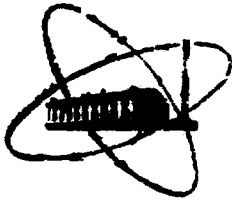


548305665

ФЭИ-1348



ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

С. И. ЩЕРБАКОВ, Л. М. ПАРАФИЛО

**МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТА ТЕПЛА
ДЛЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ СХЕМ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Обнинск — 1982

УДК 621.311: 621.039

С. И. Щербаков, Л. М. Парафило.

Модель транспорта тепла для многоэлементных схем энергетических установок.

ФЭИ-1348. Обнинск: ФЭИ, 1982. — 12с.

Изложена модель транспорта тепла для расчета тепловых процессов в многоконтурных разветвленных схемах с принудительной циркуляцией, содержащих большое количество элементов: трубопроводов, теплообменных устройств, узлов слияния и разделения потоков, насосов и т. п. Использование предлагаемой модели возможно для схем произвольного вида с различными теплоносителями и предполагает минимальный объем информации о свойствах элементов. В качестве определяющих параметров тепловых процессов приняты: изменение мощности энергоисточников, изменение расходов насосов, изменение схемы в течение процесса, например, в соответствии с регламентом переходных операций.

Целями разработки настоящей модели расчета тепловых процессов в схемах энергетических установок являются:

- отражение процессов в реально сложных схемах, т.е. с учетом всех элементов изучаемого объекта;

- обеспечение возможности изучения процессов в схемах с изменяющейся структурой, что соответствует реальным режимам эксплуатации;

- обеспечение приемлемых для широкого круга потребителей качеств расчетной модели: в практике проектирования установок - минимальные затраты времени программиста при переходе от одной задачи к другой, проведение расчетов для схем с неустановленными окончательно характеристиками элементов, в практике эксплуатации станции - оперативная оценка различных возникающих на объекте ситуаций.

Методов и программ, их реализующих, которые одновременно удовлетворяют поставленным здесь целям, в настоящее время нет. Наиболее известные программы [1, 2, 3] при их совершенстве и точности получаемых результатов, характеризуются упрощением тепловой схемы объекта.

Существующие трудности, по мнению авторов данной работы, порождены используемым представлением контуров в виде совокупности осредоточенных элементов, соединенных между собой трассами, т.е. рассмотрением процессов в эйлеровой системе координат. При переходе к лагранжевой системе координат возможно представление схем только как совокупности трасс, где трассы и являются элементами.

Кроме того, практически целесообразен и такой подход, когда детальность описания каждого из элементов приносится в жертву полноте описания схемы для отражения явлений, присущих схеме в целом.

Учитывая ограниченность располагаемых ресурсов машинного времени и оперативной памяти, поставленные в данной работе цели могут быть достигнуты прежде всего путем выделения важнейших характеристик элементов и введения единого способа описания процессов транспорта тепла через элементы в лагранжевой системе координат.

Таким образом задача разработки модели включает два основных момента:

- разработку универсального описания элементов,
- разработку простого способа построения схемы из элементов.

I. Понятие об универсальном расчетном элементе.

Рассматриваемые тепловые схемы могут содержать в качестве элементов: участки трубопроводов, тройники (узлы разделения и слияния двух потоков), коллектора, емкости, насосы, теплообменники и парогенераторы, тепловыделяющие сборки реактора и т.п.

Несмотря на конструктивные различия всех перечисленных элементов, они обладают рядом общих конструктивных особенностей и свойств протекающих в них процессов. К их числу относятся:

- наличие одной или нескольких проточных частей, каждая из которых имеет один вход по теплоносителю и ограничена стенкой от входа до выхода из элемента. В случае, если проточная часть имеет более одного входа теплоносителя, внутри нее для каждого входа могут быть условно выделены параллельные участки проточной части:

- передача тепла к протекающему через элемент теплоносителю через стенку.

Указанных общих свойств достаточно для описания тепловых процессов в схемах (транспорта тепла теплоносителем через элементы и транспорта тепла через стенку от соседних элементов) и поэтому возможно построение расчетных моделей схем из универсальных расчетных элементов, обладающих только этими свойствами.

Универсальные элементы расчетных моделей схем могут соответствовать не только реальным конструктивным элементам, но и мысленно выделенным областям течения, например, в баках, с границами вдоль линий тока.

Таким образом универсальный расчетный элемент содержит один вход, через который в элемент поступает теплоноситель с расходом

$G(\tau)$ и энтальпией $H(\tau)$. По мере протекания через элемент теплоноситель в пределах любого поперечного сечения движется только в направлении от входа к выходу и заполняет объем элемента V теплоноситель - V . Через грани элемента в его объем поступает поток тепла - $Q(\tau)$.

2. Построение схемы из элементов

В рамках настоящего подхода тепловая схема может быть представлена как совокупность универсальных элементов, соединенных между собой по входу и выходу теплоносителя в замкнутые или разомкнутые контуры и, возможно, находящиеся в тепловом контакте друг с другом через общую стенку (например, теплообменник может быть представлен, как два контактирующих элемента различных контуров).

Каждому элементу в схеме присвоен порядковый номер. Построение схемы заключается в определении для нумерованного элемента номера предвключенного ему элемента, номера элемента, находящегося с ним в тепловом контакте. Пример схемы приведен на рис. I.

Схема представляет собой фрагмент тепловой схемы ЯЭУ и содержит теплообделывающие сборки (50, 59-64), схему смешения теплоносителя в пространстве над сборками (элементы 51, 57, 68, 69-70), теплообменник (1 - вход по первому контуру, 5 - вход по второму контуру, элементы 1 и 5 находятся в тепловом контакте), модули парогенератора (элементы - 11, 24, 14, 30, 16, 28 - второго контура и соответственно находящиеся с ними в контакте элементы третьего контура - 41, 48, 35, 46, 39, 33). Раздаточные тройники (7, 8), (9, 10) и т.п. с известными долями разделения потока имеют один предвключенный элемент 6 или 7. Сливные тройники (68, 69), (15, 12) и т.п. имеют только по одному последующему элементу, предыдущим для которого должен быть указан любой из двух его предшествующих элементов. Эти предшествующие элементы считаются находящимися в тепловом контакте, чем обеспечивается соблюдение теплового баланса при слиянии потоков.

В построенной таким образом схеме происходят тепловые процессы, заключающиеся в транспортировке теплоносителем тепла от одного элемента к другому и в трансформации тепла в некоторых элементах, типа теплообменников. Поэтому для расчета тепловых процессов для каждого нумерованного элемента необходимо определять тип протекающего через него теплоносителя и соответствующие ему теплофизические свойства, расход теплоносителя через элемент в любой момент времени, а также коэффициенты, определяющие передачу тепла через общую границу контактирующих элементов.

Требуемые теплофизические свойства теплоносителей - зависимости $H(T, P)$ и $v(T, P)$ где H - энтальпия, v - удельный объем, T - температура, P - давление.

Массовый расход теплоносителя через элемент определяется:

- расходом через контур, к которому он относится, (т.е. расходом через элемент типа насоса);
- ветвлением контура, (распределением расходов на раздаточных тройниках), которое может изменяться при проведении теплового процесса в результате подключения или отключения определенных элементов;
- изменением плотности теплоносителя во времени в предшествующих элементах контура.

Количество тепла передаваемого через общую границу теплового контакта двух элементов в данной модели определяется с помощью коэффициента термической эффективности - ψ по режимным параметрам [4]:

$$Q = \psi \cdot \min \left\{ G_1 \cdot (H_1(T_{k1}, P_1) - H_{k1}); G_2 \cdot (H_{k2} - H_2(T_{k2}, P_2)) \right\} \quad (1)$$

где $H_1(T_{k1}, P_1) = H_1(T_2(H_{k2}, P_2), P_1)$ - значение энтальпии, определяемое для теплоносителя, протекающего через первый из взаимодействующих элементов по температуре, соответствующей энтальпии на входе второго элемента. Аналогично введено $H_2(T_{k2}, P_2)$.

Выбор функции ψ в качестве определяющей обусловлен рядом ее достоинств:

- эта функция соответствует требованиям универсальности, изменяясь в узком диапазоне; для значительного числа теплообменных устройств $\psi \sim 1$;
- позволяет простейшим способом использовать имеющиеся расчетные и экспериментальные данные для теплообменников;
- для основных элементов оборудования имеются известные зависимости ψ от расхода [4];
- позволяет явным образом определить передаваемую мощность через значения температур на входах в теплообменное устройство, что упрощает алгоритм расчета.

3. Описание процесса для элемента

Задачей расчета элемента является определение энтальпии на его выходе, или, что то же самое на входе в последующий (-ие) элемент(ы) - $H(\tau)$ для каждого момента времени по известным ее значениям на входе в предшествующие моменты времени.

Частицы теплоносителя, появившиеся в момент τ на выходе из элемента, поступили на его вход в момент $\tau - \Delta\tau$, где $\Delta\tau$ - текущее время транспорта частиц через элемент, определяемое соотношением

$$V = \int_{\tau - \Delta\tau}^{\tau} W(t) dt \quad (2)$$

где W - объемный расход в точке нахождения транспортируемых частиц внутри элемента.

В связи с тем, что в данной модели распределение параметров внутри элемента не рассматривается, относительно величины $W(\tau)$ необходимо ввести дополнительные предположения. В качестве простого допущения можно принять

$$W(t) = \frac{t - (\tau - \Delta\tau)}{\Delta\tau} G_{вх}(t) v_{вх}(\tau) + \frac{\tau - t}{\Delta\tau} G_{вх}(t) \cdot v_{вх}(\tau - \Delta\tau) \quad (3)$$

где массовый расход G и удельный объем v относятся ко входу и выходу элемента.

За промежуток времени $\Delta\tau$ частица, проходящая через элемент изменяет свою энтальпию за счет подвода тепла таким образом, что энтальпия на выходе определяется уравнением

$$H_{вх}(\tau) = H_{вх}(\tau - \Delta\tau) + \int_0^V \frac{q_r(\omega) d\omega}{G(\omega)} \quad (4)$$

где $G(\omega)$ и $q_r(\omega)$ - расход и отнесенная к объему тепловая мощность в момент нахождения частиц в области ω объема элемента.

Величина (q_r/G) для теплообменных устройств меняется значительно слабее, чем любая из величин q_r и G , так как величина q_r определяется разностью температур между теплоносителями, которая пропорциональна расходу. В связи с этим использование отношения q_r/G для расчетов процессов с резко изменяющимся расходом (например, при мгновенном исчезновении расхода) является предпочтительным.

Уравнение типа (4) может быть записано для обоих теплоносителей, протекающих через теплообменное устройство. При условии, что величина q_r пропорциональна локальной разности температур теплоносителей, указанные уравнения могут быть совместно решены. В этом случае для правой части уравнения (4) получаем при противотоке

$$\int_0^{v_1} \frac{q_r(w) dw}{G_1(w)} \sim \frac{H_{k2}(\tau - \Delta\tau_1 - \Delta\tau_2) + H_{k2}(\tau)}{2} - H_{k1}(\tau - \Delta\tau_1) \quad (5)$$

при прямотоке

$$\int_0^{v_1} \frac{q_r(w) dw}{G_1(w)} \sim \frac{H_{k2}(\tau - \Delta\tau_1) + H_{k2}(\tau - \Delta\tau_2)}{2} - H_{k1}(\tau - \Delta\tau_1) \quad (6)$$

Сравнивая выражения (5) и (6) принимаем для правой части уравнения (4)

$$\int_0^{v_1} \frac{q_r dw}{G_1} = \psi \cdot \min \left\{ \frac{H_1(T_{k2}, P_1)^{\tau - \Delta\tau_1 - \Delta\tau_2} + H_2(T_{k2}, P_1)^{\tau}}{2} - H_{k1}^{\tau - \Delta\tau_1}, \frac{G_2^{\tau - \Delta\tau_2} \left(\frac{H_{k2}^{\tau - \Delta\tau_1 - \Delta\tau_2} + H_{k2}^{\tau}}{2} - H_2(T_{k1}, P_2)^{\tau - \Delta\tau_1} \right)}{G_1^{\tau - \Delta\tau_1}} \right\} \quad (7)$$

Аналогичный вид имеет соотношение в случае прямотока.

Приближенное обобщенное соотношение для прямотока и противотока имеет вид:

$$\int_0^{V_1} \frac{q_v dw}{G_1} = \psi \cdot \min \left\{ \begin{array}{l} H_1(T_{c_{12}}, P_1)^{\tau - \alpha \tau_1} - H_{c_{11}}^{\tau - \alpha \tau_1} \\ \frac{G_2^{\tau - \alpha \tau_1}}{G_1^{\tau - \alpha \tau_1}} \left(H_{c_{12}}^{\tau - \alpha \tau_1} - H_2(T_{c_{11}}, P_2)^{\tau - \alpha \tau_1} \right) \end{array} \right. \quad (8)$$

Таким образом уравнения (7,8) совместно с (4) позволяют определить энтальпию на выходе из элемента в текущий момент времени по значениям энтальпии в предыдущие моменты времени.

4. Порядок расчета транспорта тепла в схемах

Тепловой процесс в схеме, построенной из нумерованных элементов согласно описанию в разделе 2., рассчитывается из заданного начального состояния для каждого из последующих моментов времени, разделенных известными интервалами.

Каждый шаг расчета включает:

- определение расходов в каждом из элементов с учетом задаваемых изменений режимов насосов и переключений в схеме. Переключения в схеме производятся только в местах разделения потока;

- итерационный процесс определения энтальпий на входах всех элементов с учетом транспорта и подогрева их в предыдущих элементах и тепловых мощностей, передаваемых через стенки элементов (уравнения 2,4,8). Последовательность обхода элементов здесь не существенна, так как режим большинства элементов, например, согласно (7), определяется предисторией процесса. Итерационный характер позволяет рассчитывать элементы, время транспорта теплоносителя через которые меньше шага по времени, т.е. те, для которых определяющим является текущее состояние.

Значения энтальпии, расхода, плотности и т.п. представляют собой временные последовательности для каждого из элементов с возможно весьма большим числом членов. Однако при разумно выбранных объемах элементов схемы (время транспорта через элементы не должно существенно различаться) необходимы только последние члены последовательностей.

Для схемы, представленной на рис. I и содержащей в первом и втором контурах натрия, а в третьем - воду и водяной пар в качестве примера был рассчитан тепловой процесс, включающий:

- разогрев из холодного состояния до номинальных параметров при неизменных расходах по контурам и мощности реактора,
- мгновенное отключение питательной воды (момент τ),
- отключение пара холодного промпрегрева, и отключение и выбег насосов второго контура ($\tau + 50$),
- отключение мощности реактора ($\tau + 80$).

Заданные объемы элементов находятся в интервале 0.5 - 30 м³.

Теплофизические свойства всех теплоносителей рассчитывались по обобщенным табличным зависимостям как функции отклонения от состояния насыщения (с поправкой на давление для плотности пара).

При расчете использовались функции ψ следующего вида

$$\psi = (A - 1) / (A - Q_{\min} / Q_{\max})$$
$$A = \exp \left\{ \frac{\psi_0}{1 - \psi_0} \left(\frac{Q_0}{Q_{\min}} - \frac{Q_0}{Q_{\max}} \right) \right\}$$

Здесь: для теплообменника: $\psi_0 = 0.82$, $Q_0 = 272$ МВт,

для модулей парогенератора: $\psi_0 = 0.62$, $Q_0 = 90$ МВт.

Q_{\min} и Q_{\max} определяются в процессе расчета по формуле (8).

Имеющийся к настоящему времени опыт работы с ФОРТРАН-программой для ЭМ ЕС, реализующей описанную модель

- подтвердил возможность расчета процессов в схемах произвольной сложности с разными теплоносителями в реальном масштабе времени,
- показал, что затраты времени программиста на подготовку данных являются незначительными,
- выявил простоту корректировки параметров модели по имеющимся экспериментальным данным для установок.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Спасоков В.П. и др. Многоэлементная модель расчета процессов в ЯЭУ с ВВЭР при нарушении герметичности первого контура. Семинар ТЭ-78. т.1, Будапешт, 1978 г., стр. 79-89.
2. Букринский А.М., Фуко Р.Д. Многоэлементная модель для расчетного исследования аварий с потерей теплоносителя на АЭС. ТЭ, №7, 1977 г., стр. 77-81.
3. Салтанов Г.А. Системные исследования гидродинамики и теплообмена АЭУ за рубежом (обзор). ТЭ, №10, 1981 г., стр. 71-74.
4. Х.Уонг. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. М., Атомиздат, 1979 г.

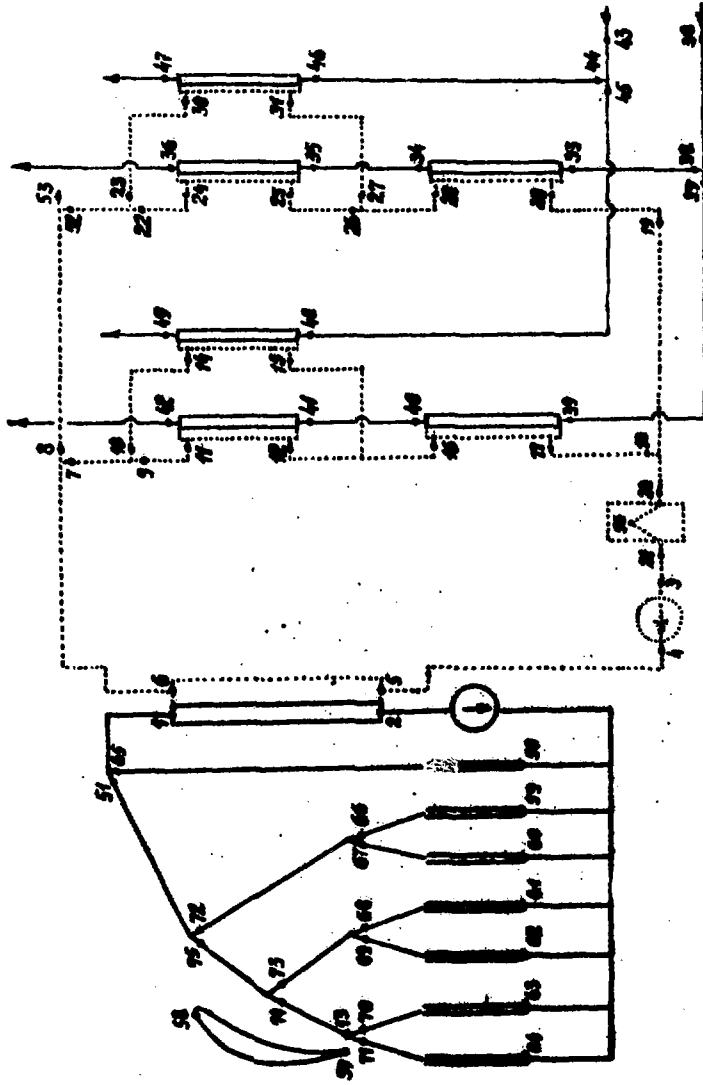


Рис. 1. Фрагмент тепловой схемы ЯЗУ. Контур: — первый, второй, — третий, (57,58) — вырезка зона в баке реактора, (66-75) — течение в объеме бака. Входы теплоносителя: (50,59-64) — в топливные сборки, (1,5) — в промтеплообменник, (11,41) и (24,35) — в перегреватели, (16,39) и (28,33) — в испарители, (14,48) и (30,46) — в промперегреватели, (20) — в буферную емкость.

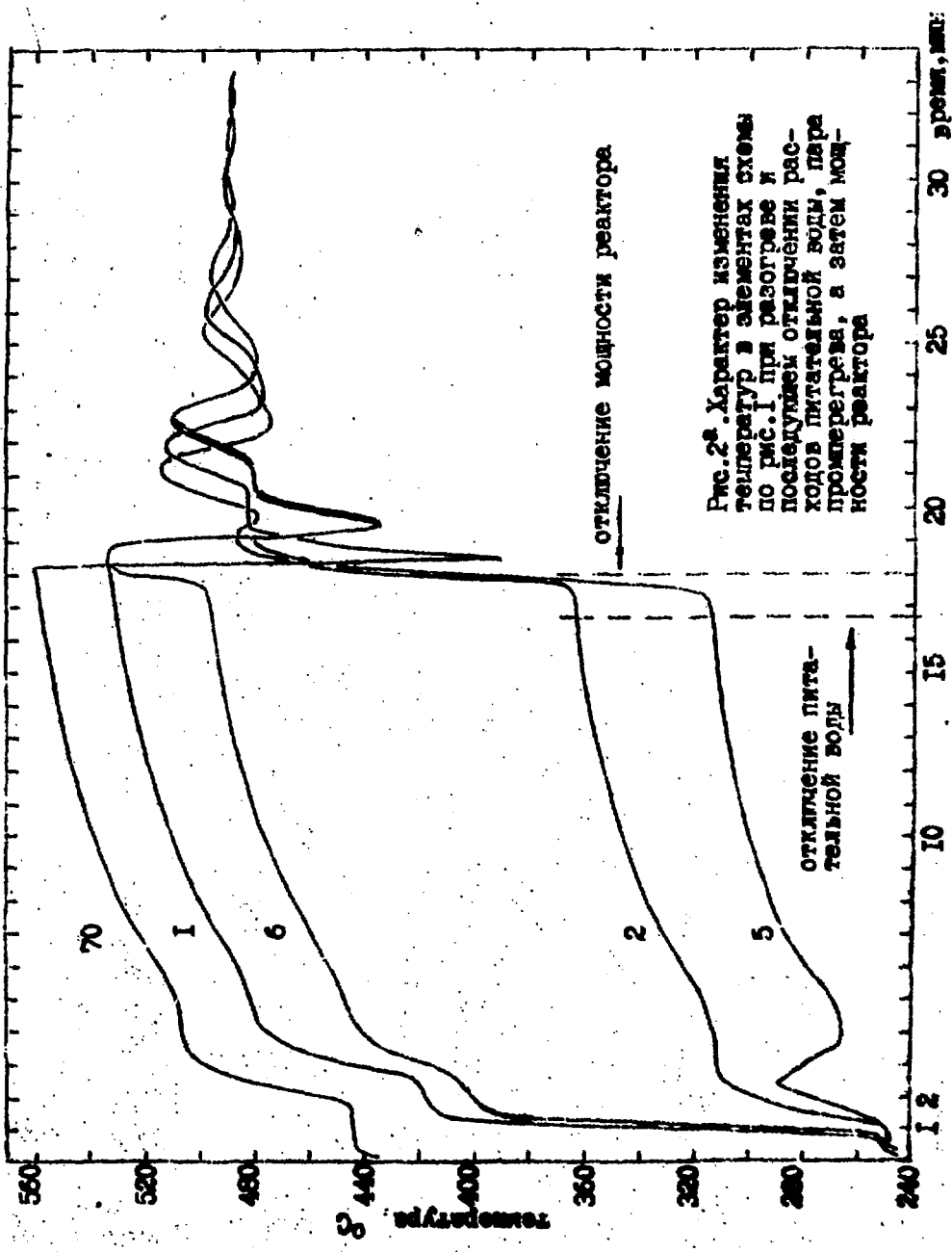


Рис. 2^а. Характер изменения температур в элементах схемы по рис. 1 при разогреве и последующем отключении расходов питательной воды, пара промпрегрева, а затем мощности реактора

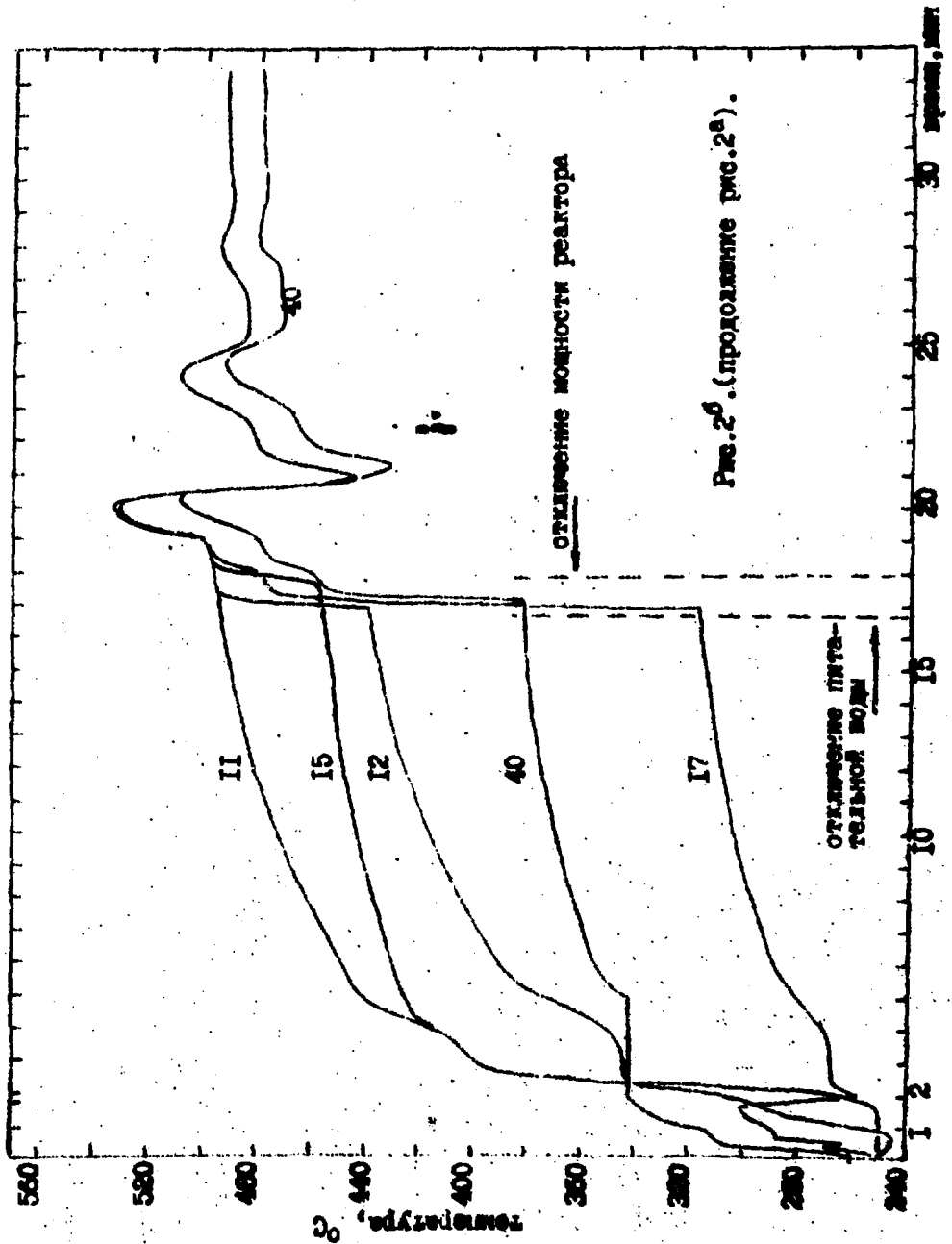


Рис. 2^б. (продолжение рис. 2^а).

Технический редактор Н. П. Герасимова

Подписано к печати 20/VIII-1982 г. Т-14141 Формат 60×90 1/16
Офсетная печать Усл. п. л. 0,75 Уч.-изд. л. 0,5 Тираж 78 экз.
Цена 8 коп. Индекс 3624 ФЭИ-1348

Отпечатано на роталпринте ФЭИ, г. Обнинск

8 коп.

Индекс 3624

**Модель транспорта тепла для многоэлементных схем энергетических установок.
ФЭИ-1348, 1982, 12.**