Альбакасов А.И., Климов М.И.
Оренбургский государственный университет

К ВОПРОСУ НОРМИРОВАНИЯ ЩЕЛЕВИДНЫХ НЕСПЛОШНОСТЕЙ В КОНСТРУКЦИЯХ С ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИМИ СРЕДАМИ

В данной работе на первый план выдвигается решение задачи установления обоснованных норм на дефекты сосудов давления и газонефтепроводов, работающих в условиях агрессивных сред. Развитие щелевых дефектов в материале конструкции прогнозируется как методами механики разрушения, так и теории упругости с моделированием на ПК. Оценки предельных состояний конкретных конструкций (трубопроводы, аппараты) получены с учетом особенностей развития дефектов. Приведенный в статье численный анализ развития протяженных дефектов (плоские или ступенчатые щели) позволяет совершенствовать соответствующие нормативные документы.

Проблема безаварийной эксплуатации цилиндрических оболочечных конструкций (трубопроводы, аппараты) с расслоениями, эксплуатируемых в условиях взаимодействия с сероводородсодержащими средами, многопланова и не имеет однозначного теоретического и методологического решения [1, 2]. Снижение конструктивной прочности по сравнению с предельно возможной прочностью конструкции определяется рядом факторов, зависящих от наличия дефектов в материале и условий нагружения. С повышением прочности материала конструкции, а также с учетом особенностей условий эксплуатации (коррозионная среда, низкая температура) особенно опасным становится наличие трещиноподобных дефектов. На рис. 1 показаны водородные расслоения трубопроводов Оренбургского газоконденсатного месторождения (ОГКМ). Водородное расслоение представляет собой вид коррозионно-механического разрушения материала, заключающегося в образовании внутренних щелей в металле и их вскрытии. Полости располагаются параллельно поверхности оболочки и возникают в разное время эксплуатации конструкции в области исходных внутренних дефектов металла.

Водородное расслоение в конце концов становится ступенчатым по толщине стенки сосуда или трубопровода, вызывая его разрушение. Процесс развития расслоений не всегда является плавным «вычерчиванием» ступенек и происходит часто вследствие череды мгновенных объединений параллельных трещин. Это связано с силовым воздействием водорода, накапливающегося в расслоениях и способного вызвать лавинообразное развитие.

Сравнительный анализ результатов контроля [2] показал, что на некоторых участках трубопроводов и аппаратах подрастание

Рисунок 1. Водородные расслоения в сечении трубопровода

расслоений имеет место в течение года, на других нет. Причиной массового водородного расслоения цилиндрических конструкций, работавших при проектных режимах, явилась их длительная, более десяти лет, эксплуатация в агрессивных сероводородсодержащих средах, способных при коррозионном воздействии вызвать интенсивное наводороживание металла. Различная степень поражения, так же как и сама причина его возникновения, связана с комплексным воздействием ряда факторов, выделение вклада каждого из которых затруднительно. Многочисленные факторы сами по себе и в комплексе действуют неравномерно во времени и от конструкции к конструкции. По имеющимся косвенным фактам можно предполагать наличие существенного влияния содержания серы в металле, а также влияние собственно технологических факторов. Разработка более совершенных методик оценки прочности таких конструкций представляет особый научный и практический интерес и является задачей, решением которой на кафедре сопротивления материалов ОГУ авторы занимаются с 80-х годов прошлого века [3]. Проделанная нами работа представляется к опубликованию в двух частях. В первой части изложены основные теоретические положения (определение критерия неустойчивого развития расслоений, различные подходы, в т. ч. упрощенные, к математическому моделированию) с построением экспресс-методики прогнозирования прочности конструкций, работающих в условиях агрессивных сред. Во второй части приведены результаты анализа критических параметров дефектов на основе трехмерного моделирования, а также предельные значения геометрических параметров расслоений (в виде таблиц) с учетом прочностных свойств для различных материалов конструкции.

Если оценку прочности производить по действующим нормативным и инструктивным документам (ГОСТ 27.727-77, ASME SXI, ASTM SA 435, SA 578 и др.), то не избежать грубых оценок. Существующие нормы имеют достаточно большой разброс как в плане понятий, способов измерений, так и в плане критериев и допустимых пределов. Они не учитывают целый ряд важных условий: глубину залегания расслоений от поверхности, величину раскрытия, влияние силового механизма в полости дефекта на их рост – взаимодействие зон концентраций напряжений.

В настоящее время достаточно развиты различные подходы прогнозирования прочности конструкций, в том числе и в условиях агрессивных сред, с учетом трещинообразований. В исходном состоянии трещины – поверхностные, а затем проникают внутрь материала или сразу представляют собой внутренние трещины, но в обоих случаях с берегами, свободными от нагрузки. Анализ формул [4] не позволяет выявить качественные отличия коэффициентов интенсивности для полосы с центральной продольной трещиной при действии равномерного растяжения на внешнем контуре и полосы с равномерным внутренним давлением, приложенным к берегам трещины. Возможно, поэтому существующие критерии для определения изолированно развивающихся расслоений или их групп являются явно консервативными. Так, например, скопление трещиноподобных образований считают локализованным, если радиус объемлющего его дискообразного контура меньше минимального расстояния между точками контуров образований, принадлежащих скоплению и лежащих вне его. Подобное определение групповых дефектов дано в работе [5].

В нашей работе оценка прочности рассматриваемых конструкций производится следующим образом. Сначала выполняется расчет цилиндрической оболочки без учета дефектов (как для «бездефектной» на внешние воздействия с учетом «обычных» мембранных усилий). Затем выделяется минимальная область конструкции в виде области с щелевым дефектом, который располагается внутри нее и с достаточным удалением от граничных сечений (как минимум на длину дефекта и более). Действующие в оболочке напряжения прикладываются по краю области как внешние силы. При этом должно выполняться главное условие – поле возмущений напряженного состояния от внутреннего давления водорода в полости данного дефекта не достигает границы области.

После этого выполняется численное исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) в области оболочка – дефект методами линейной механики разрушения или теории упругости.

Предельное состояние характеризуется геометрическими параметрами взаимного расположения дефектов как по толщине стенки, так и в продольном, окружном направлениях аппарата, трубопровода. Разнообразие применяемых материалов и, в основном, условий эксплуатации (расслоения различной конфигурации и структуры) делает задачу весьма сложной. Однако методический подход к постановке подобных исследований может быть достаточно общим. Существуют два подхода, учитывающие влияние дефектов на прочность конструкций. Первый подход основан на базе линейной механики разрушения и рассматривает все щелевидные дефекты, имеющиеся в конструкции, как щели-разрезы (трещины). Работоспособность конструкции анализируется на основе параметров трещиностойкости и исчерпывается достижением трещиной критического размера, который может привести к хрупкому разрушению конструкции. С позиции подхода механики разрушения все трещиноподобные дефекты равноопасны, если их максимальные размеры совпадают. Однако, как показывает опыт эксплуатации конструкций рассматриваемого назначения [1, 2] и др., влияние различных дефектов на прочность при равных размерах существенно различается. Оценка прочности их элементов (с учетом исходных дефектов) с позиции линейной механики разрушения оправдана только для дефектов, близких по своему характеру к трещине. Как указано в работе [6], только для щели с радиусом кривизны в ее вершине $\rho < 0{,}05$ мм полная долговечность образца практически определяется стадией развития дефекта как трещины.

Во втором подходе все щелевидные дефекты, имеющиеся в конструкции, рассматриваются как притупленные щели, и при этом используются решения, полученные методами теории упругости и теории прочности с использованием критерия максимального нормального напряжения. Проблема влияния дефектов на прочность представляет интерес только в том случае, когда наличие дефекта может привести к возникновению хрупкого разрушения, например при наводороживании.

Таким образом, все острые плоские щели можно свести к расчетной схеме некоторой эквивалентной трещины и решению задачи механики разрушения, а притупленные щелеобразования к решению задачи теории упругости. Далее приводятся результаты численного исследования параметров напряженно-деформированного состояния в области оболочка – щелевой дефект, полученные как методами линейной механики разрушения, так и теории упругости с использованием МКЭ для случая плоской деформации (рассматриваются протяженные в окружном направлении расслоения; кривизна цилиндрической оболочки в тангенциальном направлении не учитывается).

С целью разработки экспресс-методики построена математическая модель для анализа неустойчивого развития остроконечных и притупленных щелевых дефектов с прямолинейным фронтом в полосе заданной толщины H. На берегах щели приложено нормальное давление p. В процессе неустойчивого развития от длины L_0 до L давление снижается от величины p_0 до значения $p = p_0 L_0 / L$. Результаты получены для полосы, имеющей как одиночные, так и расположенные на разных уровнях по высоте остроконечные или притупленные щели. При рассмотрении группы внутренних дефектов различной конфигурации и определении для них условий неустойчивого развития была принята следующая схематизация дефектов: щель – разрез (радиус кривизны устья $\rho < 0{,}05$ мм) имитирует расслоение – трещину; прямоугольного вида притупленная щель с бóльшим радиусом кривизны в устье ($\rho \geq 0{,}05$ мм) – имитирует расслоение с притупленными кромками.

За критерий неустойчивого роста щелеобразования принимаются следующие условия. Полагаем, что начало роста дефекта происходит при выполнении условия $G_{\max} = G_c$. В качестве параметров $G_{\max}$ и G_c может быть принят как коэффициент интен-

сивности напряжения и его предельное значение, тогда $G_{\max} = K_1, G_c = K_{1c}$ для остроконечных щелей объема V. Если в качестве параметров принято наибольшее нормальное растягивающее напряжение и его предельное значение, тогда $G_{\max} = \sigma_{1\max}$, $G_c = \sigma_{1c}$ для щелей с притупленными концами. Траектория неустойчивого развития определяется (при $p_i V_i = const$) таким приращением характерного линейного размера L_i дефекта, для которого выполняются следующие условия:

$$G = G_c, \frac{dG}{dL} > 0, \qquad (1)$$

при этом внутреннее давление

$$p = p(L), \text{ а } \frac{dp}{dL} < 0.$$

Если значения G других щелевых дефектов превысят исходное значение G_C, то возможно приращение нескольких дефектов, их соединение между собой или с поверхностью полосы.

Прогнозирование последствий взаимодействия трещиноподобных образований выполнялось аналитически на основе математических зависимостей механики разрушения вида $K_1 = K_1(p, L)$ [4]. В других случаях, для притупленных дефектов, из-за невозможности представления в явном – аналитическом виде зависимостей $\sigma_1 = \sigma_1(p, L)$ использовался способ дискретного «продвижения» щели. При этом принято следующее. При моделировании длина щели получает конечное приращение, а давление в ее полости уменьшается за счет увеличения объема. Вместе с тем уменьшается и расстояние между дефектами, что ведет к усилению их взаимодействия при возрастающих значениях максимальных растягивающих напряжений у дефектов с притупленными концами. Это условие, как и представленное в функциональном виде (1), принимается за критерий неустойчивого состояния щелевого дефекта. В результате анализа выделяются такие щели, которые, развиваясь мгновенно, объединяются и возвращаются в равновесное состояние или приводят к разрушению полосы, как только давление p в их полости достигнет критического значения p_c.

Концентрация напряжений и деформаций в области щелевого дефекта определяется в первую очередь проекцией его длины, ориентированной перпендикулярно к действующим напряжениям. Здесь учитывается ступенчатый характер щелеобразований, т. е. расслоения в рассматриваемых конструкциях развиваются по нормали к направлению наибольшего растягивающего напряжения. Направление развития щелевого дефекта (поперечное или продольное) определяется в соответствии с бóльшим из напряжений σ_x и σ_y на контуре.

Выполнен численный анализ ряда формул [4], позволяющих рассчитывать коэффициенты интенсивности напряжений для трещин рассматриваемой задачи. Формулы проанализированы с точки зрения их физической достоверности: для некоторых из них выявлены и устранены грубые погрешности. Использование формул для численного анализа условия (1) позволило установить неустойчивое развитие трещинообразования в виде щели-разреза с длиной $L \geq 0{,}57H$. Противоположный вывод получен из других многочисленных расчетов для полосы с притупленной щелью методом теории упругости, – только устойчивое развитие. Таким образом, для анализа неустойчивого развития притупленных расслоений (1) нельзя использовать идеализированную расчетную схему трещины и методы механики разрушения.

Установим следующие два признака определения взаимодействующих дефектов (предварительный и результирующий):

1) когда они находятся на таком близком расстоянии друг от друга, что НДС в окрестности одного из них оказывает влияние на НДС в области другого дефекта;

2) когда они, в случае выполнения условий страгивания, развиваются неустойчиво и объединяются.

Для экспресс-анализа, с целью предварительного заключения о неустойчивом развитии расслоений, область взаимодействия дефектов (ОВД) представим графически в виде четырехугольника (рис. 2).

На основании полученных результатов [7] были установлены параметры ОВД – значения a, b, зависящие от длины L, и величины раскрытия щели δ. Каждое расслоение и другие щелевидные дефекты следует заключить в четырехугольник, стороны и положение которого определяются параметрами:

$$a = \begin{cases} \min\{0{,}3L\ ; 12\,мм\}, & при\ \delta \le 0{,}1L; \\ (0{,}3\ldots 0{,}6)\,L, & при\ 0{,}1L < \delta < 0{,}3L, \end{cases}$$

$$b = \begin{cases} L, & при\ \delta \le 0{,}1L; \\ 1{,}2\,L, & при\ 0{,}1L < \delta < 0{,}3L. \end{cases} \qquad (2)$$

Если часть какого-либо расслоения попадает внутрь четырехугольника, построенного для другого дефекта, то они являются взаимодействующими.

Взаимодействие по первому признаку является необходимым, но не достаточным условием слияния щелевых дефектов между собой или с контуром. Взаимодействие по второму признаку происходит с меньшими значениями параметров a, b, особенно для параметра b. Если необходимые условия ОВД (экспресс-анализ с использованием параметров (2)) выполняются, то в первом приближении делается соответствующее заключение. Если данные требуется уточнить, то надо выполнить численное исследование условий (1) с использованием программы расчета на ПК.

В условиях (2) отражена важная особенность рассматриваемой задачи. Переход от одноосного растяжения силами на внешнем контуре полосы к нагружению одного из расслоений распределенными силами, приложенными на ее берегах, сокращает зону взаимодействия (ориентированную вдоль расслоений) до двух порядков (от L до 0,6…0,02L). Полученные данные позволяют более обоснованно подходить к нормированию геометрических параметров различных изолированных дефектов и их групп.

По результатам выполненного анализа прочности цилиндрических конструкций при различных значениях геометрических параметров щелевых дефектов отметим следующее. Предельному состоянию конструкции соответствует 50-процентное поражение сечения стенки дефектами, объединившимися по ее толщине и вдоль поверхности. При этом наиболее существенными для оценки безопасности работы конструкции являются параметры развития расслоений по толщине стенки, учитывая ступенчатые структуры как наиболее вероятные схемы разрушения.

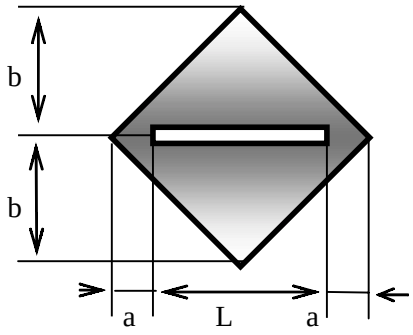

Рисунок 2. К построению ОВД

С целью оценки предельных значений геометрических параметров изолированных дефектов и их групп выполнен анализ развития параметров изолированного расслоения длиной L в стенке оболочки толщиной H. В качестве характерных геометрических параметров как самого расслоения, так и рассматриваемой конструкции в области дефектообразования дополнительно приняты: δ_L – величина наибольшего раскрытия расслоения; h_L – расстояние от расслоения до ближайшей поверхности конструкции; ξ – линейный размер зоны возмущения напряженного состояния впереди фронта расслоения.

В нашей работе [8] показаны зависимости наибольшего раскрытия расслоения от его длины для различных расположений по толщине стенки конструкции рассматриваемого назначения с учетом допущений и упрощений, отмеченных выше. Величина δ_L для расслоений $L < 5$ мм и $h_L > 5$ мм является величиной порядка $10^{-5}...10^{-3}$ мм. Расслоения $L \approx 10$ мм и $h_L \approx 10$ мм имеют наибольшее раскрытие δ_L порядка 10^{-2} мм. Для расслоений $L \ge 20$ мм и $h_L \le 4{,}2$ мм; $L \ge 28$ мм и $h_L \le 7{,}3$ мм; $L \ge 32$ мм и $h_L \le 8{,}4$ мм; $L \ge 36$ мм и $h_L \le 9{,}4$ мм; $L \ge 40$ мм и $h_L \le 10$ мм величина δ_L начинает стремительно возрастать от 0,1 мм до значений более миллиметра. Учитывая величину раскрытия полости и зависимую от нее величину раскрытия устья, отметим, что большинство протяженных изолированных расслоений следует рассматривать как притупленные трещины. Последние могут развиваться только устойчиво, в отличие от трещин-разрезов. Установленная взаимосвязь геометрических параметров $L, h_L c \delta_L$ позволяет в каждом конкретном случае сделать заключение о характере силового воздействия водорода внутри полости, о предельном состо-

нии расслоений. В случае отсутствия такой взаимосвязи у рассматриваемых параметров в течение длительного времени следует считать либо механизм развития расслоения совершенно иным (без силового давления водорода), либо инкубационный период накопления водорода характеризуется начальной стадией. Здесь и далее получены результаты для расслоений, развивающихся по силовому механизму, связанному с ростом внутреннего давления водорода в его полости. Подобный анализ для нормирования взаимосвязи геометрических параметров $L, h_L c \delta_L$ с составлением соответствующих таблиц планируется провести далее для различных видов конфигураций расслоений, в том числе эллипса, включая различные границы сплющенных эллипсов, круговых дискообразных.

В работе [8] для различных расслоений показаны их предельные значения (L, h_L) – длина и глубина залегания от ближайшей поверхности, с которой в результате взаимодействия образуется Т-образное вскрытие. В качестве вывода отметим, что развитие изолированных расслоений в целом происходит эволюционно во времени. Неустойчивое и тем более лавинообразное развитие возможно только во взаимодействии с другими дефектами и их группами. В конечном итоге развивающееся расслоение в узком слое по толщине стенки конструкции соединится с поверхностью Т-образным вскрытым расслоением.

Многозначность предельных значений (L, h_L) связана с влиянием на процесс развития щелевидных дефектов параметра δ – ширины щели расслоения. Например, рассматривается три случая: 1) $\delta = 1{,}5$ мм; 2) $\delta = 1$мм; 3) $\delta = 0{,}5$ мм, которые сходятся к результатам, полученным для щели-разреза методами механики разрушения. Так, для цилиндрической оболочки с толщиной стенки 32 мм из стали 20: $\sigma_в = 500$МПа; $\sigma_т = 330$МПа; $К_{1с} = 54$МПа$\sqrt{м}$; если расслоение развивается на глубине $h_L = 15$ мм от поверхности, то вскрытие с поверхностью возможно при $L > 140$ мм, для других значений $h_L < 15$мм от внешнего контура: h_L=10 мм , L>60 мм; h_L=5 мм, L>16 мм.

Эти результаты получены для максимально притупленных дефектов $\delta = 1{,}5$ мм, для других случаев – остроконечных расслоений предельные значения увеличиваются в несколько раз, приближаясь к результату для трещин-разрезов: h_L=15 мм, L=290 мм; h_L=10 мм, L=190 мм; h_L=5 мм, L=40 мм.

Развитие методов и средств неразрушающего контроля для выявления несплошностей позволяет все с большей точностью определять места расположения и конфигурацию дефектов. Вместе с тем нормы на допустимые дефекты совершенствуются с учетом фактора достоверности их обнаружения неразрушающими методами контроля. Геометрические параметры расположения внутренних щелевых дефектов, ориентированных по толщине стенки конструкции, определяются существующими методами контроля пока еще с большой погрешностью. Отсутствие всех необходимых данных приводит к тому, что значения предельно допустимых дефектов назначаются в широком диапазоне значений.

В табл. 1 приведены три группы таких значений L для расслоений в стенке конструкции из стали 20:

– первая – L_1 определяет наибольшие значения, до которых эксплуатация конструкции с дефектами безопасна и начиная с которых требуется наблюдение;

– вторая – L_2 указывает на возможность разрушений со стороны контура, если расслоения значительно притупленные;

– третья – L_3 соответствует предельным значениям для развития любого вида остроконечных дефектов.

Последние, как более острые, получают относительно большее развитие за счет увеличения своей граничной области прежде начала разрушений со стороны поверхности оболочки к расслоению и существенно зависят от соотношения K_{1c} и σ_{1c}. Отсюда диапазон предельных значений $L_{пр}$ определяется неравенством:

$$L_2 \le L_{пр} \le L_3. \qquad (3)$$

Из анализа этих результатов отметим, что отдельные расслоения в процессе развития не объединяются, если они отстоят друг от друга больше, чем на удвоенное значение этих величин (табл. 1 – II группа). Оба расслоения в своем развитии на этом расстоя-

нии должны вскрыться к контуру, поражая сечение по высоте до 50%.

Полученные результаты позволяют уточнить установленные нормами [9] недопустимые значения расслоений в любом направлении длиной более 80 мм, ограничив длину либо меньшим, либо большим, но зависимым от толщины стенки оболочки. Сопоставление наших значений с допустимыми по нормам [9] ПК 1514–72 максимальными размерами локализованных внутренних дефектов показывает, что установленные в настоящее время нормы для толщин $H < 14$ мм оказываются ненадежными, а для толщин 14… 24 мм – достаточно приемлемыми и, наконец, для $H > 24$ мм оказываются в большой мере консервативными. Действующие правила контроля нормируют как основной параметр максимальный линейный размер допустимого дефекта или эквивалентную площадь. Это соответствует тому, что методы неразрушающего контроля для выявления несплошностей достаточно надежно регистрируют только максимальный линейный размер щелеобразования, находящийся в плоскости, перпендикулярной к направлению просвечивания, при рентгеновском методе контроля или его эквивалентную площадь при ультразвуковом контроле. При этом расшифровка геометрических особенностей дефектов в других пространственных направлениях может даже не проводиться. В то же время, как мы показали [8], при оценке влияния дефектов на прочность максимальный размер дефекта не всегда является определяющим. Так, для суждения о работоспособности конструкции необходимо знать все основные геометрические параметры расчетной схемы «оболочка – щелевидный дефект». Только при выявлении всех необходимых исходных данных по количеству и размерам дефектов, включая данные о притупленности устья расслоений (изучение очагов разрушения), соответствующие расслоения могут быть уточнены как допустимые в каждом конкретном случае. Таким образом, с целью нормирования параметров щелевидных дефектов, выполнив подобные расчеты, составляют таблицы, подобные табл. 1, с учетом особенностей деформирования для различных материалов, что будет изложено во второй части статьи.

Таблица 1. Допустимые и предельно возможные значения расслоений

Толщина стенки H, мм	Параметры протяженных расслоений L, δ, мм			
	L_1	L_2	L_3	δ_{max}
9	12	28	30	0,25
12	22	50	57	0,54
14	30	70	80	0,73
16	38	90	110	1,0
18	50	115	145	1,28
24	85	175	300	2,53
32	155	305	600	4,78
46	320	500	1510	9,8

Разработанная методика способна содействовать оценке степени опасности развития как группы, так и отдельных протяженных расслоений. Предлагаемые положения о влиянии дефектов на прочность рассматриваемых конструкций получены в основном численными исследованиями и позволяют оценивать их допустимое состояние с учетом особенностей развития расслоений в конкретных условиях эксплуатации. Проведенные сравнительные исследования подтверждают прогнозируемые в соответствии с расчетной моделью закономерности развития расслоений.

Список использованной литературы:

1. Павловский Б.Р., Щугорев В.В., Холзаков Н.В. Водородная диагностика: опыт и перспективы применения // Газовая промышленность. – 1989. – С. 30-31.
2. Пастухов С.В. Техническое освидетельствование и коррозионное состояние оборудования ОГПУ // Материалы заседания секции НТС по теме «Основные направления в решении проблем эксплуатации ОГКМ при 100% влажности газа в системе «промысел – ОГПЗ». – М.: ИРЦ Газпром, 1994. – С. 65-70.
3. Кушнаренко В.М., Климов М.И., Альбакасов А.И. К оценке работоспособности конструкций, контактирующих с наводороживающими средами. В кн. «Коррозия металлов под напряжением и методы защиты». – Львов, 1989. – С.31-32.
4. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: в 3 т. / Под общ. ред. В.В. Панасюка. – Киев: Наук. думка, 1988 – 1990 (т. 1. – 1988. – 486, [1] с.: ил ; т. 2. – 1988. – 618, [1] с.: ил ; т. 3. – 1990. – 435с.).
5. Гольдштейн Р.В., Зазовский А.Ф., Павловский Б. Р. Развитие дискообразного расслоения в стальном листе под действием растяжения и наводороживания // Физ.– хим. механика материалов. – 1985. – N5. – С.100 – 105.
6. Синюков А.М., Полозов В.А. Влияние остроты концентратора на трещиностойкость стали в сероводородсодержащих средах. Коррозия и защита скважин, трубопроводов, оборудования и морских сооружений в газовой промышленности. – Экспресс информация Мингазпрома. – 1986. – № 2. – С. 1-4.
7. Альбакасов А.И, Климов М.И. К прогнозированию прочности цилиндрических конструкций с щелевой несплошностью в условиях водородсодержащих сред // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 2005. – № 8. – С. .
8. Альбакасов А.И. Влияние геометрических параметров дефектов в цилиндрических конструкциях на прочность при наводороживании // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 2005. – № 7. – С.
9. СНиП 2.05.06 – 85. Магистральные трубопроводы. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 52с.