

На правах рукописи

ВАН ХАЙЖУН

**ПРОЧНОСТЬ ТРУБОПРОВОДОВ АЭС, ОСЛАБЛЕННЫХ
ТРЕХМЕРНЫМИ ДЕФЕКТАМИ СТЕНКИ**

05.14.03 – Ядерные энергетические установки,
включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:

Ван Хайжун

Москва – 2005

Работа выполнена в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете).

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Маркочев В.М.
МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
нач. лаборатории РНЦ КИ Тутнов И.А.

доктор технических наук,
нач. отдела ФГУП ЦНИИТМАШ Казанцев А.Г.

Ведущая организация: ВНИИ АЭС, г. Москва

Защита состоится 29 июня 2005 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.04 в МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31, тел. 324-84-98, 323-91-67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан «19» мая 2005 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор



Е.М.Кудрявцев

2749

Общая характеристика работы

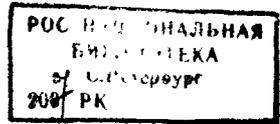
Актуальность темы

Ужесточение требований к безопасности трубопроводов действующих и проектируемых атомных электростанций, необходимость продления ресурса оборудования, отработавшего проектный срок службы, остро ставят задачу совершенствования методов расчета на прочность трубопроводов, поврежденных дефектами разнообразной формы и различного происхождения. При этом в общемировой практике отдается предпочтение приближенным, но оперативным инженерным методикам, а не трудоемким процедурам, основанным на численном анализе напряженно-деформированного состояния.

На стадии эксплуатации существенное значение приобретает диагностика эксплуатационных повреждений оборудования и трубопроводов АЭС, оперативная оценка степени опасности обнаруженных повреждений, прогнозирование скорости развития повреждений и обоснованное назначение сроков следующего контроля состояния поврежденного оборудования или принятие решение о ремонте или замене.

При длительной эксплуатации в трубопроводных системах АЭС возникают как трещины самого разнообразного происхождения, так и трехмерные (3D) дефекты стенок трубопроводов, обусловленные как процессами коррозии металла, так процессом эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ). В зоне такого дефекта возникает локальное утонение стенки трубопровода, причем скорость утонения может достигать порядка миллиметра за год. Повреждения этого типа характерны не только для трубопроводов АЭС, а также для трубопроводов предприятий химической и нефтегазовой отраслей.

Вместе с тем на сегодняшний день можно говорить об отсутствии инженерной методики, позволяющей уверенно определять условия достижения предельного состояния для поврежденных трубопровода как в начальном состоянии, так и с учетом изменения свойств материала в процессе эксплуатации.



Цели и задачи исследования

Целью данной диссертационной работы была разработка оперативного инженерного метода оценки предельной прочности прямых участков и гибов трубопроводных систем с 3D дефектами при воздействии внутреннего давления и изгибающего момента.

Работа базируется на новом методе прочностных расчетов – методе реальных элементов (MePeЭл) – и включает в себя:

- разработку алгоритма компьютерного моделирования процесса статического деформирования прямых участков и гибов трубопроводных систем АЭС при наличии 3D дефектов;
- создание расчетной процедуры для оценки предельной прочности поврежденных гибов с переменной толщиной стенки, изготовленных методом наматывания на сектор.;
- проведение верификационных расчетов и сравнение их результатов с результатами численных решений и натурных испытаний труб;
- развитие методических основ аналитического построения критериальных кривых, пригодных как для расчетов на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации при наличии дефектов.

Научная новизна и значимость работы

- Разработана новая инженерная методика расчета на прочность элементов трубопроводов АЭС при наличии 3D дефектов, пригодная для оценки предельного упругопластического состояния поврежденных трубопроводов и расчетов диаграмм деформирования трубопроводов вплоть до их разрушения.
- Развита концепция «равнопрочного» гива, позволяющая эффективно использовать MePeЭл для расчетов остаточной прочности разностенных гибов, изготовленных методом наматывания на сектор.

- Предложена новая методика аналитического описания критериальной кривой зависимости предельной нагрузки от размера повреждения, не противоречащая нормативным основным расчетам на прочность.

Математическое обеспечение предложенной методики расчетов предельного состояния поврежденных трубопроводов работает в реальном масштабе времени и поэтому она может быть эффективно использована для оперативных оценок степени опасности обнаруженных дефектов. Она может быть включена в состав нормативных документов, регламентирующих надежную и безопасную эксплуатацию трубопроводов АЭС.

Достоверность результатов расчетов по разработанной методике обеспечивается:

- Прямым использованием для расчетов экспериментальных диаграмм растяжения – сжатия поврежденных образцов или диаграмм, восстановленных по основным механическим свойствам конструкционного материала;
- Использованием для моделирования процесса деформирования признанной инженерной гипотезы плоских сечений;
- Применением для описания предельного состояния поврежденного трубопровода совокупности силовых и деформационных параметров;
- Верификацией методики посредством сопоставления результатов расчета по предложенной методике с результатами расчетов с применением метода конечных элементов и с результатами натуральных испытаний поврежденных труб.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новая методика расчета предельной несущей способности поврежденных трубопроводов АЭС и соответствующее математическое обеспечение;
2. Результаты расчетов предельного состояния прямых участков и гибов трубопроводных систем АЭС при различных сочетаниях силовых факторов в

зависимости от размеров 3D повреждений стенки и механических свойств конструкционного материала;

3. Результаты верификационных расчетов прочности поврежденных трубопроводов АЭС с использованием развитого метода в сопоставлении с данными натурных испытаний;

4. Новая методика аналитического построения объединенных критериальных кривых для поврежденных элементов трубопроводных систем АЭС.

Апробация работы и публикации

Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на Научных сессиях МИФИ в 2003-2005 гг. (Москва).

По результатам исследований, составляющим основу диссертации, опубликовано 8 печатных работ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и одного приложения. Общий объем диссертации составляет 149 страниц, в т.ч. 78 иллюстраций, 10 таблиц, приложение на 16 страницах и библиография, включающая 112 наименований.

Краткое содержание диссертации

Первая глава диссертации представляет собой обзор существующих методов расчетов на прочность трубопроводов с трехмерными дефектами. Критически проанализированы существующие в России и других странах методы оценки предельного состояния транспортных трубопроводов и трубопроводов АЭС с трехмерными дефектами стенки, а также соответствующие нормативно технические документы. Установлено, что существующие методы оценки предельного состояния трубопроводов с трехмерными дефектами стенки имеют существенные недостатки, заключающиеся в следующем:

- они находятся в противоречии с основными прочностными расчетами на стадии проектирования;

- большинство из них базируются на достижениях механики разрушения и поэтому трехмерные дефекты рассматриваются как двумерные трещины без учета окружного размера дефекта;
- при использовании для анализа напряженного состояния метода конечных элементов в упругопластической постановке возникают значительные затруднения как в плане вычислений, так и в плане выбора критерия предельного состояния для дефектного трубопровода.

С точки зрения принятия решения о возможности эксплуатации поврежденной конструкции представляется весьма желательным располагать информацией об условиях достижения реального предельного состояния для конструкции, о нагрузках и деформациях, соответствующих предельному состоянию, и о возможных путях его достижения. Более того, специфические особенности работы таких ответственных элементов, как трубопроводы ЯЭУ, требуют прогнозирования изменения условий предельного состояния во времени, по мере радиационного охрупчивания материала. С учетом сказанного и на основе проведенного анализа сформулированы следующие требования к инженерному методу расчета предельной несущей способности трубопровода при наличии трехмерного дефекта стенки:

1. Применимость для расчетов в упругом и упругопластическом состоянии конструкционного материала.
2. Непротиворечивость методам основных расчетов по Нормам прочности.
3. Возможность численных расчетов в реальном масштабе времени и учета изменения механических свойств конструкционного материала.
4. Достоверность и разумная консервативность результатов расчетов.

Показано, что такой метод можно создать на основе методологии реальных элементов (MePeЭл). Отличительными особенностями MePeЭл являются:

- Применимость MePeЭл для расчетов в упругой и упругопластической стадии деформирования;

- Использование для расчетов всей информации о механическом поведении материала, содержащейся в диаграммах деформирования стержневых элементов, имеющих повреждения разной степени;
- Применение деформационного критерия разрушения;
- Возможность расчета диаграммы деформирования поврежденного трубопровода и использование в качестве характеристики предельного состояния совокупности силовых и деформационных факторов;
- Использование гипотезы соответствия предельного состояния поврежденного трубопровода и предельного состояния стержневой системы по моменту разрушения одного из стержневых элементов.

Во второй главе описаны разработанные стержневые модели прямых участков и гибов трубопроводов с трехмерными дефектами стенки. Особенностью гибов является их разностенность и зависимость окружных напряжений от координатного угла α (см. рис.1) . Если гиб изготавливают из прямой трубы толщиной s при среднем радиусе r_m на трубогибочном оборудовании методом наматывания на сектор, то толщина стенки гiba изменяется от минимальной s_1 на внешней стороне до максимальной s_2 на внутренней стороне. Утонение внешней стенки гiba может достигать 20% . Разностенность растет с уменьшением радиуса гiba R_s . Для описания геометрии поврежденного гiba требуется восемь величин: r_m , R_s , s_1 , s_2 , s_0 , α , c_m и c_l . Еще три величины необходимы для описания механических свойств конструкционного материала: предела текучести $\sigma_{0,2}$, предела прочности σ_b и равномерного удлинения δ . Минимум два внешних силовых фактора – внутреннее давление q и изгибающий момент M_z необходимо учитывать при анализе предельного состояния. Поэтому к достоинству метода реальных элементов следует отнести то, что он представляет оперативную возможность исследовать влияние

на предельное состояние по параметрам q и M_z любого из перечисленных 11 факторов.

При постоянной толщине стенки s окружные напряжения σ_t в стенке тонкостенного гiba под внутренним давлением q зависят от координатного угла α как

$$\sigma_t = \frac{qr_m 2R_s + r_m \cos(\alpha)}{2s R_s + r_m \cos(\alpha)}. \quad (1)$$

В работе сформулирована концепция «равнопрочного гiba», в соответствии с которой принимается, что толщина гiba s после изготовления изменяется в зависимости от угла α , так, что окружные напряжения σ_t , рассчитанные по формуле (1), перестают зависеть от α . Но поскольку при использовании МереЭл для расчетов предельного давления в гibe удобно приме-

нять такие стержневые элементы, для которых продольные силы постоянны по длине стержня, то «равнопрочного гiba» трансформируется в концепцию «равнопрочного стержневого элемента». Это приводит к следующему выра-

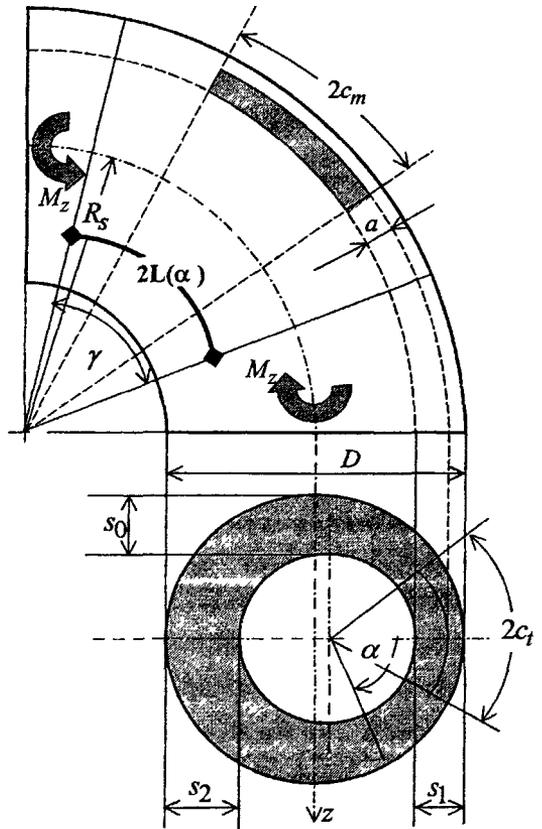


Рис. 1. Гиб трубопровода с внутренним дефектом на внешней стороне

жению для толщины гiba, которое и было использовано в дальнейших расчетах

$$s(\alpha) = \frac{2R_s s}{2R_s + r_m \cos(\alpha)} \quad (2)$$

Для построения стержневой МереЭл – модели поврежденного гiba при нагружении внутренним давлением и изгибающим моментом выделяют секторный участок гiba с угловым размером γ , как показано на рис.2. Толщина s и длина L стержневых элементов зависит от угла α . Схема деформирования соответствующей стержневой модели показана на рис.3, где

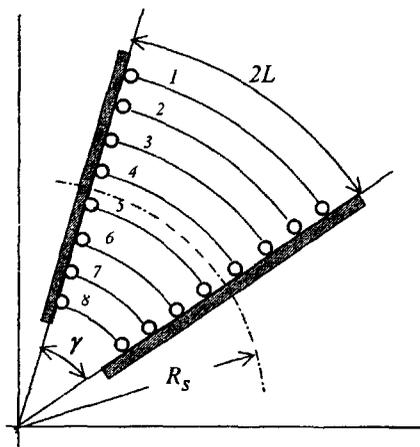


Рис 2 Разбиение участка гiba на стержневые элементы

Δ_0 - осевое перемещение сечения, ϑ - угловое перемещение сечения.

При нагружении трубопровода внутренним давлением q , продольной силой P_x и изгибающим моментом M_z , уравнения равновесия для эквивалентной стержневой системы на рис.3 имеют следующий вид.

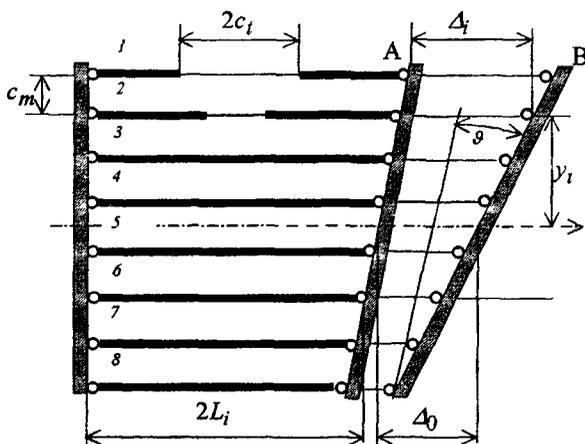


Рис 3 Схема деформирования стержневой модели поврежденного гiba

Для проекций сил на ось x трубы

$$P_x + Q(q) = \sum_i p(i, \Delta_0 + y_i tg(\vartheta) + \delta_m(q)), \quad (3)$$

для моментов относительно оси z

$$M_z = \sum_i p(i, \Delta_0 + y_i tg(\vartheta) + \delta_m(q)) y_i, \quad (4)$$

где $Q(q)$ - осевая сила, обусловленная внутренним давлением,

$$Q(q) = q \frac{\pi(D - 2s)^2}{4}, \quad (5)$$

$p(i, \Delta_0 + y_i tg(\vartheta) + \delta_m(q))$ - диаграмма упругопластического растяжения – сжатия для i -го стержня, y_i - координата центра тяжести сечения i -го стержня (с угловой координатой φ_i) относительно оси z

$$y_i = \frac{D - s + a_i}{2} \cos(\varphi_i), \quad (6)$$

a_i - глубина внутреннего дефекта на i -ом стержне, Δ_0 - осевое перемещение сечения, ϑ - угловое перемещение сечения, D - внешний диаметр трубы $\delta_m(q)$ - абсолютная осевая деформация стержней, обусловленная окружающими напряжениями, возникающими при нагружении трубы внутренним давлением,

$$\delta_m(q) = \left(\frac{\mu q L(D - 2s)}{2E s} \right), \quad (7)$$

E - модуль упругости, μ - коэффициент Пуассона.

Введение слагаемого $\delta_m(q)$ позволяет учитывать двухосность напряженного состояния трубы и обеспечивает сведение MePeЭл расчетов к «сопроматному» расчету в области упругости.

Для данного отрезка трубы система уравнений равновесия (3) и (4) связывает воедино три силовых (q , M_z и P_x) и два деформационных (Δ_0 и ϑ) фактора. Решение уравнений дает значения любых двух факторов при заданных трех остальных. Тем самым обеспечивается возможность расчета диа-

грамм деформирования гiba, например, в виде зависимости изгибающего момента от угла поворота сечения при заданном внутреннем давлении

Для расчетов предельного состояния по МеРеЭл используется деформационный критерий прочности. Поврежденный трубопровод достигает предельного состояния при достижении предельного удлинения одним из стержней эквивалентной системы. Считается также, что справедлива гипотеза плоских сечений. Поэтому, если наиболее слабым стержнем является первый стержень ($i = 1$) и его предельное удлинение равно νk_1 , то предельная деформационная прямая – зависимость предельного осевого перемещения сечения Δ_c от углового перемещения сечения ϑ_c будет иметь вид

$$\Delta_c = \nu k_1 - y_1 \operatorname{tg}(\theta_c), \quad (8)$$

где y_1 - координата центра тяжести сечения первого стержня относительно геометрической оси трубопровода.

Суммарное удлинение i -го стержня u_i равно

$$u_i = \Delta_0 + y_i \operatorname{tg}(\vartheta) - \delta_{mi}(q) \quad (9)$$

Для расчетов предельного состояния трубопровода в силовых терминах уравнение (9) объединяют с уравнением (8).

На основе проведенных расчетов разработаны рекомендации относительно окружного $2W$ и осевого $2L$ размеров МеРеЭл моделей поврежденных участков элементов трубопроводных систем. При расчетах предельного давления, приводящего к разрушению трубопровода по образующей, размеры модели L и W находили соответственно по формулам

$$L = 2c_m + 3\sqrt{r_m s}, \quad (10)$$

$$W = 2c_m \sqrt{\frac{a}{s}} + c_t + s. \quad (11)$$

При расчетах предельного состояния трубопровода при наличии внутреннего давления и изгибающего момента, которому соответствует гильотин-

ное разрушение трубы, осевой размер L участка трубопровода с дефектом вычисляли как

$$L = c_m + \sqrt{r_m s}. \quad (12)$$

Третья глава посвящена исследованиям влияния геометрических и материаловедческих факторов на предельное состояние трубопровода с трехмерным дефектом стенки. Расчет проведен длягиба, изготовленного трубы толщиной $t = 5$ мм при среднем радиусе $r_m = 50$ мм. Материал - конструкционная сталь с пределом текучести $\sigma_{0,2} = 540$ МПа, пределом прочности $\sigma_b = 700$ МПа и равномерным пластическом удлинении $\delta = 18$ %. В расчетах использовали билинейную диаграмму деформирования с постоянным деформационным упрочнением в упругопластической области.

На рис.4 приведены зависимости предельного давления в зависимости от глубины дефекта при различной кривизнегиба R_s . Дефект (осевой размер $2c_m = 100$ мм, окружной размер $2c_t = 50$ мм) располагался на внешней сторонегиба, где вероятность появления эрозивно-коррозионного утонения стенки наибольшая. При изменении радиуса осигиба R_s от 100 мм до 10 м минимальная толщина s_1 изготовленного

гиба изменяется от 4 до 5 мм. Поэтому зависимости разрушающего давления от глубины дефекта с увеличением кривизныгиба смещаются вниз.

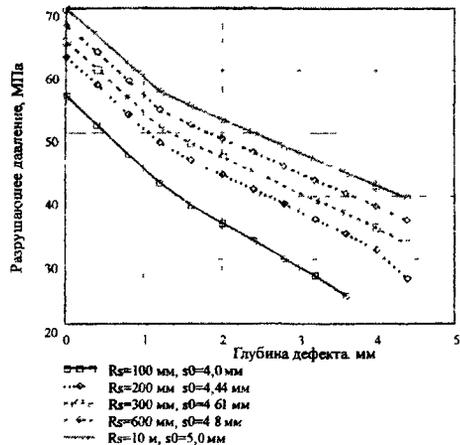


Рис.4. Зависимость разрушающего давления равнопрочногогиба от глубины дефекта при разных радиусах осигиба

Влияние на прочность гйба ($R_s = 300$ мм, $s_1 = 4,6$ мм, $r_m = 50$ мм, $t = 5$ мм, $2c_m = 100$ мм и $2c_t = 50$ мм) предела текучести и относительного удлинения показано на рис. 5 и рис.6 соответственно. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ изменяли при сохранении значения предела прочности $\sigma_b = 700$ МПа и равномерного пластического удлинения $\delta = 18$ %. Снижение предела текучести привело к смещению излома на зависимости предельного давления от глубины дефекта в сторону больших значений глубины дефекта.

Снижение предела текучести привело к смещению излома на зависимости предельного давления от глубины дефекта в сторону больших значений глубины дефекта. Критическую глубину дефекта a_c , при которой появляется излом, можно оценить по формуле

$$\frac{a_c}{s_1} = 1 - \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_b}. \quad (13)$$

Для указанных на рис. 5 пределов текучести критическое значение отношения a_c/s_1 , рассчитанное по формуле (6), равно соответственно 0,23, 0,52 и 0,66. Эти значения достаточно хорошо совпадают с местом изломов на рис.5.

Как следует из рис. 6, потеря пластичности приводит к существенному понижению прочности при малых глубинах дефекта и катастрофическому снижению предельного давления при больших глубинах. Предельное состояние поврежденного гйба при нагружении внутренним давлением и изгибающим моментом характеризуется критической кривой - зависимостью предельного изгибающего момента от предельного внутреннего давления. На рис.7 показано семейство критических кривых для разных значений глубины дефекта прямоугольной формы для гйба с радиусом $R_s = 300$ мм. Сплошная

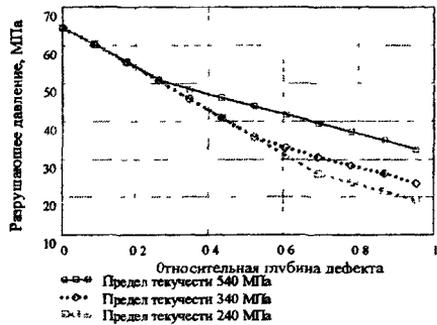


Рис.5. Влияние на прочность гйба предела текучести материала трубы

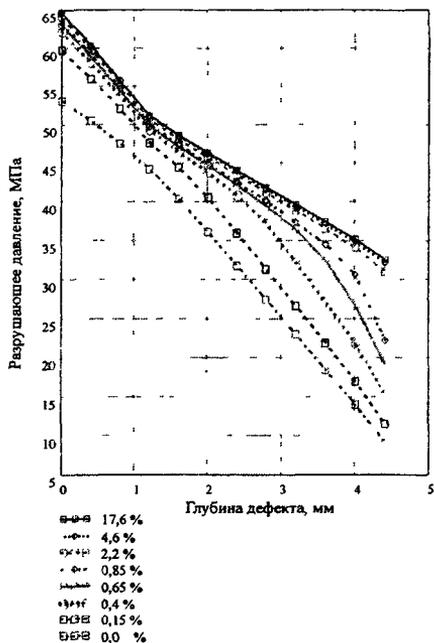


Рис.6 Влияние на прочностьгиба пластичности материала трубы

кривая, пересекающая предельные кривые, соединяет те точки, в которых давления равны внутреннему давлению разрыва по образующей для соответствующих глубин дефектов. Область допустимых давлений и моментов для конкретного дефекта ограничена сверху соответствующей критической кривой и кривой предельных давлений справа. Видно, что присутствие трехмерного дефекта может привести к снижению предельной прочности на 50 % .

На рис.8 критические кривые в координатах «угловое перемещение – изгибающий момент» изображены совместно с диаграммами деформирования, показывающими траектории приближения напряженно – деформированных состояний гибов к критическим состояниям. Диаграммы деформирования для неповрежденных гибов рассчитаны при действии изгибающего момента как в направлении дальнейшего загиба, так и в направлении разгиба. В

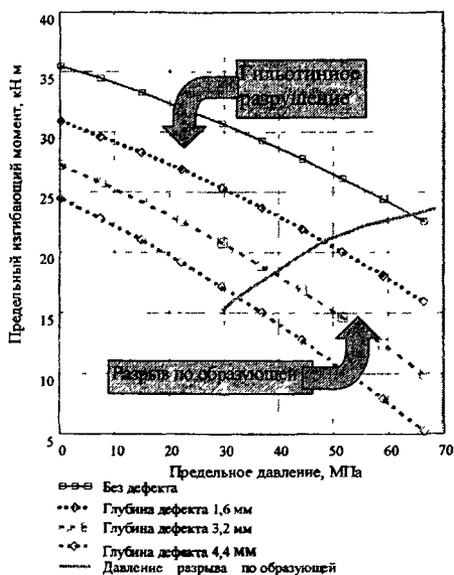


Рис.7. Предельные силовые кривые длягиба при разной глубине дефекта с размером по оси $2c_t = 100$ мм и окружном размере $2c_r = 50$ мм

первом случае внутреннее давление равно нулю, во втором — 40 МПа. Для поврежденногогиба диаграмма рассчитана при внутреннем давлении 22,2 МПа.

В соответствии с концепцией MePeЭл разрушающему давлению элемента трубопроводной системы соответствует достижение одним из стержней предельного упругопластического удлинения. Предельное состояние стержня зависит от геометрии повреждения и механических свойств материала в данном состоянии и может быть сравнительно легко исследовано экспериментально. Поэтому MePeЭл дает уникальную возможность количественного прогнозирования предельного состояния поврежденного оборудования АЭС на основе экспериментальных данных по влиянию процессов старения материала и изменения его механических свойств под действием радиационного облучения.

Четвертая глава диссертации посвящена верификации разработанного метода. Для расчетной верификации были проведены расчеты зависимостей максимального окружного напряжения в зоне дефекта от внутреннего давления в трубопроводе с применением как метода конечных элементов (МКЭ), так и метода реальных элементов (MePeЭл). Расчеты были проведены для трехмерного дефекта, поверхность которого имела форму эллиптического

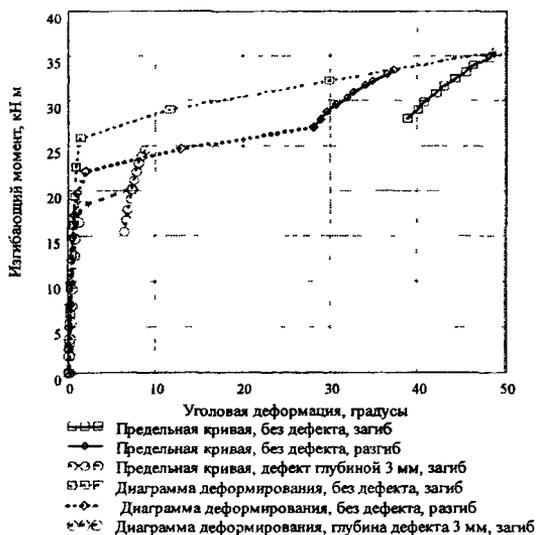


Рис. 8. Критические кривые и диаграммы деформированиягиба при разном направлении действия изгибающего момента

параболоида, вершина которого находится на поверхности реального дефекта в месте максимальной глубины последнего:

$$z = a \left(\left(\frac{x}{c_t} \right)^2 + \left(\frac{y}{c_m} \right)^2 \right), \quad (14)$$

где x и y – координатные оси, направленные соответственно по окружности и оси трубопровода, z – ось с началом на поверхности дефекта с направлением во внутрь трубы.

Расчеты проводили для стальной трубы с внутренним радиусом $r = 48,5$ мм и толщиной стенки $t = 8,6$ мм. Размер дефекта по оси трубы $2c_m = 60$ мм, угловой размер дефекта $2r\phi = 60^\circ$, что соответствует протяженности дефекта по окружности $2c_e = 50,8$ мм. Относительные значения глубины дефекта a/t были равны 0,2, 0,4, 0,6 и 0,8 соответственно.

Предел текучести материала трубопровода $\sigma_{0,2} = 326$ МПа, предел прочности $\sigma_b = 490$ МПа, равномерное удлинение $\delta = 20\%$. Диаграмму растяжения материала аппроксимировали билинейной функцией с модулем пластического упрочнения 820 МПа.

На рис.9 и 10 показаны расчетные зависимости максимального окружного напряжения от внутреннего давления. На этих рисунках сплошная кривая соответствует расчетам по МКЭ, пунктирная – расчетам по МеРеЭл.

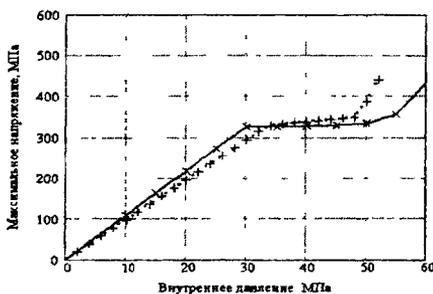


Рис 9 Зависимость максимального напряжения от внутреннего давления для дефекта глубиной $a/t=0,4$

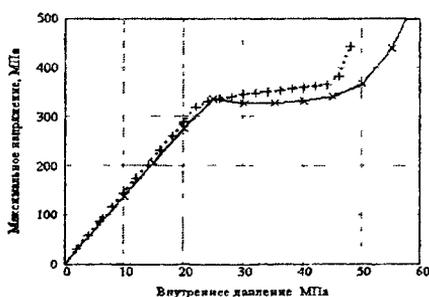


Рис 10 Зависимость максимального напряжения от внутреннего давления для дефекта глубиной $a/t=0,6$

Расчеты по МКЭ и по MePeЭл выявили существование на кривой «максимальное напряжение – внутреннее давление» площадки, на которой напряжение примерно сохраняет свое значение с ростом внутреннего давления. Размер этого «плато» увеличивается с ростом глубины дефекта. Появление этого плато обусловлено механизмами перераспределения напряжений после появления пластической деформации на дне дефекта. Дальнейшее увеличение напряжений начинается после того, когда внутреннее давление достигнет значений, при которых пластические деформации появляются и в неповрежденных областях трубопровода (примерно 50 МПа для данной трубы).

Расхождение между МКЭ и MePeЭл кривыми практически не превышает 15 %, причем на плато и далее расчет по MePeЭл приводит к консервативным результатам по сравнению с расчетами по МКЭ. Кроме того, последние точки на MePeЭл кривых соответствуют достижению трубопроводом с 3D дефектом предельного состояния по деформации на пределе прочности материала, а МКЭ – кривые обрезаны искусственно. Это оправдывает применимость MePeЭл для инженерных расчетов на прочность трубопроводов с трехмерными дефектами стенки.

Следующим этапом верификации предложенного метода расчетов было сопоставление результатов MePeЭл расчетов с опубликованными результатами натурных испытаний поврежденных отрезков труб.

На рис.11 результаты испытаний цилиндров с прямоугольными дефектами стенок сопоставлены с результатами расчетов по предложенной методике. Средний радиус цилиндров 66 – 70 мм, толщина стенки 2,9 – 6,3 мм. Материал цилиндров – алюминиевый сплав BS 1476 HT30WP с пределом текучести $\sigma_{0,2} = 261$ МПа, пределом прочности $\sigma_b = 296$ МПа и относительным удлинением $\delta = 2$ %.

На рис.12 приведены данные MePeЭл расчетов и натурных испытаний труб с внешним диаметром 762 мм и толщиной стенки 17,5 мм из стали APIX65. Предел текучести стали $\sigma_{0,2} = 450$ МПа, предел прочности $\sigma_b = 680$ МПа, относительное удлинение $\delta = 18$ %.

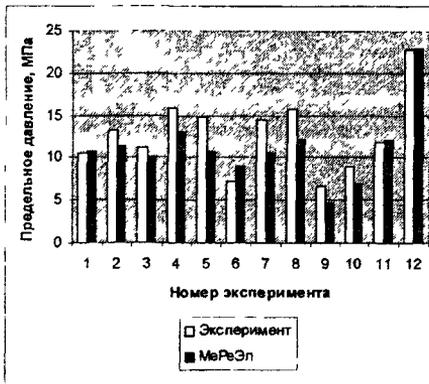


Рис 11 Сопоставление результатов расчетов предельного состояния по MePeЭл с результатами испытаний (Kitching R, Zarabi K. Limit and burst pressures for cylindrical shells with part-through slots // Int. J. of Pressure Vessels and Piping 1982, Vol 10 pp 235-270)

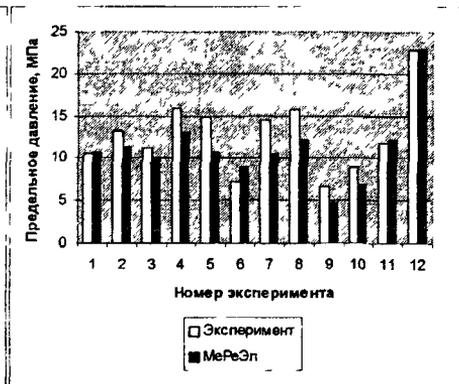


Рис 12 Сопоставление результатов расчета предельного состояния по MePeЭл с результатами натурных испытаний (Choi J B, Goo B K, Kim J C, Kim Y.J, Kim W S. Development of limit load solution for corroded gas pipelines // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. 2003, Vol 80 pp. 121-128)

Результаты натурных испытаний труб из стали X60 диаметром 508 мм при толщине 6,35 мм и результаты расчета разрушающего давления по MePeЭл представлены на рис.13. Механические свойства материала трубы: предел текучести $\sigma_{0,2} = 540$ МПа, предел прочности $\sigma_b = 600$ МПа относительное удлинение $\delta = 18$ %. Дефекты наносились как вдоль оси трубы, так и под углом к оси трубы.

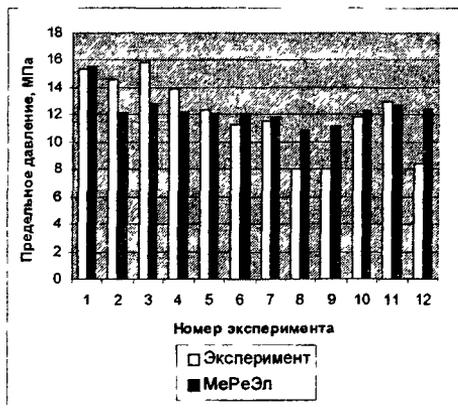


Рис 13 Сопоставление результатов эксперимента и расчета предельного давления в поврежденных стальных трубах диаметром 508 мм и толщиной 6,35 мм (Mok D H.B, Pick R J, Glover A.G, Hoff R. Bursting of line pipe with long external corrosion // Int. J. of Pressure Vessels and Piping 1991, Vol 46 pp 195-216)

Как следует из приведенных гистограмм, имеет место достаточно близкое совпадение результатов расчетов с результатами натуральных испытаний труб. Видно, что разработанная МеРеЭл - методика расчетов разрушающих давлений трубопроводов с трехмерными дефектами обеспечивает точность расчетов, вполне достаточную с инженерной точки зрения. Погрешность расчетов лежит в пределах 15 %. Поэтому можно считать, что предложенный метод успешно прошел первый этап верификации.

В пятой главе предложена методика устранения противоречия между основным прочностным расчетом на стадии проектирования и прочностными расчетами на стадии эксплуатации поврежденных трубопроводов АЭС посредством построения объединенного критерия прочности, пригодного как при проектировании, так и при эксплуатации. Для этого предложено использовать следующий метод. Если требуется осуществить плавный переход от функции $y_1(x)$ к функции $y_2(x)$ в области значений аргумента $x = x_0$, то этот процесс обеспечивает функция

$$y(x) = \left[y_1(x) + y_2(x) \left(\frac{x}{x_0} \right)^n \right] / \left[1 + \left(\frac{x}{x_0} \right)^n \right], \quad (15)$$

где n – показатель степени, значение которого регулирует скорость перехода от функции $y_1(x)$ к функции $y_2(x)$.

Большинство существующих методов оценки прочности труб при наличии трехмерных дефектов базируются на полуэмпирической формуле

$$q_s(a, L_m) = \frac{1,1q(1 - 2a/3t)}{1 - 2a/3t \sqrt{(0,893L_m/\sqrt{Dt})^2 + 1}} \quad (16)$$

Эта формула связывает допускаемое давление q_s при наличии дефекта глубиной a и осевой длиной L_m с расчетным давлением q для бездефектной

трубы. Видно, что при нулевых размерах дефекта давление q_s превышает расчетное на 10 %.

Применив методику (15) сначала для аргумента L_m , получаем формулу

$$q_{0s}(a, L_m) = \frac{q + q_s(a, L_m) \left(\frac{L_m}{L_{m0}} \right)^n}{1 + \left(\frac{L_m}{L_{m0}} \right)^n} \quad (17)$$

Затем применяем (15) для аргумента a и получаем общую формулу для допустимого давления $p(a, L_m)$

$$p(a, L_m) = \frac{q + q_{0s}(a, L_m) \left(\frac{a}{a_0} \right)^m}{1 + \left(\frac{a}{a_0} \right)^m} \quad (18)$$

пригодную как на стадии проектирования, так и для расчетов на стадии эксплуатации трубопровода. Поверхность допустимых давлений, рассчитанная по формуле (18), приведена на рис.14.

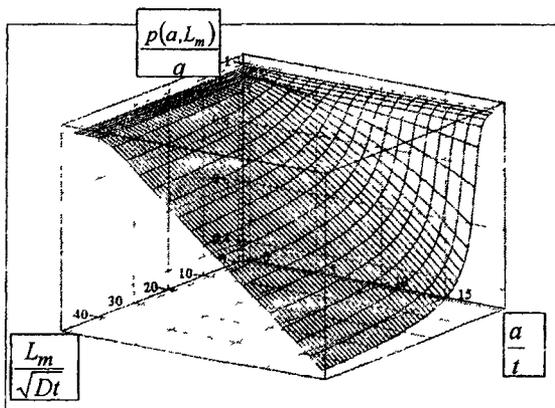


Рис 14. Поверхность допустимых давлений для поврежденного трубопровода

В шестой главе диссертации дан анализ места метода реальных элементов (MePeЭл) в системе прочностных расчетов. Показано, что MePeЭл является относится к методам сопротивления материалов, способом распро-

странения сопротивления материалов на расчеты поведения простых элементов конструкций в упругопластическом состоянии и при наличии дефектов. Для этого в MePeЭл используются такие понятия сопротивления материалов как понятие «волокно», гипотеза плоских сечений и диаграмма деформирования.

Установлено, что MePeЭл и разработанный на его основе метод расчетов предельного состояния поврежденных трубопроводов АЭС обладают естественной консервативностью, необходимой для обоснования безопасной работы трубопроводов при наличии дефектов.

Показано, что метод реальных элементов представляет собой инженерный метод расчета на прочность, ориентированный на прямое использование в расчете экспериментальных данных (диаграмм деформирования) о свойствах материала в поврежденной области, отвечающей за нарушение прочности конструкции. Данный подход позволяет преодолеть ограничения, связанные с концепцией опасной точки и математическими сингулярностями, возникающими в критериях механики разрушения. С другой стороны, MePeЭл позволяет по единой процедуре проводить расчеты на прочность трубопроводов АЭС с дефектами любой геометрии в упругом и упругопластическом состоянии.

Приложение к диссертации содержит программу для анализа предельного состояния дефектногогиба, находящегося под действием внутреннего давления и изгибающего момента. Программа написана в среде Mathcad.

Основные выводы

1. Разработан метод расчета предельного состояния прямых участков и гибов трубопроводов АЭС, поврежденных 3D дефектами стенки, базирующейся на использовании MePeЭл методологии построения расчетных стержневых моделей. Предельное состояние описывается совокупностью силовых и соответствующих деформационных факторов.
2. Предложена концепция «равнопрочного» ггиба, позволяющая использовать MePeЭл методологию для расчетов реальных гибов, изготовленных методом наматывания на сектор.
3. Разработан алгоритм и математическое обеспечение для реализации предложенного метода прочностных расчетов дефектных участков и гибов трубопроводов АЭС при нагружении внутренним давлением и изгибающим моментом.
4. Выполнен цикл расчетов предельного состояния поврежденных гибов, отличающихся радиусом кривизны, размерами повреждения и механическими свойствами конструкционного материала. Показано, что совместное увеличение глубины дефекта и снижение характеристик пластичности конструкционного материала может впятеро понизить предельную несущую способность трубопровода.
5. Предложена математическая процедура построения объединенных критериев прочности для элементов конструкций, поврежденных трещинами или коррозионно-эрозионными язвинами, пригодная для прочностных расчетов как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации трубопроводов АЭС.
6. Предложенная методика верифицирована посредством сопоставления результатов, полученных с применением данной методики, с результатами расчетов с применением метода конечных элементов и данными натурных испытаний поврежденных трубопроводов. Установлено, что погрешность расчетов предельных давлений в трубопроводе по предложенной методике в среднем не превышает 15 %.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. Ван Хайжун, Маркочев В.М. Прочность трубопровода с трехмерным дефектом стенки. / Научная сессия МИФИ - 2003. Сб. науч. тр. - М.: МИФИ, 2003, Т. 8, С.199 – 200.
2. Ван Хайжун, Маркочев В.М. Предельное состояние трубопровода с трехмерным дефектом стенки. / Научная сессия МИФИ - 2004. Сб. науч. тр. - М.: МИФИ, 2004, Т. 8, С. 130 -131. (ЗЛ)
3. Маркочев В.М., Ван Хайжун. Построение объединенных критериев прочности. / Научная сессия МИФИ - 2004. Сб. науч. тр. - М.: МИФИ, 2004, Т. 8, С. 132 -133.
4. Маркочев В.М., Ван Хайжун. Построение обобщенных критериев прочности //Инженерная физика. 2004, № 3. С. 31-35.
5. Ван Хайжун, Маркочев В.М. Анализ предельного состояниягиба трубопровода с 3D дефектом стенки // Инженерная физика, 2004, № 4, с.24-27.
6. Ван Хайжун, Маркочев В.М. Предельное состояние стенки трубы с трехмерными дефектами // Заводская лаборатория, 2005, №4, с. 49 - 52.
7. Ван Хайжун, Маркочев В.М. Предельное давление длягиба с 3D дефектом стенки. / Научная сессия МИФИ - 2005. Сб. науч. тр. - М.: МИФИ, 2005, Т. 8, С. 166 -167.
8. Маркочев В.М., Ван Хайжун. Прочность поврежденногогиба при нагружении внутренним давлением и изгибающим моментом. / Научная сессия МИФИ - 2005. Сб. науч. тр. - М.: МИФИ, 2005, Т. 8, С. 168 –169.

Подписано в печать 17.05.2005 г.

Формат 60 x 90/16. Объем 1.0 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 1705051

Оттиражировано в ИП Гурбанов Сергей Галыбович
Св. о регистрации № 304770000207759 от 09 июня 2004 года
ИНН 770170462581 . .