

# ПРОТИВОКОРРОЗИОННАЯ ЗАЩИТА ОБЪЕКТОВ ВЫСОКОШИРОТНЫХ МОРСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

(на примере Штокмановского газоконденсатного месторождения, фазы II и III)

С.С. Толстов, С.А. Швец, К.Л. Шамшетдинов, ДОО «ЦКБН» ОАО «Газпром»

Морское Штокмановское газоконденсатное месторождение (ШГКМ) разрабатывается на относительно большой глубине по сравнению с прибрежным шельфом. Подводный добычный комплекс (ПДК) месторождения, как объект защиты от коррозии, представляет собой весьма развитую поверхность, контактирующую с коррозионной средой. Коррозии подвержены обсадные колонны промысловых скважин, металлоконструкции и комплекты подводного добычного комплекса.

Мировой опыт разработки и эксплуатации морских месторождений показывает, что противокоррозионная защита успешно справляется с поставленной перед нею задачей сохранения и продления эксплуатационного ресурса стальных промысловых объектов, конструкций и сооружений. Наиболее развитые в отношении освоения морских северных месторождений страны уделяют большое внимание методам и средствам подавления коррозии. Подводный добычный комплекс, в который входят фонтанная арматура, подводные технологические трубопроводы с запорно-регулирующей арматурой, силовые конструкции и щитовые от падающих предметов защитные сооружения, промысловые выкидные трубопроводы (райзеры), шлангокабели, буи для обеспечения плавучести райзеров и шлангокабелей, отъемная часть технологической турели, а также якорные устройства и буевые канаты (если они стальные), представляет собой комплекс сооружений, постоянно эксплуатирующихся в морской воде. Один из вариантов исполнения подводного добычного комплекса показан на рисунке 1. Подводный узел, соединяющий промысловые трубопроводы добычного комплекса с плавучей платформой, показан на рисунке 2. Морская вода вследствие своей солености относится к коррозионным

средам высокой электропроводности (удельное электрическое сопротивление – до 0,5 Ом·м). По этой причине ослабевает омическое торможение скорости коррозии.

Неоднородность температуры воды по глубине (от –1,5 в придонных областях до +9 °С на поверхности моря) приводит к различию в концентрации растворенного кислорода (при более низкой температуре – концентрация выше) – основного катодного деполаризатора катодной (защитной) реакции. При этом, с одной стороны, согласно закону Аррениуса, при понижении температуры скорость коррозии снижается, а с другой, согласно законам растворения газа в жидкости (в воде), – возрастает концентрация деполаризатора (растворенного кислорода), что приводит к дополнительной неопределенности в прогнозировании коррозии.

Вследствие биообрастания сооружения при длительной эксплуатации различие в концентрации кислорода на поверхности металла по глубине может выравниваться, но при этом в процесс повышения коррозионной агрессивности включаются продукты жизнедеятельности биофауны, и скорость коррозии может увеличиться. Обрастание поверхности сооружений хотя и происходит с меньшей интенсивностью, чем в теплых морях, но тоже присутствует и вносит свой вклад

в ускорение скорости коррозии и выхолащиванию защитных мер. Поэтому защите сооружений, в особенности сооружений и трубопроводов, расположенных на дне Баренцева моря, и контролю скорости коррозии уделяется повышенное внимание.

Различные скорости подводных течений по глубине, достигая максимума на поверхности моря (65 см/с) и минимума в придонной области (на глубине 320 м – 30 см/с), приводят к различию потенциалов течения, что вызывает возникновение макрокоррозионных пар на металлическом сооружении, частичной очистке реагирующей поверхности металла от продуктов коррозии, являющихся естественными замедлителями коррозии. Указанные характеристики, хотя количественно и небольшие, при длительной эксплуатации приводят к существенным коррозионным эффектам.

Грунты морского дна, будучи пропитаны морской водой, также относятся к средам высокой коррозионной агрессивности. Однако неподвижность грунта несколько снижает коррозионный эффект за счет увеличения концентрационной поляризации при катодной защите.

В соответствии с принципом независимости коррозии во внутренней и внешней средах, защита от коррозии подводного добычного комплекса

(ПДК) в настоящем проекте рассматривается как защита двух независимых объектов – объекта, подверженного внутренней коррозии от агрессивных компонентов добываемого флюида, и объекта, подверженного внешней коррозии в грунте геологического разреза, придонном грунте и в морской воде.

Добычные объекты ПДК, электрически соединенные металлом последовательно от продуктивного пласта промысла до морской ледостойкой технологической платформы, будут эксплуатироваться под воздействием коррозионных компонентов добываемого флюида. Внутренняя коррозия оболочковых конструкций, запорно-регулирующей аппаратуры и трубопроводов зависит от концентрации агрессивных компонентов (углекислого газа и сероводорода), влажности, давления и температуры флюида. При этом практически нет различий в механизмах коррозии внутренней поверхности материковых промысловых трубопроводов и технологических аппаратов ШКГМ.

Методы элиминирования опасности внутренней коррозии ШКГМ практически идентичны материковым: это установление прибавки к толщине стенок оболочковых конструкций на коррозионный износ, ингибирование флюида уже на подступах агрессивных компонентов из продуктивного пласта к насосно-компрессорным трубам в промысловых скважинах, организация тщательного многофакторного мониторинга и принятие других превентивных мер, например применение в конструкциях коррозионно-стойких сталей, покрытий из коррозионно-стойких материалов и цветных металлов (преимущественно титана).

Применение прибавки на коррозию предусматривает увеличение толщины стенок оборудования для сохранения срока службы без потери прочности. Если расчетная прибавка на коррозию превышает 6 мм, изыскиваются другие дополнительные технические решения.

Расчет зависимости скорости коррозии в среде от температуры и концентраций углекислоты и сероводорода выполняется по эмпирически полученной де Ваардом и Мильямсом модифицированной регрессионной модели:

$$\lg(V_{\text{cor}}) = A + B/T - C \lg(\text{PCO}_2) - D \lg(\text{PH}_2\text{S})$$

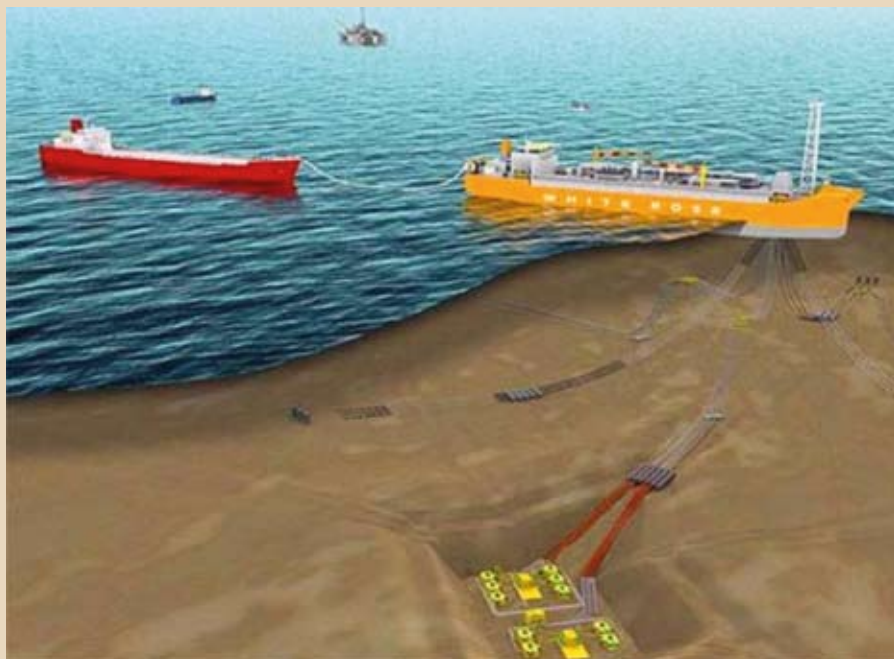


Рис. 1. Вариант исполнения подводного добычного комплекса

где  $V_{\text{cor}}$  – скорость коррозии, мм/год;

$T$  – температура, К;

$\text{PCO}_2$  и  $\text{PH}_2\text{S}$  – парциальное давление соответственно  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$  в коррозионной системе, МПа;

$A, B, C$  и  $D$  – эмпирические коэффициенты.

Расчеты скорости коррозии трубной стали под действием агрессивных компонентов ШКГМ показывают, что вследствие падения температуры и давления по длине трубопроводов скорость монотонно падает по мере увеличения расстояния от устья скважины, как показано на рисунке 3. Скорость коррозии позволяет принять единственное из нескольких вариан-

тов решение создать совокупный вариант. Это может быть увеличение толщины стенки трубы (в разумных пределах), применение коррозионно-стойких сплавов и композитных материалов для изготовления сосудов, аппаратов и трубопроводов, применение ингибиторной защиты.

### ЗАЩИТА ИЗОЛЯЦИОННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

В основном должна осуществляться преимущественно на предприятиях – изготовителях аппаратов и отдельных составных частей ПДК, поставляемых на промысел в готовом для монтажа виде. При нарушении покрытий в процессе доставки на место

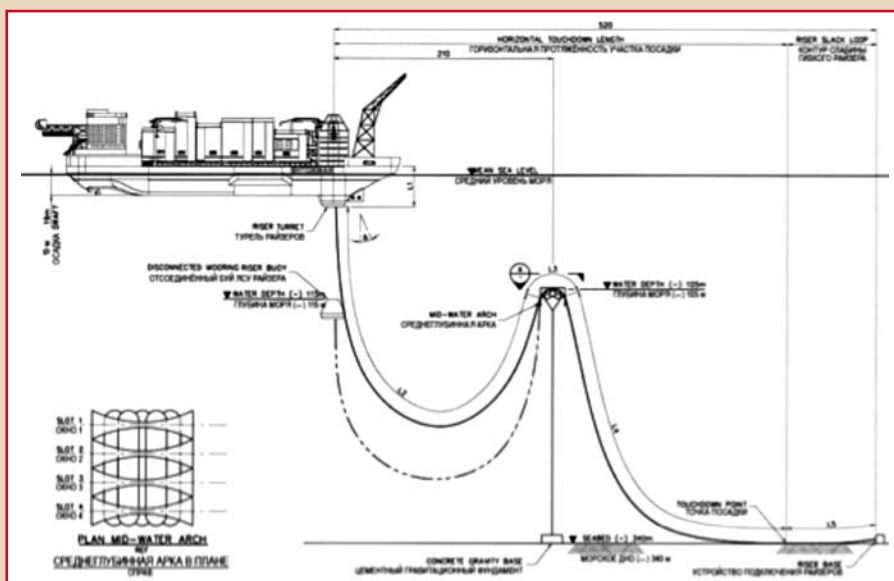
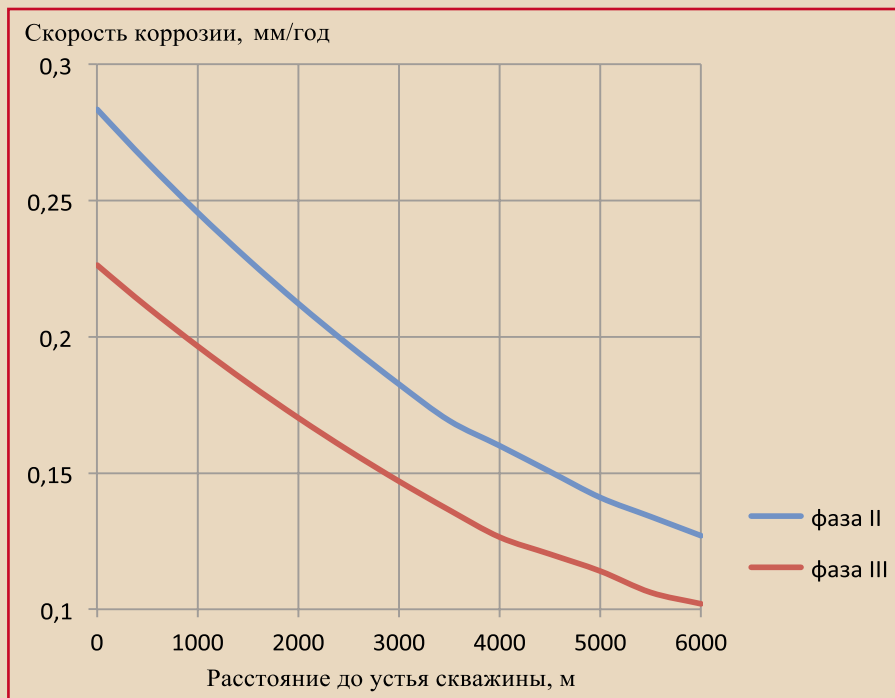


Рис. 2. Подводный узел, соединяющий промысловые трубопроводы добычного комплекса с плавучей платформой



**Рис. 3. Прогнозируемая скорость внутренней коррозии промышленного трубопровода в зависимости от расстояния до устья скважины ШГКМ**

монтажа должен быть проведен ремонт участков с нарушенной изоляцией. Качество отремонтированного изоляционного покрытия по показателям электрического сопротивления, адгезии, механической прочности и стойкости к удару должно быть не хуже основного заводского покрытия. Должна быть обеспечена термодинамическая совместимость ремонтных материалов с основным покрытием.

### ЗАЩИТА АППАРАТОВ И ОТДЕЛЬНЫХ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ПДК ЛАКОКРАСОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Должна применяться в случае невозможности нанесения покрытия в заводских условиях, в случаях предъявления к покрытиям особых требований, например создания лакокрасочным покрытием протекторного эффекта или для подводного ремонта покрытий.

### ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА

Принципиально может применяться как катодная защита от отдельного источника тока (электроэнергии) и как гальваническая (протекторная) защита.

Применение катодной защиты для объектов ПДК встречает ряд трудностей, основными из которых являются значительная удаленность защищаемых объектов от морской ле-

достойкой технологической платформы (на ней имеются источники электроэнергии), а также прекращение действия катодной защиты в период отключения технологического буя якорной системы удержания от турели, требующее усложнение оснастки объектов защиты электрическими коммуникациями и пр.

Принципы защиты от коррозии обсадных колонн морских промысловых скважин одинаковы с материковыми. Однако, например, информация об эффективности защиты по глубине даже материковой скважины представляет собой чисто результаты расчета, а недозащищенность проявляется и оценивается исключительно через разгерметизацию колонн в местах обсадных труб. Тем более для скважин морских промыслов вследствие высокой электропроводности морской воды защищенность по глубине будет весьма неопределенна. Ток защиты от анодов, расположенных на дне либо в воде, будет преимущественно утекать на подводные сооружения, электрически подключенные к обсадным колоннам (промысловые трубопроводы, манифольды, морская технологическая платформа и пр.). Из-за несоизмеримости сопротивления растеканию тока в грунте и в воде обсадным колоннам будет, скорее всего, недоставать тока для защиты по всей глубине скважины, как показано на рисунке 4.

Наиболее приемлемым способом электрохимической защиты объектов ПДК является гальваническая (протекторная) защита. Протекторы различной конфигурации устанавливаются на конкретных объектах ПДК и трубопроводах. Масса и количество протекторов определяются электрохимическими параметрами, равномерностью и пятидесятилетней длительностью защиты.

### ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ СООРУЖЕНИЯ

ПДК, в том числе основания для бурения и гравитационные платформы, представляют собой железобетонные плиты, в качестве каркаса в которых применяется стальной прокат – крупноразмерные швеллеры и двутавры. Каркас одновременно несет армирующие функции. Установленные на дне моря железобетонные конструкции эксплуатируются в среде практически неизменной температуры и в стабильном механическом напряжении. Многолетние донные отложения по своему составу также стабильны, и только возможное техногенное загрязнение донных отложений может усилить влияние на коррозионную опасность. В нормальных условиях эксплуатации щелочная водная вытяжка из бетона способствует образованию на поверхности металла защитной окисной пленки, тем самым предотвращая коррозию стальной арматуры на длительное время. Практика эксплуатации показывает, что коррозия железобетонных морских (и речных) сооружений активизируется при наличии трещин в бетоне, открывающих доступ воды к арматуре. Морская вода относительно бетона является кислой. Поступая к металлу через трещины, вода нейтрализует щелочность примыкающего к металлу арматуры бетона и бетона в своей массе, и скорость коррозии арматуры возрастает. Щадящая технология строительства гравитационных платформ, не приводящая к сколам и трещинам железобетонной конструкции, позволяет обойтись без дополнительной электрохимической защиты. Кроме того, электрохимическая защита других стальных сооружений ПДК, соединенных электрически с арматурой железобетона, в некоторой степени будет создавать катодное смещение потенциала и на арматуре.

## СРЕДНЕГЛУБИННАЯ АРКА

Представляет собой несколько стальных цистерн, скрепленных между собой в единую конструкцию стальным куполом и межсекционными стенками, защищается от коррозии при помощи защитного покрытия (либо полимерного, либо лакокрасочного) и гальванической защитой. При этом гальванические аноды (протекторы) должны быть установлены как в полостях арки, так и снаружи ее – и в местах, недоступных повреждению. В настоящее время сталь можно с успехом заменить на композитные материалы и изготовить цистерну плавучести из него целиком. Этим обеспечивалась бы безаварийность арки. Конечно, для подтверждения правильности такого конструктивного решения необходимо поставить и провести масштабные научные исследования, в том числе экспериментальные.

## ШЛАНГОКАБЕЛИ

Содержащие внешнюю стальную броню, также нуждаются в защите от коррозии. Наибольшую сложность защиты шлангокабелей представляет создание электрического контакта между броней и гальваническим анодом. Решение этой задачи должно осуществляться путем присоединения анодов к стыкам отдельных длин шлангокабеля и требует конструктивной проработки.

## ПРОМЫСЛОВЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ ПОДВОДНОГО ДОБЫЧНОГО КОМПЛЕКСА

Защищаются также гальваническими анодами. Расположение их по длине – примерно через каждые 200–250 м.

Наиболее достоверно при расчете электрохимической защиты можно подсчитать количество электричества, необходимое для защиты объектов. Однако расчет распределения защитных потенциалов, которые являются основным показателем защищенности от коррозии, в связи с тем что подводные сооружения ПДК образуют сложную многоэлектродную систему как в целом, так и по объектно, не приводит к требуемой достоверности результатов. Поэтому указанное распределение необходимо получить путем компьютерного моделирования с количеством вариантов, определяемым как взаиморасположением отдельных объектов, так и старением

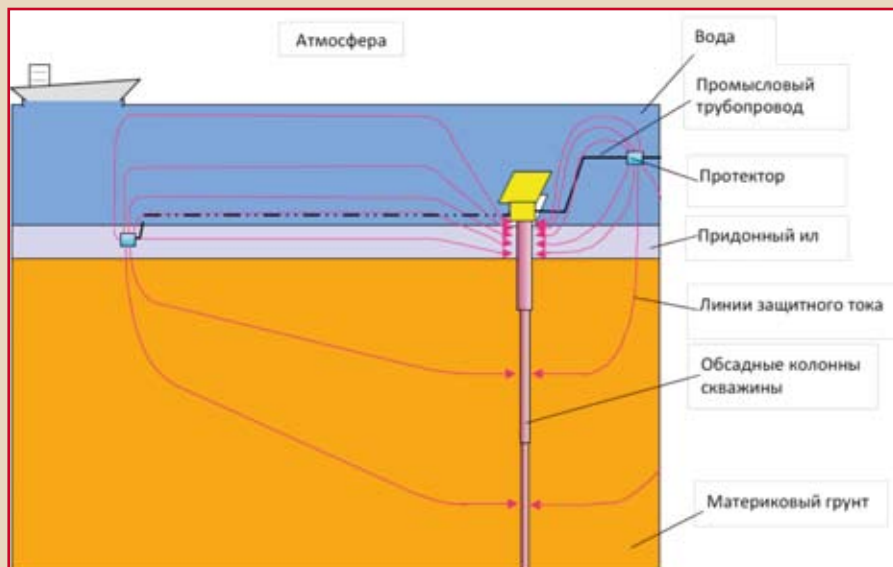


Рис. 4. Распределение защитного тока по длине скважины в морских условиях

изоляции и физическим ее повреждением в различных областях ПДК, а также увеличением сопротивления токоотдающих анодов вследствие их износа. Особого подхода к моделированию требуют защитные потенциалы стальных цистерн плавучести, манифольды и другие подводные конструкции, содержащие сложные металлические связи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Защита от коррозии высокоширотных морских газопромысловых объектов представляет собой сложную, но решаемую задачу для периода эксплуатации 50 лет. Имеющиеся в настоящее время классические методы защиты и средства соответствуют областям применения – для защиты внутренних и внешних стальных поверхностей.
2. Коррозионными агрессивными компонентами флюидов высокоширотных месторождений являются в основном традиционные углекислота и сероводород. Поэтому внутренняя поверхность конструкций, содержащих сырой флюид, требует увеличения толщины стальных стенок трубопроводов, гидравлической арматуры и сосудов, а также применения ингибиторов. Потребуется также применение коррозионно-стойких сталей, титана или композитных материалов. Композитные материалы должны быть стойкими как к коррозионно-агрессивным компонентам флюида, так и к газовому конденсату.
3. Защита от морской коррозии (защита внешних поверхностей) объектов подводного добычного комплек-

са реализуется, как обычно: изоляционными покрытиями и электрохимической гальванической защитой протекторами.

Наибольшую сложность представляет защита обсадных колонн подводных скважин. В настоящее время отсутствует эффективный способ подачи защитного тока на всю глубину скважины.

4. Некоторые отдельно эксплуатирующиеся конструкции ПДК, изготовленные из стали, предлагается заменить на конструкции из композиционных материалов, например, глубинную арку средней плавучести. В этом направлении наступило время проводить необходимые исследовательские работы.

5. Согласно предварительному проекту обустройства Штокмановского газоконденсатного месторождения, выбор типов изделий и марок материалов покрытия для конкретных объектов осуществлен на основе данных зарубежного рынка. При разработке предварительного проекта, к сожалению, не учтен потенциал производителей изоляционных и лакокрасочных материалов России.

Лакокрасочные покрытия для применения в морских высокоширотных условиях требуют усовершенствования технологии их нанесения при влажности, превышающей 85%.

Рекомендуется изучить возможность создания лакокрасочных и газотермически напыляемых металлических защитных покрытий на основе российских материалов.

Рисунки 1 и 2 – из презентаций фирмы «Штокман Деволупмент».