

АЭС атомными котельными, определяется из уравнений (1)–(4):

$$\Delta W = W_I - W_{II} = 0,86 \cdot 10^{-3} \Delta N_{\text{АЭС}} \tau_{\text{АЭС}} \times \left(\frac{\eta_{\text{АСТ}}}{\eta_{\text{кот}} \eta_{\text{АЭС}}} - \frac{1}{\eta_{\text{КЭС}}} \right) \text{ Гкал/год}; \quad (5)$$

$$\Delta G = 0,123 \cdot 10^{-3} \Delta N_{\text{АЭС}} \tau_{\text{АЭС}} \left(\frac{\eta_{\text{АСТ}}}{\eta_{\text{кот}} \eta_{\text{АЭС}}} - \frac{1}{\eta_{\text{КЭС}}} \right) = G_{\text{АСТ}} \left(\frac{\eta_{\text{АСТ}}}{\eta_{\text{кот}}} - \frac{\eta_{\text{АЭС}}}{\eta_{\text{КЭС}}} \right) \text{ т усл. т./год}, \quad (6)$$

где $\Delta N_{\text{АЭС}}$ — электрическая мощность АЭС, заменяемых АСТ, *квт*; $G_{\text{АСТ}}$ — расход условного топлива, эквивалентный количеству ядерного горючего, потребляемого на АСТ, *т усл. т./год*.

Экономия условного топлива в год при $\eta_{\text{АСТ}} = 0,97$; $\eta_{\text{АЭС}} = 0,32$; $\eta_{\text{кот}} = 0,9$; $\eta_{\text{КЭС}} = 0,41$; $\tau_{\text{АЭС}} = 7000$ *ч/год* выразится: $\Delta G = 0,8 \Delta N_{\text{АЭС}} = 0,3 G_{\text{АСТ}}$ *т усл. т./год*.

Например, если $\Delta N_{\text{АЭС}} = 30$ *млн. квт*, годовая экономия органического топлива при замене АЭС на тепловых нейтронах атомными станциями теплоснабжения составит 24 *млн. т усл. т.* Дополнительная мощность КЭС, которая может быть введена на экономном топливе, определяется уравнением

$$\Delta N = \frac{\Delta W \eta_{\text{КЭС}}}{\tau_{\text{КЭС}}} = \Delta N_{\text{АЭС}} \frac{\tau_{\text{АЭС}}}{\tau_{\text{КЭС}}} \left(\frac{\eta_{\text{КЭС}} \eta_{\text{АСТ}}}{\eta_{\text{АЭС}} \eta_{\text{кот}}} - 1 \right). \quad (7)$$

О допустимости кипения в опускных участках циркуляционного контура охлаждения реактора

БОНДАРЕНКО А. В., МИНАШИН М. Е.

УДК 621.039.53

В кипящих реакторах канального типа (Белооярская АЭС, Вилибинская АТЭЦ) в кипящих корпусных реакторах при нормальных эксплуатационных режимах в подводящих трактах течет некипящий однофазный теплоноситель. Однако при некоторых пусковых и аварийных режимах трудно гарантировать отсутствие хотя бы кратковременного кипения воды в опускных трактах циркуляционного контура, тем более, если учесть, что на части опускных трактов имеется теплоподвод. Следует решить вопрос, допустимо ли такое кипение вообще и, если допустимо, при каких условиях. Требование недопустимости кипения в опускных трактах при всех режимах может значительно усложнить схемное решение станции. Ответ на поставленный вопрос наиболее важен для реакторов, охлаждаемых естественной циркуляцией теплоносителя и имеющих на опускных трактах П-образные участки, которые при неблагоприятных условиях могут способствовать накоплению пара на подводящих трактах и прекращению циркуляции.

Оценки возможности закипания на опускных участках в результате падения давления сделаны в работе [1], где определены условия закипания в таких режимах и указано на недопустимость закипания на опускном участке, если скорость теплоносителя на нем сравнима со скоростью подъема пара. Однако не учитывались

При $\tau_{\text{АЭС}} = \tau_{\text{КЭС}}$ и вышеприведенных значениях к. п. д. $\Delta N = 0,38 \Delta N_{\text{АЭС}} = 11,4$ *млн. квт*. Интересно отметить (см. рисунок), что при таком перераспределении использования ядерного горючего особенно важно повышение к. п. д. КЭС (например, за счет МГДГ). Следовательно, некоторая перестройка атомной энергетики может привести к существенной экономии органического топлива, намного большей, чем этого можно достичь улучшением термодинамического к. п. д. АЭС. Отметим также, что благодаря пониженным параметрам ($p < 60$ *кг/см²*; $t < 200^\circ \text{C}$) и сравнительно небольшой единичной мощности реактора АСТ могут иметь весьма высокую надежность и соответствовать условиям размещения их в городах.

Широкое внедрение типовых и стандартных АСТ, полностью автоматизированных и имеющих умеренные капиталовложения на единицу тепловой мощности реактора, позволит улучшить состояние воздушного бассейна городов. Вопрос о развитии атомной энергетики может решаться только на основе технико-экономического анализа возможных вариантов удовлетворения потребностей в электроэнергии и тепле с учетом структуры присоединенных электрических и тепловых нагрузок, резервирования мощностей и режима работы энергогенерирующих установок. Предварительный анализ перспективного топливно-энергетического баланса г. Москвы показал, что даже замена всех ТЭЦ на КЭС, удаленные от города, и АСТ при сохранении равной выработки электрической и тепловой энергии не приводит к перерасходу органического топлива.

Поступило в Редакцию 27/XI 1972 г.
В окончательной редакции 12/II 1973 г.

особенности, обусловленные наличием обогреваемых участков на опускных трактах.

В настоящей работе сделана попытка расчетным путем оценить возможные критерии допустимости кипения на обогреваемых участках опускных трактов, включающих в себя ниже обогреваемого участка достаточно протяженные необогреваемые участки. Закипание на опускном участке зависит от скорости изменения температуры воды на входе в него, скорости изменения давления, скорости воды, изменения обогрева, геометрии трактов.

Полное математическое описание процесса закипания в расчетной схеме (см. рисунок) связано с большими трудностями, поэтому для обогреваемого участка предлагается модель вскипания при переменной скорости воды на входе в участок постоянной длины, заполненный в начальный момент водой с температурой насыщения или пароводяной смесью с постоянным по длине паросодержанием, т. е. тепловая нагрузка действует с момента времени, равного нулю. Зависимостью параметров воды и пара от переменного по высоте давления можно пренебречь. Такая модель позволяет получать качественные оценки для случая, когда вскипание на опускном обогреваемом участке происходит в результате колебаний тепловой нагрузки при практически постоянном давлении (вернее, когда

можно пренебречь изменением давления) или когда вскипание происходит в результате падения давления, но протяженность участков по высоте не очень велика и подогревы на обогреваемом участке больше, чем разница температур насыщения при давлении на участке и давлении в верхней части контура (в сепараторе), т. е. вскипание при падении давления произойдет прежде всего на обогреваемом участке. Учитывается влияние изменения расхода.

С учетом этих допущений линеаризованная система уравнений закона сохранения энергии и неразрывности в случае малых возмущений имеет вид:

$$(\gamma' - \gamma'') \frac{\partial \Delta \varphi}{\partial \tau} - \gamma' \frac{\partial \Delta w'}{\partial z} + \varphi_0 \left(\gamma' \frac{\partial \Delta w'}{\partial z} - \gamma'' \frac{\partial \Delta w''}{\partial z} \right) + (\gamma' w'_0 - \gamma'' w''_0) \frac{\partial \Delta \varphi}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

$$(\gamma' i' - \gamma'' i'') \frac{\partial \Delta \varphi}{\partial \tau} + \left(\gamma' i' \frac{\partial \Delta w'}{\partial z} - \gamma'' i'' \frac{\partial \Delta w''}{\partial z} \right) \varphi_0 - \gamma' i' \frac{\partial \Delta w'}{\partial z} + (\gamma' i' w'_0 - \gamma'' i'' w''_0) \frac{\partial \Delta \varphi}{\partial z} = -\Delta Q. \quad (2)$$

Если предположить, что средняя скорость взаимного движения фаз однофазного двухфазного потока определяется родом жидкости, давлением и объемным паросодержанием, но слабо зависит от расходных характеристик, то относительную скорость пара можно выразить через данные по проскальзыванию пара при барботаже [2]. В таком случае для опускного движения

$$w_{отн} = w'' - w' = -\frac{a}{1 - \varphi}, \quad (3)$$

где $a(p) = (0,65 - 0,0039 p) \left(\frac{d}{63} \right)^{1/4}$ ($30 \text{ мм} < d < 240 \text{ мм}$ — гидравлический диаметр, $11 \text{ атм} < p < 125 \text{ атм}$).

Для отклонения скорости пара от начального

$$\Delta w'' = \Delta w' - \frac{a \Delta \varphi}{(1 - \varphi_0)^2}. \quad (4)$$

С использованием этой модели для $\Delta w''$ и ставилась задача. Для передаточных функций изменения паросодержания, скоростей водяной и паровой фаз при изменении скоростей на входе и теплоподвода на обогреваемой части опускного тракта решение с использованием метода преобразования Лапласа уравнений (1), (2) и (4) при не зависящих от координат начальных значениях параметров теплоносителя выражается следующим образом:

А. Обогреваемый участок

$$\Delta \varphi_1(s, z) = \frac{\Delta \bar{Q}(s) [\gamma' - \varphi_0 (\gamma' - \gamma'')]}{s \gamma' \gamma'' r} (1 - e^{-\frac{sz}{w''_0}}); \quad (5)$$

$$\Delta w'_1(s, z) = \Delta w'_{вх}(s) + \frac{(\gamma' - \gamma'')}{\gamma' \gamma'' r} \Delta \bar{Q}(s) z + \frac{a}{1 - \varphi_0} \left(1 + \frac{\gamma''}{\gamma'} \frac{\varphi_0}{1 - \varphi_0} \right) \frac{1}{s} \frac{\Delta \bar{Q}(s)}{\gamma'' r} (1 - e^{-\frac{sz}{w''_0}}); \quad (6)$$

$$\Delta w''_1(s, z) = \Delta w'_{вх}(s) + \frac{(\gamma' - \gamma'')}{\gamma' \gamma'' r} \Delta \bar{Q}(s) z. \quad (7)$$

Б. Необогреваемый участок ниже кипящего

$$\Delta \varphi_2(s, l) = \Delta \varphi_1(s, z_1) e^{-\frac{sl}{w''_0}}; \quad (8)$$

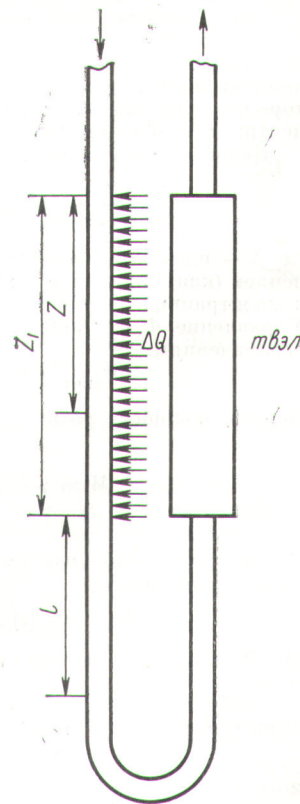
$$\Delta w'_2(s, l) = \Delta w'_1(s, z_1) - \frac{a}{(1 - \varphi_0)^2} \Delta \varphi_1(s, z_1) (1 - e^{-\frac{sl}{w''_0}}); \quad (9)$$

$$\Delta w''_2(s, l) = \Delta w'_1(s, z_1) - \frac{a}{(1 - \varphi_0)^2} \Delta \varphi_1(s, z_1) = \Delta w'_{вх}(s) + \frac{(\gamma' - \gamma'')}{\gamma' \gamma'' r} \Delta \bar{Q}(s) z_1, \quad (10)$$

Передаточная функция (7) показывает, что на кипящем участке с увеличением координаты возрастет скорость паровой фазы при увеличении теплоподвода и скорость водяной фазы (6), причём всплытие пара приводит к дополнительному приросту скорости водяной фазы. Временные характеристики этого дополнительного прироста характеризуются временем запаздывания, определяемым скоростью движения пара.

На участке опускного тракта ниже обогреваемой зоны (9), (10) при росте паросодержания на входе в этот участок наблюдается торможение водяной и паровой фаз относительно скорости водяной фазы на выходе обогреваемой зоны. Для водяной фазы торможение происходит во время изменения паросодержания на выходе из обогреваемой зоны и на интервале времени после этого, равном времени прохода пара по необогреваемому участку. Для паровой фазы торможение определяется возрастанием паросодержания на выходе обогреваемой зоны в данный момент времени. Однако если подставить (5) и (6) при $z = z_1$ в (10), т. е. найти передаточную функцию изменения скорости пара на необогреваемом участке от изменения скорости воды на входе в обогреваемый участок и теплоподвода на нем, получится выражение [вторая половина формулы (10)], показывающее ускорение пара на необогреваемом участке относительно скорости воды на входе в обогреваемый участок. Уменьшение скорости паровой фазы не превышает снижения скорости воды, если оно происходит на входе в обогреваемый участок.

Таким образом, в динамических режимах, связанных с закипанием на опускных трактах, на всем протяжении обогреваемой и находящейся ниже необогреваемой частей наименьшая



Расчетная схема.

скорость движения пара наблюдается на входе в обогреваемый участок, вернее вблизи точки закипания.

Чтобы сохранить нормальную циркуляцию и предотвратить опасные последствия, вызванные остановкой движения пара и его последующим накоплением, скорость воды на входе в опускной участок, где возможно закипание, не должна снижаться до значения, близкого к величине фактора проскальзывания.

Результаты экспериментального изучения аварийных режимов Билибинской АТЭЦ на специализированном стенде дали качественные оценки, которые позволяют считать указанное выше условие относительно скорости на входе в участок с закипанием

необходимым для исключения опасных последствий вскипания теплоносителя в опускных трактах при нестационарных режимах. Для уточнения нужна постановка специальных экспериментов.

Поступило в Редакцию 7/II 1972 г.
В окончательной редакции 19/I 1973 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крамеров А. Я., Шевелев Я. В. Инженерные расчеты ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1964, с. 471.
2. Крамеров А. Я., Шевелев Я. В. Там же, с. 321.

Оптимальное выравнивание тепловыделения по объему реактора

ЗАРИЦКАЯ Т. С., РУДИК А. П.

УДК 621.039.51

В последнее время с использованием принципа максимума Л. С. Понтрягина был решен ряд задач [1—9]. В настоящей работе решается еще одна задача — об оптимальном выравнивании тепловыделения по объему реактора.

Постановка задачи заключается в следующем. Имеется реактор заданной мощности без отражателя, в котором возможно перераспределение ядерного горючего по объему реактора (без учета глубины выгорания). Требуется так распределить ядерное горючее, чтобы среднеквадратичное отклонение тепловыделения по объему реактора было бы минимальным. Рассматривается простейшая математическая модель: одна группа нейтронов, линейная зависимость лапласиана от концентрации ядерного горючего, одномерный реактор без отражателя. Геометрия реактора: $z = 0$ — центр; $z = H$ — граница.

Исходное уравнение имеет обычный вид [10]:

$$\frac{d^2 N}{dz^2} + [U(z) - \tilde{U}] N = 0, \quad (1)$$

где N — плотность тепловых нейтронов; $U(z)$ — «управление» (как принято в работе [5]), пропорциональное концентрации ядерного горючего; U — постоянная. Управление $U(z)$ должно удовлетворять следующим ограничениям:

$$U_{\text{мин}} \leq U(z) \leq U_{\text{макс}}. \quad (2)$$

Полная мощность реактора \bar{W} считается заданной:

$$W = \int_0^H U(z) N(z) dz. \quad (3)$$

Кроме того, возможно существование теплотехнического ограничения:

$$P(z) = U(z) N(z) - D \leq 0, \quad (4)$$

где D — заданная постоянная (или функция координаты z).

Требуется подобрать такое $U(z)$, чтобы достигался минимум функционала \mathcal{J} :

$$\mathcal{J} = \int_0^H \left[U(z) N(z) - \frac{W}{H} \right]^2 dz. \quad (5)$$

С учетом условия (3) преобразуем функционал (5) к виду

$$\mathcal{J} = \int_0^H U^2(z) N^2(z) dz - \frac{W^2}{H}. \quad (6)$$

Каноническая система уравнений, соответствующая выражениям (1) — (6), имеет следующий вид [5]:

$$\begin{aligned} \frac{dx^{(0)}}{dz} &= U^2 [x^{(1)}]^2; & \frac{dx^{(1)}}{dz} &= x^{(2)}; \\ \frac{dx^{(2)}}{dz} &= -[U - \tilde{U}] x^{(1)}; & \frac{dx^{(3)}}{dz} &= 1; & \frac{dx^{(4)}}{dz} &= U x^{(1)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $x^{(1)} \equiv N$; $x^{(2)} \equiv \frac{dN}{dz}$; $x^{(0)}$ связано с минимизируемым функционалом; $x^{(3)}$ учитывает, что размер реактора задан; $x^{(4)}$ соответствует условию (3). Системе (7) соответствует гамильтониан \mathcal{H} :

$$\mathcal{H} = \psi_0 U^2 (x^{(1)})^2 + \psi_1 x^{(2)} - \psi_2 (U - \tilde{U}) x^{(1)} + \psi_3 + \psi_4 U x^{(1)}. \quad (8)$$

Сопряженные функции ψ_i удовлетворяют следующим уравнениям [в предположении, что строгое неравенство в выражении (4) выполняется]:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_i}{dz} &= -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial x^{(i)}}; & \frac{d\psi_1}{dz} &= -2\psi_0 U^2 x^{(1)} + \psi_2 (U - \tilde{U}) - \psi_4 U; \\ & & \frac{d\psi_2}{dz} &= -\psi_1. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь функция $\psi_0 = -1$, а функции ψ_3 и ψ_4 — постоянные, значения которых определяются из решения оптимизационной задачи. Уравнения для функции ψ_2 удобно преобразовать к виду, аналогичному виду уравнения (1):

$$\frac{d^2 \psi_2}{dz^2} + [U - \tilde{U}] \psi_2 = 2\psi_0 U^2 x^{(1)} + \psi_4 U. \quad (10)$$

Фазовые переменные $x^{(i)}$ удовлетворяют обычным граничным условиям, а сопряженные функции ψ_i — гра-