

УДК 539.3.621.001.2

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОТЯЖЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ТРУБ

И. П. ШАБАЛОВ¹,
Г. Х. МУРЗАХАНОВ²,
А. А. БАРСУКОВ²,
В. Я. ВЕЛИКОДНЕВ¹,
В. С. КАЛЕНСКИЙ¹

¹ ООО «ТРУБНЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ»

² МГЦ АО «МОСГАЗ»

На примере сталей различных классов прочности описаны результаты численных исследований особенностей протяженного разрушения перспективных высокопрочных труб [3, 4]. Численным методом с использованием разработанной математической модели протяженного разрушения [2, 6] исследовано влияние параметров стали трубы на ее сопротивление протяженному разрушению. Качественно получены форма и вид геометрии трещины, а также определена скорость раскрытия трещины в зависимости от давления в устье трещины.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: численный метод, протяженное разрушение, геометрия трещины, скорость раскрытия трещины, падение давления газа.

В данном исследовании в качестве модели материала применяется модель пластического деформирования Джонсона-Кука с наступлением разрушения по достижению заданной величины относительного удлинения. Данная модель поведения материала зависит от деформации и учитывает уравнение состояния, отражающее истинную диаграмму растяжения [1, 5, 7].

Для задания реальных механических свойств материала в расчетную модель в лаборатории разрушающего контроля Московского городского Центра АО «МОСГАЗ» была проведена серия испытаний на растяжение основного металла при комнатной температуре. Определение механических характеристик производилось на прямоугольных полнотолщинных образцах. Впоследствии полученные характеристики были заданы в расчетную модель.

NUMERICAL STUDY OF THE PERSPECTIVE HIGH-STRENGTH PIPES' EXTENDED DESTRUCTION FEATURES

I. P. SHABALOV, G. K. MURZAKHANOV,
A. A. BARSUKOV, V. Y. VELIKODNEV,
V. S. KALENSKIY

In this paper using example steels of different strength classes the results of complex research of new generation highly strength and highly viscous steel testing methods to extended destruction resistance are described [3, 4]. A numerical method founded on the developed mathematical model of extended fracture [2, 6] used for research the effect of steel pipe parameters on its resistance to extended fracture. The shape and type of the fracture geometry were qualitatively obtained, and the crack opening speed was determined as a function of the pressure at the crack orifice.

KEYWORDS: numerical method, extended destruction, crack geometry, crack opening speed, gas pressure drop.

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Верификация расчетной модели проведена по характеру разрушения трубопровода. Согласно представленному на рис. 1 с использованием разработанной расчетной модели можно получить картину разрушения, соответствующую реальному виду разрушения при проведении натурных полигонных пневматических испытаний.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ ТРЕЩИНЫ

При проведении численных расчетов с использованием разработанной расчетной модели протяженного разрушения трубопровода выделяются несколько характерных особенностей изменения геометрии трубопровода вдоль линии распространения трещины:

– вертикальные перемещения с поперечным раскрытием берегов трещины (рис. 2);

ТАБЛИЦА 1.

Механические характеристики

Класс прочности стали	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	№ протокола
К 52	419,51	565,85	25,56	697Р
К 60	529,5	631,66	15,17	145Р
К 65	590,54	676,75	13,10	144Р

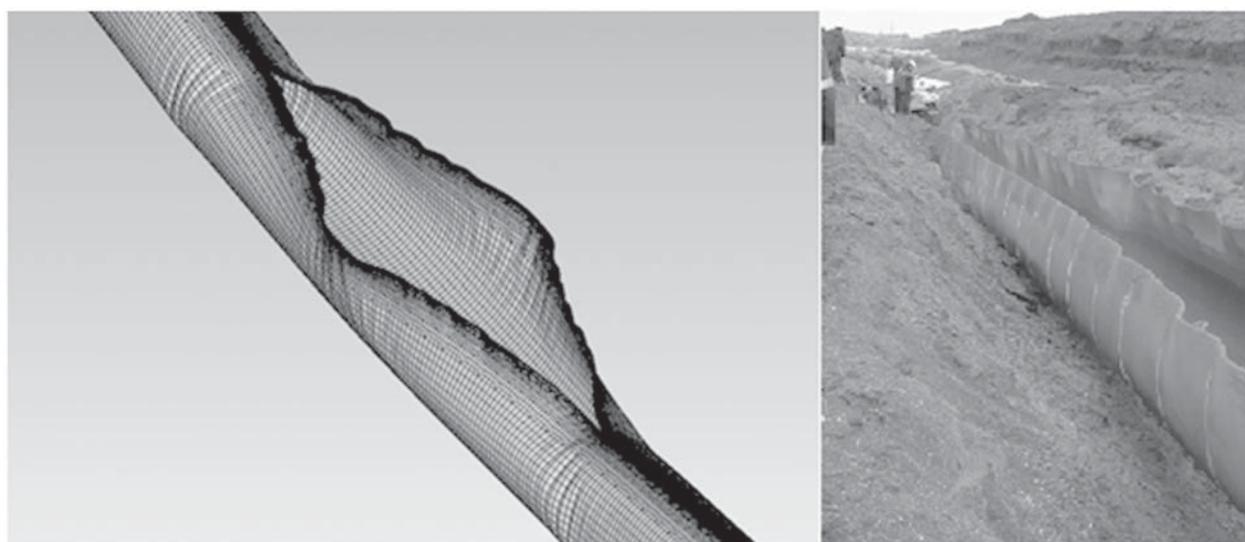


РИС. 1.

Вид разрушения трубопровода при использовании расчетной модели и проведении пневматических испытаний

- волнообразный вид кромок (рис. 3);
- утонение стенки трубопровода на берегах трещины (рис. 4).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИНЫ ОТ ДАВЛЕНИЯ

На рис. 5 представлен сравнительный анализ изменения скорости движения трещины от пройденного пути в зависимости от приложенного внутреннего давления газа. Согласно представленным результатам можно сделать вывод о том, что с повышением давления газа скорость распространения трещины также повышается.

На рис. 6 представлен сравнительный анализ времени начала движения трещины в зависимости от приложенного внутреннего давления газа. Согласно представленным результатам можно сделать вывод о том, что с повышением давления газа время начала движения трещины значительно сокращается.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СКОРОСТИ РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИНЫ ТРУБОПРОВОДА

На рис. 7 представлен сравнительный анализ изменения скорости движения трещины от пройден-

ного пути в зависимости от класса прочности стали. Согласно представленным результатам можно сделать вывод о том, что с повышением класса прочности скорость распространения и расстояние движения трещины также увеличивается.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СКОРОСТИ ПАДЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА

На рис. 8 представлен сравнительный анализ изменения скорости падения давления газа в зоне устья трещины при ее продольном движении в зависимости от класса прочности стали. Согласно представленным результатам можно сделать вывод о том, что с повышением класса прочности скорость падения давления газа по мере продвижения трещины уменьшается.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТАЛИ ТРУБЫ НА ЕЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОТЯЖЕННОМУ РАЗРУШЕНИЮ

Оценка влияния механических характеристик сталей для перспективных высокопрочных труб для магистральных газопроводов проведена на примере трубной стали класса прочности К60. При анализе варьировались основные механические характеристики,

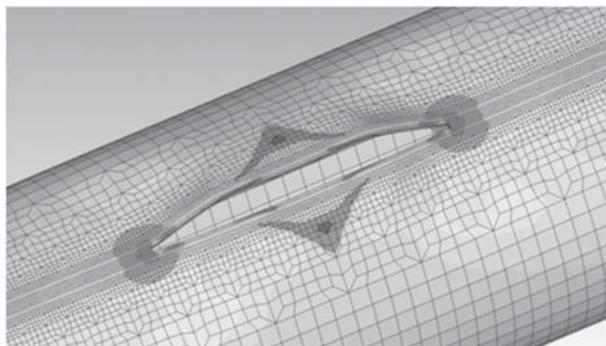


Рис. 2. Раскрытие берегов трещины

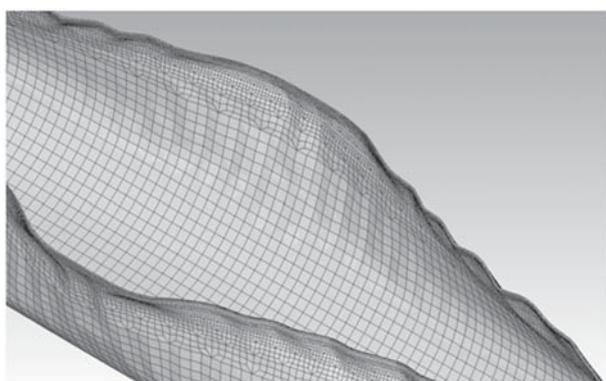


Рис. 3. Вид кромок после протяженного разрушения

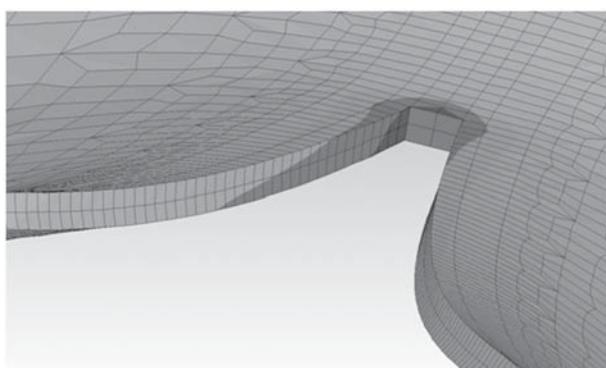


Рис. 4. Утонение стенки трубопровода

4. По результатам серий расчетов на построенной модели выделены следующие особенности деформирования:

- с повышением давления газа в трубопроводе скорость распространения трещины увеличивается;
- с повышением давления газа в трубопроводе время начала движения трещины сокращается;
- с повышением класса прочности стали скорость

И. П. ШАБАЛОВ,
Г. Х. МУРЗАХАНОВ, А. А. БАРСУКОВ,
В. Я. ВЕЛИКОДНЕВ, В. С. КАЛЕНСКИЙ
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ
ПРОТЯЖЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
ВЫСОКОПРОЧНЫХ ТРУБ

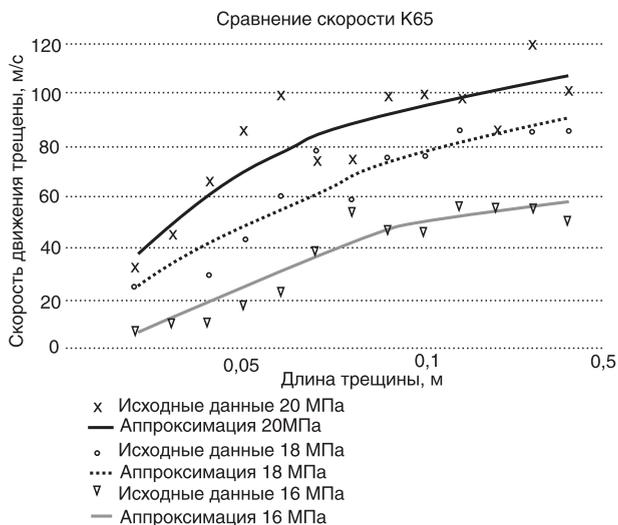


Рис. 5. Сравнительный анализ скорости движения трещины в зависимости от давления

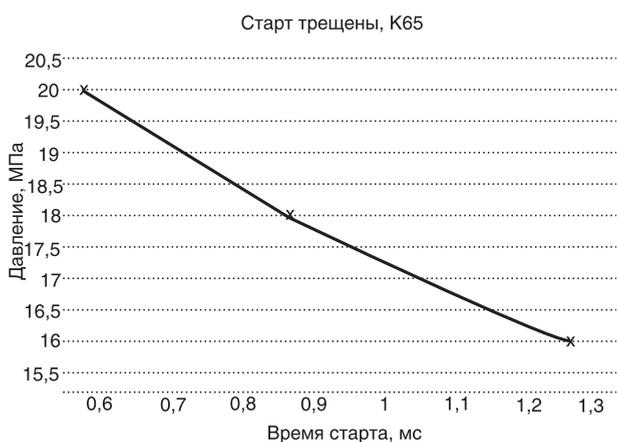


Рис. 6. Сравнительный анализ времени начала движения трещины в зависимости от давления

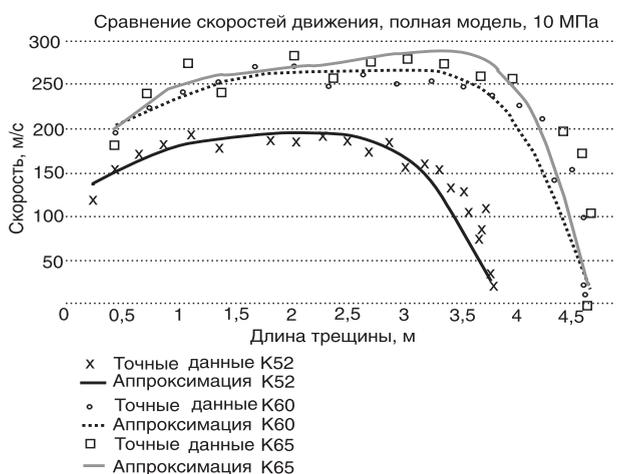


Рис. 7. Сравнительный анализ скорости раскрытия трещины трубопровода

полученные на цилиндрических образцах («гагарки») при испытаниях в МГЦ АО «МОСГАЗ»:

- предел текучести,
- предел прочности (временное сопротивление),
- относительное удлинение.

Критерием изменения механических характеристик выбрано отношение предела текучести к пределу прочности материала. Реальное отношение $\sigma_T/\sigma_B = 0,82$, для варьирования механических характеристик данное отношение принято 0,88 (сталь К65).

На рис. 9 представлен сравнительный анализ изменения скорости движения трещины от пройденного пути в зависимости от механических характеристик стали. Согласно представленным результатам можно сделать вывод о том, что принципиальное влияние на движение трещины оказывает значение относительного удлинения, в то время как изменение предела текучести и предела прочности не оказывают значимого влияния на процесс протяженного разрушения газопровода, выполненного из высокопрочной стали.

ВЫВОДЫ

1. Разработана модель протяженного разрушения газопровода для оценки уровня удельной энергии разрушения металла трубы, обеспечивающего локализацию протяженного разрушения.

2. При проведении численных расчетов с использованием разработанной расчетной модели протяженного разрушения трубопровода выделяются несколько характерных особенностей изменения геометрии трубопровода вдоль линии распространения трещины:

- вертикальные перемещения с поперечным раскрытием берегов трещины;
- волнообразный вид кромок;
- утонение стенки трубопровода на берегах трещины.

3. На основе сравнения выделенных особенностей разрушения расчетной модели проведена ее качественная верификация при сравнении с результатами полигонных испытаний.

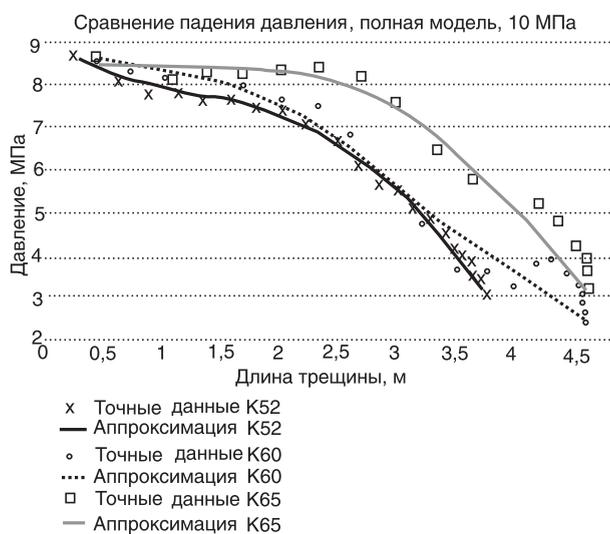


Рис. 8.

Сравнительный анализ скорости падения давления газа устье трещины

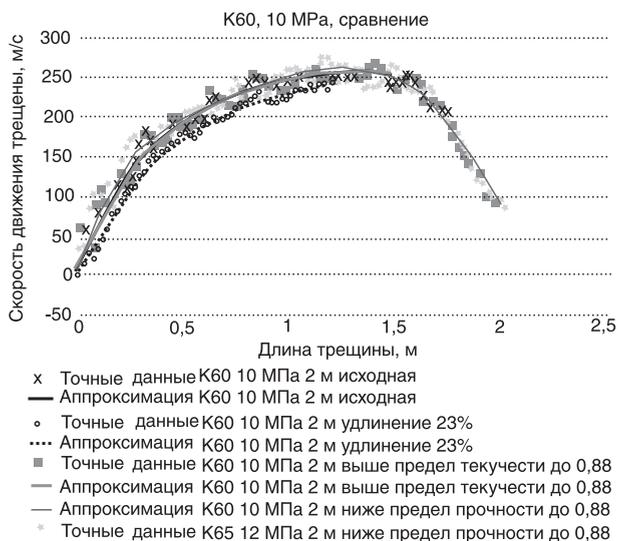


Рис. 9.

Оценка влияния параметров стали трубы на скорость распространения трещины

ТАБЛИЦА 2.

Механические характеристики стали К60

	Опытные	Вариант №1	Вариант №2	Вариант №3
Предел текучести, МПа	518,5	518,5	556,6	518,5
Предел прочности, МПа	632,5	632,5	632,5	589,22
Относительное удлинение, %	19,33	23	19,33	19,33
σ_T/σ_B	0,82	0,82	0,88	0,88

распространения и расстояние движения трещины до закольцовывания увеличивается;

– с повышением класса прочности стали скорость падения давления газа в зоне устья трещины по мере продвижения трещины уменьшается.

5. Две последние особенности связаны с тем, что в расчетной модели используется модель материала с критерием разрушения по достижению заданного уровня деформаций, полученных по результатам проведенных испытаний на статическое растяжение.

6. Принципиальное влияние на движение трещины оказывает значение относительного удлинения, в то время как изменение предела текучести и предела прочности не оказывают значимого влияния на процесс протяженного разрушения газопровода, выполненного из высокопрочной стали.

7. Необходимо проведение серии испытаний при ударном осевом разрушении при комнатной температуре на 10-тикратных и 5-тикратных образцах для определения относительного удлинения и относительного сужения исследуемых сталей (К60, К65, К70).

8. По результатам испытаний на УОР вычислить коэффициент разрушения, используемый в модели материала, с учетом полученных характеристик относительного удлинения и относительного сужения.

9. Необходимо проведение дополнительной серии расчетов для сталей К60, К65, К70 при давлениях 10, 12, 15, 18 МПа и Рисп (согласно СТО Газпром 2-4.1-713-2013) с учетом результатов по п. 8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мурзаханов Г.Х., Барсуков А.А., Великоднев В.Я., Шабалов И.П. Расчетно-экспериментальное исследование деформационных и прочностных характеристик высокопрочных и вязких сталей для магистральных газопроводов // Вестник РАЕН. 2016. Т. 16. № 1. С. 59–64.
2. Мурзаханов Г.Х., Барсуков А.А., Семенов А.С., Макшин А.В. Имитационное моделирование разрушения образцов из трубных сталей при ударном нагружении // Материалы XIX Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т. 1. М.: Изд-во МАИ. 2013. С. 167.
3. Мурзаханов Г.Х., Барсуков А.А., Шабалов И.П., Великоднев В.Я. Численные исследование особенностей деформирования высоковязкой трубной стали при испытаниях на ударный изгиб // V Международная научно-техническая конференция «Газотранспортные системы: настоящее и будущее», тезисы докладов. М.: ОАО Газпром ВНИИ-ГАЗ, 2013. С. 104.
4. Шабалов И.П., Великоднев В.Я., Мурзаханов Г.Х. и др. Обоснование требований к трубам магистральных газопроводов в зонах высокой сейс-

И. П. ШАБАЛОВ,
Г. Х. МУРЗАХАНОВ, А. А. БАРСУКОВ,
В. Я. ВЕЛИКОДНЕВ, В. С. КАЛЕНСКИЙ
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ
ПРОТЯЖЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
ВЫСОКОПРОЧНЫХ ТРУБ

мичности и активных тектонических разломов // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. 2013. №2. С. 21–26.

5. Шабалов И.П., Великоднев В.Я., Мурзаханов Г.Х. и др. Имитационное моделирование динамических испытаний высоковязких трубных сталей // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. 2014. № 2. С. 46–50.
6. Шабалов И.П., Великоднев В.Я., Мурзаханов Г.Х. и др. Оценка локальных затрат энергии при испытаниях высоковязких трубных сталей на ударный изгиб численными методами // ГТС ВНИИ-ГАЗ. 2013.
7. Шабалов И.П., Великоднев В.Я., Мурзаханов Г.Х. и др. Ударная вязкость высоковязких трубных сталей при ударном растяжении как параметр стойкости трубных сталей к протяженному разрушению // Сборник трудов VII-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» ПРОСТ 2014. 22–24 апреля 2014 г., Москва, НИТУ «МИСиС». М.: Почерк мастера, 2014. С. 222.

Шабалов Иван Павлович,
генеральный директор ООО «Трубные инновационные технологии»

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

Барсуков Алексей Анатольевич,
заместитель директора МГЦ АО «МОСГАЗ»

Великоднев Валерий Яковлевич,
д.т.н., технический директор ООО «Трубные инновационные технологии»

Каленский Виктор Сергеевич,
ведущий специалист ООО «Трубные инновационные технологии»

☎ 105120, г. Москва, Мрузовский пер., д. 11,
тел.: +7 (495) 916-59-30,
e-mail: MurzakhanovGK@mos-gaz.ru