

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ПОВРЕЖДЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ МЕТОДОМ РЕАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.М. Маркочев, Ю.В. Шамраев

*Московский государственный инженерно-физический институт
(технический университет), г. Москва*



Рассмотрен новый метод расчетов на прочность элементов конструкций, содержащих дефекты и неоднородности, - метод реальных элементов. Метод основан на замене элемента конструкции эквивалентной стержневой системой и использовании экспериментальных диаграмм деформирования образцов с различной степенью повреждения. Анализ предельного состояния базируется на деформационном критерии разрушения наиболее поврежденного стержня. Приведен алгоритм построения расчетной схемы отрезка трубопровода, содержащего несквозной окружной дефект и нагруженного изгибающим моментом и осевой силой. С использованием компьютерной программы, реализующей алгоритм метода, проведен анализ прочности ГЦТ Ду-500, содержащего окружную несквозную трещину в различных положениях сечения трубопровода. Оценены критический размер трещин в трубопроводе и влияние отклонения центра трещины от силовой плоскости на прочность сечения.

На протяжении последних лет было зафиксировано наличие трещиновидных дефектов в трубопроводах ЯЭУ различных типов. Большинство дефектов были окружными и располагались вблизи сварных швов в зоне теплового воздействия. Оценка степени опасности обнаруженных трещин лежит в основе решения о ремонте трубопровода или о продолжении его эксплуатации.

К настоящему времени разработан ряд критериев разрушения тел, содержащих дефекты: расчет по предельному состоянию с использованием коэффициентов интенсивности напряжений J -интеграла. На их базе созданы методики, стандарты и нормы расчета на прочность. Их ограничения связаны с тем, что они базируются преимущественно на силовых критериях, используют малое количество экспериментальных данных и не позволяют моделировать процессы деформирования и рассчитывать диаграммы деформирования элементов конструкций.

При расчетах в нелинейной области напряжения, в отличие от деформаций, теряют свойство аддитивности. Поэтому объективно назрел переход к деформационным критериям и операционным параметрам, позволяющим учитывать как нелинейность, так и необратимость процессов деформирования упругопластических тел.

В связи с этим была предпринята попытка разработать новый метод расчета на прочность элементов конструкций, содержащих дефекты и неоднородности, ба-

зирующийся на деформационном критерии и получивший название "метода реальных элементов" (MePeЭл) [1-5]. Основными положениями, используемыми в MePeЭл, являются:

- замена элемента конструкции эквивалентной стержневой системой, стержни которой работают только на растяжение-сжатие; условия совместности деформации выполняются лишь на концах стержней;
- каждому стержню ставится в соответствие диаграмма деформирования, получаемая экспериментально; тем самым, в силу конечности диаграмм, каждый стержень наделяется критериальными свойствами; при этом стержень может быть неповрежденным, либо содержать неоднородность или дефект; набор диаграмм для стержней с различными дефектами формируется из проблемно-ориентированного банка данных;
- процесс моделирования деформирования заключается в пошаговой реализации заданной программы совместных перемещений концов стержней, определении на каждом шаге усилий в стержнях по экспериментальным диаграммам и расчете силовых факторов для всего элемента конструкции;
- расчет предельного состояния базируется на деформационном критерии, вытекающем из конечности диаграмм деформирования; критерием разрушения конструкции служит достижение одним из стержней своего предельного удлинения; элемент, в котором деформации первыми достигают предельного значения, является критериальным; остальная система элементов, деформируясь под действием внешней нагрузки, определяет его возможные перемещения.

Привлечение большого объема экспериментальных данных и использование итерационных процедур в ряде вычислений делает необходимым применение ЭВМ для MePeЭл-расчетов. С использованием MePeЭл становится возможным решение целого спектра нетривиальных прочностных задач при сложном нагружении, с учетом неравномерного распределения температуры по объему элемента конструкции и изменения механических свойств материала в процессе эксплуатации.

Имеется три способа формирования банка диаграмм деформирования, определяющего связь между удлинением и силой для разных размеров трещин [1]:

- испытание образцов, вырезанных из подобного элемента конструкции в полную толщину, с надрезами, соответствующими глубинам трещин, ожидаемым при эксплуатации;
- испытание цилиндрических образцов с кольцевыми надрезами;
- построение диаграмм деформирования на основе стандартных механических свойств с использованием различных моделей и теорий.

Наиболее простым способом формирования банка диаграмм деформирования, вместе с тем дающим достаточно достоверные результаты, является второй – испытание цилиндрических образцов. Проведенные испытания показали, что отличие получаемых диаграмм деформирования от диаграмм деформирования образцов в полную толщину той же степени поврежденности (при сопоставимых размерах сечений образцов) оказалось незначительным [5].

Рассмотрим задачу о прочности отрезка трубопровода длиной L , нагруженного изгибающим моментом M и осевой силой P . Толщина трубы – t , внешний радиус – R . В сечении трубопровода расположена окружная несквозная трещина, симметричная относительно оси y , лежащей в плоскости действия изгибающего момента (рис. 1а и 1б). Глубина трещины достигает максимума в точке, расположенной на оси y . Процедура расчета этого трубопровода с окружной трещиной состоит в следующем:

- мысленно разрежем отрезок трубопровода на $2n$ продольных полос (рис. 1в), целых или содержащих трещины глубиной a_i ; ширина полосы равна b ;

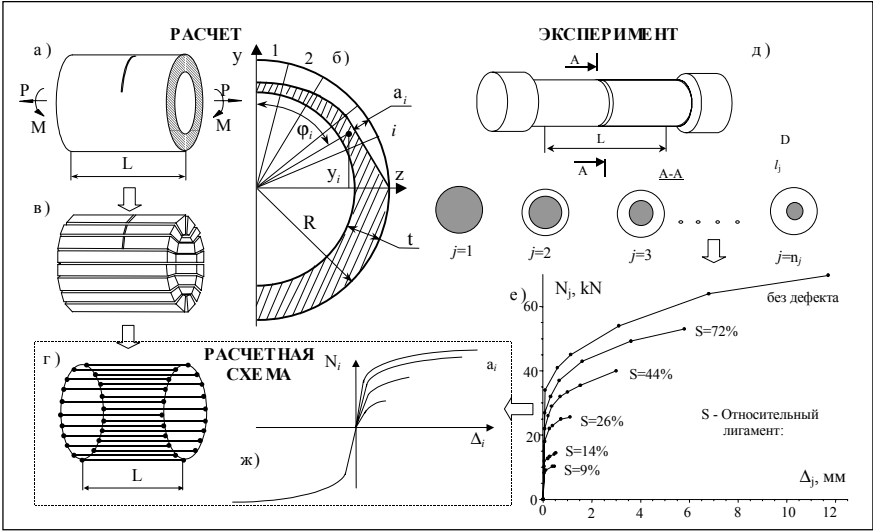


Рис.1. К построению расчетной схемы отрезка трубопровода, содержащего окружную трещину

- составим стержневую модель, шарнирно соединив концы стержней с двумя абсолютно жесткими обручами (рис.1г); взаимные осевые и угловые перемещения обручей сопровождаются растяжением-сжатием стержневой модели; поврежденность стержня характеризуется относительным лигаментом (отношением площади живого сечения к полной площади сечения образца): $S_{СТ}=a_i/t$;
- из того же материала, что и рассчитываемый трубопровод, изготовим цилиндрические образцы (рис.1д) с кольцевыми надрезами (трещинами) глубины l_j и испытаем их с записью диаграмм в координатах “нагрузка N - удлинение D на базе L” (рис.1е); степень повреждения образца также характеризуется его относительным лигаментом: $S_{ОБР}=(1-2l_j/D)^2$;
- для каждого стержня модели с глубиной трещины a_i зададим диаграмму деформирования цилиндрического образца с таким же значением относительного лигамента $S_{ОБР}=S_{СТ}$, т.е. с кольцевым надрезом глубиной

$$l = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{a_i}{t}} \right); \tag{1}$$

при необходимости производится интерполирование между диаграммами образцов с различными глубинами l_j ; отметим, что толщина стенки трубы не должна существенно отличаться от диаметра цилиндрического образца для обеспечения такого же вида деформирования и разрушения; нагрузки на диаграмме деформирования стержневого элемента должны быть промасштабированы с учетом различия площадей поперечного сечения элемента системы (полосы) и образца; сила N_i , действующая в стержне, равна

$$N_i = N \frac{\pi D^2}{4bt}; \tag{2}$$

диаграммой для неповрежденных стержней является диаграмма образца без надреза, а диаграмма сжатия для всех стержней принята аналогичной диаграмме растяжения гладкого стержня;

- сместим правый обруч относительно левого на расстояние Δ и повернем на угол θ ; если $\theta \ll 1$, то каждый из стержней получит удлинение:

$$\Delta_i = \theta \cdot y_i + \Delta; \quad (3)$$

этим удлинением соответствуют силы N_i , определяемые по диаграмме деформирования элемента с трещиной a_i ;

$$N_i = \Phi(\Delta_i, a_i), \quad (4)$$

силы, действующие в стержнях, создают суммарную осевую силу P и изгибающий момент M относительно оси z :

$$P = \sum_{i=1}^{2n} N_i, \quad (5)$$

$$M = \sum_{i=1}^{2n} N_i \cdot y_i = \sum_{i=1}^{2n} N_i \cdot \left(R - \frac{t}{2}\right) \cos\left[\frac{\pi(i-0.5)}{n}\right]; \quad (6)$$

• предельное состояние трубопровода отождествим с предельным состоянием наиболее поврежденного стержня ($i=1$); его предельное удлинение $\Delta_1^{\text{lim}} = \Delta_K = \text{const}$ достигается при различных сочетаниях предельной угловой θ_c и линейной Δ_c деформации отрезка трубопровода:

$$\Delta_K = \theta_c \cdot y_1 + \Delta_c; \quad (7)$$

уравнение (7) задает критическую деформационную кривую $\theta_c - \Delta_c$; для каждой точки кривой (пары значений θ_c и Δ_c) вычислим нагрузки по (5) – (6). Полученный набор точек $M_c - P_c$ даст силовую критическую кривую. При заданной программе нагружения можно построить диаграммы деформирования трубы $M - \theta$ и $P - \Delta$.

Состояние элемента конструкции считается неопасным, если точка, соответствующая действующим в нем нагрузкам, находится под критической кривой. Коэффициентом запаса по предельному состоянию по одному из параметров (M , P , θ или Δ) является отношение предельного значения этого параметра, определяемое по критической кривой, к его максимальному эксплуатационному значению.

Для расчета предельного состояния и моделирования процесса деформирования

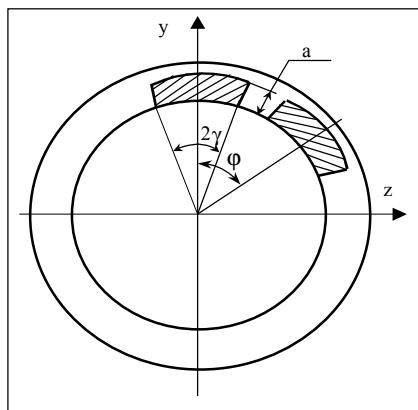


Рис. 2. Внутренняя окружная трещина прямоугольного профиля в стенке трубопровода:

2γ - угловой размер;

a - глубина трещины;

z - нормаль к плоскости действия изгибающего момента;

ϕ - угол отклонения центра трещины от наиболее опасного положения (силовой плоскости)

трубопроводов, содержащих окружные дефекты, была написана компьютерная программа. Ее верификация произведена с использованием теоретических решений, специальных экспериментов и литературных данных [2, 5]. Для большинства случаев расхождение экспериментальных данных с результатами расчета составило не более 10%.

Процедура МеРеЭл-расчета применена для оценки прочности главного в циркуляционном трубопроводе (ГЦТ) Ду-500 реактора типа ВВЭР-440, содержащего окружной дефект. Внутренний диаметр трубопровода Ду-500 составляет 500 мм, а толщина стенки 32 мм. Максимальные напряжения, действующие при эксплуатации на прямом участке трубопровода, соответствуют изгибающему моменту $M=0,83 \text{ МН*м}$ и осевой силе $N=2,96 \text{ МН}$ [5].

Материал трубопровода – сталь 08Х18Н10Т. Экспериментальные критериальные диаграммы деформирования на базе измерения

$L=50$ мм (рис. 1е) были получены в результате испытания цилиндрических образцов (рис.1д) диаметром $D=12$ мм, в которых были изготовлены надрезы различной глубины [5]. Около каждой диаграммы указано значение относительного лигамента образца S . Предельная деформация на выбранной базе образца с наименьшим лигаментом 9% составила 0,41 мм. Видно, что как предельная нагрузка в образцах, так и предельное удлинение пропорциональны лигаменту.

Была рассчитана прочность сечения трубопровода, содержащего внутренние окружные трещины прямоугольного профиля с различными угловыми размерами 2γ и глубиной a (рис.2). С использованием компьютерной МеРеЭл-программы проведен расчет критических кривых $M_c - P_c$ для трубопровода с трещинами углового размера 60° и глубиной 9, 18, 24 и 29 мм, а также для неповрежденной трубы (рис.3а). Точкой Э на графиках отмечены значения максимальной нагрузки.

Примем изгибающий момент в качестве параметра, определяющего близость состояния конструкции к предельному. Запас прочности (при осевой силе 2,96 МН) равен отношению предельного момента к максимальному моменту (0,83 МН*м). На рис.4 представлены кривые равного запаса для трубопровода с окружными трещинами различных размеров. Для неповрежденного сечения запас составляет 6,19, для трещин глубиной 9 мм запас по изгибающему моменту составляет 4,6..5,4, для 18 мм – 3,4..4,7 и для 24 мм – 2,5..4,1, в зависимости от углового размера трещины. Для трещин глубиной 29 мм запас составляет 2,4..3,2 для угловых размеров $0-60^\circ$, 1,6..2,4 для угловых размеров $60-120^\circ$ и 0,8..1,5 для $120-200^\circ$.

По полученным кривым равного запаса оценены критические размеры трещины при максимальных нагрузках: для трещины глубиной 29 мм критический угловой размер составляет 175° ; для трещины глубиной 28 мм критический угловой размер превышает 200° . Для допускаемого запаса по предельному состоянию, например,

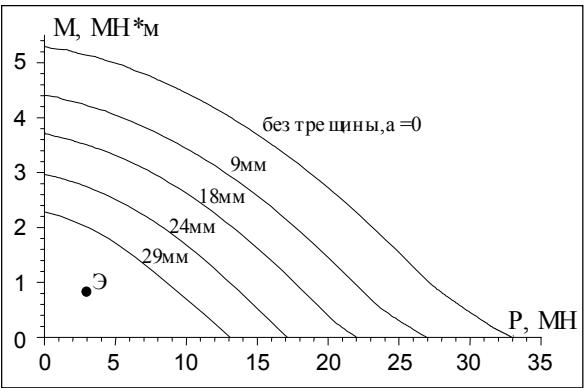


Рис. 3а. Критические кривые для сечения ГЦТ Ду-500, содержащего внутреннюю окружную трещину углового размера 60° и постоянной глубины: 1 – 9 мм, 2 – 18 мм, 3 – 24 мм и 4 – 29 мм, а также критическая кривая для трубы без дефекта

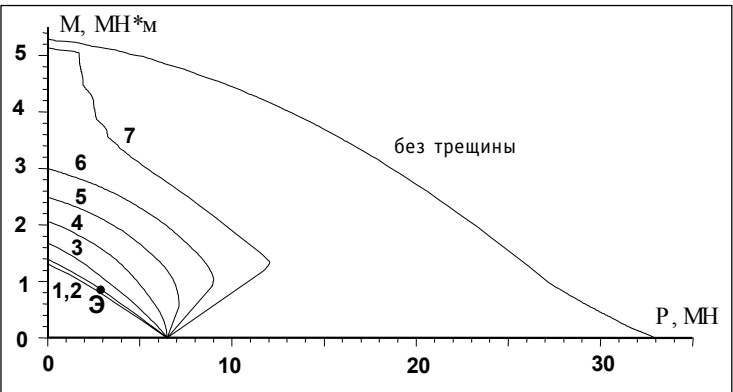


Рис. 3б. Критические кривые для сечения ГЦТ Ду-500, содержащего внутреннюю окружную трещину углового размера 180° и постоянной глубины 29 мм при углах отклонения центра трещины от силовой плоскости: $\varphi = 0, 30, 60, 90, 120, 150$ и 180° , а также критическая кривая для трубы без дефекта; точка Э соответствует максимальным нагрузкам в эксплуатации ($M=0,83$ МН*м, $P=2,96$ МН). Внутренний диаметр трубопровода 500 мм, толщина стенки – 32 мм

2,5 опасность представляют трещины, имеющие глубину не менее 24 мм и угловой размер от 45° .

Рассмотрен случай, когда центр трещины прямоугольного профиля смещен в сторону от силовой плоскости на угол φ (рис.2). С использованием программы расчета по МеРеЭл были построены критические кривые для окружных несквозных трещин с угловым размером 180° и глубиной 29 мм при углах отклонения от силовой плоскости $\varphi = 0, 30, 60, 90, 120, 150$ и 180° (рис. 3б). Запас по моменту изменяется от 0,90 для трещины, расположенной в наиболее опасном положении сечения до 4,56 для трещины, расположенной в положении, обратном наиболее опасному. Полученный максимальный запас меньше запаса для неповрежденного сечения из-за действия осевой силы, равной 2,96 МН. В обоих случаях центр дефекта проходит через плоскость действия изгибающего момента, которая является в этом случае и плоскостью изгиба.

В промежуточных положениях трещины запас меняется неравномерно: 1,01 для угла φ , равного 30° , 1,30 для 60° , 1,89 для 90° , 2,53 для 120° и 3,57 для 150° . При этом имеет место косой изгиб трубопровода, т.е. плоскость действия изгибающего момента не совпадает с плоскостью изгиба. Возрастание предельного момента при увеличении угла φ обусловлено как ростом момента инерции сечения, так и заходом части трещины в зону действия сжимающих напряжений.

В заключение отметим, что большая достоверность МеРеЭл решения связана с использованием диаграмм деформирования образцов, изготовленных из материала элемента конструкции, как для определения связи между деформациями и нагрузками в анализируемом элементе конструкции, так и для определения предельной деформации поврежденного элемента. Таким образом, отсутствует необходимость деления исходных свойств материала на механические свойства, используемые для расчета процесса деформирования тела с трещиной, и характеристики трещиностойкости, используемые для расчета предельного состояния.

Расчет предельных состояний трубопровода ведется в терминах эксплуатационных параметров: изгибающий момент в сечении, содержащем дефект, осевая

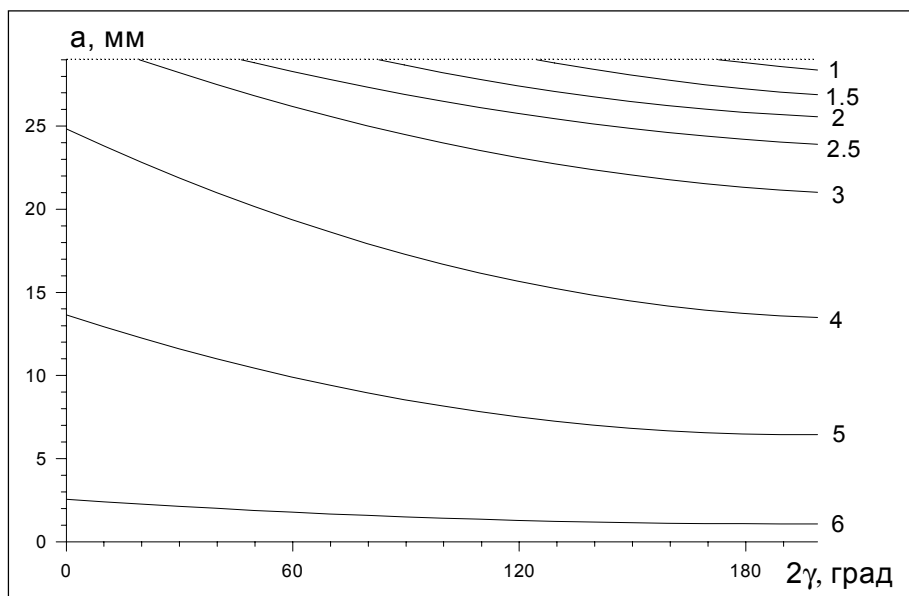


Рис.4. Диаграмма запасов по предельному состоянию (по изгибающему моменту при постоянной осевой силе 2,96 МН) для сечения трубопровода, содержащего внутреннюю окружную трещину углового размера 2γ и глубиной a ; внутренний диаметр трубопровода 500 мм, толщина стенки – 32 мм

сила. Запас по предельному состоянию определяется с учетом реального пути нагружения элемента конструкции. Принципиальным в МеРеЭл является вопрос построения эквивалентной стержневой системы, методологии испытаний и способа задания адекватных диаграмм деформирования для стержневой системы. Отметим, что для таких элементов конструкций, как сосуды давления, балки и брусья, процедура построения стержневой системы очевидна.

Анализ критериальных диаграмм деформирования цилиндрических образцов с различной степенью повреждения (глубиной кольцевого надреза), изготовленные из материала 0X18H10T, показал наличие пропорциональности максимальной нагрузки на образце лигаменту, что свидетельствует о нечувствительности материала к наличию трещины по параметру силы. Однако предельное удлинение образцов также пропорционально лигаменту, что говорит о том, что материал на самом деле чувствителен к наличию дефекта по параметру деформации. Ограниченность деформаций поврежденной части сечения приводит к тому, что в неповрежденной части сечения элемента конструкции не могут быть достигнуты значения предельных нагрузок. В случае, если предельная деформация элемента с трещиной меньше деформации начала текучести неповрежденного элемента, разрушение произойдет без пластических деформаций неповрежденной части сечения, что может трактоваться как хрупкое разрушение конструкции.

Рассчитанные запасы по предельному состоянию для главного циркуляционного трубопровода Ду-500 для различных трещин в сечении трубопровода представлены на диаграмме возможных размеров дефектов (глубина – угловой размер). Полученные результаты показывают значительный запас прочности ГЦТ при действии максимальных нагрузок даже в случае наличия достаточно протяженных и глубоких окружных трещин. Принимая в качестве допускаемого запаса по предельному состоянию, например 2,5, можно заключить, что опасность представляют трещины, имеющие глубину не менее 24 мм и угловой размер от 45°.

При отклонении центра трещины от силовой плоскости на угол менее 30°, увеличение запаса не превышает 10%. При отклонении на 60° и более, прочность сечения резко повышается и стремится в пределе к прочности неповрежденного сечения.

Работа выполнена при поддержке ФЦП “Интеграция”, проект К0605 “Механика предельных состояний твердого тела – наука и образование”.

Список литературы

1. Маркочев В.М., Кравченко И.О., Шамраев Ю.В. Оценка прочности поврежденных конструкций методом реальных элементов // Заводская лаборатория. – 1997. – №2. – С.44-50.
2. Маркочев В.М., Гольцев В.Ю., Кравченко И.О., Шамраев Ю.В. Оценка прочности поврежденных конструкций методом реальных элементов. Экспериментальная проверка // Заводская лаборатория. – 1997. – №3. – С.33-38.
3. Markotchev V.M., Shamraev Yu.V. Method of the Real Elements and Assessments of Residual Strength of Pipes Containing Defects. Proceedings of the fifth International Conference on Material Issues in Design, Manufacturing and Operation of Nuclear Power Plants Equipment. Volume 2. St.Peterburg: Prometey, 1998. - P.231-243.
4. Markotchev V.M., Shamraev Yu.V. Strength Assessments of NPP Pipes Containing Defects using the Method of the Real Elements / Международный конгресс “Энергетика-3000”: Тезисы докладов. – Обнинск: ИАТЭ, 1998, С.62-63.
5. Шамраев Ю.В. Анализ прочности поврежденных трубопроводов АЭС методом реальных элементов / Автореферат кандидатской диссертации. – М.: МИФИ, 1998. – 24 с.

Поступила в редакцию 29.03.99.

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.311.25:621.039.004

Requirements to XXI Century NPPs \ P.N.Alekseev, A.Yu.Gagarinski, N.N.Ponomarev-Stepnoij, V.A.Sidorenko; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 16 pages.

Power development in the XXI century would follow the trend to more uniform consumption per capita and per region. Among the competing energy sources - fossil fuels, sun and nuclear energy - the principal advantages of nuclear power - almost unlimited fuel resources. Its high energy capacity, ecological compatibility with a possibility of high wastes' concentration - determine the large-scale nuclear power development. The signs of large-scale power - large rate (dozens of percent) in electricity production, diverse areas (electricity, heat supply, technologies, transport) and media of application (land, ocean, space), extension of number of user countries, diversified power systems (centralized, autonomous), obligatory reproduction and reuse of produced fuel - create various requirements to nuclear power installations of the future. Economic efficiency, safety (of reactors and fuel cycle with waste), proper characteristics of nuclear fuel reproduction, guarantees of nuclear arms' nonproliferation are the conditions of such nuclear power development.

Succession in nuclear power development dictates the requirements to the reactor systems of close and long-term perspective.

The acceptable safety level is closely connected with the power scale and with the fields of nuclear energy sources' applications. However, the progress in the direction of reduction of potential hazard from nuclear installations and of protection systems' cheapening is inevitable. While choosing the new directions, the demonstration of new qualities in solving the tasks of future nuclear power would be important.

In the perspective, a variety of reactor technologies could exist. The report discusses the forming requirements to nuclear power plants of the following development stages - in the fields of safety, economy, user characteristics, fuel utilization - and the expected stages of this development.

УДК 621.039.566

Calculation of the Strength of NPP' Failed Pipelines with the Real Elements Method \ V.M.Markotchev, Yu.V.Shamraev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 7 pages, 4 illustrations. - References, 5 titles.

The new method - real elements method (MeReEl) - for calculation of the strength of structural elements containing defects and inhomogeneities is considered. The method is based on replacement of structural elements by equivalent rod system and use of experimental diagrams of deformation of samples with different degree of failure. The analysis of limiting condition is founded on the deformation criterion of the mosr failed rod. The algorithm of calculation of a segment of the pipeline containing nonthrough circumferential defect and loaded by bending moment and axial force is given. Using MeReEl computer code, an analysis of the strength of primary circuit pipeline (Di-500) containing nonthrough circumferential cracks in various locations in the cross section is made. Critical sizes for pipeline cracks and influence of the crack centre deflection from the force plane on the strength of the cross section are estimated.

УДК 621.039.7

Main Trends of Intermediate- and Low-Level Radioactive Waste Management in Russia \ S.D. Gavrilov, V.A. Kremnev, A.A. Grudakov, S.A. Dmitriyev, A.A. Resnik, L.P. Khamyanov, S.L. El'yash; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 4 pages. - References, 4 titles.