

УДК 539.3.001.2

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДОВ С ДЕФЕКТАМИГ. Х. Мурзаханов,
А. С. Марницын

МГЦ ГУП «МОСГАЗ»

В статье рассматривается напряженно деформированное состояние трубы подземного газопровода, в области каверны в грунте. Производится оценка остаточного ресурса металлического подземного газопровода, содержащего локальные дефекты. Моделирование квазистатических разрушений. Вычисления производятся численными методами с использованием программного комплекса ANSYS и MATHCAD. Даны рекомендации по оптимизации вычислительного процесса.

Ключевые слова: подземный газопровод, остаточный ресурс, каверна, острый локальный дефект, МКЭ.

Оценка остаточного ресурса газопроводов, ответственная и многоступенчатая задача. Для применения существующих моделей механики разрушения необходимо наличие двух основополагающих наборов расчетно-экспериментальных данных:

- параметры выявленных повреждений и дефектов трубы газопровода,
- параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) трубы газопровода.

Для формирования первого из них существует ряд методов неразрушающего визуально-измерительного контроля, такие как акустикоэмиссионный контроль, ультразвуковая дефектоскопия и т. п. Параметры НДС для залегающих газопроводов могут быть определены эмпирически, однако, в случаях неосесимметричных параметров нагружения, математический аппарат становится настолько громоздким, что не может быть рекомендован для широкого практического применения. Именно к этому типу задач относится определение НДС в газопроводе в случае образования в прилегающем грунте осыпи или каверны. Кавернообразование в грунте может происходить вследствие просадочных свойств грунта, особенно при недостаточной трамбовке, как следствие промоин от воздействия подземных вод, как результат локальных

SIMULATION OF RESIDUAL LIFE
OF PIPELINES WITH DEFECTS

G. H. MURZAKHANOV, A. S. MARNITSIN

The article considers the stressedly-strain condition of the pipes of the underground gas pipeline, in the field of the caverns in the ground. The assessment of a residual resource of the cylindrical gas pipe line containing local defects is made. Modeling of quasistatic rupture. Calculations are made by numerical methods with use of the program ANSYS and MATHCAD complex. Recommendations about optimization of computing process are made.

KEYWORDS: *underground gas pipe line, residual resource, ground cavern, sharp local defect, FEM.*

ослаблений грунта в местах карстовых провалов, иных причин. Очевидно, что уплотненный и равномерно прилегающий грунт обладает балластирующими способностями и оказывает значительное стабилизирующее влияние на развитие дефектов в металле газопровода. В случае образования в грунте пустот и каверн, участки трубопровода лишены такой поддержки, и являются наиболее потенциально опасными при эксплуатации, особенно, если на участок с каверной приходятся еще и дефекты материала трубы. В этом случае возрастает вероятность разрушения вследствие образования больших деформаций в металле, и использование нетто-напряжений, исчисленных при равномерной засыпке для оценки НДС в области дефектов, уже не удовлетворительно для поставленных целей, поскольку образуются обширные области значительных концентраций напряжения. НДС в области дефекта, попадающего в такую зону, требует индивидуальной локальной оценки. Такого рода оценку удобно осуществлять с помощью метода конечных элементов (МКЭ), формируя параметры каверн и дефектов САД средствами.

В статье рассматривается участок газопровода диаметром $d=500$ мм, толщиной стенки $h=8$ мм, внутренним рабочим давлением $P=6$ МПа, выполненный

из стали марки 09Г2С ($E=2,06 \times 10^5$ МПа, $\nu=0,28$, $\rho=7850$ кг/м³), залегающий в дресвяном грунте с пылевато-глинистым заполнителем. Коэффициенты для модели грунта Друкера-Прагера: $E=5,1$ МПа, сцепление 11,3 кПа, углы внутреннего трения и дилатации 19°. В грунте обнаружена просадочная каверна протяженностью $l=1,5$ м, раскрытием по окружности около 45°. Расчет НДС выполняется с использованием программного комплекса ANSYS.

На стадии эксплуатации на трубопровод действуют два основных класса нагрузок: функциональные и природно-климатические [7]. Рассмотрение последних выходит за рамки статьи. Для подземных трубопроводов в рамках расчетной модели возможен учет следующих нагрузок и воздействий:

- внутреннее давление перекачиваемого продукта;
- температурные нагрузки замыкания конструкций при монтаже;
- нагрузки, вызывающие искривление продольной оси трубопровода;
- весовые и контактные нагрузки от грунта засыпки.

При создании расчетной модели были учтены нагрузки от внутреннего давления, весовые и контактные от грунта засыпки. Очевидно, что размер моделируемого участка существенно влияет на время счета и необходимо осуществить его разумную минимизацию. Размер грунтового слоя вокруг трубы и расчетная длина участка, прилегающего к каверне, выбраны из соображений достаточного затухания на удаленных границах локальных неравномерностей в картине НДС, вносимых каверной по сравнению с нетто-параметрами в теле металла и на поверхностях грунта в модели без каверны. Размер моделей выбран расчетно-опытным путем таким образом, что, разница характерных величин НДС на границах бездефектной модели и модели, содержащей каверну, составляет 1,5% по напряжениям и 0,7% по деформациям. Малость всех этих величин означает достаточность выбранных габаритов расчетной модели для затухания эффектов, производимых каверной.

При моделировании металла трубопровода и окружающего грунта использовались восьмиузловые 3-D элементы типа SOLID45 с различной степенью дискретизации. Для грунта, где высокая точность вычислений не является необходимой, дискретизация ниже. Этот элемент способен учитывать большие деформации и может быть применен при решении контактных задач. Область контакта металла-грунт моделируется контактными элементами TARGE170 для ответной поверхности (грунт) и CONTA174 для контактной поверхности (металл) с коэффициентом трения $\mu=0,3$. Отметим, что для расчета тонкостенных конструкций, в общем случае, удобнее применять оболочечные элементы типа SHELL, но идентичность в выборе контактных элементов для металла и грунта обусловлена лучшей сходимостью контактных задач в

ANSYS в случае применения одинаковых элементов при моделировании соприкасающихся поверхностей.

Для решения задачи создан макрос на языке APDL. Создана конечноэлементная сетка. Для имитации осыпи (каверны) удалена часть объема грунта в середине модели. Далее сформированы контактные пары с использованием оператора ESURF. В качестве контактной выбрана поверхность металла трубы, ответной – грунт. Наложены связи на внешние поверхности конструкции (DA). Жестко закреплены нижние поверхности грунта, наложены жесткие ограничения на продольные (вдоль оси Z) перемещения торцов модели. Приложены нагрузки: давление продукта на внутреннюю поверхность трубы (SFA), и гравитационная составляющая в поле сил тяжести (ACEL).

При формировании расчетной модели ставилась двухпараметрическая задача исследования поведения конструкции в случае больших деформаций (вплоть до величины абсолютного остаточного сужения 21%, режим решателя NLGEOM) и больших давлений. Для этого использована модель однородного изотропного упругопластического тела с кусочно-линейным упрочнением. Отдельным макросом сформирована кривая истинной деформации, что позволило учитывать временное упрочнение в теле металла. Здесь, поскольку данных об истинной площади сечений после образования шейки нет, участок между истинным пределом прочности и истинным сопротивлением разрыву интерполирован прямой линией.

Результатом расчета получена типичная картина НДС в области каверны для рабочего давления в 8 МПа, приведенная на рис. 1, 2.

Интересен слабовыраженный волновой характер НДС в областях, близких к местам непосредственного контакта грунта и трубы. Авторы относят этот феномен на счет формирования изгибных мод при решении нелинейной контактной задачи. Вообще, при решении контактных и нелинейных задач в ANSYS, настройка параметров сходимости и выбор расчетной модели оказывает исключительно важное влияние, как на время расчета, так и на его принципиальную возможность. Для решения этой характерной проблемы оправдано принимать максимум допустимых упрощений. Авторы столкнулись с тем, что при использовании модели Друкера-Прагера для модели грунта время счета, затраченное ПЭВМ на решение задачи, измеряется многими часами, и, оценочно, не соответствует сложности поставленной задачи. Ее физический смысл таков, что решение контактного модуля является сопутствующим и, не требуя высокой точности, не оправдывает временных затрат на счет. Для сравнительного анализа было принято упрощение и применена модель грунта как Винклеровского основания, – в исключительно упругой постановке. Результаты счета отличались менее чем на 1%, время же счета сократилось в десятки раз! Таким образом,

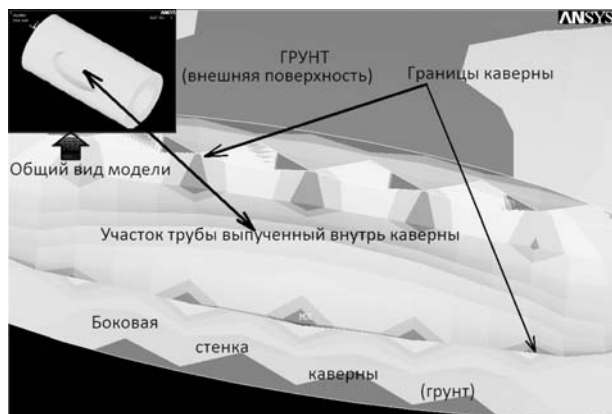


Рис. 1. Распределение эквивалентных деформаций по Мизесу в области каверны по поверхности материала

рекомендовано использование именно простейшей Винклеровской модели, хотя она и является менее физической, чем модель Друкера-Прагера. Особенно учитывая тот факт, что не ставится вопрос о точном исследовании НДС в области контактных пятен. Вклад весовых нагрузок в НДС исследуемых областей так же оказался пренебрежимо малым. Однако вычислительная компонента, учитывающая поле сил тяжести, незначительно увеличивает время счета ПЭВМ и было принято решение ее не исключать.

Пошагово увеличивая давление в модели, строим график максимальных относительных деформаций по Мизесу (шкала ординат логарифмическая) в трубе, приведенный на рис. 3. Диапазон параметров нагружения был выбран таким образом, чтобы достигнуть деформаций, сопоставимых с параметром абсолютно остаточного сужения материала трубы.

Выяснилось, что пластическая фаза в деформировании металла наступает далеко за пределами рабочего и тестового давлений. Иначе говоря, образование самой каверны на участках труб, лишенных внутренних дефектов металла – не опасно, и имеет смысл говорить о повышенной опасности разрушения только в случае совпадения каверны и локальных дефектов трубы. Это очень важный вывод, поскольку он показывает возможность упрощения реальной модели (грунт по Друкеру-Прагеру, упругопластическая постановка задачи с истинной кривой напряжения-деформации, нелинейная контактная задача в местах соприкосновения) до упругой задачи с Винклеровской моделью грунта-засыпки.

В практике расчетов прочности и трещиностойкости широкое распространение получили методики, основанные на применении критериев интерполяционного типа. В основу критериев положен принцип граничной интерполяции, состоящий в том, что решение для промежуточных состояний представляется в форме интерполяционных соотношений между

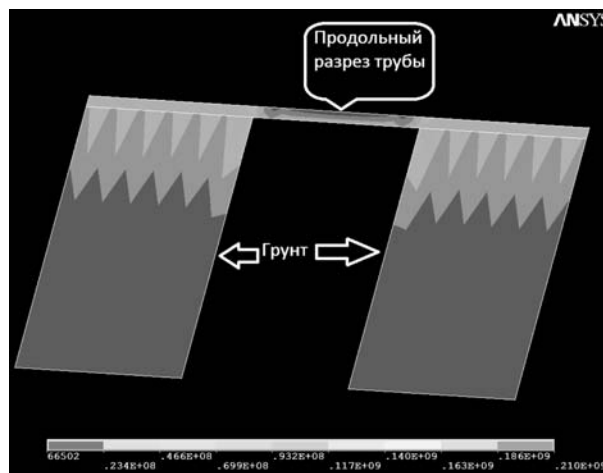


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в толще материала в продольном сечении модели, проходящем через центр каверны. (Масштаб сильно сжат в продольном направлении для улучшения наглядности картины)

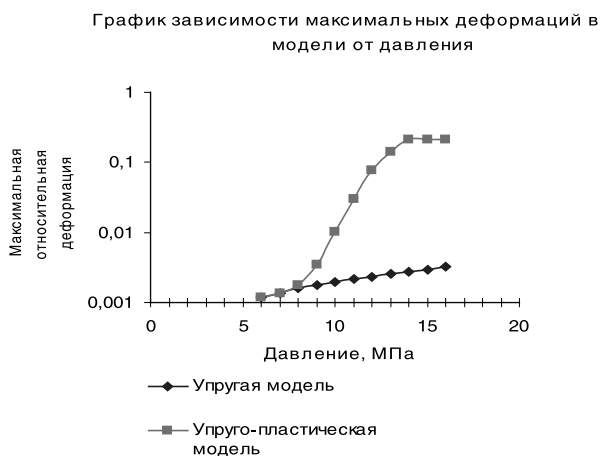


Рис. 3. Сравнительные кривые максимальной относительной деформации по Мизесу в теле модели для упругой и упруго-пластической постановки

имеющимися граничными решениями, соответствующими двум альтернативным механизмам разрушения – хрупкому и вязкому. Одним из таких критериев является выражение:

$$\left[\frac{K_1}{K_{1c}} \right]^{2s} + \left[\frac{\epsilon_n}{\epsilon_f} \right]^s \leq 1 \quad (1)$$

Его мы и используем для целей настоящей статьи – оценки остаточного ресурса поврежденного участка. Здесь K_1 – максимальный КИН на фронте трещины и ϵ_n – сопутствующие ему номинальные деформации, $s=2$ параметр интерполяции, K_{1c} – критический для

материала КИН, по достижении которого рост трещины носит спонтанный и разрушающий характер, ϵ_f – предельная разрушающая деформация.

Находим параметры для формулы (1) с использованием программного комплекса ANSYS. Выделяем подмодель, содержащую по результатам дефектоскопии острый дефект – область коррозионного растрескивания с максимальной глубиной 3 мм, размерами 67×35 мм. Для этого в программном модуле ANSYS создаем макрос с использованием языка APDL, моделируя имеющийся острый дефект в виде эквивалентной эллиптической трещины [3, 6]. Для моделирования сингулярности напряжений в вершине трещины вводятся специальные квадратичные элементы со сдвигом серединного узла на четверть стороны [5]. Используется команда KSCON языка APDL. Трехмерная сетка формируется выдавливанием предварительно созданной двумерной модели вдоль линии вершины трещины. Параметры нагружения подмодели в районе локализации трещины выделяем из массива данных НДС, полученного для полной модели.

На рис. 4 приведен вид НДС вблизи трещины в плоскости, перпендикулярной ее фронту. Хорошо видна область концентрации напряжений в непосредственной близости от вершины трещины.

В макросе ANSYS авторами предусмотрен блок вычисления J-интеграла с последующим получением на его основе коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины (КИН) K_I . Находим ряд K_I в области дефекта для разной его глубины. От существующего размера до достаточно близкого к толщине стенки шагом, достаточным для уверенной интерполяции. Полученные величины представлены в табл. 1, наряду с номинальными деформациями ϵ_n , которые понадобятся в дальнейшем для построения линии нагружения.

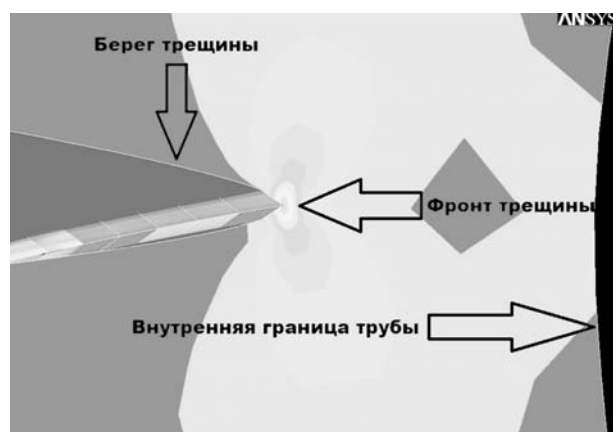


Рис. 4.

Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в вершине трещины в сечении, перпендикулярном фронту

ТАБЛИЦА 1.

Выборка КИН и деформаций в вершине трещины по мере ее роста

НДС\глубина, мм	1,6	3	4	5	6	7
K_I	17	30	44	62	84	110
$\epsilon_n, \%$	2	2,6	3,3	4,2	5,3	7

Определим критические параметры нагружения в сечении дефектов.

Критический коэффициент интенсивности напряжений:

– экспериментальный способ [2],

$$K_{Ic} = 5.0\sigma_{\text{брутто}}\sqrt{0.5h},$$

где $\sigma_{\text{брутто}}$ – разрушающее (критическое) напряжение в лабораторном образце толщиной h , в котором искусственно создана трещина глубиной $0.5h$. Здесь $K_{Ic}=100$ МПа/м².

– эмпирический способ на основе ударной вязкости по Гиренко [4],

$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{0.1K_{vc}E}{1-\mu^2}},$$

где $K_{vc}=600000$ Дж/м² для стали 10Г2 [8], из которой изготовлен трубопровод, $E=2.06 \times 10^5$ МПа – модуль Юнга, $\mu=0.28$ – коэффициент Пуассона. Здесь $K_{Ic}=114$ МПа/м². Заметим хорошее порядковое соответствие между этими двумя величинами. Выбираем первый, более консервативный.

Значительное формоизменение при упругопластическом деформировании может привести к уменьшению размеров элемента металла и исчерпанию его несущей способности еще до разрушения. Типичный пример – образование «шейки» при одноосном растяжении. После того, как такое состояние достигнуто, дальнейшее деформирование происходит без увеличения нагрузки, неустойчиво. Очевидно, что, хотя металл еще некоторое время сохраняет свою целостность, момент исчерпания несущей способности, даже в ограниченном объеме металла, следует считать недопустимым предельным состоянием.

Для оценки предельной деформации примем:

$$\epsilon_f = \epsilon_{bc}(R2/\sigma_{bc}),$$

где $R2=R_2^n m_2 k_1$, где $m_1=0,8$ – коэффициент условий работы материала труб при разрыве; $m_2=0,65$ – коэффициент условий работы трубопровода, транспортирующего взрывоопасный и/или сжиженный газ; $k_1=0,8$ – коэффициент однородности материала бес-

шовных труб из углеродистой стали; $\epsilon_{bc}=21\%$ – остаточная деформация при разрыве для данного вида стали; $R_2^t=265$ МПа – нормативное сопротивление, равное наименьшему значению предела текучести при растяжении по ГОСТ 8711-74; $\sigma_{bc}=470$ МПа – предел временного сопротивления.

Подставляя значения, получаем $\epsilon_f=4,95\%$.

Вид предельной кривой (пунктир) и линии нагружения (сплошная) с учетом полученных параметров представлен на рис. 5.

Следует отметить, что линия нагружения по существу отражает не зависимость, а лишь соответствие величин КИН и деформаций. Кроме того, варьируя во входных параметрах макроса ANSYS первоначальную длину эллиптической трещины в значительных пределах, авторами замечено, что изменение расположения линии нагружения на графике настолько незначительно, что эта разница субъективно лежит за пределами методологических допусков. Из этого наблюдения можно сделать вывод о хорошей устойчивости выбранного критерия, а так же его типологическую схожесть с параметрами, определяющими фундаментальные свойства материала и некритичными к параметрам конкретного дефекта.

Точка А является критической для совокупности выбранного критерия, нагрузки и имеющегося дефекта. Средствами пакета MATHCAD определяем ее точные координаты и соответствующее значение критической глубины дефекта, $l_{cr}=5,3$ мм.

Скорость роста трещин коррозионного растрескивания при квазистатическом нагружении определяется зависимостью вида:

$$V(t) = \frac{da}{dt} = B_{\sigma} (K_1 - K_{th})^{n_{\sigma}} / (K_{1c} - K_{th}^{\sigma})^n, \quad (2)$$

где $B_{\sigma}=1,6$ мм/год, $n_{\sigma}=2,1$ экспериментальные параметры [2], определяющие скорость роста трещины. При

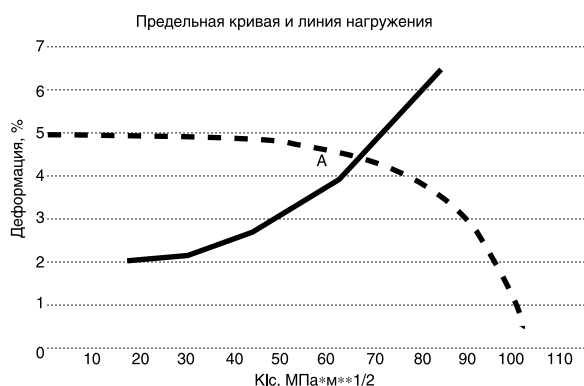


Рис. 5.

Предельная кривая (пунктир) материала и линия нагружения локального дефекта (сплошная)

этом необходимо учесть, что скорость подрастания трещины с течением времени неодинакова и определенным образом зависит от геометрических параметров трещины в каждый конкретный момент времени, иначе говоря, от стадии ее развития. Для того чтобы найти время, необходимое для достижения трещиной критической глубины l_{cr} от начального размера трещины l_0 в условиях постоянно изменяющейся скорости подрастания, которая, в свою очередь, так же зависит от стадии развития трещины, авторы применили кинематические аналогии для вычисления расстояния, пройденного телом, неравномерно движущимся со скоростью, которая является зависимостью координаты. Даже в случаях достаточно простого формульного описания скорости продвижения в такого рода параметрических случаях, вывод эмпирической формулы, которая позволила бы развернуть эту замкнутую зависимость относительно расстояния (в нашем случае – глубины трещины) в качестве аргумента, и вычислить временной промежуток, необходимый на преодоление заданного участка пути, не всегда представляется возможным, а при наличии технических средств, позволяющих осуществлять численное интегрирование с удовлетворительной точностью, даже будучи возможным, но громоздким, не всегда оправдан. В нашем случае, рассмотрим величину, обратную скорости роста трещины (2) в каждый момент на стадии развития дефекта, физический смысл которой – временные затраты на единицу роста трещины именно при локальных, текущих, параметрах состояния трещины, что в кинематических аналогиях будет означать время, затраченное на преодоление определенного расстояния. Это величина $1/V(t)$. Очевидно, что интегрируя ее в пределах l_0 до l_{cr} мы и получим время, необходимое на прохождение трещиной в своем развитии всех стадий вплоть до критической при квазистатическом способе нагружения, иначе говоря, остаточный ресурс (RR). Таким образом, окончательная формула вычисления остаточного ресурса модели, на основании приведенных рассуждений, такова:

$$RR = \int_{l_0}^{l_{cr}} (V(t))^{-1} dt. \quad (3)$$

Подставляя ранее полученные значения и численно интегрируя средствами MATHCAD, получаем остаточный ресурс (RR) дефектной области. Результат

ТАБЛИЦА 2.

Зависимость остаточного ресурса газопровода от глубины дефекта

Начальная глубина трещины, мм	2	3	4	5
Остаточный ресурс, лет	>10	7,5	2,7	0,4
Остаточный ресурс по методике [9]	>10	6,7	2,6	0,4

таты расчета для трещин разной начальной глубины отражены в сводной табл. 2.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

– получена обобщенная картина НДС трубы газопровода в области каверны в прилегающем грунте;

– получена нелинейная модель разрушения конструкции с учетом реальной геометрии дефектов;

– полученные результаты качественно соответствуют аналитическим оценкам НДС, не имеют видимых разрывов и нефизических градиентов, что позволяет считать модели адекватными, а сетки достаточно подробными для решения поставленной задачи;

– это дает возможность программно моделировать процессы разрушения конструкции и оценивать ее остаточную прочность без использования дорогостоящих экспериментальных процессов;

– вычислен остаточный ресурс реального газопровода с обнаруженным по результатам дефектоскопии дефектом;

– величина остаточного ресурса, вычисленная по предложенной методике, качественно согласуется с результатами, полученными в рамках проверенных методик, используемых ОАО «ГАЗПРОМ», при этом, предложенная методика несколько более консервативна и существенно более универсальна и применима к более широкому кругу задач и типов конструкций и способов нагружения;

– сравнительный анализ результатов, полученных при использовании полной и максимально упрощенной моделей, показывает, что простая модель вполне удовлетворяет требованиям поставленной задачи. При этом достигается значительная (в десятки раз) экономия компьютерных и интеллектуальных ресурсов исследователя. Результаты, полученные в статье, в дальнейшем могут быть использованы для создания расчетной модели оценки остаточного ресурса трубопровода в области локальных дефектов металла трубы;

– использование методов, предложенных в статье, позволяет принимать экономически целесообразные решения, связанные с эксплуатацией, ремонтом и реновацией дорогостоящего оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Авдонин А.С.** Прикладные методы расчета оболочек и тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1969. 404 с.
2. **Басов К.А.** ANSYS для конструкторов. М.: ДМК Пресс, 2009. 248 с.
3. ВРД ОАО «ГАЗПРОМ» 39-1.10-004-99.
4. **Гиренко В.С., Котенков Э.В.** Зависимости между ударной вязкостью и критериями механики разрушения конструкционных сталей и их сварных соединений // Автоматическая сварка. 1985. № 9. С. 13–20.
5. **Морозов Е.М., Никишков Г.П.** Метод конечных элементов в механике разрушения. М.: Книжный дом «Либроком», 2010. 256 с.
6. **Мурзаханов Г.Х., Быстрова Н.А.** Методы оценки остаточного ресурса трубопроводов. М.: МГТУ им. Баумана. 2008. 103 с.
7. **Мурзаханов Г.Х., Быстрова Н.А., Рябцев С.А.** Диагностика технического состояния и прогнозирование остаточного ресурса вертикальных стальных резервуаров. Учебное пособие по неразрушающему контролю и оценке остаточного ресурса. М.: МГТУ им. Баумана, 2009. 132 с.
8. **Сорокин В.Г., Гервасьев М.А.** Стали и сплавы. Марочник.: Справ. изд. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 608 с.
9. СТО ОАО «ГАЗПРОМ» 2-3.5-252-2008.

Мурзаханов Гумер Хасанович,
д.т.н., профессор, советник генерального директора, директор МГЦ ГУП «Мосгаз»

✉ e-mail: MurzakhanovGK@mos-gaz.ru
тел.: +7 (919) 106-08-39

Марницын Александр Сергеевич,
инженер МГЦ ГУП «Мосгаз»

✉ 105120, г. Москва, Мрузовский пер., д. 11,
e-mail: marnitsin@rambler.ru