

произвольном питании. Из требования достижения наибольшей плотности производства ценности найден оптимальный коэффициент деления потока питания. Показано, что в рассмотренном приближении отсутствует оптимум разделительной способности по интенсивности потока питания. В отличие от стандартного метода усреднения по радиусу полученные результаты применимы при произвольном соотношении интенсивностей питания и противотока.

Автор выражает благодарность В.Д. Селезневу за конструктивную критику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cohen K. The Theory of Isotope Separation as Applied to Large-Scale Production of U^{235} . New York: McGraw-Hill Book, 1951. 165 p.
2. Бермел У., Костер Е., Ретц Е. Обзорная статья по центрифужной технологии. — В сб.: Открытые публикации и патенты по газовым центрифугам. Под ред. А.П. Сенченкова. М., РНЦ «Курчатовский ин-т», 1995, с. 19—72.
3. Wood H., Gunzburger M. Adjoint and sensitivity-based methods for optimization of gas centrifuges. — In: Proc. of 7th Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases. Moscow, 2000, p. 89—99.
4. Ratz E. Optimal flows in gas centrifuges. — In: Proc. of 3th Workshop on Gases in Strong Rotation. Rome, 1979, p. 431—458.
5. Обогащение урана. Под ред. С. Виллани. Пер. с англ. под ред. И.К. Кикоина. М.: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.
6. Von Halle E. The Optimum Axial Flow Taper in a Countercurrent Gas Centrifuge. US. DOE Report K/OA-4445, 1979.
7. Борисевич В.Д., Левин Е.В., Наумочкин В.В. Оптимальная структура течения в газовой центрифуге для разделения изотопов урана. — Атомная энергия, 1991, т. 70, вып. 1, с. 28—32.
8. Александров О.Е. Применение метода усреднения по радиусу для описания диффузии в газовой центрифуге при неоднородном потоке циркуляции. — Там же, 1999, т. 86, вып. 3, с. 210—219.
9. Olander D. The theory of uranium enrichment by the gas centrifuge. — In: Progress in Nuclear Energy. N.Y.—London: Pergamon Press Ltd., 1981, v. 8, p. 1—33.
10. Токманцев В.И. Уточненное уравнение для анализа разделения бинарной смеси изотопов в газовой центрифуге методом усреднения по радиусу. — Атомная энергия, 2002, т. 92, вып. 5, с. 360—366.
11. Токманцев В.И. Потенциал и локальная эффективность центробежного разделения неизотопной бинарной смеси газов. — Там же, 2001, т. 91, вып. 2, с. 153—163.
12. Александров О.Е. Разделительная способность газовой центрифуги и некоторые ошибки ее оптимизации. — Там же, 2002, т. 92, вып. 3, с. 212—221.
13. Александров О.Е. Идеальная центрифуга. — Там же, 1999, т. 87, вып. 3, с. 213—219.
14. Von Halle E., Wood H., Lowry R. The effect of vacuum core boundary conditions on separation in the gas centrifuge. — Nucl. Technol., 1983, v. 62, p. 325—334.

Поступила в Редакцию 2.08.02

УДК 621.039.55.34

ТЕПЛОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА МОДЕЛИ МИШЕНИ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЕМОЙ СИСТЕМЫ

Ефанов А.Д., Орлов Ю.И., Сорокин А.П., Иванов Е.Ф., Богословская Г.П.

(ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейтунского),

Ли Н. (Лос-Аламосская национальная лаборатория, США)

Мишенный узел TS-1 представляет собой часть экспериментальной установки, которая сооружается в Лос-Аламосской национальной лаборатории (США) для испытаний в пучке протонов ускорителя LANSCE. Проверка устойчивой работы

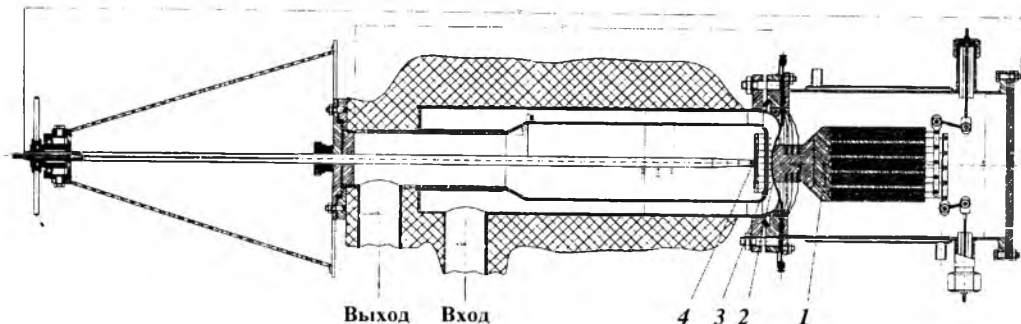
мишени требует расчета распределения температуры с помощью компьютерных программ, затем на основе полученных результатов — анализа термомеханических и прочностных характеристик установки.

Основными целями экспериментов были опытное решение сопряженной задачи по теплообмену между турбулентным потоком теплоносителя и мембранной поверхностью, получение необходимых для верификации кодов данных о распределении температуры как в жидком металле, так и в теле мембраны. Эти задачи включают в себя решение двух независимых проблем. Первая состоит в изучении условий теплообмена между потоком теплоносителя и стенкой в непосредственной близости от поверхности теплообмена, вторая — в исследовании турбулизирующего влияния на поток теплоносителя профилирующей решетки, установленной во внутреннем канале модели.

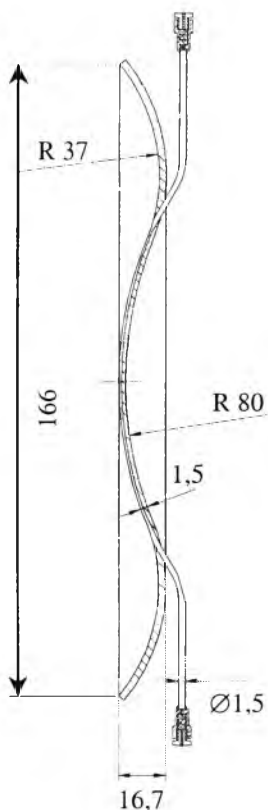
Таким образом, целями работы являются разработки проекта тепловой модели мишени и экспериментального метода исследования теплообмена в мишени, а также получение экспериментальных данных о распределении температуры теплоносителя и мембраны. Распределение температуры, полученное в настоящей работе, а также скорости в проточной части модели мишени, найденное в рамках программы гидродинамических опытов проекта МНТЦ № 559, является базой данных для верификации двух- и трехмерных кодов теплогидравлического расчета подобных систем.

Экспериментальная модель. Опыты проводили на стенде АР-1. Натрий-калиевый контур стенда АР-1 обеспечивает следующие режимные параметры: расход до $15 \text{ м}^3/\text{ч}$, теплоноситель движется как вынужденно при работе насоса, так и за счет естественной конвекции, подведенная электрическая мощность $\sim 1,5 \text{ МВт}$. Возможность использования эвтектического сплава натрий—калий как моделирующей жидкости для тяжелого металла обоснована расширенным экспериментальным и аналитическим опытом, накопленным в ФЭИ.

Теплоноситель входит в кольцевой канал модели через входное отверстие и движется к мембране, установленной в правом конце (рис. 1). Здесь он поворачивается, ударившись о поверхность мембраны, и, проходя через сетку, движется в противоположном направлении во внутреннем канале (трубе), выходит из модели через выходной патрубок, расположенный в нижней части модели. Мембрана, установленная в правой части модели, представляет собой тонкую пластину из нержавеющей стали толщиной 1,5, диаметром 175 мм (рис. 2). Медный прут, при-



Р и с. 1. Продольный вид тепловой модели мишени: 1 — медный блок с нихромовыми нагревателями; 2 — мембрана мишени; 3 — решетка с профилирующими отверстиями; 4 — термопарный зонд



Р и с. 2. Конструкция мембраны

Нагревательный блок представляет собой конструкцию, состоящую из медного блока диаметром 130, длиной 200 мм с установленными внутри 19 нагревателями. Каждый нагреватель соединен с четырьмя катушками, которые связаны последовательно парами и формируют две параллельные схемы. Каждая схема из двух катушек последовательно связана параллельно с подобной схемой соседнего нагревателя. Такое подключение ведет к уничтожению магнитных полей, наведенных током. Предложенная схема позволяет существенно уменьшить шумы в схемах измерения. Нагревательный модуль прикреплен к мембране с использованием серебра, температура плавления которого 600 °С.

На расстоянии 5 мм от мембраны установлена дистанционирующая решетка, формирующая специальное распределение расхода теплоносителя: мембрана омывается наилучшим способом. Как видно из рис. 3, большинство отверстий имеет овальную форму, но центральное отверстие круглое диаметром 10 мм.

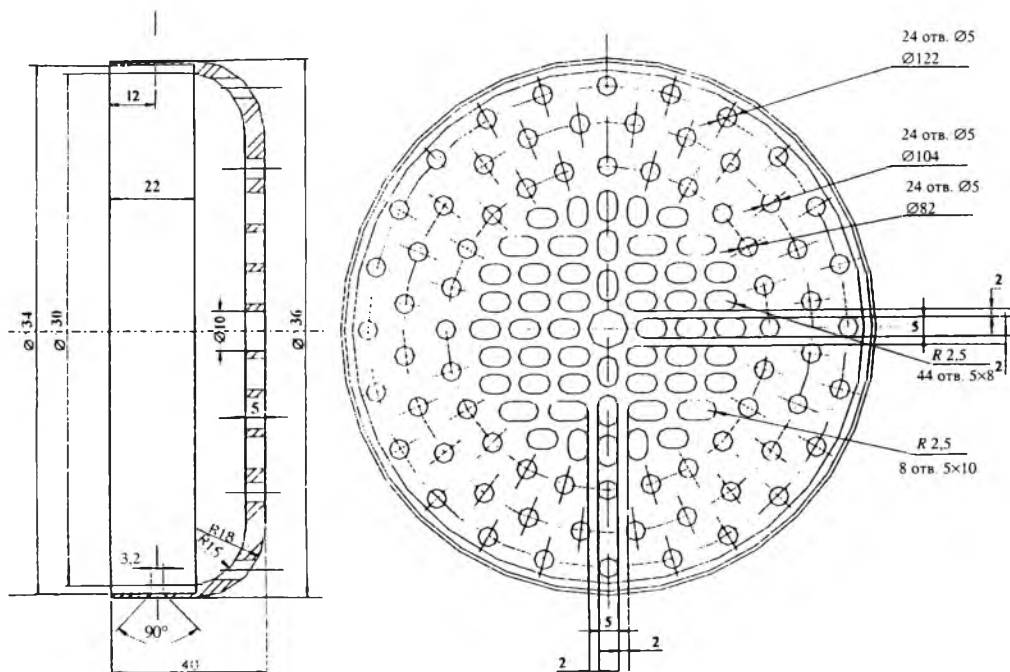
Система сбора и обработки данных. Испытательный контур АР-1 снабжен системой автоматического сбора данных и управления теплогидравлическими процессами, которая обеспечивает сбор данных с помощью устройств, предназначенных для измерения колебаний и абсолютной температуры в металлических модулях и потоке теплоносителя, датчиков, определяющих гидравлическое сопротивление и пульсации давления в теплоносителе, акустических датчиков, расходомеров, датчиков электрической мощности, подводимой к рабочему участку.

В ходе опытов фиксировали следующие режимные параметры: расход натрий-калиевого теплоносителя магнитным расходомером, электрическую мощность, вы-

паянный серебром к поверхности мембраны, создает тепловой поток. На поверхности со стороны, омываемой теплоносителем, сделано полукруглое углубление 0,6 мм, в котором перемещается подвижная термопара, покрытая капилляром. Как показано на рис. 2, в капилляр вставлены изолированные хромелевые и копелевые провода, в месте соприкосновения сваренные электроконтактным методом. Поскольку теплопроводность нержавеющей стали и натрий-калиевого сплава одинаковая, теплоноситель, заполняющий пространство между термопарой и мембраной, способствует сглаживанию распределения температуры.

Центр спая подвижной термопары находится на расстоянии 0,2 мм от поверхности мембраны. Таким образом, температура, измеренная подвижной термопарой, соответствует температуре на глубине 0,2 мм от ее поверхности. При тепловом потоке 80 Вт/см² она превышает поверхностную температуру на 14 °С.

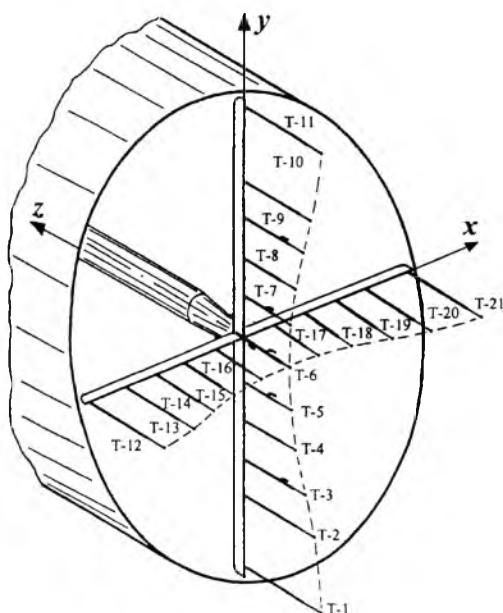
Мембрана — наиболее нагруженный элемент мишени нагревается электрическим методом тепловой призмы. Это позволяет приблизительно обеспечить граничное условие постоянного теплового потока на ее поверхности, причем тепловой поток уточняется позже после оценки тепловых потерь.



Р и с. 3. Дистанционирующая решетка

деляемую в нагревательном модуле по напряжению и току в нагревателях, тепловой поток на мембранной поверхности по показаниям девяти хромель-алюмелевых термопар Т-26—Т-34 ($\theta_{26}, \theta_{27}, \dots, \theta_{34}$), заделанных на расстоянии 7 мм одна от другой в медном нагревательном модуле (по три под углом 120°), а также по повышению температуры теплоносителя, температуру теплоносителя за профилирующей решеткой $\theta_1(z), \theta_2(z), \dots, \theta_{21}(z)$ с помощью подвижной термопары (рис. 4), входную и выходную температуру теплоносителя θ_{22}, θ_{23} (Т-22 и Т-23 соответственно), температуру мембраны θ_{24} со стороны жидкости подвижной термопарой Т-24, помещенной в специальное углубление в теле мембраны.

Хромель-копелевые термопары, покрытые оболочкой из нержавеющей стали, установлены напротив соответствующих отверстий в профилирующей решетке (см. рис. 3) по горизонтальному (одна гребенка) и вертикальному (другая) диаметру внутренней трубы. Общее число термопар 21. Термопарные провода имеют разную длину, причем их рабочие концы повторяют мембранный профиль. Таким образом, структурно зонд представляет собой две перпендикулярно установ-



Р и с. 4. Термопарный зонд

ленные пластины толщиной 1 мм с хромель-копелевыми термопарами, поверхности которых обозначены на рис. 4 как Т-1, Т-2,..., Т-21.

Пульсации температуры теплоносителя $\tilde{\theta}_n(t)$, $n = 1, 2, \dots, 21$ и температуру мембраны $\tilde{\theta}_{24}(t)$ находили по показаниям термопар.

Экспериментальные результаты и обсуждение. Эксперименты были выполнены на тепловой модели мишени. Режимные параметры были следующие: расход теплоносителя $7,3 \text{ м}^3/\text{ч}$, тепловой поток от поверхности мембраны 86 Вт/см^2 , область нагрева — сферический сегмент 65 мм в диаметре.

Первая серия экспериментов состояла в следующем: при устойчивых тепловых условиях измеряли мгновенную температуру теплоносителя в некоторых сечениях внутреннего канала, отделенных от мембраны на 300, 250, 200, 150, 100, 80, 60, 40, 20 и 15 мм. Последнее сечение, которое расположено на расстоянии 15 мм от мембраны, соответствует положению термопарного зонда, отдаленного на 5 мм от внутренней поверхности дистанционирующей решетки.

Следует отметить, что схема позволяет проводить прямые измерения разности между температурой теплоносителя и температурой на входе. В качестве примера на рис. 5 показаны результаты измерений на расстоянии от мембраны 300 мм в



Р и с. 5. Температура теплоносителя на расстоянии от мембраны 300 мм

форме графика температуры, измеряемой подвижной термопарой. Измерения выполнены последовательно в вертикальном направлении от основания до вершины термопарами Т-1—Т-10 и горизонтальном слева направо термопарами Т-11—Т-20. График коррелирует с процедурой измерения: для каждой термопары выполнены 64 измерения, причем на одно измерение требуется 0,04 с, затем между измерениями соседних термопар был сделан просвет шириной 32 замера. В течение этого просвета измеряли температуру теплоносителя на входе. При каждом измерении были оценены средняя температура, среднеквадратичное значение и максимальные температурные колебания.

Распределение температуры на различном расстоянии от мембраны показывает, что во внутренней трубе модели наблюдается существенный перегрев теплоносителя по сравнению с пристенной температурой. Это особенно относится к сечению около решетки. Так, в сечении, расположенном на расстоянии 15 мм от мембраны (5 мм за решеткой), температура на оси на 30°C выше, чем около стенки.

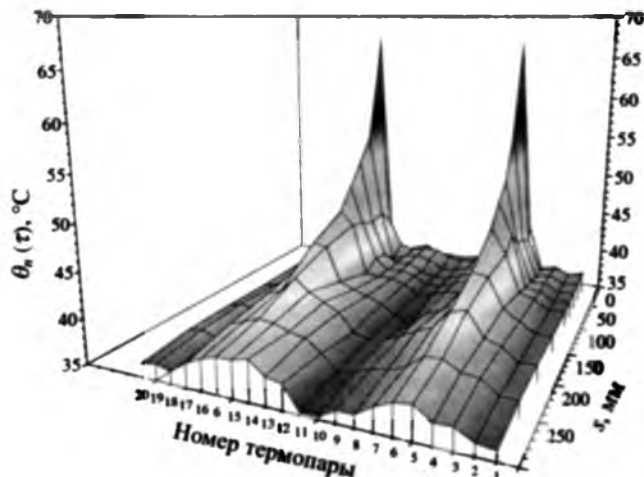
Температура теплоносителя, которая измерена термопарами, установленными в поток напротив смежных с центральным отверстием, только на 5°C выше температуры теплоносителя на входе. Таким образом, наблюдается узкий участок высокотемпературного теплоносителя,двигающегося от мембраны по оси внутреннего канала модели. По мере движения теплоносителя участок быстро размывается. Его резкое размывание по оси внутренней трубы показано на рис. 6.

На оси внутренней трубы около решетки имеются существенные колебания температуры теплоносителя. Так, на расстоянии 15 мм от поверхности мембраны они достигают 13—18 °С, что составляет приблизительно 50% подогрева теплоносителя. Следует отметить, что температурные колебания в отверстиях, смежных с центральным, значительно ниже и составляют 3—5 °С. Большое различие между колебаниями температуры в соседних каналах и интенсивное смешивание струй теплоносителя вызывает быстрое уменьшение температуры на оси.

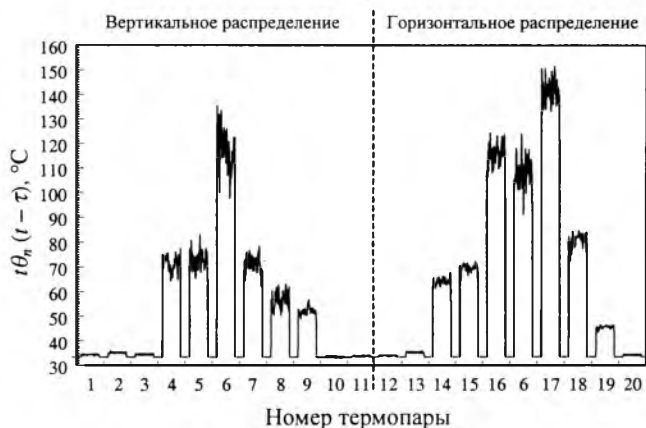
Из рис. 6 видно, что по мере удаления от мембраны максимальная температура на оси около решетки резко снижается уже на расстоянии 30 мм. Далее вниз по потоку температурные колебания становятся более интенсивными в точках, которые соответствуют отверстиям, смежным с центральным, причем одновременно уменьшается интенсивность колебаний на оси канала. Это ведет к тому, что различие между колебаниями в соседних струях снижается и, как следствие этого, интенсивность выравнивания температуры по радиусу в сечениях на расстоянии 200, 250, 300 мм от мембраны уменьшается. Последние данные о средней температуре, усредненной во времени, использовали для оценки турбулентной теплопроводности за решеткой.

Поскольку термопарный зонд был размещен по оси соответствующего отверстия решетки, специальная серия экспериментов была связана с измерением температуры вблизи дистанционирующей решетки, когда термопарный зонд подходил близко к решетке, проходил сквозь нее и подходил к мембране. Так, в этой серии экспериментов расстояние от поверхности мембраны составляло 10, 5, 3, 2, 1 мм. В качестве примера распределение температуры на расстоянии 1 мм от мембраны показано на рис. 7.

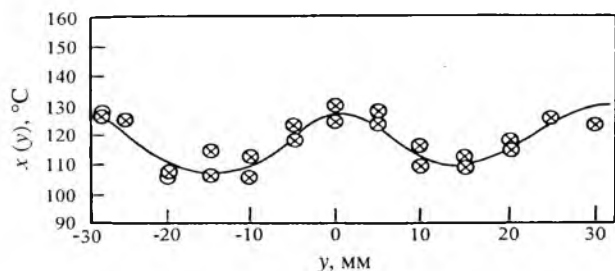
Данные о мгновенной температуре около поверхности мембраны были получены подвижной термопарой. Температурные значения первоначально измерены в центре мембраны при $y = 0$ (ось модели), затем подвижную



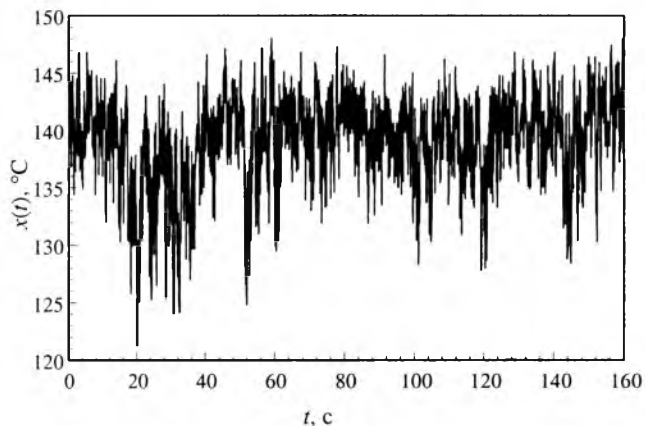
Р и с. 6. Объемное представление температурного поля мишени



Р и с. 7. Распределение температуры в модели мишени на расстоянии от мембраны 1 мм



Р и с. 8. Зависимость средней температуры мембраны $x = \theta_{24}(t)$ от координаты y



Р и с. 9. Температура мембраны $x(t) = \theta_{24}(t)$ при $y = 0$.

$\theta_{22} = 33^\circ\text{C}$, $\overline{x(t)} = 139^\circ\text{C}$, $\sigma_x(t) = 3,9^\circ\text{C}$

Причина может быть в нестационарном движении вихрей крупного масштаба с разной температурой около мембраны.

Таким образом, поверхность мембраны (с жидкой стороны) была подвергнута существенным температурным колебаниям. Среди особенностей обсуждаемого эксперимента могут быть отмечены максимальная амплитуда колебаний, наблюдаемая в высшей точке мембраны, и энергонесущие температурные колебания в диапазоне 0—1 Гц.

термопару перемещали вниз с шагом 5 мм до 30 мм, после этого вверх от центра до 30 мм. На рис. 8 показана усредненная температура мембраны, измеренная подвижной термопарой. Было отмечено, что при перемещении от центра к краям нагретой мембраны колебания уменьшаются. Можно отметить немонотонный характер мембранных температурных колебаний. Так, есть некоторый период с маленькими температурными изменениями, затем наблюдается резкий температурный всплеск. Этот эффект подтверждает рис. 9, где температура мембраны приводится в течение периода 160 с. Температурная неоднородность мембраны и теплоносителя указывает, что распределение температуры возле мембраны непостоянно.

Поступила в Редакцию 17.05.02

УДК 621.039.5

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ ЭНЕРГОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ В СВЯЗАННОЙ РЕАКТОРНОЙ СИСТЕМЕ ИМПУЛЬСНОГО ДЕЙСТВИЯ

*Бережной К.В., Дьяченко П.П., Еловский О.А., Кухарчук О.Ф., Прохоров Ю.А.,
Фокин Г.Н., Якубов П.А. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)*

Связанные реакторные установки с быстрым, промежуточным или тепловым спектром нейтронов, работающие как в стационарном, так и в импульсном режиме, — один из необычных, хотя и предложенных более 40 лет назад видов разнотемпературных систем в современной ядерной науке и технике [1, 2]. Одной из инте-