

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТВЭЛА РЕАКТОРА С ИСПАРИТЕЛЬНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ НА ОДНОСТЕРЖНЕВОЙ ТРЕХКОНТУРНОЙ МОДЕЛИ

В.Н. Богомолов, В.Н. Лопатинский, В.Н. Замиусский, В.М. Рябый
ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



В статье представлены результаты экспериментальных исследований системы теплоотвода твэла реактора испарительного охлаждения с натриевым теплоносителем, выполненные на одностержневой трехконтурной модели каскадного типа. Они по-новому освещают некоторые проблемы создания натриевых реакторных установок с испарительным охлаждением.

ВВЕДЕНИЕ

При испытаниях физических трехконтурных одностержневых моделей, с помощью которых моделировались системы охлаждения твэла реактора с испарительным охлаждением (РИО) [1], проводились экспериментальные исследования динамики теплофизических параметров таких систем с целью изучения работоспособности капиллярно-пористой структуры (КПС) имитатора твэла и узлов раздачи натрия I и II контуров, динамики температур, обусловленной взаимодействием контуров испарительно-конденсационного типа, а также влияния различных переходных процессов на работоспособность системы теплоотвода от твэла РИО.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Для моделирования режимов работы твэла испарительного охлаждения была разработана специальная конструкция твэльной одностержневой модели, состоящая из трех контуров, где 1 и 2- натриевые, а 3 - воздушный (рис.1). Имитатор твэла состоит из стальной (сталь ЭИ847) оболочки $\varnothing 14 \times 0,4$ мм, общей длиной 340 мм, из которых 300 мм являются активной частью твэла. Она представляет собой трубчатый электрический нагреватель, допускающий регулирование мощности в широких пределах. Поверх оболочки находится КПС. Ее внутренний слой состоит из продольных артерий, которые сформированы гофрами нержавеющей сетки №685 саржевого плетения толщиной 0,13 мм при высоте гофр 0,3 мм, и шаге 1 мм. Поверх гофр надета трубка из 2-х слоев гладкой нержавеющей сетки №685 саржевого плетения, изготовленная путем свертывания ее вдоль основы и сварен-

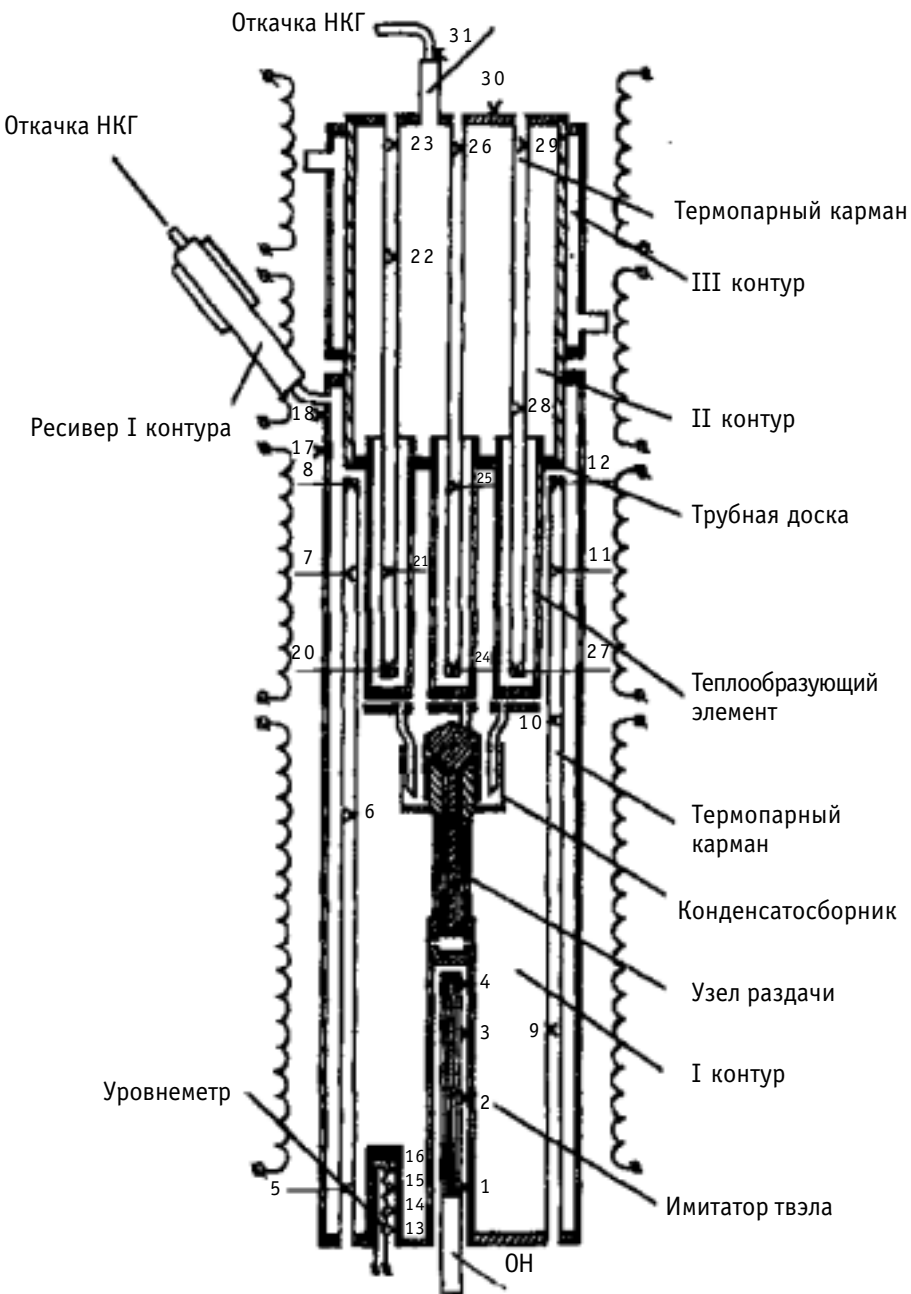


Рис.1. Схема одностержневой трехконтурной модели с размещением термопар и дополнительных нагревателей

ная точечной сваркой. В верхний хвостовик имитатора твэла установлен узел раздачи, осуществляющий подачу натрия в КПС имитатора сверху. Узел раздачи разработан так, чтобы на любых мощностях пропускать только необходимое количество натрия. Работа этого узла основана на совместном действии капиллярных и гравитационных сил.

В таких моделях впервые в практике физического моделирования натриевых контуров испарительно-конденсационного типа была применена пайка для соеди-

нения трубной доски с тремя цилиндрическими теплообменными элементами (испарителями - конденсаторами), предназначенными для передачи тепловой энергии между I и II контурами. Каждый такой теплообменный элемент представляет собой оболочку $\varnothing 14 \times 0,4$ мм из стали ЭИ847 длиной 345 мм. Внутри и снаружи оболочка выложена КПС, имеющую такую же структуру, как и КПС имитатора твэла. Подача натрия в испарительную зону каждого теплообменного элемента осуществлялась отдельным переливным узлом, устройство и принцип работы которого такой же, как и узла раздачи имитатора твэла. Цифрами на рис.1 обозначены номера термопар по месту их установки. Термопары №№ 13, 14, 15 и 16 относятся к термопарному уровнемеру [2].

Натрий I контура, конденсируясь на наружной поверхности цилиндрических теплообменных элементов (рис.1), стекает по артериям КПС в щелевой коллектор и из него по сливным трубкам в конденсатосборник узла раздачи, откуда необходимое его количество через верхний узел раздачи поступает в КПС имитатора твэла сверху. Избыток натрия в верхнем коллекторе сливается в нижний коллектор модели и поступает в КПС имитатора твэла снизу.

При изготовлении моделей повторно использовались узлы и детали от предшествующих образцов (в том числе полностью II контур) после тщательной отмывки от натрия. Это позволило за короткий срок изготовить и всесторонне исследовать 5 образцов моделей, каждая из которых являлась модификацией своей предшественницы.

Все модели испытывались и доказали свою работоспособность в очень жестких условиях. Так, последняя модель испытывалась в основном на мощности основного нагревателя (ОН) имитатора твэла более 3 кВт (плотность теплового потока на оболочке имитатора твэла $q=227.5$ кВт/м²) и проработала в разных, в основном переходных режимах на такой мощности несколько десятков часов без видимого ухудшения своих эксплуатационных характеристик. Максимальное значение мощности ОН, на котором модель устойчиво работала, но имела при этом признаки, предшествующие режиму с частичным осушением КПС, достигало 4.1 кВт ($q=310.9$ кВт/м²). На такую мощность в данной серии экспериментов выходили несколько раз на время до 30 мин. Максимальная мощность, на которую временно (до 10 мин.) выходили модели данного типа составляла ~4.7 кВт.

Экспериментальные исследования показали, что КПС имитатора твэла позволяет проводить практически безопасный запуск модели из «холодного» состояния. При этом температура исходного состояния модели роли не играет, но средний темп увеличения мощности ОН ограничивается в начальный момент, предшествующий запуску модели, опасностью осушения КПС имитатора твэла. В исследуемых моделях среднее значение для ОН при запуске не должно было превышать ~1.75 Вт/с, это же значение скорости изменения мощности ОН признано допустимым в переходных режимах и после запуска модели. Допустимое разовое ступенчатое изменение мощности ОН после запуска модели зависит от исходного режима работы модели и колеблется от ~150 Вт в низкотемпературных режимах (600°C и ниже) и до ~600 Вт в высокотемпературных (700°C и выше). Эксперименты данной серии показали, что КПС имитатора твэла данной конструкции надежно выполняет функции теплоотвода от его оболочки при мощности ОН до ~3.5 кВт в стационарных и переходных режимах работы модели. В то же время в некоторых переходных режимах появляются условия для частичного, либо полного осушения КПС. Некоторые из этих явлений требуют дополнительного изучения.

Температурный напор между контурами испарительно-конденсационного типа при нормальных режимах работы модели невелик, по расчетам он не превышает

10°C, а в экспериментах не более 3°C. Однако корректно измерить его без применения микротермопар довольно сложно из-за неопределенности, которую дает эффект локального адиабатного разогрева, возникающий при торможении парового потока на поверхности теплообменных элементов со стороны I контура. Паровой поток имеет в этой зоне скорости, близкие к звуковым [3].

Существенную роль в моделях такой конструкции играет присутствие неконденсирующихся газов (НКГ) в рабочем объеме I контура [4,5]. Только присутствием НКГ можно объяснить наличие перепадов температур в ~ 400°C и более, наблюдаемых при запуске модели, реализующихся на одном уровне по высоте. Это демонстрирует динамика температур в зоне парогазового фронта (ПГФ) I контура модели при ее запусках (см. перепады показаний у ТП-7 и ТП-11, а также ТП-8 и ТП-12, находящиеся на одном уровне по высоте, на рис.2).

Отмечено, что максимальное значение перекосов температур в зоне ПГФ наблюдаются в момент запуска II контура модели (резкое падение температур в зоне размещения ТП-7 и ТП-11 при $\tau=1400$ с). Продолжительность существования подобных перекосов температур величиной ~100°C и более составляет десятки минут, а меньшие их значения (20 - 30°C) могут существовать часами в определенных режимах работы. Избавиться от таких нежелательных явлений можно путем откачки НКГ из рабочего объема контура модели, либо путем сбора НКГ в специальный объем. Внедрение этого метода помогло избавиться от огромных температурных перекосов при запусках модели и при стационарной ее работе. В ряде экспериментов было отмечено, что в период запуска модели температура теплообменных элементов II контура может существенно влиять на формирование ПГФ в зоне конденсации I контура.

Экспериментально обнаружено, что при запуске модели из некоторых исходных состояний, в частности, с предварительным разогревом НКГ II контура дополнительными нагревателями, происходит временная потеря работоспособности системы раздачи натрия по теплообменным элементам со стороны II контура. Следствием этого становится заброс НКГ во внутренние объемы теплообменных элементов, большие градиенты температуры по их высоте, и связанные с этим трудности запуска II контура. Эта аномалия, в частности, сопровождается также большой нестабильностью температур в теплообменных элементах по их высоте со стороны II контура, стохастичностью температурного режима модели и пр.

В случае, если II контур работает нестабильно, то это сказывается на поступлении натрия в верхний коллектор I контура, поэтому при изменении режимов работы модели в некоторых случаях возникает реальная угроза осушения верхней части имитатора твэла (зона размещения ТП-4, рис.1). Избыток НКГ в I контуре приводит к аналогичной ситуации.

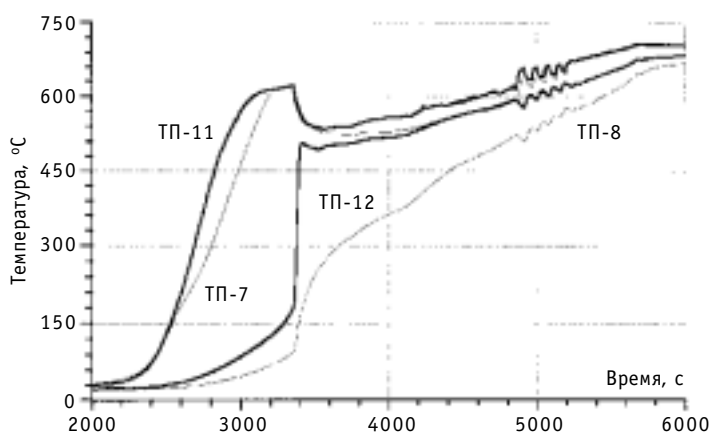


Рис. 2. Динамика температур в зоне ПГФ 1-го контура при запуске модели из "холодного" состояния (эксперимент mk1106)

В ходе этой и предшествующих серий экспериментов замечено, что усложнение конструкции зоны конденсации I контура способствует зависанию конденсата натрия в кольцевом зазоре, а также в межтрубном пространстве теплообменных элементов. Это приводит к общему дефициту натрия в модели и проявляется частичным осушением верхней части КПС имитатора твэла. Зависанию натрия способствует высокая скорость пара и малое количество НКГ в рабочем объеме I контура. Интерпретация подобных режимов невозможна без дополнительной информации, получаемой от термопарного уровнемера, информативность которого заметно повышается при усложнении конструкции моделей [2].

В этой серии экспериментов было подтверждено высказанное ранее предположение о возможности реализации в двух и более связанных контурах испарительно-конденсационного типа режима с автоколебаниями температур в них, были определены условия, при которых возникает режим автоколебаний и найдены способы выхода из этих режимов. На рис.3 представлена динамика температур в некоторых зонах модели при ее запуске, вводе в режим автоколебаний и выводе из него, зарегистрированная в эксперименте tk1112, и график изменения мощности ОН. Абсолютно необходимым условием для режима автоколебаний является относительно низкое значение температуры паров натрия ($\sim 560^\circ\text{C}$), наличие определенных количеств НКГ в контурах и соответствующих специфических условий для течения паров рабочего тела II контура в объеме модели. Амплитуда колебаний температур на оболочке имитатора твэла сравнительно невелика - до 8°C , в зоне ПГФ достигает величины $\sim 80^\circ\text{C}$ и $\sim 50^\circ\text{C}$ в нижней точке теплообменных элементов со стороны II контура, период колебаний везде одинаков и составляет $\sim 240\text{с}$. Если режим работы модели не менять, то автоколебания, как показали эксперименты, могут продолжаться бесконечно долго. Причиной возникновения автоколебаний является периодическое запираение цилиндрических теплообменных элементов со стороны второго контура по звуковому пределу.

Одной из задач данной серии экспериментов являлось проведение ресурсных испытаний модели на предельных уровнях мощности ОН. При успешном оконча-

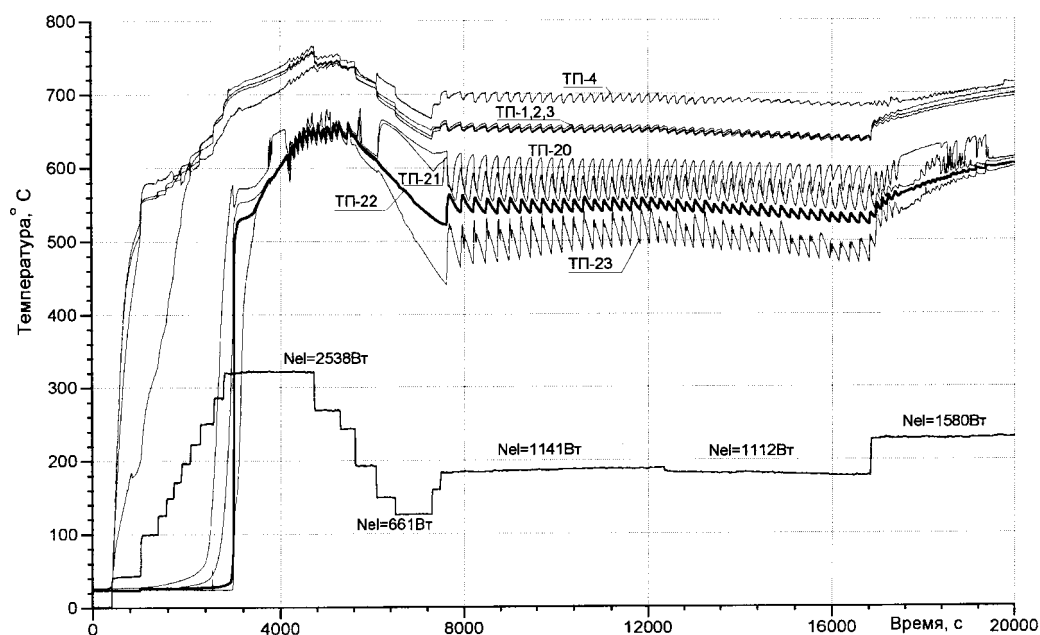


Рис.3. Динамики температур при запуске модели с выходом в режим автоколебаний (эксперимент tk1112)

нии ресурсных испытаний, продолжительность которых была назначена в 100 ч., предполагалось провести металлографический анализ материалов КПС и оболочки имитатора твэла. Испытания проводились на мощности ОН ~3,6 кВт, продолжительность непрерывной работы на этом уровне составила 12,5 ч. После этого совершенно неожиданно произошел прожог оболочки имитатора твэла. Тщательный анализ записей параметров показал, что за последние несколько минут до прожога никаких существенных изменений параметров не было. Вероятнее всего причиной прожога явился дефицит натрия в нижнем коллекторе I контура вследствие его зависания на внутренних элементах модели (исследования в последующей серии показали на возможность появления такой аномалии), но не исключено, что причиной прожога мог быть изначальный дефект твэльной трубки. Этот эксперимент наглядно показал опасность осушений КПС имитатора твэла при работе модели на мощности более 3,5 кВт. Скорость изменения температуры в этом случае достигла очень больших значений. Так, в зоне размещения ТП-1 она равнялась ~60°С/с, а в зоне размещения термопары ТП-4 почти 200°С/с.

ВЫВОДЫ

Настоящая серия экспериментов на трехконтурной твэльной одностержневой модели показала, что задача отвода тепла от твэла путем испарения натрия с его поверхности с передачей тепла II контуру испарительно-конденсационного типа несколько усложняется, т.к. появляются некоторые специфические вопросы взаимодействия контуров. Однако эти вопросы решаются, а основные проблемы теплоотвода в РИО сводятся, по-прежнему, к вопросам абсолютно надежной подпитки КПС твэла натрием во всех допустимых режимах работы установки. С этим тесно смыкаются вопросы диагностирования предаварийных и аварийных режимов, которые состоят из задач выявления ситуаций с частичным осушением КПС твэла на ранней стадии их появления, как это стало возможным по генерации ультразвуковых волн в период, предшествующий звуковому запираению [6]. Эксперименты показали, что много полезной диагностической информации приносят данные, полученные от встроенного в нижний коллектор I контура термопарного уровнемера. Было бы полезно иметь такой уровнемер также в коллекторе II контура.

Список литературы

1. Громов Б.ф., Григорьев О.Г., Логинов Н.И., Лиончук М.П. и др. Реакторные установки с испарительным охлаждением активной зоны: Доклад / Конференция Ядерного общества России. - Москва, 1996.
2. Богомолов В.Н., Замиусский В.Н., Лопатинский В.Н. Применение термопарного уровнемера для изучения уровня динамики натрия в нижнем коллекторе высокотемпературных тепловых труб в режиме с осушением капиллярно-пористой структуры испарителя // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 1998. - №2. - С.36 - 44.
3. Богомолов В.Н., Замиусский В.Н., Шутов П.С., Шутов С.С. Опыт экспериментального изучения вибрации внутренних элементов высокотемпературных тепловых труб под действием потока паров натрия. // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 1996. - №4. - С.56 - 63.
4. Тернер, Миллс, Дэни. Влияние неконденсирующегося газа на ламинарную пленочную конденсацию жидких металлов. / Труды американского общества инженеров-механиков. Теплопередача. - 1973. - Т.3. - С. 23-29.
5. Рохани, Дянь. Стационарный тепло- и массообмен в парогазовой области тепловой трубы, заполненной неконденсирующимся газом (двумерное приближение) / Труды американского общества инженеров-механиков. Теплопередача. - 1973. - Т.3. - С. 47-56.
6. Богомолов В.Н., Морозов С.А., Шпорта Ю.А. Возможности применения эффекта генерации ультразвуковых волн в тепловых трубах для идентификации аномальных режимов. // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 1994. - №4-5. - С.36 - 41.

Поступила в редакцию 7.09.99.

and Superphenix design concept fuelled with UN-PuN. These results can be useful for the design of new generation of nuclear reactors.

УДК 621.039.514.4

Tests of Digital Reactimeter with 15 Groups of Delayed Neutrons in Experiments on ZPR \ Yu.V. Volkov, T.G. Petrosov, D.A. Klinov, V.F. Ukraintsev, Ya.V. Slemenitchs, M.Moniri; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 10 pages, 5 illustrations, 5 tables. – References, 2 titles.

The mathematical model of the reactimeter for low power heavy water reactor with using of 15 groups of delayed neutrons is described. Realization of this model on the personal computer in the on-line option is also described. Results of the reactimeter testing and improving its operating regimes by using a signals filter and different delayed neutron data sets are presented.

УДК 536.248: 532.5: 621.039.52

Hydrodynamics and Heat Generation in a Liquid Vertical Eutectic Jet as a Target for the Intense Neutron Source \ E.F.Avdeev, S.L.Dorokhovitch; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 8 titles.

As the target of high-power spallation neutron source the vertical jet of melted lead-bismuth eutectics directed towards to the beam of protons is considered. Locking up vacuum chamber of the accelerator is offered to be realized using the supersonic jet of an inert gas. The computational estimations of gas leakage to the vacuum chamber are given. The analytical solution of a magnetohydrodynamic task and the determination of jet borders using approximation of flow is given. The thermal power of the target, distribution of temperature along the height of the jet and the neutron yield for choosed parameters of protons beam are calculated.

УДК 536.242

On the Basic Regularities of Crisis of Heat Exchange in Water Cooled Channels \ V.P. Bobkov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 6 pages. – References, 14 titles.

The regularities for critical heat flows in channels cooled with boiling water are discribed. Accent is put on the solution of a problem of influence of various factors on crisis in complex channels. The developed semiempirical model for treating critical heat flows in channels is used. The detected obtained have allowed to receive new approaches to prediction of critical heat fluxes in channels.

УДК: 621. 039. 534.63

Some results of Experimental Studies of Evaporation-cooled Reactor Fuel Rod Operation Modes in Single-rod Three-circuit Model \ V.N. Bogomolov, V.N. Lopatinsky, V.N. Zamiussky, V.M. Ryaby; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 6 pages, 3 illustrations. – References, 6 titles.

Some results of experimental studies on fuel rod heat removal obtained on physical three-circuit single-rod model which simulated evaporation-cooled reactor cooling system with sodium as a coolant are presented in this work. They give new insight into the problems of designing of sodium reactor installations with evaporation cooling.

УДК 546.718:621.039.7:539.174

Ruthenium as a ⁹⁹Tc Transmutation Product: Necessary Separation Factor for Use \ A.A. Kozar, V.F. Peretroukhin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 10 pages, 3 illustrations. – References, 26 titles.

The process of preparation of stable ruthenium as platinum group metal by ⁹⁹Tc transmutation is considered. On the basis of the analysis of parasitic capture of neutrons in targets it is shown