

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ MODELING AND OPTIMIZATION

УДК 621.039.586

DOI: 10.17587/it.26.443-450

А. Е. Александров, д-р техн. наук, проф., e-mail: femsystem@yandex.ru,
Т. Б. Аждер, канд. техн. наук, доц., e-mail: azhder@yandex.ru,
И. В. Степанова, канд. геол.-мин. наук, доц., e-mail: ivs_rrr@mail.ru,
Российский технологический университет (МИРЭА)

Вероятностная модель расчета трубопроводов по механизму вязкого и хрупкого разрушения

Разработана вероятностная модель расчета разрушения трубопровода по механизму хрупкого и вязкого разрушения. Приведенная модель реализована в виде программы для ЭВМ, которая может быть использована для расчета вероятностей возникновения течей и крупномасштабного разрушения цилиндрических сосудов давления и трубопроводов под действием статических и циклических нагрузжений при переменных по толщине полях температур и напряжений. Приведены примеры параметрических расчетов для моделирования поведения трубопровода при различных условиях эксплуатации и выбранных материалах. Полученные результаты расчетов могут быть использованы для обоснования обеспечения требований концепции "течь перед разрушением", определяющих невозможность крупномасштабного разрушения трубопровода и в связи с этим сделать более безопасной его эксплуатацию.

Ключевые слова: вероятностный анализ безопасности, вероятностные методы механики разрушения, докритический и критический рост трещин, метод Монте-Карло, параметрический анализ

Введение

При эксплуатации энергетических систем, особенно объектов ядерной энергетики, одним из важнейших направлений является задача по обеспечению заданного уровня безопасности. Важное место в данном направлении занимает концепция, основанная на предварительном анализе рисков и прогнозировании аварийных ситуаций [1]. Решение такого рода задач проводится, как правило, с помощью методов моделирования и разработанных на их основе программных средств. В данной работе приводится вероятностная модель расчета трубопроводов по механизму хрупкого и вязкого разрушения, реализованная в виде программы для ЭВМ и используемая для моделирования процессов разрушения при различных условиях эксплуатации.

Системы трубопроводов относятся к числу наиболее протяженных и нагруженных конструкций, поэтому аварии таких систем приводят к наиболее тяжелым экономическим и экологическим последствиям.

Общая схема расчета трубопровода реакторной установки

Вероятностный анализ разрушения трубопровода предполагает реализацию нескольких этапов проведения расчетов, которые представлены на рис. 1.

Предварительно выбранный трубопровод разбивается на конструктивные элементы (КнЭ). Характерная особенность КнЭ состоит в том, что в рамках выделенного геометрического объема развитие трещины не выходит за его границы, т.е. достижение трещиной границы КнЭ означает, что размер ее достиг предельно допустимого критического размера. Это требование к выбору КнЭ позволяет определить полную вероятность разрушения анализируемой конструкции, объединяя вероятности разрушения КнЭ в соответствии со структурной схемой конструкции.

В разработанной программе поддерживаются следующие типы КнЭ: прямой участок, сварное соединение, гиб (отвод гнутый, сварное колено). Тип выбранного КнЭ определя-

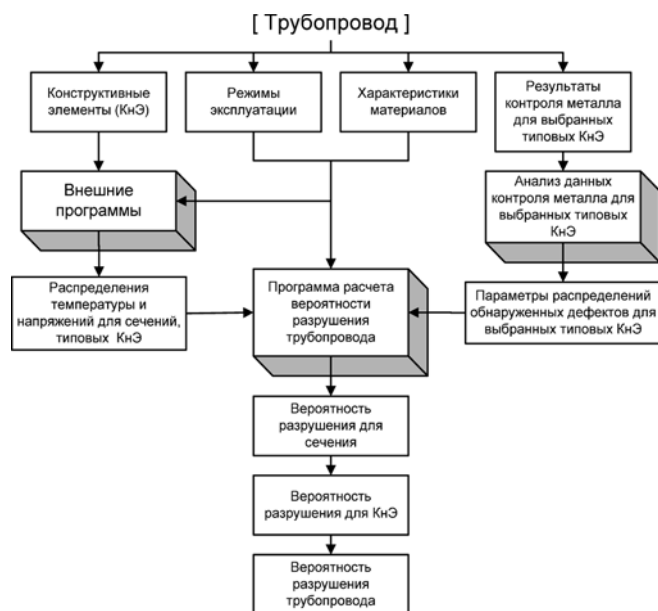


Рис. 1. Общая схема расчета вероятности разрушения трубопровода

ет доступные методы расчета, используемые в программе.

Для каждого из выделенных КнЭ задаются исходные данные, включающие режимы эксплуатации, характеристики материалов, а также результаты проводимого контроля металла (дефектность металла). Для выбранного КнЭ задаются также возможные траектории развития трещин, вдоль которых с помощью внешних программных средств рассчитываются температурные поля и напряжения. Все эти данные передаются в программу как исходные, на основе которых определяется условная вероятность разрушения рассматриваемого КнЭ для заданной траектории развития трещин. Используя полученные данные условной вероятности разрушения для каждого КнЭ, можно рассчитать суммарную вероятность разрушения исследуемого трубопровода. Следует заметить, что если КнЭ образуют последовательно соединенную структурную схему исходной конструкции, то разрушение (отказ) любого КнЭ трубопровода приводит к разрушению (отказу) всего трубопровода.

Для анализа безопасности трубопровода экспертами предварительно формируются расчетные события, моделирующие сценарий процесса его эксплуатации. Расчетные события включают режимы эксплуатации, их сочетания в виде отдельных последовательностей, которые образуют циклограммы, число циклограмм и частоту их появления в процессе эксплуатации. В свою очередь, сами расчетные события характеризуются частотой появления. В этом случае вероятность безотказной работы

трубопровода может быть найдена по теореме умножения независимых событий — не отказов каждого из выделенных элементов. Условную вероятность отказа (разрушения) всего трубопровода $P_{fr_i}(\tau)$ для i -го расчетного события можно найти из следующего соотношения:

$$P_{fr_i}(\tau) = 1 - \prod_{j=1}^M (1 - P_{j/fr_i}), \quad (1)$$

где τ — время эксплуатации трубопровода; $P_{fr_i}(\tau)$ — условная вероятность отказа всего трубопровода при реализации i -го расчетного события; $P_{j/fr_i}(\tau)$ — условная вероятность отказа (разрушения) j -го конструктивного элемента при условии реализации i -го расчетного события; fr_i — частота появления i -го расчетного события; M — число конструктивных элементов, входящих в описание анализируемого трубопровода.

Если известна частота появления расчетного события fr_i , то вероятность отказа (разрушения) всего трубопровода может быть найдена следующим образом:

$$P_{\Sigma}(\tau) = \sum_{i=1}^N fr_i P_{fr_i}(\tau), \quad (2)$$

где N — число расчетных событий, определяемых экспертами заданный сценарий эксплуатации трубопровода.

Математическая модель

Математическая модель, используемая в программе, основана на уравнениях механики разрушения, в частности, механики тел, содержащих трещины, и включает математическое описание стадий их докритического и критического роста.

Докритический рост трещин рассматривался в виде циклического подрастания, определяемого уравнением Пэррисса:

$$\frac{da}{dN} = A_0 C_0 (\Delta K_{eff})^m, \quad (1)$$

где $\Delta K_{eff} = \frac{\Delta K}{\sqrt[4]{1-R}}$, $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ — размах коэффициента интенсивности напряжений в пределах цикла; A_0 , C_0 , m — экспериментальные коэффициенты для данного материала и среды; R — коэффициент асимметрии цикла, который рассчитывается по формуле $R = \frac{K_{min}}{K_{max}}$.

В свою очередь, критический рост трещин был промоделирован по механизму хрупкого или вязкого разрушения.

Согласно работе [2] хрупкое разрушение имеет стохастическую природу и может быть описано на основе теории наислабейшего звена. Поэтому при расчете хрупкого разрушения было использовано трехпараметрическое распределение Вейбулла:

$$P_f = 1 - \exp \left[- \left(\frac{K_1 - K_{\min}}{K_0(T)^L - K_{\min}} \right)^4 \right], \quad (2)$$

где P_f — вероятность хрупкого разрушения при значении коэффициента интенсивности напряжений K_1 ; K_{\min} — минимальное значение вязкости разрушения, независящее от размера образца (точнее от длины фронта трещины) и температуры испытаний; $K_0(T)^L$ — параметр масштаба, зависящий от размера образца и температуры.

Параметр масштаба $K_0(T)^L$ для заданной температуры T и заданного характерного размера L рассчитывался по формуле

$$K_0(T)^L = K_{\min} + (\overline{K_{IC}}(T) - K_{\min}) \left(\frac{L_0}{L} \frac{1}{(-\ln(1 - P_f))} \right)^{1/4}, \quad (3)$$

где $\overline{K_{IC}}(T)$ — базовая температурная зависимость вязкости разрушения при заданном уровне вероятности P_f и для стандартного образца размера L_0 (определяется по экспериментальным данным для заданного материала).

При моделировании процессов хрупкого разрушения значения $\overline{K_{IC}}(T)$ вводятся в программу в виде таблицы как исходные данные.

Для расчета коэффициента интенсивности напряжений K_1 было использовано напряжение, приведенное к равномерному, которое рассчитывалось на основе значений напряжений, передаваемых из внешних программ. В этом случае напряженное состояние и температура по толщине стенки КнЭ могут иметь произвольные законы распределения.

При расчете вязкого разрушения были использованы инженерные методы (коллапс нетто-сечения): метод предельной пластической нагрузки (ППН) и метод локального разрушающего напряжения (ЛРН). Предельное состояние в этом случае определялось в соответствии с условием, что приложенная к конструктивному элементу с трещиной нагрузка превышает значение напряжения течения σ_f (разрушающего напряжения). Величина σ_f для материала рассчитывалась как величина, лежащая между значениями пределов текучести $R_{p0,2}$ и прочно-

сти R_m . Конкретный способ расчета предельной нагрузки и величины σ_f определяется выбранным методом расчета. В разработанной программе были реализованы все инженерные методы расчета вязкого разрушения, приведенные в национальном стандарте [3], включая:

- метод ЛРН (KWU) для поверхностной окружной трещины;
- метод ЛРН (KWU) для сквозной окружной трещины;
- метод ППН (MP-125) для поверхностной окружной трещины;
- метод ППН (MP-125) для сквозной окружной трещины;
- метод ВМІ для поверхностной осевой трещины;
- метод ВМІ для сквозной осевой трещины;
- метод MP-125 для поверхностной осевой трещины;
- метод MP-125 для сквозной осевой трещины;
- метод МРА(KCV) для поверхностной осевой трещины;
- метод МРА(KCV) для сквозной осевой трещины;
- метод расчета напряжения течения для сквозной осевой трещины в отводе гнупом.

Для выбора наиболее консервативного результата и учета неопределенностей может быть использован мажоритарный подход. В этом случае проводится серия расчетов из перечисленного набора методов и выбирается наиболее консервативный результат.

Методической основой для расчета вероятности как вязкого, так и хрупкого разрушения является метод Монте-Карло. Несомненным преимуществом используемого метода является простота его реализации применительно к произвольным, в том числе и нелинейным процессам. Это позволяет без особых сложностей сопровождать разработанное программное обеспечение и вносить в него изменения по мере необходимости, оставляя основную конструкцию программы не тронутой.

Используемые в исходной модели случайные параметры моделируются на основе заданных исходных распределений. Расчет вероятности разрушения элемента трубопровода включает проведение заданного предварительно числа статистических экспериментов. В ходе каждого отдельного эксперимента рассчитывается вероятность разрушения для выбранного КнЭ трубопровода (основной металл или сварное соединение), исследуемого режима эксплуатации и всех типов исследуемых в расчете трещин. Результатом расчета является плот-

ность распределения вероятности разрушения, а также математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение.

Особое внимание при работе с программой уделено формированию случайных распределений размеров дефектов и его изменению, вызванного различными процессами при эксплуатации исследуемого трубопровода. Для этой цели разработана библиотека функций, позволяющая менять исходное распределение дефектов в соответствии с задаваемыми условиями эксплуатации. На основе экспериментально полученных значений размеров обнаруженных дефектов и характеристик прибора по контролю металла, первоначально формируется распределение в виде кусочно-постоянной функции $g_0(a_i)$ с переменным шагом на интервале допустимых в рамках проводимого расчета размеров дефектов, где a_i — размер дефекта для i -го интервала. Полученный массив значений $g_0(a_i)$ корректируется с учетом вероятности обнаружения дефекта заданного размера. Для этого используется функция $Pfunc(a)$, известная для используемого метода контроля. Модификация исходного распределения в целях учета необнаруженных дефектов выполняется по формуле

$$g(a_i) = \frac{g_0(a_i)}{Pfunc(a_i)}. \quad (4)$$

В результате формируется массив значений действительных размеров дефектов $g(a_i)$.

Для корректировки плотности дефектов вычисляется интеграл от функции $g(a_i)$ на интервале (a_{\min}, s) :

$$k = \frac{N}{M} = \int_{a_{\min}}^s g(a) da \geq 1, \quad (5)$$

где a_{\min} — чувствительность используемого метода контроля;

s — толщина стенки трубопровода,

M — число обнаруженных дефектов в контрольном объеме,

N — число действительных дефектов в контрольном объеме.

Корректировка плотности дефектов ρ проводится согласно формуле

$$\rho = k\rho_0, \quad (6)$$

где ρ — плотность действительных дефектов; ρ_0 — плотность обнаруженных дефектов.

Далее таблица значений действительных размеров трещин нормируется в соответствии с формулой

$$\overline{g(a_i)} = \frac{g(a_i)}{\int_{a_{\min}}^s g(a) da}, \quad (7)$$

где $\overline{g(a_i)}$ — нормированное значение распределения действительных размеров дефектов.

Исходная выборка дефектов формируется на основе данных, полученных перед эксплуатацией объекта в результате проведения входного или предэксплуатационного контроля. Если размер дефекта превышает заданное предельное значение a_{rem} , дефект ремонтируется. В этом случае проводится корректировка распределения в следующей последовательности: для интервала, расположенного левее значения a_{rem} , корректировка не проводится, а для интервала, расположенного правее a_{rem} , корректировка проводится по формуле

$$g_{rem}(a_i) = g(a_i)(1 - Pfunc(a_i)), \quad (8)$$

где $g_{rem}(a_i)$ — плотность распределения действительных размеров с учетом ремонта при входном или/и предэксплуатационном контроле.

Далее таблица значений действительных размеров с учетом ремонта при входном или/и предэксплуатационном контроле нормируется в соответствии с формулой:

$$\overline{g_{rem}(a_i)} = \frac{g_{rem}(a_i)}{\int_{a_{\min}}^s g_{rem}(a_i) da}, \quad (9)$$

где $\overline{g_{rem}(a_i)}$ — нормированное значение распределения действительных размеров трещин с учетом ремонта.

Корректировка плотности дефектов, вызванная проведением контроля металла и последующим ремонтом, проводится в соответствии с зависимостями

$$k_{rem} = \int_{a_{\min}}^s g_{rem}(a_i) da, k \leq 1, \quad (10)$$

$$\rho_{rem} = \rho k_{rem}, \quad (11)$$

где ρ_{rem} — плотность дефектов с учетом ремонта.

Обнаруженные при эксплуатации дефекты могут иметь различный механизм образования: это могут быть технологические дефекты (пора, непровар, подрез сварного соединения и т. д.) или дефекты, образовавшиеся в период эксплуатации (трещины усталостные, коррозионные и т. д.). Независимо от механизма образования дефектов при проведении расчетов все обнаруженные дефекты приводятся к расчетным трещинам. Используемая в настоящее время схе-

матизация полученных при проведении неразрушающего контроля дефектов [4] предполагает представление их в виде эллипса (если это поверхностная трещина) или в виде полуэллипса (если это поверхностная трещина). Расположение трещины формируется таким образом, что малая ось совпадает с направлением толщины стенки и называется глубиной трещины. Ориентация трещин может быть осевой (продольная трещина) или окружной (поперечная трещина).

Методически программа построена таким образом, что вначале рассчитывается вероятность разрушения контрольного объема от единичной трещины, а затем с учетом действительного числа трещин в контрольном объеме рассчитывается вероятность разрушения произвольного объема, в котором находятся n трещин. Эта процедура получила название "процедура масштабирования".

Процедура масштабирования

Если в объеме V находится N трещин, то вероятность разрушения рассматриваемого объема составит

$$P_f(N) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{fi}), \quad (12)$$

где $P_f(N)$ — вероятность разрушения рассматриваемого объема V , в котором находятся N трещин; P_{fi} — вероятность разрушения объема V от i -й трещины.

Выберем среди всех рассматриваемых трещин такую, которая имеет наибольшую вероятность разрушения P_f и будем считать, что для всех N трещин вероятность разрушения одинакова и равна значению P_f . В этом случае полученное значение вероятности разрушения объема V будет иметь консервативное значение. Для этого случая рассмотрим два варианта: 1-й вариант — когда выполняется условие $P_f \ll 1$, и 2-й вариант — когда условие $P_f \ll 1$ не выполняется. Для 1-го варианта вероятность разрушения объема V , имеющего N трещин, составит

$$P_f(N) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{fi}) = 1 - (1 - P_f)^N = NP_f. \quad (13)$$

События вида "в объеме V содержится n трещин", где $n = 0, 1, \dots, \infty$, образуют полную группу событий, так как сумма вероятностей этих событий равна 1, а сами события попарно несовместны. Тогда, используя формулу полной вероятности, получим:

$$P_{fV} = \sum_{n=0}^{\infty} P(n)P_f(n), \quad (14)$$

где P_{fV} — вероятность разрушения объема V ; $P_f(n)$ — вероятность разрушения объема V , если в нем содержится n трещин; $P(n)$ — вероятность нахождения n трещин в объеме V .

Заметим, что вероятность $P(n)$ нахождения n трещин в объеме V является случайной величиной, распределенной по закону Пуассона [5]:

$$P(N/\rho) = \frac{\rho^N}{N!} \cdot \exp(-\rho), \quad (15)$$

где $P(N/\rho)$ — интегральная функция распределения вероятности нахождения числа трещин N при условии заданной плотности трещин ρ ; параметр ρ равен математическому ожиданию числа трещин, распределенных по закону Пуассона.

Подставив в формулу (14) значение $P(n)$ в соответствии с формулой (15), а вместо выражения $P_f(n)$ — его значение, взятое из формулы (13), получим

$$P_{fV} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\rho^n}{n!} \exp(-\rho) n P_f = \bar{n} P_f = \rho V P_f, \quad (16)$$

где V — рассматриваемый объем; \bar{n} — математическое ожидание числа трещин, полученное из закона распределения Пуассона.

В случае если условие $P_f \ll 1$ не выполняется, необходимо использовать вместо соотношения (13) следующую зависимость:

$$P_f(N) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{fi}) = 1 - (1 - P_f)^N, \quad (17)$$

а вместо (16) — зависимость

$$P_{fV} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\rho^n}{n!} \exp(-\rho) [1 - (1 - P_f)^n]. \quad (18)$$

Число членов ряда n выбирается из условия обеспечения заданной точности расчетов.

Пример расчета с использованием разработанной программы

Используя разработанную программу, можно моделировать различные ситуации, в том числе и аварийные, прогнозируя их развитие и оценивая риски. Ниже приведены результаты параметрических расчетов вероятности разрушения трубопровода (внутренний диаметр $D = 0,346$ м; толщина стенки $S = 0,04$ м) для различных исходных данных. Исходные данные для проводимых расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

| № | 1. Характеристики средств контроля | | | |
|--|---|--|--|--|
| | Коэффициент достоверности методов контроля, 1/м | Чувствительность средств контроля, мм | Граничная глубина дефекта, выше которой проводится ремонт трубопровода, мм | |
| 1 | 60 | 0,5 | 3 | |
| 2. Описание трещин | | | | |
| | Тип трещин | Ориентация трещин | Число трещин на ед. длины, 1/м | |
| 2 | Полуэллиптическая | Осевая | 5,4 | |
| 3. Распределение трещин по размерам, логнормальное | | | | |
| Распределение глубин, мм | | Распределение длин, мм | | |
| | Логарифмическое матожидание | Логарифмическое стандартное отклонение | Логарифмическое матожидание | Логарифмическое стандартное отклонение |
| 3 | 0,15 | 0,73 | 1,24 | 0,75 |

Таблица 2

| № | Характеристика материала, напряжение течения, МПа | | Внешняя нагрузка | |
|---|---|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| | Математическое ожидание | СКО, 10 % от математического ожидания | Среднее по толщине напряжение, МПа | Средняя по толщине температура, °С |
| 1 | 300 | 30 | 50 | 350 |
| 2 | 280 | 28 | 76 | 350 |
| 3 | 250 | 25 | 100 | 350 |
| 4 | 230 | 23 | 125 | 350 |
| 5 | 220 | 22 | 150 | 350 |
| 6 | 200 | 20 | 175 | 350 |
| 7 | 180 | 18 | 200 | 350 |
| 8 | 160 | 16 | 300 | 350 |

В качестве варьируемых параметров были выбраны характеристики материала и значения внешней нагрузки, приведенные в табл. 2.

На рис. 2 приведены результаты расчетов вероятности течи и вязкого разрушения в зависимости от характеристики материала. В качестве такой характеристики было использовано напряжение течения, задаваемое в виде случайного нормального распределения.

Среднее квадратичное отклонение принималось равным 10 % от значения матожидания. Внешняя нагрузка для данной серии расчетов принималась следующей: среднее по толщине

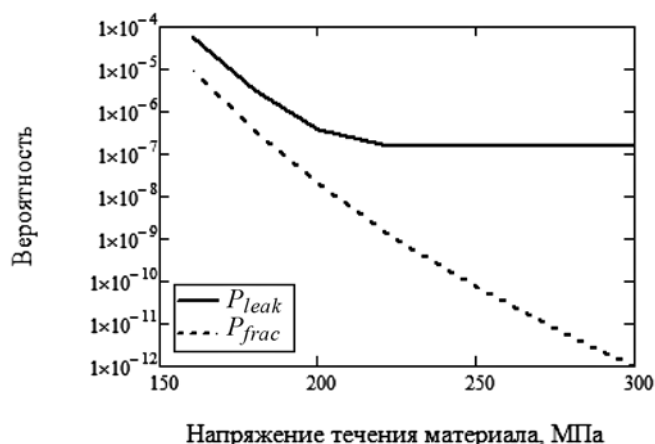


Рис. 2. Зависимость вероятности течи P_{leak} и разрушения P_{frac} трубопровода от характеристики материала — напряжения течения σ_f , МПа

напряжение $p = 76$ МПа; средняя по толщине температура $T = 350$ °С. Как следует из рис. 2, при ухудшении свойств материала (при уменьшении значения напряжения течения) различие между вероятностью течи и разрушения становится незначительным. Этот момент необходимо учитывать при использовании концепции "течь перед разрушением", которая обосновывает невозможность катастрофического разрушения трубопровода при эксплуатации [6]. Одним из важнейших требований при реализации этой концепции является определение условий, при которых возможна течь, но не наступает полное разрушение трубопровода. Ранее обнаружение течи позволяет принять своевременные мера и избежать крупномасштабного разрушения трубопровода. Подробное изложение подходов и особенностей применения концепции "течь пред разрушением" представлено в документах МАГАТЭ [7].

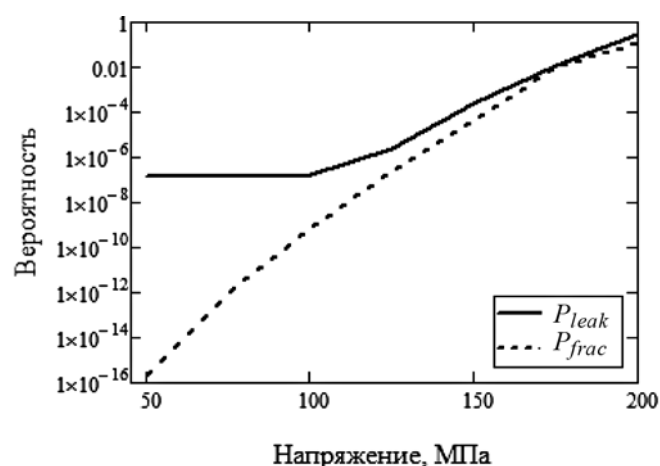


Рис. 3. Зависимость вероятности течи P_{leak} и разрушения P_{frac} трубопровода от внешней нагрузки p , МПа, $T = 350$ °С, при заданной характеристике материала σ_f (матожидание 300 МПа, СКО = 30 МПа)

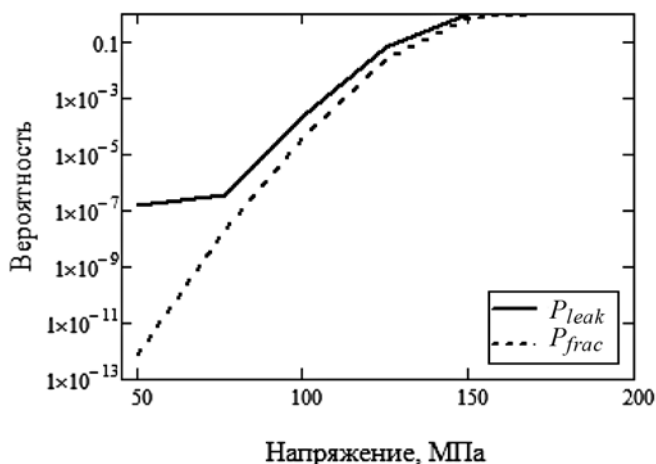


Рис. 4. Зависимость вероятности течи P_{leak} и разрушения P_{frac} трубопровода от внешней нагрузки p , МПа, $T = 350$ °С, при заданной характеристике материала σ_f (матожидание 200 МПа, СКО = 20 МПа)

Из представленной на рис. 2 зависимости можно определить требуемые характеристики материала при заданном уровне безопасной эксплуатации трубопровода.

На рис. 3 и 4 приведены результаты расчетов вероятности течи и вязкого разрушения в зависимости от внешней нагрузки для выбранных значений характеристик материала, которые также могут быть использованы для выбора условий эксплуатации и оценки рисков аварийных ситуаций. Следует заметить, что список варьируемых параметров может быть существенно расширен.

Заключение

Разработана вероятностная модель расчета разрушения трубопровода по механизму хрупкого и вязкого разрушения. Приведенная модель реализована в виде программы для ЭВМ, которая может быть использована для расчета вероятностей возникновения течей и крупномасштабного разрушения цилиндрических сосудов давления и трубопроводов под действием статических и циклических нагрузений при переменных по толщине полями температур и напряжений.

Математическая модель, используемая в программе, основана на уравнениях механики разрушения, в частности, механики тел, содержащих трещины, и включает математическое описание стадий их докритического и критического роста.

Докритический рост трещин рассматривался в виде циклического подрастания, определяемого уравнением Пэрриса.

Критический рост трещин моделировался по механизму хрупкого или вязкого разрушения. Для расчета хрупкого разрушения было использовано трехпараметрическое распределение Вейбулла. Значения базовой температурной зависимости вязкости разрушения при заданном уровне вероятности и для стандартного образца, которые определяются по экспериментальным данным для заданного материала, вводятся в программу в виде таблицы как исходные данные.

При расчете вязкого разрушения были использованы инженерные методы (коллапс нетто-сечения): метод пластической нагрузки и метод локального разрушающего напряжения. В разработанной программе были реализованы все инженерные методы расчета вязкого разрушения, приведенные в национальном стандарте ГОСТ Р 58328—2018.

Особое внимание при работе с программой было уделено формированию случайных распределений размеров дефектов и его изменению, вызванному различными процессами при эксплуатации исследуемого трубопровода. Для этой цели разработана библиотека функций, позволяющая менять исходное распределение дефектов в соответствии с задаваемыми условиями эксплуатации.

Приведены примеры параметрических расчетов для моделирования поведения трубопровода при различных условиях эксплуатации и выбранных материалах. Полученные результаты расчетов могут быть использованы для обоснования обеспечения требований концепции "течь перед разрушением", определяющих невозможность крупномасштабного разрушения трубопровода.

Список литературы

1. Анализ риска и проблемы безопасности. В 4-х частях // Ч.1. Основы анализа и регулирования безопасности: Науч. руковод. К. В. Фролов. М.: МГФ "Знание", 2006. 640 с.
2. Wallin K. The scatter in K_{IC} result // *Eng. Fract. Mech.* 1984. Vol. 19. P. 1085—1095.
3. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 58328—2018. Трубопроводы атомных станций. М.: Стандартинформ, 2019. 73 с.
4. Методические рекомендации. МР 125-02-95. Правила составления расчетных схем и определение параметров нагруженности элементов конструкций с выявленными дефектами. М.: ЦНИИТМАШ, 1995.
5. Унифицированная процедура оценки оборудования и трубопроводов АЭС с РУ ВВЭР на протяжении срока службы. VERLIFE — версия 2008. 2008 г.
6. Гетман А. Ф. Концепция безопасности "течь перед разрушением" для сосудов и трубопроводов давления АЭС. М.: Энергоатомиздат. 1999. 258 с.
7. International Atomic Energy Agency. Applicability of the leak before break concept. IAEA-TECDOC-710. Vienna, 1993.

A. E. Aleksandrov, Ph.D., Professor, e-mail: femsystem@yandex.ru,
T. B. Azhder, Ph.D., Associate Professor, e-mail: azhder@yandex.ru,
I. V. Stepanova, Ph.D., Associate Professor, e-mail: ivs_rrr@mail.ru
Moscow Technological University (MIREA), 107996, Moscow, Russian Federation

A Probabilistic Model for Calculating Pipelines by the Mechanism of Ductile and Brittle Fracture

A probabilistic model for calculating the failure of the pipeline by the mechanism of brittle and ductile fracture is developed. The presented model is implemented in the form of a computer program, which can be used to calculate the probabilities of leaks and large-scale fracture of cylindrical pressure vessels and pipelines under the action of static and cyclic loads with temperature and stress fields varying in thickness. Examples of parametric calculations for modeling the behavior of the pipeline under various operating conditions and selected materials are given. The results of the calculations can be used to justify the requirements of the "leak before destruction" concept, which determine the impossibility of large-scale fracture of the pipeline and, therefore, make its operation safer.

Keywords: probabilistic safety analysis, probabilistic methods of fracture mechanics, subcritical and critical crack growth, Monte Carlo method, parametric analysis.

DOI: 10.17587/it.26.443-450

References

1. **Risk** analysis and security issues. In 4 parts. Part 1. Fundamentals of safety analysis and regulation: Scientific adviser K. V. Frolov, Moscow, MGF Znanie, 2006, 640 p. (in Russian).
2. **Wallin K.** The scatter in K_{IC} result, *Eng. Fract. Mech.*, 1984, vol. 19, pp. 1085–1095.
3. **National** standard of the Russian Federation. GOST R 58328–2018. Piping of nuclear power plants, Moscow, Standartinform, 2019, 73 p. (in Russian).
4. **Guidelines.** MR 125-02-95. Rules for drawing up design schemes and determining the load parameters of structural elements with identified defects. TSNIITMASH, Moscow, 1995 (in Russian).
5. **VERLIFE** Unified procedure for lifetime assessment of components and piping in WWER NPPs during operation, 2008.
6. **Getman A. F.** Leak Before Break, Safety Concept for NPP Pressure Vessels and Piping, Ergoatomizdat, Moscow, 1999 (in Russian).
7. **International** Atomic Energy Agency, Applicability of the leak before break concept, IAEA-TECDOC-710, Vienna, 1993.