

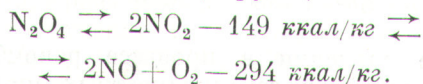
Физико-технические основы создания АЭС с быстрыми газохлаждаемыми реакторами и с диссоциирующим теплоносителем — четырехокисью азота*

А. К. КРАСИН, В. Б. НЕСТЕРЕНКО, Н. М. СИНЕВ, В. П. СЛИЗОВ, В. И. ХОРЕВ, Б. И. ЛОМАШЕВ,
В. П. БУБНОВ, Б. Е. ТВЕРКОВКИН, В. А. НАУМОВ

УДК 621.311.2:621.039

Одним из путей получения эффективных характеристик газохлаждаемых быстрых реакторов может быть применение диссоциирующей четырехокси азота N_2O_4 в качестве теплоносителя и рабочего тела в одноконтурных схемах АЭС [1—7].

Существует большой класс неорганических многоатомных газов, в которых имеют место термические обратимые химические реакции диссоциации и ассоциации, проходящие с тепловыми эффектами и изменениями числа молей. Из них наибольший интерес представляет хорошо изученная диссоциирующая система:



Температурный диапазон первой стадии реакции находится в интервале $21-170^\circ C$, второй $140-850^\circ C$. Основные физико-химические свойства N_2O_4 приведены в работе [1].

Наличие больших тепловых эффектов как по первой, так и по второй стадии реакции оказывает существенное влияние на теплофизические свойства диссоциирующих газов.

В Институте ядерной энергетики Академии наук БССР (ИЯЭ АН БССР) проведено комплексное изучение теплофизических свойств N_2O_4 в широком диапазоне температур и давлений: исследование вязкости при $30-500^\circ C$ и $1-150 \text{ атм}$; $p-v-t$ -свойств — при $50-525^\circ C$ и $8-125 \text{ атм}$; энтальпии — при $20-150^\circ C$ и $100-170 \text{ атм}$; состава газа — при $200-600^\circ C$ и $1-7,5 \text{ атм}$ [4]. Проведены широкие исследования по теплообмену при кипении, конденсации и конвективном переносе тепла при охлаждении.

Исследования показали, что эффективная теплоемкость и теплопроводность N_2O_4 в три — девять раз превышает обычную теплоемкость и молекулярную теплопроводность недиссоциирующих газов. Это обеспечивает резкое увеличение коэффициентов теплообмена (например, максимальные значения эффективной теплоем-

кости N_2O_4 при 1 атм и $80-100^\circ C$ достигают $2,4 \text{ ккал/кг}^\circ C$).

В неизотермическом потоке химически реагирующего газа значительное количество тепла помимо теплопроводности передается в виде химической энтальпии путем концентрационной диффузии. Вклад химической энтальпии в общий баланс передач тепла может быть очень большим. В экспериментальных исследованиях, проведенных в ИЯЭ АН БССР, при турбулентном течении N_2O_4 в обогреваемой трубе при критических давлениях $115-160 \text{ атм}$ и температурах $250-530^\circ C$, плотностях тепловых потоков $(1-7) \cdot 10^5 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$ и числах Рейнольдса $(1-2,5) \cdot 10^5$, коэффициенты теплообмена составляют $18000-42000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}^\circ C$, что в три — девять раз больше значений, получаемых на инертных газах в сравнимых условиях.

Благодаря высоким теплофизическим свойствам применение N_2O_4 в качестве теплоносителя обеспечивает эффективный теплосъем с активной зоны быстрого реактора тепловой мощностью $2500-3000 \text{ Мвт}$ при средней энергонапряженности активной зоны $500-600 \text{ кВт/л}$, максимальной температуре оболочки твэлов (с учетом локальных факторов перегрева) $700-720^\circ C$, температуре газа на выходе из реактора $520-540^\circ C$, давлении $140-170 \text{ атм}$ и подогреве газа $230-270^\circ C$.

Важнейшей особенностью и преимуществом диссоциирующей системы N_2O_4 является возможность использования изменяющегося от температуры молекулярного веса (и, следовательно, газовой постоянной R) для существенного увеличения эффективного к. п. д. и удельной мощности газотурбинного цикла. Хорошо известны недостатки газовых циклов на гелии и CO_2 , у которых при температурах $500-650^\circ C$ очень мал коэффициент полезной работы цикла ($\varphi = \frac{L_T - L_K}{L_T} = 0,2 \div 0,35$). Наличие обратимых реакций в N_2O_4 и изменение химического состава — от $N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2$ при $25-30^\circ C$ с газовой «постоянной» $9,2$ до $NO + O_2$ при $650-850^\circ C$ с газовой «постоянной» $27,6$ — позволяет осуществлять термодинамический газовый цикл с различной газовой «постоянной» в турбине и компрессоре. Меньшая газовая

* IV Международная конференция по использованию атомной энергии в мирных целях (Женева сентябрь 1971 г.). Доклад № 431.

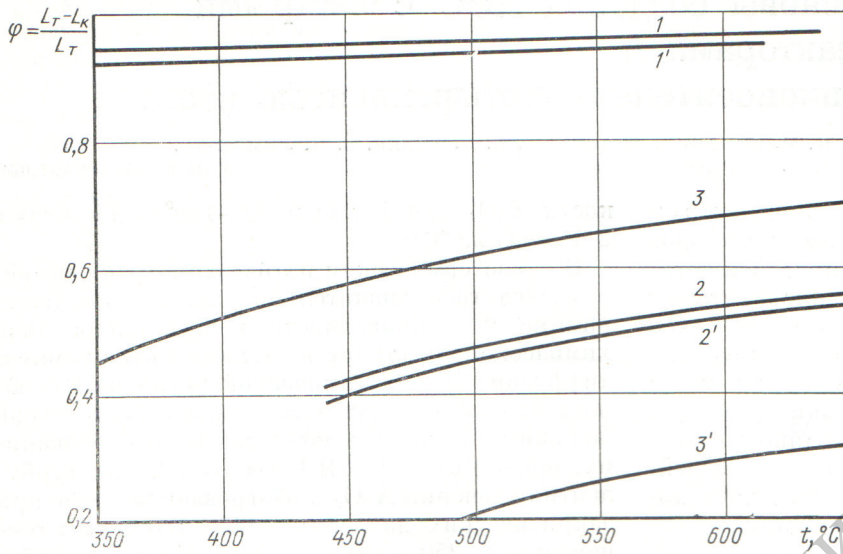


Рис. 1. Сравнение коэффициентов полезной работы термодинамических циклов АЭС с газоохлаждаемыми быстрыми реакторами.

Газо-жидкостный цикл: 1 — N_2O_4 , $p = 240 \text{ ата}$; 1' — N_2O_4 , $p = 150 \text{ ата}$; 2 — CO_2 , $p = 240 \text{ ата}$; 2' — CO_2 , $p = 170 \text{ ата}$. Газовый цикл: 3 — N_2O_4 , $p = 150 \text{ ата}$; 3' — He.

«постоянная» в компрессоре по сравнению с этой величиной в турбине позволяет уменьшать долю мощности, затрачиваемую на сжатие и циркуляцию газа, до 30—45%, в то время как на гелии при температуре 500—650° С она составляет 70—80%. Это приводит к существенному увеличению коэффициента полезной работы и росту эффективного к. п. д. теплового цикла на N_2O_4 по сравнению с циклами на инертных газах [4—6] (рис. 1).

Сравнение газовых теплоносителей (He, CO_2 и N_2O_4) применительно к быстрым реакторам по параметру прокачки (удельные затраты мощности на циркуляцию газа, отнесенные к единице передаваемой тепловой мощности) при 100—120 ата и 300—600° С показало, что на N_2O_4 достигаются меньшие удельные затраты (в семь-восемь раз), чем на CO_2 и He.

Система $\text{N}_2\text{O}_4 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO} + \text{O}_2$ имеет такие параметры линии насыщения, что на ней могут быть осуществлены газо-жидкостные циклы с нижними параметрами 1,3—1,7 ата и температурой конденсации 27—32° С [1].

Четырехокись азота имеет малую теплоту испарения (в 5,5 раза меньшую, чем у воды). Это позволяет упростить схему регенерации тепла в газо-жидкостном цикле, так как вполне достаточно тепла уходящих из турбины газов не только для нагрева испарения жидкости, но и для перегрева газа в регенераторе на 100—200° С. Благодаря протеканию в регенераторе по стороне высокого давления химических реакций диссоциации с меньшей теплотой химической реакции (149 ккал/кг), чем по стороне

низкого давления в процессе рекомбинации (294 ккал/кг), в газо-жидкостных циклах на N_2O_4 имеется возможность достигнуть более высокой регенерации тепла, чем на воде или CO_2 , и, следовательно, лучших термодинамических показателей. Таким образом, на N_2O_4 возможно создание АЭС с газоохлаждаемым реактором, а также применение тепловой схемы, использующей газо-жидкостный цикл с регенерацией.

Изучение механизма химических реакций и кинетических констант N_2O_4 показало, что при газодинамических расчетах турбомашин и теплообменных аппаратов, а также коэффициентов теплообмена необходимо учитывать временные характеристики диссоциации и рекомбинации. Оценки времени химической релаксации показали, что первая стадия реакции ($\text{N}_2\text{O}_4 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2$) протекает равномерно за время 10^{-6} — 10^{-8} сек, а по второй стадии реакции ($2\text{NO}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO} + \text{O}_2$) времена релаксации в зависимости от термодинамических параметров могут изменяться в пределах 10^{-3} — 10^{-1} сек.

Исследования показали, что из большого числа возможных схем высокую эффективность имеет схема АЭС с промежуточной регенерацией тепла между турбинами высокого и низкого давлений. При давлениях промежуточной регенерации 15—25 ата достигается полная эффективность регенерации и практически исключается влияние кинетики химических реакций. В газовых циклах на N_2O_4 для обеспечения его высокой термодинамической эффективности

нижнее давление цикла должно выбираться в пределах 8—10 *ата*, чем обеспечивается достаточное приближение к равновесным процессам. Таким образом, газовые турбины на N_2O_4 не требуют вакуума.

Это приводит к ряду преимуществ для N_2O_4 — рабочему телу турбин — по сравнению с другими рабочими телами (например, водяной пар). При давлении за турбиной 1,3—1,7 *ата* удельный объем N_2O_4 в 34—40 раз меньше, чем у водяного пара при давлении в конденсаторе 0,035 *ата*. Это позволяет значительно увеличить мощность газовой турбины, придя к одному выхлопу, и довести ее (при размерах последней ступени, аналогичных паровым турбинам) до 1000 *Мвт* [1].

Кроме того, использование N_2O_4 позволяет сделать проточную часть с малым числом ступеней, так как изэнтропийные перепады на N_2O_4 в 2,5 раза меньше, чем на водяном паре.

Конструктивные разработки газовой турбины на N_2O_4 мощностью 1000 *Мвт* позволили получить следующие основные характеристики: расход газа 2930 *кг/сек*; давление и температура газа перед турбиной 130 *ата* и 565° С; давление и температура перед турбиной низкого давления 15 *ата* и 91° С; давление за турбиной 1,5 *ата*; число оборотов 3000 в минуту. Турбина высокого давления имеет шесть ступеней с постоянным корневым диаметром ротора 1000 *мм* при высоте направляющих лопаток первой ступени 430 *мм*. Турбина низкого давления имеет две ступени. Средний диаметр последней ступени 1660 *мм*, высота рабочих лопаток 560 *мм*, выходная скорость из рабочего колеса 122 *м/сек*. Для разгрузки упорного подшипника и уменьшения размеров лопаток турбина выполнена с двумя выхлопами. Вес турбины 390 *т*. Проведенная разработка показала возможность создания турбины на N_2O_4 в 4—4,5 раза меньшей металлоемкости, чем на водяном паре, с лучшими аэродинамическими показателями (отсутствует влажность в проточной части турбины) и значительно меньших габаритов. Вполне реально создание одновальной двухпоточной турбины мощностью 2000—3000 *Мвт* в одном агрегате [1].

По результатам экспериментальных исследований в диапазоне 25—550° С N_2O_4 обладает достаточной для практического использования в атомной энергетике термической и радиационной стойкостью. Экспериментально изучена радиационная стойкость N_2O_4 и рассчитан радиолит этого теплоносителя в поле n — γ -излучения быстрого реактора. В диссоциирующей

системе теплоносителя ($N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2 = 2NO + O_2$) вследствие специфики быстрых реакторов радиационнохимические эффекты обусловлены воздействием n — γ -излучений высокой мощности дозы (примерно 10^{19} *эв/см³·сек*) при временах контакта в активной зоне $\sim 10^{-2}$ *сек*, температурах газа 200—550° С и давлениях 130—170 *ата*. Продуктами радиолита NO_2 являются N_2O , N_2 и O_2 . Доля разлагающегося теплоносителя в быстром реакторе составляет около 10^{-6} .

В среде N_2O_4 в диапазоне температур 25—700° С и давлений 1—150 *атм* экспериментально изучена и получена высокая коррозионная стойкость (0,001—0,005 *мм/г*) для большого числа конструкционных сталей и сплавов [8]: Х18Н10Т, ЭИ-847, ЭИ-629, ЭИ-654, ЗХВ, ЭИ-432, Х25, ЗХЗ, в рабочем диапазоне температур — алюминиевых и титановых сплавов, высокохромистого чугуна, графита АГ-1500, силицированного графита, тефлона и др. По оболочечным материалам твэлов Х18Н10Т и ЭИ-847 получена высокая коррозионная стойкость до 800° С при длительности испытаний 10 000—12 500 ч. Введение в теплоноситель 0,7—1% NO значительно уменьшает коррозию металлов (до 0,02—0,05 *мм/г*) в зоне фазовых превращений в теплоносителе.

В институте проводятся экспериментальные работы по технологии теплоносителя. Создано несколько теплофизических стендов с давлениями N_2O_4 до 150 *ата* и температурами газа до 550° С. На стендах были изучены теплофизические, газодинамические и коррозионные характеристики N_2O_4 , отработана технология очистки, подготовки, заполнения и опорожнения контуров на опытных теплотехнических установках мощностью до 1000 *квт*. Несколько опытных стендов работают с 1965 г. В 1968 г. испытана опытная энергетическая установка с двухступенчатой газовой турбиной полезной мощностью 100 *квт* при параметрах газа перед турбиной 500—520° С, давлении до 6 *ата*, расходе газа 1 *кг/сек* и тепловой мощности стенда 1000 *квт*. Первые опыты на этом стенде были проведены с целью изучения устойчивости параметров газо-жидкостного цикла с максимальной температурой 504° С и давлением 5 *ата*, при циркуляции в контуре 360 *кг* N_2O_4 и мощности стенда 1070 *квт*. Испытания продолжались 372 ч. В течение непрерывного опыта за 170 ч было достигнуто более 1000 циклов обращения диссоциирующего теплоносителя. В опытах получена высокая стабильность параметров и не обнаружено явлений необратимости в теплоносителе.

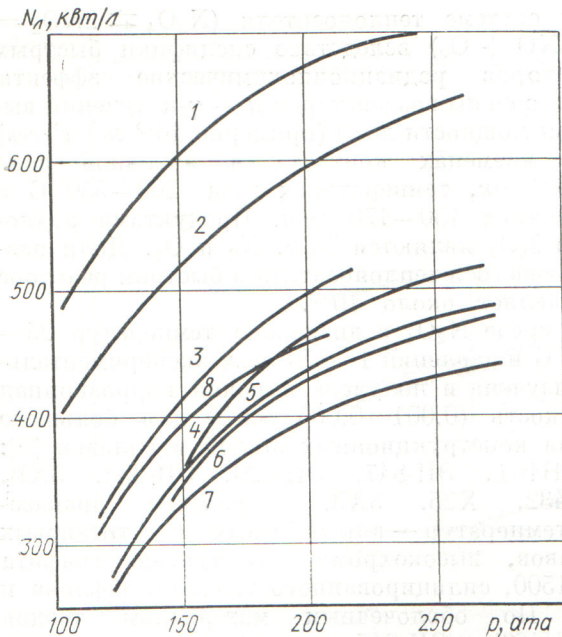


Рис. 2. Удельная теплонпряженность газоохлаждаемых быстрых реакторов на N_2O_4 , He и CO_2 в зависимости от давления на выходе из реактора при $D/H = 2$, $t_{\text{макс обол}} \leq 720^\circ C$:

1, 2 — N_2O_4 ($d_{\text{ТВЭЛ}} = 6,4$ мм, $t_{\text{газ}} = 350$ и $540^\circ C$, перепад давления реактора 12 и 10 ата соответственно); 3, 5, 7, 8 — He ($t_{\text{газ}} = 670^\circ C$; 0,9; 0,95; 0,95; 0,9; $d_{\text{ТВЭЛ}} 6,0$; 6,0; 6,4; 6,4 мм соответственно); 4, 6 — CO_2 ($t_{\text{газ}} = 570^\circ C$; $\Delta p = 16$ ата; $d_{\text{ТВЭЛ}} = 6,0$ и 6,4 мм соответственно).

В 1966—1967 гг. в экспериментах на замкнутом циркуляционном стенде в течение 600 ч на 80 кг N_2O_4 при 30—550° С и давлениях 10—60 ата также была достигнута полная обратимость газо-жидкостного цикла. Всего стенд проработал на рабочих режимах более 1500 ч, в том числе 1000 ч без замены N_2O_4 . Химический анализ проб не показал заметного изменения качества теплоносителя (примеси составляли менее 0,8%).

В 1969—1970 гг. в ИЯЭ АН БССР в течение 500 ч были проведены опыты на замкнутом стенде с газо-жидкостным циклом по изучению характеристик теплообмена при параметрах газа по давлению 80—160 ата и температуре 250—540° С. В этих опытах была также получена полная обратимость конденсационного цикла. Все вышеперечисленные эксперименты позволили сделать вывод о полной обратимости газо-жидкостного цикла и практической применимости N_2O_4 в качестве рабочего тела энергетических установок.

С целью определения перспективности газовых теплоносителей He, CO_2 и N_2O_4 на АЭС

с газоохлаждаемыми быстрыми реакторами было проведено сравнение эффективности по к. п. д. и коэффициенту полезной работы одноконтурных газовых и конденсационных циклов при условии достижения максимальной теплонпряженности и при одинаковых поверхностях теплообменных аппаратов. Исследование теплофизических характеристик выполнено с ТВЭлами в металлической оболочке и с топливной композицией $UO_2 + 30\% Cr, Ni$ ($PuO_2 + 30\% Cr, Ni$) [11]. Максимальная температура керамического топлива 1300—1400° С, энергонапряженность 450—500 кВт/л, т. е. равна принятой для активной зоны натриевого быстрого реактора БН-1000 [7].

Современный опыт разработки металлических корпусов с наплавкой на внутренних поверхностях нержавеющей стали показал, что можно создать транспортабельные (по железной дороге) корпуса для быстрых реакторов мощностью 2600—3000 Мвт (т.). При рабочем давлении до 170 ата такие корпуса должны иметь максимальный диаметр 4,2—4,3 м и высоту 10—12 м. В них может быть размещена активная зона диаметром 2,2—2,4 м с теплонпряженностью 500—600 кВт/л.

На рис. 2 представлено изменение теплонпряженностей газоохлаждаемых быстрых реакторов одноконтурных АЭС на He, CO_2 и N_2O_4 при различных давлениях.

Для газовых циклов на He и N_2O_4 максимальная температура газа изменялась в диапазоне 500—670° С, для газо-жидкостных циклов на CO_2 и N_2O_4 — в пределах 350—650° С. Исследования позволили выявить предпочтительную область параметров газа для достижения теплонпряженности 450—500 кВт/л: для гелия при температуре 670° С и давлении 200—240 ата; для CO_2 550—570° С и 190—220 ата; для N_2O_4 520—540° С и 120—140 ата. На N_2O_4 при температуре 350° С такие же теплонпряженности достигаются при уровне давлений 80—120 ата, а теплонпряженность 650 кВт/л — при 180 ата.

В проектах газоохлаждаемых быстрых реакторов на N_2O_4 целесообразно принять давление 150—170 ата, температуру на выходе из реактора 520—540° С и удельную теплонпряженность 550—600 кВт/л. Дальнейшее повышение удельной теплонпряженности может быть достигнуто за счет уплотнения D/H активной зоны до 3,5—4,0. Возрастание уплотнения активной зоны D/H с 2,0 до 4,0 при 170 ата позволяет увеличить удельную теплонпряженность: на CO_2 с 420 до 530 кВт/л, на He с 450

до 540 *квт/л*, на N_2O_4 при 540°С с 550 до 650 *квт/л*, а при 350°С с 640 *квт/л* до 700—720 *квт/л* (рис. 3). Однако для таких уплотнений должны быть созданы и отработаны корпуса реакторов из напряженного железобетона для уровня давлений 160—180 *ата*.

Проводилось сравнение физических характеристик для плутониевых реакторов цилиндрической геометрии различного уплотнения мощностью 1000 *Мвт* (эл.) с одинаковыми составами активных зон. В результате расчетов были получены основные физические характеристики для непрофилированных реакторов (табл. 1).

При вычислении времени удвоения принималось, что время переработки пакетов активной зоны и экранов равно одному году, средняя энергонапряженность 500 *квт/л* и максимальная глубина выгорания 10%. Расчеты проводились по двумерной 18-групповой программе МИФИ 18—4 RZ 15-B [9]. Групповые константы, использованные в этой программе, получены на основе системы констант БНАБ [6].

Анализ результатов расчетов показывает, что благодаря более жесткому спектру и более высокой утечке нейтронов из активной зоны реакторы с диссоциирующим газом по сравнению с натриевыми позволяют увеличить коэффициент воспроизводства на 3%, снизить время удвоения на ~0,6 года и получить более благоприятные характеристики с точки зрения безопасности установки (эффект удаления теплоносителя в два-три раза меньше).

Были выполнены расчеты газовых реакторов с карбидной и матричной топливными композициями. Использование карбидного топлива снижает время удвоения на один год, что в перспективе позволяет получить время удвоения менее шести лет. Физические характеристики реактора на N_2O_4 при матричной топливной

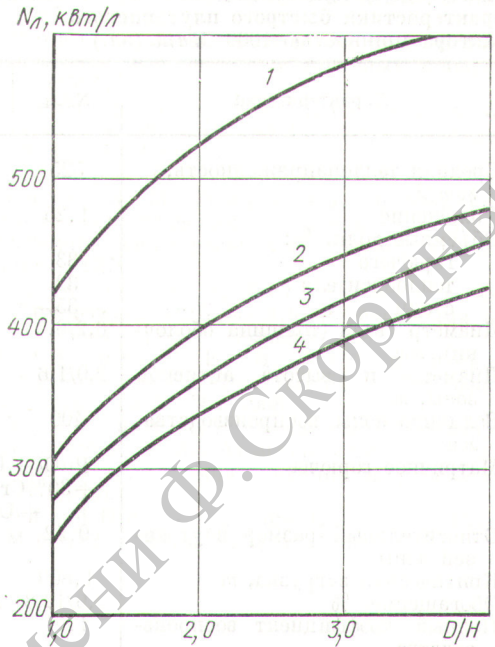


Рис. 3. Удельная теплонпряженность газоохлаждаемых быстрых реакторов в зависимости от относительного уплощения активной зоны при $p_{газ} = 150 \text{ ата}$, $t_{обол}^{МАКС} \leq 720^\circ\text{С}$:

1 — N_2O_4 ($t_{газ} = 540^\circ\text{С}$; $\Delta p = 10 \text{ ата}$; $d_{ТВЭЛ} = 6,4 \text{ мм}$); 2 — He ($t_{газ} = 670^\circ\text{С}$; $\Delta p = 16 \text{ ата}$; $d_{ТВЭЛ} = 6 \text{ мм}$); 3 — CO_2 ($t_{газ} = 570^\circ\text{С}$; $\Delta p = 16 \text{ ата}$; $d_{ТВЭЛ} = 6 \text{ мм}$); 4 — He ($t_{газ} = 670^\circ\text{С}$; $\Delta p = 8 \text{ ата}$; $d_{ТВЭЛ} = 6 \text{ мм}$).

композиции не хуже, чем с натриевым теплоносителем. В табл. 2 приведены сравнительные характеристики реакторов на N_2O_4 и Na, из которой видно, что предпочтительнее физические характеристики реактора на N_2O_4 .

При определении эффективности одноконтурных схем АЭС с газоохлаждаемыми быстрыми

Физические характеристики непрофилированных плутониевых быстрых реакторов мощностью 1000 *Мвт* (эл.)

Таблица 1

Величина	Теплоноситель					
	Na			N_2O_4		
Уплотнение D/H	1	1,69	2,5	1	1,69	2,5
Критическая загрузка Pu^{239} , т	1,91	1,93	2,00	1,89	1,91	1,96
Критическое обогащение Pu^{239} , %	9,00	9,10	9,36	8,88	8,99	9,25
Коэффициент воспроизводства активной зоны	1,242	1,226	1,183	1,256	1,237	1,194
Коэффициент воспроизводства бокового экрана	0,299	0,226	0,182	0,341	0,263	0,209
Полный коэффициент воспроизводства	1,657	1,661	1,677	1,727	1,731	1,752
Время пребывания горячего в активной зоне, лет	1,120	1,126	1,181	1,160	1,164	1,211
Время пребывания горячего в боковом экране, лет	3,56	4,43	5,42	3,21	3,93	4,84
Время удвоения, лет	7,67	7,60	7,58	7,14	7,00	6,93

Гомельская областная библиотека
Атомная энергия № 312785

312785

Физические и теплофизические характеристики быстрого плутониевого реактора мощностью 1000 Мвт (эл.)

Таблица 2

Характеристики	N ₂ O ₄	Ne
Средняя теплонапряженность, <i>квт/л</i>	525	400
Уплотнение	1,25	3
Объемные доли, %:		
горючего	33	50
теплоносителя	32	33
стали	35	17
Диаметр твэла (толщина оболочки), мм	6,2/0,30	7,8/0,30
Диаметр и высота активной зоны, м	2,0/1,6	
Величина зоны воспроизводства, мм	400	400
Матричное горючее	PuO ₂ + UO ₂ + 30% CrPuO ₂ + UO ₂	
Относительный размер внутренней зоны	0,52	0,53
Критическая загрузка, т	1,800	2,4
Обогащение, %	9,6/12,8	10,1/13,5
Полный коэффициент воспроизводства	1,51	1,50
Средний коэффициент воспроизводства в активной зоне	1,00	0,95
Глубина выгорания, %	10	10
Время удвоения, лет	7,5	8
Давление теплоносителя, <i>ата</i>	164/154	~ 1-7
Температура теплоносителя, °C	240/540	400/580
Максимальная температура твэла (с учетом факторов перегрева), °C	730	700/720
Максимальная температура топливного сердечника (с учетом факторов перегрева), °C	1 280	2 400

реакторами гидравлические сопротивления основных агрегатов были приняты из условия достижения на каждом теплоносителе максимальной теплонапряженности в реакторе и наименьших поверхностей теплообменных аппаратов.

На рис. 1 приведено сравнение коэффициента полезной работы газовых циклов на He и N₂O₄ и газо-жидкостных циклов на CO₂ и N₂O₄. В газотурбинном цикле коэффициент полезной работы АЭС на N₂O₄ при максимальной температуре 500—670° С АЭС достигает 0,6—0,7, что в два-три раза больше по сравнению с АЭС на гелии, а к. п. д. АЭС на N₂O₄ может быть равным 28—35% (рис. 4), тогда как на гелии для регенеративной схемы с двукратным охлаждением в сравнимых условиях к. п. д. составляет 20—31%. Коэффициент полезной работы конденсационного цикла на N₂O₄ при температуре 50—550° С составляет 0,94—0,96,

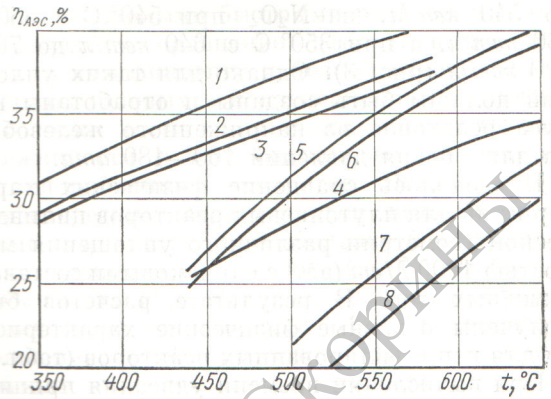


Рис. 4. Сравнение термодинамической эффективности одноконтурной АЭС с газоохлаждаемыми быстрыми реакторами.

Газо-жидкостный цикл: 1 — N₂O₄, p = 240 *ата*; 2 — p = 170 *ата*; 3 — N₂O₄, p = 150 *ата*; 5 — CO₂, p = 240 *ата*; 6 — CO₂, p = 170 *ата*. Газовый цикл: 4 — N₂O₄, p = 150 *ата*; 7 — He, p = 240 *ата*; 8 — He, p = 170 *ата*.

что в 1,9—2,3 раза больше, чем для CO₂ в аналогичных условиях (см. рис. 1). Термодинамическая эффективность конденсационных циклов при максимальных температурах на N₂O₄ достигает 33—37%, тогда как на CO₂ она находится в пределах 26—35%.

В одноконтурных схемах АЭС на диссоциирующем газе могут быть приняты большие значения перепадов давления, достигнуты сравнительно большие удельные теплонапряженности и получены меньшие габариты теплообменных аппаратов. В одноконтурных схемах АЭС на CO₂ даже при входной температуре охлаждающей воды, равной 15° С, вес теплообменных аппаратов в 2,2 раза больше, чем у аналогичных теплообменников на N₂O₄ при температуре 20—22° С.

В 1968—1970 гг. в ИЯЭ АН БССР были выполнены проектные разработки АЭС с газоохлаждаемым быстрым реактором на N₂O₄ при одноконтурной схеме станции и с газо-жидкостным циклом с промежуточной регенерацией. В этих разработках была показана возможность создания газоохлаждаемого быстрого реактора с напряженностью 500—600 *квт/л* с временем удвоения менее семи лет, с одновальной газовой турбиной мощностью 1000 Мвт, имеющей металлоемкость в 4,5 раза меньше, чем на водяном паре. Применен газо-жидкостный цикл с промежуточной регенерацией при 20—23 *ата* при максимальном давлении цикла 150 *ата* и температуре газа 520—540° С. На основании выполненных проектных разработок проведены

расчеты технико-экономических показателей АЭС электрической мощностью 2000 Мвт. Эти расчеты показывают возможность достижения в одноконтурных АЭС электрической мощностью 2000 Мвт с двумя газоохлаждаемыми быстрыми реакторами по 1000 Мвт на N_2O_4 достаточно высоких технико-экономических показателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. К. Красин. Диссоциирующие газы как теплоносители и рабочие тела энергетических установок. Труды Всесоюзной конференции. Минск, «Наука и техника», 1970, стр. 6; В. Б. Нестеренко, там же, стр. 11.
2. А. К. Красин, В. Б. Нестеренко, Н. М. Синев. Труды симпозиума «Математическое моделирование тепловых процессов в энергетике». Минск, «Наука и техника», 1970, стр. 95.
3. А. К. Красин, В. Б. Нестеренко. Термодинамические и переносные свойства химически

реагирующих газовых систем. Минск, «Наука и техника», 1967.

4. П. М. Ковтун, А. Н. Наумов, С. А. Косматов. «Бюлл. изобретений и товарных знаков», № 21, 62 (1964).
5. В. Б. Нестеренко, В. П. Бубнов, А. М. Матюнин. «Изв. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук», № 1, 57 (1966).
6. М. А. Бажин, В. П. Бубнов, В. Б. Нестеренко, Н. М. Ширяева. Оптимизация параметров энергетических установок с применением диссоциирующих рабочих тел. Минск, «Наука и техника», 1970.
7. А. К. Красин, В. Б. Нестеренко и др. Труды Симпозиума СЭВ по АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, Т. 1. Обнинск, 1967.
8. А. М. Сухотин, Н. Я. Лантратова, В. А. Герасимова. «Изв. АН БССР. Сер. физ.-энергет. наук», № 2, 56 (1968).
9. В. В. Хромов, А. М. Кузьмин. Сб. «Физика быстрых реакторов», М., Атомиздат, 1968, стр. 92.
10. Л. Лайс и др. «Атомная техника за рубежом», вып. 1, 7 (1970).
11. Advanced and High Temperature Gas Cooled Reactors, SM-411/12, Vienna, IAEA, 1968.

Abstracts of Articles in this Issue

UDC 621.039.003
An Evaluation of the Long-term Role of Nuclear Power in the Fuel and Power Balance of the U.S.S.R. By A. A. Makarov, A. S. Makarova, A. G. Vigdorich, A. N. Zeiliger, G. B. Levental' and A. M. Belostotskii. *Atomnaya energiya*, 32, 187 (1972).

The article is devoted to an investigation of the long-term role of nuclear power in the fuel and power balance of the U.S.S.R. The analysis evaluates the effect of the rate of growth of nuclear power on the economy and structure of the long-term fuel and power balance as well as the effect of the basic economic and energy factors (oil and gas resources, power demand, costs of energy units, load factors) on power, location and optimal use of nuclear plants. (6 figures, 3 references.)

UDC 621.039.519
Reactivity Measurements at Beloyarsk Power Reactors. By B. G. Dubovskii, A. Ya. Yevseev, I. M. Kisil', V. V. Korolyev, V. F. Lyubchenko, Yu. I. Miityaev and E. I. Snitko. *Atomnaya energiya*, 32, 205 (1972).

The measurement of instantaneous values of reactivity is described. The results of using the reactivity meter for studying stationary and transient reactivities at startup and at power levels of reactor operation are presented. An analysis of certain methodological features of reactivity measurements is given. The applicability of the reactivity meter as an integral part of the reactor monitoring system is discussed. (4 figures, 2 tables, 9 references.)

UDC 539.173.4 + 549.454.2
The Determination of the Amount and Spatial Distribution of Uranium in Fluorites from the Tracks of Uranium Fission Fragments. By I. G. Berzina, I. V. Mel'nikov and D. P. Popenko. *Atomnaya energiya*, 32, 214 (1972).

Fluorites and their host rocks from fluorite, tin and uranium-molybdenum deposits were investigated. The amount and spatial distribution of uranium in fluorites and their host rocks were determined by the method of f-radiography. The investigation of the spatial distribution of uranium was carried out directly

on fluorite crystals by means of chemical etching as well as by means of special detectors which recorded the tracks of the induced uranium fission.

Investigations were carried out on the identification of etched patterns on the tracks from fission fragments. It has been demonstrated that the difference between etched patterns on the tracks from fission fragments and etched patterns on dislocations makes it possible to distinguish between the uranium captured in a crystal lattice of fluorite during its formation and uranium penetrating a fluorite crystal along fissures during subsequent processes.

It has been demonstrated also that the concentration of uniformly distributed uranium in a fluorite lattice does not exceed $n \cdot 10^{-3}\%$ by weight and that during the growth of crystals the «excess» uranium settles along the faces of growth or is concentrated in the marginal zones of crystals. It has been found that host-rocks of fluorite contain two to three orders of magnitude more uranium than the fluorite crystals. The distribution of uranium in rocks is extremely non-uniform: there are observed large quantities of small grains of uranium minerals and uranium concentrations appearing at the detector as stars.

It has been shown that the presence of excess uranium and an increase of uranium in the crystalline lattice of fluorite may serve as a prospecting guide for the discovery of ore bodies having an elevated uranium content. (5 figures, 2 tables, 11 references.)

UDC 539.12.17
The Passage of Beams of High Energy Particles Through Thick Layers of Matter. By V. S. Barashenkov, H. M. Sobolevskii and V. D. Toneev. *Atomnaya energiya*, 32, 217 (1972).

The absolute yield, spectral angular characteristics and spatial distribution of particles beyond a thick shield are calculated by the Monte Carlo method. The cascade-evaporation model is used to describe particle-nucleus interactions. A comparison between the theoretical calculations and experimental data shows that the method developed can be employed successfully in the design of radiation shielding. This method is applicable at primary energies up to several tens of GeV. (1 figure, 8 tables, 9 references.)