

и степень удаления трития с поверхности частиц топлива.

Анализ приведенного уравнения позволил заключить, что план эксперимента расположен в области оптимума, тем не менее было целесообразно продолжить поиск оптимальных условий с помощью метода «крутого восхождения». Уравнение было использовано для движения по градиенту к оптимуму (см. табл. 2). Как видно из данных табл. 2, в опытах получена высокая степень удаления трития, достигающая 99,96% при 12-часовой обработке и  $t = 650^\circ\text{C}$ . Дальнейшее увеличение температуры и времени процесса не привело к заметному повышению степени удаления трития.

Таким образом, эксперименты позволили на основании полученной математической модели процесса удаления трития найти оптимальные условия для этого процесса: температура  $650^\circ\text{C}$ , время выдержки  $> 12$  ч, в качестве окислительного реагента используется влажный воздух.

УДК 621.039.534.6

## Эксперименты по вскипанию натрия на реакторе БОР-60

АФАНАСЬЕВ В. А., АЛЕКСАНДРОВ К. А., КЕБАДЗЕ Б. В., ГРАДОВ В. М., ГОЛУБИЧ В. В., КРАСНОЯРОВ Н. В., МИТЕНКОВ Ф. М., МЕРКУЛОВ В. И., ПАХОМОВ В. В., КАРАСОВ В. Н., ЗЕМЛИН А. В. (ОСР), ФУГЕ Р., ПРИДЕЛЬ Э., УЛЬМАН Г., КЭТЦМЕР Д. (ГДР)

Высокая энергонапряженность активной зоны быстрых реакторов с натриевым теплоносителем определяет важность раннего обнаружения аварий, связанных с блокировкой расхода теплоносителя отдельных тепловыделяющих сборок (ТВС) или ячеек активной зоны. В последние годы в ряде стран проводятся интенсивные исследования по диагностике вскипания натрия, целью которых является разработка средств защиты элементов активной зоны от возможного разрушения при локальной аварии [1]. Исследования кипения натрия в стендовых условиях позволяют выбрать характеристики датчиков и аппаратуры анализа, а также провести их испытание [2, 3]. Эксперименты в реальных условиях работы на мощности быстрого натриевого реактора могут дать полное представление о практических проблемах и реальности создания системы диагностики вскипания натрия. В настоящей работе приводятся данные по кипящей сборке, системе измерений и результатам экспериментов со вскипанием натрия в объеме активной зоны реактора БОР-60.

При обработке облученной двуокиси урана в данном режиме степень удаления трития составляет более 99,96%, что обеспечивает радиационную безопасность при обращении с водными растворами, содержащими тритий.

Поступила в Редакцию 19.XII.77  
В окончательной редакции 21.IV.78

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Srinivasan N. In: Proc. IAEA «Reprocessing of Highly Irradiated Fuel—Some Alternations», Vienna, 1970, IAEA-115, p. 148.
2. Watson C. et al. In: Proc. 16th Conf. on Remote Systems Technology, Vienna, 1969, p. 19.
3. Агеев А. Т., Вагнер Е. М. «Атомная энергия», 1976, т. 41, вып. 2, с. 140.
4. Агеев А. Т. и др. Там же, вып. 1, с. 23.
5. Ломоносов И. Н., Соловьев Л. Д. Измерение трития. М., Атомиздат, 1968.
6. Ластман Б. Радиационные явления в двуокиси урана. М., Атомиздат, 1964.

Экспериментальное оборудование. На период эксперимента с кипением натрия реактор был оснащен кипящей сборкой и двумя волноводами (рис. 1). Кипящая ТВС расположена на границе активной зоны и состоит из 18 вольфрамовых и одного стального стержня диаметром 6 и длиной 450 мм (высота активной зоны 400 мм), которые окружены двумя обечайками с газовым теплоизолирующим зазором между ними. Расход натрия через кипящий блок 18 л/ч, что обеспечивает выход в режим кипения при мощности реактора 9 МВт; полное энерговыделение от  $\gamma$ -излучения в вольфрамовых стержнях  $\sim 5$  кВт. В объеме кипящей сборки расположено 7 термопар. Кипящая сборка продолжена штангой с выходом над крышкой аппарата; по штанге выведены кабели от термопар и двух погружных датчиков (П-1, П-2), расположенных на расстоянии 300 мм от предполагаемого места схлопывания пузырей. Чувствительные элементы датчиков — кристаллы из ниобата лития диаметром 6 мм.

Волноводный датчик (В-1) в перегрузочном канале представляет собой стальной стержень

Рис. 1. Схема размещения экспериментальных устройств:  
 1 — ионизационные камеры (ИК); 2 — кипящая тепловыделяющая сборка; 3 — погружные датчики из ниобата лития; 4 — прижимной датчик на малой пробке (А-1); 5 — волноводный датчик в перегрузочном канале (В-1); 6 — штанга; 7 — волноводный датчик в термодарном канале (В-2); 8 — активная зона

длиной 5280 мм с переменным диаметром 8—16 мм с пьезопреобразователем (ЦТС-19) на верхнем конце стержня. Нижний конец волновода контактирует с натрием на расстоянии ~20 мм от головок ТВС. Аналогичный волноводный датчик (В-2) расположен на периферии реактора; стержень контактирует с натрием в районе выходных патрубков. Кроме того, на крышке аппарата (малая поворотная пробка) помещен прижимной акустический датчик (А-1) из пьезокерамики ЦТС-19. Для измерения флюктуаций нейтронного потока использовали штатную ионизационную камеру.

**Система измерений.** Структурная схема системы измерений приведена на рис. 2. По результатам анализа фоновых шумов для улучшения отношения сигнал/шум акустических датчиков применяли фильтры, отсекавшие шумы ниже 20 кГц. Во всех режимах выходов в кипение

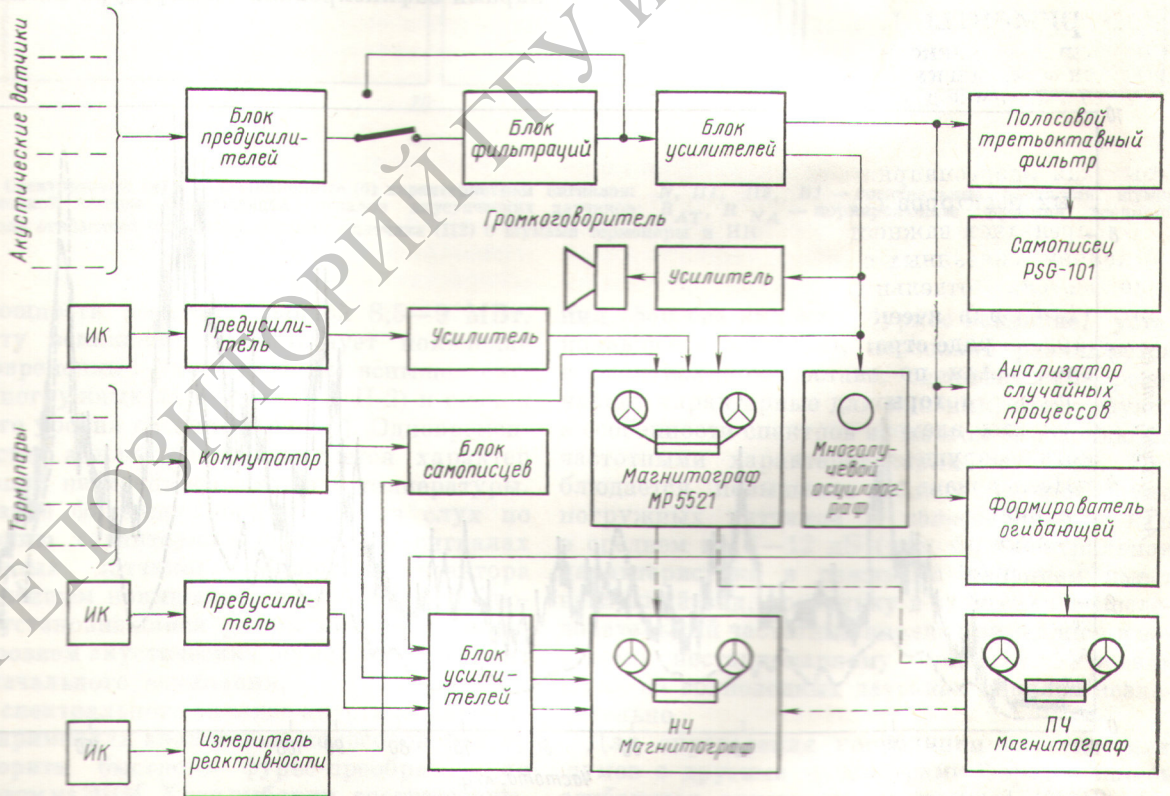
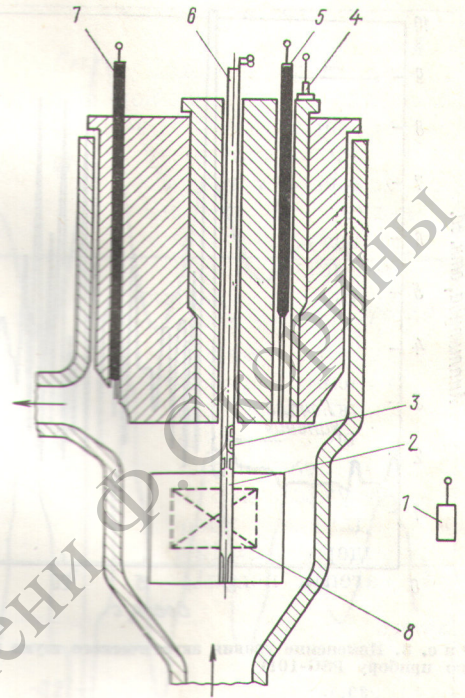


Рис. 2. Структурная схема системы измерений и регистрации

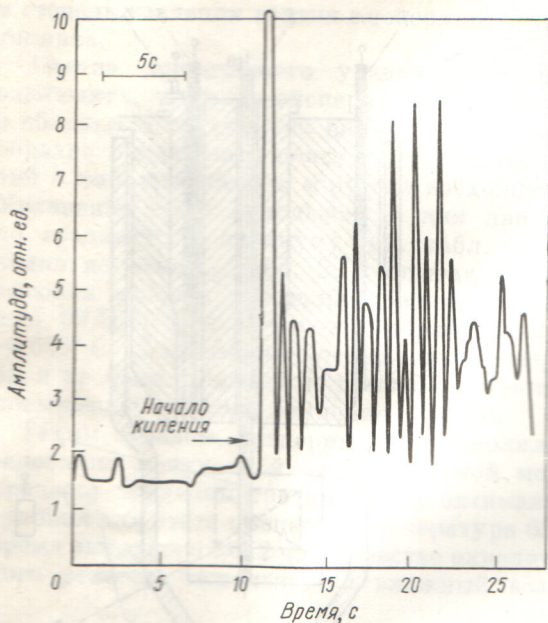


Рис. 3. Изменение уровня акустического шума при вскипании (по прибору PSG-101)

усиленные сигналы с нейтронных, акустических и термометрических датчиков записывали на магнитограф МР-5521 (3 канала с частотной модуляцией, динамический диапазон 40 дБ, частотный диапазон 0—20 кГц; 4 канала прямой записи диапазоном 26 дБ, полоса 150 кГц). Низкочастотные процессы записывали также на 9-канальный магнитограф с полосой до 500 Гц. Для последующей обработки акустических сигналов на ЭВМ и аналоговом корреляторе проводили трансформированную перезапись сигналов магнитографом 7001 ( $f_{\text{макс}} = 20$  кГц, частотная модуляция). Предварительный анализ в процессе эксперимента проводили на анализаторе случайных процессов с полосой 20—500 кГц [2] и с помощью полосового трехполосного фильтра. Для регистрации использовали также самописец чувствительности акустического шума. Параметры визуально контролировали осциллографом и самописцем. Сигнал с акустических датчиков поступал на динамик. Колебания реактивности записывались реактиметром.

Результаты экспериментов. Были проведены четыре захода в режим кипения, которые отличались скоростью подъема мощности. Термометром зафиксирована температура насыщения

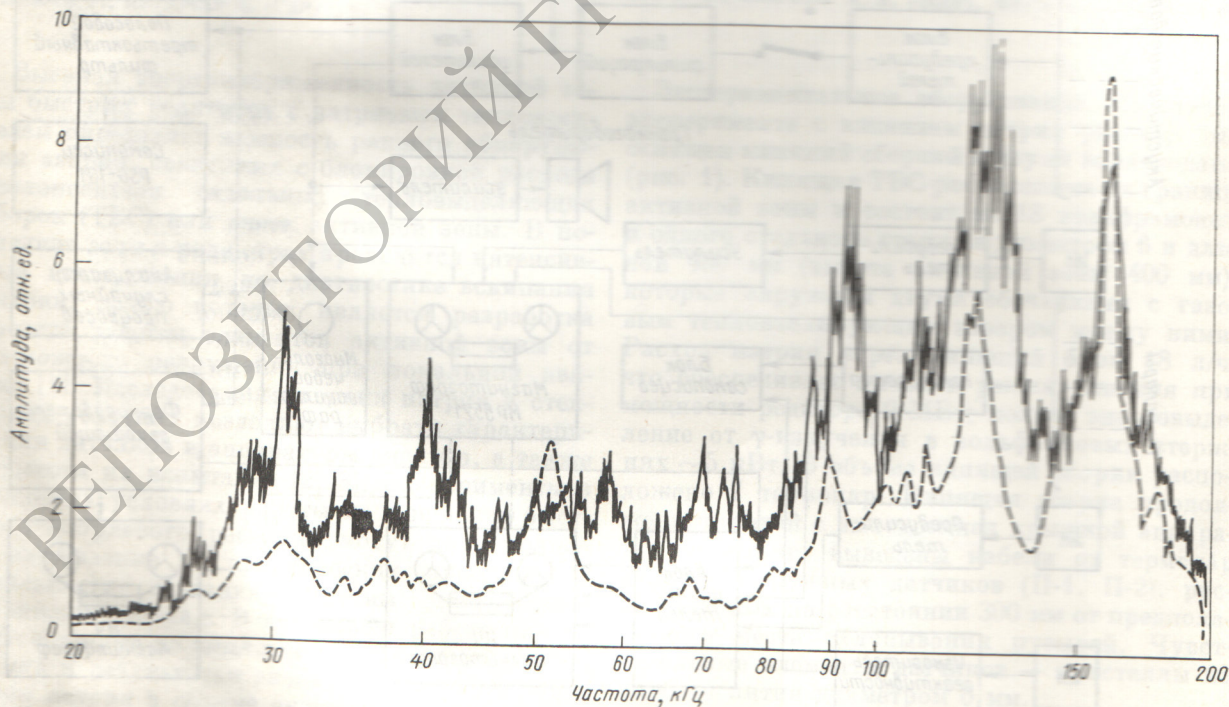


Рис. 4. Спектр шумов погружного датчика П-1 (последовательный частотный анализ с шириной полосы  $\Delta f = 0,03 f_{cp}$ ): — фон без кипения, — режим кипения

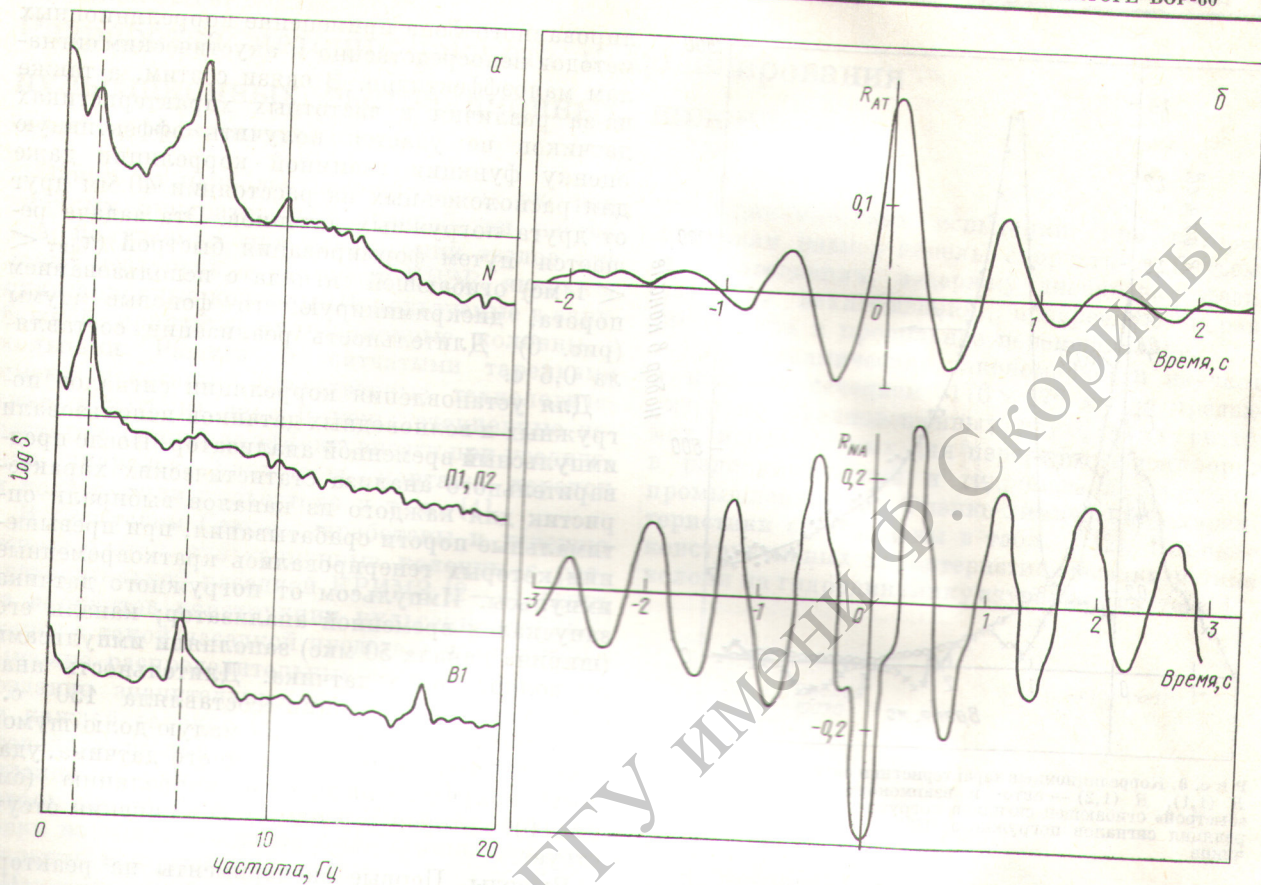


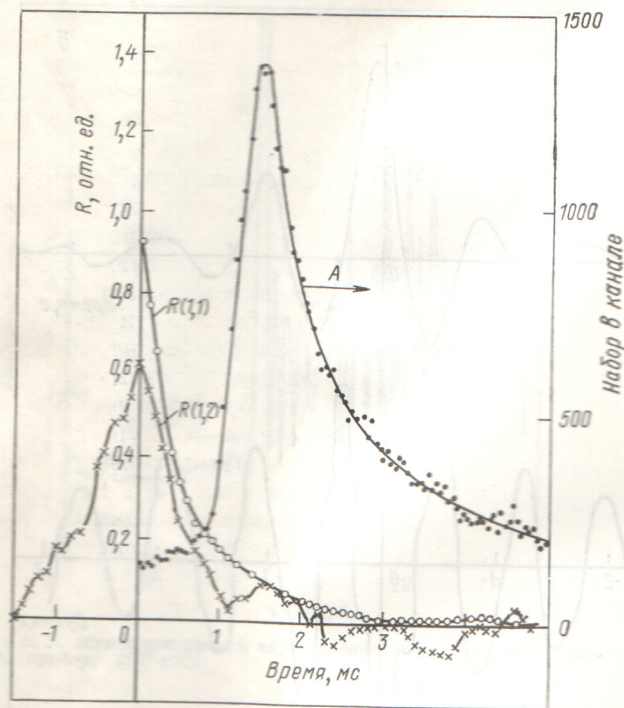
Рис. 5. Спектральные (а) и корреляционные (б) характеристики сигналов: N, П1, П2, В1 — спектральные плотности шумов ионизационной камеры и огибающей сигналов акустических датчиков;  $R_{AT}$ ,  $R_{NA}$  — нормированные функции взаимной корреляции огибающей сигнала погружного датчика (П2) с шумами термопары и ИК

при мощности реактора, равной 8,5—9 МВт. Моменту вскипания соответствует появление кратковременных (порядка 1 мс) всплесков сигналов погружных датчиков (П-1, П-2) и скачок среднего уровня сигналов (рис. 3). Одновременно растет амплитуда и изменяется характер пульсаций нейтронного потока и температуры. Вскипание фиксировалось также на слух по появлению характерных щелчков в сигналах погружных датчиков. Мощность реактора в дальнейшем повышалась до 10 МВт. Наблюдается установившийся режим кипения с меньшим уровнем акустических шумов, чем в момент первоначального вскипания.

Для спектрального анализа акустических сигналов применяли аналоговый полосовой фильтр и алгоритм быстрого фурье-преобразования с расчетом на ЭВМ. Хотя выборки, соответствующие различным этапам выхода на режим кипения

(фон без кипения, бурное вскипание, установившееся кипение), несколько различаются в спектральном составе, специфические резонансы, характерные для кипения, отсутствуют, а особенности спектров во многом определяются частотными характеристиками датчиков. Наблюдается повышение общего уровня шума погружных датчиков в полосе 20—120 кГц в среднем на 8—12 дБ (рис. 4). Спектральная характеристика в режиме с кипением имеет негладкий вид, поскольку в этом случае последовательный частотный анализ применялся к заведомо нестационарному процессу. Уровень шума на волноводных датчиках менялся незначительно.

Для определения корреляции акустических шумов с другими параметрами формировалась огибающая акустического сигнала (ОАС). На рис. 5 показаны спектральные плотности и кор-



Р и с. 6. Корреляционные характеристики акустических сигналов:  $R(1,1)$ ,  $R(1,2)$  — авто- и взаимокорреляционные функции «быстрой» огибающей сигналов погружных датчиков;  $A$  — корреляция сигналов погружного (П2) и волноводного (В) датчиков

реляционные функции нейтронного потока, температура, ОАС различных датчиков. При кипении во флуктуациях этих параметров появляются характерные резонансы на частотах  $\sim 1,4$  и 6 Гц, причем наблюдается хорошая корреляция указанных параметров на частоте 1,4 Гц. Очевидно, этот резонанс проявляется в квазипериодических изменениях парового объема в сборке; возрастание последнего сопровождается увеличением схлопывающихся в смесительной камере пузырьков и ростом интенсивности акустического шума. Антикорреляция ОАС с нейтронным потоком объясняется отрицательным паровым коэффициентом реактивности. Присхождение резонанса на  $f = 6$  Гц не вполне ясно. Возможно, что он связан с механическими вибрациями, возбуждаемыми при кипении либо быстрой осцилляцией поверхности парового объема.

Ввиду нестационарности акустических шумов кипения и наличия значительного некоррели-

рованного фона применение корреляционных методов непосредственно к акустическим сигналам малоэффективно. В связи с этим, а также из-за различия в частотных характеристиках датчиков не удается получить эффективную оценку функции взаимной корреляции даже для расположенных на расстоянии 40 мм друг от друга погружных датчиков. Эта задача решается путем формирования быстрой ( $\tau_{\text{инт}} < 1$  мс) огибающей сигнала с использованием порога, дискриминирующего фоновые шумы (рис. 6). Длительность реализации составляла 0,6 с.

Для установления корреляции сигналов погружных и волноводных датчиков использовали импульсный временной анализатор. После предварительного анализа статистических характеристик для каждого из каналов выбирали оптимальные пороги срабатывания, при превышении которых генерировались кратковременные импульсы. Импульсом от погружного датчика запускался временной анализатор; каналы его (ширина канала 50 мкс) заполняли импульсами от волноводного датчика. Длительность анализируемой реализации составляла 150 с. Этим методом, несмотря на малую долю шумов кипения в сигнале волноводного датчика, удалось получить надежную корреляцию (см. рис. 6), которая в режимах без кипения отсутствует.

**Выводы.** Первые эксперименты на реакторе БОР-60 показали принципиальную возможность обнаружения вскипания натрия по акустическим и нейтронным шумам. Получена полезная информация о характере сигналов и возможностях использования различных методов их обработки. Однако необходимы дальнейшие экспериментальные и расчетные исследования для создания оперативной и надежной системы контроля вскипания в активной зоне быстрого реактора.

Поступила в Редакцию 2.II.78

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов В. М. Ультразвуковые измерения в атомной технике. М., Атомиздат, 1975.
2. Александров К. А. и др. Преприят НИИАР П-9 (275), Димитровград, 1976.
3. Александров К. А. и др. «Атомная энергия», 1977, т. 42, вып. 5, с. 410.