

## Высокотемпературный реактор-преобразователь «Ромашка»\*

*М. Д. Миллионщиков, И. Г. Гвердцители, А. С. Абрамов, Л. В. Горлов,  
Ю. Д. Губанов, А. А. Ефремов, В. Ф. Жуков, В. Е. Иванцов,  
В. К. Ковырзин, Е. А. Коптелов, В. Г. Косовский, Н. Е. Кухаркин,  
Р. Я. Кучеров, С. П. Лалыкин, В. И. Меркин, Ю. А. Нецлев,  
Б. С. Поздняков, Н. Н. Пономарев-Степной, Е. Н. Самарин,  
В. Я. Серов, В. А. Усов, В. Г. Федин, В. В. Яковлев,  
М. В. Якутович, В. А. Ходаков, Г. В. Комаринцев*

Эффективное использование атомной энергии в установках различного назначения связано с поисками и исследованиями новых способов преобразования энергии. Большой интерес представляет разработка реакторов-преобразователей с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую.

Одной из таких установок является экспериментальный энергетический реактор «Ромашка» Института атомной энергии им. И. В. Курчатова. В этой установке используется одна из наиболее простых по конструкции и надежных в работе систем, основанная на скомпонованном в единый агрегат реакторе-преобразователе, в котором тепло, генерируемое в активной зоне реактора, передается за счет теплопроводности материалов на расположенный на наружной поверхности отражателя термоэлектрический преобразователь.

В реакторе используются твэлы на основе дикарида урана, который по своим свойствам (высокой рабочей температуре и достаточно высоким теплопроводности) является перспективным материалом для твэлов. Хорошие теплофизические и нейтронно-физические параметры реактора обеспечиваются за счет применения в установке металлического бериллия в качестве материала отражателя и графита в качестве конструкционного материала активной зоны. Применение этих материалов в реакторе позволило использовать высокотемпературный преобразователь на основе полупроводников из кремний-германиевого сплава.

\* Доклад № 873, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1964.

### Описание реактора-преобразователя

Ядерный реактор (рис. 1) представляет собой нейтронно-физическую систему, работающую на быстрых нейтронах. Он служит источником тепловой энергии, которая с помощью термоэлементов преобразуется в электрическую энергию.

Энергетический пуск реактора-преобразователя «Ромашка» — первой в мире ядерно-энергетической установки с прямым преобразованием энергии — состоялся 14 августа 1964 г. С этого времени установка работает в режиме оптимальной нагрузки при температуре в центре активной зоны  $1770^{\circ}\text{C}$  и температуре наружной поверхности реактора  $1000^{\circ}\text{C}$ . Электрический ток, снимаемый с преобразователя при параллельном соединении групп термоэлементов, достигает 88 а. По состоянию на 18 ноября 1964 г. выработано более 1000 *кат·ч* электроэнергии.

Испытания установки позволили сделать вывод об одной из важных особенностей реактора-преобразователя «Ромашка» — стабильности его работы. Несмотря на наличие автоматического регулятора, исследователям не приходится вводить его в работу, так как установка практически не нуждается в регулировании. После вывода на номинальный режим мощность и температура с хорошей точностью поддерживаются на заданном уровне за счет саморегулирования реактора, обладающего отрицательным температурным коэффициентом реактивности. Результаты испытаний подтверждают высокую работоспособность полупроводниковых термоэлементов из сплава кремний — германий в полях излучения реактора, работающего на быстрых нейтронах. За 2500 ч работы не обнаружено изменений основных свойств термоэлементов. Электрическая мощность так же, как и э. д. с. преобразователя, практически не меняется.

Результаты испытаний установки изучаются. Они позволят сделать ряд важных выводов для дальнейших исследований и разработки новых реакторов-преобразователей.

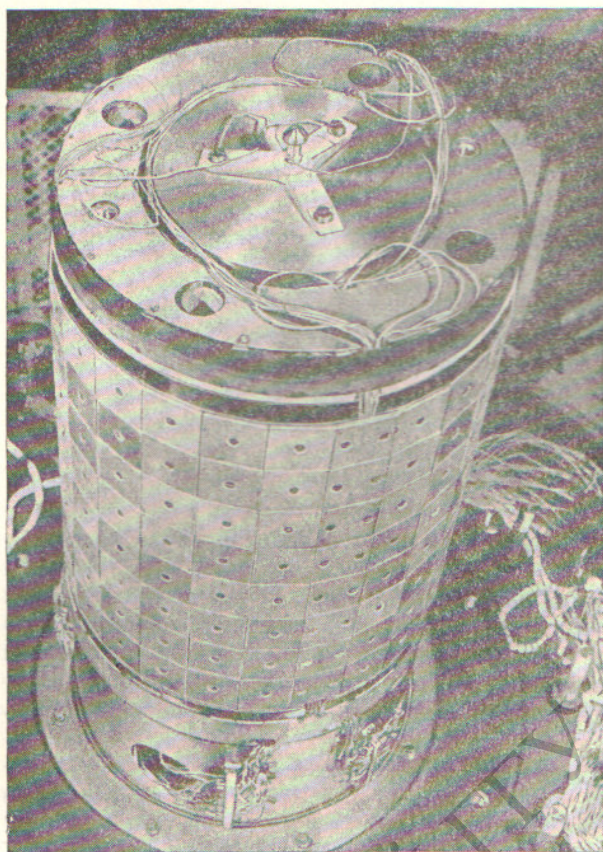


Рис. 1. Общий вид реактора.

Тепло, выделяемое в результате деления  $U^{235}$  в активной зоне реактора, путем теплопроводности передается в радиальном направлении на отражатель и далее с его боковой поверхности на примыкающий к отражателю полупроводниковый преобразователь. Реактор цилиндрической формы; состоит из активной зоны и отражателя. Расположение реактора вертикальное.

Активная зона реактора по высоте набирается из твэлов, каждый из которых выполнен из графитового корпуса и пластин из дикарида урана с обогащением 90% по  $U^{235}$ . Общий вес  $U^{235}$  в активной зоне 49 кг. Радиальный отражатель собран из коаксиально расположенных элементов из бериллия и графита. Торцовые отражатели изготовлены из металлического бериллия. Для уменьшения утечек тепла через торцы реактора применяется теплоизоляция.

Система регулирования реактора состоит из четырех стержней, расположенных в радиаль-

ном бериллиевом отражателе, и нижнего торцового отражателя. Стержень АР, состоящий из бериллия и окиси бериллия в оболочке из жаропрочной стали, осуществляет автоматическое регулирование реактора. Ручное регулирование производится движением стержня РН, который состоит из рассеивающей части и основы окиси бериллия и бериллия и поглощающей части на основе борсодержащего сплава. Температурный эффект компенсируется движением нижнего торцового отражателя. Для аварийной защиты реактора используются два аварийных стержня АЗ, расположенных в радиальном отражателе, и нижний торцовый отражатель. По конструкции стержни АЗ аналогичны стержню РР. Привод всех органов регулирования, кроме стержня автоматического регулирования АР, осуществляется помощью гидравлической системы. Стержень АР перемещается сервоприводом с электрическим питанием. Приводы органов регулирования и защиты расположены снизу под корпусом реактора.

В качестве термоэлектрического преобразователя в установке используются термоэлементы на основе кремний-германиевого сплава. Термоэлементы представляют собой два термостолбика с *n*- и *p*-проводимостью, соединенные по горячей стороне коммутационной пластиной. По холодной стороне отдельные пары термостолбиков коммутируются между собой в единую цепь. В целом термоэлектрический преобразователь установки разбит на четыре группы термоэлементов, каждая из которых имеет независимые силовые выводы. Таким образом, конструкция преобразователя установки позволяет исследовать характеристики как отдельных групп, так и всего преобразователя при последовательном или параллельном соединении групп. Внутри каждой из четырех групп преобразователя термоэлементы коммутируются последовательно в четыре параллельные цепи. Общий вид преобразователя представлен на рис. 2.

Ниже приведены основные параметры реактора-преобразователя:

Теплоэнергетические параметры установки

Электрическая мощность, <i>квт</i> *	0,50—0,8
Общая тепловая мощность, <i>квт</i> **	40
Максимальная температура бериллиевого отражателя, °С	1200

\* В зависимости от температурных условий.  
\*\* С учетом утечек.

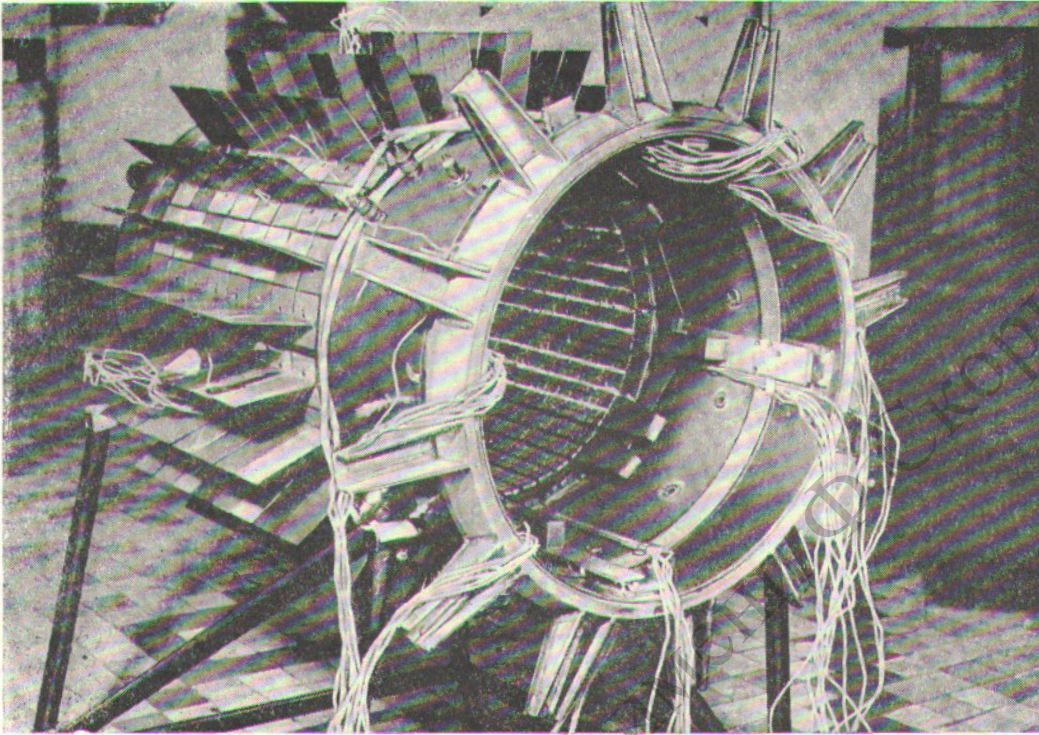


Рис. 2. Общий вид термоэлектрического преобразователя.

Максимальная температура наружной поверхности бериллиевого отражателя, °С	980
Средняя температура основания излучающих ребер, °С	550
Максимальная температура твэлов из диоксида урана, °С	1900

**Нейтронно-физические характеристики реактора**

Загрузка $U^{235}$ , кг	49
Эффективность, %	
стержня AP	0,2
стержня PP	0,4
стержня AZ	0,4
всех стержней регулирования	1,4
подвижного торцевого отражателя	3,5
Общий поток нейтронов, нейтр/см <sup>2</sup> ·сек:	
в центре активной зоны	$10^{13}$
на границе активной зоны	$7 \cdot 10^{12}$
Утечка нейтронов из реактора, нейтр/см <sup>2</sup> ·сек	$3 \cdot 10^{11}$

**Выбор параметров установки**

Энергетические возможности реактора-преобразователя без теплоносителя определяются предельными характеристиками используемых в нем материалов, размерами его основных элементов и их конструктивным оформлением. Тесная взаимосвязь этих параметров потребовала выполнения широкого круга расчетно-

теоретических и экспериментальных теплофизических, нейтронно-физических и материаловедческих исследований, направленных на отыскание оптимальных характеристик установки и обоснование работоспособности ее элементов.

**Теплоэнергетические расчеты.** Электрическая мощность установки в конечном счете определяется тепловым режимом преобразователя, параметрами его конструкции и физическими свойствами материалов. Выражение, описывающее величину электрической мощности, можно представить в виде

$$W = \frac{M}{(1+M)^2} \times \left[ 1 - \frac{r_K s}{l(Q_1 + Q_2)} \frac{2\kappa_3 s_3}{s(\kappa_1 + \kappa_2)} \right] \times \frac{2Q_n l a^2 \left[ \frac{1}{M+1} \cdot \frac{T_r}{T_r - T_x} - \frac{1}{2} \frac{1}{(M+1)^2} \right]}{1 + \frac{nms(Q_1 + Q_2)(\kappa_1 + \kappa_2)}{\sum_{i=1}^{n_g} \sum_{k=1}^{n_g} \alpha_i a_k Q_i Q_k}} \times \frac{1}{(x_1 + x_2)^2 \frac{s}{m} \sum_i n_i (Q_{1i} + Q_{2i})}$$

где  $Q_i$  — тепловой поток через  $i$  зону;  $Q_{\Pi}$  — полный тепловой поток через преобразователь;  $\kappa$  — коэффициент теплопроводности;  $\rho$  — удельное сопротивление;  $\alpha$  — коэффициент термо-э. д. с.;  $l$  — длина термостолбика;  $s$  — сечение термостолбиков;  $s_3$  — сечение теплоизоляции между столбиками;  $n_s$  — число зон;  $n_z$  — число последовательно соединенных пар;  $m$  — число параллельно соединенных пар;  $T_r T_x$  — температура горячего и холодного спаев полупроводников;  $r_k$  — сопротивление коммутации одной термопары;  $M$  — отношение сопротивления внешней нагрузки к внутреннему сопротивлению преобразователя. (Индексы 1 и 2 относятся к полупроводниковым материалам типа  $n$  и  $p$ ;  $i$  или  $k$  — номер зон.)

Неравномерность распределения температур и тепловых потоков по внешней поверхности радиального отражателя учитывается этой формулой приближенно путем разбиения преобразователя по высоте на кольцевые зоны, в пределах которых температурные условия принимаются одинаковыми. Влиянием неравномерности на эффекты Джоуля и Пельтье пренебрегается.

Особенностью установки является то, что режим работы преобразователя, а следовательно, и выдаваемая им электрическая мощность определяются допустимым уровнем температуры отдельных элементов реактора и преобразователя и возможностями сброса тепла излучателем. В связи с этим для определения энергетических параметров установки необходимо было выполнить тепловой расчет реактора-преобразователя в целом.

Задача о распределении температур в активной зоне, отражателе и преобразователе сводится к решению уравнений теплопроводности в многозонной системе с нелинейными граничными условиями, описывающими передачу тепла излучением. Численное решение этих уравнений было проведено на электронно-вычислительной машине.

Распределение температур в радиальном отражателе для одного из режимов работы показано на рис. 3.

Элементы активной зоны реактора находятся в напряженных условиях как по уровню температур, так и по температурным перепадам, определяющим термические напряжения. В связи с этим была решена задача о влиянии возможных нарушений целостности тела на повышение температуры в активной зоне. Решение было выполнено с помощью метода электромоделирования температурных полей на электропроводной бумаге.

В рассматриваемой системе тепло, прошедшее через преобразователь, отводится излучением. Максимальный теплоотвод с поверхности при заданной средней температуре холодных слоев преобразователя обеспечивает наибольшую электрическую мощность при прочих равных условиях. Для отыскания оптимальной формы излучающей поверхности (число ребер, размер, профиль) была решена система интегро-дифференциальных уравнений, описывающая распределение температуры в ребрах, с учетом взаимного облучения элементов и теплопроводности. На рис. 4 приведена зависимость теплоотвода от веса и числа ребер.

С учетом результатов тепловых расчетов системы была определена электрическая мощность установки в зависимости от тепловой мощности, проходящей через преобразователь при вариации величины добротности термоэлемента.

**Нейтронно-физические расчеты.** Нейтронно-физические характеристики реактора были рассчитаны на электронно-вычислительной машине при использовании многогруппового метода статистических испытаний (метод Монте-Карло). Применение этого метода в данном случае позволило надежно учесть геометрические и физические особенности системы, связанные с гетерогенной структурой активной зоны,

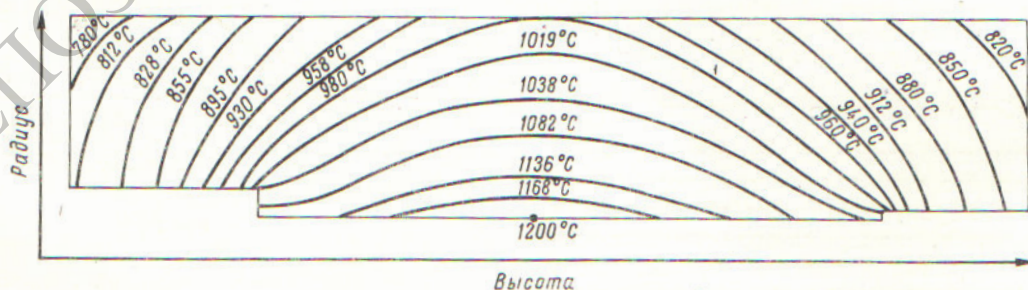


Рис. 3. Распределение температур по сечению радиального отражателя.

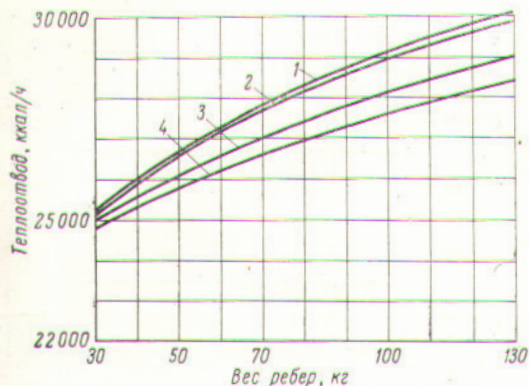


Рис. 4. Зависимость тепловода от веса ребер (температура основания ребер 600° С): 1 - 6 ребер; 2 - 9 ребер; 3 - 18 ребер; 4 - 36 ребер.

наличием каналов и зазоров сложной конфигурации, резко неоднородными физическими свойствами материалов активной зоны и отражателя, специфической системой регулирования реактора и т. д. При расчетах использовалась многогрупповая (21 группа) система констант, которая учитывает резонансную структуру сечения  $U^{238}$ , реакцию  $(n, 2n)$  на бериллии и неупругие переходы в первых девяти группах. В процессе расчета прослеживалось около 50 000 нейтронных историй.

Экспериментальное изучение характеристик элементов установки. Для обоснования проектных параметров установки были проведены экспериментальные теплофизические и металлофизические исследования материалов и узлов установки.

Исследованы контактное взаимодействие дикарида урана с графитом, испаряемость дикарида урана в инертной среде и вакууме при температурах до 2000° С (рис. 5). Изучены температурная зависимость коэффициента теплопроводности дикарида урана (рис. 6), коэффициента линейного расширения и другие характеристики в широком интервале температур. Эти исследования наряду с исследованием термостойких характеристик дикарида урана, испытаниями макетных твэлов и петлевыми испытаниями образцов из дикарида урана показали работоспособность твэлов в рабочих условиях.

Использование в реакторе бериллиевого отражателя, работающего при больших тепловых нагрузках в области температур, близких к температуре плавления, потребовало экспериментального исследования взаимодействия металлического бериллия с различными конструк-

ционными материалами, изучения коэффициента теплопроводности бериллия, исследования деформируемости и термостойкости бериллия.

Для уменьшения утечек тепла через торцы реактора и между термоэлементами преобразователя в установке используется высокотемпературная теплоизоляция. В связи с этим была изучена теплопроводность теплоизоляции в различных средах в области рабочих температур.

Одна из важных сторон проведенных исследований — это изучение работоспособности элементов термоэлектрического преобразователя в потоках нейтронного и  $\gamma$ -излучения. Неоднократные многочасовые испытания термоэле-

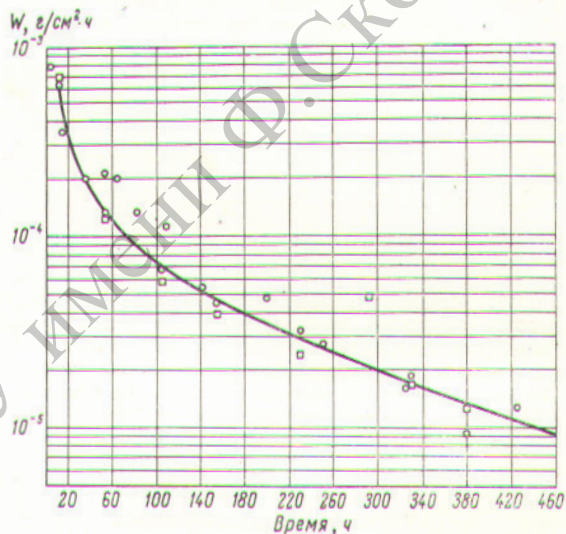


Рис. 5. Скорость испарения  $w$  дикарида урана в инертной среде при  $t = 2000^\circ \text{C}$  (разные точки — разные образцы). Данные Л. К. Мизрахи и Ю. М. Уткина.

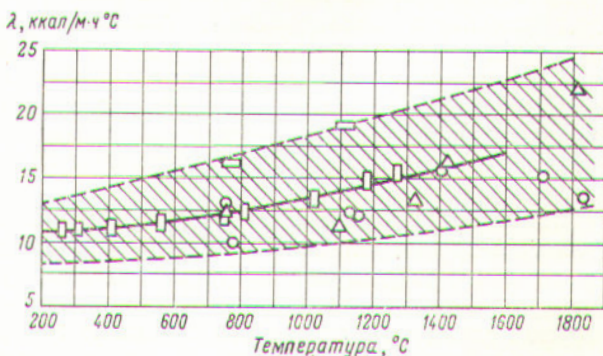


Рис. 6. Зависимость теплопроводности дикарида урана от температуры (разные точки — разные образцы). Данные А. Г. Харламова.

ментов в петлях реактора РФТ при интегральных потоках нейтронов  $3 \cdot 10^{19}$  *тепл.нейтр/см<sup>2</sup>* позволили сделать вывод, что основные свойства термоэлементов изменяются в допустимых пределах (рис. 7).

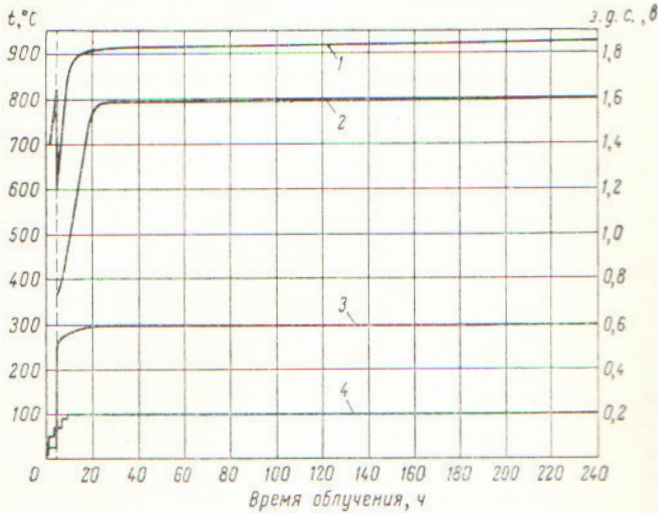


Рис. 7. Изменение основных параметров полупроводниковых термоэлементов в процессе реакторного облучения (максимальный интегральный поток нейтронов  $\sim 3 \cdot 10^{19}$  *нейтр/см<sup>2</sup>*). Данные Г. М. Павлова:  
1 — температура горячего спая; 2 — термо-в.д.с. секции; 3 — перепад температуры на термоэлементах; 4 — мощность реактора.

### Стендовые исследования нейтронно-физических и теплоэнергетических характеристик установки

**Исследование нейтронно-физических характеристик.** Было осуществлено пять различных сборок, отличающихся концентрацией делящегося материала. На каждой сборке был проведен комплекс исследований, охватывающий широкий круг вопросов: зависимость критических загрузок от состава активной зоны, эффективность отражателей и органов регулирования, распределение тепловыделения в активной зоне, влияние на реактивность конструктивных зазоров и т. д.

Большое внимание было уделено изучению влияния перемещения нижнего торцевого отражателя и профилирования активной зоны на нейтронно-физические характеристики реакторной системы, а также исследованию эффективности стержней регулирования и полей тепловыделения. Некоторые из полученных результатов приведены на рис. 8, где показано распределение тепловыделения по радиусу и

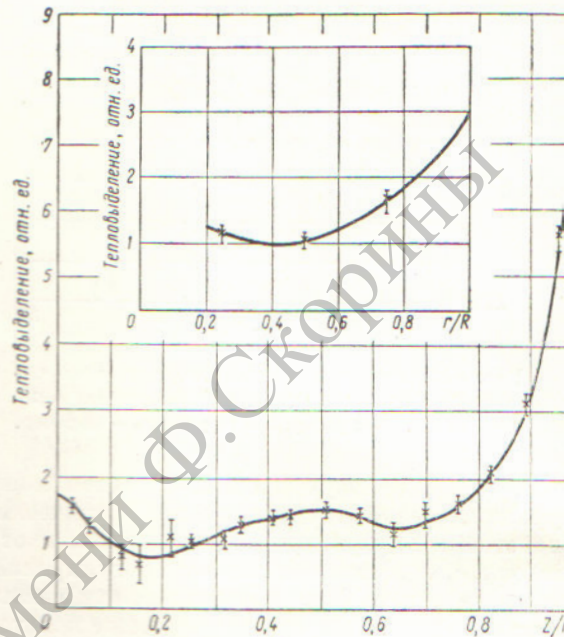


Рис. 8. Относительное распределение тепловыделения по высоте и радиусу активной зоны ( $R$  — радиус и высота активной зоны;  $r$  и  $z$  — координаты). Данные А. М. Крутова.

высоте активной зоны. Реактивность во всех этих случаях измерялась различными методами по периоду разгона, импульсным и интегральным.

Сравнение результатов измерений реактивности различными методами позволило оценить величину эффективности запаздывающих фотонейтронов, обусловленных наличием бериллиевого отражателя. Установлено, что в реакторах подобного типа фотонейтроны практически отсутствуют и для обработки экспериментальных данных могут быть использованы характеристики шести групп запаздывающих нейтронов.

**Исследование теплоэнергетических характеристик.** Заключительному этапу испытания реактора-преобразователя на натурном испытательном стенде предшествовали комплексные испытания полномасштабной тепловой модели реактора-преобразователя на стенде электронагревом. Цель указанных испытаний — проверка работоспособности всей установки в целом и ее отдельных узлов, а также исследование рабочих параметров установки в стационарных и нестационарных режимах.

В процессе испытаний постоянно измерялись температурные поля в различных элементах установки. Для этого в реакторе и преобразователе было установлено 53 вольфрам-ренийевых и 86 хромель-алюмелевых термопар.

Электрические характеристики преобразователя измерялись с помощью специального электрического пульта, который позволял, во-первых, для каждой из четырех групп термоэлементов плавно менять нагрузку от 0,1 до 10 ом и проводить измерения электродвижущей силы, тока короткого замыкания, рабочего тока и напряжения; во-вторых, проводить электрические измерения не только раздельно по группам, но и при последовательном и параллельном соединении групп. Электрическая мощность преобразователя определялась в режиме максимальной мощности. В номинальном режиме установка испытывалась более 1000 ч.

Анализ результатов ресурсных испытаний установки позволил сделать вывод о хорошей работоспособности всех основных элементов реактора-преобразователя. Характеристики установки в течение всего времени испытаний были достаточно стабильны. Термоэлектродвижущая сила преобразователя на протяжении всего ресурса практически оставалась постоянной. К концу испытаний было замечено некоторое увеличение внутреннего сопротивления преобразователя, в связи с чем электрическая мощность, снимаемая с преобразователя (в режиме максимальной мощности), уменьшилась в среднем на 10%.

Проведенные испытания позволили изучить и показать работоспособность активной зоны, отражателя и преобразователя в рабочих условиях.



## Развитие энергетических реакторов типа реакторов Белоярской АЭС с ядерным перегревом пара\*

*Н. А. Доллежал, И. Я. Емельянов, Н. И. Алещенков, А. Д. Жирнов, Г. А. Зверева,  
Н. Г. Моргунов, Ю. И. Митяев, Г. Д. Князева, К. А. Крюков, В. Н. Смолин,  
Л. И. Лукина, В. И. Кононов, В. А. Петров*

### Введение

Непрерывно возрастающая потребность в электроэнергии требует увеличения темпов развития энергетики, для чего наиболее целесообразно сооружать установки большой единичной мощности.

В настоящее время в Советском Союзе изготавливаются и находятся в стадии проектирования турбоагрегаты на различные параметры пара (табл. 1).

Как видно из табл. 1, увеличение мощности турбоагрегата связано с повышением температуры и давления используемого пара.

Перспективы развития ядерной энергетики, как и обычной энергетики, связаны с сооружением атомных электростанций большой единичной мощности. При этом целесообразно

устанавливать на атомных электростанциях энергетические реакторы, обеспечивающие выработку пара высоких параметров, что позволяет использовать изготовляемые и разрабатываемые турбоагрегаты большой мощности и обеспечивает высокий к. п. д. АЭС.

Указанным требованиям вполне соответствуют бескорпусные уран-графитовые реак-

Таблица 1  
Параметры пара и мощность изготовляемых и проектируемых в Советском Союзе турбогенераторов

Параметры пара перед турбиной		Электрическая мощность, Мвт
давление, ата	температура, °С	
90	535	100
130	565/565	150, 200
240	580/565	300, 500, 800, 1000

\* Доклад № 309, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1964.