

УДК 621.039.517.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЕРМЕТНЫХ ТВЭЛОВ С НИЗКООБОГАЩЕННЫМ ТОПЛИВОМ В РЕАКТОРЕ ИВГ.1М

И.В. Прозорова*, Ю.Б. Чертков, А.С. Сураев

Томский политехнический университет

*Институт атомной энергии Национального ядерного центра, г. Курчатов, Казахстан

E-mail: chertkov@tpu.ru

Приведены результаты оценок нейтронно-физических параметров активной зоны реактора ИВГ.1М, полученные в рамках перевода реактора на топливо пониженного обогащения. Сделан вывод о том, что в качестве нового вида топлива могут выступать керметные твэлы на основе микротоплива с обогащением по ^{235}U не более 20 %. Приведены графики и расчетные характеристики модернизированного реактора.

Ключевые слова:

Реактор, тепловыделяющий элемент, тепловыделяющая сборка, теплоноситель, уран, низкообогащенное топливо.

Key words:

Reactor, fuel element, fuel rod array, coolant, uranium, low-enriched fuel.

Исследовательский водоохлаждаемый реактор ИВГ.1М был создан на базе высокотемпературного газоохлаждаемого реактора ИВГ.1, который с 1975 по 1988 гг. использовался для испытания газоохлаждаемых тепловыделяющих сборок высокотемпературных реакторов. Основной целью предыдущей реконструкции реактора ИВГ.1М, проведенной до 1990 г., являлось создание водоохлаждаемой реакторной установки для петлевых экспериментальных исследований, направленных на обоснование безопасности объектов атомной энергетики, ядерной техники и технологии. Топливом в нем является уран-циркониевая композиция с обогащением 90 % по ^{235}U [1].

Ограниченные возможности системы охлаждения данного реактора приводят к тому, что длительность непрерывной работы реактора (пуска) даже на мощности 6 МВт не превышает 6...7 ч. Кроме того, на длительность пуска оказывает влияние загрузка в его центральный канал различных облучаемых устройств, вносящих в реактор отрицательную реактивность, и большое значение стационарного эффекта отравления ^{135}Xe . В результате длительность непрерывной работы реактора на мощности 6 МВт не превышает 4...6 ч.

Для расширения экспериментальных возможностей предполагается проведение модернизации реакторной установки ИВГ.1М, в рамках которой планируется перевод реактора на новое топливо и проведение реконструкции системы водяного охлаждения реактора. Одновременно должна быть решена и задача конверсии активной зоны — снижение обогащения используемого топлива исследовательского реактора ниже 20 % по ^{235}U , которое исключило бы работу с материалом, из которого возможно извлечение высокообогащенного урана. Исследованию этих проблем и посвящена данная работа.

При проведении модернизации и конверсии исследовательского реактора в первую очередь встает задача не только сохранить его эксперимен-

тальные возможности, но и попытаться их увеличить. В первую очередь параметры реактора зависят от используемых твэлов. Было решено использовать для дальнейшей работы керметные твэлы на основе микротоплива с матричной структурой следующего состава: UO_2 с 20 % обогащением по ^{235}U в матрице из сплава на основе Zr. При этом изменению должна подвергнуться лишь конструкция ТВС, а внешние размеры и основные узлы ТК должны быть сохранены. При выборе оптимального содержания низкообогащенного топлива в такой матрице должна быть обеспечена длительная работа реактора без перегрузки. На рис. 1 представлена схема поперечного сечения этого реактора.

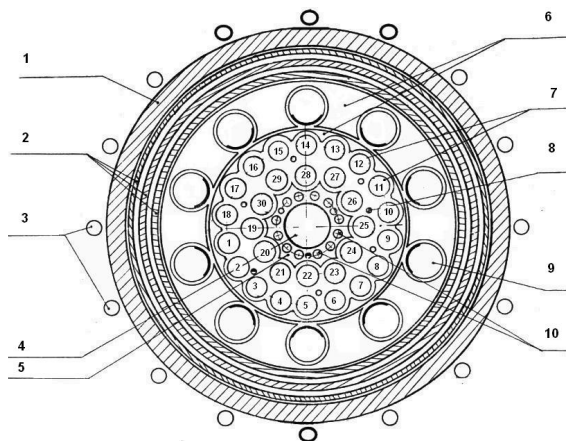


Рис. 1. Схема поперечного сечения реактора ИВГ.1М: 1) корпус; 2) боковые экраны; 3) ионизационные камеры; 4) центральная ампула; 5) центральный вытеснитель; 6) отражатель; 7) технологические каналы (ТК); 8) источник нейтронов; 9) регулирующие барабаны (РБ); 10) стержни компенсации реактивности (СКР)

Существующая тепловыделяющая сборка (ТВС) состоит из тонкостенной цилиндрической обоймы, торцевых проницаемых решеток и пакета твэлов внутри. Скрепление всех элементов ТВС в единый блок осуществляется с помощью стерж-

ня, установленного по центру пакета и стягивающего ТВС по оси. В каждой из сборок находится по 468 твэлов, установленных по треугольной решетке. Высота активной части технологических каналов 1-го и 2-го рядов составляет 800 мм, а в каналах 3-го ряда – 600 мм. На рис. 2 показано поперечное сечение ТВС типа ВОТК (водоохлаждаемый технологический канал), а в табл. 1 приведены основные параметры этого реактора.

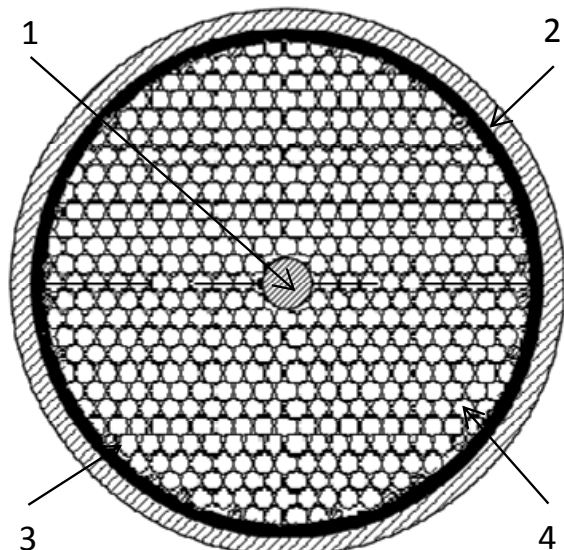


Рис. 2. Поперечное сечение водоохлаждаемого технологического канала (ВОТК): 1) центральный стержень; 2) оболочка канала; 3) вытеснители; 4) твэлы

Таблица 1. Основные параметры реактора ИВГ.1М

Параметр	Значение
Эквивалентный диаметр активной зоны, мм	548
Загрузка реактора по ^{235}U , г	4590
Суммарная эффективность системы РБ, $\beta_{\text{эф}}$	$11,3 \pm 0,3$
Эффективность системы из 12 СКР, $b\beta_{\text{эф}}$	$4,8 \pm 0,1$
Запас реактивности реактора с введенными СКР, $\beta_{\text{эф}}$	$6,0 \pm 0,2$
Положение системы РБ в критическом состоянии, град.	79
Эффективная доля запаздывающих нейтронов	0,0073
Среднее время жизни мгновенных нейтронов, с	$0,85 \cdot 10^{-4}$
Температура на входе в активную зону, °C	10...20
Температура на выходе из активной зоны, °C	<97
Общий расход теплоносителя через реактор, м ³ /с	<0,36

Замена топлива и твэлов должна произойти так, чтобы новый пучок самодистанционирующихся твэлов вписался в габариты чехла технологического канала.

Среди рассмотренных вариантов топлива наиболее перспективным является использование керметных твэлов на основе микро топлива с обогащением не более 20 % по ^{235}U . Использование такого топлива должно обеспечить длительную работу без перегрузки.

При проведении нейтронно-физических расчетов была использована программа MCNP5 [2],

предназначенная для решения задач переноса (нейтронного, фотонного и электронного) излучения в произвольной трехмерной геометрии. Расчетная модель реактора для программы MCNP5 максимально соответствовала реальной конструкции реактора ИВГ.1М вплоть до возможности точно задавать угловое положение РБ от 0° (поглощающие элементы развернуты к активной зоне) до 180° (поглощающие элементы максимально удалены от активной зоны).

Одной из особенностей реактора ИВГ.1 было то, что в нем реализовано несколько вариантов активных зон, отличавшихся высотой активной зоны – 800 и 600 мм. При высоте активной зоны 800 мм (высота поглощающей части системы РБ немного больше этого значения) эффективность системы РБ составляла $16,3 \beta_{\text{эф}}$, при высоте активной зоны 600 мм – $11,3 \beta_{\text{эф}}$. В существующей активной зоне ТВС внешнего 3-го ряда имеют высоту 600 мм, а эффективность системы РБ – $11,3 \beta_{\text{эф}}$.

Увеличение эффективности системы РБ тоже способствует расширению экспериментальных возможностей (увеличению длительности пусков реактора) и, естественно, в модернизированном варианте высота активной зоны должна составлять 800 мм.

Для верификации модели была выбрана серия из нескольких интегральных экспериментов на реакторе, во время которых на минимально контролируемом уровне мощности были получены положения регулирующих барабанов в критическом состоянии (экспериментальное значение реактивности равно нулю). Расчетная модель детально описывала геометрию активной зоны, расположение, материальный состав твэлов и положение регулирующих барабанов. В табл. 2 приведены результаты расчета экспериментальных критических состояний реактора.

Таблица 2. Результаты расчета критических состояний реактора ИВГ.1М

Конфигурация активной зоны	Критическое положение РБ, град.	Эффективный коэффициент размножения	Расчетная реактивность, $\beta_{\text{эф}}$
Во всех ячейках реактора находятся ТВС типа ТК-300	68	1,00287	0,39
Во всех 30 ячейках реактора находятся ТВС типа ВОТК	79	1,00211	0,29
27 ячеек реактора заполнены ТВС типа ВОТК, в 3-х ячейках физическими макетами. В центре реактора сборка 73.000	89	1,00141	0,19
27 ячеек заполнены ТВС типа ВОТК, в 3-х ячейках – физическими макетами ВОТК, в центре реактора канал ТК300	62	1,00210	0,29

Среднее отклонение результатов расчета критических состояний от экспериментального составляет $(0,29 \pm 0,1) \beta_{эф}$. Небольшое значение этого отклонения и близость расчетных результатов друг к другу позволяют говорить о том, что расчетная модель реактора ИВГ.1М достаточно корректно описывает реактор и позволяет прогнозировать его поведение при замене топлива.

В качестве топлива в реакторе предлагается использовать керметное топливо на основе микро топлива [3] с матричной структурой (диоксид урана в матрице из сплава на основе циркония) с обогащением 20 % по изотопу ^{235}U . При этом изменению подвергается лишь конструкция ТВС, основные узлы ТК будут сохранены. Внешний контур ТК, расположение и высота активной зоны должны совпадать с существующим каналом ВОТК. Схема предлагаемого керметного твэла на основе микро топлива показана на рис. 3.

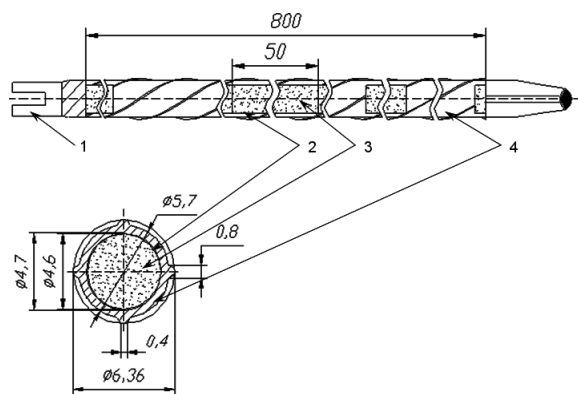


Рис. 3. Схема керметного твэла: 1) концевые детали; 2) контактный подслой; 3) тепловыделяющий керметный сердечник; 4) оболочка с дистанционирующими ребрами

Для расчетов выбраны три варианта конструкции ТВС с керметным топливом, различающиеся диаметром твэлов и их количеством в ТВС:

- 90 твэлов описанным диаметром 5,7 мм (вариант 1);
- 150 твэлов описанным диаметром 4 мм (вариант 2);
- 144 твэлов описанным диаметром 4 мм (вариант 3).

В качестве материала матрицы керметного твэла используется сплав на основе циркония. Топливный сердечник высотой 800 мм набирается из таблеток высотой 50 мм и диаметром 4,6 мм (для варианта 1) размещается в оболочке с внутренним диаметром 4,7 мм. Зазор между оболочкой и топливным сердечником составляет 0,05 мм и заполняется силумином.

Во всех вариантах высота активной зоны составляет 800 мм, сохраняется корпус ВОТК из сплава АМГ-5 диаметром 76 мм с толщиной стенки 3 мм. Внутри корпуса между двумя торцевыми решётками из сплава АМГ-5, соединёнными центральным стержнем, располагаются цилиндрические твэлы со спиральными рёбрами.

Между корпусом ТК и твэлами размещаются до 30 заполнителей, предназначенных для плотной упаковки твэлов в объеме канала. Заполнители и центральный стержень изготавливаются из сплава Э110 и вместе с решётками образуют контейнер для размещения твэлов.

Система регулирования реактора ИВГ.1М состоит из 10 регулирующих барабанов, имеющих эффективность (в существующей активной зоне) $11,3 \beta_{эф}$. Кроме того, в ее состав входят 12 стержней компенсации реактивности из бериллия, которые могут перемещаться только вручную и только на неработающем реакторе. В существующей компоновке реактора эти стержни находятся в активной зоне (при их извлечении из активной зоны они заменяются реакторной водой, что приводит к уменьшению реактивности реактора на $\sim 5 \beta_{эф}$).

Извлечение этих стержней позволит повысить запас реактивности реактора, который можно будет использовать для компенсации отрицательной реактивности, вносимой в реактор облучаемыми экспериментальными образцами. Поэтому при нейтронно-физических расчетах модернизируемой активной зоны СКР были извлечены из активной зоны.

Максимально допустимая объемная доля диоксида урана с обогащением 20 % в композиции изготавливаемого керметного топлива может быть доведена до 75 %. Но при этом запас реактивности реактора для всех трех вариантов в среднем составил бы более $30 \beta_{эф}$, что существенно превышает эффективность органов регулирования.

На рис. 4 приведена схема одного из вариантов конструкции технологического канала с керметным топливом пониженного обогащения [3].

Для выбора содержания ^{235}U и оптимальной конструкции из трех предлагаемых вариантов ТВС с керметным топливом были проведены нейтронно-физические расчеты реактора ИВГ.1М со сделанными выше предположениями. При этом точно задавалась конструкция ТВС, положение и материальный состав всех твэлов в активной зоне.

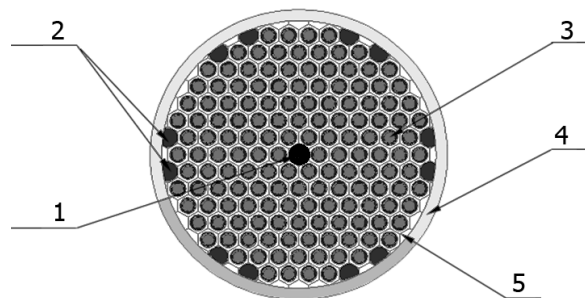


Рис. 4. Конструкция ТВС со 150-ю твэлами с керметным топливом: 1) центральный стержень; 2) заполнители; 3) твэлы; 4) корпус ТК; 5) теплоноситель

В этом состоянии в соответствии с правилами ядерной безопасности реактор должен быть подкритичным, а значение подкритичности должно быть не менее $3 \beta_{эф}$. Если это значение взять с запасом ($4 \beta_{эф}$), то концентрации диоксида можно считать оптимальными.

Этому требованию удовлетворяют все три рассмотренных варианта в диапазоне доли диоксида в матрице сердечника твэлов не более 33...35 %.

С другой стороны избыточное значение отрицательной реактивности в этом состоянии приводит к сокращению длительности работы реактора. Поэтому оптимальное значение реактивности реактора при положении системы РБ 0° должно составлять $4 \beta_{эф}$. Этому значению соответствует оптимальные доли диоксида в матрице твэлов 33,9, 35,6 и 33,8 % соответственно для вариантов ТВС из 90, 144 и 150 твэлов.

На рис. 5 приведены зависимости запаса реактивности реактора ИВГ.1М для трех вариантов компоновки ТВС от объемной доли диоксида в матрице сердечников твэлов.

Необходимо отметить, что в варианте сборки с числом твэлов 90 используются твэлы с диаметром сердечника 4,6, а не 3,0 мм, как в вариантах со 144 и 150 твэлами. Это приводит к тому, что при оптимальном содержании диоксида урана в сердечнике загрузка UO_2 в реактор составит 40,6 кг для сборок с 90 твэлами и примерно 28,8 кг для двух других вариантов.

Запас реактивности, во многом определяющий работоспособность реактора, вычисляется при положении системы РБ 180° (поглощающий слой развернут в крайнее положение от активной зоны). В этом положении в реакторе реализуется максимальная реактивность. При оптимальных значениях концентрации диоксида урана в твэлах в реакторе ИВГ.1М может быть достигнут запас реактивности, равный 20,5 и 17,8 $\beta_{эф}$ для вариантов загрузки 90 твэлов и двух других. Компенсирующая способность системы из 10 РБ составит 24,6 и 21,8 $\beta_{эф}$ соответственно.

По сравнению со штатным (существующим) вариантом загрузки компенсирующая способность системы из 10 РБ увеличивается с 11,3 $\beta_{эф}$ почти в 2 раза. Это позволяет при сохранении эффектив-

ности аварийной защиты уменьшить положение РБ, соответствующее взводу аварийной защиты с 48 до ~35°.

В табл. 3 приведены основные расчетные параметры рассмотренных вариантов загрузки реактора ИВГ.1М.

Таблица 3. Основные расчетные параметры рассмотренных вариантов загрузки реактора ИВГ.1М

Наименование параметра	Варианты конструкции ТВС		
	1	2	3
Число твэлов	90	150	144
Диаметр твэла, мм	5,7	4,0	4,0
Диаметр сердечника, мм	4,6	2,8	2,8
Доля диоксида урана в сердечнике, %	33,9	35,6	33,8
Загрузка реактора диоксидом, кг	40,6	25,3	25,0
Компенсирующая способность РБ, $\beta_{эф}$	24,6	21,8	21,8
Запас реактивности, $\beta_{эф}$	20,6	17,8	17,8
Диаметр твэла по рёбрам, мм	6,360	5,144	5,144

Учитывая то, что во 2-м и 3-м вариантах загрузки требуется существенно меньше диоксида урана с обогащением 20 %, следует при окончательном выборе варианта загрузки рекомендовать последний из них.

Значения плотности потока тепловых нейтронов для трех вариантов конструкции ТВС различаются между собой менее чем на 10 %. При сохранении тепловой мощности ВОТК поток тепловых нейтронов в центральном экспериментальном канале уменьшится на ~20 % по сравнению с существующим значением. Коэффициент неравномерности распределения плотности потока тепловых нейтронов по высоте канала составляет приблизительно 1,3 для всех вариантов конструкции ТВС. Плотность потока тепловых нейтронов в канале в варианте с 90 твэлами в среднем на ~7 % больше, чем в вариантах с большим числом твэлов. Коэф-

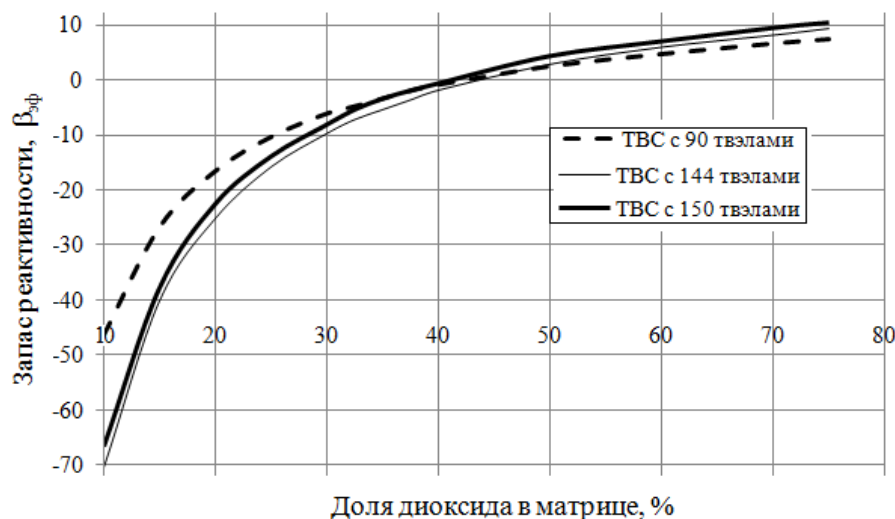


Рис. 5. Зависимость запаса реактивности от объемной доли диоксида в матрице твэлов трех выбранных вариантов загрузки реактора ИВГ.1М

фициент неравномерности этого распределения составляет 1,32.

Коэффициент неравномерности распределения энерговыделения по высоте активной зоны составляет 1,26 и 1,28 для вариантов с числом ТВЭлов 90 и двух других вариантов. Во 2-м и 3-м вариантах загрузки требуется существенно меньше диоксида урана с обогащением 20 %, следует при окончательном выборе варианта загрузки рекомендовать последний из них.

Заключение

По результатам расчетных исследований для активной зоны реактора ИВГ.1М с керметным топливом пониженного обогащения установлено, что:

- оптимальные значения доли диоксида урана в матрице ТВЭлов 33,9, 35,6 и 33,8 % соответ-

ственно для тепловыделяющих сборок из 90, 144 и 150 ТВЭлов;

- при оптимальных значениях концентраций UO_2 в матрице ТВЭлов достигается запас реактивности от 17,8 до 20,5 $\beta_{\text{эф}}$;
- компенсирующая способность системы из 10-и регулирующих барабанов составит 21,8 (24,6) $\beta_{\text{эф}}$ соответственно для варианта сборок из 90 (144 и 150) ТВЭлов; подкритичность реактора составляет $\sim 4 \beta_{\text{эф}}$;
- при сохранении тепловой мощности реактора поток тепловых нейтронов в центральном экспериментальном канале уменьшится не более чем на 10 %, а коэффициент неравномерности распределения плотности потока тепловых нейтронов по высоте канала составляет $\sim 1,3$.
- для 3-го варианта загрузки требуется существенно меньше UO_2 с обогащением 20 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айтхожин Э.С., Аринкин Ф.М., Батырбеков Г.А. и др. Реакторные комплексы ИГР, «Байкал-1», ВВР-К и перспективы развития на их базе фундаментальных и прикладных исследований: Препринт НЯЦ РК-00-12. – Курчатов, 2000. – 75 с.
2. Briesmeister J.F., et al. MCNP – a general Monte-Carlo Code for neutron and photon Transport. – Los Alamos, 1997. – LA-7396M.
3. Федик И.И., Денискин В.П., Пономарев-Степной Н.Н. и др. Новое поколение ТВЭлов на основе микротоплива для ВВЭР // Атомная энергия. – 2004. – № 4. – С. 276–285.

Поступила 20.12.2010 г.

УДК 536.24

РЕЖИМЫ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ В ЗАМКНУТОМ ДВУХФАЗНОМ ТЕРМОСИФОНЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Г.В. Кузнецов¹, М.А. Аль-Ани¹, М.А. Шеремет^{1,2}

¹Томский политехнический университет

²Томский государственный университет

E-mail: maathe_a@yahoo.com

Проведен численный анализ тепловых режимов замкнутого двухфазного термосифона цилиндрической формы в условиях смешанной конвекции в предположении бесконечно тонкой зоны испарения и пленки жидкости постоянной толщины. Математическая модель, сформулированная в безразмерных переменных «функция тока – завихренность – температура», реализована численно на основе метода конечных разностей. Получены распределения изолиний функции тока, температуры и поля скорости, характеризующие формирование и развитие термогидродинамических структур в анализируемом объекте.

Ключевые слова:

Замкнутый двухфазный термосифон, смешанная конвекция, сопряженный теплоперенос.

Key words:

Two-phase closed thermosyphon, mixed convection, conjugate heat transfer.

Введение

Замкнутый двухфазный термосифон, представляющий собой вертикально ориентированную бесфитильную тепловую трубу с адиабатической боковой поверхностью, в которой перенос теплоносителя от зоны испарения к зоне конденсации происходит под действием подъемной силы, является простым, но эффективным устройством передачи тепла. В таких теплообменниках рабочая жидкость (например, вода), испаряясь в нижней части

устройства, позволяет переносить большое количество энергии. Пар, образующийся в зоне испарения, вследствие воздействия выталкивающей силы поднимается в центральной части в область конденсации, где и происходит выделение скрытой теплоты фазового перехода. Сконденсированный пар по внутренней боковой поверхности термосифона под действием силы тяжести возвращается в зону испарения. Благодаря своей надежности, экономичности и высокой тепловой эффективно-