

На правах рукописи



АЛБАГДАДИ Бара Мохсен Хоссеин

**ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ
МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ
РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПРОДОЛЬНЫХ ТРЕЩИН
ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕБЕР**

Специальность:

01.02.06 – динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Челябинск – 2019

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» на кафедре технической механики.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Чернявский Александр Олегович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
Барышов Сергей Николаевич,
заместитель начальника отдела главного
механика ООО «Газпром добыча Оренбург»

доктор технических наук,
Лепихин Анатолий Михайлович,
главный научный сотрудник Красноярского
филиала Института вычислительных
технологий СО РАН – Специального
конструкторско-технологического бюро
«Наука»

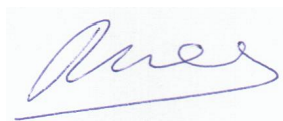
Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
университет», г. Тюмень

Защита диссертации состоится 26 апреля 2019 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.10 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и на сайте www.ugatu.su.

Автореферат разослан «___»_____ 2019 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.В. Месропян

Общая характеристика работы

Проблема безопасной и надежной эксплуатации магистральных трубопроводов очень важна с экономической точки зрения. Общий ущерб от таких аварий в России составляет, по данным Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, около 40 млрд рублей в год. Средний ущерб от одного инцидента превышает 30 млн рублей и растет на 15-20% в год, что свидетельствует о росте доли тяжелых аварий. Одним из наиболее тяжелых типов аварий является протяженное разрушение, при котором длина продольной трещины может достигать сотен метров – рис. 1. Работа посвящена анализу только этого типа разрушения.

В разработку проблемы предотвращения развития трещин в трубопроводах значительный вклад внесли Абакумов А.И., Алексеев А.А., Будилов И.Н., Буклешев Д.О., Глушков С.В., Гумеров А.К., Гумеров К.М., Жернаков В.С., Зайнуллин Р.С., Кушнарченко В.М., Лисин Ю.В., Макаров Г.И., Маркочев В.М., Матвиенко Ю.Г., Морозов Е.М., Мурзаханов Г.Х., Мусаев С.Д., Неганов Д.А., Полуян Л.В., Пышминцев И.Ю., Салганик В.М., Суриков В.И., Тимашев С.А., Фридлянд Я.М., Хажинский Г.М., Харионовский В.В., Харисов Р.А., Харисов Р.А., Чикишев Д.Н., Higuchi R., Kalwa S., Makino H., Mondry A., Nonn A., Scheider I., Takahashi H., Takeuchi I., Völling A. и др. Однако, несмотря на значительные усилия и успехи в этой области, требование повышения рабочих давлений и использования более прочных (нередко менее



Рис.1. Протяженное разрушение трубопровода

пластичных) сталей делают задачу борьбы с протяженными разрушениями **по-прежнему актуальной**.

В качестве возможного способа борьбы с протяженным разрушением рассматривается формирование кольцевых ребер (утолщений) на трубах. Технология формирования таких ребер была разработана в Челябинском политехническом институте О.Ф. Чернявским и А.В. Ильиным. Ребра (рис. 2а) создаются за счет циклических теплосмен путем некоторого укорочения трубы. Технология не требует механических воздействий и дорогого оборудования; она значительно дешевле, чем повышение вязкости материала трубы за счет легирования или применение отдельно монтируемых муфт.

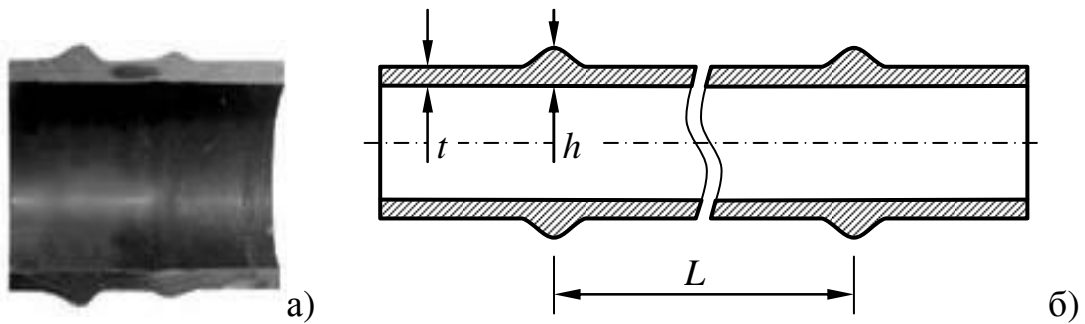


Рис. 2 Ребро на трубе – лабораторный образец (а) и эскиз применения (б)

Для удовлетворения существующим стандартам, требующим локализации разрушения в пределах одной трубы (25 м для магистральных трубопроводов) может оказаться достаточно 2 ребер на одной трубе ($L \approx 12$ м – рисунок 2б). Упомянутая технология позволяет создавать ребра с толщиной $h \sim 2...3t$ (рисунок 2б), толщины порядка $h \sim 5t$ труднодостижимы по технологическим причинам. Однако эффективность таких ребер в смысле возможности предотвращения протяженного разрушения ранее не исследовалась.

В связи с этим была поставлена **цель работы**: разработка методики и выполнение расчетной оценки эффективности применения ребер для снижения опасности разрушения магистральных трубопроводов путем

образования трещин большой длины. Для достижения этой цели поставлены следующие **задачи**:

1. Выполнить оценку возможной эффективности ребер с использованием подходов линейной механики разрушения для случаев квазихрупкого разрушения (трубы из материалов высоких классов прочности с пониженной вязкостью разрушения и большой толщиной стенки, при низкой температуре) и как предварительную оценку для хрупко-вязкого разрушения;

2. Для случая хрупко-вязкого разрушения разработать методику расчета развития протяженной трещины в трубопроводе с учетом сил инерции, пластичности, сложного напряженного состояния, высоких скоростей нагружения, падения давления вследствие течи через раскрывающуюся трещину;

3. Выполнить оценку эффективности ребер технологически достижимых размеров.

Научная новизна работы заключается в

– создании методики расчетной оценки сопротивления труб распространению продольных трещин, отличающейся от существующих одновременным учетом ряда факторов: с одной стороны – особенностей хрупко-вязкого разрушения в зоне трещины, с другой стороны – динамики распространения трещины в трубе, заполненной жидкостью или газом;

– выполнении оценок прочности для новой, не рассматривавшейся ранее конструкции, с учетом как изменений формы, так и возможности управления технологическими остаточными напряжениями в конструкции.

Теоретическая значимость работы обоснована тем, что

– применительно к проблематике диссертации эффективно (т.е. с получением обладающих новизной результатов) использован комплекс существующих численных методов. Разработанный подход позволил преодолеть ограничения существующих методов, рассматривающих отдельные стороны задачи;

– изучены возможности нового, не рассматривавшегося ранее, способа торможения магистральных трещин в трубопроводах за счет одновременного использования изменения формы конструкции (ребра) и благоприятных остаточных напряжений.

Практическая значимость работы заключается в том, что

– определена возможная эффективность предлагаемого метода торможения трещин. Доказано, что для трубопроводов, заполненных жидкостью (нефтепроводы), эта эффективность выше, чем для трубопроводов, заполненных газом;

– разработана методика определения параметров, описывающих хрупко-вязкое разрушение в пакетах программ, не использующих напрямую критерии механики разрушения.

Исследование проведено путем расчетного моделирования процесса в динамической нелинейной постановке, в том числе – с учетом взаимодействия твердотельной конструкции с жидкостью.

Положения, выносимые на защиту:

- сопоставление коэффициентов интенсивности напряжений у вершин трещины в трубе со стенкой постоянной толщины и трубе с ребрами;

- методика задания критерия разрушения при описании развития трещины и невозможности напрямую использовать критериальные величины механики разрушения;

- результаты моделирования, демонстрирующие, что тормозящая роль ребер будет проявляться в случае, когда волна снижения давления в жидкости (вызванного раскрытием трещины) обгонит трещину, распространяющуюся через ребро.

Результаты работы опубликованы в 3 статьях в журналах, входящих в список ВАК, и докладывались на конференциях аспирантов и докторантов Южно-Уральского государственного университета, ученом совете Научно-инженерного центра «Надежность и ресурс больших систем и машин» Уральского отделения РАН.

Основное содержание работы.

Технология создания ребер на трубах, разработанная в Челябинском политехническом институте в рамках исследования явления формоизменения теплонапряженного оборудования (для борьбы с ним) позволяет получать гофры или ребра плавной формы, а также управлять остаточными напряжениями вблизи этих ребер. Ребра создаются за счет циклического действия термических напряжений, при этом максимальные температуры таковы, что исключают фазовые превращения в материале. Ребра создаются из материала трубы за счет ее укорочения. По технологическим причинам максимальное утолщение стенки трубы ограничено несколькими (2...3) начальными толщинами. Создание ребер требует только оборудования для термообработки (индукционный нагрев и водяное охлаждение), механическое оборудование не требуется. Процесс является значительно более дешевым, чем обеспечение вязкости материала трубы за счет легирования или использование специальных муфт, которые некоторые авторы предлагают устанавливать при монтаже трубопровода.

Предварительные оценки.

Предварительная оценка эффективности ребер выполнялась путем сравнения коэффициентов интенсивности напряжений у трещин в гладких трубах (с постоянной толщиной стенки) и трубах с ребрами. Расчеты проводились с применением метода конечных элементов (пакет ANSYS) с сингулярными элементами вблизи вершины трещины – рис. 3. Оценивались только условия старта трещины. Пример результатов расчетов (для трубы диаметром 1000 мм с толщиной стенки 10 мм при давлении 5 МПа) показан на рис. 4.

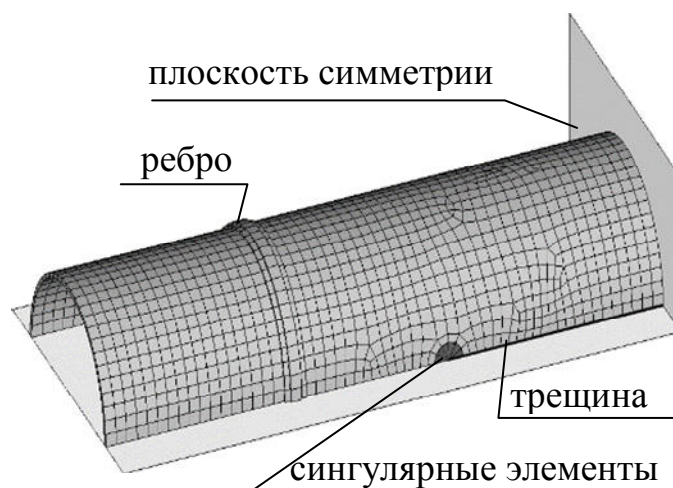


Рис. 3. Конечно-элементная модель

Расчеты показывают, что ребра могут значительно уменьшить коэффициент интенсивности напряжений у вершины трещины, когда трещина находится в окрестности ребра (рис.4). Изгибная жесткость ребра не так высока, как жесткость на растяжение, поэтому после прохождения трещины через ребро коэффициент интенсивности напряжений снова возрастает, но уменьшение минимального коэффициента интенсивности напряжений позволяет надеяться на возможность остановки трещины. Ребра в 2 раза толще стенки трубы обеспечивают снижение K_I на 35...40%, что является довольно обнадеживающим.

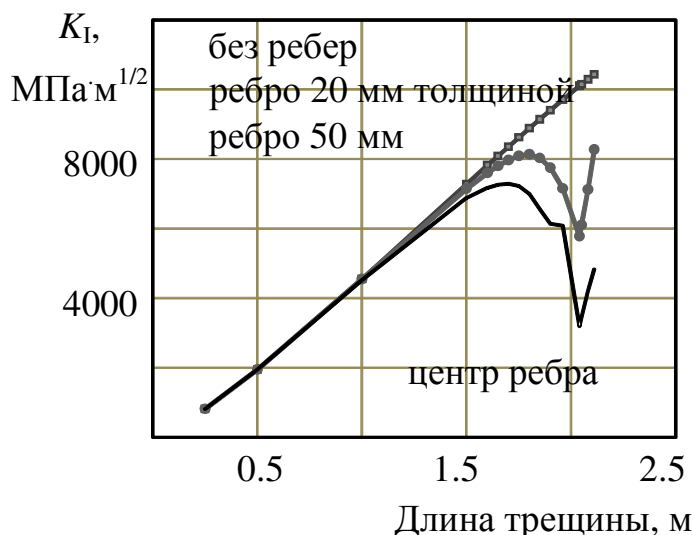


Рис. 4. Расчетные значения коэффициента интенсивности напряжений

Уровень рассчитанных значений коэффициента интенсивности напряжений (КИН) для длинных трещин значительно превышает вязкость разрушения трубных сталей – рис. 5. С увеличением длины трещины значение КИН возрастает и стабилизируется только на очень высоком уровне. При этом стартовавшая трещина должна развиваться неограниченно, что не соответствует практике. Это означает, что подход линейной механики разрушения недостаточен и нужны более точные вычисления.

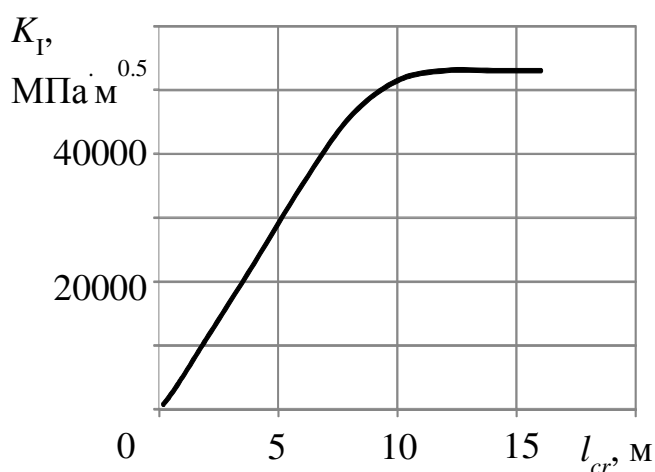


Рис. 5. Коэффициент интенсивности напряжений для длинных трещин

Учет пластичности материала

Высокие значения КИН, полученные в рамках линейно-упругой статической задачи, не позволяют анализировать остановку трещин. Дополнительными факторами, которые могут влиять на результат, являются: упруго-пластическое поведение материала трубы; инерционные силы в случае быстрого распространения трещины; изменение внутреннего давления из-за течи через трещину; разные скорости волн напряжений (сопровождающих движение трещины) в стенке трубы и волн давления в заполняющей трубу газе или жидкости. Эти факторы могут быть учтены при использовании конечно-элементного пакета LS-DYNA, но этот пакет не оперирует критериями механики разрушения (K_I , J -интеграл, CTOD, CTOA и подобными). Вместо этого LS-DYNA использует набор критериев разрушения, основанных на напряжениях или деформациях в конечном элементе; подходящие критерии должны быть выбраны и откалиброваны. Калибровка проводилась на примере стали 17ГС с пределом текучести $\sigma_{0,2} = 345$ МПа, пределом прочности $\sigma_s = 510$ МПа и сужением при разрыве $\delta = 60\%$. Восстановленная по этим значениям истинная диаграмма деформирования (по Рамбергу-Осгуду) показана на рис. 6 в координатах «логарифмическая деформация e – истинное напряжение s ». Разрушение при номинальном напряжении до $0,7\sigma_{0,2}$ может быть описано с использованием предела трещиностойкости ($K_{IQ} = 130 \text{ МПа м}^{0,5}$).

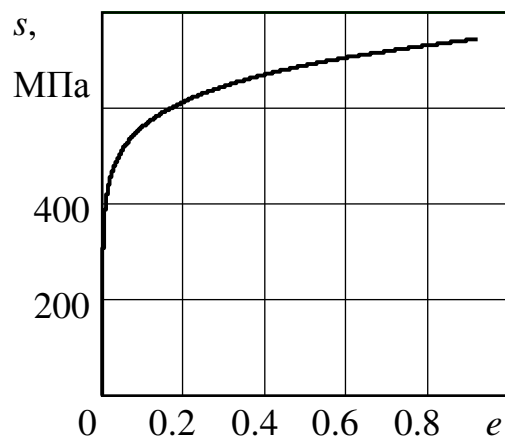


Рис. 6. Диаграмма деформирования

Калибровка модели разрушения в LS-DYNA осуществлялась сравнением давления страгивания трещины, определенного с использованием параметров механики разрушения и с использованием критериев, применяемых в LS-DYNA. Расчеты проводились для номинальных

напряжений $0,36\sigma_{0,2}$, $0,58\sigma_{0,2}$, $0,70\sigma_{0,2}$ и $0,87\sigma_{0,2}$ (последний вариант очевидно некорректен и был взят только для сравнения). Для выбранной модели трубы диаметром 500 мм и толщиной стенки 10 мм это соответствовало давлениям 2,5, 4, 5 и 6 МПа при длинах трещин, обеспечивающая $K_I = K_{IQ}$, равных соответственно 100, 65, 50 и 40 мм.

Критерии, основанные на напряжениях или деформациях в конечном элементе, очень чувствительны к размеру элемента из-за больших градиентов деформации вблизи вершины трещины. Более того, эта чувствительность оказывается разной для разных конструкций (отличающихся, например, длинами трещин – рис. 7). Для устранения зависимостей результата от размера конечных элементов рассмотрена возможность использования модели «нелокального материала», у которого критерий разрушения учитывает состояние материала в области, окружающей рассматриваемую точку (используется усреднение с весовой функцией, убывающей с расстоянием r). Параметры L , p и q весовой функции вида

$$w(\mathbf{r}) = \left[1 + (\mathbf{r}/L)^p \right]^{-q}$$

определялись путем минимизации относительной погрешности

$$\delta = \frac{\max_{m,n}(\varepsilon^*(p,q,L)) - \min_{m,n}(\varepsilon^*(p,q,L))}{\min_{m,n}(\varepsilon^*(p,q,L))}$$

Здесь ε^* - интенсивность пластической деформации, рассчитанная в пакете LS-DYNA при выбранных p , q , L для давления, для которого ANSYS предсказывает $K_I = K_{IQ}$; m и n соответствуют наборам расчетов для различных длин трещин и размеров конечных элементов. Численная

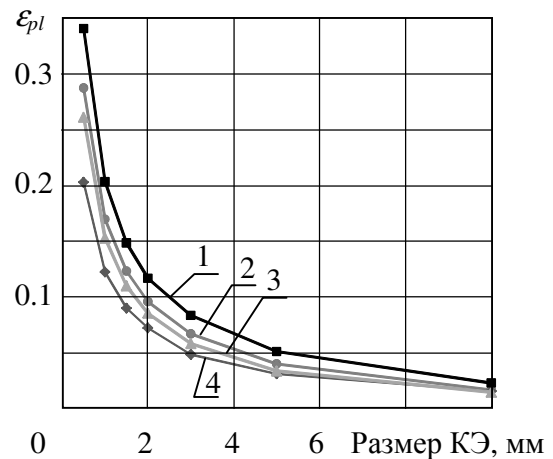


Рис. 7. Пластические деформации в конечном элементе вблизи вершины трещины (расчет LS-DYNA) при давлении, соответствующем старту трещины по критерию K_{IQ} (ANSYS). 1 ... 4 - разная начальная длина трещины

минимизация (рис. 8) позволила найти значения p , q , L , обеспечивающие независимость решения от размера элемента - рис.9. По-прежнему существует некоторая зависимость результатов от длины трещины l , но эта зависимость достаточно слаба для длинных трещин.

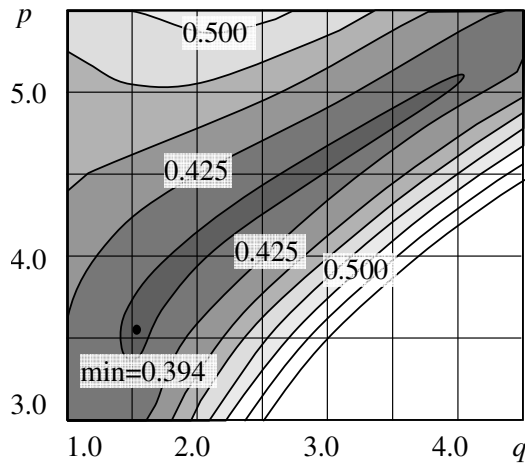


Рис. 8. Зависимость погрешности δ от p and q при $L = 2.1$ мм.

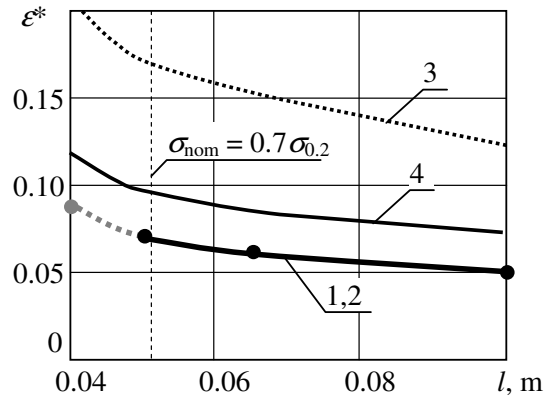


Рис. 9. Деформация ε^* для различных длин трещин и размеров конечных элементов (КЭ): 1,2 – размер КЭ 1 и 2 мм с использованием усреднения; 3,4 – то же без использования усреднения.

Механизм разрушения

Разрабатываемая процедура должна верно предсказывать тип разрушения – направление развития трещины. Если критерием разрушения является максимальная интенсивность пластической деформации, то направление роста трещины соответствует «направлению 1» на рис.10, тогда как типичное направление в реальных трубопроводах – «направление 2» (за исключением некоторых специфических случаев). Критерии, основанные на использовании коэффициента интенсивности напряжений и J -интеграла, предсказывают «направление 2», но такие крите-

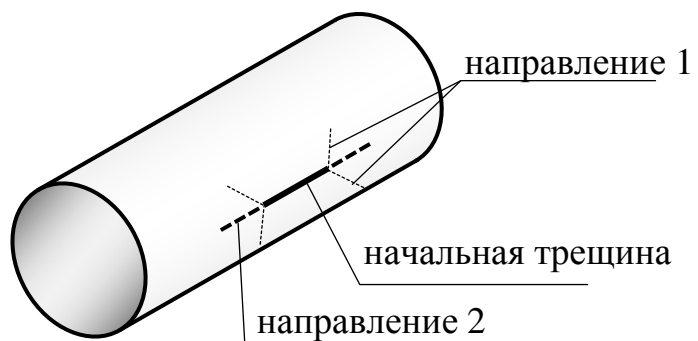


Рис. 10. Типы разрушения

рии не могут быть использованы в LS-DYNA напрямую.

В качестве возможного решения была проанализирована зависимость конечной пластической деформации от типа напряженного состояния. Учет такой зависимости реализован в LS-DYNA: тип напряженного состояния характеризуется трехосностью (в российской технической литературе ей соответствует «жесткость напряженного состояния», введенная В.Л.Колмогоровым) и параметром Лоде (углом Лоде). Следуя работам В.Л.Колмогорова, зависимость конечной деформации от трехосности была взята в экспоненциальной форме с показателем, равным 1,5. Напряженное состояние перед вершиной трещины является более «жестким», то есть характеризуется большей трехосностью (рис. 11), поэтому «направление 2» может оказаться предпочтительным.

Но это дополнение оказалось недостаточным. Более того, развитие трещины происходит в «направлении 1» даже для большего показателя экспоненты (2.5-3), расчет предсказывает ветвление трещины с двумя симметричными продолжениями. Нерегулярность сетки конечных элементов и разнотолщинность стенки трубы (случайная или регулярная, вызванная несовершенством процесса производства труб) были включены в модель, но не улучшили ситуацию.

Более подробный анализ показал, что это ветвление вызвано волнами напряжений, движущимися вдоль трещины. Эти волны создают определенное распределение пластических деформаций (рис. 12) и приводят к повороту и ветвлению трещины. Образование таких волн зависит от механизма инициирования трещины и геометрических параметров

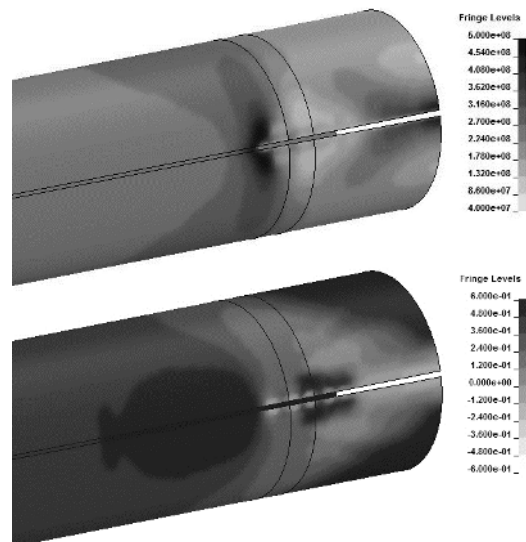


Рис. 11. Распределение параметра «трехосности» в трубе с неподвижной и движущейся трещиной. $p/\sigma_u = 0.55 \dots 0.577$

конструкции. Моделирование испытаний (квазистатическое увеличение давления, затем инициирование трещины кумулятивным пробоем) во всех случаях предсказывает ветвление (направление 1) после некоторого прямого распространения трещины (направление 2), длина этого прямого участка зависит от параметров конструкции, но для рассмотренных размеров труб и свойств стали не превышает 4 м.

Для корректного моделирования длинных трещин может быть использована комбинированная технология, когда направление контролируется по полю напряжений путем вычисления параметров механики разрушения, а в конечно-элементной модели, созданной в пакете LS-DYNA, возможность разрушения рассматривается только для элементов, лежащих на продолжении трещины.

Влияние течи через раскрывающуюся трещину

Для оценки влияния снижения давления (вследствие течи через раскрывающуюся трещину) на условия роста трещины была создана конечно-элементная модель, содержащая трубу, заполненную жидкостью (газом) с начальным давлением и возможностью истечения через раскрывающуюся трещину – рис. 13. Развитие трещины инициировалось удалением определен-

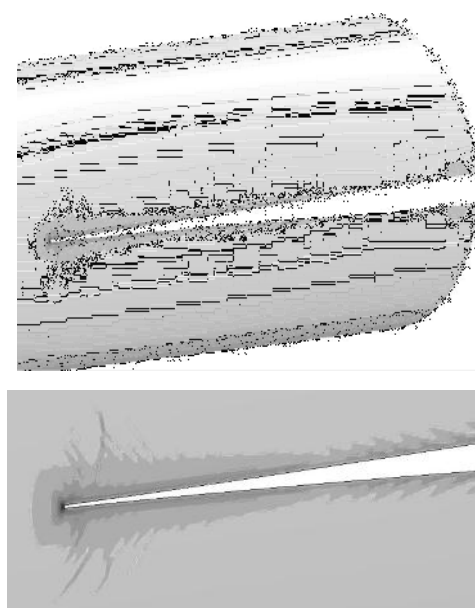


Рис. 12. Пластические деформации у вершины трещины (более темный цвет соответствует большей интенсивности деформаций).

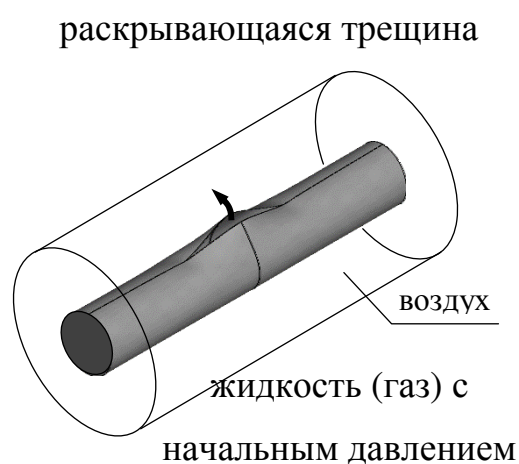


Рис. 13. Модель трубы со средой

ного количества конечных элементов. Для моделирования жидкости использовался подход Эйлера, трубы – подход Лагранжа. Предполагалось, что рассматриваемое раскрытие трещины достаточно велико, и влиянием шероховатости берегов трещины на сопротивление истечению жидкости можно пренебречь.

Модель позволяет имитировать испытания трубопроводов по методике ВНИИСТ: нагружение трубопровода давлением, некоторая выдержка для достижения равновесного состояния, затем – инициация дефекта и распространение трещины.

Примеры результатов расчетов для трубы, заполненной нефтью, показаны на рис. 14 и 15. Для трубы, заполненной газом, падение давления является гораздо меньшим из-за большой сжимаемости газа. Скорость декомпрессионной волны может превышать скорость звука в жидкости из-за распространения трещины.

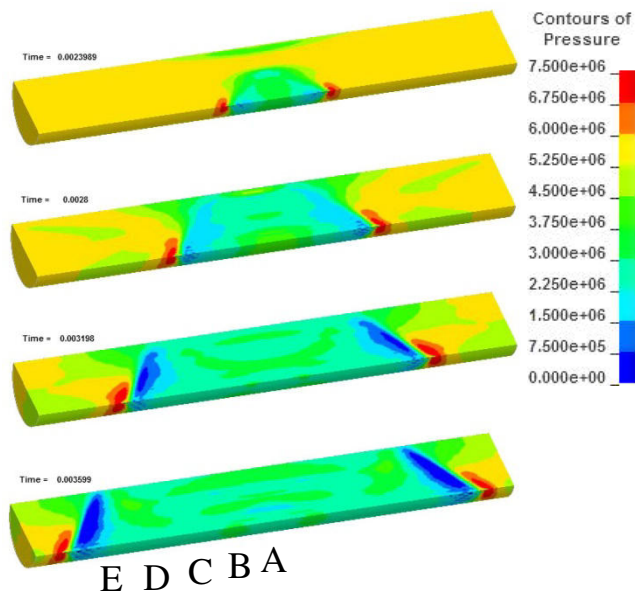


Рис. 14. Распространение волны снижения давления от трещины

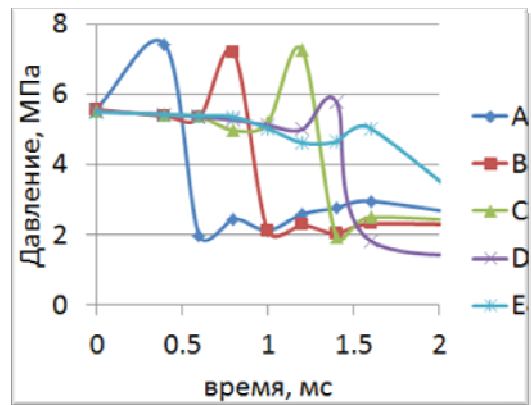


Рис. 15. Изменение давления в нескольких точках вблизи поверхности трубы (обозначение точек – на рис. 14)

Скорость трещин в материале трубы больше, чем скорость звука в жидкости, поэтому для трубы без ребер трещина будет обгонять де-

компрессионную волну и продолжать распространяться под постоянным давлением (рис. 16).

Ситуация меняется в трубе с ребрами. Ребра, в особенности при наличии около них зон благоприятных остаточных напряжений, тормозят трещину, и волна декомпрессии может трещину обогнать – рис.16. При этом давление вблизи вершины трещины уменьшится, и остановка трещины станет возможной в материале с меньшей вязкостью разрушения, чем в трубе без ребер. Таким образом, ребра могут быть полезны для остановки длинных трещин в трубопроводах.

Трудности экспериментальной проверки

Сравнения показывают качественную сходимость результатов расчетов и экспериментов – рис. 17. В то же время расчеты показывают, что прямая экспериментальная проверка полученных результатов для длинных трещин затруднена. Использование маломасштабных моделей вместо полномасштабных магистральных труб при одинаковых свойствах материалов требует различного отношения между диаметром трубы и длиной трещины, что приводит к различной зависимости между растягивающими и

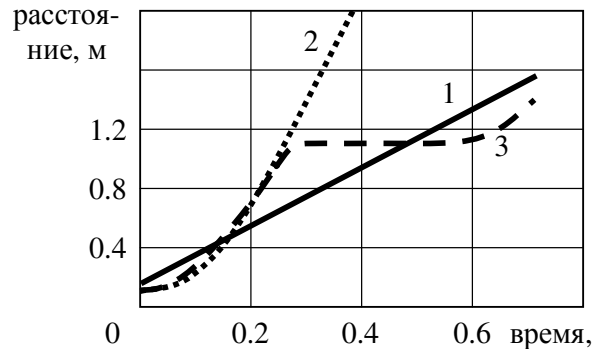


Рис. 16. Разрушение трещин и декомпрессия: 1 – декомпрессионная волна, 2 – трещина в трубе без ребер, 3 – трещина в трубе с ребрами и благоприятными остаточными напряжениями

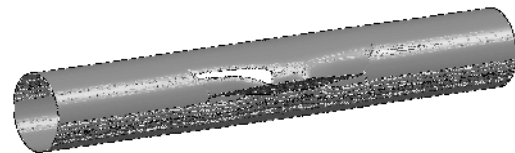
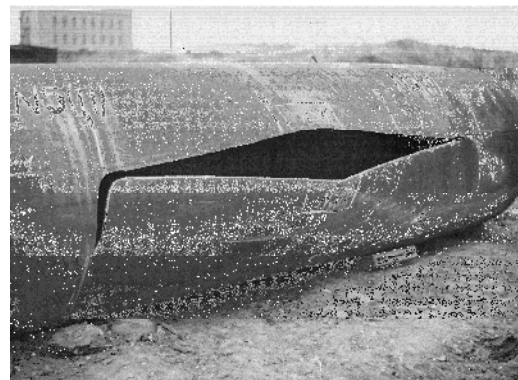


Рис. 17. Эксперимент (ЧТПЗ) и расчет

изгибными напряжениями вблизи вершины трещины. Пропорциональное изменение размера недостаточно для обеспечения подобия условий в силу нелинейности задачи, и при неизменных свойствах материала обеспечить прямое соответствие маломасштабной модели (эксперименты на которой не слишком дороги) и полномасштабной трубы не удастся. Интерпретация результатов эксперимента возможна только на основе численного моделирования, особенности которого обсуждались выше.

Заключение

Анализ литературных источников показал, что обеспечение безопасной эксплуатации магистральных трубопроводов требует в том числе повышения их сопротивления распространению продольных трещин. В работе выполнен анализ эффективности нового, не применяемого в настоящее время, способа такого повышения, включающего совместное использование изменения формы конструкции (кольцевые ребра) и благоприятных остаточных напряжений. Расчетные оценки позволили получить следующие результаты.

1. Ребра с выбранными параметрами увеличивают сопротивление труб хрупкому разрушению на 30...50%. В отличие от применяемых в настоящее время подходов, это увеличение достигается не за счет использования легированных вязких сталей или дополнительных конструктивных элементов, усложняющих монтаж трубопровода. Практическая полезность оценок чисто хрупкого разрушения обусловлена существующей экономически обоснованной тенденцией повышения рабочих давлений, требующей использования более прочных (и зачастую – менее пластичных) сталей и увеличения толщин стенок, смещающих разрушение в сторону хрупкого.

2. Разработана процедура уточненной оценки, учитывающая особенности хрупко-вязкого разрушения материала, силы инерции, возможное снижение давления в трубе вследствие течи через

раскрывающуюся трещину. Разработанный подход позволил преодолеть ограничения существующих методов, рассматривающих отдельные стороны задачи, за счет создания методики задания параметров разрушения в пакетах программ, не использующих напрямую критерии механики разрушения.

3. Показано, что одиночные ребра технологически достижимых размеров не могут остановить развитие динамической длинной трещины, но могут затормозить ее. Наличие последовательности ребер (2 ребра на каждой трубе) позволит снизить скорость роста трещины и обеспечить ее эффективную разгрузку в случае, если эта скорость станет ниже скорости распространения волны декомпрессии, связанной с течью через раскрывающуюся трещину. Доказано, что эффективность ребер для трубопроводов, заполненных жидкостью (нефтепроводы), будет выше, чем для трубопроводов, заполненных газом

Экспериментальная проверка полученных результатов осложнена высокой нелинейностью задачи, затрудняющей подбор критерия подобия для маломасштабных моделей.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ **В рецензируемых журналах из перечня ВАК:**

1. Албагдади Б.М.Х., Чернявский А.О. Possibility of using ribs to protect pipelines from the long crack propagation – Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2016. Т. 16, № 3. С. 15–20

2. Албагдади Б.М.Х., Чернявский А.О. Сравнение критериев моделирования разрушения трубопроводов методом конечных элементов – Вестник ЮУрГУ Серия: Машиностроение. 2017. Т. 17. № 1. С. 13-20.

3. Албагдади Б.М.Х., Чернявский А.О. Расчетный анализ условий остановки трещин в магистральных трубопроводах – Естественные и технические науки. 2017. № 12 (114). С. 129-135.

Диссертант



Албагдади Бара Мохсен Хоссеин