М432689

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного знамени высшее техническое училище им.Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Семишкин Валерий Павлович

УДК 539.376

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НА ПОЛЗУЧЕСТЬ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

01.02.06. - Динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва - 1985

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Стасенко И.В.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Зарубин В.С.

кандидат технических наук, с.н.с. Хажинский Г.М.

Ведущая организация:
Всесоюзный научно-исследовательский институт атомного машиностроения.

Защита состоится "26" 12 1985 г. в часов мин. на заседании специализированного совета "Динамика и прочность" в Московском высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана: 107005, г.Москва, 2-я Бауманская, д.5.

С дис[illegible] сковского высшего те[illegible]

Учены[illegible]
специализир[illegible] В.В.
кандидат т[illegible]
доцент

М432689

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы: Неотъемлемой составной частью большинства теплоэнергетических установок являются трубопроводы, работающие при высоких значениях температуры и давления теплоносителя. В условиях дальнейшего роста производства и одновременном снижении себестоимости электроэнергии, что может быть обеспечено в первую очередь повышением параметров рабочей среды: давления и температуры, все большее применение в конструкциях трубопроводов получают толстостенные трубы.

Разрыв трубопровода является аварийной ситуацией и может привести к большим потерям. Поэтому вопросам надежности работы трубопроводов уделяется повышенное внимание. Нормативные документы требуют проведения полного обоснования прочности, в том числе для высокотемпературных трубопроводов расчет должен проводиться на длительную прочность. Для удовлетворения нормативным требованиям необходимо создание таких методов расчета толстостенных трубопроводов, которые в полной мере учитывали бы все факторы, существенно влияющие на прочность.

М432689

Для решения вопроса о прочности высокотемпературного толстостенного трубопровода в соответствии с требованиями "Норм..." необходимо исследовать кинетику напряженного состояния в сечениях. В общем случае анализ трехмерного неоднородного по длине напряженного состояния является пространственно-временной задачей механики деформированного твердого тела (МДТТ). Решение ее даже на современных ЭВМ практически невозможно. Поэтому является актуальной разработка таких методик расчета на ползучесть толстостенных трубопроводов, которые с одной стороны обеспечивали бы достаточную точность расчета, а с другой - могли бы быть реализованы на современных ЭВМ.

Цель работы: Основной целью настоящей работы является создание научнообоснованных методик расчета на ползучесть толстостенных трубопроводов теплоэнергетических установок и разработка способов численной их реализации на ЭВМ. Методики строятся на основе численного интегрирования по времени уравнений неустановившейся ползучести и на применении методов решения краевых стационарных задач МДТТ. Исходя из возможностей современных ЭВМ ставится цель разработки методики поэтапного расчета пол[illegible]сти толстостенных трубопроводов. На первом

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1432689
Семишкин, В.П.Разработка ме

МГТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

этапе исследуется кинетика внутренних усилий и перемещений в пространстве обобщенных сил (Q - пространстве). На втором этапе исследуется кинетика напряженного состояния в сечениях для известных из решения на первом этапе функций распределения внутренних сил. Для обоснования правильности решения в Q - пространстве проводятся математический и физический эксперименты.

Научная новизна. Проведен выбор вида функции дополнительного рассеяния в Q - пространстве для толстостенных прямых и кривых труб, находящихся в неравномерном температурном поле, при комбинированном нагружении. Правильность выбора вида функции дополнительного рассеяния обоснована с помощью физического и математического экспериментов. Создана методика анализа в Q - пространстве внутренних сил, возникающих в трубопроводах. Разработаны методики численного исследования кинетики напряженного состояния в толстостенных трубах произвольной кривизны при неустановившейся ползучести с учетом обобщенных сил и перемещений, найденных из решения в Q-пространстве.

Практическая ценность. Предложенная методика расчета на ползучесть толстостенных трубопроводов и составленные по ней программы для численной реализации на ЭВМ могут быть использованы при проектировании и расчете на прочность теплоэнергетического оборудования. Данные методики и программы внедрены в практику научно-исследовательских и конструкторских работ организаций СКБ "Гидропресс" и СКБ ИЯЭ АН БССР.

Апробация. Основные результаты диссертационной работы докладывались на научном семинаре "Пластичность и ползучесть" кафедры "Динамика и прочность машин" (1976 и 1983 г.г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано шесть статей в научно-технических изданиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, перечня основных результатов и выводов, списка литературы. Работа изложена на 228 листах, включая 7 таблиц, 66 рисунков, 11 страниц литературы, которая содержит 124 работы отечественных и зарубежных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассматриваются общие вопросы связанные с задачами проектирования и расчета на прочность высокотемпературных трубопроводов теплоэнергетического оборудования, формулируется тема диссертации и дается обоснование ее актуальности.

Первая глава диссертации посвящена краткому обзору литературы советских и зарубежных авторов по вопросам расчета на прочность толстостенных труб и трубопроводов. Делается постановка задачи исследования.

При температурах свыше 450°С в сталях, из которых изготавливаются высокотемпературные трубопроводы, проявляется эффект ползучести, что изменяет механику накопления повреждений в сравнении с низкотемпературными условиями работы. В процессе эксплуатации трубопроводы подвергаются воздействию внутреннего давления и усилий, возникающих как за счет монтажных натягов и в результате самокомпенсации, так и за счет перемещений опор и концевых заделок. Распределенной нагрузкой является вес труб и теплоизоляции. В переходных режимах разогрева и расхолаживания возникает неравномерное поле в радиальном направлении.

В результате рассмотрения требований нормативных документов к расчету на прочность высокотемпературных трубопроводов обосновывается выбор подхода к расчету на длительную прочность, согласно которому накопление повреждений не влияет на эквивалентное напряжение.

Отмечается, что решение задачи ползучести трубопровода в пространстве напряжений (G - пространстве) связано с огромными затратами счетного времени на ЭВМ, что было показано Д.Л. Костовецким на примере расчета на ползучесть схематизированного пространственного трубопровода. Возможность получения решений задачи ползучести стержневых систем в Q - пространстве показана в работах Ч.Келледайна, Д.Друкера и Ю.Н.Работнова. В работах И.В.Стасенко доказана принципиальная возможность расчета на ползучесть тонкостенных трубопроводов в Q - пространстве.

Большая часть исследований по ползучести толстостенных труб посвящена рассмотрению задач установившейся ползучести прямых труб для частных случаев нагружения. Это исследования

Л.М.Качанова, Н.Н.Малинина, Ю.Н.Работнова, Р.Бейли, А.А.Ильюшина, С.Пехника, М.А.Задояна, И.В.Стасенко, Б.Ф.Шорра, И.Финни, В.С.Наместникова, А.Джонса, Д.Гендерсона и Б.Кана. Общая постановка и решение задачи установившейся ползучести прямой толстостенной трубы при комбинированном нагружении даны в работах М.Жичковского, Я.Скшипека и И.В.Стасенко. Б.Ф.Шорром получены уравнения в скоростях напряжений для прямой толстостенной трубы, нагруженной внутренним давлением и осевой силой в условиях температурного градиента. Исключительно мало исследований по кривым толстостенным трубам. Имеются только приближенные решения задачи упругого деформирования толстостенного тора, нагруженного внутренним давлением. А.Корнеки предложил искать решение системы дифференциальных уравнений данной задачи с помощью рядов по малому параметру. И.В.Стасенко рассмотрел приближенное решение в предположении малости касательных напряжений и независимости радиального напряжения от окружной координаты.

Для определения кинетики напряженного состояния при неустановившейся ползучести в случае нагружения тела постоянными во времени объемными и поверхностными силами широкое распространение получил принцип минимума дополнительной мощности. Но его применение в случае минимизации по параметру $\chi(\tau)$ ограничено.

Более перспективен метод прямого интегрирования по времени уравнений неустановившейся ползучести и сведения задачи к последовательности краевых стационарных задач для каждого отрезка интегрирования. Простейшая схема получается в случае одношагового интегрирования по методу Эйлера. Применяя эту схему к интегрированию уравнения состояния, имеем в конце шага $[\tau;\tau+\Delta\tau]$:

$$\varepsilon_{ij}(\tau+\Delta\tau)\approx\varepsilon_{ij}(\tau)+\Delta\tau\cdot f(\tau,\varepsilon_{ij}(\tau)). \qquad (I)$$

В работах П.С.Куратова и В.Н.Розенблюма, Ю.Н.Работнова, С.Э.Уманского и Б.Ф.Шорра этот метод получил название "шагового метода".

Для решения краевой стационарной задачи на шаге интегрирования обычно применяются два метода: решение систем дифференциальных уравнений в напряжениях и использование метода конечных элементов.

Таким образом, для оценки длительной прочности трубопроводов необходимо определять кинетику напряженного состояния. Поскольку решение задачи ползучести толстостенного трубопровода в G - пространстве не может быть реализовано на современных

ЭВМ, целесообразно использовать схему поэтапного расчета, согласно которой вначале проводится анализ кинетики внутренних си а затем анализ кинетики напряженного состояния в заданных сечениях для сил, найденных на первом этапе. Для проведения решени в Q - пространстве требуется построить функцию дополнительного рассеяния для толстостенных труб.

Основными задачами настоящего исследования являются:

I. Построение функции дополнительного рассеяния для толстостенных труб в Q - пространстве с целью решения задачи о кинетике внутренних сил в толстостенном трубопроводе при ползучести.

2. Обоснование правильности выбора вида функции дополнительного рассеяния для толстостенных труб с помощью физического и математического экспериментов.

3. Создание методов численного решения задач анализа кинетики напряженного состояния при неустановившейся ползучести толстостенных труб произвольной кривизны.

4. Разработка метода учета обобщенных сил и перемещений при анализе кинетики напряженного состояния в сечениях трубопровода в условиях ползучести.

Вторая глава посвящена решению задач неустановившейся ползучести толстостенных труб в напряжениях. Решения в σ - пространстве необходимы как для обоснования выбора вида функции дополнительного рассеяния, задаваемого в Q - пространстве, так и для изучения кинетики напряженного состояния.

Получена система дифференциальных уравнений в тороидальной системе координат τ , φ и θ для кривой толстостенной трубы, имеющей радиус кривизны R_0 и кольцевое поперечное сечение с радиусами внутренней и наружной поверхностей τ_1 и τ_2 . Введены функции напряжений, являющиеся компонентами вихревого тензора.

С помощью допущения об однородности напряженного состояния в направлении оси трубы и гипотезы равнодеплантированных сечений

$$\dot{\varepsilon}_\theta = (\dot{\lambda} + \dot{\varkappa}_1 \tau \cos\varphi + \dot{\varkappa}_2 \tau \sin\varphi) \frac{R_0}{R_0 + \tau\cos\varphi} \qquad (2)$$

можно существенно упростить систему дифференциальных уравнений задачи. С помощью выражения (2) устанавливается связь между скоростью осевой деформации и кинематическими параметрами: λ-

скоростью относительного изменения длины трубы в направлении оси $\dot{\varkappa}_1$ и $\dot{\varkappa}_2$ – скоростями изменения кривизн в двух взаимноперпендикулярных плоскостях.

Относительно простой получается система дифференциальных уравнений для прямой трубы, причем с учетом гипотезы равнодеплапированных сечений она сводится к двум уравнениям

$$\frac{\partial^4\dot{\Phi}}{\partial r^4}+\frac{2}{r}\frac{\partial^3\dot{\Phi}}{\partial r^3}-\frac{1}{r^2}\left(1-2\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2}\right)\frac{\partial^2\dot{\Phi}}{\partial r^2}+$$

$$+\frac{1}{r^3}\left(1-2\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2}\right)\frac{\partial\dot{\Phi}}{\partial r}+\frac{1}{r^4}\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2}\left(\frac{\partial^2\dot{\Phi}}{\partial\varphi^2}+4\dot{\Phi}\right)=F_1; \qquad (3)$$

$$\nabla^2\dot{\Psi}=-2G\dot{\vartheta}+F_2, \qquad (4)$$

где:

$$\nabla^2=\frac{\partial^2}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2};\quad \dot{\vartheta}=\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial z}\left(-\frac{1}{r}\frac{\partial\dot{u}_r}{\partial\varphi}+\frac{\dot{u}_\varphi}{r}+\frac{\partial\dot{u}_\varphi}{\partial r}\right);$$

$$F_1=-4G\left[\left(\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2}-\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\right)\left(\dot{\varepsilon}_r^c\right)+\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2}+\frac{2}{r}\frac{\partial}{\partial r}\right)\left(\dot{\varepsilon}_\varphi^c\right)-\right.$$

$$\left.-\frac{1}{2}\nabla^2\left(\dot{\varepsilon}_r^c+\dot{\varepsilon}_\varphi^c\right)-\left(\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial\varphi}+\frac{1}{r}\frac{\partial^2}{\partial r\partial\varphi}\right)\left(\dot{\gamma}_{r\varphi}^c\right)\right]; \qquad (5)$$

$$F_2=-G\left[\frac{\partial\dot{\gamma}_{zr}^c}{\partial\varphi}-\frac{\partial}{\partial r}\left(r\dot{\gamma}_{\varphi z}^c\right)\right]. \qquad (6)$$

Связь между скоростями внутренних сил и кинематическими параметрами устанавливается с помощью условий статической эквивалентности. В результате разложения в ряды Фурье по окружной координате φ функций напряжений Φ и Ψ :

$$\dot{\Phi}=\sum_{m=2}^{\infty}\left(\dot{\Phi}_{1m}\cos m\varphi+\dot{\Phi}_{2m}\sin m\varphi\right)+\frac{1}{2}\dot{\Phi}_0;$$

$$\dot{\Psi}=\sum_{m=1}^{\infty}\left(\dot{\Psi}_{1m}\cos m\varphi+\dot{\Psi}_{2m}\sin m\varphi\right)+\frac{1}{2}\dot{\Psi}_0 \qquad (7)$$

система уравнений (3) и (4) сводится к ряду обыкновенных дифференциальных уравнений относительно функций одной переменной r .

Решение системы дифференциальных уравнений относительно приращений функций напряжений на шаге интегрирования проводим с помощью метода конечных разностей. Для численной реализации этого решения разработана программа CTR для ЭВМ БЭСМ-6. Для рационального выбора шага интегрирования разработана итерационная схема, основывающаяся на понятии главного члена погрешности. В результате интегрирования по объему трубы уравнения для дополнительной мощности получается:

$$\Delta\tilde{R} = \tilde{W}\Delta\tau = \Delta\tilde{U} + \tilde{\lambda}\Delta\tau, \qquad (8)$$

где $\tilde{U}$ - упругий потенциал; $\tilde{\lambda}$ - дополнительное рассеяние.

Для контроля за шагом интегрирования используется величина главного члена погрешности

$$\eta = \tilde{R}^{(2)} - \tilde{R}^{(1)}, \qquad (9)$$

где $\tilde{R}^{(1)}$, $\tilde{R}^{(2)}$ дополнительные работы при интегрировании последовательно с двумя шагами $\Delta\tau$ и одним шагом $2\Delta\tau$.

Результаты решения ряда задач ползучести прямой толстостенной трубы при парциальном и двухкомпонентном нагружении, полученные с помощью программы CTR, хорошо совпадают с аналитическими решениями. Процесс неустановившейся ползучести при комбинированном нагружении протекает иначе, чем при действии только внутреннего давления. Наличие радиального градиента температур существенно изменяет общую картину перераспределения напряжений, при этом время выхода на установившийся режим резко увеличивается с возрастанием перепада температуры по стенке трубы.

Третья глава посвящена исследованию кинетики напряженного состояния в толстостенной трубе с помощью МКЭ. Этот метод был применен к решению задач неустановившейся ползучести толстостенных труб в качестве альтернативы решению систем дифференциальных уравнений относительно функций напряжений.

Разрешающие уравнения МКЭ на шаге интегрирования получаются из рассмотрения уравнений равновесия в форме Лагранжа:

$$\int_V \Delta F_i \delta\ddot{u}_i\, dV + \int_{S_\sigma} \Delta F_{iv} \delta\ddot{u}_i\, dS - \int_V \Delta\sigma_{ij} \delta\dot{\varepsilon}_{ij}\, dV = 0. \qquad (10)$$

Поскольку время не варьируется, в (10) проводятся замены $\ddot{u}_i = \Delta\dot{u}_i/\Delta\tau$ и $\dot{\varepsilon}_{ij} = \Delta\varepsilon_{ij}/\Delta\tau$ и после сокращения на $\Delta\tau$ получается основное вариационное уравнение на шаге $[\tau; \tau+\Delta\tau]$:

$$\delta\Delta\Pi = \delta\Big(\int_V \Delta F_i \Delta U_i\, dV + \int_{S_\sigma} \Delta F_{i_0} \Delta U_i\, dS - \int_V \Delta G_{ij} \Delta\varepsilon_{ij}\, dV\Big) = 0. \quad (11)$$

Приближенная минимизация функционала $\Delta\Pi$ осуществляется на поле приращений перемещений. Конечно-элементная идеализация толстостенных труб проводится с помощью криволинейных квадратичных конечных элементов (рис.I). Для построения аппроксимирующих функций вводятся вспомогательные функции :

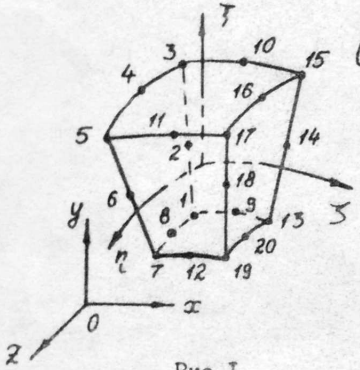


Рис.I

$$G(\beta_i,\beta_i) = \begin{cases} \frac{1}{2}(1+\beta_i\beta) & \text{для } \beta_i = \pm 1; \\ (1-\beta^2) & \text{для } \beta_i = 0, \end{cases} \quad (12)$$

$$g_i = G(\tau,\tau_i)\, G(\eta,\eta_i)\, G(\zeta,\zeta_i).$$

Функции формы для угловых узлов имеют вид:

$$N_1 = g_1 - \frac{1}{2}(g_2+g_8+g_9), \ldots, \quad (13)$$

и для узлов на ребрах:

$$N_i = g_i, \text{ где } i = 2k,\ k = 1,\ldots,10. \quad (14)$$

При построении модели деформирования трубы, как участка трубопровода, учитывается тот факт, что распределение приращений напряжений в текущем сечении статически эквивалентно приращениям внутренних усилий ΔS, ΔM_κ, ΔM_{u1} и ΔM_{u2}, являющихся функциями приращений усилий на торцах и координаты θ. Условия статической эквивалентности по-существу накладывают линейные ограничения на поле возможных приращений узловых перемещений $\{\Delta W\}$ в каждом сечении трубы. В результате интегрирования условий статической эквивалентности по длине трубы получается полная система линейных ограничений

$$\sum_{n=1}^{N} \int_{V_n} (\Delta\sigma_\theta)_n\, dV = \int_0^{\theta_0} \Delta S\, R_0\, d\theta;$$

$$\sum_{n=1}^{N} \int_{V_n} (\Delta\tau_{\theta\varphi})_n\, \tau\, dV = \int_0^{\theta_0} \Delta M_\kappa\, R_0\, d\theta;$$

$$\sum_{n=1}^{N}\int_{V_n}(\Delta\sigma_\theta)_n\,r\,\cos\varphi\,dV=\int_0^{\theta_0}\Delta M_{u1}R_0\,d\theta;$$

$$\sum_{n=1}^{N}\int_{V_n}(\Delta\sigma_\theta)_n\,r\,\sin\varphi\,dV=\int_0^{\theta_0}\Delta M_{u2}R_0\,d\theta. \qquad (15)$$

Условия (15) в матричной форме имеют вид

$$[G]\{\Delta W\}-\{\Delta A_c\}-\{\Delta A_F\}=0. \qquad (16)$$

С учетом условий (16) вариационное уравнение (11) преобразуется к виду

$$\delta\Delta\Pi^*=\delta\left[\Delta\Pi+\{\Delta Y\}^T\left([G]\{\Delta W\}-\{\Delta A_c\}-\{\Delta A_F\}\right)\right]=0, \qquad (17)$$

где $\{\Delta Y\}^T=\{\Delta\lambda\ \Delta\vartheta\ \Delta\mathcal{H}_1\ \Delta\mathcal{H}_2\}$ - вектор множителей Лагранжа.

Из условия (17) получается система алгебраических уравнений

$$\begin{bmatrix}[K] & [G]\\ [G]^T & 0\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\{\Delta W\}\\ \{\Delta Y\}\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\{\Delta R\}+\{\Delta F_p\}+\{\Delta F_c\}\\ \{\Delta A_c\}+\{\Delta A_F\}\end{Bmatrix} \qquad (18)$$

из решения которой определяются векторы $\{\Delta W\}$ и $\{\Delta Y\}$.

Для численной реализации решения задач неустановившейся ползучести кривых толстостенных труб в соответствии с разработанным в третьей главе алгоритмом составлена программа *CTFEM* для ЭВМ БЭСМ-6, тестирование которой проведено на основе аналитических решений для кривой трубы при чистом изгибе и кручении и численных решений по программе *CTR* в предельном случае $R_0\to\infty$. На примере решения задачи неустановившейся ползучести кривой толстостенной трубы, нагруженной внутренним давлением, показано, что имеет место значительная неоднородность напряженного состояния в окружном направлении, которая сохраняется и при ползучести (рис.2). В случае комбинированного нагружения процесс неустановившейся ползучести протекает иначе, чем при действии только внутреннего давления. С увеличением изгибающего или крутящего моментов, функция окружного напряжения ма-

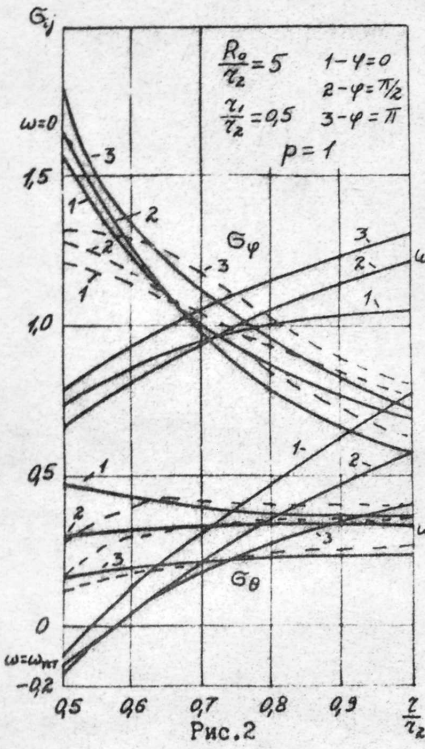


Рис.2

ло изменяется в процессе ползучести. В формулировке МКЭ задачи неустановившейся ползучести нетрудно учесть влияние на кинетику напряженного состояния неправильности поперечного сечения трубы.

Четвертая глава посвящена обоснованию возможности решения задачи ползучести толстостенного трубопровода в Q - пространстве.

Трубопроводы теплоэнергетических установок представляют собой статически неопределимые пространственные системы. При расчете в Q - пространстве естественным является представление трубопровода в виде совокупности конечных элементов, т.е. прямолинейных и криволинейных отрезков труб. Поле скоростей перемещений аппроксимируется с помощью балочных функций, получаемых на основе гипотезы плоских сечений. Каждый конечный элемент имеет два узла. В узле допускается 6 степеней свободы, которым соответствуют скорости узловых перемещений: $\dot{q}_{x1}$, $\dot{q}_{x2}$, $\dot{q}_{x3}$ - проекции скорости полного линейного перемещения узла на оси координат: $\dot{q}_{\varphi x1}$, $\dot{q}_{\varphi x2}$, $\dot{q}_{\varphi x3}$ - скорости угловых перемещений узла относительно координатных осей. Между вектором скоростей узловых перемещений $\{\dot{q}\}$ и вектором скоростей текущих перемещений $\{\dot{V}\}$ в области, ограниченной конечным элементом устанавливается связь

$$\{\dot{V}\}=[Z]\{\dot{q}\}, \qquad (19)$$

где $[Z]$ - матрица аппроксимирующих функций.

Для вариационной формулировки задачи процесс неустановившейся ползучести с помощью численного интегрирования по методу

Эйлера заменяется последовательностью дискретных состояний, характеризующихся постоянством скоростей перемещений в пределах шага интегрирования по времени. Система уравнений равновесия для трубопровода имеет вид

$$[K]\{\Delta q\}=\{\Delta R\}+\{\Delta R_p\}+\{\Delta R_c\}, \qquad (20)$$

где $[K]$ - матрица жесткости; $\{\Delta R\}$ и $\{\Delta R_p\}$-векторы узловых сил от действия сосредоточенных и распределенных сил; $\{\Delta R_c\}$- вектор узловых сил обусловленных ползучестью, вычисление которого проводится методом сил.

Функция дополнительного рассеяния λ является функцией интенсивности обощенных сил Q_o, которая в свою очередь является однородной функцией первой степени от обобщенных сил Q_i. Поскольку в общем случае нагружения трубы аналитическое решение задачи установившейся ползучести отсутствует, вид функции выбирается приближенно на основе теоремы Келледайна-Друкера. Для степенной аппроксимации кривых ползучести принимается

$$\lambda=\frac{B}{n+1}Q_o^{n+1}, \qquad (21)$$

где $Q_o=\sqrt{(\alpha Q)_i(\alpha Q)_i}$.

Скорости обобщенных перемещений получаются на основе принципа Кастильяно

$$\dot{U}_i^c=\frac{\partial\lambda}{\partial(\alpha Q)_i}=BQ_o^{n-1}(\alpha Q)_i. \qquad (22)$$

Вид функции дополнительного рассеяния существенно зависит от выбора системы обобщенных сил. Наиболее оправданным с физической и математической точек зрения является построение функции дополнительного рассеяния в пространстве главных обобщенных сил, для перехода к которому квадратичная форма удельной энергии упругого деформирования приводится к каноническому виду. Для вычисления функции Q_o проводятся решения задач установившейся ползучести отрезков труб при парциальном действии нагрузок и устанавливается связь между обобщенными силами и скоростями обобщенных перемещений. Для отрезка прямой трубы можно получить аналитические решения. В случае стационарного теплового потока через стенку трубы, что соответствует логарифмическому закону распределения температур, коэффициенты α_i для прямой трубы будут равны:

$$\alpha_s = \frac{2-k\nu}{2\pi\, r_1^{k\nu}\left(r_2^{2-k\nu} - r_1^{2-k\nu}\right)},$$

$$\alpha_\kappa = \frac{\sqrt{3}\,(3+\nu-k\nu)\, r_2^{\nu}}{2\pi\, r_1^{k\nu}\left(r_2^{3+\nu(1-k)} - r_1^{3+\nu(1-k)}\right)},$$

$$\alpha_u = \frac{(3+\nu-k\nu)\, r_2^{\nu}}{I_n\, r_1^{k\nu}\left(r_2^{3+\nu(1-k)} - r_1^{3+\nu(1-k)}\right)}, \qquad (23)$$

$$\alpha_p = \frac{\sqrt{3}\,\nu(2+k)\, r_2^{\nu(2+k)}}{2\left(r_2^{\nu(2+k)} - r_1^{\nu(2+k)}\right)},$$

где $\nu = \frac{1}{n}$; $I_n = \oint (\cos\varphi)^{1+\nu} d\varphi$; $k = \frac{U_0\, \Delta T_{1k}}{R\, T_{01}^2 \ln(r_1/r_0)}$;

U_0 – энергия активации ползучести; R – газовая постоянная;

T_{01} – абсолютная температура на внутренней поверхности трубы.

Для кривой трубы коэффициенты α_i могут быть получены из аналитических решений только для случая парциального нагружения силой S и моментами M_κ, M_{u1} и M_{u2}. В случае однородного температурного поля коэффициенты α_i имеют вид:

$$\alpha_s = \frac{1}{R_0^{\nu}\int_F \frac{dF}{(R_0 + r\cos\varphi)^{\nu}}}, \qquad \alpha_\kappa = \frac{\sqrt{3}\, r_2^{\nu}}{R_0^{\nu}\int_F \frac{r^{1+\nu}}{(R_0 + r\cos\varphi)^{\nu}} dF},$$

$$\alpha_{u1} = \frac{r_2^{\nu}}{R_0^{\nu}\int_F \frac{(r\cos\varphi + e)^{\nu}}{(R_0 + r\cos\varphi)^{\nu}} r\cos\varphi\, dF}, \quad \alpha_{u2} = \frac{r_2^{\nu}}{R_0^{\nu}\int_F \frac{(r\sin\varphi)^{1+\nu}}{(R_0 + r\cos\varphi)^{\nu}} dF} \qquad (24)$$

Коэффициенты α_p получаются из численного решения с помощью программы *CTFEM* задачи ползучести кривой толстостенной трубы при нагружении внутренним давлением. Увеличение кривизны мало изменяет значения коэффициентов α_i.

Функция (21) приближенно описывает процесс ползучести в толстостенных трубах. Для подтверждения достоверности применения аппроксимации (21) проводятся математический и физический эксперименты. Математический эксперимент заключается в сопоставлении скоростей обобщенных перемещений полученных по приближенной зависимости (22) и в результате решения с помощью программ *CTR* и *CTFEM*. На рис.3 показаны результаты решения задачи ползучести для кривой толстостенной трубы. Из графиков следует, что расчет скоростей перемещений по приближенной зависимости (22) достаточно хорошо совпадает с точным решением задачи в напряжениях. При увеличении перепада температуры ΔT_{1k} скорости перемещений уменьшаются. Увеличение кривизны трубы

приводит к незначительному снижению скоростей обобщенных перемещений.

Физический эксперимент был проведен на установке, позволяющей реализовывать в цилиндрических образцах (отрезках прямых толстостенных труб) одновременно чистый изгиб и кручение. Для каждого режима нагружения было испытано по 3 образца. Незачерненные кружочки и треугольники на рис.4 соответствуют скоростям обобщенных перемещений, полученным с помощью программы CTR , зачерненные - скоростям обобщенных перемещений, полученным экспериментально. Как следует из графика на рис.4, экспериментальные точки достаточно хорошо группируются около теоретической кривой, что подтверждает достоверность описания функции диссипации с помощью зависимости (21).

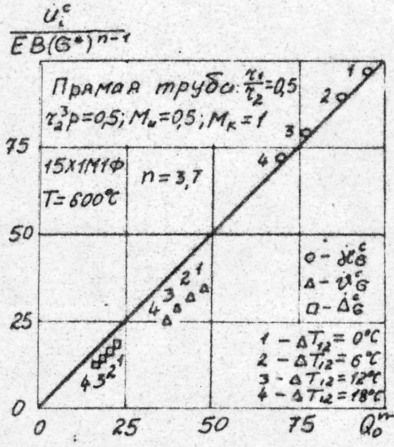


Рис.3

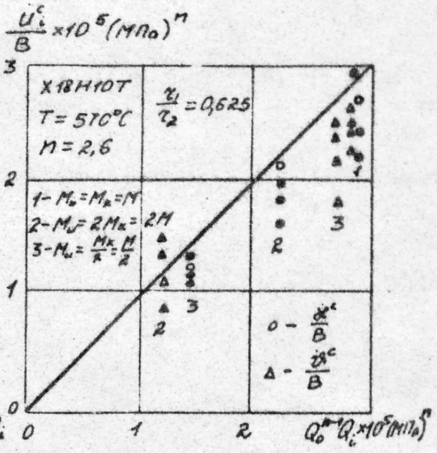


Рис.4

На основании уравнения (20) составлена программа CTPL с помощью которой была исследована кинетика внутренних сил в толстостенном трубопроводе отвода острого пара (рис.5) атомной энергетической установки типа БН. Получены функции изменения сил в сечениях трубопровода. На рис.6 показаны функции изменения внутренних сил, а на рис.7 - эквивалентного напряжения $\sigma_э=\frac{1}{2}(\sigma_i+\sigma_i)$ в сечении 20 за первые 250 часов. Функции эквивалентного напряжения использовались при определении повреждаемости. Для анализа кинетики напряженного состояния в сечениях трубопровода

применялись программы: CTR - для прямой трубы; CTFEM - для кривой трубы.

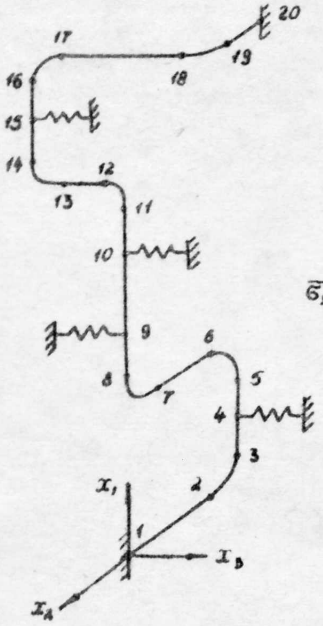


Рис.5

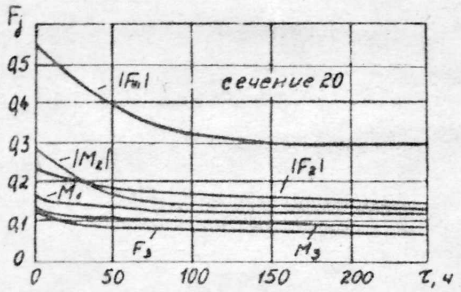


Рис.6

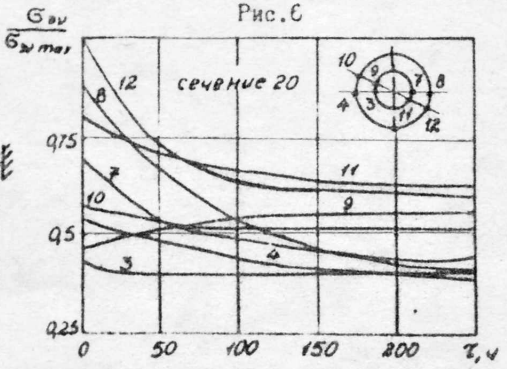


Рис.7

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Выполнено комплексное исследование ползучести толстостенных труб и трубопроводов и получены следующие результаты:

I. Для исследования кинетики напряженного состояния в сечениях толстостенных труб получена полная система дифференциальных уравнений, неизвестными в которых являются функции скоростей напряжений. Связь между обобщенными перемещениями и силами устанавливается с помощью гипотезы равнодеплапированных сечений.

2. Разработаны итерационные схемы интегрирования по времени основных уравнений задачи, основанные на контроле главного члена погрешности, вычисляемого при интегрировании уравнения для дополнительной мощности.

3. Сформулирована вариационная постановка задачи неуста-

новившейся ползучести кривой толстостенной трубы, основанная на численном интегрировании по времени. Функционал приращения энергии $\Delta\Pi$ исследуется на условный экстремум. Показано, что компонентами вектора множителей Лагранжа являются обобщенные перемещения.

4. Получены уравнения МКЭ для исследования кинетики внутренних усилий в трубопроводе, на основании которых составлена программа CTPL.

5. Проведен выбор вида функции дополнительного рассеяния λ в Q - пространстве.

6. Проведены математический и физический эксперименты для обоснования достоверности выбора λ.

7. Разработаны программы для исследования кинетики напряженного состояния: CTR и CTFEM.

Анализ результатов работы позволяет сделать следующие выводы:

I. Расчет на ползучесть толстостенных трубопроводов следует проводить по двухэтапной схеме: этап I - анализ кинетики внутренних обобщенных сил в Q - пространстве, этап 2 - анализ кинетики напряженного состояния в заданных сечениях трубопровода для внутренних сил, найденных на I-ом этапе.

2. Выбор функции дополнительного рассеяния λ в виде степенной функции от интенсивности обобщенных сил Q_0 приводит к результатам, хорошо согласующимся с данными математического и физического экспериментов.

3. При исследовании кинетики внутренних сил в трубопроводе и напряженного состояния в его сечениях наиболее рационально применять одношаговый метод интегрирования по времени с выбором величины шага из условия заданной погрешности.

4. Наличие радиального градиента температур существенно изменяет общую картину перераспределения напряжений. С возрастанием перепада температуры по стенке трубы резко увеличивается время выхода на установившийся режим. Для кривых труб имеет место существенная неоднородность напряженного состояния в окружном направлении, сохраняющаяся в процессе перераспределения напряжений.

5. Для определения кинетики напряженного состояния в кривых толстостенных трубах, особенно с некруговым поперечным сечением, предпочтительнее использование МКЭ, реализованного в

программе CTFEM . Для расчета на неустановившуюся ползучесть прямых толстостенных труб выгоднее применять программу CTR , требующую в 3-5 раз меньше машинного времени для решения той же задачи.

6. Разработанная методика расчета на ползучесть толстостенного трубопровода, реализованная в программах для ЭВМ ЕЭСМ-6 CTR , CTFEM и CTPL , может быть использована в проектных и научно-исследовательских организациях, занимающихся разработкой теплоэнергетического оборудования с высокими значениями температуры теплоносителя.

Основные результаты диссертации изложены в статьях:

I. Стасенко И.В., Семишкин В.П. Неустановившаяся ползучесть толстостенной трубы. - Изв.вузов. Машиностроение, 1977, №2, с.13-15.

2. Семишкин В.П. Напряженное состояние толстостенного тора, нагруженного внутренним давлением. - Изв.вузов. Машиностроение, 1978, №2, с.10-13.

3. Стасенко И.В., Семишкин В.П. Неустановившаяся ползучесть толстостенных труб при комбинированном нагружении. - Расчеты на прочность. - М.: Машиностроение, 1978, вып19, с.109-122.

4. Стасенко И.В., Семишкин В.П. Ползучесть неравномерно нагретых труб. - Расчеты на прочность. - М.: Машиностроение, 1980. вып.21, с.111-117.

5. Киселев В.А., Семишкин В.П. Исследование кинетики напряженного состояния вблизи концентраторов напряжения в условиях высокотемпературной ползучести. - Проблемы прочности, 1981, №2, с.10-13.

6. Стасенко И.В., Семишкин В.П. Кинетика напряженного состояния в толстостенных криволинейных трубах при неустановившейся ползучести. - Расчеты на прочность. - М.: Машиностроение, 1983, вып.21, с.140-147.

Объем 1п.л. Тираж 100 экз. Ротапринт ОКБ "Гидропресс"
Л-83531

МВТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА