УДК 622.23.05

ИЗУЧЕНИЕ ПРИЧИН ПРЕЖДЕВРЕМЕННОГО ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ В СКВАЖИНАХ СО СЛОЖНОЙ ТРАЕКТОРИЕЙ

INVESTIGATION OF THE CAUSES OF PREMATURE FAILURE OF DRILL PIPES IN WELLS WITH COMPLEX TRAJECTORIES

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

Аннотация. В статье приводятся результаты исследований причин и механизма потери работоспособности бурильных труб при бурении скважин со сложным профилем и наличием коррозионно-активных компонентов в буровом растворе. Проведёнными исследованиями установлено, что под воздействием коррозионно-агрессивной среды на поверхности бурильных труб возникают пятна питтинговой коррозии. При наличии воздействия на бурильную колонну знакопеременных циклических напряжений эти пятна инициируют возникновение и последующее распространение усталостных трещин, что в конечном итоге приводит к промыву и разрушению бурильных труб. Установлено также, что при возникновении проблем с хождением бурильной колонны в стволе скважины необходимо осуществлять корректировку расчётов возникновения потери продольной устойчивости бурильной колонны путём увеличения расчётного коэффициента трения.

Ключевые слова: бурильные трубы, снижение работоспособности, коррозия, потеря устойчивости, циклические знакопеременные напряжения, усталостные трещины.

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

Annotation. The article presents the results of studies of the causes and mechanism of loss of performance of drill pipes when drilling wells with a complex profile and the presence of corrosive components in the drilling mud. The studies have established that under the influence of a corrosive environment, pitting corrosion spots appear on the surface of drill pipes. In the presence of alternating cyclic stresses on the drill string, these spots initiate the occurrence and subsequent propagation of fatigue cracks, which ultimately leads to washing and destruction of drill pipes. It has also been established that if problems arise with the movement of the drill string in the wellbore, it is necessary to adjust the calculations of the occurrence of loss of longitudinal stability of the drill string by increasing the calculated friction coefficient.

Keywords: drill pipes, reduced performance, corrosion, loss of stability, cyclic alternating stresses, fatigue cracks

Массовый переход на бурение скважин со сложной траекторией и, в частности, с горизонтальным проложением ствола, существенно усложнил условия работы бурильных колонн. Следствием этого является характерное для общемировой практики бурения снижение работоспособности бурильных труб. Потеря работоспособности проявляется, в частности, в возникновении сквозных промывов стенок труб, а также приводит к их слому (рис. 1).

а) сквозной промыв стенки трубы б) слом трубы

Рисунок 1 – Примеры типовых дефектов бурильных труб при бурении скважин со сложным профилем

С целью выяснения причин возникновения подобных дефектов исследованию подвергнуты бурильные трубы, эксплуатировавшиеся на одном из месторождений Восточной Сибири при проводке скважин с горизонтальным окончанием. Характерной особенностью такого рода дефектов является их локализация в пределах определённых интервалов по длине бурильной колонны. Исследования показывают, что причиной этого является, как правило, появление зон концентрации напряжений, действующих на трубы в процессе проводки ствола скважины. При этом локальное повышение значений характерно большей частью для изгибающих напряжений (рис. 2).

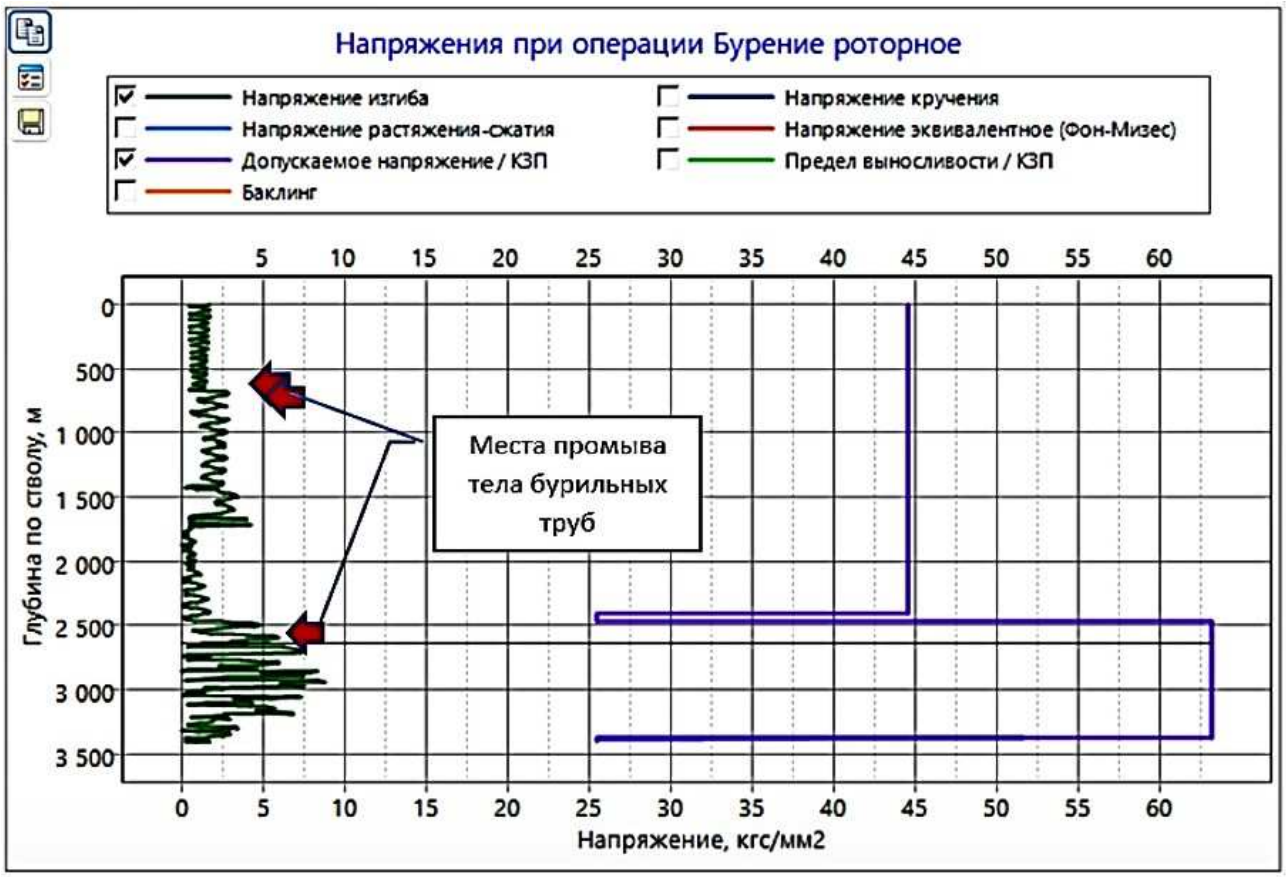


Рисунок 2 – Результаты расчёта изгибающих напряжений с помощью Программного комплекса «Бурсофтпроект»

Приведённая на данном рисунке диаграмма свидетельствует о наличии в теле бурильной колонны изгибающих напряжений, наибольшая величина которых отмечается в интервалах 700–1700 и 2500–3200 м. Места промывок бурильных труб, обнаруженные в ходе спуско-подъёмных и диагностических операций, находятся на начальных участках указанных интервалов концентрации изгибающих напряжений (отмечены стрелками на диаграмме).

Знакопеременные изгибающие напряжения вызывают развитие усталостных дефектов в теле труб. Так, Руководящие указания Американского Нефтяного Института API RP 7G [1] содержат следующий текст: *«Большинство разрушений бурильных труб связано с усталостью. Усталостное разрушение происходит в результате воздействия переменных напряжений, меньших предела текучести материала. Усталостные трещины начинаются с микротрещин, растущих под влиянием переменных напряжений. Скорость роста трещины зависит от величины нагрузки, и в определенных условиях может быть очень высокой. Разрушение не сопровождается значительной пластической деформацией, поэтому его трудно своевременно обнаружить».*

Микроскопические исследования образцов бурильных труб, подвергшихся сквозному промыву стенок, подтверждают наличие в их теле микротрещин (рис. 3).

С точки зрения предупреждения аварийных ситуаций, связанных с воздействие на трубы усталостных дефектов, чрезвычайно важным представляется выяснение причин возникновения и локализации знакопеременных изгибающих напряжений. Исходя из самого характера работы бурильной колонны в стволе скважины следует, что возникновение знакопеременных нагрузок возможно только тогда, когда колонна бурильных труб находится в изогнутом состоянии и при этом вращается [2, 3]. В

свою очередь, изгиб бурильной колонны может быть обусловлен как наличием изгибов траектории ствола скважины, так и специфической конфигурацией колонны, приобретаемой в результате потери ею устойчивости под воздействием осевой нагрузки (рис. 4) [4].

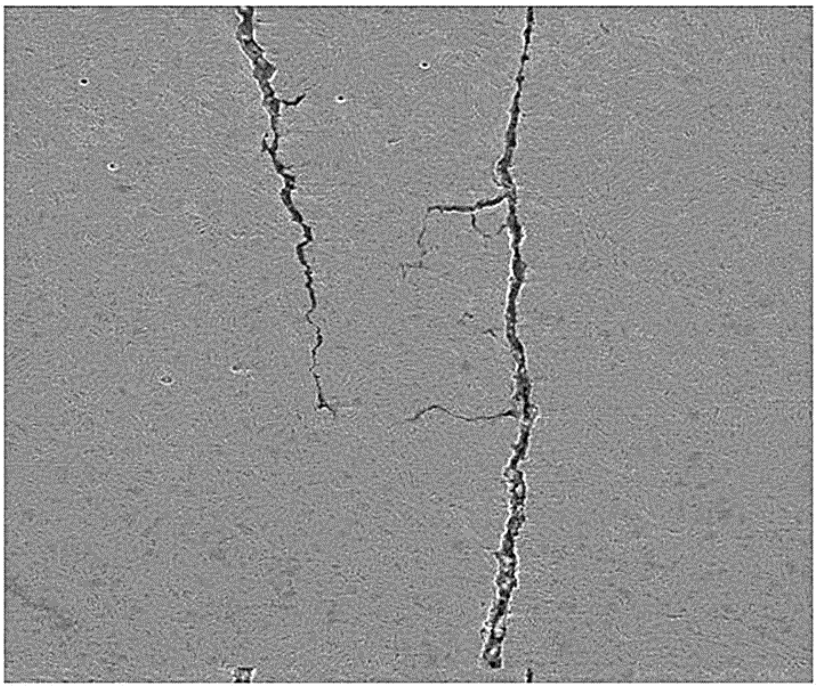


Рисунок 3 – Микрофотография усталостной трещины в теле бурильной трубы

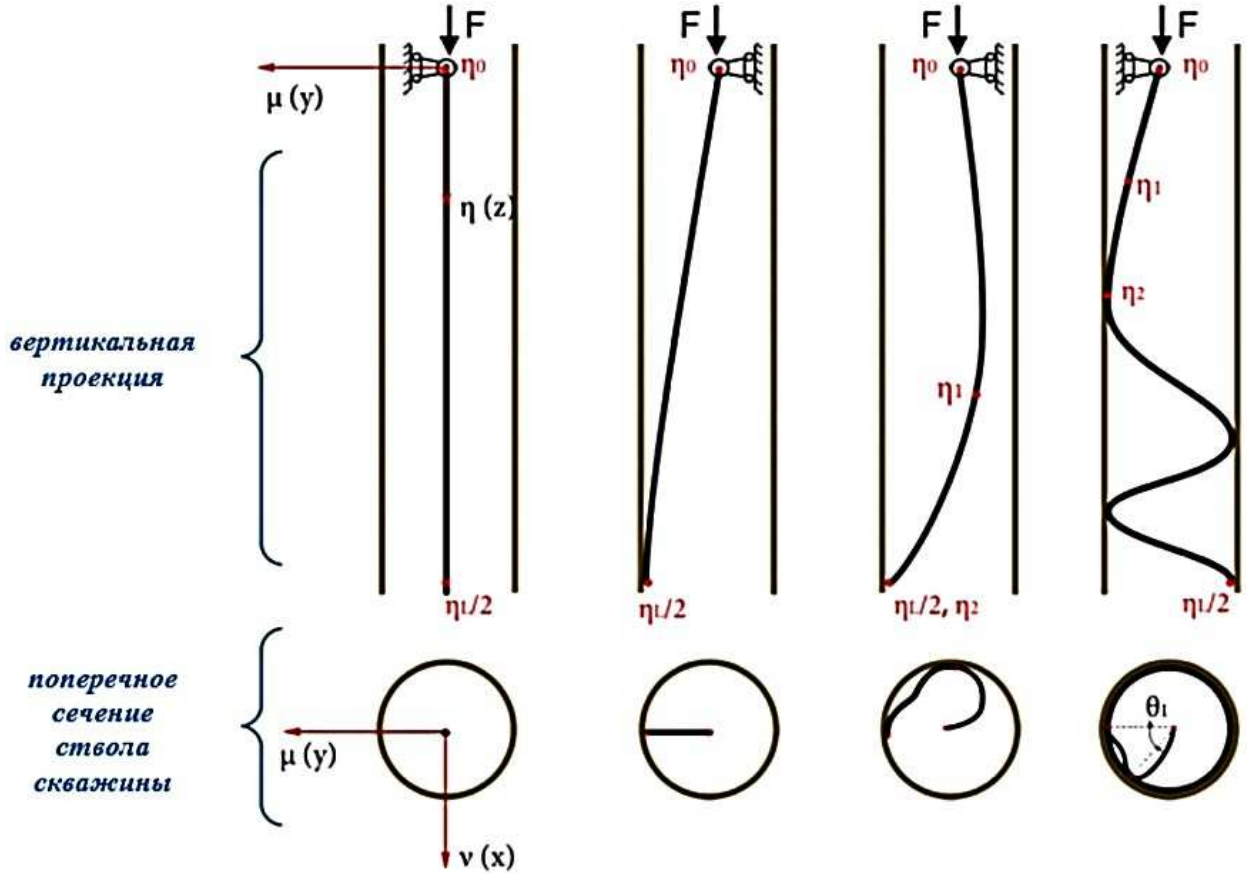


Рисунок 4 – Изменение конфигурации сжатой части бурильных труб в скважине под воздействием увеличения осевой нагрузки

Теоретическими исследованиями [5] было доказано, что продольная устойчивость бурильной колонны может быть охарактеризована критическими сжимающими усилиями, превышение которых создаёт условия для возникновения синусоидального или спирального («баклинга») изгиба, соответственно. В проектной документации на строительство анализируемых скважин в качестве исходных условий приняты следующие значения коэффициентов трения бурильной колонны со стенками скважины:

- в обсаженной части ствола – 0,15;
- в открытом стволе – 0,25.

Оценка возможности потери продольной устойчивости бурильной колонны, использованной при строительстве анализируемых скважин, произведена с помощью Программного комплекса «Бурсофт-проект» (рис. 5).

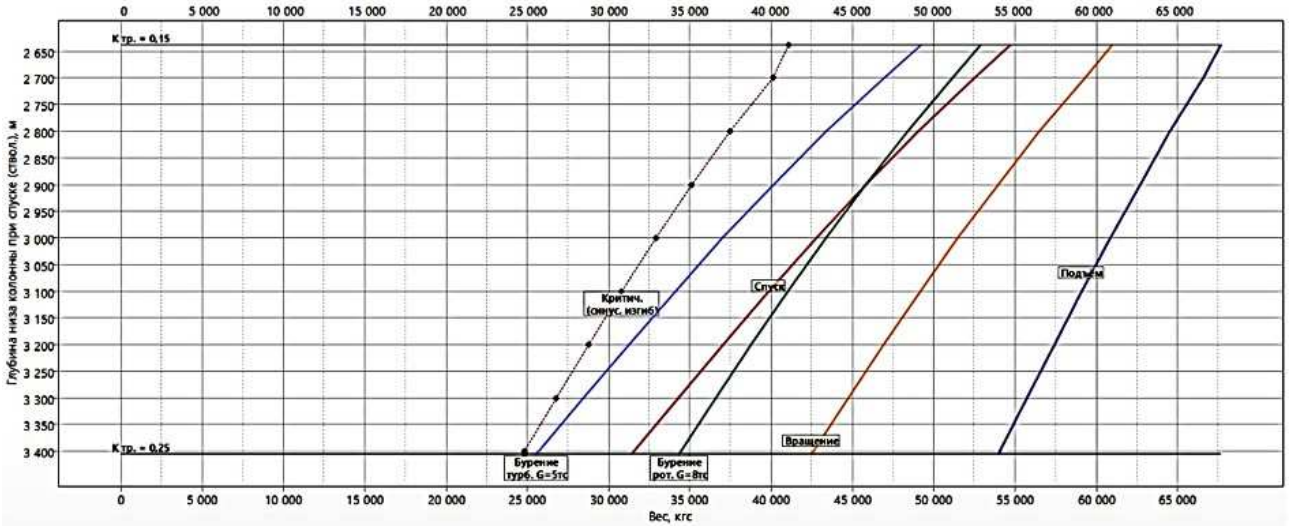


Рисунок 5 – Результаты оценки возможности возникновения синусоидального изгиба бурильной колонны при выполнении различных операций

Результаты произведённых расчётов говорят о том, что при соблюдении исходных условий, заложенных в проектные решения, потери устойчивости бурильной колонны происходить не должно. Весьма показательным в этом смысле представляется отсутствие непосредственной связи между интенсивностью искривления определённого участка ствола скважины и появлением усталостных трещин, которые впоследствии вызывают возникновение сквозных промывок стенок труб (рис. 6).

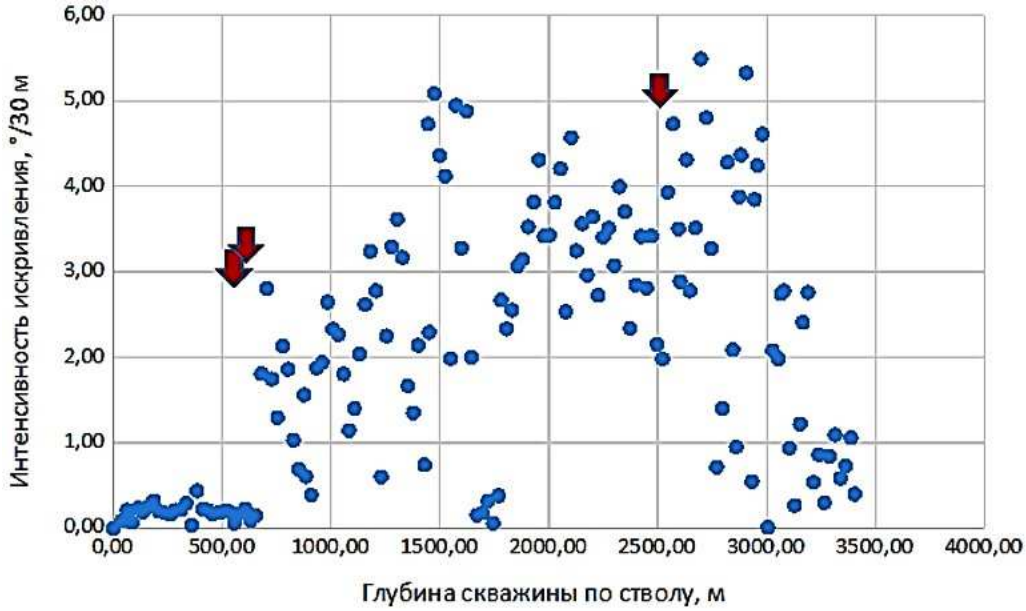


Рисунок 6 – Влияние изменения характера траектории ствола скважины на возникновение усталостных трещин и промыв бурильных труб

Отсутствие упомянутой причинно-следственной связи может быть объяснено тем, что возникновение циклических знакопеременных напряжений в данном случае было обусловлено в большей степени потерей продольной устойчивости колонны бурильных труб и вращением её в стволе скважины в изогнутом состоянии. Данные объективного контроля процесса бурения свидетельствуют, что фактически при проводке ствола скважины имело место сверхнормативное увеличение коэффициента трения бурильной колонны со стенками скважины в открытом стволе (наличие посадок и затяжек бурильного инструмента), а также увеличение программных значений величин нагрузки на долото. Очевидно, что это могло привести к возникновению «баклинга» бурильной колонны. В этом случае влияние искривления траектории ствола скважины на возникновение циклических знакопеременных нагрузок имело бы относительно меньшее значение.

Справедливость данного вывода объективно подтверждается результатами анализа характера коррозионного воздействия окружающей среды на бурильные трубы, применявшиеся при проводке скважин. При визуальном исследовании образцов аварийных труб на их стенках были зарегистрированы поверхностные дефекты в виде тёмных точек. При ближайшем рассмотрении можно заметить, что часть из упомянутых «точек» представляют собой полости в теле трубы, заполненные продуктами коррозии. Именно поэтому такого рода точки имеют чёрный цвет. Эти «чёрные точки» по поверхности образца располагаются неравномерно. Они занимают сектор, равный, примерно, 120° по окружности поперечного сечения трубы. В остальной зоне питтинговые язвы располагаются хаотично, имеют более выраженную оранжевую окраску и не имеют внутренних полостей. Различия в расположении следов питтинговой коррозии двух вышеописанных типов приведены на рисунке 7.

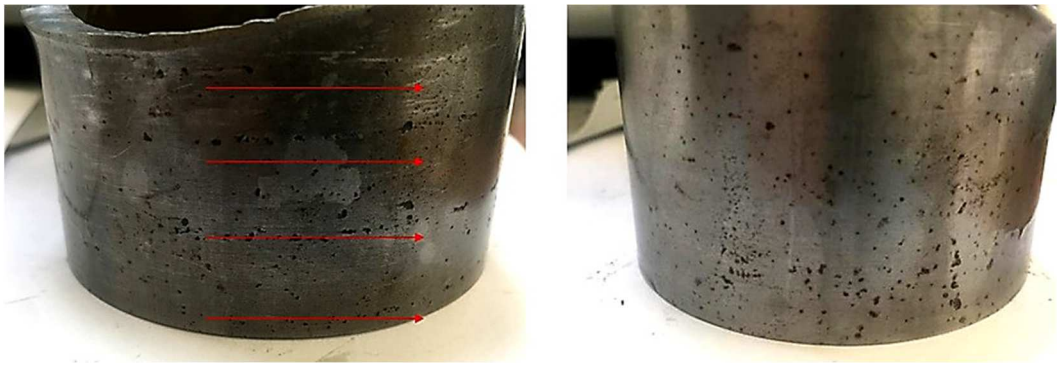


Рисунок 7 – Различия в расположении следов питтинговой коррозии на стенках бурильных труб

Визуальное освидетельствование аварийной трубы говорит о том, что развитие магистральной трещины, по которой произошёл разлом трубы, протекало вдоль рядов указанных полостей, о чем свидетельствует наличие бороздок от внешней поверхности трубы по направлению к внутренней стенке (рис. 8).

Результаты произведённых микроскопических исследований позволяют утверждать, что именно «чёрные» точки, то есть места воздействия питтинговой коррозии, обладающие полостями, являются источником возникновения поперечных трещин в теле металла (рис. 8).

Рисунок 8 – Следы развития трещин на поверхности излома бурильной трубы

С целью уточнения природы образовавшейся в теле трубы трещины был произведён раздельный энергодисперсионный анализ продуктов коррозии в областях залегания питтинговой язвы и образовавшейся поперечной трещины (рис. 9).

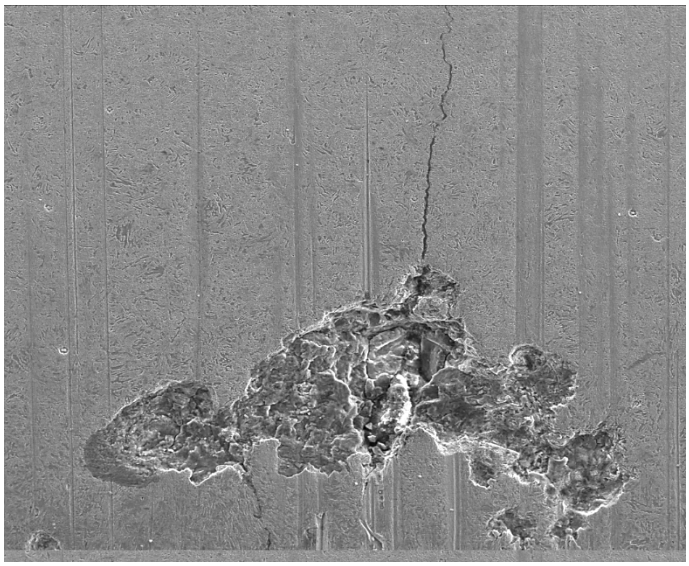
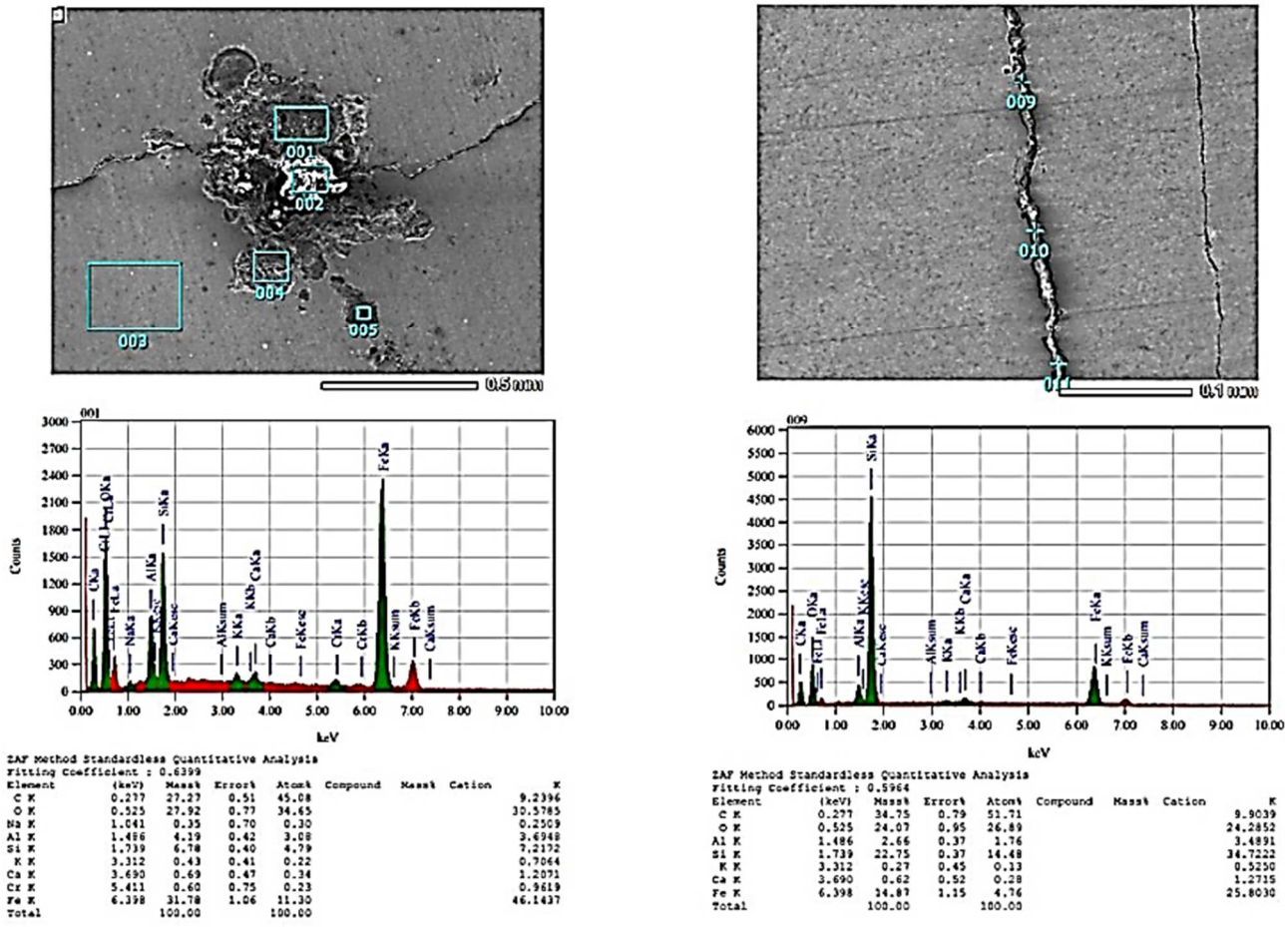


Рисунок 9 – «Чёрная точка» на поверхности стенки трубы и поперечная трещина



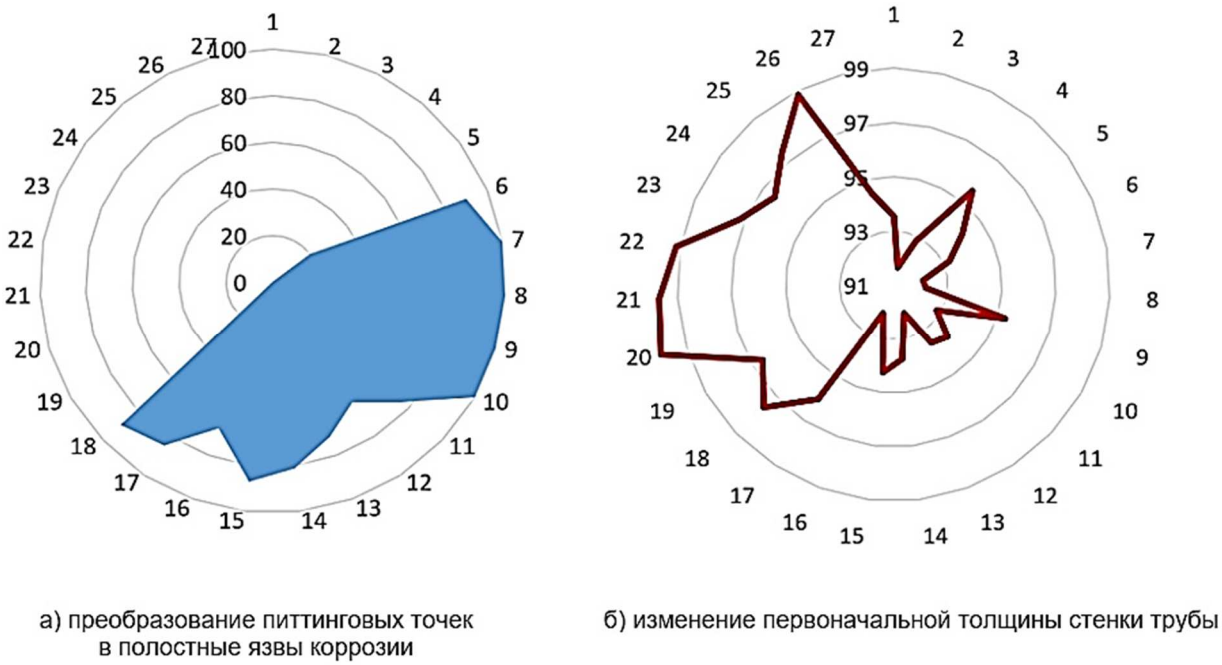
а) в области полостной язвы «чёрной точки» б) в области трещины

Рисунок 10 – Результаты энергодисперсионного анализа продуктов коррозии

Приведённые на рисунке 10 данные энергодисперсионного анализа свидетельствуют о существенном различии состава продуктов коррозии, отобранных в зоне питтинговой язвы и трещины. Полученный результат подтверждает тот факт, что образовавшиеся в стенках металлического образца трещины не являются последствиями химической коррозии.

С целью идентификации механизма образования трещин вся боковая поверхность образца трубы была разбита на 27 секторов по окружности. В каждом из секторов было подсчитано общее количестве точек — следов коррозии и, в том числе, «чёрных». В качестве идентификатора интенсивности «перерождения» рыжих точек в чёрные принято отношение количества чёрных точек, явившихся инициаторами образования трещин, к общему количеству точек в конкретном секторе. Результаты такого подсчёта приведены на рисунке 11 а. Значения по окружности диаграммы – номера секторов, в которых производились измерения.

Ещё одним доказательством того, что полостные язвы и трещины образуются на внешней части дугообразного изгиба трубы, примыкающего к стенкам скважины, является совпадение локализации “чёрных” точек с зоной наиболее интенсивного износа стенки трубы (рис. 10 б).



а) преобразование питтинговых точек в полостные язвы коррозии

б) изменение первоначальной толщины стенки трубы

Рисунок 11 – Относительная секторальная интенсивность изменения состояния стенок бурильной трубы в результате эксплуатационного износа, %

Результаты произведённых исследований позволяют сделать следующие выводы.

– Под воздействием присутствующих в промывочной жидкости химически активных элементов на поверхности бурильных труб образуются питтинговые пятна, которые, при определённых условиях, становятся очагами зарождения усталостных трещин в теле бурильной колонны;

– Образовавшиеся питтинговые пятна претерпевают изменения в зависимости от напряженного состояния поверхности трубы;

– При отсутствии циклических изгибающих напряжений питтинговые пятна сохраняют стабильное состояние и не представляют опасности с точки снижения работоспособности труб;

– При наличии односторонних циклических изгибающих напряжений питтинговая язва становится источником возникновения усталостной трещины, которая распространяется вглубь стенки трубы перпендикулярно её оси. При этом язва углубляется, в ней скапливаются продукты коррозии, и она приобретает более тёмный цвет;

– При бурении скважин со сложным профилем, в случае возникновения затяжек или прихватов, необходимо корректировать аналитические расчёты, связанные с потерей продольной устойчивости бурильной колонны при увеличенных значениях коэффициента трения в открытом стволе. Значение этого параметра следует увеличить, как минимум, до 0,4. Ресурс безаварийной работы эксплуатации бурильных труб должен быть соответствующим образом уменьшен.

Список литературы:

1. API RP 7G-2: Recommended Practice for Inspection and Classification of Used Drill Stem Design and Operating Limits. – API, 2020. – 227 p.

2. Гнибидин В.Н. Оценка усталостного ресурса бурильных труб в условиях интенсивного кавернообразования // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2021. – № 11 (347). – С. 9–11.

3. Гнибидин В.Н. Применение математического моделирования для изучения условий эксплуатации бурильных труб / В.Н. Гнибидин, А.А. Подъячев // Нефть. Газ. Новации. – 2021. – № 1. – С. 13–18.
4. Mylnikov V.V. Speed Effect upon Varying the Cyclic Loading Frequency for Certain Pure Metals / V.V. Mylnikov, D.I. Shetulov, E.A. Chernyshov // Russ. J. NonFerr. Met. – 2015. – Vol. 56. – № 6. – P. 627–632.
5. Wu J. Coiled Tubing Implication in Drilling and Completing Horizontal Wells / J. Wu, H.C. Juvkam-Wold // SPE Drilling & Completion. – 1995. – P. 16–21.

List of references:

1. API RP 7G-2: Recommended Practice for Inspection and Classification of Used Drill Stem Design and Operating Limits. – API, 2020. – 227 p.
2. Gnibidin V.N. Estimation of fatigue life of drill pipes in conditions of intensive cavern formation // Construction of oil and gas wells onshore and offshore. – 2021. – № 11(347). – P. 9–11.
3. Gnibidin, V.N. Application of the mathematical modeling for studying the drill pipe operation conditions (in Russian) / V.N. Gnibidin, A.A. Podyachev // Neft. Gas. Novations. – 2021. – № 1. – P. 13–18.
4. Mylnikov V.V. Speed Effect upon Varying the Cyclic Loading Frequency for Certain Pure Metals / V.V. Mylnikov, D.I. Shetulov, E.A. Chernyshov // Russ. J. NonFerr. Met. – 2015. – Vol. 56. – № 6. – P. 627–632.
5. Wu J. Coiled Tubing Implication in Drilling and Completing Horizontal Wells / J. Wu, H.C. Juvkam-Wold // SPE Drilling & Completion. – 1995. – P. 16–21.