

в предположении $\xi\sigma_s = \text{const}$ и $\gamma = 1$, сравнительно хорошо согласуются с экспериментальными. Они гораздо ближе к экспериментальным, чем спектры, полученные с моделью газа с $m = 1$, и незначительно отличаются от спектров, рассчитанных с использованием ядра Недкина. Следует еще отметить, что спектры в приближении тяжелого газа ($\xi\sigma_s = \text{const}$ и $\gamma = 0$) для поглотителя с сечением $1/v$ мало отличаются от спектров с $\xi\sigma_s = \text{const}$ и $\gamma = 1$. Однако при другом законе поглощения величина γ может оказаться существенной, что видно, например, из рис. 4 (поглотитель кадмий).

В заключение выражаю благодарность В. И. Мостовому, В. С. Дикареву и Ю. С. Салтыкову за предоставленную возможность ознакомиться с результатами выполненных ими измерений.

Поступила в Редакцию 5/VIII 1963 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. И. Дроздов и др. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии». Докл. советских ученых. Т. 1. М., Атомиздат, 1959, стр. 486.
2. J. Beyster. Nucl. Sci. and Engng, 9, No. 2 (1961).
3. Н. И. Лалетин. «Атомная энергия», 14, 458 (1963).



УДК 621.039.514. 4

Исследование нестационарных режимов естественной циркуляции в многоконтурных схемах ядерных реакторов

Ю. Е. Багдасаров, О. Д. Казачковский, М. С. Пинхасик, В. К. Пышин

Илагаются результаты исследований нестационарных режимов естественной циркуляции жидкометаллического теплоносителя в трехконтурных схемах реакторов. Приведены основные положения расчета по разработанной авторами методике и результаты экспериментального изучения переходных режимов естественной циркуляции теплоносителя в реакторе БР-5.

Особенность ядерных реакторов — наличие большого остаточного тепловыделения в активной зоне после полного прекращения цепной реакции. Для предотвращения опасного роста температуры горючего при любых аварийных ситуациях необходимо осуществлять непрерывный отвод тепла. Особенно важно выполнение этого требования для быстрых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем, которые являются весьма энергонапряженными [1]. Наиболее надежный, автоматически действующий и экономичный способ аварийного расхолаживания ядерных реакторов — отвод тепла с помощью естественной циркуляции теплоносителей по контурам установки. Этот способ широко применяется в реакторах БР-2, БР-5, ЕВР-II, «Энрико Ферми» и др.

Расчет стационарных режимов естественной циркуляции нетруден и позволяет легко найти распределение температур и расходов теплоносителя по контурам установки через большой промежуток времени после прекра-

щения цепной реакции и остановки циркуляционных насосов. Основные затруднения возникают при попытках найти нестационарные значения этих параметров в течение первых 10—20 мин после аварийной остановки реактора. В то же время именно этот период является наиболее важным, поскольку здесь имеет место резкий спад тепловыделения и может наблюдаться максимальное влияние компоновки трубопроводов и начальных условий (начального распределения температур, начальной кинетической энергии потока теплоносителя, начальной кинетической энергии маховых масс и т. д.) на развитие процесса. В настоящей работе приведены основные положения разработанной авторами методики расчета нестационарных режимов естественной циркуляции в многоконтурных схемах ядерных реакторов. Для проверки правильности важнейших предпосылок теории были проведены соответствующие экспериментальные работы на реакторе БР-5.

Основные положения методики расчета

Физическая трактовка задачи приводит к необходимости учета ряда специфических факторов, присущих нестационарным режимам. К таким факторам относится прежде всего фактор запаздывания: в нестационарных процессах

температура теплоносителя в рассматриваемой точке тракта в текущий момент определяется температурой теплоносителя на выходе из реактора (или теплообменника) в какой-то предыдущий момент. При использовании теплоносителей, характеризующихся высокими значениями коэффициентов теплопроводности и теплоотдачи, первостепенное значение приобретает теплообмен между теплоносителем и конструктивными элементами контуров, поскольку в полупромышленных и промышленных установках теплоемкость стальных конструкций того же порядка, что и теплоемкость всей массы теплоносителя. Очевидно, что точность определения распределения температур и расходов теплоносителя по контурам при нестационарных режимах естественной циркуляции сильно зависит от правильности учета указанного теплообмена.

При исследовании переходных процессов отвода тепла с помощью естественной циркуляции большое значение приобретают геометрические факторы, а именно: взаимное расположение по высоте теплоподводящих и теплоотводящих устройств, их ориентация в пространстве и протяженность, компоновка трубопроводов. Например, U-образные компенсационные участки, расположенные в вертикальных плоскостях, могут сильно влиять на изменение расхода теплоносителя во времени в связи с последовательным перемещением нагретых до различных температур слоев теплоносителя через подъемные и опускные участки контура.

Так как влияние перечисленных и ряда других, менее значительных факторов (тепловых потерь через изоляцию, инерционности потока теплоносителя и др.) чрезвычайно сложно, то аналитически решить задачу или точно математически описать ее для численного решения на быстродействующих вычислительных машинах не представляется возможным. Поэтому авторами разработана методика приближенного расчета нестационарных режимов естественной циркуляции в многоконтурных схемах реакторов. Полученная система уравнений запрограммирована на электронную машину. Ниже приведены наиболее существенные положения разработанной методики.

Для расчета движущего напора и расхода теплоносителя при естественной циркуляции в текущий момент времени необходимо знать температуры во всех подъемных и опускных участках контура. Наиболее простой метод решения — разбиение всего контура на элемен-

тарные участки, составление соответствующих уравнений теплообмена и определение температуры теплоносителя в интересующем участке после последовательного определения температур по всем предыдущим участкам. Очевидно, что такой путь не является оптимальным, поскольку для вычисления температуры теплоносителя в двух-трех вертикальных участках или на входе в теплообменник требуется провести вычисления по 20—30 элементарным участкам. При отсутствии вертикальных участков (например, между реактором и теплообменником) вся громоздкая работа потребуется для вычисления одной лишь температуры на входе в теплообменник. Это явно неоправданное усложнение. По этой причине было введено запаздывание, позволяющее ограничиться вычислениями только в тех точках и участках контура, которые необходимы для определения движущего напора и расхода теплоносителя при естественной циркуляции в текущий момент времени. Одновременно существенно упрощены и уравнения, учитывающие теплообмен между теплоносителем и конструктивными элементами.

Запаздывание. Если пренебречь тепловыми потерями в окружающую среду и теплообменом с конструктивными элементами, омываемыми теплоносителем, то температура последнего в произвольной точке контура x (рис. 1) в текущий момент времени τ может быть выражена через температуру теплоносителя на выходе из реактора T_a (в точке a):

$$t_x(\tau) = T_a(\tau - \tau_x), \quad (1)$$

где τ_x — время, необходимое для того, чтобы элементарный объем теплоносителя прошел расстояние $a - x$. Это время в свою очередь связано с законом изменения расхода соотношением

$$\int_{\tau - \tau_x(\tau)}^{\tau} G(\tau') d\tau' = Q_x, \quad (2)$$

где $G(\tau)$ — объемный расход теплоносителя в текущий момент времени; Q_x — объем теплоносителя на участке контура между точками a и x .

Очевидно, что интегральное определение переменного запаздывания при помощи соотношения (2) не позволяет практически использовать соотношение (1).

Проведем замену переменных

$$\varphi = \int_0^{\tau} G(\tau') d\tau'. \quad (3)$$

Таким образом, переменное время τ заменено на переменную φ , обозначающую полное количество теплоносителя, прошедшего через произвольное сечение контура к данному моменту времени. Соотношение (2) можно переписать так:

$$Q_x = \varphi(\tau) - \varphi(\tau - \tau_x). \quad (4)$$

Тогда

$$t_x[\varphi(\tau)] = T_a[\varphi(\tau - \tau_x)]. \quad (5)$$

Но поскольку

$$\varphi(\tau - \tau_x) = \varphi(\tau) - Q_x, \quad (6)$$

окончательно имеем

$$t_x(\varphi) = T_a(\varphi - Q_x). \quad (7)$$

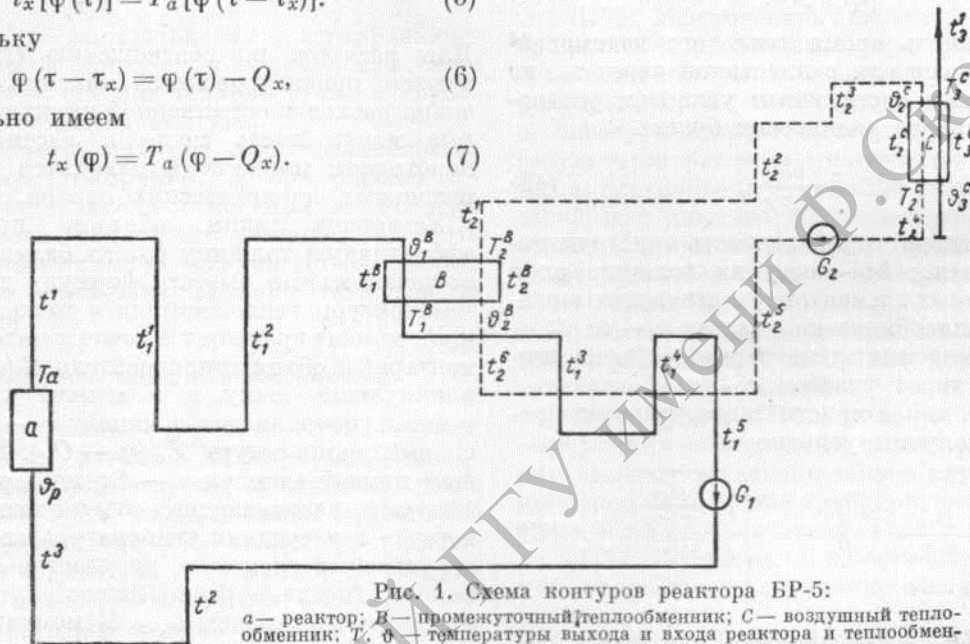


Рис. 1. Схема контуров реактора БР-5:
 а — реактор; б — промежуточный теплообменник; с — воздушный теплообменник; T_a, φ — температуры выхода и входа реактора и теплообменника; G_1, G_2 — расходы теплоносителя по контурам.

Это и есть соотношение, связывающее все температуры по контуру t_x с определяющей температурой T_a через постоянное запаздывание Q_x . Так как расход теплоносителя — величина переменная, связь между φ и τ нелинейная. Выбранный интервал времени для численного расчета $\Delta\tau = \text{const}$; интервал по переменной φ непостоянен и вычисляется на каждой ступени счета:

$$\Delta\varphi = G(\tau) \Delta\tau. \quad (8)$$

При этом интервал времени расчета $\Delta\tau$ должен быть выбран так, чтобы он был значительно меньше времени прохождения теплоносителя в режиме естественной циркуляции через любое теплообменное устройство.

Теплообмен между теплоносителем и конструктивными элементами контуров. Для приближенного описания процесса теплообмена между теплоносителем и конструктивными эле-

ментами вся масса последних на рассматриваемом участке $a - x$ делится на две группы. В первую группу входят конструктивные элементы или их слои, которые участвуют в равновесном теплообмене с элементарным объемом теплоносителя $G\Delta\tau$. Это означает, что средняя температура слоев или конструкций первой группы на участке $a - x$ и температура эле-

ментарного объема теплоносителя $G(\varphi - Q_x)\Delta\tau$ оказываются выравненными за время прохождения последним расстояния от a до x . Во вторую группу входят все остальные конструкции, которые полностью исключаются из рассмотрения и из теплообмена, т. е. их теплоемкость приравнивается нулю. Таким образом, вопрос о приближенном учете теплообмена сводится к вопросу об определении принадлежности той или иной конструкции, того или иного слоя элемента конструкции к первой группе. Для этого воспользуемся решением задачи, приведенной в работе [2]. Обозначим

$$\psi = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \frac{\sin \mu_n}{\mu_n} \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo)^*. \quad (9)$$

* Обозначения и терминология приняты те же, что и в работе [2].

Тогда изменение во времени отношения средних температур пластины и теплоносителя будет описываться функцией $K(Fo)$:

$$K(Fo) = \frac{\bar{t}(Fo)}{\theta(Fo)} = \frac{1 + (F+1)\psi(Fo, Bi, F)}{1 - F(F+1)\psi(Fo, Bi, F)} \quad (10)$$

Нетрудно показать, что при любых значениях параметра F величина K окажется достаточно близкой к единице при условии

$$\mu_1^2 Fo \geq 5. \quad (11)$$

Если обозначить время теплового взаимодействия теплоносителя с пластиной через τ_T , то необходимым и достаточным условием установления теплового равновесия будет

$$\mu_1^2 \geq 5 \frac{\delta_k^2}{a_k \tau_T}, \quad (12)$$

где a_k — температуропроводность конструктивного материала; δ_k — средняя толщина слоя конструктивных элементов, участвующих в равновесном теплообмене на участке $a - x$; τ_T — время прохождения элементарного объема теплоносителя через участок $a - x$.

Используя характеристическое уравнение работы [2], получим условие

$$F \geq \frac{5\delta_k^2}{a_k \tau_T} \cdot \left(\frac{1}{Bi} - \frac{\operatorname{ctg} \sqrt{\frac{5\delta_k^2}{a_k \tau_T}}}{\sqrt{\frac{5\delta_k^2}{a_k \tau_T}}} \right) \quad (13)$$

Физический смысл параметра F — отношение теплоемкости всего материала стенки к теплоемкости всего теплоносителя, соприкасающегося с материалом.

Вернемся теперь к задаче о теплообмене при нестационарных режимах естественной циркуляции. Рассмотрим замкнутую систему двух тел, состоящую из элементарного объема теплоносителя $G(\varphi - Q_x)\Delta\tau$ и конструктивных элементов на участке $a - x$, способных полностью обменяться теплом с объемом теплоносителя за время его прохождения τ_T от точки a до точки x . Для этой системы тел

$$F = \frac{f_k \delta_k \gamma_k c_{pR}}{G \gamma c_p \Delta\tau}, \quad (14)$$

где f_k — поверхность соприкосновения конструктивных элементов с теплоносителем на участке $a - x$; γ_k, c_{pR} — удельный вес и теплоемкость конструктивного материала соответственно; γ, c_p — удельный вес и теплоемкость теплоносителя соответственно. Подставив (14) в (13), получим условие для определения при-

веденной толщины δ_k участвующих в равновесном теплообмене слоев конструктивных элементов на участке $a - x$:

$$\frac{f_k \gamma_k c_{pR}}{G \gamma c_p \Delta\tau} \geq \frac{5\delta_k}{a_k \tau_T} \times \left(\frac{1}{Bi} - \frac{\operatorname{ctg} \sqrt{\frac{5\delta_k^2}{a_k \tau_T}}}{\sqrt{\frac{5\delta_k^2}{a_k \tau_T}}} \right) \quad (15)$$

Для расчетов по соотношению (15) используются ориентировочные максимальные значения расходов естественной циркуляции, которые могут иметь место в рассматриваемом переходном процессе и находятся из предварительных аналитических оценок.

Установив таким образом приведенную эффективную толщину δ_k , из балансных соотношений можно вывести формулу для расчета температуры теплоносителя в точке x . В текущий момент времени τ в точке x находится элементарный объем теплоносителя $G(\varphi - Q_x)\Delta\tau$, покинувший точку a в момент $\tau - \tau_x$ (или в новых координатах в момент $\varphi - Q_x$), когда он имел температуру $T_a(\varphi - Q_x)$. В предыдущий момент времени $\tau - \Delta\tau$ температура предыдущего элементарного объема теплоносителя в точке x и средняя температура слоя δ_k конструктивных элементов на участке $a - x$ одинаковы (после равновесного теплообмена между ними) и равны $t_{0,x}$. К моменту τ , когда рассматриваемый элементарный объем окажется в точке x , температура этого объема и средняя температура слоя δ_k конструктивных элементов на участке $a - x$ будут равны t_x . Из этих соображений получено уравнение баланса

$$f_k \delta_k \gamma_k c_{pR} t_{0,x} + G(\varphi - Q_x) \Delta\tau \gamma c_p T_a(\varphi - Q_x) = [f_k \gamma_k \delta_k c_{pR} + G(\varphi - Q_x) \Delta\tau \gamma c_p] t_x \quad (16)$$

После простейших преобразований найдем

$$t_x = T_a(\varphi - Q_x) - C \frac{T_a(\varphi - Q_x) - t_{0,x}}{1 + A_x G(\varphi - Q_x) \Delta\tau}, \quad (17)$$

где

$$A_x = \frac{\gamma c_p}{f_k \delta_k \gamma_k c_{pR}}; \quad C \equiv 1.$$

Форма записи выражения (17) удобна тем, что простым приравнованием $C = 0$ можно при необходимости исключить из рассмотрения теплообмен с конструкциями.

Учет остальных факторов нестационарности не представляет сложности и не требует подробных пояснений. Так, тепловые потери через изоляцию трубопроводов учитываются введением дополнительного члена в уравнение (17). Инерционность потока теплоносителя вводится в математическое описание задачи с помощью известного уравнения работы [3]:

$$P^н - P^п = \frac{L}{gF_1} \cdot \frac{dG}{dt}, \quad (18)$$

где $P^н$ и $P^п$ — движущий напор и гидравлические потери в контуре; g — ускорение силы тяжести; F_1 — сечение теплоносителя в трубопроводе; L — длина контура.

Инерционность маховых масс вращающихся узлов машин (например, ротора насоса) задается в виде закона изменения во времени вынужденного движущего напора, который приплюсовывается к вычисляемому на каждом шагу счета движущему напору естественной циркуляции.

Экспериментальное исследование

Экспериментальное изучение стационарных и переходных режимов естественной циркуляции осуществлялось на воздушной петле аппарата БР-5 [1], схематическая компоновка которой показана на рис. 1. Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. При полностью открытых вентилях первого и второго жидкометаллических контуров, частично открытых шиберов третьего воздушного контура и отключенных источниках вынужденного движения теплоносителей начинался медленный подъем мощности реактора. Постепенно возникала и интенсифицировалась естественная циркуляция по всем контурам. На заранее выбранном уровне мощности устанавливался стационарный режим. После этого без изменения гидравлических характеристик контуров по определенной программе изменялась мощность реактора и записывалось изменение технологических параметров во времени. Всего было проведено пять экспериментов по исследованию стационарных режимов и пять по исследованию переходных режимов естественной циркуляции на различных мощностях в пределах 0—300 *квт*.

Результаты исследования

Результаты расчетного и экспериментального исследования различных нестационарных режимов естественной циркуляции приведены на

рис. 2, *а, б, в*. Расчетные кривые получены с учетом всех факторов нестационарности: запаздывания, инерционности потока теплоносителя, тепловых потерь через изоляцию, теплообмена со стальными конструкциями, омываемыми натрием. При этом действительная компоновка трубопроводов и оборудования заменялась схематической компоновкой, показанной на рис. 1, которая отражает наиболее важные геометрические данные контуров установки БР-5. Исключением является пунктирная кривая рис. 2, показывающая результат расчета соответствующего режима с учетом всех факторов, кроме теплообмена между натрием и конструктивными материалами. Сравнение результатов расчетов многочисленных вариантов с различными исходными данными между собой и с данными экспериментов позволили выявить влияние указанных факторов на развитие процесса, а также определить необходимую степень их учета.

Не останавливаясь на анализе всех вариантов, ограничимся изложением полученных результатов исследования:

1. Эксперименты показали, что естественная циркуляция — надежный способ расхолаживания ядерных установок даже в случае неблагоприятной компоновки трубопроводов. При подогреве натрия в активной зоне реактора БР-5 до $\sim 200^\circ \text{C}$ с помощью естественной циркуляции от реактора отводится мощность до 6% от номинальной.

2. Фактором, который решающим образом влияет на изменение расходов и температур при нестационарных режимах естественной циркуляции, является теплообмен натрия с конструктивными элементами. Именно благодаря интенсивному теплообмену резко уменьшается влияние U-образных участков трубопроводов, расположенных в вертикальных плоскостях. Это отчетливо видно при сравнении сплошных и пунктирных кривых рис. 2. Интенсивный теплообмен приводит к тому, что даже в случае самых неблагоприятных условий (при резких изменениях мощности, наличии длинных опускных участков) происходит плавное изменение температур и расходов и практически отсутствует опасность полной остановки или «прокидывания» циркуляции.

3. Влияние инерционности потока теплоносителя и потерь тепла через изоляцию весьма незначительно. При расчете расхолаживания энергетических реакторов с помощью естественной циркуляции этими факторами можно пренебречь, что значительно упрощает и сокра-

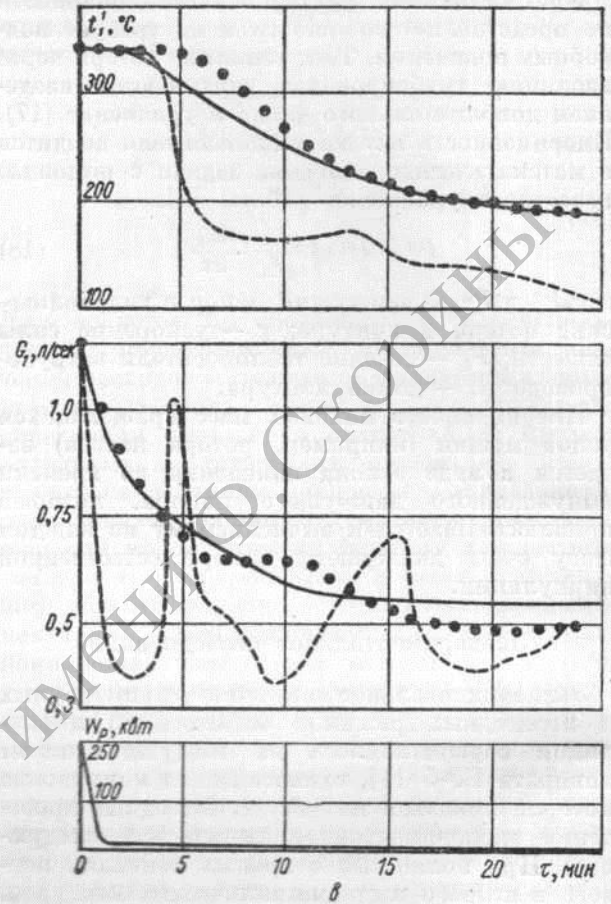
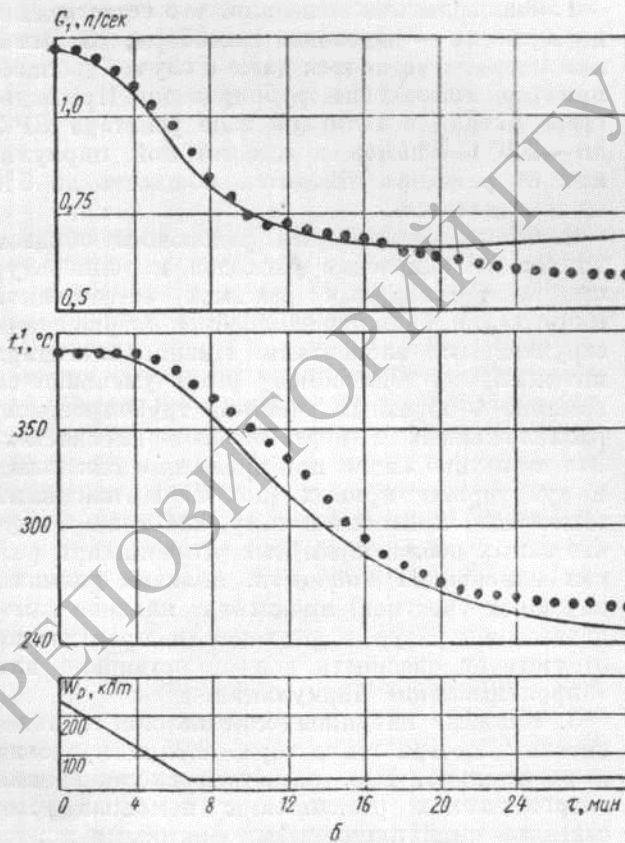
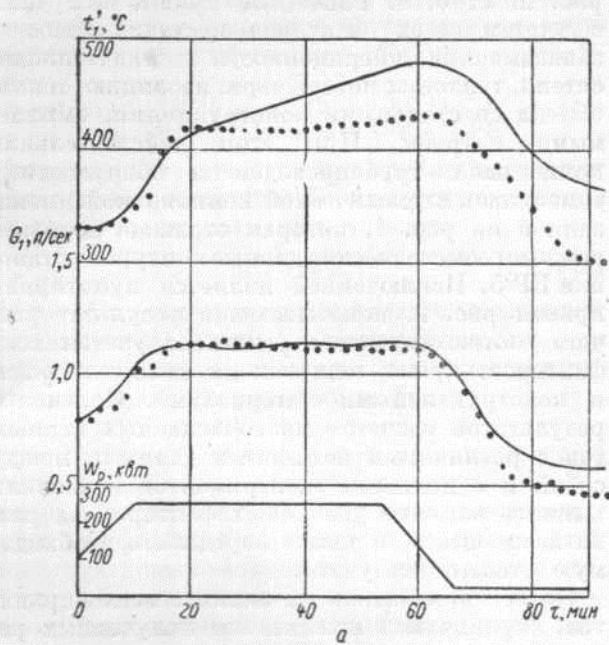


Рис. 2. Изменение во времени тепловыделения в реакторе, расхода натрия в первом контуре и температуры натрия на выходе из реактора:
 ● — экспериментальные результаты; — — — расчетные данные с учетом всех факторов нестационарности процесса; — — — расчетные данные без учета теплообмена с конструктивными элементами.

щает вычисления. Инерционность потока теплоносителя целесообразно учитывать только в случае резких изменений расходов при переходах от вынужденной циркуляции к естественной.

4. Теоретическое и экспериментальное исследование показали, что для реакторов с жидкометаллическими теплоносителями описанный приближенный способ учета теплообмена при переходных режимах естественной циркуляции оказывается удовлетворительным и может быть рекомендован для практического использования при проектировании установок такого типа.

Поступила в Редакцию 3/Х 1963 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Лейпунский, О. Д. Казачков-ский, М. С. Пинхасик. «Атомная энергия», 11, 370 (1961).

2. Ю. Е. Багдасаров. «Ниж.-физ. ж.», № 9, 67 (1963).

3. И. И. Агроскин. Гидравлика. М., Госэнергоиздат, 1954.

УДК 621.039.514.4

К расчету реакторов на тепловых нейтронах с возвращением плутония

И. Венцель

(VEB Atomkraftwerk, Betriebsteil Berlin, Берлин—Панков, ГДР)

Рассматривается стационарный режим работы реактора на природном или обедненном уране с частичным возвращением образующегося плутония в топливный цикл. Определяются также оптимальные значения вероятности избежать резонансного поглощения в U^{238} , отношение объема замедлителя к объему горячего и доля плутония, возвращаемого в топливный цикл. Исследуется зависимость коэффициента размножения нейтронов от этих параметров, и указывается существование максимума величины k (коэффициента размножения). На основании проведенных исследований показана возможность эксплуатации водо-водяных или кипящих реакторов на природном уране с частичным использованием образующегося плутония.

лагается, что в системе непрерывно (или квазинепрерывно) осуществляется загрузка небольшого количества свежего топлива и выгрузка такого же количества отработавшего горячего. Из отработавшего горячего выделяется плутоний и часть его вместе с природным (или обедненным) ураном возвращается в реактор

761941

Известно, что на природном уране могут работать немногие типы реакторов. При использовании слегка обогащенного урана возможности в выборе замедлителя, теплоносителя и конструкционных материалов, а также физико-технических характеристик активной зоны несколько больше. Плохие делящиеся свойства природного урана можно улучшить добавлением плутония, образующегося в отработавшем ядерном горячем. При этом можно значительно улучшить использование не делящегося под действием тепловых нейтронов U^{238} . Пока не устранены трудности в строительстве реакторов на быстрых нейтронах, наиболее эффективно использовать природный уран позволяют реакторы на тепловых нейтронах с возвращением плутония в топливный цикл.

В настоящей работе для решения вопроса о том, может ли определенный тип реактора на тепловых нейтронах работать на природном уране и образующемся плутонии и какие при этом возможны выгорания и оптимальные физико-технические характеристики, в первом приближении рассматривается стационарное состояние уран-плутониевой системы. Предпо-

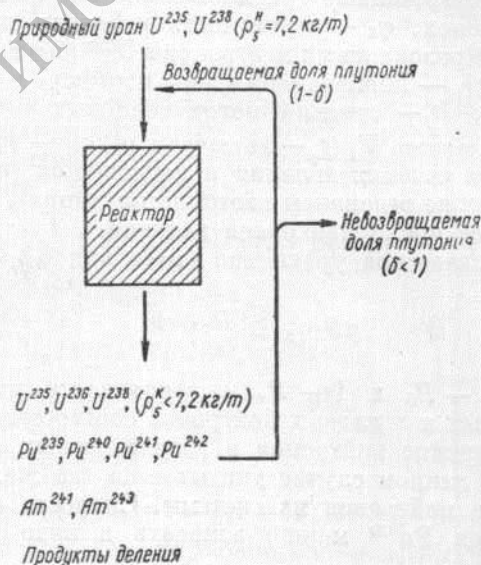


Схема топливного цикла.

(см. рисунок). Кроме того, предполагается, что горячее в активной зоне перемешивается гомогенно (или квазигомогенно). В данном случае подразумевается, что оно перемешивается гомогенно только в нейтронно-физическом смысле и что, например, топливо с разным выгоранием распределено отдельно. При эксплуатации реактора устанавливаются равновесные концентрации образующихся при выгорании изотопов.