

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕ В ЖИДКОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРУЕ ЭВТЕКТИКИ - МИШЕНИ ИНТЕНСИВНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ

Е. Ф. Авдеев, С. Л. Дорохович

Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск



В качестве мишени интенсивного источника нейтронов рассматривается струя расплавленной свинцово-висмутовой эвтектики, направленная вертикально вверх навстречу пучку протонов. Запирание вакуумной камеры ускорителя предлагается осуществлять с помощью сверхзвуковой струи инертного газа. Даются расчетные оценки утечки газа в вакуумную камеру. Приводится аналитическое решение гидродинамической задачи и определение границ струи в приближении потенциального течения. Рассчитывается тепловая мощность мишени, распределение температуры по высоте струи и выход нейтронов для принятых параметров пучка протонов.

ОБОСНОВАНИЕ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ

В последнее время обсуждается перспектива создания безопасного подкритического реактора, мощность которого возможно регулировать потоками нейтронов, получаемых при взаимодействии внешнего пучка ускоренных частиц с подходящего вида мишенями, размещенными в активной зоне реактора [1].

Предлагаемая мишень (рис.1) в виде направленной вертикально вверх, навстречу пучку протонов жидкометаллической струи обладает высокой оптической плотностью, повышенным выходом нейтронов, обеспечивает непрерывный подвод свежих порций расплава в область ядерных реакций и отвод тепла из области взаимодействий в емкость с горячим расплавом, который может прокачиваться через теплообменник.

В случае сильноточных высокоэнергетических ускорителей разделяющая твердая перегородка окна мишени подвергается интенсивным радиационным и тепловым нагрузкам, что приводит к необходимости ее частой замены. Поэтому предлагается использовать газодинамический эффект “запирания” окна сверхзвуковой кольцевой струей инертного газа.

Поперечные размеры нераспадающейся части направленной вверх струи эвтектики должны соответствовать диаметру пучка, поэтому необходимо детальное выяснение гидродинамики и границ струи. В приводимом ниже решении, в при-

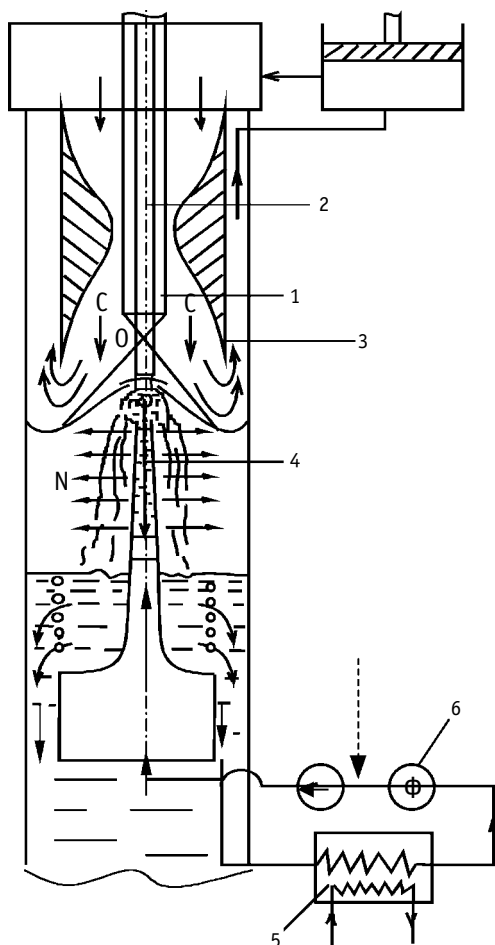


Рис. 1. Схема устройства ввода пучка высокоэнергетических частиц в струйную мишень: "С-С" – сечение окна вакуумной камеры 1 ускорителя; "СО" – границы сверхзвуковой струи газа; 2 – пучок заряженных частиц; 3 – сверхзвуковое сопло Лавала; 4 – жидкая мишень в виде вертикальной струи; 5 – теплообменник; 6 – фильтр очистки

эффекте расширения сверхзвуковой струи газа, поступающей из кольцевого недорасширенного сопла Лавала с цилиндрической вставкой. Если на выходе пучка заряженных частиц из ускорителя соосно ему организуется кольцевой сверхзвуковой поток газа, внутренние границы расширения струи образуют непроницаемую для газа коническую поверхность. Предельный угол поворота внутренних границ расширения зависит от числа M на выходе из сопла и давления в вакуумной камере.

Схема подвода пучка и мишени содержит два контура: контур инертного газа, используемого для "запирания" окна и контур циркуляции рабочего расплава эвтектики.

Натекание газа в вакуумную камеру ускорителя будет происходить из-за наличия на внешней выходной кромке цилиндрической вставки области пограничного слоя с малыми скоростями. В [4] расчетами оценивалась максимально возможная величина утечки, равная расходу газа через область пограничного слоя. Для

ближении потенциального течения, внимание сосредоточено на определении границ "головки" струи. Это позволит проводить расчеты поля температур, а в случае технических трудностей реализации газодинамического запирания, поставить в соответствие форме верхней границы головки форму фольги, отделяющей лучепровод ускорителя от мишени. Фольга в этом случае не будет испытывать динамических воздействий со стороны струи (кроме пульсаций) и одновременно будет происходить ее охлаждение растекающейся в радиальном направлении эвтектикой.

Выявляется еще одно преимущество использования такого вида мишени в качестве канала управления подкритическим реактором, связанное с возможностью управления нейтронным потоком за счет изменения ориентации струи по отношению к направлению пучка, при сохранении неизменными параметров пучка.

"ЗАПИРАНИЕ" ОКНА МИШЕНИ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ ТВЕРДОЙ СТЕНКИ

С целью минимизации поступления паров мишени в вакуумную камеру ускорителя без установки в окне твердой стенки предлагается использовать способ газодинамического "запирания" окна, обоснование которого дано в работах [2, 3, 4]. Его принцип основан на

значения числа Маха на выходе из сопла $M=5$, утечка составила 1,5% от общего расхода через сопло, что согласуется с экспериментами, описанными в [5], в которых при $M=8$ утечка составила 0,2%. Устранение натекания газа в вакуумную камеру предлагается в [3] отсосом пограничного слоя.

РЕШЕНИЕ И РАСЧЕТ ГРАНИЦ ДЛЯ НАПРАВЛЕННОЙ ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ ТЯЖЕЛОЙ СТРУИ

Относительно простое точное решение для границ струи в приближении потенциального течения можно получить, используя общее решение уравнения неразрывности для потенциала скорости ϕ , полученное Уиттекером [6]. Для плоского или осесимметричного течения оно имеет вид:

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(z + iy \cos \varepsilon) d\varepsilon, \quad (1)$$

где z - координата вдоль оси струи, а $f(z + iy \cos \varepsilon)$ - в общем случае произвольная функция.

Так как продольная и поперечная составляющие скорости будут

$$u(z, y) = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f'(z + iy \cos \varepsilon) d\varepsilon,$$

$$v(z, y) = \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f'(z + iy \cos \varepsilon) i \cos \varepsilon d\varepsilon,$$

то для функции тока общее решение получается в виде:

$$\psi(z, y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^y y dy \int_{-\pi}^{\pi} f'(z + iy \cos \varepsilon) d\varepsilon.$$

После разложения функции $f'(z + iy \cos \varepsilon)$ в окрестности оси струи ($y=0$) в ряд Тейлора $f'(z + iy \cos \varepsilon) = f'(z) + iy \cos \varepsilon f''(z) + \dots$, обозначив $f'(z)$ через $f_0(z)$, получим общее решение задачи:

$$u(z, y) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2^{2n} (n!)^2} y^{2n} f_0^{(2n)}(z), \quad (2)$$

$$v(z, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot 2n}{2^{2n} (n!)^2} y^{2n-1} f_0^{(2n-1)}(z), \quad (3)$$

$$\psi(z, y) = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot 2n}{2^{2n} (n!)^2} y^{2n} f_0^{(2n-2)}(z). \quad (4)$$

В условиях рассматриваемой задачи функция $f_0(z)$ совпадает со скоростью на оси струи $u(z)$

$$f_0(z) = u(z) = V_0 \sqrt{1 - \frac{z}{Fr}}, \quad (5)$$

где $Fr = \frac{V_0^2}{2a_0 g}$, V_0 , a_0 - соответственно число, Фруда, скорость и радиус на выходе струи.

После подстановки (5) в решения (2)-(4) выражения для безразмерных скоростей и функции тока будут иметь вид:

$$u(z, y) = \left(1 - \frac{z}{Fr}\right)^{\frac{1}{2}} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n (4n)!}{(2n)! (n!)^2 (4n-1)} \left(\frac{y}{Fr}\right)^{2n} \left(1 - \frac{z}{Fr}\right)^{\left(\frac{4n-1}{2}\right)}, \quad (6)$$

$$v = \frac{1}{4} \frac{y^2}{Fr} \left(1 - \frac{z}{Fr}\right)^{-\frac{1}{2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n (4n)!}{4(2n)! (n!)^2 2^{6n} (n+1)} \times \frac{1}{Fr} \left(1 - \frac{z}{Fr}\right)^{\left(\frac{4n+1}{2}\right)}, \quad (7)$$

$$\psi(z, y) = \frac{1}{2} y^2 \left(1 - \frac{z}{Fr}\right)^{\frac{1}{2}} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n (4n)!}{(2n)! (n!)^2 2^{6n} (4n-1) 2(n+1)} \times y^2 \left(\frac{y}{Fr}\right)^{2n} \left(1 - \frac{z}{Fr}\right)^{\left(\frac{4n-1}{2}\right)}. \quad (8)$$

По решению (8) были рассчитаны границы направленной вертикально вверх струи (рис.2) при начальной скорости $V_0=5$ м/с и выходном радиусе струи $a_0=2,5 \cdot 10^{-2}$ м. При этом число Фруда было равно 50. Расчеты по решению (8) выполнялись последовательным наращиванием точности определения границ за счет увеличения числа слагаемых ряда. Как указано выше, основное внимание было сосредоточено на определении границ верхней головки струи. Если учет более 3-х членов ряда (8) практически не приводит к изменению границ основной части струи, то в области торможения струи (ее "головки") учет каждого нового слагаемого вносит значительные уточнения в границы.

В этой области, начиная с некоторого увеличения радиальной координаты, ряд становится расходящимся, что связано с использованием разложения функции $f(z+iy \cos \varepsilon)$ в ряд в окрестности оси струи. Поэтому, начиная с места достижения на внешней границе нулевого значения вертикальной составляющей скорости (6), спадающие границы головки находились из условия свободного падения с начальной поперечной скоростью (7) в этом месте и сохранения расхода. Оказалось, что максимальная высота головки находится не на оси струи.

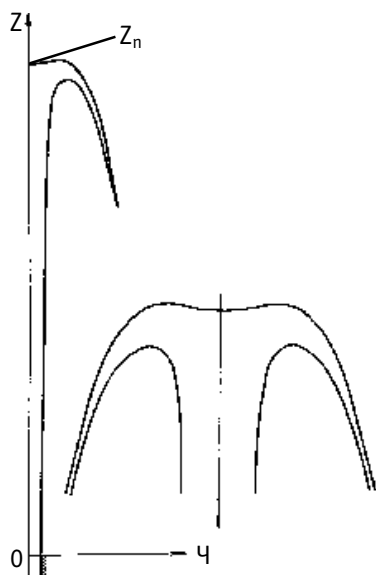


Рис.2. Рассчитанные границы основной части и "головки" струи

ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ДЛИНЕ НАПРАВЛЕННОЙ ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ СТРУИ

В качестве рабочего вещества мишени выбран эвтектический сплав 55,5% Bi - 44,5% Pb. Выбор обусловлен сочетанием высокого выхода нейтронов и низкой температурой плавления сплава (123,6 °C).

Предполагаемые исходные параметры нейтронного генератора:

- диаметр струи на выходе из насадка, $d_0=5 \cdot 10^{-2}$ м;
- начальная скорость струи, $V_0=5$ м/с;
- начальная температура расплава, $t_{вх}=200^\circ\text{C}$;
- энергия протонов, $E_p=1$ ГэВ;
- максимальная величина удельного тепловыделения в мишени, $q_v^{\max}=3$ МВт/л.

Распределение тепловыделения $q(z')$ (кривая 1, рис.3) по высоте мишени рассчитывалось для мишени диаметром 5 см с помощью программы

GEANT 3.21. Здесь $z'=z_0-z$, где z_0 - максимальная высота, которой достигают частицы расплава на оси струи (рис.2). Предварительно программа тестировалась на имеющихся экспериментальных данных [7]. В качестве распределения протонов по радиусу пучка выбиралось распределение Гаусса ($\sigma=1$ см). Величина $q(z')$ определялась для одного налетающего протона.

Для расчета распределения температуры эвтектики кривая тепловыделения аппроксимировалась следующей зависимостью (кривая 2, рис.3):

$$q(z') = 24,4z'^{10,82} e^{-0,5z'^{10,68}}, \text{ [МэВ/см]} \quad (9)$$

Полное тепловыделение в расчете на один протон, полученное с помощью программы GEANT 3.21, составило 350 МэВ. Аппроксимирующая зависимость (9) дает 345 МэВ. Максимальное значение тока пучка протонов I_{\max} , при котором средняя величина удельного тепловыделения в сечении мишени не превысит $q_v^{\max}=3$ МВт/л, определялось из соотношения

$$q_v^{\max} = \frac{I_{\max}}{S} q^{\max} \times 10^3, \quad (10)$$

где S - площадь поперечного сечения мишени, q^{\max} - максимальное значение тепловыделения по высоте мишени. Размерности величин, используемых в соотношении (10), следующие: q_v^{\max} - МВт/л, I_{\max} - А, q^{\max} - МэВ/см, S - см². Для $q^{\max}=21,1$ МэВ/см величина I_{\max} равна $\approx 2,8$ мА.

Тепловая мощность, выделяемая в мишени, рассчитывалась по зависимости

$$Q_T = I_{\max} \int_0^{h'} q(z') \times 10^6 dz', \quad (11)$$

где h' - длина области тепловыделения в мишени. Размерности величин в выражении (11): $q(z')$ - МэВ/см, I_{\max} - А, Q_T - Вт. Расчетами получено значение $Q_T=0,96$ МВт. Объем области тепловыделения составил $\approx 1,18$ л, среднее удельное тепловыделение $\bar{q}_v=0,82$ МВт/л.

Средний подогрев эвтектики в мишени

$$\Delta t = \frac{Q_T}{c_p G}, \quad (12)$$

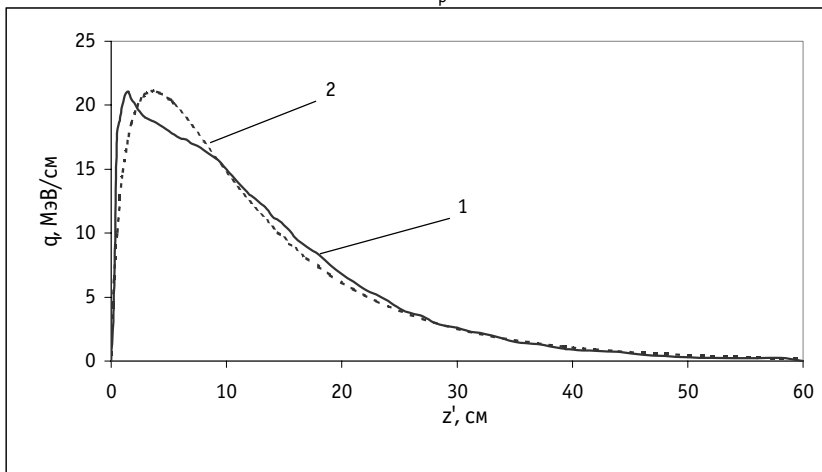


Рис. 3. Распределение тепловыделения по высоте мишени: 1 – результаты расчета по программе GEANT 3.21; 2 - результаты расчета по формуле (9)

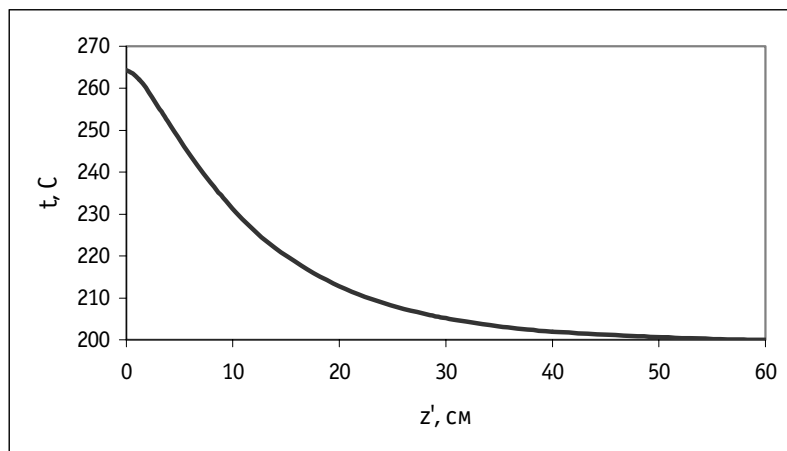


Рис.4. Распределение температуры по высоте мишени

где G - массовый расход. При удельной теплоемкости эвтектики $c_p=147$ Дж/(кг·град), получено $\Delta t=64^\circ\text{C}$.

Распределение температуры расплава по высоте мишени рассчитывалось согласно зависимости

$$t(z') = t_{\text{вх}} + \Delta t - \frac{I_{\text{max}}}{c_p G} \int_0^z q(z') \times 10^6 dz' \quad (13)$$

Расчеты по формуле (13) представлены на рис. 4.

Следует отметить, что подогрев эвтектики по радиусу струи будет сильно неравномерным вследствие неравномерного распределения плотности потока протонов по радиусу пучка (распределение Гаусса). Максимальный подогрев расплава Δt_{max} следует ожидать в приосевой области мишени. Величину Δt_{max} можно получить лишь из двухмерного расчета теплообмена в струе.

Выход нейтронов из объема мишени рассчитывался с использованием сечения образования нейтронов σ по формуле

$$N = \sigma n_1 n_2 h' S, \quad (14)$$

где n_1 и n_2 - соответственно, концентрация атомов в мишени (см^{-3}) и средняя плотность потока протонов через сечение струи ($\text{см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$). Среднее значение $\sigma = 1,35 \cdot 10^{-23} \text{см}^2$ рассчитано с помощью программы КАСКАД [8]. Расчетный выход нейтронов составил $0,4 \cdot 10^{18} \text{н/с}$, причем средняя плотность потока нейтронов через подвижную жидкую поверхность струи равна $0,4 \cdot 10^{15} \text{н/}(\text{см}^2 \text{с})$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получено решение для гидродинамики струйной жидкометаллической мишени, рассчитаны границы струи и ее "головки", средний подогрев расплава и распределение по высоте средних по сечениям мишени температур. Даны расчетные оценки выхода нейтронов. Вышеуказанные расчеты показывают возможность использования предлагаемого вида мишени в канале управления подкритического ядерного реактора. Авторы выражают благодарность Ф.И.Карманову и А.Ю.Конобееву за любезно предоставленные им результаты расчета тепловыделения в мишени с помощью программы GEANT 3.21, а также сечений образования нейтронов по программе КАСКАД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rubbia, C., et al.* Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier, CERN/AT/95-44(ET), Geneva, 1995.
2. *Авдеев Е. Ф., Коровин Ю. А., Мурогов В. М. и др.* Газовая мишень/А. с. №1295987 от 8.11.1986.
3. *Авдеев Е. Ф., Дорохович С. Л., Худаско В. В.* Мишенное устройство/А.с. № 1639405 от 19.06.89: В официальном бюллетене комитета Российской Федерации по патентам и товарным знакам (БИ) 47-48, 1993, с.191.
4. *Дорохович С. Л.* Тепломассообмен в рабочей камере нейтронного генератора с газодинамической мишенью, облучаемой высокоэнергетическим пучком дейтронов// Авт. дис. к. т. н. - Обнинск: ИАТЭ, 1992.
5. *Armstrong D. et al.* A 14 Mev Intense Neutron Source Facility. Nucl. Inst. and Meth...-1977.- V.145.-№1.-Р.127-148.
6. *Уиттекер Э. Т., Ватсон Дж. Н.* Курс современного анализа. Ч. II. -М.: Физматгиз, 1963. - С. 250-251.
7. *Belyakov-Bodin V. I. et al.* Calorimetric Measurements and Monte Carlo Analyses of Medium-Energy Protons Bombarding Lead and Bismuth Targets. Nucl. Instr. and Meth. A 295.-1990.-Р.140-146.
8. *Барашенков В. С. и др.* Препринт - ОИЯИ, р2-85-173. - Дубна, 1985.

Поступила в редакцию 15.08.99.

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