

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В БЫСТРЫХ РЕАКТОРАХ

В.П. Гинкин, Н.М. Троянова*

ГНЦ РФ-ФЭИ, г. Обнинск

**Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва*



Описана организация вычислений в комплексе программ GVA для расчета быстрых переходных процессов в реакторах типа БН, моделирующем пространственно-временное поведение активной зоны реактора на быстрых нейтронах в случае возникновения аварийной ситуации. Для решения нестационарного уравнения реактора использовано квазистатическое приближение, сводящее исходную задачу к системе двух уравнений: для расчета амплитудного фактора, быстро меняющегося во времени и не зависящего от пространственных координат, и форм-функции, зависящей от пространственных координат и слабо меняющейся во времени. Приведены результаты демонстрационных расчетов, в которых в качестве исходных аварийных событий рассматриваются такие, как остановка ГЦН и самоход стержней органов регулирования.

Ключевые слова: нестационарное уравнение реактора, квазистатическое приближение, переходные процессы, комплекс программ.

Key words: non-stationary equation of the reactor, quasi-static approximation, transient processes, program code

ВВЕДЕНИЕ

Для расчета пространственной динамики реакторов на быстрых нейтронах в ГНЦ РФ-ФЭИ разработан комплекс программ GVA [1]. В основе этого комплекса лежат три программы, разработанные независимо друг от друга: GRIF-SM [2], предназначенная для трехмерного теплогидравлического расчета реактора типа БН с учетом двухфазного течения натрия; ВОЛНА [3] – для расчета пространственной кинетики реактора в (*hex-z*)-геометрии в диффузионном многогрупповом квазистатическом приближении и АРАМАКО [4] – для расчета гомогенизированных многогрупповых макроконстант в спектре, типичном для быстрых реакторов. Объединение этих программ в один комплекс позволило решить главную задачу – прямым численным расчетом промоделировать пространственно-временное поведение активной зоны реактора на быстрых нейтронах в случае возникновения аварийной ситуации. При этом для демонстрации работы комплекса GVA в качестве исходных аварийных событий рассматриваются такие, как остановка ГЦН и самоход стержней органов регулирования.

ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ В КОМПЛЕКСЕ ПРОГРАММ GVA

В настоящее время комплекс GVA рассчитывает только начальную стадию

аварии, на которой не происходит плавления топлива и разрушения активной зоны реактора. Но принципиальных ограничений не существует для распространения данного подхода на более глубокие стадии развития аварии, связанные с перемещением материалов. Более того, на наш взгляд, квазистатический подход является единственно приемлемым и практически реализуемым для детального и комплексного описания аварий, приводящих к плавлению топлива и разрушению ТВС.

Программа расчета теплогидравлики GRIF-SM решает нестационарную систему уравнений сохранения массы, импульса и энергии в рамках модели пористого тела, причем пористость, проницаемость и другие коэффициенты системы уравнений модели зависят от пространственных координат. Такое приближение позволяет описать кипение натрия и его конденсацию в верхней полости реактора и учесть гидравлическое взаимодействие каналов зоны друг с другом. Входными данными для программы GRIF-SM являются пространственные распределения энерговыделения в каждый момент времени. Выходными данными являются пространственные распределения давлений, скоростей и плотностей теплоносителя, температур топлива, оболочек, теплоносителя и других материалов.

Программа расчета пространственной кинетики ВОЛНА решает пространственно-временное уравнение переноса нейтронов в диффузионном приближении. Для решения этого уравнения используется квазистатический подход. При таком подходе исходное нестационарное уравнение тождественным преобразованием приводится к системе двух уравнений: пространственно-временного уравнения для форм-функции $\psi(r, t)$, для решения которого используется эффективный вариант комбинированной сверхнеявной схемы неполной факторизации с параметрической периферийной компенсацией [3], и только временного уравнения типа уравнения точечной кинетики для амплитудного фактора $P(t)$, интерпретируемого как мощность реактора. Плотность потока нейтронов равна произведению форм-функции на амплитудный фактор.

Важнейшей чертой квазистатического приближения является принципиальная возможность введения двух временных масштабов: крупного – для пересчета трехмерной форм-функции и мелкого – для расчета амплитудного фактора.

Входными данными для программы ВОЛНА являются пространственные распределения групповых макроконстант в каждый момент времени и скорости движения стержней органов регулирования. Последние используются косвенно, так как по ним определяются координаты концов движущихся стержней и вычисляются усредненные константы в ячейках, содержащих концы этих стержней с учетом долей объемов ячеек, занятых стержнем и свободных от него.

Выходными данными программы ВОЛНА являются пространственные распределения энерговыделений по объему реактора, групповых плотностей потоков нейтронов и групповых концентраций предшественников запаздывающих нейтронов.

Групповые макроконстанты для расчета по программе ВОЛНА вычисляются по программе АРАМАКО. Входными данными для этой программы являются пространственные распределения температур и плотностей топлива, конструкционных материалов и теплоносителя в каждый момент времени, получаемые по программе GRIF-SM.

Начальным состоянием в программе GVA принято строго критическое состояние реактора. Изменение макроконстант хотя бы в одной пространствен-

ной ячейке реактора вызывает изменение этого состояния. Это означает введение реактивности, вызванное той или иной физической причиной. Реактивность вычисляется в процессе решения нестационарного уравнения реактора путем интегрирования по объему реактора изменений в распределениях макроконстант с весом форм-функции и функции ценности нейтронов деления для критического реактора.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Представлены результаты расчетов двух аварий с помощью комплекса программ GVA:

- остановка всех ГЦН с одновременным отказом органов защиты;
- выдвижение группы шести компенсирующих стержней из активной зоны реактора со скоростью 10 см/с.

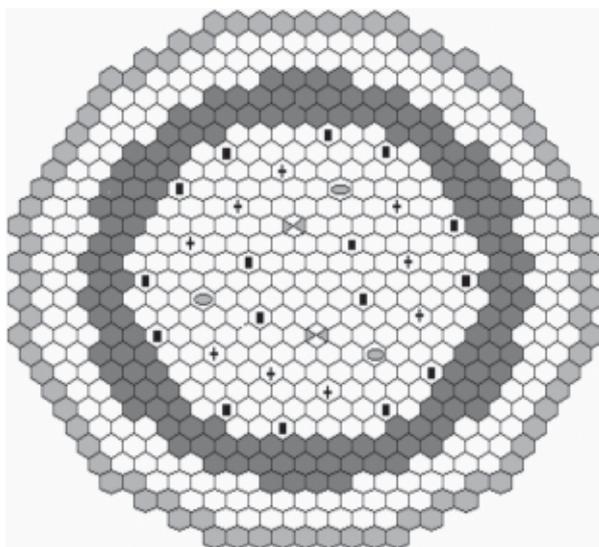


Рис. 1. Картограмма активной зоны для тестового расчета: \circ – ТВС зоны малого, среднего и большого обогащения; \blacksquare – компенсирующие стержни; \otimes – регулирующие стержни; \oplus – стержни аварийной защиты; \ominus – стержни пассивной аварийной защиты; \bullet – радиальная зона производства

Первая авария. На рисунках 1, 2 приведены картограмма и распределение по высоте материалов реактора в начальном состоянии; на рис. 3 – рассчитанные зависимости реактивности и мощности реактора при аварийном отключении ГЦН. Сплошные кривые отвечают расчету по комплексу программ GVA, а пунктирные – по формулам точечной кинетики. После обесточивания ГЦН происходит разогрев активной зоны при одновременном снижении мощности. Реактивность на протяжении всего процесса остается отрицательной и определяется, в основном, натриевой плотностной компонентой. На 16-ой секунде начинается кипение натрия в одном из каналов в сечении, соответствующем верхнему торцу активной зоны. По мере образования пар поступает в область натриевой прослойки, где натриевый пустотный эффект отрицателен. В результате наблюдается резкое падение реактивности, а затем и мощности реактора. Далее уменьшение мощности приводит к прекращению кипения натрия и уменьшению объема пара в реакторе. Реактивность начинает возрастать, а с ней и мощность.

<i>k\i</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
29	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	28	25	25
28	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	28	28	37
27	25	25	25	25	51	51	51	51	51	51	51	51	28	28	37
26	25	25	25	25	51	51	51	51	51	51	51	51	28	28	30
25	25	25	25	25	51	51	51	51	51	51	51	51	27	27	30
24	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	27	27	30
23	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	27	27	30
22	33	34	35	36	24	24	24	24	24	24	24	24	27	27	30
21	45	46	47	48	49	49	49	49	49	49	52	69	27	27	30
20	40	41	42	43	44	44	44	44	44	44	52	68	27	27	30
19	40	41	42	43	44	44	44	44	44	44	52	68	27	27	30
18	40	41	42	43	44	44	44	44	44	44	52	68	27	27	30
17	18	19	20	21	22	22	22	22	22	22	52	32	27	27	30
16	13	14	15	16	17	17	17	23	23	23	52	39	27	27	30
15	13	14	15	16	17	17	17	23	23	23	52	39	27	27	30
14	13	14	15	16	17	17	17	23	23	23	52	39	27	27	30
13	13	14	15	16	17	17	17	23	23	23	52	39	27	27	30
12	13	14	15	16	17	17	17	23	23	23	52	39	27	27	30
11	13	14	15	16	17	17	17	23	23	23	52	39	27	27	30
10	13	14	15	16	17	17	17	23	23	23	52	39	27	27	30
9	13	14	15	16	17	17	17	23	23	23	52	39	27	27	30
8	13	14	15	16	17	17	17	23	23	23	52	39	27	27	30
7	13	14	15	16	17	17	17	23	23	23	52	39	27	27	30
6	13	14	15	16	17	17	17	23	23	23	52	39	27	27	30
5	13	14	15	16	17	17	17	23	23	23	52	39	27	27	30
4	53	54	55	56	57	57	57	57	57	57	52	57	27	27	30
3	63	64	65	66	67	67	67	67	67	67	67	67	27	27	30
2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	31	27	27	29
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	26	26	29

Рис. 2. Расчетная модель реактора типа БН-800: 1– нижняя напорная камера реактора; 2–12, 31 – входные участки ТВС; 13–16 – зона малого обогащения; 17 – зона среднего обогащения; 23 – зона большого обогащения; 18–22, 32 – область стальных заглушек твэлов; 24, 33–36 – область головок ТВС; 45–49 – верхняя борная защита; 40–44 – натриевая полость; 53–57 – нижняя торцевая зона воспроизводства; 63–67 – область газовых объемов твэлов; 52 – радиальная зона воспроизводства; 39, 68, 69 – внутренняя радиальная защита и хранилище; 51 – верхняя камера реактора; 26 – входной трубопровод; 29 – насос первого контура; 27 – промежуточная радиальная защита; 28 – стержневая защита; 30, 37 – промежуточный теплообменник; 25 – прочие конструкционные элементы

Результаты расчета по двум указанным выше подходам близки. Однако, в отличие от формул точечной кинетики, программа GVA рассчитывает пространственные эффекты, которые, в частности, продемонстрированы на рис. 4. На этом рисунке представлены отличия пространственных распределений энерговыделения от начальных распределений в трех сечениях реактора по высоте в момент времени $t = 20$ с, когда происходит закипание натрия. Четко виден пространственный эффект от закипания натрия в верхней части реактора.

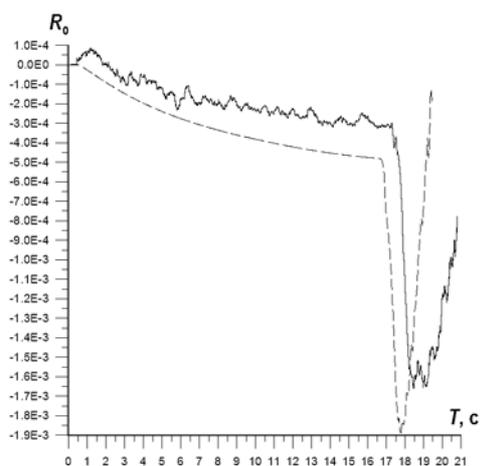


Рис. 3. Расчетная зависимость реактивности реактора от времени при аварийном отключении ГЦН

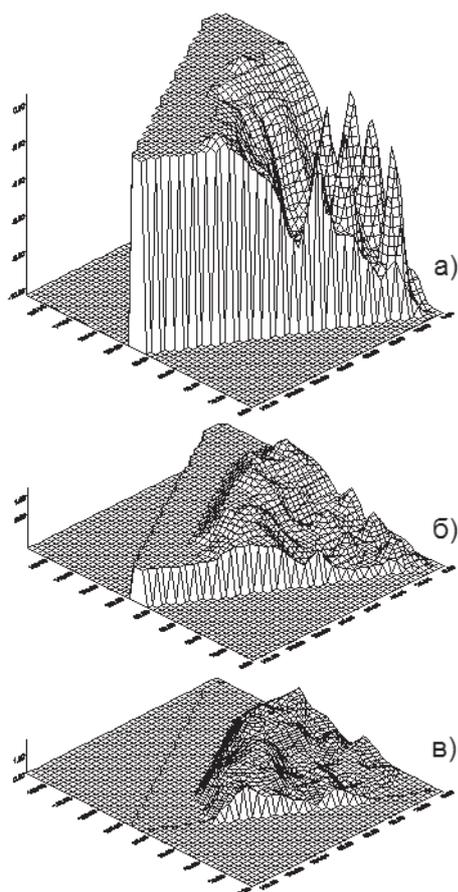


Рис. 4. Относительное формоизменение пространственного распределения энерговыделения в разных сечениях реактора на момент времени $t = 20$ с по отношению к $t = 0$: а) – 73.5 см от низа активной зоны; б) – 52.5 см от низа активной зоны; в) – 31.5 см от низа активной зоны. Моделируется аварийное отключение ГЦН

Вторая авария. На рисунках 5, 6 приведены зависимости реактивности и мощнос-

ти от времени для второй аварии, связанной с выбросом шести компенсирующих стержней, которые в начальный момент времени полностью опущены в активную зону реактора, со скоростью 10 см/с. Соответствующие распределения относительных формоизменений энерговыделения в разных сечениях по высоте реактора в различные моменты приведены на рис. 7. Видно, что имеется сильное локальное возмущение, которое постепенно распространяется на окружающие области активной зоны.

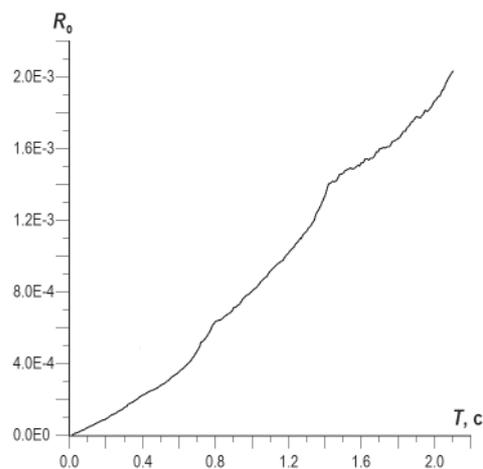


Рис. 5. Расчетная зависимость реактивности реактора от времени при извлечении группы из шести КС со скоростью 10 см/с

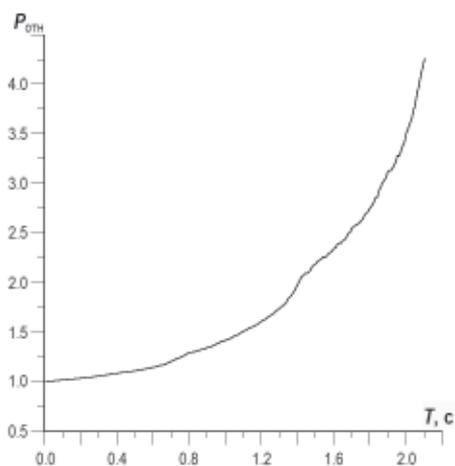


Рис. 6. Расчетная зависимость относительной мощности реактора от времени при извлечении группы из шести КС со скоростью 10 см/с

ВЫВОДЫ

1. Разработана программа GVA, предназначенная для совместного решения в трехмерной геометрии уравнений пространственно-временной кинетики реактора и теплогидравлики применительно к расчету нестационарных и аварийных процессов в реакторах.

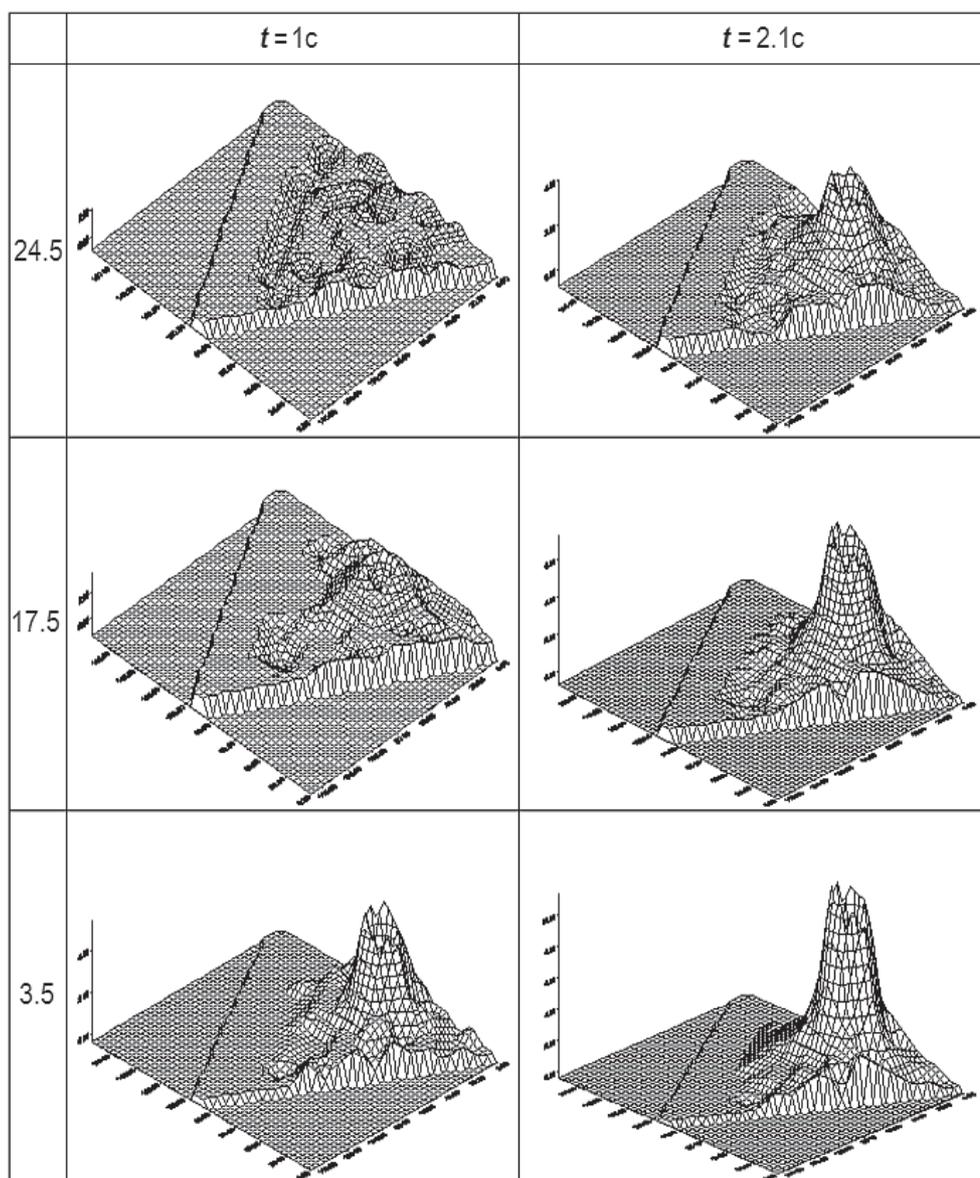


Рис. 7. Относительное изменение пространственного распределения энерговыделения в разных сечениях реактора в моменты времени $t=1c$ и $t=2.1c$ по отношению к $t=0$ при извлечении группы стержней со скоростью 10 см/с

2. По программе GVA проведены тестовые расчеты запроектных ULOF- и TOP-аварий в реакторе типа БН-800. Эти расчеты достаточно хорошо согласуются с расчетами тех же аварийных процессов по программе GRIF-SM, однако позволяют учитывать существенные пространственные изменения полей энерговыделения в реакторе, вызванные перемещениями реакторных материалов в аварийном процессе, движением поглощающих стержней (до 10–15% от исходных значений).

Литература

1. Безбородов А.А., Волков А.В., Ганина С.М., Гинкин В.П., Кузнецов И.А., Троянова

Н.М., Швецов Ю.Е. Программа совместного решения уравнения пространственно-временного переноса нейтронов и теплогидравлических нестационарных и аварийных процессов в быстрых реакторах / Препринт ФЭИ-2637, 1997.

2. *Chvetsov I., Kuznetsov I., Volkov A.* GRIF-SM – the Computer Code for Analysis of the Severe Beyond Design Basis Accidents in Sodium Cooled Reactors // International topical meeting. Obninsk, Russia, October, 3–7, 1994. Sodium Cooled Fast Reactor Safety, vol. 2.

3. *Гинкин В.П., Ваньков К.А., Троянова Н.М.* ВОЛНА – программа трехмерного нестационарного расчета реактора в квазистатическом групповом приближении / Препринт ФЭИ-2360, Обнинск, 1994.

4. *Хохлов В.Ф., Николаев М.Н., Савоськин М.М.* Комплекс программ АРАМАКО для расчета групповых макро- и заблокированных микросечений на основе 26-групповой системы констант в подгрупповом представлении // Ядерные константы, вып.8. М.: Атомиздат, 1972.

Поступила в редакцию 25.12.2012

with the weight windows generated with the method of characteristics. Technique proposed implements CADIS (Consistent Adjoint Driven Importance Sampling) scheme and includes solving the adjoint multigroup problem with characteristics code MCG3D to generate the space-energy weight windows for the Monte-Carlo calculation. A general structure of the technique for use in design calculation is described. Presented numerical results confirm the high efficiency and accuracy of the proposed hybrid technique. The advantages of using the method of characteristics in the CADIS scheme are discussed.

УДК 519.6:621.039.5

Space-time calculation of transient processes in fast reactors \ Ginkin V.P., Troyanova N.M.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 8 pages, 7 illustrations. References, 4 titles.

Algorithms of 3-D neutron physics simulating for fast transient abnormal conditions in BN-type reactors core were developed in the GVA code. A quasi-static approximation is used for the solution of non-stationary equation of reactor physics. This approach divides the original equation onto the system of two equations: for calculating of the amplitude factor, which is quickly changed during the time and does not depend on spatial coordinates, and form-function, which depends on spatial coordinates and is slightly changed during the time. The results of test simulating in flow rate stop conditions and in self-movement of control rods conditions are demonstrated.

УДК 537.58:539.321.9

The physical phenomenon of emission of electrons in metals under the action of ultrasound \ Trofimov A.I.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 8 pages, 5 tables, 5 illustrations. References, 9 titles.

A theoretical and experimental study of a new physical phenomenon – the emission of electrons in metals under the influence of ultrasound. Shows the analogy mechanisms to increase the internal energy in metals by heating and effect of ultrasound. The substantiation of a possible rise in the emissivity of the emitter thermionic converters.

УДК 621.039.052

Numerical and experimental investigations of thermohydraulic characteristics for fast reactor vessels on integral model SARH in different operation regimes \ Zaryugin D.G., Kalyakin S.G., Leskin S.T., Opanasenko A.N., Sorokin A.P.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 9 pages, 8 illustrations. References, 4 titles.

Features of the stratified flows on examples of reactors on fast neutrons, possibility of their scale modelling are considered. Some results of experimental and numerical researches in mixing chambers and pipelines are presented. It is underlined necessity of the account of the stratification phenomena at a substantiation of reliability, safety, periods of operation for various nuclear power plants.

УДК 621.039.517

Simulation of loop test conditions for the modified SM reactor fuel rods and test results in justification of their performance \ Starkov V.A., Fedoseev V.E., Shishin V.Yu.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 9 pages, 1 table, 9 illustrations. References, 9 titles.

Irradiation conditions were simulated to test pilot modified fuel rods of the SM reactor under middle (10MW/m²) and maximal (up to 15MW/m²) thermal load. Some post-irradiation results are presented. A conclusion was made about the performance of the pilot SM fuel rods with the U content increased by 20%. A comparative analysis of both test conditions and material tests of the SM fuel rods was performed. The material tests results were used as a basis to propose and justify a phenomenological model of fuel rods swelling.

УДК 621.039.519

Tests of experimental low neutron poisoning fuel assemblies in reactor SM \ Klinov A.V., Kalinina N.K., Marikhin N.Yu., Pimenov V.V., Petelin A.L., Starkov V.A., Fedoseev V.E.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 9 pages, 6 tables, 6 illustrations. References, 12 titles.

The paper presents the heat rate distribution, thermal flux density and burnup for three experimental