



Девятая международная научно-техническая конференция
«Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики»
ОАО Концерн «Росэнергоатом»
Москва, 21–23 мая 2014г.

РАЗРАБОТКА РУКОВОДСТВА ПО ПРИМЕНЕНИЮ КОНЦЕПЦИИ БЕЗОПАСНОСТИ «ТЕЧЬ ПЕРЕД РАЗРУШЕНИЕМ» К ТРУБОПРОВОДАМ ДЕЙСТВУЮЩИХ АЭУ



Европин С.В., Киселев В.А.

Предыстория

1. 1993-1999г: «Методика расчета трубопроводов АЭС в рамках концепции “течь перед разрушением”» М-ТПР-01-93. НИКИЭТ-ОКБ ГП, 1993.
2. 1999-2011г: РД 95 10547-99 «Руководство по применению концепции безопасности "течь перед разрушением" к трубопроводам АЭУ» (Р-ТПР-01-99), с изм. №1, 2004 г.
3. 2013г: РД ЭО 1.1.2.05.0939-2013 «Руководство по применению концепции безопасности “течь перед разрушением” к трубопроводам действующих АЭУ».
- ✓ РД ЭО 1.1.2.05.0939-2013 содержит общие положения, основные требования, необходимые предпосылки, методологию и процедуры технического обоснования выполнения условий ТПР главным образом применительно к трубопроводам энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР и РБМК диаметром более 150 мм.

Основные цели ТПР

- ✓ **Повышение эксплуатационной безопасности АЭС** путем демонстрации отсутствия опасности внезапного разрыва высокоэнергетических систем трубопроводов;
- ✓ **Исключение рассмотрения последствий локальных динамических воздействий**, относящихся к маловероятным постулируемым разрывам высокоэнергетических трубопроводов:
 - воздействия на опоры компонентов и окружающие строительные конструкции;
 - воздействия на близко расположенные системы, оборудование и трубопроводы, такие как реактивные усилия, биения и соударения труб;
 - волны давления внутри оборудования от постулируемых разрывов;
- ✓ **Обоснованный отказ от установки дополнительных опор-ограничителей** от перемещений концов трубопроводов, защитных экранов и других избыточных механических защитных конструкций, предназначенных для противодействия последствиям постулированных разрывов (ударные воздействия, хлысты, биение и соударение труб, воздействие реактивных струй, летящие осколки, пр.);
- ✓ **Снижение тепловых нагрузок** на трубопроводы от массивных конструкций;
- ✓ **Обеспечение доступа для эксплуатационного контроля** трубопроводов, снижение трудозатрат и доз облучения персонала при техническом обслуживании, получение более достоверные результаты контроля.

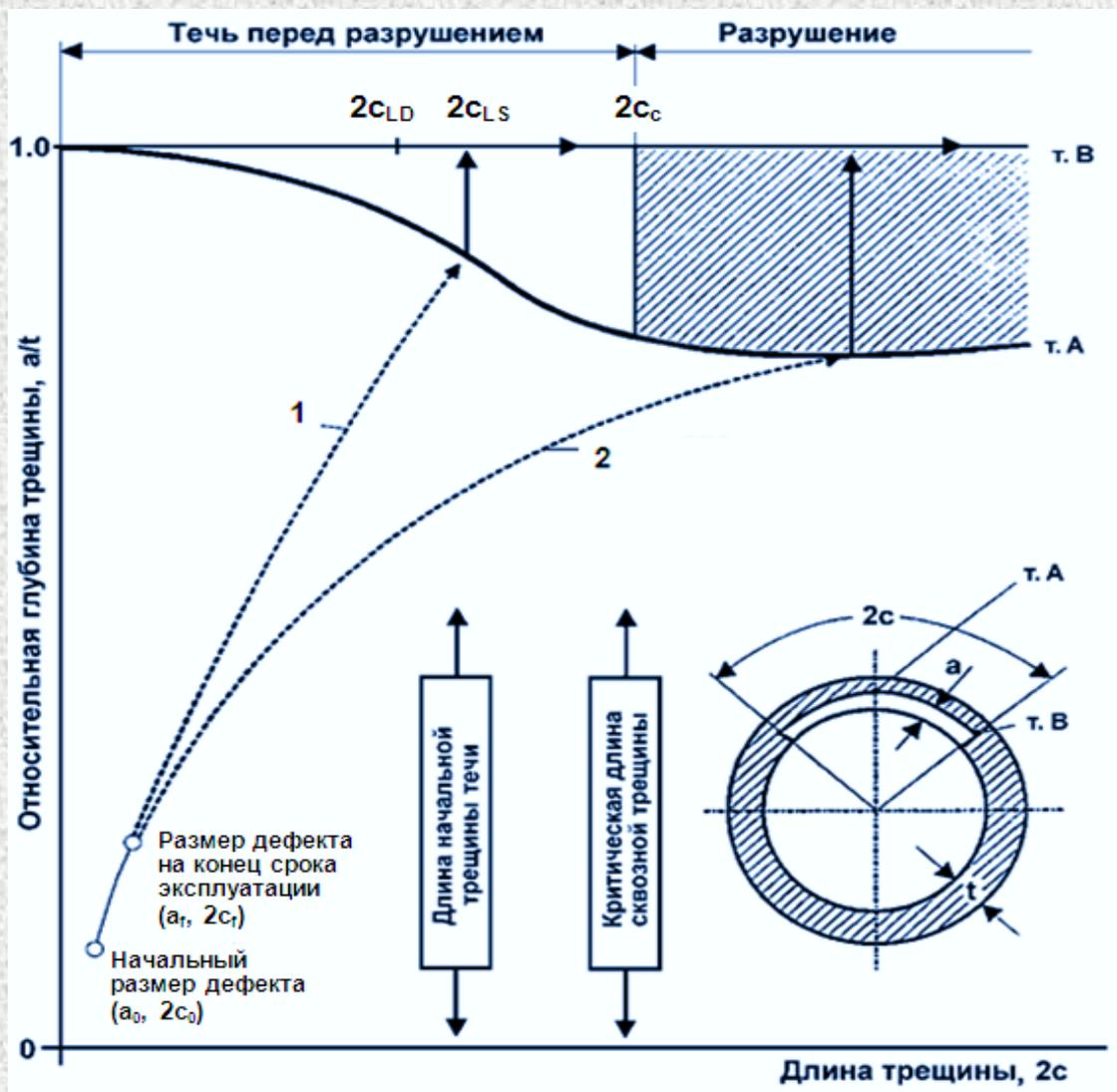
Общая концепция безопасности ТПР/ИР



Методология ТПР

- ✓ Означает, что даже в случае, если скрытый в металле трещиноподобный дефект способен при эксплуатации по каким-либо причинам бесконтрольно развиваться и превратиться в сквозную трещину, то эта трещина будет обнаружена с помощью системы контроля течи в режиме НЭ задолго до того, когда ее длина может достигнуть критического размера, при этом сама трещина будет стабильной при максимальной расчетной нагрузке.
- ✓ Не применяется, когда дополнительные специфические нагрузки (например стратификация), косвенные воздействия (например затопление) или любые значимые деградационные механизмы (например, коррозия-эрозия, МКРПН) могут вызвать разрушение компонентов.
- ✓ Используется также для обоснования конструкционной целостности компонентов в условиях затрудненного контроля за счет расчетного обоснования невозможности их полного разрушения при смоделированных наихудших условиях нагружения даже при маловероятном событии, связанным с образованием сквозной трещины.

Демонстрация поведения по сценарию ТПР



- 1 – сценарий "течь перед разрушением", требуется обнаружение течи;
 2 – сценарий "разрушение без течи", требуется периодический контроль.

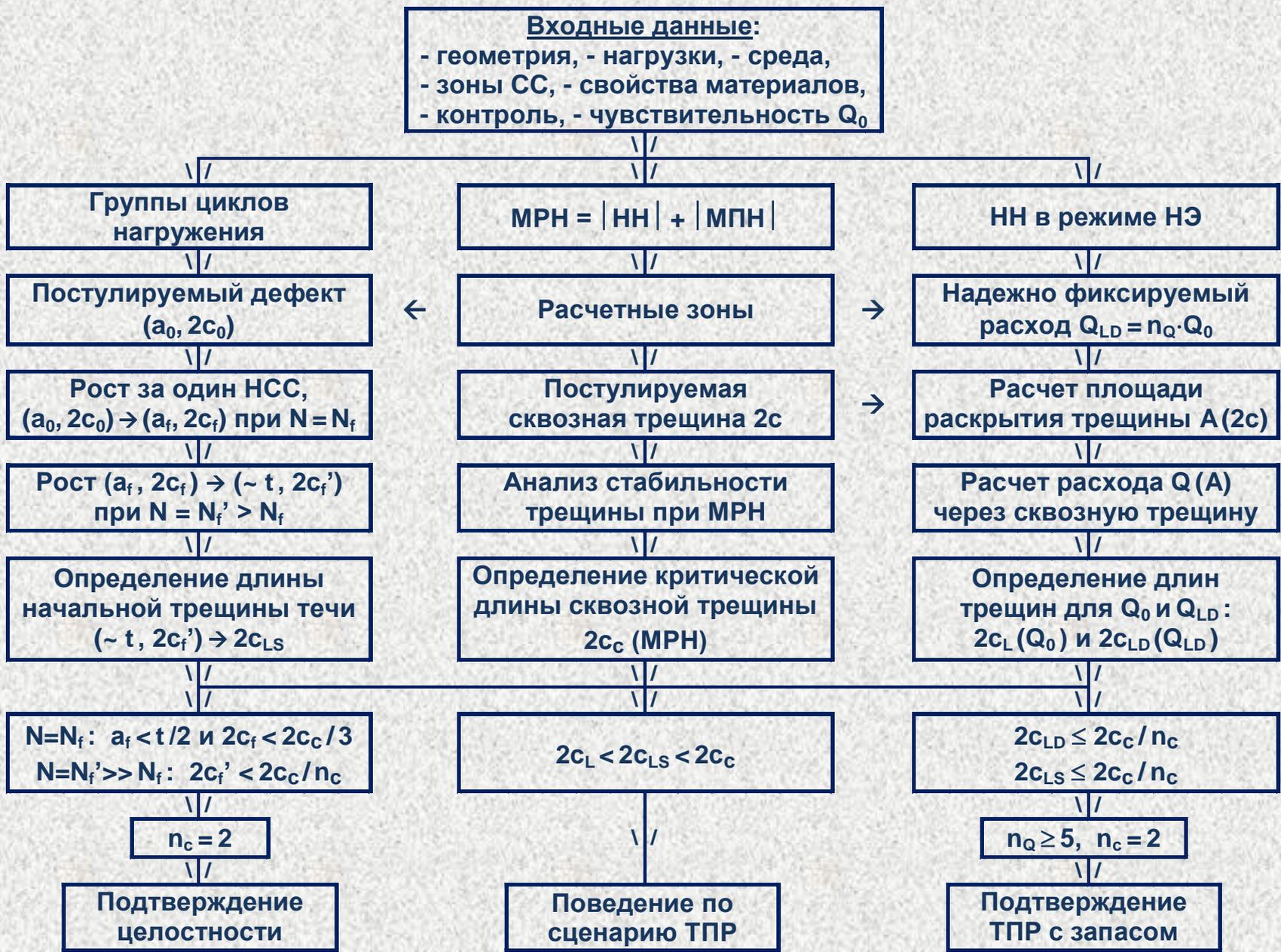
Расчетные процедуры

- ✓ Для расчетного обоснования условий ТПР рекомендуются две детерминистические процедуры, используемые на практике в США (NSAC/EPRI) и ФРГ (GRS/Siemens KWU).
- ✓ По результатам расчетного обоснования должны быть оценены коэффициенты запаса, обеспечивающие своевременное обнаружение стабильной течи, исключающей возможность полного разрушения рассматриваемых высокоэнергетических трубопроводов.
- ✓ Согласно обеим процедурам необходимо продемонстрировать незначительный циклический прирост начального поверхностного дефекта (a_0 , $2c_0$) за один назначенный срок службы (НСС) и стабильность при максимальной расчетной нагрузке (МРН) сквозной трещины с обнаруживаемой течью $2c_{LD}$, постулируемых в наиболее нагруженных сварных швах.

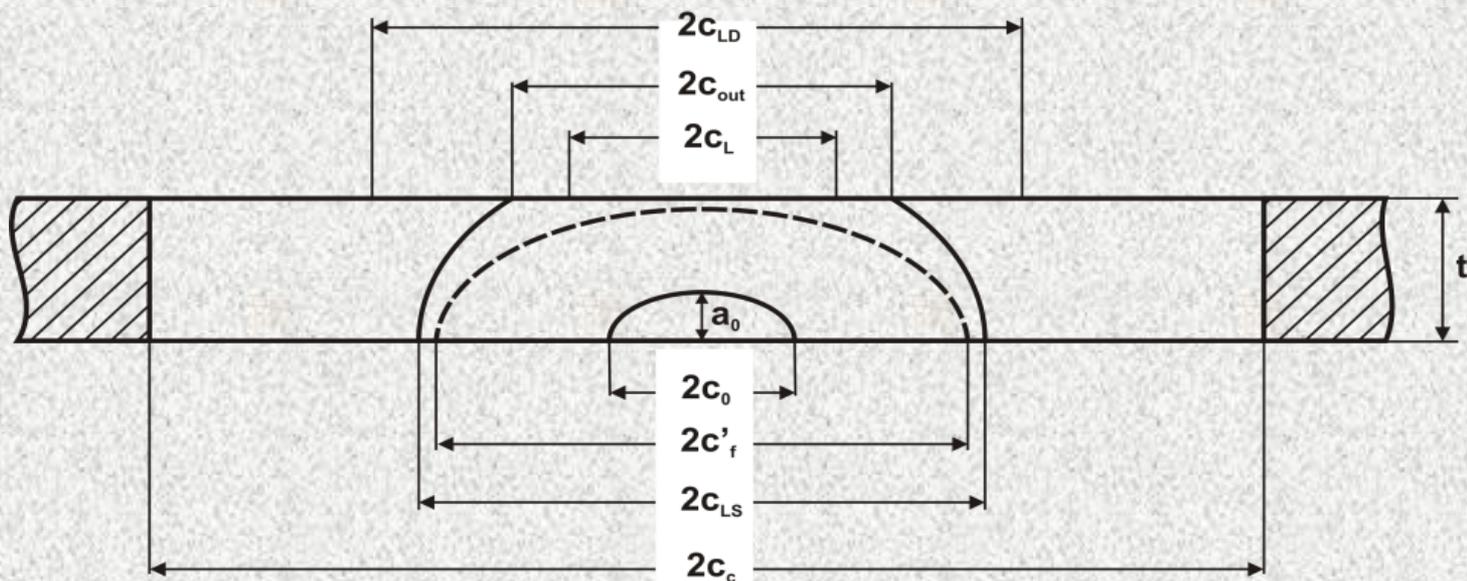
Основные различия в процедурах

1. Процедура NSAC/EPRI базируется на постулировании сквозной трещины с обнаруживаемой течью $2c_{LD}$ с последующей оценкой её стабильности при MPH. Анализ циклического роста начального поверхностного дефекта $(a_0, 2c_0)$ не проводится в случае, если определены нормы допускаемых размеров дефектов в эксплуатации, так как использование методики определения допускаемых размеров дефектов предопределяет этот расчет.
2. Процедура GRS/Siemens дополнительно требует анализа развития формы начального поверхностного дефекта за пределами НСС до и после его проникновения через толщину стенки с последующей оценкой выявляемости и стабильности результирующей сквозной трещины $2c_{LS}$.

Процедура обоснования условий ТПР



Демонстрация циклического роста начального дефекта через толщину стенки по сценарию ТПР



- $2c_{LS}$ – расчетная длина сквозной трещины после разрыва перемычки;
- $2c_L$ – размер трещины, расход через которую равен минимально регистрируемому уровню Q_0 ;
- $2c_{LD}$ – размер надежно обнаруживаемой трещины по расходу $Q_{LD} = n_Q \cdot Q_0$;
- $2c_c$ – критическая длина постулируемой сквозной трещины.

Условия ТПР: $\max(2c_{LS}, 2c_{LD}) < 2c_c / n_c$

Перечень решаемых задач механики разрушения

- 1. Анализ циклического роста начального дефекта (a_0 , $2c_0$):**
 - в течение одного НСС;
 - до его проникновения через толщину стенки за пределами НСС;
 - до предельной длины после образования сквозной трещины.
- 2. Анализ стабильности трещин:**
 - анализ предельного состояния компонент с трещинами для построения диаграмм конструкционной целостности (ДКЦ);
 - анализ стабильности поверхностных и сквозных трещин;
 - расчет критической длины сквозной трещины.
- 3. Определение размера трещины по заданному расходу среды:**
 - расчет площади раскрытия сквозной трещины;
 - расчет расхода теплоносителя через сквозную трещину;
 - расчет длины трещины в зависимости от заданного расхода.

Методы и критерии обоснования условий ТПР

Этап	Методы	Нагрузки	Результаты	Критерии
Определение начального дефекта	Методы неразрушающего контроля	–	$(a_0, 2c_0)$ или $a_0 = 0,2t, 2c_0 = t$	$4 \leq a_0 \leq 8$ мм $20 \leq 2c_0 \leq 40$ мм
Циклический рост дефекта за один НСС	Уравнение типа Пэриса	Нагрузки при переходных режимах НУЭ и ННУЭ	$a_f = a_0 + \Delta a,$ $2c_f = 2c_0 + 2\Delta c$	Малый подрост за один срок службы: $2c_f < 2c_c/3$ при $a_f < t/2$
Запроектный циклический рост трещины			$a_f' = a_0 + \Delta a' \approx t,$ $2c_f' = 2c_0 + 2\Delta c',$ $2c_{LS} = \max(2c_f', 3t)$	Достаточный запас на размер трещины: $2c_f' < 2c_c/n_c, 2c_{LS} \leq 2c_c/n_c$
Анализ стабильности трещины	Инженерные методы механики разрушения	МРН	$P_{appl}, K_I,$ $2c_c$	Коллапс нетто-сечения $P_{appl} < P_c$ при $K_I < K_c$
	Упругопластическая механика разрушения		$J, T_{appl},$ $2c_c$	Стабильность трещины $J < J_R, T_{appl} < T_{mat}$
Расчет длины выявляемой трещины течи	Признанные методы и программы расчета	НН при НУЭ	$A(2c), Q(2c, A),$ $2c_{LD}(Q_{LD})$	Достаточный запас на чувствительность COT: $Q_{LD} = n_Q \cdot Q_0$
Оценка коэффициентов запаса ТПР	Процедура типа NSAC/EPRI или GRS/Siemens	НН и МРН	Запасы n_c, n_p, n_Q на длину трещины, нагрузку и расход	Достаточный запас на длину выявляемой трещины течи: $2c_{LD} \leq 2c_c/n_c$

Анализ циклического роста начального дефекта

1. Формирование групп циклов нагружения i с параметрами $R_i = (K_{\min} / K_{\max})_i$. Сначала рассматривают циклы, вызывающие ускоренный рост дефекта, затем – последовательно циклы, вызывающие его меньший прирост.
2. Расчет начального дефекта $(a_0, 2c_0)$ за один НСС с числом циклов $N_f = \sum N_i$.

- Для каждой группы циклов i рассчитывают подросты дефекта Δa_{Ni} и $2\Delta c_{Ni}$:

$$dI/dN = C \cdot [\Delta K_{\text{eff}}]^n \quad \text{при } \Delta K_{\text{eff}} > \Delta K_{\text{th}},$$

$\Delta K_{\text{eff}} = q(R) \cdot \Delta K$ – размах эффективного КИН с параметром R ;

$q(R)$ – функция материала, зависящая от R , условий нагружения и среды;

$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ – размах КИН в точках А и В по РД ЭО 1.1.2.05.0330-2012;

C и n – характеристики материала для заданных условий нагружения и среды.

- Суммирование по всем группам циклов дает результирующие приросты Δa_{Nf} и $2\Delta c_{Nf}$ и расчетный размер дефекта на конец НСС при $N_f = \sum N_i$:

$$a_f = a_0 + \sum \Delta a_{Ni}, \quad 2c_f = 2c_0 + 2 \cdot \sum \Delta c_{Ni}.$$

3. Аналогичным образом выполняется смоделированный расчет дальнейшего роста полуэллиптической трещины $(a_f, 2c_f)$ за пределами НСС при $N = N_f' \gg N_f$ до разрыва перемычки и образования сквозной трещины:

$$(a_f, 2c_f) \rightarrow (\sim t, 2c_f') \rightarrow 2c_{in} \rightarrow 2c_{LS}.$$

4. Анализируют дальнейший циклический рост сквозной трещины $2c_{LS}$ до значения $2c_c$.

Методы анализа стабильности трещин

Разделены на три уровня по мере возрастания сложности расчетов:

1. Инженерные методы анализа потери несущей способности компонента с трещиной при вязком разрушении (коллапс нетто-сечения), использующие только **механические характеристики** материала (пределы прочности и пластичности).
2. Инженерные методы, учитывающие не полную пластичность ослабленного сечения, такие как **двухкритериальные подходы** оценки опасности разрушения по условию начала движения трещины и предельной нагрузки, использующие как механические свойства, так и вязкость разрушения K_c , например, предел трещиностойкости I_c и процедура **R6-Opt.1**.
3. Наиболее сложные методы **упругопластической механики разрушения**, учитывающие докритический стабильный подрост трещины и основанные на прямом вычислении или расчетной оценке **JT**-интеграла с использованием J_R - кривых и диаграмм деформирования материала.

Определение размера трещины по расходу среды

Проводят для сквозной усталостной трещины эллиптической формы с использованием первичных напряжений σ_n и параметров среды (p, T, ρ) в режиме НУЭ.

1) Рекомендуются методы расчета площади раскрытия сквозной трещины:

Численный метод конечных элементов в трехмерной постановке;

Верифицированные инженерные методы с коррекцией на размер пластической зоны:

- Метод MP-125, - Метод RCC-MR, - Метод R6, - Метод Kastner, - Метод В-К.

Получают зависимость $A = f_a(2c)$, фиксируют значение A_{LS} для трещины длиной $2c_{LS}$.

2) Расчет массового расхода двухфазной среды через постулируемую трещину:

$$Q = q_0 \cdot A = q_0 \cdot f_a(2c) \quad [\text{кг/мин}]$$

$$q_0 = f_q(S, F_p, \Delta p, \xi) \quad [\text{кг/мин/мм}^2]:$$

S – геометрические характеристики; F_p – параметры состояния среды (p, T, ρ);

Δp – перепад давления на пути потока; ξ – гидравлическое сопротивление потоку.

- В случае однофазного истечения водной среды:

$$q_0 = \xi \cdot (2 \cdot \Delta p \cdot \rho_B)^{1/2},$$

$\xi = 0,1$; ρ_B – плотность воды при расчетной температуре.

- Для паровой однофазной среды массовый расход насыщенного пара:

$$q_0 = \xi \cdot (k_1 \cdot k_2 \cdot p \cdot \rho_n)^{1/2},$$

$\xi = 0,25$; $k_1 = 2k / (k+1)$, $k_2 = [2 / (k+1)]^{2/(k-1)}$, $k = c_p / c_v$ – адиабатическая пара.

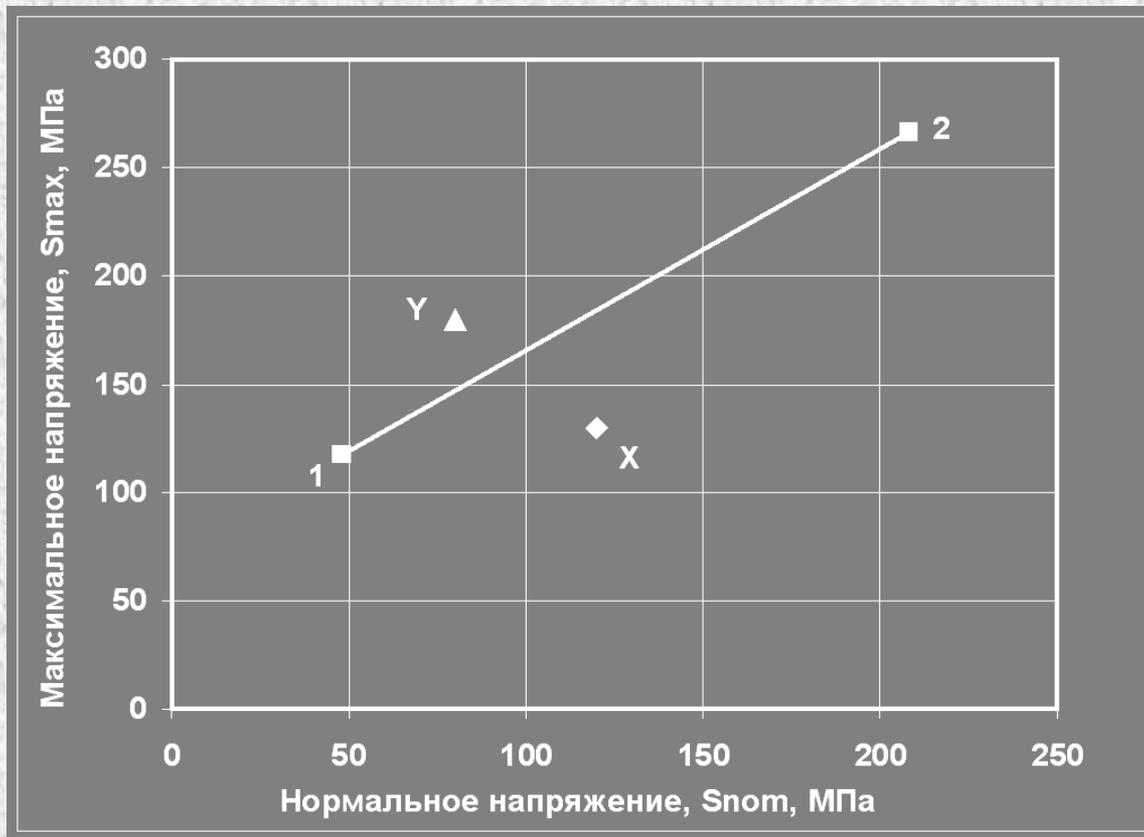
Массовый расход [кг/мин] можно пересчитать в его объемный расход [л/мин].

3) Расчетные длины трещин $2c_L$ и $2c_{LD}$ определяют из условий $Q=Q_0$ и $Q=Q_{LD}$.

Рекомендуемые программные средства

1. Аттестованный в 1999г компьютерный код **Fracture 1.0** для расчета предельных состояний, допускаемых размеров дефектов на базе построения ДКЦ, площади раскрытия трещин с использованием верифицированных инженерных методов механики разрушения, а также расхода однофазной водной или паровой среды.
2. Лицензированная в Швеции программа **ProSACC** для расчета предельных состояний и определения допускаемых размеров дефектов по процедуре R6-Opt.1, а также анализа циклического роста трещин.
3. Общепризнанные программы **SQUIRT (Battelle)**, **PICEP (EPRI)**, **FLOPA (Siemens)**, **ASTEQ (Framatome)**, **CRAFLO (VTT)**, **Crack_L (ИБРАЭ)** для расчета двухфазного истечения неравновесной пароводяной среды, учитывающие гидравлическое сопротивление и фрикционные потери, обусловленные шероховатостью поверхности и другими морфологическими параметрами трещины.

Оценка условий ТПР по методу ГРК



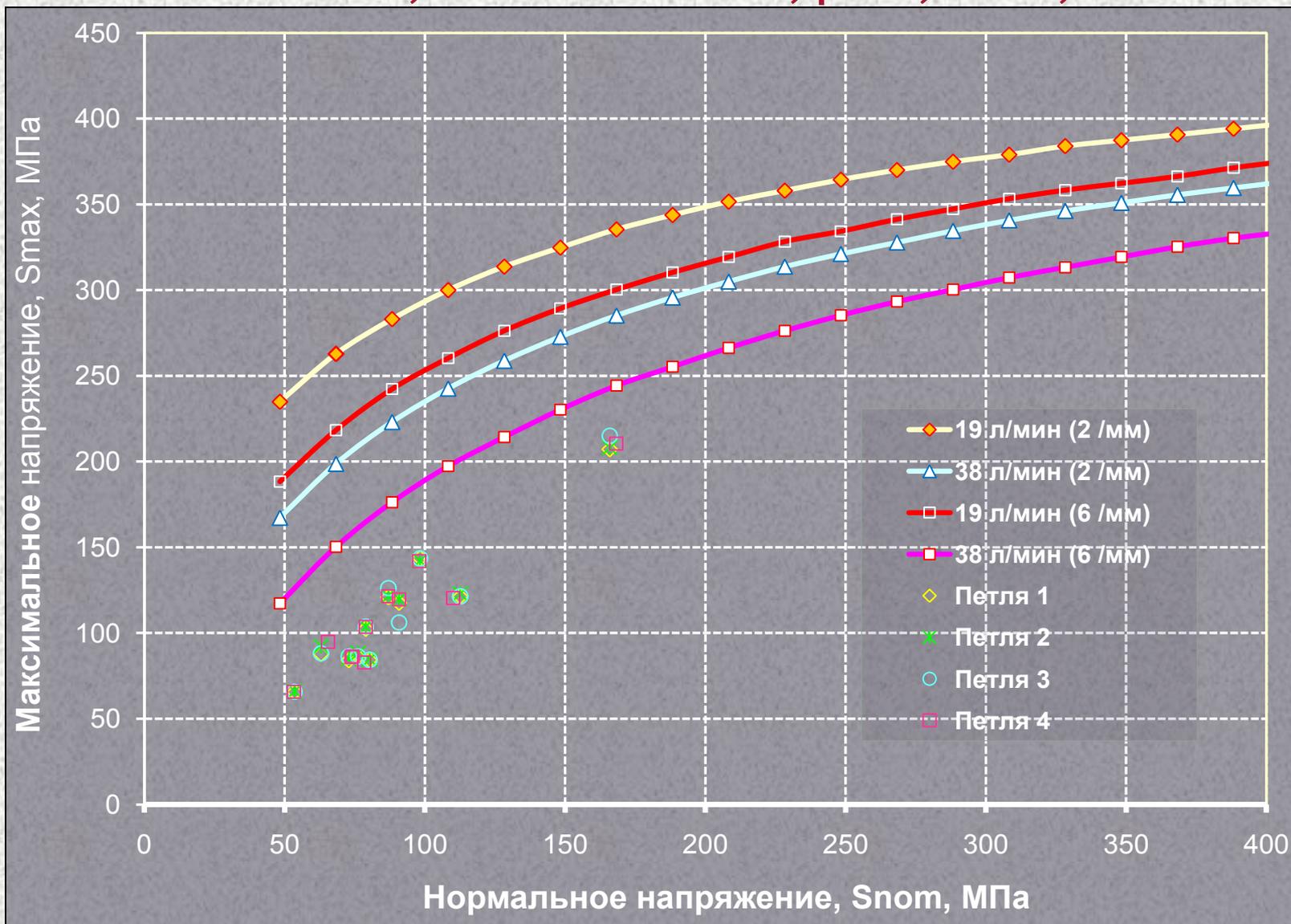
Для оценки соответствия анализируемого трубопровода критериям ТПР нормальное напряжение S_{nom} (при НУЭ) и максимальное напряжение S_{max} (при НУЭ+МРЗ) для каждого сечения (СС) трубопровода из расчета напряжений помещают на график ГРК.

Так на графике ГРК уровень напряжений, представленный точкой X, квалифицирует СС трубопровода для ТПР, в то время как точка Y не удовлетворяет критериям ТПР.

ГРК и напряжения в расчетных сечениях

4-х петель ГЦТ ВВЭР-1000

Ø990×65мм, сталь 10ГН2МФА, $\rho=15,7$ МПа, $T=350$ С



Благодарю за внимание!

kva@nikiet.ru