

## Прочность и надежность трубопроводных систем\*

А. Я. Красовский, И. В. Орыняк

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Разработаны аналитические и численные методы решения задач о напряженно-деформированном и предельном состоянии трубопроводных систем, в том числе при наличии в них дефектов. Исследовано сопротивление трубных сталей разрушению в процессе длительной эксплуатации. Разработаны методология и программное обеспечение для оценки напряженно-деформированного состояния с целью продления ресурса действующих трубопроводов. Выполненные разработки применены для повышения надежности трубопроводных систем Украины.*

**Ключевые слова:** прочность, надежность, трубопроводные системы, расчет напряжений, деградация сталей, компьютерные программы, диагностика.

**Введение.** Трубопроводные системы широко используются в различных отраслях промышленности (магистральный трубопроводный транспорт, тепловые и атомные электростанции, химическая промышленность, металлургия и др). В основном такие объекты были построены во времена бывшего СССР на основе существовавшей технической политики. В настоящее время обеспечение работоспособности трубопроводных систем приобрело для Украины стратегическое значение, особенно учитывая существенное повышение требований к защите природной среды и снижению рисков эксплуатации. Например, территорию Украины пересекают магистральные газопроводы (>35000 км), нефтепроводы (>8000 км) и аммиакопровод (>1000 км), которые в основном проработали 25...40 лет, а в некоторых случаях – 50 лет и более. Аналогичная ситуация сложилась также в других отраслях промышленности, использующих трубопроводные системы. Поэтому оценка безопасности, надежности и рисков эксплуатации трубопроводных систем актуальна как с точки зрения экономики, так и с точки зрения экологии. Задачи совершенствования методов расчета прочности новых, продления ресурса действующих и оценки риска эксплуатации стареющих трубопроводных систем являются основной целью работы. Несмотря на многолетнюю историю мировых исследований в этом направлении, многие научные вопросы остаются неизученными. Составляющие части данной работы таковы.

Разработка аналитических и численных методов решения задач о напряженно-деформированном и предельном состоянии трубопроводных систем, в том числе при наличии в них дефектов.

Исследование сопротивления трубных сталей разрушению в процессе длительной эксплуатации.

Разработка методологии и программного обеспечения для оценки напряженно-деформированного состояния с целью продления ресурса действующих трубопроводов.

---

\* Работа удостоена премии им. С. П. Тимошенко Национальной академии наук Украины за 2008 год.

Применение выполненных разработок для повышения надежности трубопроводных систем Украины.

Настоящий обзор включает основные работы, опубликованные авторами в течение последних пяти лет, где рассматриваются вопросы, связанные с вышеперечисленными направлениями исследований. Полученные результаты позволяют внести существенный вклад как в развитие научных основ прочности трубопроводов, так и в решение конкретных задач их эксплуатации.

В соответствии с указанными выше четырьмя составляющими частями работы ниже излагаются основные результаты.

**Аналитические и численные методы.** Сложные условия эксплуатации трубопроводов, которые не могут быть учтены при их проектировании, с одной стороны, а также развитие компьютерной техники и формализованных программно-математических средств вычислений, с другой – обусловили разработку аналитических и численных методов анализа напряженного и критических состояний трубопроводов. Большое внимание уделяется гибу трубы как ключевому элементу трубопроводной системы, точность установления и способ представления интегральных балочных характеристик которого определяют эффективность расчета трубопроводной системы в целом. На основании положений теории оболочек сформулирована смешанная математическая постановка задачи для тороидальной оболочки, где в качестве неизвестных рассматриваются силовые компоненты и окружные перемещения точек оболочки. Для длинной оболочки применяется гипотеза плоских сечений. Это позволяет получить численные и аналитические решения для распределения напряжений и интегральных характеристик деформирования точек центральной оси при нагружении гибом трубы внешним моментом, действующим в его плоскости и в перпендикулярной плоскости, с учетом геометрически нелинейных эффектов, возникающих для тонкостенной оболочки, дополнительно нагруженной внутренним давлением [1–5].

Выполнены исследования так называемого “подкрепляющего эффекта”, когда с ростом внутреннего давления уменьшаются не только начальная овализация (отклонения от идеально круговой формы сечения гибом трубы), но и приобретенная в результате нагружения внешним моментом. При сопряжении гибом трубы с другими элементами трубопроводной системы (фланцы, прямые участки труб) возникают краевые эффекты, поскольку характер их деформирования принципиально разный [6–8]. Предложен аналитический подход к описанию этих эффектов, суть которого состоит в решении дифференциальных уравнений четвертой степени относительно неизвестных коэффициентов в разложении для тангенциальных перемещений. Получено приближенное решение, которое имеет елочную структуру и записывается через функции Крылова. В качестве альтернативных развиты два численных подхода, которые сводятся к решению задачи Коши для дифференциальных уравнений четвертой и восьмой степени соответственно. В результате сопоставления полученных решений с экспериментальными данными подтверждена достаточная точность расчетов.

Рассмотрено поведение гибом трубы как оболочки при гармоническом нагружении. Впервые введено понятие динамической интегральной податливости гибом трубы и получены аналитические выражения для него в зависи-

мости от частоты нагружения и геометрических характеристик [9–11]. Это позволяет представить гиб в виде балочного элемента с переменной податливостью и успешно решить некоторые динамические задачи для коротких тонкостенных трубопроводов с криволинейными элементами методами теории балок, а не оболочек с обеспечением точности расчетов. Для трубопроводов, находящихся в произвольной среде с нелинейными характеристиками взаимодействия, разработана эффективная численная итерационная процедура анализа напряженно-деформированного состояния с учетом возможного наличия опор и разветвлений [5, 12, 13]. Исходные уравнения равновесия и геометрические уравнения записаны в геометрически нелинейной постановке и дополнены граничными условиями, в частности определены аналитически для полубесконечной трубы при продольно-поперечном упругом изгибе. Разработаны аналитические процедуры установления критической силы для трубы в идеально пластической почве при горизонтальной и вертикальной формах потери устойчивости. Исследовано влияние ограниченной длины трубы на критическое сжимающее усилие.

Наличие дефектов формы и изъянов металла в трубопроводах приводит к локальному перераспределению напряжений в их окрестности. Важной характеристикой локального напряженного состояния вокруг трещин как наиболее опасных дефектов является коэффициент интенсивности напряжений (КИН). Предложен ряд эффективных инженерных подходов к определению КИН.

Подходы, основанные на методе весовых функций, позволяют при наличии решений для некоторого распределения напряжений определить значение КИН при любом другом законе нагружения берегов трещины [14]. Эти решения используются для толстостенных труб. Подходы, базирующиеся на методе сосредоточенной податливости, дают возможность использовать известные значения КИН для полосы с краевой трещиной при анализе других конфигураций тел с трещинами [15–19]. Так, получены аналитические решения для труб с осевыми, в том числе множественными, и окружными трещинами, длягиба трубы с осевыми трещинами, что дало возможность впервые аналитически исследовать влияние геометриигиба на значение КИН и показать их отличие от решений для прямой трубы. Также впервые исследован геометрически нелинейный эффект влияния внутреннего давления на КИН в тонкостенных трубах, когда увеличение давления приводит не к пропорциональному, а к несколько замедленному росту КИН.

Другой важной характеристикой состояния трубы с дефектом является предельное давление вязкого разрушения. На основании теории идеальной пластичности построен ряд статически допустимых решений для распределения напряжений в трубах с продольными дефектами. Они учитывают геометрические размеры и форму дефекта, действие осевых сил, размещение дефекта (внутри стенки, на внешней или на внутренней поверхностях), взаимодействие множественных дефектов и т.д. [7, 14].

На рис. 1 показано влияние формы и относительной длины трещины  $\lambda = l/\sqrt{Rt}$  ( $l$  – полудлина трещины,  $R$  – радиус трубы,  $t$  – толщина стенки трубы) на остаточное безразмерное предельное давление  $\alpha$  ( $\alpha = 1$  соответствует прочности бездефектной трубы).

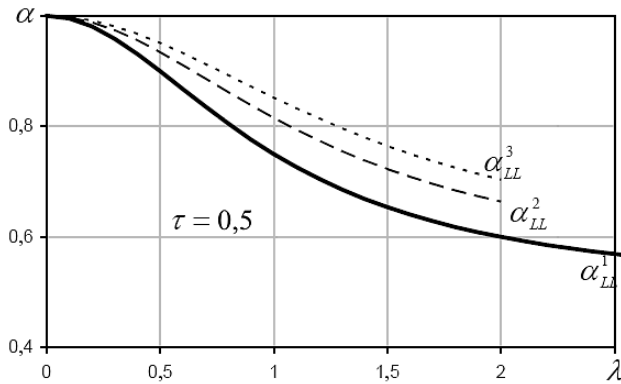


Рис. 1. Влияние формы и относительной длины трещины на безразмерное предельное внутреннее давление:  $\alpha_{LL}^1, \alpha_{LL}^2, \alpha_{LL}^3$  — соответственно для прямоугольной, полуэллиптической и параболической трещин;  $\tau$  — относительная толщина неповрежденной части стенки трубы.

Впервые объяснено различие между предельным состоянием при вязком разрушении для поверхностных и сквозных трещин и теоретически обоснована возможность “течи перед разрушением”, когда развитие поверхностного дефекта в глубь толщины стенки не приводит к немедленному дальнейшему его развитию вдоль оси трубы.

**Трещиностойкость трубных сталей.** Для оценки предельного состояния трубопроводов определяющими являются исследования сопротивления трубных сталей разрушению и их деградации в процессе длительной эксплуатации. Существенную часть данной работы составляют результаты, полученные при изучении механизмов и закономерностей деградации и разрушения трубных сталей [1, 14, 20–25]. Специфика таких сталей заключается, в частности, в том, что они используются для труб с относительно небольшими толщинами стенок, в связи с чем возникают трудности при экспериментальном определении характеристик трещиностойкости и их применении при оценке предельного состояния трубопроводов. В основу этой части работы положены выполненные авторами разработки по механике разрушения, в частности так называемый “локальный подход” к проблеме разрушения конструкционных материалов.

В качестве примера применения этого подхода приведены основные положения предложенной в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины двухпараметрической модели разрушения [1, 21, 24], соотносящей глобальный и два локальных параметра разрушения с условиями текучести на контуре пластической зоны в окрестности вершины трещины. Изучены механизмы разрушения, в том числе особенности старта и роста трещин при хрупком, квазихрупком и вязком разрушениях, что имеет значение для определения характеристик трещиностойкости трубных сталей. Особое внимание уделено изучению формирования так называемой зоны вытягивания в вершине трещины [21, 26]. Поскольку при возникновении зоны вытягивания основную роль играют пластическое затупление вершины и старт трещины, ее геометрические параметры коррелируют с трещиностойкостью материала.

Для досконального изучения этих процессов применяются разработанные два метода стереоскопических измерений профиля зоны: на одной поверхности излома; путем наложения прецизионно сопряженных профилей двух противоположных поверхностей изломов. Получены важные экспериментальные зависимости трещиностойкости трубных сталей от температуры, скорости и условий нагружения, геометрических размеров образцов. Особое внимание уделено изучению явления вязкохрупкого перехода в трубных сталях, определяющего их работоспособность при разных климатических условиях, и толкованию критической температуры вязкохрупкого перехода как количественной меры трещиностойкости металлов. Термодинамический анализ процесса вязкохрупкого перехода показывает, что зависимость трещиностойкости от температуры и скорости нагружения количественно описывается на основании представления о термически активированном пластическом течении в пределах пластической зоны и атермическом характере хрупкого разрушения. Это позволяет сделать важные обобщения относительно воздействия на трещиностойкость трубных сталей температуры, геометрических размеров образцов, скорости нагружения и предложить эффективные методы прогноза зависимости трещиностойкости сталей, критической температуры их перехода от этих и некоторых других факторов.

Важным при определении предельного состояния трубопроводов является требование корректной оценки последствий процесса деградации механических свойств трубной стали в течение длительной эксплуатации трубы. При изучении этого явления представляет интерес работа [20], где два сегмента нефтепровода, который эксплуатировался более 30 лет, вместе с таким же сегментом, но “архивной”, т.е. пролежавшей 30 лет в запасе, трубы, детально исследовались с помощью различных физико-механических методов (рис. 2).

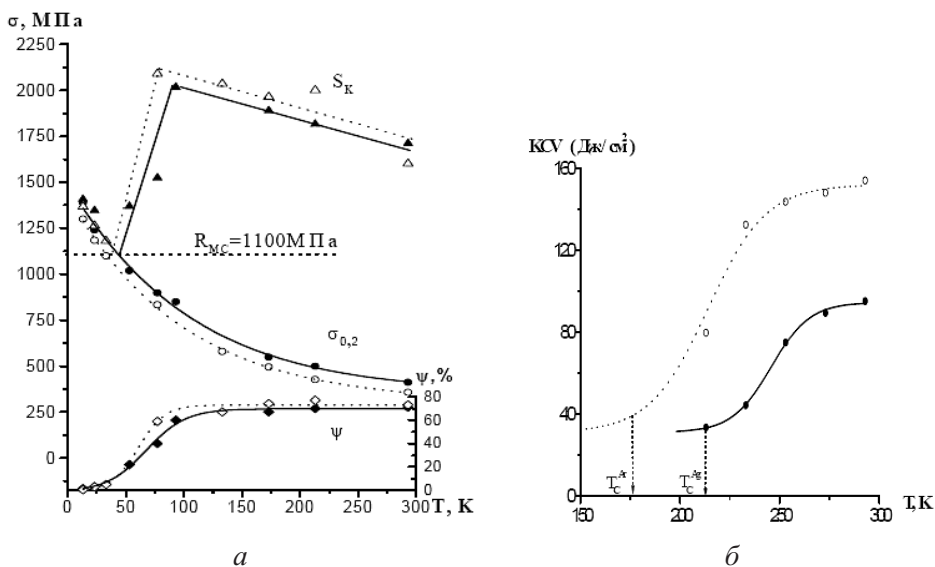


Рис. 2. Температурные зависимости механических свойств (а) и ударной вязкости (б) стали 17ГС в исходном (архивном) состоянии (пунктирные линии) и после эксплуатации в течение 30 лет (сплошные линии) на магистральном нефтепроводе.

Результаты исследования сравнивались с целью идентификации степени деградации стали. Использование для анализа полученных данных вышеуказанной концепции “локального подхода” к проблеме разрушения показывает, что рост предела текучести стали после 30-летнего “старения” под напряжением является главной причиной существенного снижения трещиностойкости. Установлено, что относительно незначительное (15...18%) увеличение предела текучести приводит к повышению на 40°C критической температуры перехода и к двукратному уменьшению трещиностойкости. Эти эффекты учитывались при оценке остаточного ресурса нефтепровода.

**Программное обеспечение.** Настоящая часть работы посвящена созданию методологии и программного обеспечения для оценки состояния действующих трубопроводов с целью продления их ресурса. При оценке технического состояния конструктивных элементов, находящихся в эксплуатации, используются нормативные документы как на их проектирование и строительство, так и для анализа “соответствия назначению” (СН) [27, 28]. Преимущество, безусловно, имеют стандарты, согласно которым конструкция проектировалась. Именно на основании стандартов устанавливаются основные принципы расчета, вид, величина и комбинация нагрузок; критерии предельного состояния; система коэффициентов запаса прочности. Однако в специализированных проектировочных нормах нельзя предусмотреть все предельные состояния и повреждающие факторы, которые имеют место во время эксплуатации. Кроме того, эти нормы часто бывают слишком консервативными. Их целью, в частности, является гарантирование высокого качества строительства и надежности при априорно принятых наиболее опасных условиях эксплуатации. Исходя из этого можно заключить, что стандарты СН должны быть более гибкими и прогрессивными [29]. Они должны оперировать теми же или близкими к базовым понятиями, критериями и принципами расчета, что и стандарты для проектирования. В противном случае кроме возможных противоречий необходимо будет признать, что проектируемая конструкция не имеет ничего общего с реальной. Согласованность и сбалансированность двух групп документов являются важной предпосылкой квалифицированного анализа технического состояния конструкции [30].

Разработка методологических основ включает в себя обоснование применения деформационных критериев для случаев, когда нагрузка является жесткой, т.е. контролируется заданными перемещениями, например от сдвига почвы [6]. С практической точки зрения при анализе остаточной прочности элемента конструкции важно использовать принципы категоризации напряжений, учитывающие их разную потенциальную опасность, различную природу возникновения и протяженность действия. Это позволяет развивать критерии допустимого состояния для дефектов формы: вмятин; осевых и угловых несоосностей труб. На примере предварительно искривленного по заданной траектории криволинейного участка трубопровода рассмотрена упругопластическая задача деформирования трубы, нагруженной растущим внутренним давлением [31]. Результаты расчета показывают, что с увеличением внутреннего давления моментные напряжения в трубе постоянно уменьшаются, а по достижении окружными напряжениями предела текучести они релаксируют очень интенсивно и могут исчезнуть.



Для анализа трещиноподобных дефектов развиты современные двух-критериальные подходы механики разрушения, которые, с одной стороны, используют классические критерии трещиностойкости, с другой – критерии теории предельного пластического состояния [14]. Графически это представляется в виде диаграммы оценки разрушения, построенной в координатах  $K_r - S_r$ , которые являются мерой приближения к хрупкому ( $K_r = 1$ ) и вязкому ( $S_r = 1$ ) разрушению. Область разрушения от области неразрушения отделяется предельной кривой, состоящей из трех прямолинейных участков, которые разделяют точки хрупкости и вязкости.

Вводится понятие допустимой области, дополнительно учитывающей интегральный коэффициент запаса прочности  $k$ , определяемый в нормах на проектирование. Если расчетная точка расположена внутри допустимой области, то элемент находится в рабочем состоянии даже с учетом дефекта. Реальный коэффициент запаса прочности определяется графически как отношение длины отрезка  $OA_2$  к длине  $OA$  (рис. 3).

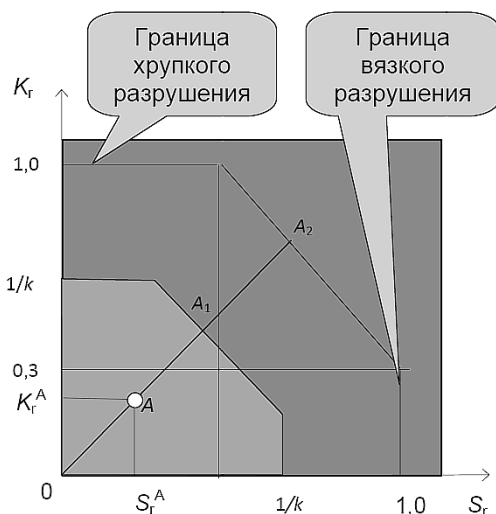


Рис 3. Диаграмма оценки разрушения для определения допустимого состояния и реальных коэффициентов запаса прочности элемента с трещиной.

В качестве альтернативы детерминистическим методам установления допустимого состояния трубопроводов с дефектами, оперирующим понятием критического состояния и основанным на определенной системе коэффициентов запаса прочности, развита методология, которая базируется на заданных показателях надежности [32]. С этой целью предложен новый подход к вероятностному описанию исходных статистических данных, в котором учитывается их реальная гистограмма и рассматривается зафиксированная в заданной выборке максимальное значение статистического параметра  $X_{\max}$  как случайная величина [22, 23]. Теоретически проанализирован полученный вероятностный закон при полиномиальном распределении исходной выборки.

Важной задачей при проведении вероятностного анализа является оценка точности, с которой диагностический внутритрубный поршень определяет наличие дефекта и его размеры. На основании разработанной методики

сопоставления результатов двух проходов поршня установлены такие стохастические характеристики, как вероятность нахождения дефектов и реальное их количество, зависимости между вероятностью обнаружения дефектов и их размерами (глубина), точность определения размеров дефектов и средней скорости их роста во время эксплуатации.

Для повышения эффективности процедуры принятия решений разработана информационно-аналитическая система для текущего мониторинга реального состояния и обеспечения целостности трубопроводов с целью продления их ресурса [12, 33–35]. Создание такой системы позволяет автоматизировать сбор, хранение и передачу информации о пространственном положении, текущем техническом состоянии магистрального трубопровода; конкретизировать объект мониторинга и представить обнаруженные дефекты в соответствии с правилами объединения и схематизации; прогнозировать кинетику зарождения и распространения дефектов; определять остаточный ресурс и планировать сроки дефектоскопического контроля и ремонтов; обеспечивать операторов трубопроводов рекомендациями относительно предельно допустимых размеров дефектов и выбора параметров испытания трубопровода при повышенном давлении и т.п. Наряду с расчетами механического состояния элемента выполняются расчеты риска для реальных и гипотетических дефектов, на основе оценки вероятности отказа учитываются гипотетические социальные и экономические последствия. По результатам определения опасности дефектов принимаются управленческие решения относительно первоочередности проведения ремонтов.

**Повышение надежности трубопроводных систем.** Указанные выше разработки аналитических и численных методов решения задач глобального и локального напряженно-деформированного, а также предельного состояния трубопроводов, фундаментальные и экспериментальные исследования сопротивления трубных сталей разрушению в процессе длительной эксплуатации, созданные методология, программное обеспечение и разработки нормативных документов для продления ресурса действующих трубопроводов позволяют выполнять системные работы по повышению надежности трубопроводных систем Украины [20, 27–30, 32–34, 36–42]. Проанализированы современные отечественные и мировые нормы обеспечения работоспособности трубопроводных систем, что важно в условиях нынешней гармонизации отечественной нормативной базы с европейскими подходами. Выполнен анализ существующих критериев прочности и надежности трубопроводов на стадии их проектирования и эксплуатации с использованием понятия риска и системы обеспечения целостности, в частности на основе процедуры оценки СН [27–30]. На базе разработанной компьютерной экспертной системы проведена диагностика технического состояния магистрального газопровода-отвода “Иванков–Зеленый Мыс–Чернобыль” и продлен его ресурс [36, 41]. С этой целью разработана процедура определения функции распределения вероятностей глубины коррозионных дефектов для оценки вероятности разрушения при использовании косвенных статистических данных в отсутствие реальной репрезентативной статистической выборки. Получена количественная оценка вероятности разрушения участка газопровода протяженностью 74,2 км в зависимости от возможного количества коррозионных дефектов.



Разработана приближительная, достаточно консервативная количественная методика оценки социальных последствий отказов, обусловленных разгерметизацией газопровода с его последующим возгоранием. Определены социальные риски для всего газопровода. Оценочные значения риска удовлетворяют критерию допустимого показателя, регламентируемого отечественным законодательством.

Сформулированные методологические принципы и разработанная компьютерная экспертная система использовались [33, 40] для оценки текущего технического состояния, остаточной прочности и долговечности сложных пространственных трубопроводных систем АЭС с учетом основных факторов нагрузки и наличия дефектов. Расчет глобального напряженного состояния разветвленных трубопроводов АЭС Украины проводится методом начальных параметров. Оценка влияния имеющихся дефектов выполнена с применением двухкритериального подхода, основные расчетные параметры которого определены с помощью новейших авторских решений. Дальнейшее развитие получила концепция “течь перед разрушением”, в которой существенно развито аналитическое моделирование для расчета предельной нагрузки трубы с произвольным дефектом. На основе этого установлена количественно граница между состояниями течи и разрушения для трубы с поверхностным дефектом под действием внутреннего давления, что оказывает определяющее влияние на условия надежного обнаружения безопасных стадий повреждений трубопроводов.

Выполнено исследование возможности поднятия рабочего давления на магистральном аммиакопроводе “Тольятти–Одесса” (территория Украины) [42] в связи с необходимостью увеличения пропускной способности. Получены статистические данные параметров эксплуатации, построены тренды изменения этих параметров во времени для определения основных тенденций в будущем. Проведены гидравлические расчеты внутреннего давления по трассе трубопровода с учетом реальных коэффициентов гидравлического сопротивления и профиля трассы аммиакопровода. Осуществлен вероятностный анализ безопасности эксплуатации аммиакопровода с постулированными эксплуатационными дефектами, оценено текущее техническое состояние и его изменения в будущем путем сравнения значений вероятностей разрушения. Предложены конкретные технические и организационные меры для обеспечения безаварийной эксплуатации аммиакопровода с повышенным давлением.

Эффективность разработанной компьютерной экспертной системы для оценки прочности, надежности и рисков эксплуатации показана [42, 43] на примерах диагностирования различных магистральных трубопроводов: нефтепровода ( $\varnothing 1020$  мм) “Кременчуг–Херсон”, газопровода ( $\varnothing 1420$  мм) “Братство”, аммиакопровода ( $\varnothing 355,6$  мм) “Тольятти–Одесса”, трубопровода ( $\varnothing 720$  мм) с латвийского нефтяного коридора и др. Для каждого из них проведен сравнительный анализ результатов диагностики с использованием данных неразрушающего контроля в разные периоды эксплуатации. Особое внимание уделено географической навигационной системе, результатам внутритрубных инспекций, возможной эксплуатационной деградации материалов и сварных швов, расчету глобального и локального (в окрестности обнаруженных дефектов) напряженно-деформированного и предельного состояний.

Нормативы разных стран и современные методы механики разрушения применяются для расчета дефектов и прогноза остаточного ресурса. Предложен метод категоризации обнаруженных дефектов с фактическими коэффициентами запаса прочности с целью упорядочения очередности ремонта дефектов, что существенно снижает объемы ремонтов и инспекций. По результатам систематического измерения перемещений грунтовых реперов на сдвиго-опасных участках магистральных трубопроводов выполнены расчеты дополнительных напряжений в трубах и определено их влияние на прогнозируемый остаточный ресурс.

## Резюме

Розроблено аналітичні і числові методи розв'язку задач щодо напружено-деформованого і граничного станів трубопровідних систем, у тому числі при наявності в них дефектів. Досліджено опір трубних сталей руйнуванню в процесі довготривалої експлуатації. Розроблено методологію і програмне забезпечення для подовження ресурсу діючих трубопроводів. Представлені розробки використовуються для підвищення надійності трубопровідних систем України.

1. *Krasowsky A. J.* On the origin of the “local approach” to brittle fracture of metals // *Strength, Fracture and Complexity*. – 2004. – **2**, No. 4. – P. 165 – 208.
2. *Орыняк И. В., Радченко С. А.* Анализ деформаций гiba трубы на основе смешанного подхода. Сообщ. 1. Пространственный изгиб по Сен-Венану // *Пробл. прочности*. – 2004. – № 3. – С. 23 – 51.
3. *Орыняк И. В., Радченко С. А.* Анализ деформаций гiba трубы на основе смешанного подхода. Сообщ. 2. Пространственный изгиб с учетом внутреннего давления // *Там же*. – № 4. – С. 46 – 59.
4. *Орыняк И. В., Радченко С. А.* Анализ деформаций гiba трубы на основе смешанного подхода. Сообщ. 3. Расчет перемещений оси гiba методом начальных параметров // *Там же*. – № 5. – С. 23 – 35.
5. *Орыняк И. В., Богдан А. В.* Числова процедура розрахунку геометрично нелінійної задачі Сен-Венана для пружної замкнутої оболонки з круговою віссю // *Машинознавство*. – 2006. – № 7. – С. 23 – 32.
6. *Орыняк И. В., Богдан А. В.* Проблема больших перемещений подземных трубопроводов. Сообщ. 1. Разработка численной процедуры // *Пробл. прочности*. – 2007. – № 3. – С. 51 – 74.
7. *Орыняк И. В., Радченко С. В.* Классический подход к анализу влияния краевых условий на напряжения и податливость упругого гiba трубы // *Там же*. – 2005. – № 4. – С. 64 – 94.
8. *Орунук I. V. and Radchenko S. A.* Analytical and numerical solution for an elastic pipe bend at in-plane bending with consideration for the end effect // *Int. J. Solids Struct.* – 2007. – **44**. – P. 1488 – 1510.

9. Орыняк И. В., Радченко С. А., Батура А. С. Расчет собственных и вынужденных колебаний трубопроводной системы. Сообщ. 1. Анализ колебаний пространственной стержневой системы // Пробл. прочности. – 2007. – № 1. – С. 79 – 93.
10. Орыняк И. В., Радченко С. А., Батура А. С. Расчет собственных и вынужденных колебаний трубопроводной системы. Сообщ. 2. Динамическая жесткостьгиба трубы // Там же. – № 2. – С. 52 – 71.
11. Батура А. С., Орыняк И. В., Радченко С. А. Анализ гармонических колебаний трубопроводных систем с помощью программного комплекса PipeMaster // Надійність і довговічність машин та споруд. – 2007. – № 28. – С. 148 – 165.
12. Радченко С. А., Орыняк И. В., Богдан А. В. Численная процедура расчета напряженно-деформированного состояния трубопровода при больших перемещениях // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин / Під ред. Б. Є. Патона. – Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 319 – 323.
13. Орыняк И. В., Богдан А. В. Проблема больших перемещений подземных трубопроводов. Сообщ. 2. Устойчивость прямолинейного трубопровода при идеально пластическом деформировании грунта // Пробл. прочности. – 2007. – № 4. – С. 108 – 127.
14. Орыняк И. В. Двухкритериальный подход к оценке целостности элементов конструкций // Прочность материалов и конструкций. – Киев: Академперіодика, 2005. – С. 457 – 502.
15. Орыняк И. В., Розгонюк В. В., Богдан А. В. Эффект Бразье длягиба трубы в присутствии осевой трещины // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. – 2005. – Вип. 6. – С. 81 – 93.
16. Орыняк И. В., Розгонюк В. В., Яковлева Е. С. Обобщение метода Чжена и Финни для расчета коэффициента интенсивности напряжений для несквозных трещин в толстостенном кольце // Пробл. машиноведения и надежности машин. – 2006. – № 2. – С. 37 – 46.
17. Орыняк И. В., Розгонюк В. В. Врахування геометричної нелінійності при розрахунку тонкостінних пружних труб з довгими осьовими тріщинами // Машинознавство. – 2006. – № 1. – С. 3 – 10.
18. Орыняк И. В., Богдан А. В. Розрахунок коефіцієнтів інтенсивності напружень для двох довгих симетричних поздовжніх поверхневих тріщин у згині труби // Там же. – № 6. – С. 3 – 8.
19. Орыняк И. В., Яковлева Е. С., Розгонюк В. В. Применение метода Чжена и Финни для расчета коэффициентов интенсивности напряжений в тонкостенных трубах с длинными осевыми трещинами с учетом геометрической нелинейности // Пробл. прочности. – 2007. – № 5. – С. 5 – 18.
20. Kotrechko S. O., Krasowsky A. J., Meshkov Yu. Ya., Torop V. M. Effect of long-term service on the tensile properties and capability of pipeline steel 17GS to resist cleavage fracture // Int. J. Press. Vess. Piping. – 2004. – 81. – P. 337 – 344.

21. Красовский А. Я. Механизмы и модели разрушения материалов // Прочность материалов и конструкций. – Киев: Академперіодика, 2005. – С. 440 – 449.
22. Орыняк И. В., Розгонюк В. В., Бородий М. В. Проблема “хвостов” в исходных вероятностных данных. Сообщ. 1. Анализ аналитических и численных методов определения вероятности разрушения // Надійність і довговічність машин і споруд. – 2005. – Вип. 24. – С. 39 – 51.
23. Орыняк И. В., Розгонюк В. В., Бородий М. В., Беккер М. В. Проблема “хвостов” в исходных вероятностных данных. Сообщ. 2. Решение проблемы на примере оценки вероятности разрушения участка газопровода // Там же. – Вип. 25. – С. 39 – 51.
24. Красовський А. Я. Про “локальний підхід” до крихкого руйнування конструкційних матеріалів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – № 2. – С. 39 – 44.
25. Krasowsky A. J. The experience on safety, reliability and risk assessment of some Ukrainian, Russian and Latvian transit pipelines // Safety, Reliability and Risk Associated with Water, Oil and Gas Pipelines / G. Pluvinage and M. H. Elwany (Eds.). – Dordrecht: Springer, 2008. – P. 219 – 231.
26. Красовский А. Я. Хрупко-вязкий переход в металлах // Прочность материалов и конструкций. – Киев: Академперіодика, 2005. – С. 449 – 457.
27. Розгонюк В. В., Руднік А. А., Орияк І. В., Білик С. Ф. Про систему керування цілісністю магістральних трубопроводів. Поняття ризик-аналізу // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004. – № 3 (12). – С. 120 – 125.
28. Беккер М. В., Орияк І. В., Розгонюк В. В. Про необхідність удосконалення нормативно-технічної документації в розрахунках на міцність нафто- і газопроводів з дефектами // Там же. – С. 116 – 119.
29. Красовский А., Орыняк И., Розгонюк В. Современные нормы обеспечения работоспособности объектов длительной эксплуатации // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / Під ред. В. В. Панасюка. – Львів, 2004. – С. 377 – 393.
30. Розгонюк В. В., Орияк І. В., Білик С. Ф., Бородий М. В. Розробка Сертифіката відповідності в рамках Декларації безпеки для подовження ресурсу газопроводу // Нафтова і газова пром-сть. – 2006. – № 2. – С. 33 – 35.
31. Орыняк И. В., Богдан А. В., Бородий М. В. и др. Использование категоризации напряжений и деформационных критериев при оценке прочности магистральных трубопроводов // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2007. – № 4. – С. 12 – 23.
32. Орияк І. В., Бородий М. В., Батура А. С. Наукові і організаційні засади впровадження ризик-аналізу в практику управління цілісністю магістральних трубопроводів // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 11 – 15.

33. Красовский А. Я., Орыняк И. В., Радченко С. А. и др. Оценка прочности трубопроводов АЭС с учетом их фактического состояния с помощью программного комплекса “3D PipeMaster” // Проблемы ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 171 – 176.
34. Красовський А. Я. Створення систем моніторингу технічного стану трубопроводів і об’єктів газо- та нафтопереробної промисловості // Проблемы ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 305 – 308.
35. Красовський А. Я., Орыняк И. В., Торон В. М. та ін. Методологія і експертна система для поточного моніторингу реального стану і забезпечення цілісності трубопроводів з метою подовження їх ресурсу // Проблемы ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 309 – 314.
36. Торон В. М., Красовский А. Я., Орыняк И. В. и др. Опыт использования экспертной системы “Прочность” для оценки технического состояния газопровода-отвода “Иванков–Зеленый Мыс–Чернобыль” // Нефть и газ. – 2006. – 4. – С. 12 – 18.
37. Орыняк И. В., Василюк В. М., Богдан А. В., Стецьків М. В. Досвід розрахування процесу протягування трубопроводу через кожух під р. Псел // Нафтова і газова пром-сть. – 2006. – № 3. – С. 29 – 32.
38. Орыняк И. В., Василюк В. М., Радченко С. А., Батура А. С. Моделювання поведінки повітряного переходу при руйнуванні трубопроводу під час гідравлічних випробувань // Там же. – № 4. – С. 27 – 32.
39. Орунук I. V., Bogdan A. V., and Vasylyuk V. M. Simulation of the process of drawing a pipe through the pipeline with a larger diameter // Proc. of 6th Int. Pipeline Conf. (IPC 2006, Sept. 25–29, 2006). – Calgary, Alberta (Canada), 2006. – 2. – P. 931 – 942.
40. Орунук I. V. Leak and break models of ductile fracture of pressurized pipe with axial defects // Proc. of 6th Int. Pipeline Conf. (IPC 2006, Sept. 25–29, 2006). – Calgary, Alberta (Canada), 2006. – 3. – Pt. A. – P. 41 – 56.
41. Розгонюк В. В., Орыняк И. В., Билык С. Ф., Бородий М. В. Использование метода риск-анализа для оценки социальных рисков участка газопровода “Иванков–Зеленый Мыс–Чернобыль” // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2006. – № 3. – С. 56 – 61.
42. Бондік В. А., Орыняк И. В., Андріанов О. А. та ін. Збільшення пропускної спроможності магістрального аміакопроводу шляхом підвищення робочого тиску. Обґрунтування безпечності та надійності експлуатації // Хім. пром-сть. – 2007. – № 4. – С. 51 – 57.
43. Орыняк И. В., Радченко С. А. Аналитическое решение задачи Бразье для тонкостенных труб с начальным несовершенством формы поперечного сечения при действии давления // Пробл. прочности. – 2008. – № 3. – С. 100 – 123.

Поступила 11. 01. 2010