



## СЕРГЕЙ ЧИКАЛОВ: «ВОДОРОДНОЕ БУДУЩЕЕ ТРУБОПРОВОДОВ»

---

Об основных вызовах и технологических тенденциях в водородной промышленности, а также о создании продуктов для выработки, транспортировки и хранения водородного топлива в интервью «Нефтегазовой Вертикали» рассказал доктор технических наук, первый заместитель генерального директора по операционной деятельности и развитию Трубной Металлургической Компании (ТМК) Сергей Чикалов.

Энергетика всегда выступала одним из драйверов технологического развития промышленности. В 2021 году ключевым вопросом в повестке ТЭК стала экология – снижение воздействия на окружающую среду, в том числе сокращение углеродного следа для борьбы

с глобальным потеплением. В энергетике эти цели достигаются благодаря развитию возобновляемых источников энергии, атомной энергогенерации, гидроэнергетики, эффективному использованию энергии и другим решениям.

С этим связан и всплеск интереса к водородному топливу, при этом многие страны уже имеют значительный опыт его производства и использования в промышленности и на транспорте. Водородная энергетика позволит значительно снизить выбросы парниковых газов и тем самым решить главную задачу декарбонизации.

При этом траектория развития водородной энергетики показывает, что оптимальным с точки зрения экономики и технологий становится симбиоз новых и существующих технических решений.

**НГВ:** *Сергей Геннадьевич, какой вам видится роль водорода в текущем энергопереходе?*

**С. Чикалов:** Сегодня ажиотаж вокруг энергоперехода немного утих, но мы понимаем, что тема снижения воздействия на окружающую среду никуда не уйдет. ТМК изначально прикладывала много усилий для того, чтобы повысить экологичность производства, создать высокотехнологичные «зеленые» продукты – термоизолирующие трубы, бессмазочные резьбовые покрытия и другие решения. И сейчас мы активно продолжаем работать на этом направлении, разрабатывая материалы и технологии для энергоперехода. Инфраструктура для водородной энергетики – одна из таких ниш.

Существует несколько концепций роста потребления энергии из альтернативных источников. Наиболее радикальный вариант – полный запрет на использование угля, нефти и газа к 2050 году – сегодня представляется малореализуемым. Есть более сдержанные планы, предполагающие сокращение доли потребления угля и нефти на 20-30% с компенсацией роста потребления энергии за счет строительства новых атомных станций, развития возобновляемых источников энергии и увеличения потребления природного газа. Этот сценарий более реалистичен.

Что касается водородного топлива, то, по экспертным оценкам, в перспективе водород может занять 10-15% в общем энергобалансе. Когда это произойдет – сегодня сказать сложно, но мы как инновационная компания должны быть готовы к этому. Водородная энергетика требует создания особых технологий для производства, транспортировки и хранения нового топлива, и ТМК активно работает в этом направлении.

**НГВ:** *Насколько переход на водород экономически обоснован?*

**С. Чикалов:** Сегодня переход на водород возможен в ограниченных масштабах – как по технологическим, так и по экономическим соображениям. Водород в природе в чистом виде практически не встречается. Основной источник промышленного водорода – это то же самое ископаемое углеводородное сырье: природный газ и уголь. Поэтому для водорода ввели градацию – «серый», «голу-

бой», «бирюзовый» и «зеленый». «Зеленым» считается водород, произведенный с помощью технологий, не выделяющих парниковых газов, путем электролиза воды, питаемого энергией ветра и солнечных батарей.

В современном мире большая часть промышленно получаемого водорода производится методом парового риформинга природного газа. Себестоимость такого водорода составляет \$1,2 за килограмм (это около 11 кубометров). Тогда как минимальная себестоимость производства «зеленого» водорода на настоящий момент примерно в пять раз выше – она оценивается в районе \$5-7 за килограмм.

### **Наиболее перспективным выглядит получение «голубого» и «бирюзового» водорода, технология получения которого активно разрабатывается в России**

При этом при существующих технологиях энергоэффективность «зеленого» водорода вызывает вопросы. Энергозатраты на производство одного кубометра «зеленого» водорода при нормальных условиях в современных электролизерах составляют около 3,8 кВт/ч (без учета стоимости подготовки воды), а при сжигании он отдаст всего 3 кВт/ч.

Чтобы обеспечить водороду место в энергобалансе, научному сообществу и промышленности необходимо решить ряд технических вопросов получения экологически чистого водорода по приемлемой цене и его доставки потребителям. С этой точки зрения наиболее перспективным выглядит получение «голубого» и «бирюзового» водорода, технология получения которого активно разрабатывается у нас в России.

**НГВ:** *Производство «голубого» водорода также имеет свои особенности. Что делать с попутным продуктом – CO<sub>2</sub>?*

**С. Чикалов:** В России, стране с колоссальным энергетическим потенциалом, основным сырьем для получения водорода станет природный газ. Для выработки водорода из природного газа используются процессы парового риформинга метана или пиролиза природного газа. Пиролиз для получения «бирюзового» водорода – наиболее экологичный процесс, в ходе которого вырабатывается водород и чистый не активный углерод. Это сравнительно новый, пока не получивший широкого распространения метод. Более известная технология – паровой риформинг, который в химическом производстве используется для получения синтез-газа.

При классическом паровом риформинге попутным продуктом является углекислый газ – основной виновник глобального потепления. Эту составляющую необхо-

димо отделять от водорода, собирать и транспортировать к месту хранения. В промышленных масштабах углекислый газ можно транспортировать по трубопроводам. В данном случае, с нашей точки зрения, не требуется создание новых материалов, поскольку CO<sub>2</sub>, полученный в процессе риформинга, не будет содержать воду и вызывать коррозию.

Диоксид углерода может храниться в подземных хранилищах, скважинах для поддержания пластового давления газа или нефти. Его также можно преобразовывать в биотопливо или смазочные материалы. Возможно, в ближайшей перспективе будут разработаны полимерные материалы, прочно связывающие углекислый газ, которые будут востребованы в народном хозяйстве. Что касается скважин поддержания давления, то для закачки CO<sub>2</sub> в пласт из-за наличия воды в нефтеносных пластах потребуются обсадные и насосно-компрессорные трубы, стойкие к углекислотной коррозии. У ТМК уже есть подобные технические решения, которые были опробованы на действующих месторождениях углеводородов в России.

**НГВ:** *Как доставлять потребителям сам водород? Насколько это комплексная проблема?*

**С. Чикалов:** Транспортировка водорода реализуется уже на протяжении десятилетий – существующие технологии хорошо отработаны и соответствуют нынешним небольшим объемам рынка. Вместе с тем масштабный рост потребления потребует новых решений, работающих с большими объемами водорода, транспортируемого на большие расстояния.

### **В промышленных масштабах углекислый газ можно транспортировать по трубопроводам**

Сейчас в мире рассматриваются различные варианты транспортировки водорода, начиная с подмешивания и заканчивая превращением в более удобные формы для доставки потребителям. У каждого из этих решений есть как плюсы, так и минусы.

Сжижение водорода потребует колоссальных затрат энергии на производство водорода, создание соответствующей транспортной инфраструктуры и терминалов для приемки топлива. Кроме того, потери при таком способе транспортировки достигают 30% от загруженного объема.

За рубежом изучают еще одну технологию – связывание водорода азотом и преобразование в аммиак. С одной стороны, это очень интересное и простое техническое решение, позволяющее достаточно компактно упа-

ковать большие объемы водорода и с низкими энергетическими затратами транспортировать его потребителям. Но процесс производства аммиака изначально убыточен. На выработку одного килограмма газа потребуется затратить энергии в пять раз больше, чем выделится при его сжигании! А при сгорании аммиак выделяет оксид азота, который является парниковым газом. Парниковая активность закиси азота почти в 300 раз выше, чем у углекислого газа. Кроме того, оксиды азота могут влиять на озоновый слой в целом.

Еще одно решение – транспортировка больших объемов водорода по трубопроводам. Для этого водород смешивается с природным газом в определенной пропорции. Хотя этот способ имеет свои минусы – так, потребителю потребуется устанавливать дорогостоящее оборудование для разделения смеси на составляющие – сегодня он представляется оптимальным с точки зрения технологий и экономики.

**НГВ:** *Это безопасно?*

**С. Чикалов:** Городские газопроводы с содержанием водорода до 55% начали эксплуатироваться в 1830 году и проблем не приносили, а воздействие давлений до 10 МПа при обычной температуре не приводило к заметным повреждениям. В конце прошлого века в эксплуатации было немало промышленных трубопроводов для водорода различного давления протяженностью в несколько сотен километров.

Сегодня основным кандидатом на роль инфраструктуры поставок водорода являются действующие нефте- и газопроводы. За рубежом рассматриваются планы развития специализированной инфраструктуры по транспортировке водорода, в рамках которых предлагается к 2040 году создать сеть транспортировки и дистрибуции водородного топлива протяженностью около 40 тыс. км в нескольких странах. Авторы этой концепции предлагают переоборудовать под транспортировку водорода существующую газовую инфраструктуру, которая будет составлять около 69% водородной сети. Остальные 31% – это новые водородопроводы, которые еще предстоит построить для подключения новых потребителей в странах с неразветвленными газовыми сетями, но с высоким потенциалом предложения и спроса на водород в будущем.

В прошлом году в России была принята Концепция развития водородной энергетики, согласно которой наша страна должна обеспечить значительные объемы производства и экспорта нового вида топлива. Поставленная задача требует развития транспортной инфраструктуры. Наиболее перспективным с этой точки зрения видится использование трубопроводов транспорта, хотя на этом направлении также существуют определенные сложности.

**НГВ:** Сложности какого характера?

**С. Чикалов:** Материаловедческого. Речь идет, прежде всего, о влиянии водорода на свойства сталей.

Охрупчивание, или повреждение, сталей и сплавов происходит в рамках нескольких процессов. Во-первых, коррозионное растрескивание под напряжением трубопроводов из углеродистой или низколегированной стали в подземных средах. Оно происходит в результате анодной коррозии, а также водородного растрескивания. Обычно это явление внешней коррозии, на которое не влияет перекачиваемый водород. Эта проблема проявляется при наличии остаточных или непосредственно приложенных растягивающих напряжений, восприимчивой окружающей среды и восприимчивых металлов. Растрескиванию под напряжением способствуют такие факторы, как участки повышенной локальной твердости, неотпущенный мартенсит в зонах сварных швов, дефекты покрытия, микробиологическая активность и отсутствие катодной защиты. Чтобы решить эту проблему, необходимо тщательно подобрать сплав для изготовления труб, контролировать его химический состав и производственные процессы.

### Сегодня основным кандидатом на роль инфраструктуры поставок водорода являются действующие нефте- и газопроводы

Вторая возможная проблема – это водородное растрескивание под напряжением. Оно напоминает по своей природе коррозионное растрескивание, но происходит в газообразном водороде – материал может стать хрупким и выйти из строя, если уровень напряжения будет слишком высоким.

Третья проблема – это все негативные воздействия, которые стали и сплавы могут испытывать в газообразном водороде: снижение пластических свойств основного металла и сварных соединений, а также более интенсивный рост усталостных трещин при определенном давлении и температуре. В общем случае, ухудшение механических свойств материалов является наибольшим, когда скорость деформации низкая, а давление и чистота водорода высокие.

Соответственно, для строительства водородопроводов должен использоваться материал, прошедший ряд испытаний на устойчивость к водородному охрупчиванию. Существует несколько методик для проведения таких тестов: одни используют механику разрушения, другие – растяжения, проверку устойчивости образцов с надрезами или дисков.

При этом на настоящий момент в РФ нет нормативной базы для оценки склонности материала к водородному

охрупчиванию и рекомендаций по подбору материалов для водородных трубопроводов. Да и в мировой практике подобных документов не так много, поэтому при выборе материала для каждого трубопровода необходимо оценивать степень склонности к охрупчиванию, проводить стендовые испытания и пробную эксплуатацию со специальным мониторингом технического состояния.

**НГВ:** Как развивать новое направление в энергетике без нормативной базы?

**С. Чикалов:** Сегодня основной нормативный документ по проектированию, строительству испытаниям и утилизации водородных трубопроводов – это международный стандарт ASME B31.12-2019. Это настольная книга для отрасли, она регламентирует применение того или иного материала для водородного трубопровода при различных условиях эксплуатации.

Вся трубная продукция, упомянутая в этом стандарте, может быть произведена в России, на предприятиях ТМК. В стране также существуют возможности по проведению необходимых испытаний и тиражированию испытательной базы для каждой производственной площадки. Таким образом, предпосылки для разработки и принятия национальной нормативной базы для водородных трубопроводов существуют и, более того, необходимость в этом уже назрела.

ТМК предложила в рамках работы технического комитета по стандартизации (ТК) 357 «Стальные и чугунные трубы и баллоны» создать стандарты на сварные и бесшовные трубы для водородных трубопроводов. В настоящий момент разработано техническое задание на два этих стандарта и направлено на согласование в ТК. Планируем, что в этом году будут разработаны соответствующие ГОСТы, пройдет обсуждение в профессиональном сообществе, чтобы в 2023 году в России появились первые стандарты на водородные трубопроводы.

**НГВ:** Какие сложности существуют при выборе решений для хранения водорода?

**С. Чикалов:** У водорода самое высокое значение энергии на единицу массы среди всех других видов топлива. Однако с учетом его низкой плотности при комнатной температуре энергоемкость водорода на единицу объема достаточно невысока. Поэтому в газообразном виде водород, как правило, хранят в накопителях под высоким давлением (350-700 Бар). Жидкий водород хранят при криогенных температурах, поскольку при атмосферном давлении его точка кипения – 252,8°С.

Исследователи в разных странах активно ищут технологии и новые материалы для хранения водорода, включая мобильные решения для использования на транспорте. Как правило, для его накопления создают объемные хранилища, где водород хранится в газообразном состоя-

нии. Это и соляные подземные хранилища, и истощенные газовые и газоконденсатные месторождения.

**НГВ:** *Какие возможности есть у ТМК для разработки продуктов для водородной энергетики?*

**С. Чикалов:** Основные компетенции по созданию продукции для водородной отрасли сосредоточены в нашем Научно-техническом центре (НТЦ) в «Сколково». Центр полностью оснащен для этого. Здесь расположены исследовательские лаборатории для изучения и разработки новых материалов, оборудованные всем необходимым для проектирования, моделирования и изучения сталей и сплавов.

В НТЦ успешно работают единственные в России стенды для натуральных испытаний труб и других металлических конструкций, где можно воссоздать условия даже более жесткие, чем возникают при реальной эксплуатации – температуры до 350 градусов, внутреннее и внешнее давление более 2 тыс. бар, растяжение и сжатие с усилием 3 тыс. тонн и так далее. В НТЦ также работает центр компетенций по цифровым двойникам, где создаются виртуальные модели продуктов и производственного оборудования, проводятся их испытания в цифровой среде прежде, чем запускать новое производство на предприятиях.

В ближайших планах компании начать испытание на стойкость трубной продукции в среде водорода. С этой целью на территории R&D-центра будут смонтированы стенды с возможностью моделирования различных условий эксплуатации водородопроводов и прогнозирования эксплуатационного ресурса труб, с помощью которых можно будет подобрать оптимальный химический состав и необходимые условия термической обработки изделий.

**НГВ:** *Какие перспективы у вас по водороду?*

**С. Чикалов:** На базе нашего НТЦ уже началась разработка трубной продукции нового поколения, способной выдерживать сверхнизкие температуры и большие давления для развития водородной энергетики на основе опыта, накопленного за рубежом.

На текущий момент ТМК готова производить и поставлять классические трубные решения, реализуемые на базе зарубежных стандартов, в частности ASTM, для применения в сфере производства, транспорта и хранения водорода.

Что касается продукции нового поколения, комплексная программа, разработанная в компании, предусматривает ряд исследовательских работ. Ожидаемые сроки вывода на рынок высокотехнологической продукции после всех необходимых испытаний – 2023 год.

**НГВ:** *Для выпуска новой продукции вам придется адаптировать производственные мощности?*

**С. Чикалов:** Компания располагает большим опытом диверсификации продуктовой линейки. Основываясь на этом опыте, компетенциях и мощном научном потенциале мы с уверенностью можем сказать, что располагаем всеми возможностями для выпуска продукции для водородной энергетики. Производство большей части этих продуктов можно наладить на существующих мощностях предприятия, в некоторых случаях потребуются локальная модернизация. Для разработки технологии изготовления новых труб и других решений мы активно используем цифровые двойники, что существенно сокращает сроки подготовки и запуска продуктов в серию.

**В РФ нет нормативной базы для оценки склонности материала к водородному охрупчиванию и рекомендаций по подбору материалов для водородных трубопроводов. Да и в мировой практике подобных документов не так много. Предпосылки для разработки и принятия национальной нормативной базы для водородных трубопроводов существуют**

Технологические вызовы, связанные с развитием водородной энергетики, нам хорошо понятны. У ТМК большой опыт развития новых продуктов для самых разных целей эксплуатации – новых сталей и сплавов, премиальных резьбовых соединений для нефте- и газодобычи, инженерных и цифровых решений для транспортировки углеводородов, уникальных труб для атомной энергетики и других областей применения. Поэтому к водородной тематике мы подходим хорошо подготовленными и уверенно заходим в эту нишу.

Уже в этом году ТМК планирует вывести на рынок новые комплексные линейки трубной продукции Sputnik-H и Sputnik-C для водородной энергетики и работы с углекислым газом. Это линейные, нарезные обсадные и насосно-компрессорные трубы – линейка будет использоваться в технологических трубопроводах установок парового риформинга, при магистральной транспортировке газа и его закачке в хранилища. При их разработке мы учитывали результаты испытаний на водородное растрескивание и лучшие практики по использованию труб ТМК в коррозионно-активных средах, при воздействии углекислотной и сероводородной коррозии, а также на объектах, где уже длительное время применяется водород. Нам удалось создать газогерметичные резьбовые соединения, устойчивые к коррозионноактивным средам водорода и углекислого газа. Сегодня трубы этой линейки проходят завершающую стадию испытаний. 🚀