

расчет систематически завышает их эффективность приблизительно на 5—10%.

3. Расчет занижает величину эффективности поглощающего элемента, когда элемент расположен вблизи (вплотную) активной зоны. Разница между измеренной и рассчитанной эффективностями обкладки ПКЦ, расположенной вплотную к активной зоне, наибольшая и не превышает 20%, а разница между измеренной и рассчитанной эффективностью эквивалентного стержня в этом случае составляет ~10%. Таким образом, ошибка расчета, вызванная допущениями, сделанными при построении эквивалентной модели, не превышает 10% и, по-видимому, как и в случае стержней, обусловлена в основном пренебрежением азимутальной зависимостью эффективных граничных условий на поверхности поглощающего элемента.

Как показали исследования, имела место действительно слабая интерференция между ПКЦ. Так, отклонение коэффициента интерференции от единицы в случае двух ПКЦ, расположенных вплотную, не превышало 12% (см. рис. 3).

Для проверки справедливости формулы (5) и соответствующего допущения была исследована зависимость эффективности одиночного ПКЦ, расположенного вплотную к активной зоне ($\frac{\rho_H}{\rho_5} = 234$, $R_{a.z} = 19,45$ см), от угла поворота ПКЦ. Из сравнения видно, что измеренные эффективности удовлетворительно согласуются с результатами расчета (см. рис. 2). При этом расчет незначительно занижает величину эффективности ПКЦ при углах поворота $\sim 0^\circ$ и завышает ее при $70 \leq \vartheta \leq 180^\circ$. Этот вывод качественно не является неожиданным и в основном следует из зависимости эффектив-

ности поглощающей обкладки ПКЦ от расстояния до активной зоны (см. рис. 7). Метод расчета запрограммирован на ЭВМ «Минск-22». Время счета одного варианта ≤ 10 мин.

Таким образом, исследования показали принципиальную возможность и целесообразность использования ПКЦ для компенсации избыточной реактивности в малогабаритных тепловых реакторах с водородсодержащими активными зонами.

Путем построения модели (цилиндрического поглощающего стержня), эквивалентной по эффективности поглощающей обкладке ПКЦ, и использования соответствующего метода расчета эффективности системы стержней, расположенных в радиальном отражателе, решена задача по определению эффективности системы ПКЦ, произвольно расположенных в отражателе и повернутых на произвольные углы.

Удовлетворительное согласие расчета эффективности ПКЦ, расположенных в водяном отражателе, с экспериментом показало корректность и физическую обоснованность сделанных допущений, что позволяет рекомендовать предложенный способ для вариантных инженерно-физических расчетов эффективности системы ПКЦ.

Поступила в Редакцию 5/V 1969 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. К. Красин и др. «Вестн АН БССР. Сер. физ.-техн. наук», № 4, 21 (1966).
2. В. А. Левадный. Там же, стр. 13.
3. Г. И. Марчук. Методы расчета ядерных реакторов. М., Госатомиздат, 1961.
4. Н. Н. Новикова. «Атомная энергия», 22, 306 (1967).
5. В. И. Носов. «Атомная энергия», 15, 71 (1963).

Кризис теплоотдачи в реакторе

Б. А. ЗЕНКЕВИЧ, В. Я. КОЗЛОВ, Л. А. КОЧЕТКОВ, О. Л. ПЕСКОВ

УДК 621.039.542:536.24

Ввиду отсутствия надежной теории кризисов теплоотдачи при вынужденном движении кипящих жидкостей данные о кризисе до сих пор получаются практически на основе натурных испытаний. Большая часть работ по кризису теплоотдачи была связана с запросами ядерной энергетики. Однако сначала вопрос о возможности переноса данных, полученных вне реактора, к данным, полученным в реакторе, даже не ставился. Расширение диапазона парамет-

ров при исследовании кризиса теплоотдачи показало сложную связь параметров, определяющих наступление кризиса. Можно было ожидать и влияния реакторного излучения на процессы теплоотдачи. К тому же известно, что законы тепловыделения в твэлах и их зависимость от температуры недостаточно хорошо воспроизводятся на стендах. Из доступных источников [1, 2] следует, что в реакторных условиях результаты экспериментов отли-

чаются от результатов внереакторных экспериментов примерно на 20%.

Описываемые эксперименты были предприняты для выяснения представительности распространенной методики определения критических параметров на стендах, когда моделирование законов тепловыделения осуществляется путем пропускания через имитаторы твэлов электрического тока.

Кроме того, отработка реакторного кризисного эксперимента имеет и самостоятельное значение: для современных энергетических реакторов характерным становится их эксплуатация в непосредственной близости от кризиса. Поэтому важной становится проблема создания контрольного канала, оснащенного необходимыми датчиками для сигнализации достижения критических условий в реакторе.

Установка и экспериментальный канал. Для проведения экспериментов по кризису в реакторе был переоборудован один тракт первого контура петли ПВ-2 [2]. Схема тракта, включенного между напорным 1 и выходным 7 коллекторами петли, приведена на рис. 1. Расход воды через канал 10 устанавливался и регулировался вентилем 2 у напорного коллектора. За вентилем в тракт был врезан смеситель 3, в который поступала вода из напорного коллектора и охлаждающая вода. Введение этого узла в схему сделало ее более гибкой, менее зависимой от режима работы петли и более удобной при подготовке кризисного режима. Суммарный поток воды через расходомерную

трубку 4 направлялся в канал. На выходе из канала был установлен смешивающий конденсатор 8 для конденсации и переохлаждения теплоносителя. Оборудование петли кроме создания циркуляции теплоносителя использовалось также для поддержания заданного давления, сброса из контура воды, подаваемой в смеситель и конденсатор, и регулирования температуры воды на входе в смеситель.

Экспериментальный U-образный канал состоит из двух идентичных трубчатых твэлов по одному в опускной и подъемной ветвях. Выбор такой конструкции был продиктован, с одной стороны, необходимостью подогрева воды (в опускном твэле), так как петля не обеспечивала необходимого уровня температур, с другой стороны, желанием получить дополнительную возможность измерения мощности рабочего участка (в подъемном твэле) путем сравнения с мощностью опускного твэла.

Канал оснащен термопарами 9 для измерения температуры воды на входе и выходе из твэлов и температуры оболочки подъемного твэла — рабочего участка. Размещение и конструкция крепления термопар к оболочке, а также размеры твэла показаны на рис. 2. Контакт и сцепление термопары с оболочкой осуществлены путем металлизации — напыления жидкого металла на термопары, уложенные между предварительно приваренными к оболочке уголками из нержавеющей стали толщиной 0,3 мм. Термопары изготавливали из про-

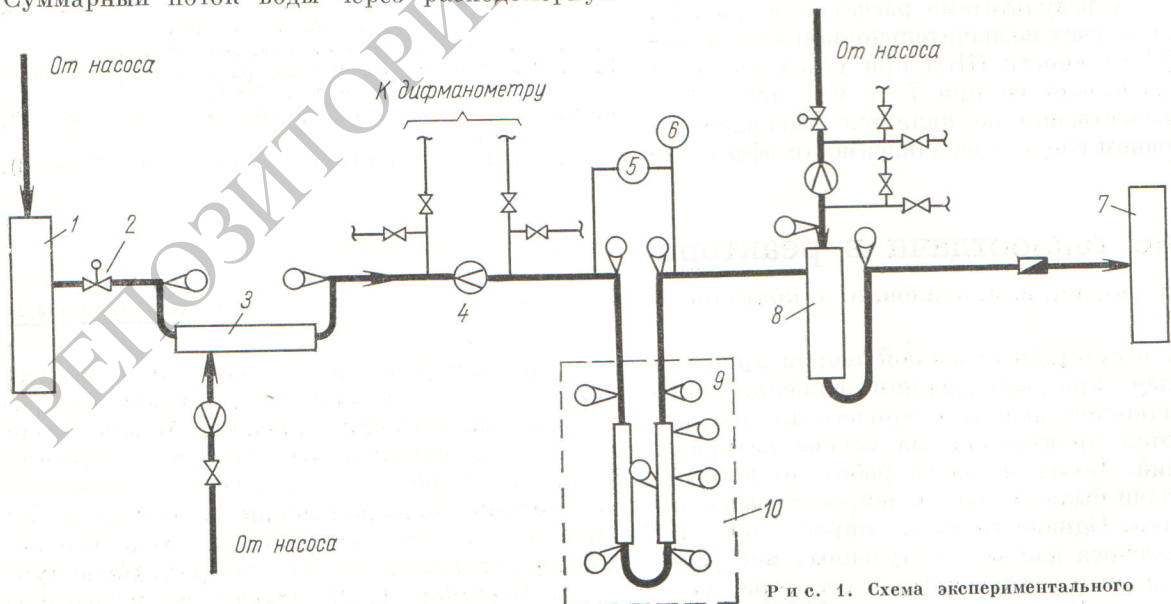
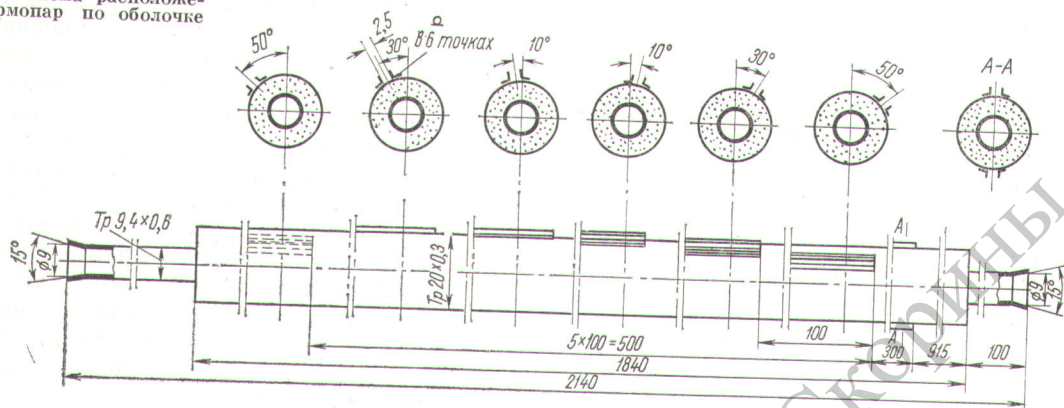


Рис. 1. Схема экспериментального тракта.

Рис. 2. Схема расположения термопар по оболочке твэла.



волоки диаметром 0,5 мм, обмотанной кварцевой нитью с пропиткой лаком Ф-9, в виде двухжильного шнура. Твэлы вместе с термопарами были изолированы от реакторной среды тонкостенными стальными чехлами, которые, создавая гарантированные газовые зазоры между твэлами и графитовыми втулками, значительно снижали теплообмен между твэлами и между твэлами с соседними каналами. Температуру воды измеряли хромель-копелевыми термопарами. Горячие спаи термопар опускали в поток воды в точеных «карманах» из нержавеющей стали размером $3,5 \times 0,25$ мм. В остальных точках тракта карманы были изготовлены из трубочек размером $4 \times 0,3$ мм.

Для измерения температуры оболочки твэлов применяли хромель-алюмелевые термопары. Все термопары перед монтажом подвергались индивидуальной проверке по реперным точкам затвердевания чистого олова, свинца и цинка. В промежуточных точках термопары градуировали путем сравнения с образцовой термопарой второго разряда градуировки ПП-1. Термо-э. д. с. измерялась потенциометром Р-2.

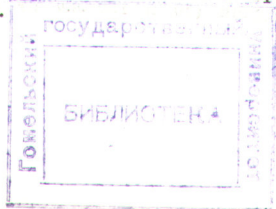
После изготовления твэлов и монтажа термопар на оболочке было проведено измерение теплопроводности тепловыделяющего слоя на стенде при обогреве пропусканием электрического тока. Измерение температуры оболочки твэлов на расстояниях 50 и 150 мм от выхода проводилось потенциометрами ЭПП-09 со шкалой 0—10 мВ и ПП-1, включенными последовательно в цепь термопар. Потенциометром ПП-1 компенсировалась основная часть постоянной составляющей, а прирост температуры записывался на ЭПП-09. В остальных точках температура измерялась потенциометрами ПСР класса 0,5 с пределом 0—800° С. Температура воды для расчета мощности твэлов измерялась потенциометром Р-2.

Расход воды контролировался с помощью двоянных диафрагм, которые перед постановкой в тракт тщательно тарировались в диапазоне рабочих чисел Рейнольдса. В качестве вторичных приборов расходомеров использовались ДМ-6 в комплекте с ДСР-1 на перепад 250 мм рт. ст. Кроме того, к расходомерным трубкам параллельно подключались ртутные дифманометры ДТ-150 для контрольных измерений перепадов и проверки электрических приборов (см. 5 — перепадомер на рис. 1). Давление измерялось на выходе из канала манометром 6 МЭД-04 (см. рис. 1) на 160 ат с дистанционной передачей и параллельно подключенным образцовым манометром МОВ на 250 ат.

Методика экспериментов и фиксация кризиса.

По данным работы [3] предварительно оценили мощность твэла, при которой можно было ожидать кризиса при выбранных параметрах. Затем выполнили градуировку мощности канала относительно мощности реактора без кипения теплоносителя. На основании этой градуировки определили область рабочих мощностей реактора и производную мощность кризисного твэла по мощности реактора, необходимую для выбора приемлемого приращения мощности реактора при выходе на кризис.

Выход на кризис осуществлялся повышением мощности реактора на 1—2% от критической со стабилизацией режима после каждого подъема. Через одну-две ступени производили замеры и запись показаний приборов. Обычно четырех-пяти таких подъемов мощности было достаточно для начала ухудшения теплоотдачи, которое отмечалось по повышению температуры оболочки твэла в 50 мм от выхода.



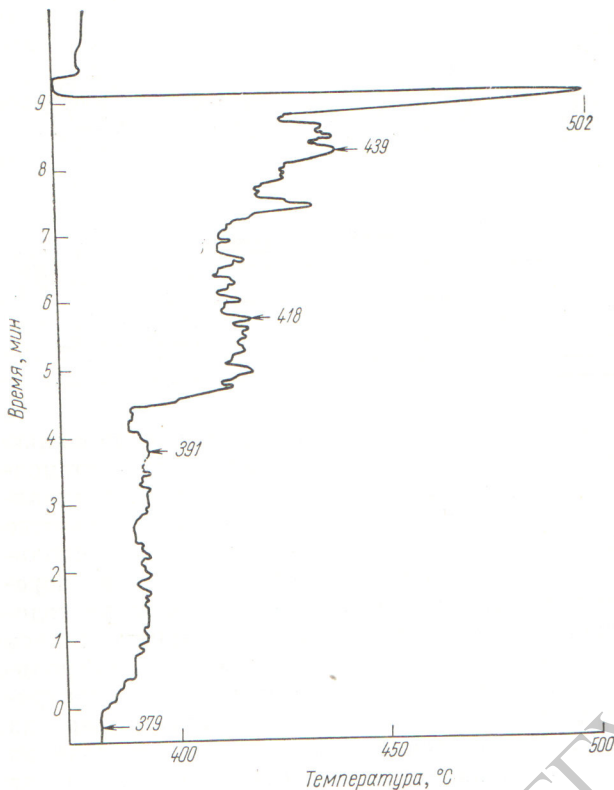


Рис. 3. Температурный режим оболочки твэла при кризисе теплоотдачи (50 мм от выхода).

Как правило, температура при этом колебалась. При достаточно малом последнем повышении мощности термометры, расположенные в центре твэла, не изменяли показаний, а приращенные показатели термометров были сравнительно невелики и могли оставаться на одном уровне при стабильном режиме длительное время (рис. 3). Последующее увеличение мощности на 0,5—1% приводило к новому уровню температуры в 50 мм от выхода с большей амплитудой колебаний. Резкое и непрерывное увеличение амплитуды принималось за кризис, который обычно наступал после одно- или двукратного повышения мощности уже в ухудшенном режиме теплоотдачи.

Повышение температуры твэла в остальных точках запаздывало незначительно во времени и заметно по амплитуде (рис. 4). Ухудшения режима теплоотдачи далее 350 мм от выхода твэла не наблюдалось, так как уже при таком распространении области ухудшенного теплообмена температура твэла у выхода достигала предельного значения.

В отдельных случаях подход к кризису осуществлялся другим, бесступенчатым способом (рис. 5). Повышение температуры твэла происходило при постоянной мощности за счет повышения температуры воды на входе, причем это повышение за все время развития кризиса составляло всего 1° С. Плавность подхода к кризису объясняется малой скоростью изменения параметров. Рост температуры в точках 1 и 2 происходил практически одновременно, но в точке 2 (150 мм от выхода твэла) повышение температуры было меньшим по сравнению с точкой 1, несмотря на больший тепловой поток. Подобное соотношение видно и на рис. 4.

Таким образом можно сказать, что область ухудшения теплоотдачи имеется на определенном участке твэла, а степень ухудшения, по-видимому, плавно увеличивается к выходу.

Принятый выше момент наступления кризиса теплоотдачи является, конечно, условным. Возможно, более определенным был бы момент начала колебания температуры твэла, однако, поскольку в большинстве работ по кризису этот начальный момент не фиксирован как кризис, то для сравнения данных принято здесь определение момента кризиса даст меньшую ошибку.

Распределение теплового потока по длине твэла. Экспериментальный канал после опытов был извлечен из реактора и установлен

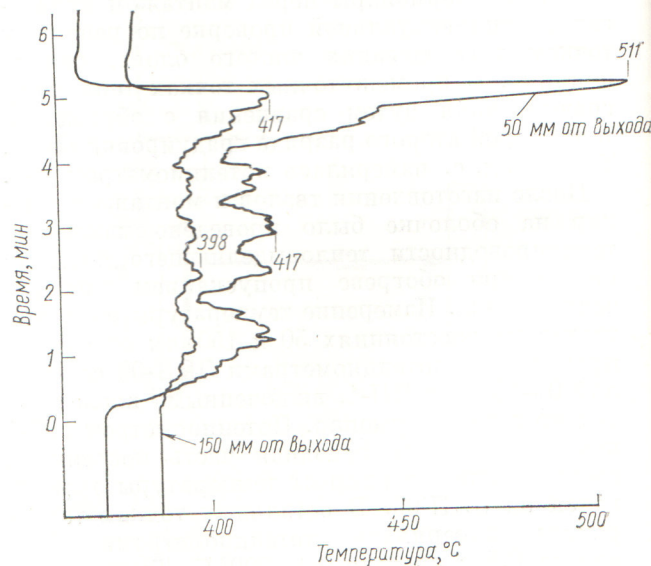
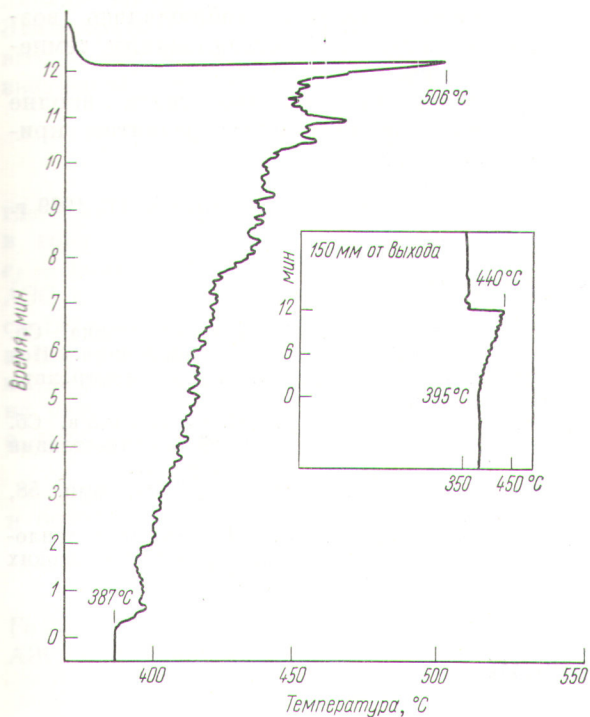


Рис. 4. Температурный режим оболочки твэла при кризисе теплоотдачи (50 и 150 мм от выхода).



Р и с. 5. Повышение температуры оболочки твэла при постоянной мощности и замедленном (6°C/ч) увеличении температуры воды на входе (50 и 150 мм от выхода).

в бассейне выдержки. Распределение теплового потока оценивалось по излучению осколков деления при протаскивании канала из бассейна около экранированного счетчика. Перемещение канала было синхронизировано с устройством, записывающим уровень излучения.

Кроме того, величина теплового потока в точках установки термопар оценивалась по перепаду температур между теплоносителем и температурой оболочки твэла. Оказалось, что распределение теплового потока по длине твэла с погрешностью не более $\pm 15\%$ соответствует выражению $q(z) = q_{\max} \cos \frac{\pi z}{2200}$, где z — расстояние от середины твэла в миллиметрах.

Внереакторный эксперимент. Подобный эксперимент был выполнен также на электрообогреваемом стенде [4]. Длина и внутренний диаметр рабочего участка здесь и в реакторе были одинаковы. Форма тепловыделения по длине была спрофилирована близкой к закону $q(z) = q_{\max} \cos \frac{\pi z}{2200}$ за счет плавного увели-

чения толщины стенки от середины участка к концам. Критические мощности определялись в тех же точках и при тех же параметрах, что и в реакторном эксперименте. Кризис фиксировался по повышению температуры наружной поверхности трубки с помощью термопар и мостовым методом. Оба метода показали одинаковые результаты. В остальном методика определения критической мощности не отличалась от описанной в работе [4].

Критические мощности, определенные в реакторе и на стенде

№ п.п.	P, бар	$t_{вх}$, °C	γW , кг/м ² ·сек	x_p/x_c , %	N_p/N_c , кВт/кВт	$\frac{N_p - N_c}{N_c} \cdot 100$, %
1	137	306	1500	25,6/26,6	37/38	-2,6
2	137	306	1560	26,2/25,0	39/38	+2,6
3	137	307	1610	26,2/23,0	40/37	+8,1
4	137	298	2020	20,6/17,0	49/46	+6,5
5	137	298	2070	20,6/18,0	50/47	+6,4
6	137	300	2050	22,0/17,8	50/45	+11
7	136	297	2550	18,2/18,2	58/58	
8	137	298	2530	18,3/17,8	58/56	+3,5
9	118	308	1570	33,6/30,7	42/39	+7,7
10	118	305	1560	32,8/30,0	42/39	+7,7
11	118	301	1570	32,6/29,6	44/41	+7,3
12	118	300	2080	24,0/20,2	50/45	+11
13	118	296	2080	24,2/21,2	48/44	+9,1
14	119	295	2500	20,2/17,7	55/51	+7,8
15	119	292	2500	19,2/16,8	56/52	+7,7
16	119	288	2590	18,8/14,7	60/53	+13

Примечание. P — давление на выходе из канала; $t_{вх}$ — температура воды на входе в обогреваемый участок; γW — массовая скорость; x_p и x_c — весовое паросодержание в реакторном и стендовом экспериментах.

Результаты экспериментов и их оценка. В таблице приведены критические мощности и параметры, при которых они определялись для реакторного (N_p) и внереакторного (N_c) экспериментов. Из таблицы видно, что расхождение критических мощностей, определенных на стенде и в реакторе, сравнительно невелико. Авторы склонны отнести это различие на счет погрешностей обоих экспериментов. Так, погрешность определения критической мощности твэла составляет $\leq 5\%$. Для стендовых экспериментов величина погрешности равна 3—4%, т. е. погрешности сравнимы с относительной разницей критических мощностей, полученных в реакторе и на стенде. Однако полностью отрицать влияние специфических реакторных условий на величину критической мощности

на основании приведенных выше результатов было бы недостаточно обоснованным. Вместе с тем это влияние, по-видимому, невелико, по крайней мере в исследованной области параметров.

Из изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Критические мощности в реакторе несколько выше результатов стендового эксперимента, однако это различие в данных условиях практически находится в пределах погрешности экспериментов.

2. Ухудшение теплоотдачи всегда началось в выходных сечениях твэла и по мере увеличения мощности область ухудшенного теплообмена распространялась к входному сечению.

3. Ухудшение теплоотдачи при достаточно плавном увеличении мощности сопровождалось сравнительно медленным повышением температуры оболочки твэла, причем на промежу-

точном уровне мощности наблюдалась возможность относительной стабилизации температуры оболочки.

4. Термодары на оболочке твэла вполне надежно фиксировали процесс развития кризиса теплоотдачи.

Поступила в Редакцию 19/III 1969 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ессельман и др. Ядерная энергетика. Сб. докладов на 2-й Женевской конференции. Под ред. М. А. Стыриковича, М., Изд-во иностр. лит., 1959, стр. 130.
2. Л. А. Кочетков, Г. Н. Ушаков. Сб. «10 лет Первой в мире атомной электростанции СССР». М., Атомиздат, 1964, стр. 27.
3. А. С. Коньков. «Труды ЦКТИ», вып. 58, 170 (1965).
4. В. И. Субботин. Сб. «Исследование теплоотдачи к пару и воде, кипящей в трубах при высоких давлениях». М., Атомиздат, 1958.

Оптимизация начального этапа развития ядерной энергетики

В. ФРАНКОВСКИЙ

(Институт ядерных исследований, Свερк, ПНР)

УДК 621.039

Большое число типов атомных электростанций свидетельствует о необходимости разработки метода определения экономически оптимального состава ядерной энергетики, развивающейся во времени. Поскольку обычно рассматриваются сравнительно небольшие периоды времени, считая от момента пуска первой АЭС, можно говорить об оптимизации начального этапа развития ядерной энергетики.

В ранее опубликованных работах [1—3] оптимальным считают такой состав ядерной энергетической системы, который соответствует минимальному значению функции цели, в том или другом виде выражающей полную стоимость производства электроэнергии на АЭС за рассматриваемый период. Для нахождения оптимального значения применялись методы линейного программирования. Следует отметить, что достоверность результатов при таком построении функции цели может оказаться сомнительной. Причина последней не зависит от выбора метода оптимизации; она обусловлена в основном тем, что срок службы АЭС, введенных в строй в рассматриваемый период, может оказаться больше этого периода.

Поэтому решения, принятые для рассматриваемого периода, могут вызвать последствия экономического характера, которые проявляются уже за его пределами, что не учитывается при указанном выше определении функции цели. Как будет показано ниже, по этой и другим причинам не следует в общем ожидать, что удастся найти одно оптимальное решение; скорее надо стремиться к определению области экономически выгодных решений на основе анализа результатов различным образом поставленных оптимизационных расчетов.

Формулировка задачи оптимизации начального этапа развития ядерной энергетики в терминах линейного программирования

Рассмотрим отдельную АЭС единичной мощностью, например, 1 Гвт. Приведенные затраты на производство электроэнергии такой АЭС на протяжении всего срока службы τ составляют

$$x = i + \varepsilon, \quad (1)$$

где i и ε — соответственно постоянная и топ-