерных труб, при использовании которых внешняя или внутренняя поверхность имеет защитное покрытие, выступающее в качестве ловушек водорода. Интересным представляется создание композитных труб из полимерного материала, внешняя поверхность которых армирована стальной проволокой. Такое решение позволяет повысить предел прочности на разрыв.

Следует отметить прогресс в исследованиях изучения возможности использования гибридных трубопроводов для совместной транспортировки водорода с природным газом. В таких решениях обращено внимание на материал изготовления трубопровода водорода, поскольку ключевым фактором безопасной транспортировки смеси является концентрация локального накопления водорода в трубопроводе природного газа.

Важному критерию обеспечения безопасности трубопроводного транспорта посвящены разработанные системы мониторинга и контроля, как для трубопровода водорода, так и гибридного трубопровода. Разработанные технические решения позволяют обеспечить контроль в реальном времени таких

важных параметров, как давление и температура, способствующих снижению механических свойств стали (водородной хрупкости) с экологическими последствиями, а также объемное соотношение водорода к природному газу при их совместной транспортировке.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS:

The authors declare no conflict of interests.

References:

1. Li J., Song F., & Zhang X. (2024). A review on hazards and risks to pipeline operation under transporting hydrogen energy and hydrogen-mixed natural gas. *Science and Technology for Energy Transition*.79(6), 1–13. <https://doi.org/10.2516/stet/2024004>.
2. Genovese, M., Schlüter, A., Scionti, E., Piraino, F., Corigliano, O., & Fragiaco, P. (2023). Power-to-hydrogen and hydrogen-to-X energy systems for the industry of the future in Europe. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(44), 16545–16568. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.194>
3. Ozcanli M., Bas O., Akar M., Yildizhan S., & Serin H. (2018) Recent studies on hydrogen usage in Wankel SI engine. *Int. J. Hydrogen Energy*, 43, 18037–18045. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.202>.
4. Filippov S.P., & Yaroslavlsev A.B. (2021). Hydrogen energy: development prospects and materials. *Advances in Chemistry*. 90(6), 627–643 (in Russ.). <https://doi.org/10.1070/RCR5014>.
5. KindraV, Maksimov I, OparinM., ZlyvkoO., & Rogalev A. (2023). Hydrogen Technologies: A Critical Review and Feasibility Study.*Energies*, 16(14), 5482; <https://doi.org/10.3390/en16145482>.
6. Hydrogen Pipeline Market. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/hydrogen-pipeline-market-154873652.html>
7. Akbar Dauletbay. (2024). *Transportation of Hydrogen: Hydrogen Usage*. In book: *Hydrogen Technologies – Advances, Insights, and Applications*. 109. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1005066>
8. Hagen . A. B., A. & Alvaro A. (2020). Report. Hydrogen Influence on Mechanical Properties InPipelineSteel.114.<https://www.sintef.no/en/publications/publication/1958342/>.
9. Abebe B. A., & Altuncu E. (2024), A Review on hydrogen embrittlement behavior of steel structures and measurement methods. *International advanced researches and engineering journal*.8(2), 91–110.<https://doi.org/10.35860/iarej.1414085>.
10. Campari A., UstolinF., Alvaro A., & Paltrinieri N. (2023). A review on hydrogen embrittlement and risk-based inspection of hydrogen.*International Journal of Hydrogen Energy* 48(90),.35316–35346. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.293>.
11. Shang J., Chen W., Zheng J., Hua Z., Zhang L., Zhou C., & Gu C. (2020). Enhanced hydrogen embrittlement of low-carbon steel to natural gas/hydrogen mixtures. *ScriptaMaterialia*, 189, 67–71. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.08.011>.
12. Barrera O., Bombac D., Chen Y., Daff T. D., Galindo-Nava E., Gong P., Haley D., Horton R., Kazarov I., Kermode J. R., Liverani C., Stopher M., & Sweeney F. (2018). Understanding and mitigating hydrogen embrittlement of steels: a review of experimental, modelling and design progress from atomistic to continuum. *Journal of Materials Science*.53(9). 6251–6290. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1978-5>.
13. Pat. 117144269, CN, 2023.

14. WO2024171518, 2024.
15. Pat. 113103613, CN, 2022.
16. Pat. 113464732, CN, 2023.
17. Pat. 20230341075, US, 2023.
18. Pat. 114962804, CN, 2022.
19. WO2024133959, 2024.
20. Pat.20240263721,US, 2024.
- 21.Pat. 20240304611, US, 2024.
22. Pat.2626801, GB, 2024.
23. Pat. 2016135833, JP, 2016.
24. Pat.20240399720, US, 2024.
25. Pat. 115654227, CN, 2023.
26. WO2023185141, 2023.
27. Pat. 0002761477, RU, 2021.
28. Pat. 116837286, CN, 2023.
29. Pat. 114484098, CN, 2022.
30. Pat. 219955069, CN, 2023.
31. Pat.116263236, CN, 2023.
32. Pat. 4394345, EP, 2024.
- 33.Pat. 114720069, CN, 2022.
34. Pat. 116336388, CN, 2023.
35. Pat, 20240384840, US, 2024.