

УДК 69.07  
МРНТИ 67.11.35

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-238-254>

<sup>1</sup>**Жаңабай Н.Ж.,**

канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-8153-1449, e-mail: nurlan.zhanabay777@mail.ru

<sup>1</sup>**Ибраимова Ұ.Б.,**

магистр, докторант, ORCID ID: 0000-0004-9786-1348, e-mail: ibraimova\_uljan@mail.ru

<sup>1</sup>**Сулейменов У.С.,**

канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0001-7798-1044, e-mail: ulanbator@inbox.ru

<sup>2</sup>**Буганова С.Н.,**

канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0003-2005-3305, e-mail: Svetlanabuganova7@gmail.com

<sup>1</sup>**Утелбаева А.Б.,**

д-р. хим. наук, ORCID ID: 0000-0002-4771-9835, e-mail: mako\_01-777@mail.ru

<sup>1</sup>Южно-Казахстанский исследовательский университет им. М. Ауэзова,  
160012, г. Шымкент, Казахстан

<sup>2</sup>Международная образовательная корпорация (КазГАСА),  
050043, г. Алматы, Казахстан

## ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГАЗОПРОВОДОВ, И МЕТОДЫ ИХ АНАЛИЗА

### Аннотация

Рассматривается процесс динамического разрушения типового участка стального магистрального газопровода с трещиной под действием газодинамического давления. Исследуется высокоскоростное развитие трещины, которая растет под действием истекающего большого количества газа под высоким давлением. Моделируется процесс движения магистральной трещины, которое индуцируется движением газа. Математическая модель этого процесса включает модель газодинамических процессов в трубе и модель высокоскоростного деформирования и разрушения участка трубы с трещиной. Предложена приближенная аналитическая модель газодинамических процессов, которая позволяет моделировать динамическое убывание давления на внутреннюю поверхность трубы и берега трещины. Динамическое изменение давления базируется на декомпрессии газа в локализованной части трубы в окрестности трещины. Модель учитывает изменение давления газа в трубопроводе вдоль продольной координаты части трубы с трещиной. Рассмотрена численная процедура для расчета газодинамического давления при истечении газа через трещину. Она позволяет определять давление на берега трещины как функцию времени. Результаты этой численной процедуры используются для численного моделирования высокоскоростного деформирования и лавинного разрушения типового участка магистрального газопровода с трещиной. Предложена аналитическая модель, которая использует методы механики разрушения для предсказания критического давления, при котором наблюдается рост трещины в трубе. Модель верифицирована по экспериментальным данным и служит для быстрой оценки целостности трубы. Этот аналитический подход используется для предсказания возможности разрушения трубы на основе свойств материала, геометрии трещины и размеров трубы. Он может использоваться для предварительных оценочных расчетов. Рассмотрен численно-аналитический метод для анализа неупругого динамического разрушения трубы. Он основывается на анализе величины угла раскрытия вершины трещины. Также рассмотрен численный метод анализа напряженного состояния в области трещины, учитывающий пластическое деформирование. Представленные модели позволяют численными методами исследовать динамику развития трещин и, как следствие, разрушение типовых участков магистральных газопроводов под давлением. Использование результатов этих исследований позволит принять превентивные меры для предотвращения случаев лавинного разрушения аварийных участков магистральных трубопроводов.

**Ключевые слова:** газопровод, разрушение, газодинамический процесс, методы оценки, кончик трещины, анализ.

## Введение

Ежегодный рост добычи газа и увеличение его удельного веса в топливно-энергетическом балансе страны и в экспортных поставках на международные рынки предопределили высокие темпы роста строительства сети магистральных газопроводов [1]. Согласно данным национального оператора Qazaqgaz в сфере газа и газоснабжения Республики Казахстан, магистральные газопроводы в настоящее время являются основным способом транспортировки больших объемов газа от месторождений к местам потребления. Однако анализ зарубежных и отечественных источников показывает [2–5], что в магистральных газопроводах по разным причинам происходят аварии различного характера. Увеличение пропускной способности газопроводов за счет увеличения диаметров труб и рабочих скоростей перекачки, а также повышения рабочего давления приводит к высокой повреждаемости и разрушаемости участков магистральных газопроводов. Такие разрушения сопровождаются быстрым ростом трещин. Скорость такого роста трещины соизмерима со скоростью распространения звука в соответствующем металле. Такой рост трещины индуцируется истечением большого количества газа под большим давлением. Учитывая вышеизложенное, появляется необходимость анализа методов оценки разрушения в магистральных газопроводах, что является весьма актуальной задачей в национальном и международном масштабе, тем более что общий износ существующих газопроводов Республики Казахстан составляет 70% [6].

## Обзор литературы

Методы анализа динамического разрушения конструкций и технологии останковки быстрого движения трещин являются ключевыми для обеспечения целостности инженерных конструкций, подверженным значительным динамическим воздействиям. Эти методы интенсивно развиваются в механике разрушения [7, 8]. Эти технологии чрезвычайно важны в случаях, когда рост неустойчивости трещин нельзя предотвратить и масштабного разрушения газопроводов [9]. Подобные исследования финансировались как частными компаниями, так и научными организациями в Евросоюзе, США, Канаде, Китае [10–12]. Поэтому некоторые усилия предприняты для решения этих задач. В статье [9] ставится задача движения магистральной трещины, которая индуцируется движением газа. Указывается, что задача движения магистральной трещины состоит из трех подзадач (анализа напряженного состояния конструкции, движения газа по трубе и через трещину и механики разрушения). Описывается разработка программы расчета, которая состоит из трех модулей: анализа напряженного состояния, газодинамики и моделирования разрушения. Рассматриваются подходы для предотвращения быстрого движения трещины. В работе [13] предложен вычислительный подход к расчету движения магистральной трещины. Для расчета напряженного состояния и движения трещины применяется коммерческая программа LS-DYNA, а для решения задачи газодинамики была разработана своя программа расчета. Подчеркнем, что при анализе разрушения конструкции учитывается зависимость от скорости деформирования. Рядом с вершиной трещины учитывается пластическое деформирование материала. Благодаря развитию пластических деформаций происходит рост трещин. С другой стороны, пластическое деформирование индуцируется действием газа на берега трещины. Как следует из численного моделирования, движение газа происходит со скоростью  $100\text{--}300\text{ м/с}$ . В работах [14–17] используется расширенный метод конечных элементов, который применяется для моделирования напряженного состояния около трещины. С помощью пакета программ Abacus моделируется рост трещин в трубопроводе. В статье [18] рассматриваются несколько существующих аналитических методов расчета разрушения трубопровода. Результаты аналитических расчетов сравниваются с результатами экспериментального анализа разрушения трубопровода. Среди аналитических методов выбираются те, которые адекватно описывают имеющиеся аналитические результаты. В статье [19]

делается обзор аналитических методов расчета разрушения газопроводов под действием давления газа. Предлагаются методы остановки развития магистральных трещин в газопроводах. В [20] описывается исследовательский опыт Европейской исследовательской группы по прочности газопроводов. Описываются подходы к анализу сопротивления пластическому разрушению. Построена пластическая модель разрушения на основании численного анализа напряженного состояния. В работе [21] метод конечных элементов применялся для моделирования разрушения трубопроводов. По результатам расчета определяется угол раскрытия вершины трещины, который обозначается через  $(СТОА)_c$ . Этот параметр экспериментально определяется для каждого материала. При критическом значении  $(СТОА)_c$  происходит рост трещины. Связанная система газ – оболочка численно исследуется в [22]. Развитие трещины моделируется методом конечных элементов с использованием локального критерия разрушения. Метод конечных объемов используется для моделирования газодинамики. Предложенный метод будет использоваться для проектирования газопроводов. В статье [23–24] рассматриваются методы остановки развития трещины и обзор причин возникновения. Обсуждается использование проволоки и композитных намоток для остановки движения трещины. В работе [25] конечно-элементные расчеты применяются совместно с экспериментальными исследованиями для моделирования развития трещины. Численное моделирование газодинамических процессов, которые наблюдаются при истечении газа из трубы, представлено в [26]. В этой статье описана численная процедура для такого моделирования.

Проведенный научный обзор существующих методов анализа разрушений газопроводов требует дополнительных исследований в части сопоставления и консолидации в единую методику расчета, что впоследствии будет применен авторами в численных исследованиях напряженно-деформированных состояний магистральных газопроводов в современном программном комплексе [27].

### Материалы и методы

#### Приближенная аналитическая модель газодинамических процессов

Разрушение трубопроводов происходит вследствие наличия начальных малых повреждений, которые развиваются вследствие действия интенсивного внутреннего давления. В этом подразделе рассмотрим приближенную простую модель газодинамического давления, которое действует на берега трещины и внутреннюю сторону трубы. Такая модель применяется для расчета динамического развития трещины [21].

Развитие трещины сопровождается декомпрессией газа, то есть затуханием давления со временем. Это происходит в трубе в окрестности трещины. При значительном открытии трещины газ начинает быстро выходить из трубы. Этот поток, выходящий наружу, инициирует волны декомпрессии (расширения) в газе. Как следует из теоретического анализа, закон для идеального газ неадекватно описывает декомпрессию газа. Локальное давление, действующее на берега трещины, описывается соотношением:

$$p_1 = p_0 \left[ \frac{2}{\gamma + 1} + \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) \frac{v}{v_a} \right]^{2\gamma/(\gamma-1)}, \quad (1)$$

где  $p_1$  — давление у вершины трещины;

$p_0$  — величина давления до начала процесса разрушения;

$v$  — скорость распространения трещины;

$v_a$  — скорость волн декомпрессии;

$\gamma$  — показатель адиабаты.

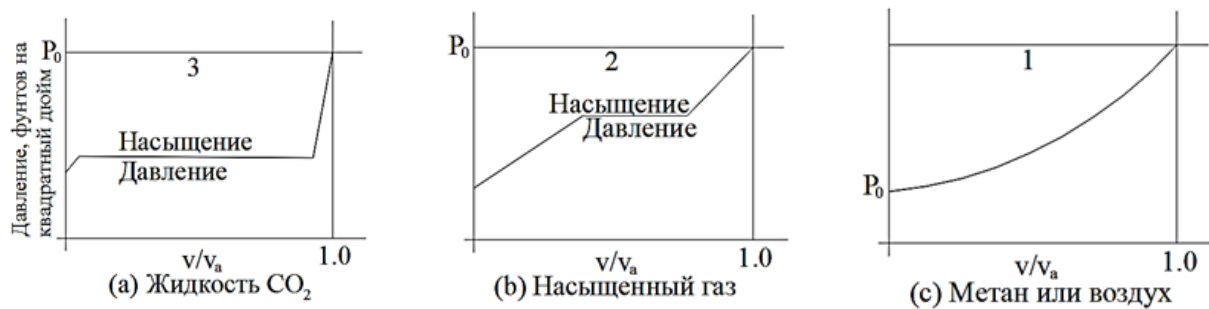


Рисунок 1 – Кривые, описывающие декомпрессию газа

Известные уравнения Benedict, Webb, Rubin [28] используются для описания декомпресии газа в следующем виде:

$$p = RT\rho + \left(B_0RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2}\right)\rho^2 + (bRT - a)\rho^3 + a\alpha\rho^6 + c\frac{\rho^3}{T^2}(1 + \gamma\rho^2)\exp(-\gamma\rho^2). \quad (2)$$

Starling [29] предложил параметрическое уравнение состояния в следующем виде:

$$p = RT\rho + \left(B_0RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2} + \frac{D_0}{T^3} - \frac{E_0}{T^4}\right)\rho^2 + \left(bRT - a - \frac{d}{T}\right)\rho^3 + \left(a + \frac{d}{T}\right)\alpha\rho^6 + c\frac{\rho^3}{T^2}(1 + \gamma\rho^2)\exp(-\gamma\rho^2), \quad (3)$$

где  $p$  – давление;

$R$  – газовая постоянная;

$\rho$  – плотность газа;

$A_0, B_0, C_0, D_0, E_0, a, b, c, d, \alpha, \gamma$  – параметры уравнения (3).



Рисунок 2 – Зависимость давления от продольной координаты трубопровода

На рисунке 1 показывается зависимость давления газа от параметра относительной скорости  $\frac{v}{v_a}$ . На рисунке 1b показывается кусочно-линейная зависимость от скорости. Используя рисунок 1 и экспериментальные данные, построим три линейный режим декомпозиции, который представлен на рисунке 2. Такая зависимость давления от продольной координаты описывает приближенное распределение давления, которое наблюдается в трубопроводе. Три линейный режим декомпозиции представим так (рисунок 3) [30]:

$$\begin{aligned} p_a(z) &= (p_0 - p) \left(1 - \frac{z}{L}\right) + p; l + l_{pb} + l_{pa} < z < l + l_{pb} + l_{pa} + L; \\ p(z) &= p; l < z < l + l_{pb} + l_{pa}; \\ p_a(z) &= p \left(1 - \frac{z}{L}\right) + p; 0 < z < l, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $l_{pa}$  — длина постоянного значения давления до вершины трещины;  
 $l_{pb}$  — длина постоянного значения давления за вершиной трещины;  
 $l$  — длина участка декомпрессии до постоянного давления;  
 $p$  — постоянное значение давления около трещины.



Рисунок 3 – Качественное поведение газа при его декомпрессии

Вследствие диссипации энергии в быстро движущемся процессе разрушения скорость движения трещины затухает. Мгновенная скорость движения трещины выражается через обобщенную длину трещины:

$$v = v_0(1 - \sqrt{z/L_r}), \quad (5)$$

где  $v_0$  — начальная скорость движения трещины;  
 $z$  — расстояние от начала трещины до ее текущего положения;  
 $L_r$  — обобщенная длина трещины равная 1.5–2.0 диаметра трубы.

Численная процедура для расчета газодинамического давления

Модель декомпрессии газа

Рассмотрим три предположения, на основании которых строится рассматриваемая одномерная модель изоэнтропического потока газа.

(1) Поток считается одномерным, несмотря на течение газа через трещину. Эта гипотеза выполняется при движении трещины, за исключением времени ее образования.

(2) Поток является адиабатическим, поэтому нагревом газа и трением пренебрегаем.

(3) Термодинамическое равновесие наблюдается во всем потоке газа.

Воспользуемся тремя дифференциальными уравнениями в частных производных, которые описывают постоянство массы, закон сохранения энергии и изменение количества движения. Эти уравнения выглядят в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) = 0;$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} \rho u + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u^2) + \frac{\partial p}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} \rho (h + 0.5u^2) + \frac{\partial}{\partial x} \rho u (h + 0.5u^2) - \frac{\partial p}{\partial x} &= 0,\end{aligned}\quad (6)$$

где  $\rho$  — плотность газа;

$u$  — скорость движения газа;

$h$  — энтальпия;

$p$  — давление.

Скорость движения возмущений в газе определяется следующим соотношением:

$$a^2 = \frac{dp}{d\rho}. \quad (7)$$

Это соотношение может быть представлено так:

$$\frac{du}{dp} = \pm \frac{1}{\rho a}. \quad (8)$$

Уравнения (7, 8) используются для расчета скорости газа в зависимости от давления. Воспользуемся такими граничными условиями:

$$u = 0; a = a_0 \text{ при } p = p_0.$$

Пусть  $p_n, \rho_n$  и  $p_{n+1}, \rho_{n+1}$  ( $p_n > p_{n+1}$ ) являются двумя последовательными точками линии постоянной энтропии, проходящей через начальную точку. Для численных расчетов используются такие конечно-разностные соотношения:

$$\begin{aligned}a_{n+1}^2 &= \frac{p_n - p_{n+1}}{\rho_n - \rho_{n+1}}; \\ u_{n+1} &= u_n + 0.5 \frac{p_n - p_{n+1}}{a_n} \left( \frac{1}{\rho_n} + \frac{1}{\rho_{n+1}} \right).\end{aligned}$$

Когда труба разрывается, газ выходит через трещину (рисунок 4, стр. 244). Декомпрессионное возмущение движется обратно в трубу. Тогда волна давления распространяется обратно со скоростью  $w$ , которая является разницей между скоростью возмущений в газе  $a$  и скоростью газа  $u$ .

$$w_{n+1} = a_{n+1} - u_{n+1}.$$

Для расчета кривой декомпозиции используется параметрическое уравнение состояния (3).

Декомпрессия газа через раскрытую трещину

Трещина в трубе движется со скоростью, близкой к скорости распространения продольных волн в трубе. Вследствие этого возникают участки трубы с большим разломом (рисунок 4, стр. 244). Через эти разломы вытекает газ. Модель такого истечения рассматривается в этом разделе. Происходит естественная декомпозиция газа (рисунок 4), численное моделирование которой рассмотрено в этом разделе. Движение газа описывается следующей системой уравнений в частных производных:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + H = 0, \quad (9)$$

где

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ e \end{bmatrix} \frac{A}{A_0}; \quad E = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ (e + p)u \end{bmatrix} \frac{A}{A_0};$$



$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\rho \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{A}{A_0} \right) \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Общая энергия газа определяется так:

$$e = \rho h + 0.5 \rho u^2 - p.$$

Величина  $A/A_0$  определяет отношение локального поперечного сечения к основному поперечному сечению.

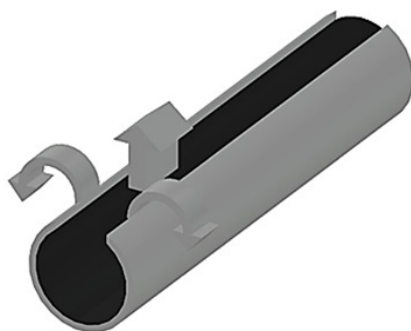


Рисунок 4 – Истечение газа через трещину

## Результаты и обсуждения

Аналитические методы анализа разрушения трубопроводов

Аналитическая модель использует методы механики разрушения для предсказания критического давления, при котором наблюдается рост трещины в трубе. Эта модель верифицирована по экспериментальным данным и является очень удобной для быстрой оценки целостности конструкции. Свойства материала, геометрия трещины, размеры трубы используются для предсказания возможности разрушения трубы.

Мы используем комбинацию следующих аналитических методов: модифицированные NG-18 уравнения [31], подход CorLAS [32], диаграмма оценки разрушения [33, 34]. Модифицированные NG-18 уравнения используют полуэмпирическую модель для предсказания давления, при котором наблюдается разрушение. Модифицированная версия этого подхода состоит из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \sigma_{fs} &= \frac{\bar{\sigma} \arccos(e^{-x})}{M_T \arccos(e^{-y})}; \\ x &= \frac{3 \cdot CVN \cdot E \pi}{2 A_0 c \bar{\sigma}^2}; \\ y &= x \left[ 1 - \left( \frac{d}{t} \right)^{0.8} \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\sigma_{fs}$  — величина напряжений при разрушении;

$\bar{\sigma}$  — поток напряжений;

$M_T$  — коэффициент Folias;  $CVN$  — верхняя оценка энергии удара;

$A_0$  — площадь рассматриваемой трещины;

$E$  — модуль Юнга;  $d$  — глубина трещины;

$t$  – толщина трубы;

$2c$  – длина трещины.

Поток напряжений определяется так:  $\bar{\sigma} = \sigma_y + 68.95 \text{ MPa}$ . Коэффициент Folias  $M_T$  рассчитывается по формуле:

$$M_T = \frac{1 - \frac{a}{tM_t}}{1 - \frac{a}{t}};$$

$$M_t = \sqrt{1 + 1.255 \frac{c_{eq}^2}{Rt} - 0.0135 \frac{c_{eq}^4}{R^2 t^2}}.$$

Уравнение (10) используются для расчета напряжений при разрушении. Результаты расчета используются для предсказания разрушающего давления  $P_f$

$$P_f = \sigma_{fs} \frac{2t}{D} \frac{\left(1 - \frac{A}{A_0}\right)}{\left(1 - \frac{A}{A_0 M_T}\right)},$$

где  $A$  – область трещины.

Коэффициент интенсивности напряжений считается так:

$$K_c^2 = \frac{8a\bar{\sigma}^2}{\pi} \ln \sec \left( \frac{\pi \sigma M_T}{2\bar{\sigma}} \right).$$

Скорость распространения трещины  $V_f$  определяется так:

$$V_f = C \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{c_v/A}} \left( \frac{P}{P_a} - 1 \right)^{1/6},$$

где  $c_v/A$  – сопротивление разрушению;

$P$  – давление газа на берега трещины;

$P_a = \frac{2t\sigma}{D}$ ;

$C$  – постоянная засыпки канавы, которая равна 0.648 (или 2.75) для незасыпанной трубы. Для полностью засыпанной трубы постоянная  $C$  равна 0.47 (или 2.34).

Подход CorLAS [32] использует  $I$  интеграл, расчет которого использует вязкость разрушения. Эта вязкость для каждого материала находится экспериментально. Этот параметр используется для анализа роста трещины и разрушающего давления.  $I$  интеграл итерационно считается с использованием формулы:

$$I = Q_f F_{sf} \left[ \frac{\sigma^2 \pi a}{E} + f_3(n) a \varepsilon_p \sigma \right],$$

где  $Q_f$  – коэффициент эллиптической формы;

$F_{sf}$  – коэффициент свободной поверхности;

$\sigma$  – локальные напряжения;

$a$  – глубина трещины;

$f_3(n)$  – коэффициент упрочнения деформаций;



$n$  — показатель упрочнения деформаций;  
 $\varepsilon_p$  — пластические деформации.

Значение  $J$  интеграла сравнивается с вязкостью разрушения материала  $J_{cr}$ , которое определяется экспериментально. Разрушение конструкции наблюдается, когда  $J = J_{cr}$ .

Предложенный аналитический метод расчета не может заменить сложный конечно-элементный расчет разрушения трубопровода. Этот аналитический расчет может быть проверочным расчетом для конечно-элементного моделирования. Кроме того, этот аналитический подход может использоваться для простых предварительных оценочных расчетов.

Численно-аналитический метод

Быстрое пластичное разрушение в стальном газопроводе – это чрезвычайно сложный процесс, состоящий из трех взаимодействующих явлений. (1) Многомасштабное упругопластическое динамическое деформирование стенок трубы. (2) Трехмерные неустойчивые газодинамики процессы. (3) Неупругое распространение трещины. Последний этап схематично представлен на рисунке 5.

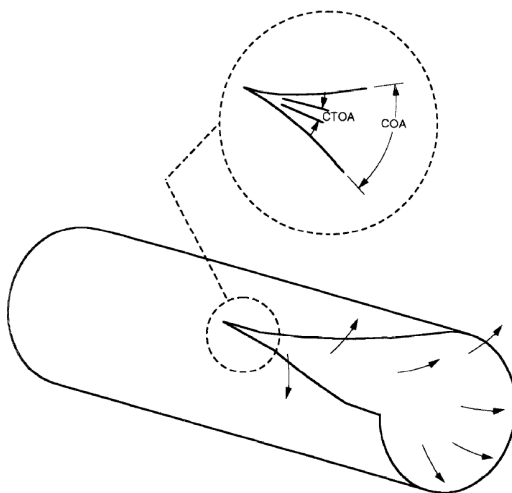


Рисунок 5 – Эскиз развития трещины

Для анализа неупругого динамического разрушения трубы угол раскрытия вершины трещины CTOA считается наиболее приемлемым параметром (рисунок 5). Параметр CTOA зависит от геометрии конструкции и нагрузок. Критическое значение этого параметра обозначается  $(CTOA)_c$ .

Параметр  $(CTOA)_{max}$  используется для описания наиболее опасного напряженного состояния около трещины. Явление разрушения не наблюдается, если выполняется соотношение:

$$(CTOA)_c > (CTOA)_{max}.$$

Для исследования чувствительности трубы к пластическому разрушению необходимо определить обе части последнего уравнения для заданных рабочих условий трубы. Конечно-элементный метод применяется для моделирования CTOA в случае установившегося движения трещины.

Величина  $(CTOA)_c$  определяется из следующего соотношения:

$$(CTOA)_c = 2571 \frac{180}{\pi} \frac{S_c}{\sigma_{od}},$$

где  $S_c$  — энергия, необходимая для пластического деформирования области возле разрушения, отнесенная к площади области;

$$\sigma_{od} = 0.65(\sigma_y + \sigma_u);$$

$\sigma_y$  – предел упругости;

$\sigma_u$  – предел прочности.

#### 4.3. Численные методы анализа разрушения трубопровода

Для анализа напряженного состояния в области трещины применяется расширенный метод конечных элементов. Сущность этого метода заключается в том, что вектор узловых перемещений  $\mathbf{u}$  в области трещины представляется так [7–11]:

$$\mathbf{u} = \sum_{I=1}^N N_I(x) \left[ \mathbf{u}_I + H(x) \mathbf{a}_I + \sum_{a=1}^4 F_a(x) b_I^a \right],$$

где  $N_I(x)$  – функция форм;

$\mathbf{u}_I$  – вектор узловых перемещений, характеризующий непрерывную часть решения;

$H(x)$  – разрывная функция, описывающая скачок;

$\mathbf{a}_I$  – расширенные степени свободы над внутренней частью трещины;

$b_I^a$  – узловые расширенные степени свободы около вершины трещины;

$F_a(x)$  – упругая асимптотическая функция вершины трещины.

Произведения  $H(x) \mathbf{a}_I$  и  $F_a(x) b_I^a$  представляют дополнительные решения, которые вырезают внутреннюю часть трещины и вырезают узлы около вершины трещины. Расширенный метод конечных элементов использует внутренние элементы, чтобы свободно разместить трещину с сеткой и не связывать ее с границей элемента. Это дает возможность не перестраивать сетку при расчете движения трещины [35]. В процессе расчета области развития магистральной трещины действительные узлы трещины вместе с конечным элементом удаляются, если напряжения или деформации превосходят критические значения.

Применяемый критерий инициации дефекта может выглядеть так, что максимальные главные напряжения ( $Maxp$ ) или деформации ( $Maxs$ ) достигли критического значения. Может использоваться другой критерий инициации дефекта, который заключается в квадратичности напряжений, или квадратичности деформаций.

Критерий эволюции дефекта может выражаться в критическом значении энергии разрушения, или критическом значении перемещений вершины трещины. В статье [36] предлагают использовать критическое значение когезионной прочности как критерия инициализации разрушения. Поток энергии в вершину трещины  $G_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E}$  принимается равным когезионной энергии для хрупкого материала, а  $J$  интеграл используется для пластичного материала. В статье [30] предлагается брать значения когезионной прочности и когезионной энергии в виде  $3\sigma_y$  и  $\Gamma_0 = \frac{K_{IC}^2}{E}$  соответственно. Здесь  $\sigma_y$  – предел упругости.

В [37, 38] показано, что  $Maxp > 1.5\sigma_y$  требуется для развития пластических деформаций в вершине трещины в конструкции из сплава алюминия. В этом случае сопротивление развитию трещины наблюдается вследствие пластической диссипации энергии. При  $Maxp < 1.5\sigma_y$  сопротивление развитию трещины оказывает энергия разрушения.

Предположим, что для моделирования роста трещины вокруг нее построена конечно-элементная модель. Для расчета движения трещины используется удаление конечных элементов. Для удаления предлагается использовать Cockcroft и Latham критерий пластичности [6], который описывается так.

$$W = \int \sigma_1 d\varepsilon_e \geq W_c, \quad (11)$$

где  $\sigma_1$  — максимальная величина из главных напряжений;

$\varepsilon_e$  — эквивалентные пластические деформации;

$W_c$  — параметр материала, который определяется из эксперимента.

Этот критерий имеет размерность работы единицы объема. Отметим, что конечный элемент не удаляется, если выполняется условие:  $W = \int \sigma_1 d\varepsilon_e \leq W_c$ . Величина  $W_c$  определялась из интегрирования кривой напряжения — деформации до разрушения материала. Используя Cockcroft и Latham критерий пластичности, получаем  $W_c = 1200(\pm 80) \text{ МПа}$ .

## Выводы

Рассмотрен процесс динамического разрушения типового участка стального магистрального газопровода с трещиной под действием газодинамического давления. Исследуется высокоскоростное развитие трещины, которая растет под действием истекающего большого количества газа под высоким давлением. Моделируется процесс движения магистральной трещины, которое индуцируется движением газа. Математическая модель этого процесса включает модель газодинамических процессов в трубе и модель высокоскоростного деформирования и разрушения участка трубы с трещиной.

Предложена приближенная аналитическая модель газодинамических процессов, которая позволяет моделировать динамическое убывание давления на внутреннюю поверхность трубы и берега трещины. Динамическое изменение давления базируется на декомпрессии газа в локализованной части трубы в окрестности трещины. Модель учитывает изменение давления газа в трубопроводе вдоль продольной координаты части трубы с трещиной.

Рассмотрена численная процедура для расчета газодинамического давления при истечении газа через трещину. Она позволяет определять давление на берега трещины как функцию времени. Результаты этой численной процедуры используются для численного моделирования высокоскоростного деформирования и лавинного разрушения типового участка магистрального газопровода с трещиной.

Предложена аналитическая модель, которая использует методы механики разрушения для предсказания критического давления, при котором наблюдается рост трещины в трубе. Модель верифицирована по экспериментальным данным и служит для быстрой оценки целостности трубы. Этот аналитический подход используется для предсказания возможности разрушения трубы на основе свойств материала, геометрии трещины и размеров трубы. Он может использоваться для предварительных оценочных расчетов.

Рассмотрен численно-аналитический метод для анализа неупругого динамического разрушения трубы. Он основывается на анализе величины угла раскрытия вершины трещины. Также рассмотрен численный метод анализа напряженного состояния в области трещины, учитывающий пластическое деформирование.

Представленные модели позволяют численными методами исследовать динамику развития трещин и, как следствие, разрушение типовых участков магистральных газопроводов под давлением. Использование результатов этих исследований позволит принять превентивные меры для предотвращения случаев лавинного разрушения аварийных участков магистральных трубопроводов.

Полученные результаты планируется использовать для численного анализа динамического напряженно-деформированного состояния и разрушения типового участка магистрального газопровода с трещинами.

## Благодарности/источник финансирования

Исследование проводилось в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан ИРН AP19680589 «Разработка

научных основ сопротивляемости магистральных газопроводов протяженному лавинному разрушению».

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Отчет национального оператора АО Qazaqgaz за 2021 г. URL: <https://qazaqgaz.kz/ru/otchety>
- 2 11th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970–2019) December 2020. URL: <https://www.egig.eu/reports>
- 3 UKOPA Pipeline Product Loss Incidents and Faults Report (1962–2020). ReportReference: February 2020. URL: <https://www.ukopa.co.uk/published-documents/ukopa-reports/>
- 4 PHMSA. Pipelines and Hazardous Materials Safety Administration. Pipeline Incident 20 Year Trends. URL: <https://www.phmsa.dot.gov/data-and-statistics/pipeline/pipeline-incident-20-year-trends>
- 5 Годовой отчет АО «ИнтергазЦентральнаяАзия» за 2019 г. – Нур-Султан. –2020. – 78 с. URL: <https://intergas.kz/ru/reports/88>
- 6 URL: <https://zonakz.net/2021/03/12/iznos-kazaxstanskix-gazoprovodov-sostavlyayet-bolee-70/>
- 7 Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения. – 2002. – Санкт-Петербург. [PDF file]. Retrieved from: <https://studfile.net/preview/2264467/>
- 8 Ibraimova U. et al. Development of method for calculation of pre-strained steel cylindrical sheaths in view of the winding angle, pitch and thickness // Case Studies in Construction Materials. – 2023. – Vol. 19, e02233. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02233>
- 9 O'Donoghue. P.E., Green S.T., Kanninen M.F., Bowles P.K. The development of a fluid/structure interaction model for flawed fluid containment boundaries with applications to gas transmission and distribution piping // Computers and Structures. – 1991. – Vol. 38. – P. 501–513. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(91\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0045-7949(91)90002-4).
- 10 O'Donoghue P.E., Kanninen M.F., Leung C.P., Demofonti G., Venzi S. The development and validation of a dynamic fracture propagation model for gas transmission pipelines // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 1997. – Vol. 70. – P. 11–25. [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(96\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(96)00012-9).
- 11 Berardo G., Salvini P. On longitudinal propagation of a ductile fracture in a buried gas pipeline: numerical and experimental analysis. In: Proceedings of the 2000 3rd international pipeline conference, Calgary, Canada. – 2000. [https://www.researchgate.net/publication/313743175\\_On\\_longitudinal\\_propagation\\_of\\_a\\_ductile\\_fracture\\_in\\_a\\_buried\\_gas\\_pipeline\\_numerical\\_and\\_experimental\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/313743175_On_longitudinal_propagation_of_a_ductile_fracture_in_a_buried_gas_pipeline_numerical_and_experimental_analysis)
- 12 Shuai J., Zhang H., Wang Y.G., Dai S.L. Research advance of dynamic crack propagation and arrest techniques for gas transmission pipeline. Journal of the university of petroleum, China. – 2004. – Vol. 28(3). – P. 129–135. [PDF file]. [https://www.researchgate.net/publication/287616844\\_Research\\_advance\\_of\\_dynamic\\_crack\\_propagation\\_and\\_arrest\\_techniques\\_for\\_gas\\_transmission\\_pipeline](https://www.researchgate.net/publication/287616844_Research_advance_of_dynamic_crack_propagation_and_arrest_techniques_for_gas_transmission_pipeline).
- 13 Nordhagen H.O., Kragset S., Berstad T., Morin A., Dørum S.T. A new coupled fluid–structure modeling methodology for running ductile fracture // Computers & Structures. – 2012. – Vol. 94–95. – P. 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.01.004>.
- 14 Okodi A., Lin M., Yoosef-Ghodsi N., Kainat M., Hassanien S., Adeeb S. Crack propagation and burst pressure of longitudinally cracked pipelines using extended finite element method // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2020. – Vol. 184. – P. 104115. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104115>.
- 15 Fries T.P., Belytschko T. The extended/generalised finite element method: an overview of the method and its applications // Int. J. Numer. Methods Eng. – 2010. – Vol. 84. – Issue 3. – P. 253 – 304. <https://doi.org/10.1002/nme.2914>.
- 16 Melenk J.M., Babuska I. The Partition of Unity Finite Element Method: Basic Theory and Applications // Computer methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1996. – Vol. 139. – P. 289–314. [PDF file]. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(96\)01087-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(96)01087-0).
- 17 Moes N., Dolbow J., Belytschko T. A finite element method for crack growth without remeshing // Int. J. Numer. Methods Eng. – 1999. – Vol. 46. – P. 131–150. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0207\(19990910\)46:13.O.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(19990910)46:13.O.CO;2-J).
- 18 Yan Z., Zhang S., Zhou W. Model error assessment of burst capacity models for energy pipelines containing surface cracks. International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2014. – P. 80–93. [PDF

file]. [https://www.academia.edu/29425274/Model\\_error\\_assessment\\_of\\_burst\\_capacity\\_models\\_for\\_energy\\_pipelines\\_containing\\_surface\\_cracks](https://www.academia.edu/29425274/Model_error_assessment_of_burst_capacity_models_for_energy_pipelines_containing_surface_cracks).

19 Zhu X.K. Review of fracture control technology for gas transmission pipelines. Proceedings of the 10th International Pipeline Conference. <https://doi.org/10.1115/IPC2014-33121>

20 Di Biagio M., Demofonti G., Mannucci G., Iob F., Spinelli C.M., Schmidt T. Development of a reliable model for evaluating the ductile fracture propagation resistance for high grade steel pipelines. Proceedings of the 2012 9th International Pipeline Conference, IPC2012, September 24-28, Calgary, Alberta, Canada. – 2012. <https://doi.org/10.1115/IPC2012-90614>.

21 Yang X.B., Zhuang Z., You X.C., Feng Y.R., Huo C.Y., Zhuang C.J. Dynamic fracture study by an experiment/simulation method for rich gas transmission X80 steel pipelines. Engineering Fracture Mechanics. – 2008. – Vol. 75. – P. 5018–5028. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.06.032>.

22 Berstad T., Dorum C., Jakoben J.P., Kragset S., Li H. et.al. CO<sub>2</sub> pipeline integrity: A new evaluation methodology / Energy Procedia. – 2010. – Vol. 4. – P. 3000–3007. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.210>

23 Zhuang Z., O'donoghue P.E. The recent development of analysis methodology for rapid crack propagation and arrest in gas pipelines // International Journal of Fracture. – 2000. – Vol. 101. – P. 269–290. <https://doi.org/10.1023/A:1007614308834>

24 Zhangabay N. et al. Factor affecting extended avalanche destructions on long-distance gas pipe lines: Review / Case Studies in Construction Materials. – 2023. – Vol. 19. – P. e02376. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02376>.

25 Fengping Y., Chunyong H., Jinheng L., He L.I., Yang L.I. Crack Propagation and Arrest Simulation of X90 Gas Pipe // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2017. – Vol. 149. – P. 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.12.005>.

26 Makino H., Sugie T., Watanabe H., Kubo T., Shiwaku, T., End, S. Inoue T., Kawaguchi, Y., Matsumoto Y., Machida S. Natural Gas Decompression Behavior in High Pressure Pipelines. ISIJ International. – 2001. – Vol. 4. – P. 389–395. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.389>.

27 ANSYS Learning–Thermal Convection in Heat Transfer–Assess Mode. Available online: <https://courses.ansys.com/index.php/courses/thermal-convection-in-heat-transfer/>

28 Jingshan T., Guanghua G., Yuping L. Chemical engineering thermodynamics. Beijing: Tsinghua University Press. – 1995. <https://chemicalpdf.com/category/chemical-engineering-thermodynamics/>.

29 Starling K. Fluid thermodynamic properties for light petroleum system. Houston. Gulf Publishing Company. – 1973. [Cited November 25, 2023]. [https://books.google.ru/books/about/Fluid\\_Thermodynamic\\_Properties\\_for\\_Light.html?hl=ru&id=YXMvAQAIAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.ru/books/about/Fluid_Thermodynamic_Properties_for_Light.html?hl=ru&id=YXMvAQAIAAJ&redir_esc=y).

30 Oikonomidis F., Shterenlikht A., Truman C.E. Prediction of crack propagation and arrest in X100 natural gas transmission pipelines with a strain rate dependent damage model (SRDD). Part 2: Large scale pipe models with gas depressurization // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2014. – Vol.105. – P. 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2013.03.003>

31 Kiefner J.F., Maxey W.A., Eiber R.J., Duffy A.R. Failure Stress Levels of Flaws in Pressurized Cylinders. American Society of Testing and Materials Report. – 1973. – P. 536, 461–481. <https://doi.org/10.1520/STP49657S>.

32 Zhang X., Lin M., Okodi A., Tan L., Leung J.Y. & Adeeb S. Numerical Analysis of API 5 L X42 and X52 Vintage Pipes With Cracks in Corrosion Defects Using Extended Finite Element Method // Journal of Pressure Vessel Technology. – 2021. – Vol. 143(6). – P. 061302. <https://doi.org/10.1115/1.4050988>

33 ASME Fitness-For-Service, API Recommended Practice 579-1/ASME FFS-1 2007, second ed. The American Society of Mechanical Engineers, New York, USA. – 2007. <https://www.yumpu.com/en/document/view/26949457/fitness-for-service/1025>.

34 B.S.I. BS7910. Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structure, British standards institution, London, UK. – 2005. [https://www.academia.edu/33758342/Guide\\_to\\_methods\\_for\\_assessing\\_the\\_acceptability\\_of\\_flaws\\_in\\_metallic\\_structures](https://www.academia.edu/33758342/Guide_to_methods_for_assessing_the_acceptability_of_flaws_in_metallic_structures).

35 Zhang Z., Xu J., Nyhus B., Østby E. SENT (single edge notch tension) methodology for pipeline applications, in: Proceedings of the 18th European Conference on Fracture, Dresden, Germany. – 2010. <https://folk.ntnu.no/zhiliang/Zhiliangs-Papers-in-PDF-format/ZZ-C070-2010-ECF18-SENT%20Methodology%20for%20pipeline%20applications.pdf>.

36 Schwalbe K.H., Scheider I., Cornec A. The SIAM Method for Applying Cohesive Models to the Damage Behavior of Engineering Materials and Structures, GKSS 2009/1, ISSN 0344-9629. [https://www.hereon.de/imperia/md/content/hzg/zentrale\\_einrichtungen/bibliothek/berichte/2009/gkss\\_2009\\_1.pdf](https://www.hereon.de/imperia/md/content/hzg/zentrale_einrichtungen/bibliothek/berichte/2009/gkss_2009_1.pdf)



37 Li H., Chandra N. Analysis of crack growth and crack-tip plasticity in ductile materials using cohesive zone models // *Int. J. Plast.* – 2003. – Vol. 19. – 849–882. [Cited November 25, 2023] URL: <https://researchwith.njit.edu/en/publications/analysis-of-crack-growth-and-crack-tip-plasticity-in-ductile-mate>.

38 Hallquist J.O. LS-DYNA Theory manual. Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore, California 94551. – 2006. – P. 680 [Cited November 25, 2023] URL: [https://www.academia.edu/23076592/LS\\_DYNA\\_Theory\\_Manual\\_LIVERMORE\\_SOFTWARE\\_TECHNOLOGY\\_CORPORATION\\_LSTC](https://www.academia.edu/23076592/LS_DYNA_Theory_Manual_LIVERMORE_SOFTWARE_TECHNOLOGY_CORPORATION_LSTC)

## REFERENCES

1 Otchet nacional'nogo operatora AO Qazaqgaz za 2021 g. [in Russian] URL: <https://qazaqgaz.kz/ru/otchety>

2 11th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970–2019) December 2020. URL: <https://www.egig.eu/reports>.

3 UKOPA Pipeline Product Loss Incidents and Faults Report (1962–2020). ReportReference: February 2020. URL: <https://www.ukopa.co.uk/published-documents/ukopa-reports/>

4 PHMSA. Pipelines and Hazardous Materials Safety Administration. Pipeline Incident 20 Year Trends. URL: <https://www.phmsa.dot.gov/data-and-statistics/pipeline/pipeline-incident-20-year-trends>

5 Godovoj otchet AO «IntergazCentral'najaAzija» za 2019 g. – Nur-Sultan. – 2020. – 78 c. URL: <https://intergas.kz/ru/reports/88>.

6 URL: <https://zonakz.net/2021/03/12/iznos-kazaxstanskix-gazoprovodov-sostavlyayet-bolee-70/>

7 Pestrikov V.M., Morozov E.M. (2002). *Mehanika razrusheniya*. Sankt-Peterburg [PDF file] [in Russian]. Retrieved from: <https://studfile.net/preview/2264467/>.

8 Ibraimova U. et al. Development of method for calculation of pre-strained steel cylindrical sheaths in view of the winding angle, pitch and thickness. *Case Studies in Construction Materials*. 2023, vol.19, e02233. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02233>

9 O'Donoghue. P.E., Green S.T., Kanninen M.F., Bowles P.K. (1991) The development of a fluid/structure interaction model for flawed fluid containment boundaries with applications to gas transmission and distribution piping. *Computers and Structures*, vol.38, pp. 501–513. .

10 O'Donoghue P.E., Kanninen M.F., Leung C.P., Demofonti G., Venzi S. (1997) The development and validation of a dynamic fracture propagation model for gas transmission pipelines. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 70, pp. 11–25.

11 Berardo G., Salvini P. (2000) On longitudinal propagation of a ductile fracture in a buried gas pipeline: numerical and experimental analysis. In: *Proceedings of the 2000 3rd international pipeline conference*, Calgary, Canada. [https://www.researchgate.net/publication/313743175\\_On\\_longitudinal\\_propagation\\_of\\_a\\_ductile\\_fracture\\_in\\_a\\_buried\\_gas\\_pipeline\\_numerical\\_and\\_experimental\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/313743175_On_longitudinal_propagation_of_a_ductile_fracture_in_a_buried_gas_pipeline_numerical_and_experimental_analysis)

12 Shuai J., Zhang H., Wang Y.G., Dai S.L. (2004). Research advance of dynamic crack propagation and arrest techniques for gas transmission pipeline. *Journal of the university of petroleum, China*, vol. 28(3), pp. 129–135. [https://www.researchgate.net/publication/287616844\\_Research\\_advance\\_of\\_dynamic\\_crack\\_propagation\\_and\\_arrest\\_techniques\\_for\\_gas\\_transmission\\_pipeline](https://www.researchgate.net/publication/287616844_Research_advance_of_dynamic_crack_propagation_and_arrest_techniques_for_gas_transmission_pipeline).

13 Nordhagen H.O., Kragset S., Berstad T., Morin A., Dørum S.T. (2012) A new coupled fluid–structure modeling methodology for running ductile fracture. *Computers & Structures*, vol. 94–95, pp. 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.01.004>.

14 Okodi A., Lin M., Yoosef-Ghodsi N., Kainat M., Hassanien S., Adeeb S. (2020) Crack propagation and burst pressure of longitudinally cracked pipelines using extended finite element method. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 184, p. 104115. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104115>.

15 Fries T.P., Belytschko T. (2010). The extended/generalised finite element method: an overview of the method and its applications, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 84, issue 3, pp. 253 – 304. <https://doi.org/10.1002/nme.2914>.

16 Melenk J.M., Babuska I. (1996) The Partition of Unity Finite Element Method: Basic Theory and Applications, *Computer methods in Applied mechanics and Engineering*. [PDF file]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 139, pp. 289–314. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(96\)01087-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(96)01087-0).



17 Moes N., Dolbow J., Belytschko T. (1999) A finite element method for crack growth without remeshing. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 46, pp. 131–150. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0207\(19990910\)46:13.O.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(19990910)46:13.O.CO;2-J)

18 Yan Z., Zhang S., Zhou W. (2014) Model error assessment of burst capacity models for energy pipelines containing surface cracks. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, pp. 80–93. [https://www.academia.edu/29425274/Model\\_error\\_assessment\\_of\\_burst\\_capacity\\_models\\_for\\_energy\\_pipelines\\_containing\\_surface\\_cracks](https://www.academia.edu/29425274/Model_error_assessment_of_burst_capacity_models_for_energy_pipelines_containing_surface_cracks)

19 Zhu X.K. (2014) Review of fracture control technology for gas transmission pipelines. *Proceedings of the 10th International Pipeline Conference*. <https://doi.org/10.1115/IPC2014-33121>.

20 Di Biagio M., Demofonti G., Mannucci G., Iob F., Spinelli C.M., Schmidt T. (2012) Development of a reliable model for evaluating the ductile fracture propagation resistance for high grade steel pipelines. *Proceedings of the 2012 9th International Pipeline Conference, IPC2012*, September 24–28, Calgary, Alberta, Canada. <https://doi.org/10.1115/IPC2012-90614>

21 Yang X.B., Zhuang Z., You X.C., Feng Y.R., Huo C.Y., Zhuang C.J. (2008) Dynamic fracture study by an experiment/simulation method for rich gas transmission X80 steel pipelines. *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 75, pp. 5018–5028. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.06.032>

22 Berstad T., Dorum C., Jakoben, J.P., Kragset S., Li H., et.al. (2010) CO<sub>2</sub> pipeline integrity: A new evaluation methodology. *Energy Procedia*, vol. 4, pp. 3000–3007. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.210>.

23 Zhuang Z., O'donoghue P.E. (2000) The recent development of analysis methodology for rapid crack propagation and arrest in gas pipelines. *International Journal of Fracture*, vol. 101, pp. 269–290. <https://doi.org/10.1023/A:1007614308834>.

24 Zhangabay N. et al. (2023) Factor affecting extended avalanche destructions on long-distance gas pipe lines: Review. *Case Studies in Construction Materials*, vol.19, p. e02376. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02376>.

25 Fengping Y., Chunyong H., Jinheng L., He L.I., Yang L.I. (2017) Crack Propagation and Arrest Simulation of X90 Gas Pipe. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 149, pp. 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.12.005>.

26 Makino H., Sugie T., Watanabe H., Kubo T., Shiwaku T., Endo S. Inoue T., Kawaguchi Y., Matsumoto Y., Machida S. (2001) Natural Gas Decompression Behavior in High Pressure Pipelines. *ISIJ International*, vol. 4, pp. 389–395. <https://10.2355/isijinternational.41.389>.

27 ANSYS Learning–Thermal Convection in Heat Transfer–Assess Mode. Available online: <https://courses.ansys.com/index.php/courses/thermal-convection-in-heat-transfer/>

28 Jingshan T., Guanghua G., Yuping L. (1995) *Chemical engineering thermodynamics*. Beijing: Tsinghua University Press. [Cited November 25, 2021]. <https://chemicalpdf.com/category/chemical-engineering-thermodynamics/>

29 Starling K. (1973). *Fluid thermodynamic properties for light petroleum system*. Houston. Gulf Publishing Company. [Cited November 25, 2023]. [https://books.google.ru/books/about/Fluid\\_Thermodynamic\\_Properties\\_for\\_Light.html?hl=ru&id=YXMvAQAAIAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.ru/books/about/Fluid_Thermodynamic_Properties_for_Light.html?hl=ru&id=YXMvAQAAIAAJ&redir_esc=y).

30 Oikonomidis F., Shterenlikht A., Truman C.E. (2014) Prediction of crack propagation and arrest in X100 natural gas transmission pipelines with a strain rate dependent damage model (SRDD). Part 2: Large scale pipe models with gas depressurization. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 105, pp. 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2013.03.003>.

31 Kiefner J.F., Maxey W.A., Eiber R.J., Duffy A.R. (1973) Failure Stress Levels of Flaws in Pressurized Cylinders. *American Society of Testing and Materials Report*, pp. 536, 461–481 <https://10.1520/STP49657S>.

32 Zhang X., Lin M., Okodi A., Tan L., Leung J. Y. & Adeeb S. (2021) Numerical Analysis of API 5 L X42 and X52 Vintage Pipes With Cracks in Corrosion Defects Using Extended Finite Element Method. *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 143(6), p. 061302. <https://doi.org/10.1115/1.4050988>.

33 ASME (2007) *Fitness-For-Service, API Recommended Practice 579-1/ASME FFS-1 2007*, second ed. The American Society of Mechanical Engineers, New York, USA. <https://www.yumpu.com/en/document/view/26949457/fitness-for-service/1025>.

34 B.S.I. BS7910 (2005). *Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structure*, British standards institution, London, UK. [https://www.academia.edu/33758342/Guide\\_to\\_methods\\_for\\_assessing\\_the\\_acceptability\\_of\\_flaws\\_in\\_metallic\\_structures](https://www.academia.edu/33758342/Guide_to_methods_for_assessing_the_acceptability_of_flaws_in_metallic_structures).

35 Zhang Z., Xu J., Nyhus B., Østby E. (2010) SENT (single edge notch tension) methodology for pipeline applications, in: Proceedings of the 18th European Conference on Fracture, Dresden, Germany. <https://folk.ntnu.no/zhiliang/Zhiliangs-Papers-in-PDF-format/ZZ-C070-2010-ECF18-SENT%20Methodology%20for%20pipeline%20applications.pdf>

36 Schwalbe K.H., Scheider I., Cornec A. (2009) The SIAM Method for Applying Cohesive Models to the Damage Behavior of Engineering Materials and Structures, GKSS 2009/1, ISSN 0344–9629. [https://www.hereon.de/imperia/md/content/hzg/zentrale\\_einrichtungen/bibliothek/berichte/2009/gkss\\_2009\\_1.pdf](https://www.hereon.de/imperia/md/content/hzg/zentrale_einrichtungen/bibliothek/berichte/2009/gkss_2009_1.pdf).

37 Li H., Chandra N. (2003) Analysis of crack growth and crack-tip plasticity in ductile materials using cohesive zone models, Int. J. Plast, vol. 19, pp. 849–882. [Cited November 25, 2023]. <https://researchwith.njit.edu/en/publications/analysis-of-crack-growth-and-crack-tip-plasticity-in-ductile-mate>.

38 Hallquist J.O. 2006 LS-DYNA Theory manual. Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore, California 94551, p. 680 [Cited November 25, 2023]. [https://www.academia.edu/23076592/LS\\_DYNA\\_Theory\\_Manual\\_LIVERMORE\\_SOFTWARE\\_TECHNOLOGY\\_CORPORATION\\_LSTC](https://www.academia.edu/23076592/LS_DYNA_Theory_Manual_LIVERMORE_SOFTWARE_TECHNOLOGY_CORPORATION_LSTC).

**<sup>1</sup>Жаңабай Н.Ж.,**

т.ғ.к., ORCID ID: 0000-0002-8153-1449, e-mail: nurlan.zhanabay777@mail.ru

**<sup>1</sup>Ибраимова Ұ.Б.,**

магистр, докторант, ORCID ID: 0000-0004-9786-1348, e-mail: ibraimova\_uljan@mail.ru

**<sup>1</sup>Сулейменов У.С.,**

т.ғ.к., ORCID ID: 0000-0001-7798-1044, e-mail: ulanbator@inbox.ru

**<sup>2</sup>Буганова С.Н.,**

т.ғ.к., ORCID ID: 0000-0003-2005-3305, e-mail: Svetlanabuganova7@gmail.com

**<sup>1</sup>Утелбаева А.Б.,**

х.ғ.д., ORCID ID: 0000-0002-4771-9835, e-mail: mako\_01-777@mail.ru

<sup>1</sup>М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, 160012, Шымкент қ., Қазақстан

<sup>2</sup>Халықаралық білім беру корпорациясы, 050043, Алматы қ., Қазақстан

## ГАЗ ҚҰБЫРЛАРЫ ҚИРАҒАН ЖАҒДАЙДА ПАЙДА БОЛАТЫН ГАЗДИНАМИКАЛЫҚ ҮРДІСТЕР МЕН ОЛАРДЫ ТАЛДАУ ӘДІСТЕРІ

### Аңдатпа

Газдинамикалық қысымның әсерінен жарылған магистральдық болат газ құбырының белгілі бір аймақтарындағы динамикалық қирау үрдісі қарастырылды. Қысымның әсерінен газ ағыны күшейіп, көп мөлшерде болуына байланысты жарықшаның жылдам таралатыны зерттелді. Газдың қозғалысынан туындаған магистральдық жарықшаның қозғалыс үрдісі модельденді. Бұл үрдістің математикалық моделі құбырдағы газдинамикалық үрдістердің моделін және құбырдың жарылған бөлігінің жоғары жылдамдықты деформациясы мен бұзылуының моделін қамтиды. Газдинамикалық үрдістердің аналитикалық моделі ұсынылып, бұл құбырдың ішкі бетіне және жарықша жағалауына қысым динамикасын төмендетуді модельдеуге мүмкіндік береді. Қысымның динамикалық өзгеруі құбырдың локализацияланған бөлігіндегі жарықша маңындағы газдың декомпрессиясына негізделген. Модель құбырдың жарылған бөлігінің бойлық координатасы бойынша құбырдағы газ қысымының өзгеруін ескереді. Жарықша арқылы газ ағып жатқан кезде газдинамикалық қысымды есептеудің сандық процедурасы қарастырылады. Жарықша арқылы газ ағу кезіндегі газдинамикалық қысымды есептеудің сандық процедурасы зерттелді. Бұл сандық процедураның нәтижесі жарылған жиектердегі қысымды анықтауға мүмкіндік береді. Құбырдағы жарықшаның тара луына әсер ететін критикалық қысымды болжау үшін қирау механикасының әдістерін қолданатын аналитикалық модель ұсынылды. Модель тәжірибелік деректермен тексерілген және құбырдың тұтастығын жылдам бағалауға қызмет етеді. Бұл аналитикалық тәсіл материалдың қасиеттеріне, жарықша геометриясына және құбыр өлшемдеріне негізделген құбырдың қирау мүмкіндігін болжау үшін қолданылады. Оны алдын ала бағалау есептеулері үшін пайдалануға болады. Құбырдың серпімді емес динамикалық қирауын талдаудың сандық-аналитикалық әдісі қарастырылған. Ол жарықша шыңының ашылу бұрышының ша масын талдауға негізделген. Пластикалық деформацияны ескере отырып, жарықша аймағындағы кернеу жағдайын талдаудың сандық әдісі де қарастырылады. Ұсынылған модельдер сандық әдістермен жарықшалардың даму динамикасын және қысымның магистральдық газ құбырларына әсерін талдау нәтижесі жиі қирайтын.

**Тірек сөздер:** газ құбыры, қирау, газдинамикалық үрдістер, бағалау әдістері, жарықшаның ұшы, талдау.

**<sup>1</sup>Zhangabay N.Zh.,**

candidate of technical sciences, ORCID ID: 0000-0002-8153-1449,

e-mail: nurlan.zhanabay777@mail.ru

**<sup>1</sup>Ibraimova U.B.,**

Master, Doctoral Student, ORCID ID: 0000-0004-9786-1348, e-mail: ibraimova\_uljan@mail.ru

**<sup>1</sup>Suleimenov U.S.,**

doctor of technical sciences, ORCID ID: 0000-0001-7798-1044,

e-mail: ulanbator@inbox.ru

**<sup>2</sup>Buganova S.H.,**

candidate of technical sciences, ORCID ID: 0000-0003-2005-3305,

e-mail: Svetlanabuganova7@gmail.com

**<sup>1</sup>Utelbayeva A.B.,**

doctor of Chemical Sciences, ORCID ID: 0000-0002-4771-9835,

e-mail: mako\_01-777@mail.ru

<sup>1</sup>Auezov University, 160012, Shymkent

<sup>2</sup>International Educational Corporation, 050043, Almaty

## **GAS-DYNAMIC PROCESSES OCCURRING DURING THE DESTRUCTION OF GAS PIPELINES AND METHODS OF THEIR ANALYSIS**

### **Abstract**

The process of dynamic destruction of a typical section of a steel main gas pipeline with a crack under the action of gas dynamic pressure is considered. The high-speed development of a crack, which grows under the action of a large amount of gas flowing out under high pressure, is investigated. The process of the main crack movement, which is induced by the gas movement, is modeled. The mathematical model of this process includes a model of gas-dynamic processes in a pipe and a model of high-speed deformation and fracture of a pipe section with a crack. An approximate analytical model of gas-dynamic processes is proposed, which makes it possible to simulate the dynamic decrease in pressure on the inner surface of the pipe and the crack bank. The dynamic pressure change is based on decompression of gas in the localized part of the pipe in the vicinity of the crack. The model takes into account the change in gas pressure in the pipeline along the longitudinal coordinate of the part of the pipe with a crack. A numerical procedure for calculating the gas dynamic pressure when gas flows through a crack is considered. It allows you to determine the pressure on the crack banks as a function of time. The results of this numerical procedure are used for numerical simulation of high-speed deformation and avalanche destruction of a typical section of a main gas pipeline with a crack. An analytical model is proposed that uses the methods of fracture mechanics to predict the critical pressure at which crack growth in the pipe is observed. The model is verified according to experimental data and serves for a quick assessment of the integrity of the pipe. This analytical approach is used to predict the possibility of pipe failure based on material properties, crack geometry and pipe dimensions. It can be used for preliminary estimation calculations. A numerical-analytical method for the analysis of inelastic dynamic destruction of a pipe is considered. It is based on the analysis of the magnitude of the crack tip opening angle. A numerical method for analyzing the stress state in the crack region, taking into account plastic deformation, is also considered. The presented models allow numerical methods to investigate the dynamics of crack development and, as a consequence, the destruction of typical sections of main gas pipelines under pressure. Using the results of these studies will make it possible to take preventive measures to prevent cases of avalanche destruction of emergency sections of main pipelines.

**Key words:** gas pipeline, destruction, gas dynamic processes, assessment methods, crack tip, analysis.