УДК 622.23.05

ВЫЯВЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЫЗЫВАЮЩИХ ДЕГРАДАЦИЮ ЭЛЕМЕНТОВ СКВАЖИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ, МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ

IDENTIFICATION OF FACTORS CAUSING DEGRADATION OF WELL EQUIPMENT ELEMENTS BY METHODS OF MATHEMATICAL MODELING OF PROCESSES

Гнибидин Виктор Николаевич
кандидат технических наук,
судебный эксперт,
индивидуальный предприниматель
GnibidinVN@vivaldi.net

Подъячев Алексей Александрович
кандидат технических наук,
доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин,
Самарский государственный технический университет
smtu@bizfix.ru

Аннотация. В статье представлен пример использования метода конечных элементов для определения возможных причин возникновения инцидента, связанного с потерей герметичности эксплуатационной колонны добывающей скважины. Достоверность результатов моделирования проверена лабораторным путём. В результате проведённых исследований в качестве причины массового выхода из строя соединительных муфт обсадной колонны названо сероводородное коррозионное разрушение под напряжением. Описанную методологию предлагается использовать при осуществлении инженерно-технической экспертизы, а также для разработки мероприятий по предупреждению осложнений на скважинах.

Ключевые слова: обсадная колонна скважины, соединительная муфта, разрушение, причины инцидента, математическое моделирование, метод конечных элементов, техническая экспертиза.

Gnibidin Viktor Nikolaevich
Candidate of Technical Sciences,
Forensic Expert,
Individual Entrepreneur
GnibidinVN@vivaldi.net

Podyachev Alexey Alexandrovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department
of Drilling of Oil and Gas Wells,
Samara State Technical University
smtu@bizfix.ru

Annotation. The article presents an example of using the finite element method to determine possible causes of an incident related to the loss of tightness of the production well casing. The reliability of the modeling results was verified in the laboratory. As a result of the studies, hydrogen sulfide stress corrosion was named as the cause of mass failure of casing couplings. The described methodology is proposed to be used in the implementation of engineering and technical expertise, as well as for the development of measures to prevent complications in wells.

Keywords: well casing, coupling, destruction, causes of incident, mathematical modeling, finite element method, technical expertise

Скважины, предназначенные для добычи нефти и газа, являются весьма дорогостоящими долговременными сооружениями. Преждевременный выход их из строя влечёт за собой необходимость как остановки процесса добычи, так и необходимость дополнительных затрат на ремонтно-восстановительные работы, если они вообще бывают возможными.

Причин выхода из строя скважин может быть множество. Одна из наиболее распространённых – потеря герметичности эксплуатационной колонны, то есть, канала связи, прямо или косвенно обеспечивающего поступление на поверхность флюида, содержащегося в эксплуатируемой залежи. Нарушение герметичности эксплуатационной колонны грозит не только значительными экономическими потерями, но и может служить причиной чрезвычайно серьёзного экологического воздействия как на поверхностные, так и на подземные элементы природного окружения (растительность, источники водоснабжения и т.д.). Именно этим обусловлена чрезвычайная важность понимания процессов, вызывающих преждевременное разрушение элементов конструкции скважин, и, в частности, эксплуатационных колонн.

Эксплуатационные колонны формируются путём последовательной сборки и спуска в скважину так называемых «обсадных труб». Длина отдельной обсадной трубы составляет 9,5–13,0 м. За исключением достаточно редких случаев применения электросварных методов, сборка обсадных труб в единую колонну осуществляется с помощью резьбовых муфтовых соединений.

В качестве примера возможного использования математического моделирования с целью идентификации причин возникновения дефектов в элементах обсадных колонн рассмотрена процедура экспертного исследования инцидента, имевшего место на одном из старейших месторождений Волго-Уральской нефтегазоносной провинции – Мухановском.

В ходе профилактических работ на одной из добывающих скважин данного месторождения была обнаружена невозможность прохождения скрепера по эксплуатационной колонне ниже 100 м от устья скважины. С целью ликвидации непроходимости был произведён комплекс ремонтных работ, в результате которых верхняя часть эксплуатационной колонны, расположенная выше цементного кольца, отдельными фрагментами была извлечена из скважины. В ходе осмотра поднятых на поверхность обсадных труб выяснилось, что практически все муфты имеют дефекты в виде продольных трещин (рис. 1).

Рисунок 1 – Внешний вид соединительной муфты при извлечении обсадной колонны из скважины

Комплексной комиссией, производившей расследование инцидента, в качестве причины его возникновения был назван заводской брак, допущенный при изготовлении муфтовых соединений. Более глубокое изучение обстоятельств инцидента позволило выявить ряд факторов, дающих основания для сомнений в справедливости данного заключения.

1. Колонна обсадных труб была успешно спущена в скважину и эксплуатировалась в штатном режиме в течение полутора лет. При этом максимальные значения растягивающих напряжений, которые воздействовали на муфтовые соединения, имели место именно в процессе первоначального спуска ее в скважину. Отсутствие проблем, связанных с разрушением муфтовых соединений на этой стадии делают маловероятным наличие заводского брака.

2. В ходе анализа фотографий поднятых из скважин труб были обнаружены случаи «перетяжки» (превышение расчётного значения затяжки) резьбовых соединений. Свидетельством этому явились несовпадения меловых меток положения торцов соединительных муфт до их отворота и «сбега резьбы» (рис. 2). Учитывая симметричность муфтового соединения, необходимо учитывать возможность докрепления также и заводского соединения, что могло бы вызвать потенциальную опасть двусторонней радиальной деформации муфты.

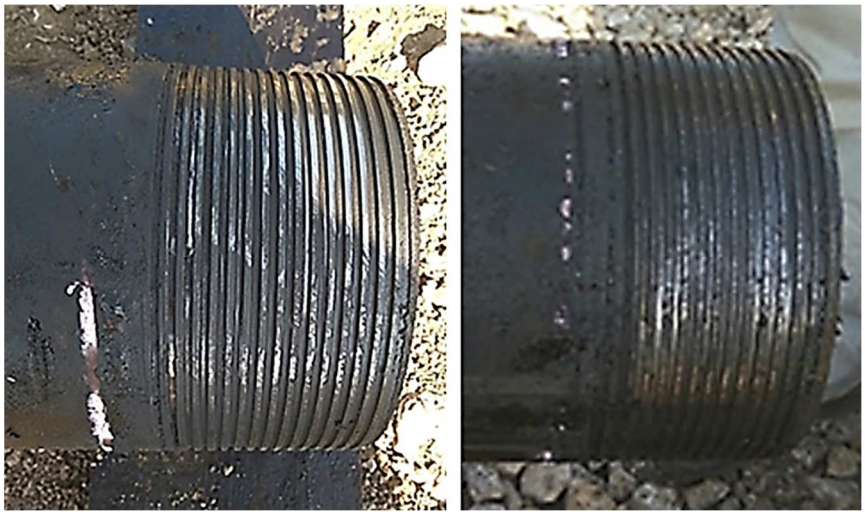

Рисунок 2 – Фотографии резьбы обсадных труб после разборки муфтовых соединений

3. Внешний вид излома муфты имеет признаки, характерные для хрупкого разрушения под воздействием СКРН (сероводородного растрескивания под напряжением). Данное обстоятельство требует дополнительной проверки.

В соответствии с высказанными соображениями, метод математического моделирования был применён для оценки достоверности следующих гипотез:

А. Оценка возможности создания в результате «перетяжки» резьбовых соединений напряжений, достаточных для разрушение муфтовых соединений под воздействием возникающей при этом радиальной деформации;

В. Оценка возможности создания условий, необходимых для разрушения муфтовых соединений по механизму СКРН.

Условия реализации механизма разрушения муфтового соединения, соответствующие гипотезе «А», могли иметь место при проведении аварийных работ, связанных с извлечением эксплуатационной колонны из скважины. При формировании исходных данных для создания модели были приняты во внимание следующие обстоятельства.

Первый «срыв» при попытке подъема эксплуатационной колонны произошёл при нагрузке на крюке буровой установки, равной 5,4 тс, при этом вес поднятого на поверхность участка эксплуатационной колонны составил 3,9 тс. Таким образом, растягивающая нагрузка на самое нижнее резьбовое соединение, подвергшееся разрушению, составляла 1,5 тс. Поскольку данные о фактической величине момента свинчивания резьбового соединения отсутствовали, в качестве нормативного значения данного показателя выбрана величина, равная 11800 Н·м [1]. В процессе моделирования условий, которые могли бы привести к деформации и потере сплошности муфтового соединения, максимальная величина момента свинчивания была увеличена вдвое по сравнению с номинальным значением. Данное допущение сделано исходя из того, что более высокие значения момента свинчивания в принципе невозможны, поскольку они ограничены техническими характеристиками устройства для свинчивания труб. Кроме того, моделирование поведения муфты в условиях заведомо завышенного значения момента свинчивания дает гарантии того, что в случае положительного результата, любое другое значение момента тем более не может сказаться на целостности муфтового соединения.

Фактические данные о составе флюида, заполняющего затрубное пространство скважины, также не были предоставлены. Поэтому с целью проверки гипотезы о возможном разрушении муфтового соединения под воздействием дополнительных напряжений, возникших в результате неправильного свинчивания, состав среды считался нейтральным, то есть не содержащим сероводорода.

Условия реализации механизма разрушения муфтового соединения, соответствующие гипотезе «В», могли возникнуть в период эксплуатации скважины в рабочем режиме, то есть после ее освоения и вызова притока из продуктивного пласта вплоть до потери эксплуатационной колонной герметичности. Поскольку данные о величине натяжения колонны в этот период также предоставлены не были, с целью изучения принципиальной возможности разрушения муфтовых соединений под действием СКРН в качестве предельно допустимого значения принята растягивающая нагрузка, величина которой, в соответствии с ГОСТ 632-80, составляет 2157 кН.

При разработке математической модели, описывающей процесс воздействия нагрузок на прочностные свойства муфтового соединения, были приняты во внимание следующие соображения.

Свойства упругости и пластичности материала муфт были определены в результате соответствующих лабораторных исследований образцов, изготовленных из тела аварийных муфт. При этом, в соответствии с общепринятыми представлениями, материал, из которого были изготовлены соединительные муфты (сталь), считался изотропным.

Вследствие существенно нелинейного характера уравнений теории упругости при конечных деформациях количественные решения почти всех задач, имеющих практическое значение, получаются в численном виде. Метод конечных элементов, благодаря его простоте и общности, является наиболее удобным способом формулировки нелинейных задач теории упругости для их численного решения.

Общие уравнения движения и равновесия для типичных конечных элементов упругих тел были получены следующим образом.

Общее уравнение движения типичного конечного элемента сплошной среды имеет вид [2]:

$$m_{NM}\ddot{u}_i^M + \int_{v_{0(e)}} t^{kj}\psi_{N,j}\left(\delta_{ki} + \psi_{M,k}u_i^M\right)dv_0 = p_{Ni}.$$

В отличие от него, уравнение движения упругого конечного элемента таково:

$$m_{NM}\ddot{u}_i^M + \int_{e_{0(e)}} \sqrt{\bar{G}\bar{\bar{\Sigma}}^{kj}}(u_s^R)\psi_{N,j}\left(\delta_{ki} + \psi_{M,k}u_i^M\right)dv_0 = p_{Ni},$$

где

$$\Sigma^{ki}\left[G_{mn}^{(e)}(u_s^R)\right] = \bar{\bar{\Sigma}}^{kj}(u_s^R).$$

В этих уравнениях *N, M, R* = 1, 2,…, N_e где N_e – общее число узловых точек элемента *e, a, i, j, k, m, n, s* = 1, 2, 3. При статическом (или квазистатическом) поведении упругих тел можно опустить инерционные члены $m_{NM}u_i^M$ что в итоге дает нам возможность представить уравнения равновесия типичного конечного элемента в виде:

$$\int_{v_{0(e)}} \frac{\partial W}{\partial y_{kj}} \psi_{N,j}\left(\delta_{ki} + \psi_{M,k}u_i^M\right)dv_0 = p_{Ni}.$$

Подставляя в вышеприведённое соотношение соответствующие выражения для W, можно найти специальный вид, который принимает это соотношение для различных типов гиперупругих конечных элементов.

Результаты математического моделирования для обеих гипотез представлены на рисунке 3. Сравнение полученных результатов однозначно свидетельствуют о том, что имевшее место нарушение правил сборки соединений обсадной колонны при ее спуске в скважину не могло послужить причиной продольного разрушения соединительных муфт.

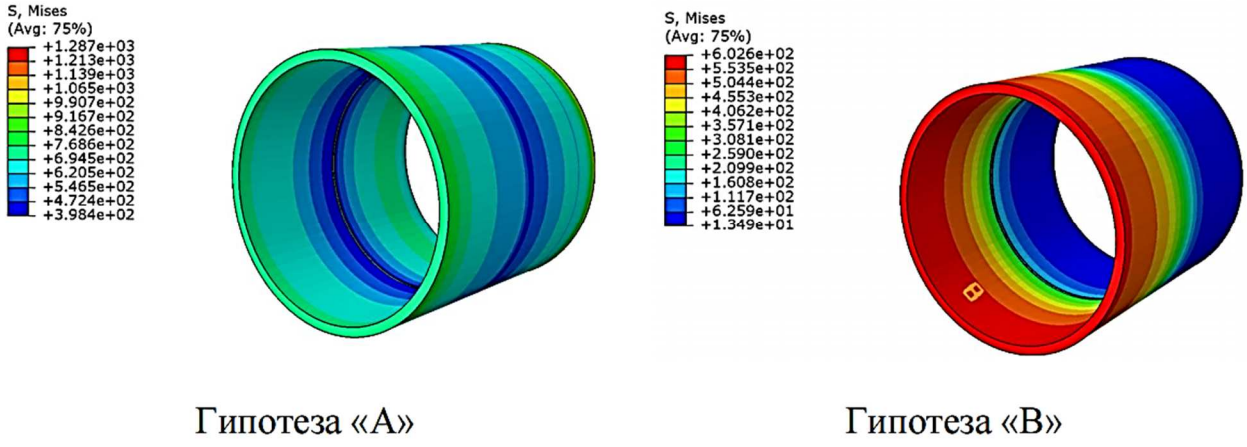

Рисунок 3 – Трёхмерная картина напряжённого состояния муфты обсадной колонны

Что же касается гипотезы «В», то наличие значительных напряжений в теле изделия является необходимым, но не достаточным условием возникновения разрушения. В качестве второго условия выступает присутствие сероводорода в среде, в которую помещено изделие.

В нефтепромысловых средах в зависимости от месторождения в большем или меньшем количестве присутствует сероводород, который взаимодействует с металлом и насыщает его водородом, что вызывает развитие агрессивного разрушения трёх видов: водородное растрескивание, сульфидное коррозионное растрескивание под напряжением и коррозия. Наличие сероводорода в продукции Мухановского месторождения подтверждается многими источниками. Так, описание геологических условий этого месторождения, приведённое в «Большой энциклопедии нефти и газа», содержит следующую информацию: «Скорость коррозии под действием сероводородных вод Мухановского месторождения достигает 34,6 г/м^2 сутки, а под действием пластовых вод Трехозерного месторождения Западной Сибири – 0,2–0,3 г/м^2 сутки». То есть, по сравнению с месторождениями Западной Сибири скорость сероводородной агрессии на Мухановском месторождении выше в 173 раза.

Согласно рекомендациям NACE MR-01-75, безопасной концентрацией сероводорода в сыром газе, считается его парциальное давление 0,00035 МПа. При этом парциальном давлении в водной фазе при нормальной температуре содержится 10,5 мг/л сероводорода. Сырая нефть по отношению к газу характеризуется меньшей агрессивностью в отношении СКРН. Это связывают с тем, что в нефти содержатся соединения, способные ингибировать процесс наводороживания.

Согласно рекомендациям NACE, сырая нефть и нефтегазовые многофазные среды не вызывают СКРН, если максимальное отношение газа к нефти составляет 0,9 м^3/л; газовая фаза содержит менее 15 % H_2S; парциальное давление H_2S в газовой фазе не превышает 0,07 МПа; давление на устье скважины < 1,7 МПа. В этих условиях, благодаря ингибирующему эффекту нефти и низким напряжением в металле, может удовлетворительно эксплуатироваться стандартное оборудование, изготовленное из обычных сталей. Парциальное давление 0,00035 МПа является критическим для

сталей с максимальным пределом текучести около 760 МПа. Стали с более высокой прочностью могут подвергаться растрескиванию при парциальном давлении намного меньшим, чем 0,00035 МПа, а стали, имеющие более низкую прочность, не подвергаются разрушению при концентрации сероводорода намного выше величины, установленной рекомендациями NACE. Инструментально определённое значение предела текучести стали, из которых изготовлены исследуемые образцы муфт обсадной колонны, находится в диапазоне от 973,8 до 1034,6 МПа, то есть на 23–36 % превышает критическое значение. Таким образом, вероятность хрупкого разрушения муфт под действием коррозионного растрескивания весьма высока.

Кстати, последнее обстоятельство служит объяснением того, почему разрушению подверглись только соединительные муфты, а не сами обсадные трубы. В соответствии с паспортными данными комплекта, муфты в нем имеют более высокую группу прочности, чем сами трубы. Как известно, повышение группы прочности стали достигается не изменением ее химического состава, а более интенсивной термообработкой. Термообработка же вызывает образование в теле изделия концентраторов напряжений, которые облегчают процесс развития разрушения изделия под действием СКРН.

С целью подтверждения реальной возможности разрушения муфт под воздействием СКРН в условиях исследуемой скважины произведено моделирование процесса нагружения образца стали, обладающего прочностными свойствами, соответствующими фактическим параметрам материала исследуемых образцов. С учетом принятого коэффициента запаса прочности предельная величина растягивающей нагрузки принята равной 72 % от фактического значения предела текучести. Динамика изменения формы исследуемого образца под воздействием растягивающей нагрузки приведена на рисунке 4.

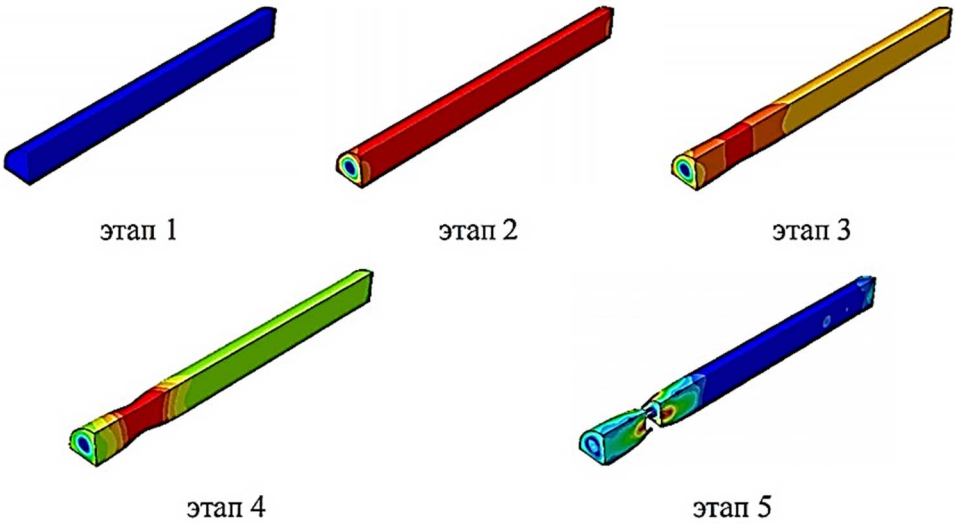

Рисунок 4 – Динамика изменения напряжений и формы образца стали под действием растягивающей нагрузки в среде, способной вызвать СКРН

С целью объективного подтверждения возможности разрушения соединительных муфт под действием СКРН проведены лабораторные испытания, результаты которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний образцов муфт обсадных труб по методике NACE TM 0177

Номер образца	Нагрузка на образец, % от предела текучести	Результат испытаний	Время до разрушения, ч
1	72	разрушен	26
2	72	разрушен	28
3	72	разрушен	32

Таким образом, в результате математического моделирования процесса деформации образца металла в условиях, делающих потенциально возможным возникновение явления коррозионного растрескивания под напряжением, установлена возможность разрушения изделия под действием СКРН (гипотеза «В»). Данный вывод полностью соответствует результатам аппаратурных исследований. Косвенным подтверждением сделанного вывода является также тот факт, что потеря герметичности эксплуатационной колонны произошла после довольно длительного периода эксплуатации (1,5 года). Очевидно, что насыщение сероводородом верхнего интервала затрубного пространства скважины, не

заполненного цементной оболочкой, произошло не мгновенно, а после того, как упомянутый газ, вместе с другими флюидообразными компонентами продуктивных пластов проник в зону последующего разрушения муфт под воздействием заколонных перетоков. Наиболее вероятной причиной такого развития ситуации явилось некачественное цементирование скважины. Предположение же о наличии заводского брака при изготовлении соединительных муфт следует исключить из рассмотрения.

Список литературы:

1. Инструкция по сборке и эксплуатации обсадных труб с резьбовым соединением «ТМК TTL-01»: РЭ ПС 02-014-2012.
2. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред / Дж. Оден; Пер. с англ.; Под общ. ред. В. Авербух. – М. : Мир, 1976. – 465 с.

List of references:

1. Instructions for assembly and operation of casing pipes with threaded connection «TMK TTL-01»: РЭ ПС 02-014-2012.
2. Oden J. Finite elements in nonlinear continuum mechanics / J. Oden; Translation from English; Under general editorship. V. Averbukh. – M. : Mir, 1976. – 465 p.