

Fourth International Information Exchange Forum
"SAFETY ANALYSIS FOR NPPs OF VVER AND RBMK TYPE"
11-15 October, 1999, Obninsk, Russia

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ СХЕМЫ И АЛГОРИТМА РАСЧЕТА
АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ КОДА "ТРАП-97"**

В.К. Артемьев*, С.И. Зайцев**, Ю. Н. Корниенко*,
(*ГНЦ РФ - Физико-Энергетический институт им. А.И.Лейпунского, Обнинск,
**ОКБ ГИДРОПРЕСС, Подольск)

Комплекс программ теплогидравлических расчетов нестационарных режимов ЯЭУ с ВВЭР "ТРАП" (Теплогидравлические Расчеты Аварийных Процессов) [1] предназначен для анализа параметров ЯЭУ и теплогидравлической обстановки в активной зоне в режимах с нарушениями в работе оборудования I, II контуров и аварийных режимах, включая аварии с потерей теплоносителя. Используется при анализе проектных аварий и запроектных аварий при обосновании работоспособности и безопасности АЭС с ВВЭР и экспериментальных стендов.

В настоящее время код ТРАП имеет продолжительную историю создания и применения. В связи с ростом требований к объему и качеству расчетного обоснования работоспособности и безопасности АЭС, представлений о процессах в реакторной установке и накоплением экспериментального материала комплекс ТРАП постоянно совершенствуется, в том числе и с точки зрения улучшения численной схемы, повышения эффективности алгоритма расчета. Особенно это актуально при моделировании аварийных режимов, в частности, при разрывах труб большого диаметра. С математической точки зрения такие режимы характеризуются резким, нестационарным, нелинейным поведением начальных и граничных условий и, следовательно, очень большим и крутым изменением искомых величин на начальной стадии аварийного процесса с постепенным переходом на стабилизированный режим; численный алгоритм теряет запас устойчивости, становится более чувствительным к ошибкам округления. Для проведения устойчивых вычислений и получения физических результатов необходимо уменьшать временной шаг, что приводит к существенному росту вычислительных затрат, особенно при проведении расчетных обоснований длительных нестационарных режимов, например, поведения основных параметров в ходе максимальной проектной аварии (с разрывом Ду-850 "холодной нитки" ГЦТ). Поэтому одной из важных проблем является повышение устойчивости счета, оптимизация выбора временного шага при моделировании процессов как с большой, так и с малой характерной постоянной времени, модернизация схем вычисления некоторых характеристик, например, давления.

Разрабатываемые подходы к улучшению численного алгоритма рассмотрим на примере задачи моделирования аварии с разрывом Ду-850 "холодной нитки" ГЦТ по программе "ТЕСН-97", входящей в комплекс "ТРАП-97". Вся конструкция I контура по тракту течения теплоносителя разбита на элементарные объемы (ячейки), которые объединены во взаимосвязанные структурные элементы (см. рис.1). Количество структурных элементов определяется необходимостью рассмотреть все элементы контура, находящиеся в различных условиях работы, и максимально возможным упрощением схемы расчета. Рабочая петля объединяет все работоспособные петли. Такая схема используется в случае, если все работоспособные петли находятся в одинаковых условиях.

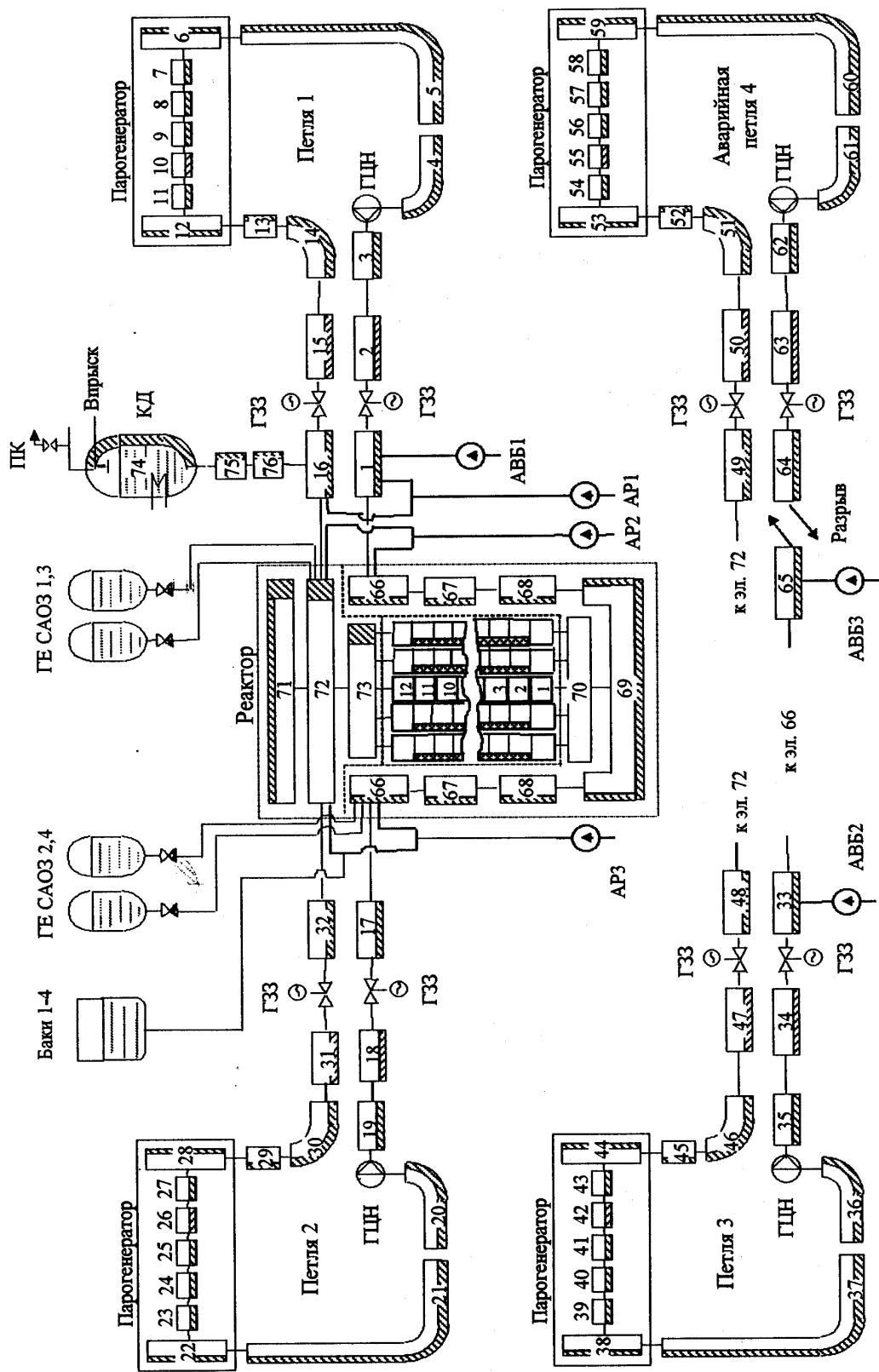


Рис. 1. Расчетная схема I контура по программе ТЕЧЬ-М.

В программе имеется возможность моделирования до четырех циркуляционных петель, находящихся в различных условиях, подачи охлаждающей воды различными системами аварийного охлаждения, подключения компенсатора давления и др.

Степень разбиения каждого структурного элемента определяется целями расчета, но одинакова для всех работоспособных петель, геометрические и гидравлические характеристики работоспособных и аварийной петель могут быть различны.

При моделировании напорной и сборной камер реактора, в связи со сложностью геометрии камер реактора, характеристики каждой ячейки этих элементов задаются отдельно.

Холодные трубопроводы могут быть включены в любую ячейку НКР, а горячие, соответственно, в любую ячейку СКР.

Компенсатор давления может быть подключен к любому элементу горячего трубопровода первой работоспособной или аварийной петли.

В системе аварийного охлаждения активной зоны выделяется: пассивный узел - емкости с водой, находящейся под давлением газа (максимальное количество емкостей - 4), и активный узел - насосы аварийного впрыска (максимальное количество - 12).

Как активные, так и пассивные элементы САОЗ могут быть подключены в любую ячейку холодного и горячего трубопроводов любых петель и непосредственно в камеры реактора.

Ячейки связаны линиями перетечек, которые характеризуются гидравлическими сопротивлениями и инерционностью.

ГЦН могут быть включены в любую ячейку холодных трубопроводов петель.

Данная расчетная схема дает возможность моделировать течь из любого элемента аварийной петли или камер реактора. При этом предусмотрена утечка теплоносителя либо из одной ячейки, либо при двухстороннем истечении из двух, соседних по схеме, ячеек. Каждый парогенератор по II контуру представлен одним специальным элементарным объемом, в котором выделен расчетный элемент переменного объема. В этом элементе моделируются параметры теплоносителя над уровнем пароводяной смеси.

Паропроводы представлены одним расчетным объемом, соединенным с паровым пространством парогенераторов. Моделируется работа системы подачи питательной воды, стопорных клапанов турбин, быстродействующих редуцирующих устройств сброса пара, предохранительных клапанов на парогенераторах, быстродействующих запорно-отсечных клапанов.

Количество расчетных объемов в петлях и камерах реактора до 100.

В активной зоне может быть рассмотрено до 5-ти каналов, один из которых моделирует протечки (канал без твэлов). Количество расчетных объемов по высоте каналов - до 12. Шаг интегрирования систем уравнений теплогидравлики лимитируется длиной минимального элемента расчетной схемы, поэтому необходимо при составлении расчетной схемы учитывать данный фактор.

Для расчета параметров теплоносителя используются уравнения неразрывности, энергии и движения, записанные в одномерном приближении и уравнение состояния; при определении температурного поля в твэлах и металлоконструкциях - одномерное уравнение теплопроводности; при расчете мощности реактора - уравнение нейтронной кинетики в точечном приближении с учетом шести групп запаздывающих нейтронов. В программе предусмотрена возможность использования различных методик и корреляций для определения условий теплообмена, коэффициентов гидравлического сопротивления, моделирования процессов разделения фаз теплоносителя в камерах реактора и критического истечения пароводяной смеси.

Основные уравнения математической модели для расчета параметров теплоносителя имеют вид:

$$f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0 \quad , \quad (1)$$

$$\frac{1}{f} \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{G^2}{\rho f^2} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} - \rho g \sin \beta - \frac{\left(\xi^{TP} + \sum_{i=1}^N (\xi_i \cdot \delta(z - z_0)) \right) \cdot G \cdot |G|}{2 \cdot \rho \cdot f^2} + \quad , \quad (2)$$

$$+ H_{нас} \delta(z - z_0)$$

$$f \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(u + \frac{1}{2} \left(\frac{G}{\rho f} \right)^2 \right) \rho \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[G \left(h + \frac{1}{2} \left(\frac{G}{\rho f} \right)^2 \right) \right] = \Pi q \quad , \quad (3)$$

где ρ - плотность теплоносителя, G - массовый расход, f - площадь проходного сечения, P - давление (абсолютное), ξ^{TP} коэффициент гидравлического сопротивления трения, отнесенный к единице длины, h - удельная энтальпия, u - удельная внутренняя энергия, $H_{нас}$ - напор насоса, g - ускорение свободного падения, Π - периметр, q - плотность теплового потока.

В зависимости от решаемой задачи система (1)-(3) может включать дополнительные уравнения и соотношения. Так в программе "ТЕСН-97" дополнительно используются уравнения для массы пара и борной кислоты, корреляции для проскальзывания и (или) всплытия пара и др.

При интегрировании уравнений для расчета параметров теплоносителя в первом и втором контурах установки может быть использован любой из следующих методов: специальный метод, основанный на использовании неявной схемы в сочетании с методом Ньютона, либо метод Эйлера-Коши второго порядка точности с автоматическим выбором шага интегрирования. Этот алгоритм работает достаточно надежно и эффективно при решении многих задач анализа безопасности ЯЭУ, однако при анализе ситуаций, характеризующихся резким нестационарным, нелинейным поведением начальных и граничных условий теряет запас устойчивости, становится менее эффективным.

Одним из реализованных способов усовершенствования алгоритма является введение установления на временном шаге. Разностные аналоги уравнений (1)-(2) после интегрирования по отрезку $[Z_i, Z_j]$ принимают следующий вид:

$$M_i^{n+1,m+1} \left(\frac{1}{\Delta t_{n+1}} + \frac{1}{\Delta \tau} \right) = \frac{M_i^n}{\Delta t_{n+1}} + \frac{M_i^{n+1,m}}{\Delta \tau} - \left(G_j^{n+1,m} - G_i^{n+1,m} \right) \quad (4)$$

для $G_j^{n+1,m} > 0$ и $G_i^{n+1,m} > 0$

$$G_j^{n+1,m+1} \left(\frac{1}{\Delta t_{n+1}} + \frac{1}{\Delta \tau} \right) = \frac{G_j^n}{\Delta t_{n+1}} + \frac{G_j^{n+1,m}}{\Delta \tau} + \frac{1}{A_{ij}} \cdot \left[\frac{\bar{G}_i^{n+1,m+1} \bar{G}_i^{n+1,m}}{\rho_i \cdot f_i^2} - \right.$$

$$\left. + \frac{\bar{G}_j^{n+1,m+1} \bar{G}_j^{n+1,m}}{\rho_j \cdot f_j^2} + \frac{G_j^{n+1,m+1} G_j^{n+1,m}}{2 \cdot \rho_i} \cdot \left(\frac{1}{f_j^2} - \frac{1}{f_i^2} \right) + (P_i - P_j) \right]$$

$$\begin{aligned}
& - \left(\frac{l_i \cdot \xi_i^{TP}}{4 \cdot \rho_i \cdot f_i^2} + \frac{\xi_{jj}^M}{2 \rho_j \min\{f_i^2, f_j^2\}} + \frac{l_j \cdot \xi_j^{TP}}{4 \cdot \rho_j \cdot f_j^2} \right) \cdot G_j^{n+1, m+1} \cdot |G_j^{n+1, m}| + \\
& + g \cdot \left(\frac{H_i}{2} \cdot \rho_i + \frac{H_j}{2} \cdot \rho_j \right) + H_{HAC} \Big]^n, \tag{5}
\end{aligned}$$

где $A_{ij} = \left(\frac{l_i}{2 \cdot f_i} + \frac{l_j}{2 \cdot f_j} \right)$.

В уравнение энергии так же можно ввести установление или оставить в прежнем виде:

$$\begin{aligned}
& \left(U + \frac{M}{2} \left(\frac{G}{f\rho} \right)^2 \right)_i^{n+1} = \left(U + \frac{M}{2} \left(\frac{G}{f\rho} \right)^2 \right)_i^n + \\
& \Delta t_{n+1} \left[G_i \left\{ h + \frac{1}{2} \left(\frac{G}{f\rho} \right)^2 \right\}_i - G_j \left\{ h + \frac{1}{2} \left(\frac{G}{f\rho} \right)^2 \right\}_j \right]^n + \Pi q_j^n \tag{6}
\end{aligned}$$

В уравнениях (4)-(5) $\Delta\tau$ - шаг установления, m – номер итерации. Дополнительным параметром, позволяющим регулировать устойчивость и эффективность счета, является шаг установления $\Delta\tau$; по мере стабилизации процесса можно увеличивать как временной шаг, так и шаг установления, что особенно важно для нестационарных режимов с выходом на длительный стабилизированный режим.

Другим направлением модернизации алгоритма является использование монотонных балансных нейтральных разностных схем, позволяющих сохранить важные интегральные свойства исходных дифференциальных уравнений, для уравнений количества движения и энергии; получение разностного уравнения для давления на основе разностного уравнения неразрывности и применение неявного метода установления для решения системы в целом (см. [2]). Рассмотрим уравнение неразрывности и переноса субстанции ϕ .

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{d\rho w}{dz} = 0, \tag{7}$$

$$\rho \frac{d\phi}{dt} + w \frac{d\phi}{dz} = \frac{d}{dz} \eta \frac{d\phi}{dz} + f, \tag{8}$$

где переменная ϕ может обозначать скорость потока, энтальпию или концентрацию, остальные обозначения общепринятые. Монотонная нейтральная балансная разностная схема имеет вид

$$\xi_i^{n+1} = \frac{\rho_i^{n+1} - \rho_i^n}{\Delta t} + \frac{(\rho w)_{i+1/2}^{n+1} - (\rho w)_{i+1/2}^n}{\Delta z_i} = 0, \tag{9}$$

$$\rho_i^n \frac{\phi_i^{n+1} - \phi_i^n}{\Delta t} - a_i \phi_{i-1}^{n+1} - b_i \phi_{i+1}^{n+1} + q_i \phi_i^{n+1} = f_i, \tag{10}$$

$$a_i = 0.5 w_{i-1/2} + \alpha_{i-1/2} \operatorname{cth} \alpha_{i-1/2} \eta_{i-1/2} / \Delta z_{i-1/2}, \tag{11}$$

$$b_i = -0.5 w_{i+1/2} + \alpha_{i+1/2} \operatorname{cth} \alpha_{i+1/2} \eta_{i+1/2} / \Delta z_{i+1/2}, \quad (12)$$

$$\alpha_{i+1/2} = \Delta Z_{i+1/2} u_{i+1/2} / 2 \eta_{i+1/2}, \quad (13)$$

$$q_i = a_i + b_i. \quad (14)$$

Для функции $\alpha \operatorname{cth} \alpha$ можно использовать простую аппроксимацию вида $\alpha \operatorname{cth} \alpha \approx |\alpha| + 1 / (1 + |\alpha| + |\alpha|^2)$. В предлагаемом усовершенствованном алгоритме уравнение (9) служит основой для построения трехточечного уравнения для давления. В таком итерационном процессе величина $\xi_i^{n+1} \neq 0$ и используется как критерий сходимости. Для совместного решения возникающих систем уравнений вводится неявный метод установления и, соответственно, линеаризация на шаге установления. Данный подход находится в стадии реализации.

На рис. 2-9 показаны результаты расчета аварии максимальной проектной аварии (с разрывом Ду-850 "холодной нитки" ГЦГ) как использованием стандартной, так и модернизированной методики. При выходе на относительно стабилизированный режим ($t > 150$ с) модифицированный подход позволяет увеличивать шаг 3-5 раз (рис. 2-3), даже при сохранении прежнего алгоритма выбора шага. Модернизация слабо влияет на вычисление таких характеристик как: масса теплоносителя в первом контуре, энтальпия на входе в активную зону, давление на входе в активную зону, выброс пара и воды из течи в ходе аварии и др. (рис. 4-7). Наиболее чувствительной расчетной величиной является перепад давления на активной зоне (рис. 8), и как следствие, температура оболочки твэла (рис. 9), что подтверждает необходимость модернизации алгоритма расчета давления.

Список литературы

1. Верификация комплекса программ теплогидравлических расчетов нестационарных режимов ЯЭУ с ВВЭР "ТРАП-97". Отчет ОКБ ГИДРОПРЕСС, ДЭ-108, Подольск, 1998.
2. Артемьев В.К. Развитие численных методов решения задач динамики вязкой жидкости. Дис. канд. физ.-мат. наук. ГНЦ РФ-ФЭИ. Обнинск, 1997.

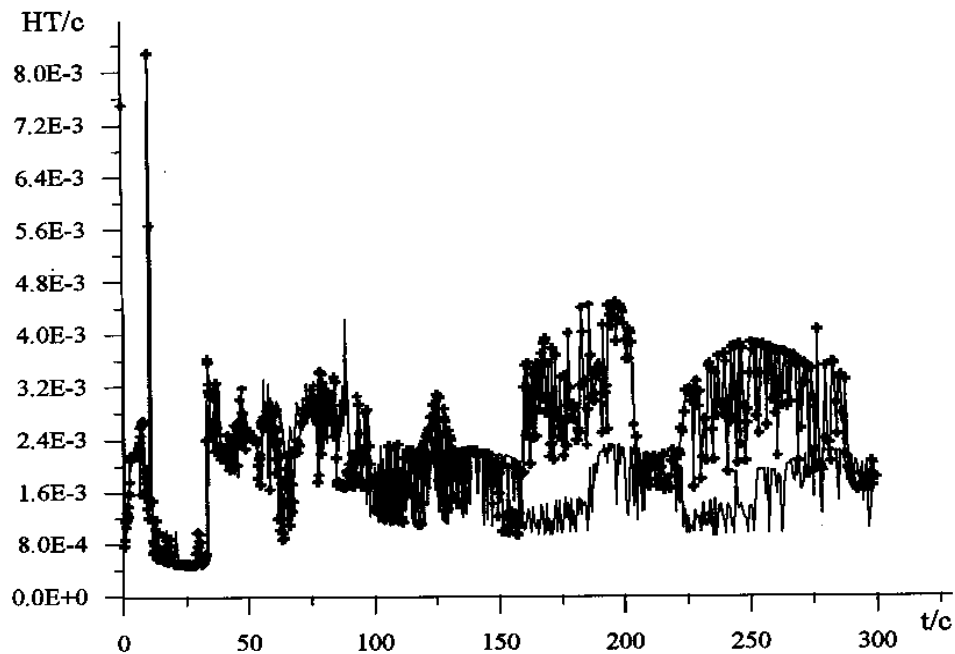


Рис. 2. Изменение шага по времени в процессе расчета аварии с разрывом Ду-850 "холодной нитки" ГЦТ;
 — - «замороженная» версия, + - метод стабилизации.

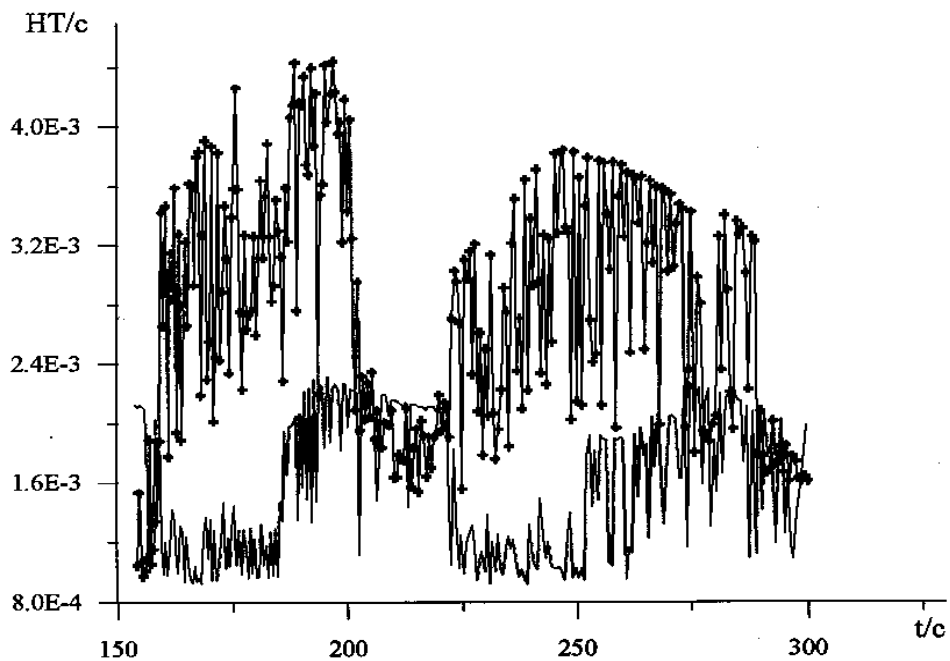


Рис. 3. Изменение шага по времени в процессе расчета аварии с разрывом Ду-850 "холодной нитки" ГЦТ на участке установления;
 — - «замороженная» версия, + - метод стабилизации.

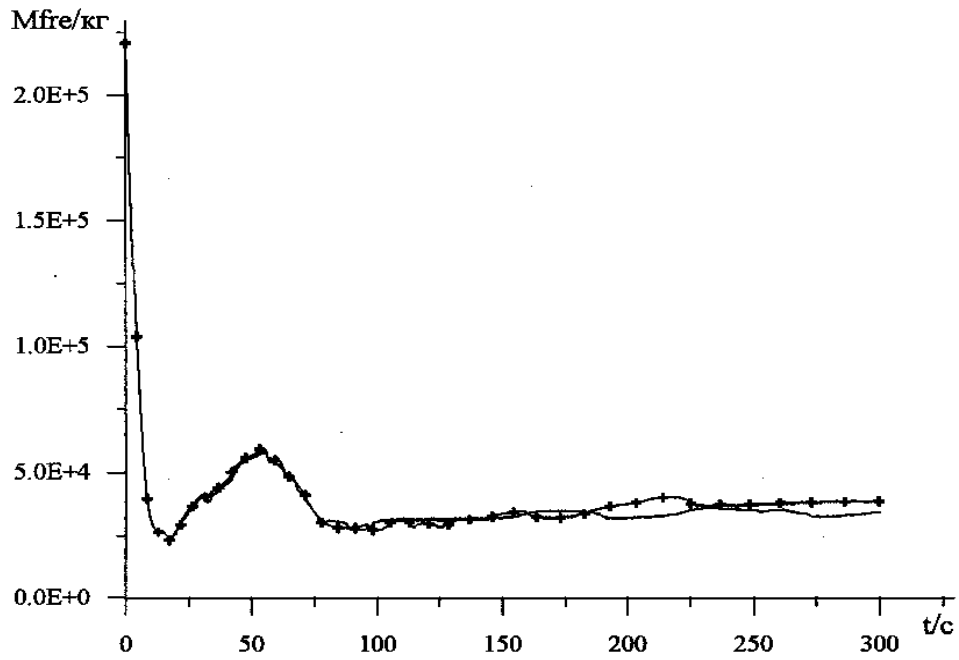


Рис. 4. Масса теплоносителя в первом контуре в ходе аварии с разрывом Ду-850 "холодной нитки" ГЦТ;
 — - «замороженная» версия, + - метод стабилизации.

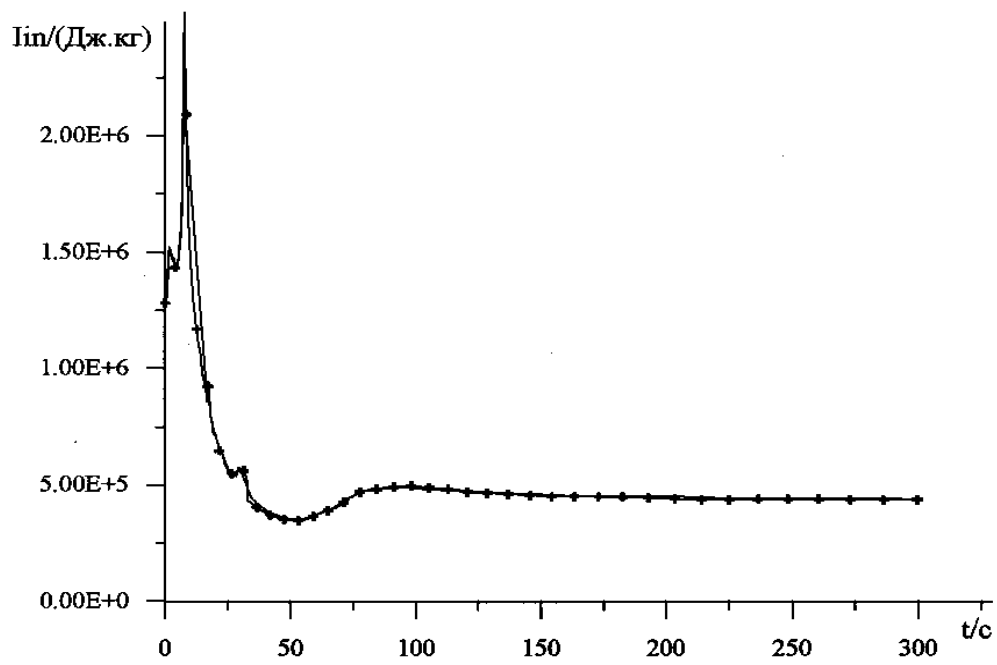


Рис. 5. Изменение энтальпии на входе в активную зону при аварии с разрывом Ду-850 "холодной нитки" ГЦТ;
 — - «замороженная» версия, + - метод стабилизации.

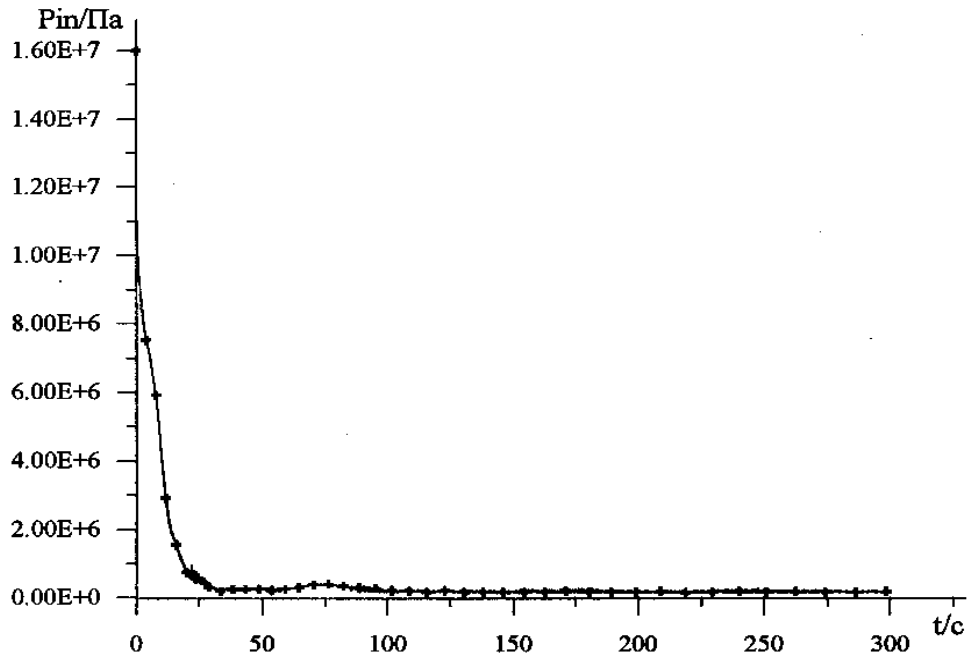


Рис. 6. Изменение давления на входе в активную зону при аварии с разрывом Ду-850 "холодной нитки" ГЦТ;
 — - «замороженная» версия, + - метод стабилизации.

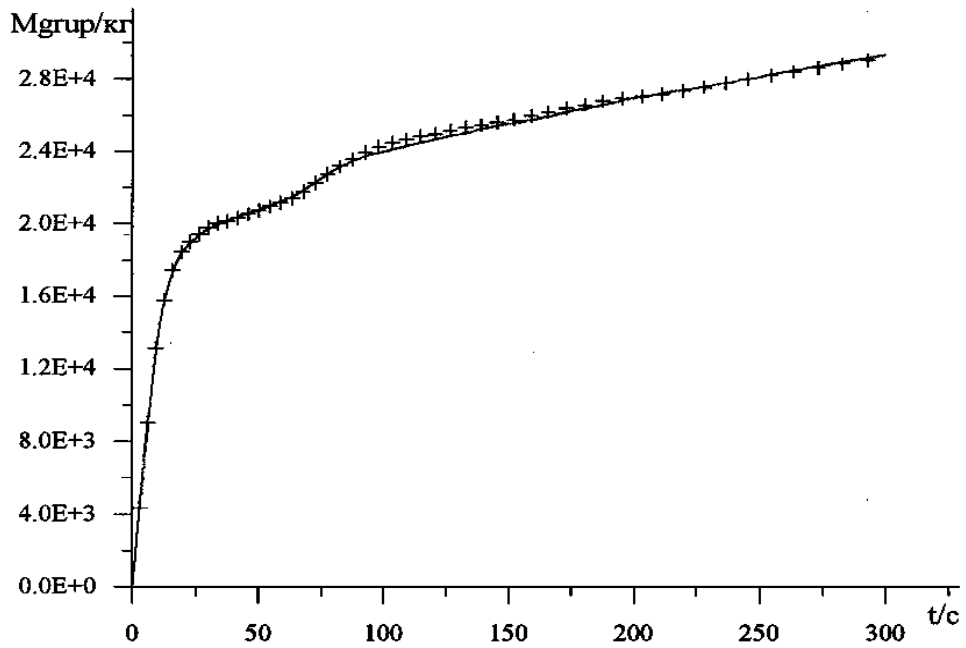


Рис. 7. Выброс пара из течи в ходе аварии с разрывом Ду-850 "холодной нитки" ГЦТ. — - «замороженная» версия,
 + - метод стабилизации.

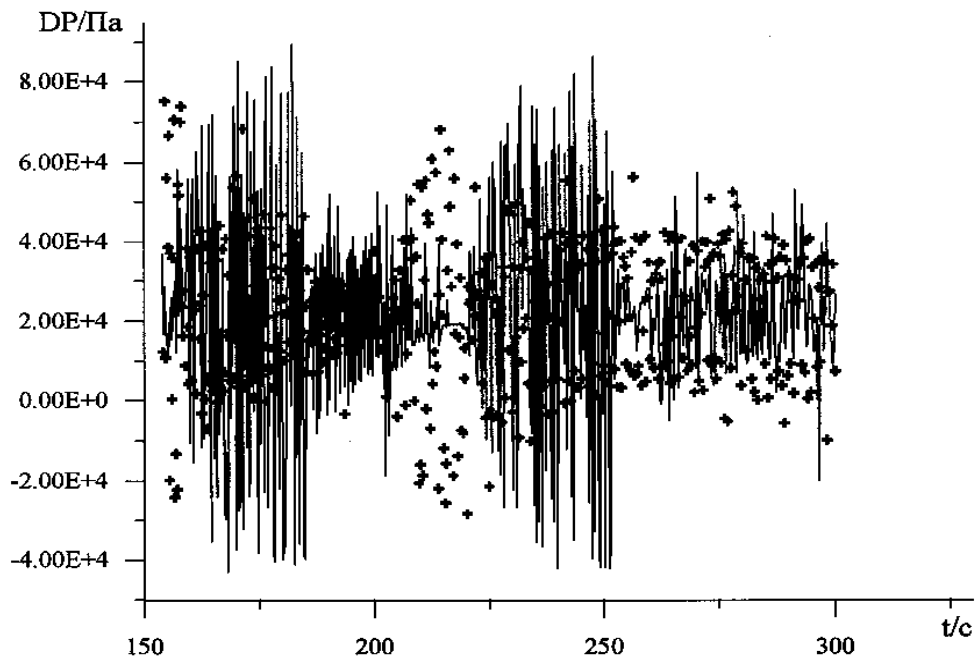


Рис. 8. Поведение перепада давления на активной зоне в ходе аварии с разрывом Ду850 "холодной нитки" ГЦТ;
 — - «замороженная» версия, + - метод стабилизации.

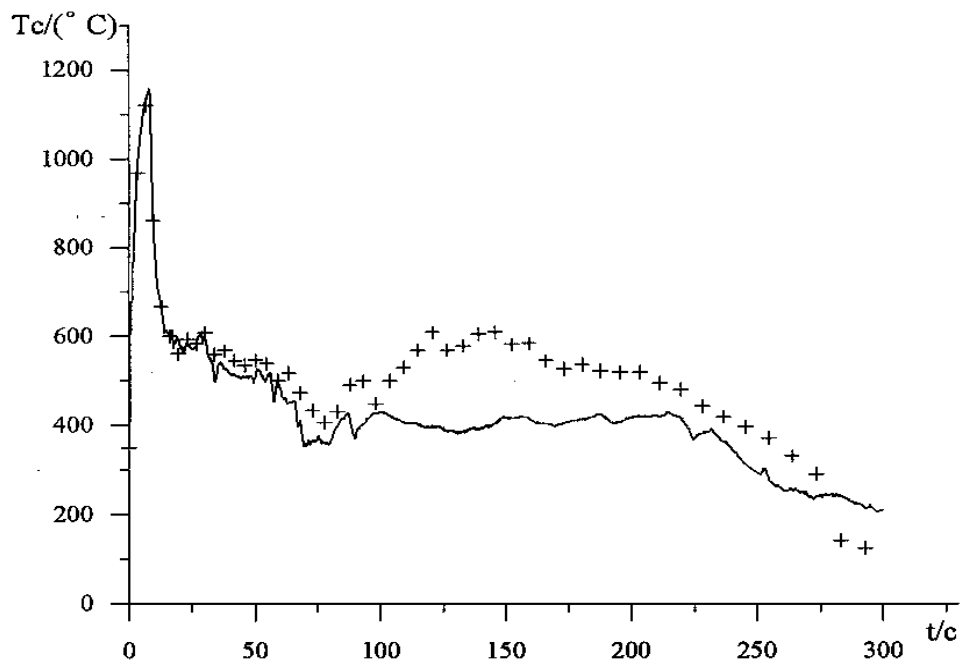


Рис. 9. Температура оболочки твэла в ходе аварии с разрывом Ду-850 "холодной нитки" ГЦТ;
 — - «замороженная» версия, + - метод стабилизации.