

перспектива не может быть оценена достаточно детально. Ясно, что разработка и всемерное расширение видов технологии, которые могут

быть переведены на ядерные энергоресурсы, являются одной из важнейших практических задач, стоящих перед нашим поколением.

## Использование ядерных реакторов для высокотемпературных энерготехнологических промышленных процессов

ДОЛЛЕЖАЛЬ Н. А., ЗАЙЧКО Н. Д., АЛЕКСЕЕВ А. М., БАТУРОВ Б. Б., КОРЯКИН Ю. И., НАЗАРОВ Э. К., ПОНОМАРЕВ-СТЕПНОЙ Н. Н., ПРОЦЕНКО А. Н., ЧЕРНЯЕВ В. А.

Подавляющее большинство технологических процессов в химической промышленности, черной и цветной металлургии и др. основано на непосредственном использовании высокотемпературного тепла, получаемого при сжигании органического топлива (природного газа, нефти, коксующего угля и продуктов их переработки). Это топливо более эффективно может быть использовано в качестве технологического сырья. Запасы его ограничены, размещены крайне неравномерно, и уже в настоящее время ощущается его дефицитность.

Замена органического топлива ядерным значительно сэкономит высококачественные виды топлива, уменьшит транспортные затраты и связи, снизит загрязнение воздушных бассейнов в промышленных зонах и существенно сократит общественные трудовые затраты на единицу конечной продукции.

### Возможные области и технологические условия включения ядерных реакторов в промышленную технологию

Исследования показали, что факторами, способствующими внедрению высокотемпературных ядерных реакторов в промышленную технологию, являются:

значительная доля топливной составляющей в себестоимости конечной продукции при использовании органического топлива;

рост требуемых единичных мощностей энергисточников для современных и перспективных технологических агрегатов;

допустимость технологического процесса при внешнем подводе тепла;

возможность иницирующего и интенсифицирующего воздействия  $\gamma$ -излучения на эффек-

тивность протекания технологического процесса;

наличие или возможность получения конструкционных материалов, обеспечивающих значительный ресурс службы оборудования в условиях атомной энерготехнологической установки при необходимом уровне температур.

Другой важный аргумент применения ядерных реакторов — устранение значительных выбросов продуктов сгорания органического топлива. При этом обязательными являются требования гарантированной защиты конечной и промежуточной продукции технологического процесса от загрязнения ее продуктами активации и деления ядерного топлива и радиационной безопасности ядерного технологического оборудования, обслуживающего персонала и окружающей среды.

**Химия.** Тепло от ядерных реакторов в химической промышленности может использоваться в высокотемпературных и энергоемких процессах паровой каталитической конверсии метана. Конверсия метана в настоящее время — один из основных способов получения водорода и водородсодержащих газов, на использовании которых базируется крупное современное и перспективное многотоннажное производство азотной промышленности (получение синтетического аммиака, метанола и др.), являющееся крупномасштабным потребителем природного газа, расход которого на одну тонну конечной продукции составляет более 1000 м<sup>3</sup>/т при нормальных условиях. Значительная доля газа (до 45%) сжигается для получения высокотемпературного тепла и может быть заменена теплом ядерного реактора. Доля стоимости топливного газа в себестоимости конечной продукции может достигать 30% и выше. Мощность энергисточников, необходимых для перспективных предприятий азотной промышленности (500—

600 МВт), приемлема для экономичного применения ядерных реакторов. Паровая конверсия метана в трубчатой печи осуществляется при внешнем подводе высокотемпературного тепла к дробному рабочему объему (реакционными трубами), что хорошо согласуется с условиями подвода тепла от ядерных реакторов.

Используемые в аммиачном производстве реакционные трубы имеют ресурс работы до  $10^5$  ч при температуре  $850-950^\circ\text{C}$  и давлении до  $40 \text{ кгс/см}^2$  и могут служить инженерной основой для создания новых трубчатых печей, получающих тепло от первичного или вторичного теплоносителя ядерного реактора с коэффициентом нагрузки около 0,8.

При анализе технологических схем с использованием ядерных реакторов на первом этапе возможны: сохранение принципиальной схемы существующего производства с рациональным использованием вторичных энергоресурсов (физического тепла реакций и продуктов горения) и соответствующим снижением потребности в природном газе или ином источнике тепла; рациональное использование традиционных схемных и конструктивных решений по технологическому оборудованию в сочетании с включением реакторной установки в энерготехнологическую схему и генеральный план производства с минимальными изменениями, обусловленными требованиями ядерной и радиационной безопасности; широкий выбор числа и параметров технологических потоков и рабочей среды, получающих тепло от реакторной установки; при этом приемлемое число технологических потоков с различными параметрами тесно взаимосвязано с выбором реактора и диктуется особенностями его конструкции и совместимостью технологических режимов различных контуров по условиям производства.

Возможные варианты использования ядерных реакторов в производстве аммиака на базе двухступенчатой каталитической конверсии метана и основные параметры технологических потоков и рабочих сред приведены на рис. 1.

Первый способ (рис. 1, а) предполагает использование тепла только в высокотемпературной части производства — в первой ступени конверсии метана для обогрева реакционных труб (рис. 1, а). Подогрев газовой, парогазовой и паровоздушной смесей, питательной воды, перегрев пара и генерация насыщенного пара во вспомогательном котле осуществляются в этом случае за счет сжигания природного газа. Все оборудование, кроме блока теплоиспользую-

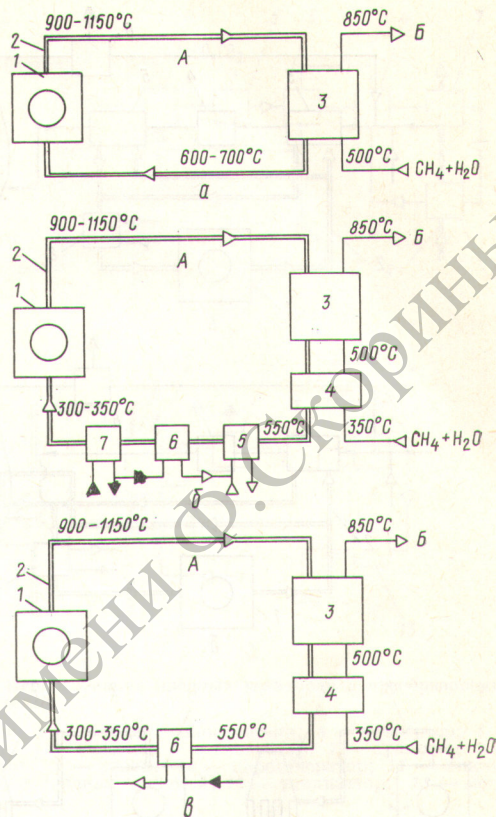


Рис. 1. Использование ядерных реакторов в производстве аммиака:

1 — реактор; 2 — контур теплоносителя; 3 — конвертер; 4 — подогреватель парогазовой смеси; 5 — пароперегреватель; 6 — парогенератор; 7 — водоподогреватель; А — газ или твердый теплоноситель; Б — продукты конверсии

щей аппаратуры, а также условия пусковых и переходных режимов остаются неизменными.

Основные достоинства этого варианта: относительная простота конструкции реакторной установки, которая обогревает только один поток — парогазовую смесь в процессе конверсии; наиболее полное сохранение основного технологического оборудования производства аммиака (за исключением трубчатой печи). Недостаток — небольшая доля (около 20%) вытесняемого природного газа общей потребности производства.

Другой способ (рис. 1, б) позволяет практически полностью отказаться от использования природного газа в качестве топлива. При этом тепло, необходимое для проведения паровой конверсии метана, для подогрева парогазовой смеси, питательной воды, а также для генерации и перегрева пара давлением  $110 \text{ кгс/см}^2$ ,

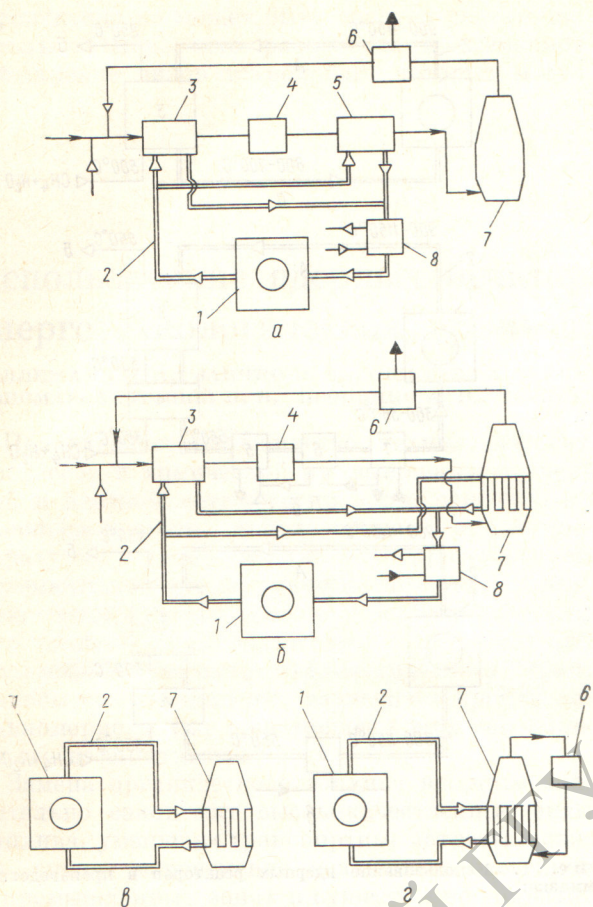


Рис. 2. Использование ядерных реакторов в производстве губчатого железа:

1 — реактор; 2 — контур теплоносителя; 3 — конвертер; 4 — охладитель; 5 — подогреватель; 6 — очистка; 7 — аппарат для получения губчатого железа; 8 — парогенератор

подводится от высокотемпературного ядерного реактора.

В реакторной установке (рис. 1, в) осуществляется только паровая конверсия метана, подогрев парагазовой смеси и генерация насыщенного пара давлением 110 или 40 кгс/см<sup>2</sup>.

Ввиду относительно небольшой требуемой суммарной тепловой мощности (500—600 МВт) даже для перспективных технологических цепочек выработка высокотемпературного тепла и энергетического пара может быть обеспечена одним реактором. На практике совмещается несколько производств аммиака, метанола, высших спиртов и т. п. с несколькими технологическими цепочками в каждом производстве; по экономичности и резервированию целесообразно установить параллельные связи между отдельными технологическими цепочками внут-

ри каждого производства и между производствами. Это позволит централизовать получение водородсодержащих газовых смесей и энергетического пара в отдельных реакторных установках.

Преимуществами такого решения являются большая надежность работы каждой технологической цепочки при меньших затратах на резервное оборудование и большая экономичность выработки производства высокотемпературного тепла и энергетического пара на специализированных ядерных реакторах.

**Черная металлургия.** Ядерные реакторы могут применяться для получения первичных металлов в доменном производстве и твердофазном восстановлении железной руды. В доменном производстве это означает получение при температуре 850°C и нагреве до 1200—1300°C восстановительных газов, которые могут использоваться в качестве доменного дутья для замены части (до 20—30%) расхода кокса.

При твердофазном восстановлении железной руды возможны следующие методы: получение и нагрев до 900—1000°C восстановительных газов с последующим использованием их в качестве химических реагентов и теплоносителя в агрегатах прямого восстановления с внутренним подводом тепла в рабочий объем, например таких агрегатов, как шахтная печь (рис. 2, а); получение восстановительных газов и обогрев агрегатов прямого восстановления с внешним подводом тепла в дробный рабочий объем (рис. 2, б); обогрев агрегатов прямого восстановления с внешним подводом тепла в дробный рабочий объем при использовании твердого восстановителя (рис. 2, в, г).

В настоящее время для использования органического топлива наиболее освоен первый метод. Второй и третий — раздельный подвод химических реагентов в виде восстановительных газов или твердого восстановителя и тепла в агрегаты прямого восстановления с дробным рабочим объемом на базе органического топлива — существенного освоения и развития не получили. Предварительное изучение показало, что при создании таких агрегатов на базе ядерных реакторов можно рассчитывать на повышение (в несколько раз) скорости протекания процесса прямого восстановления и агрегатной производительности.

**Преобразование энергоносителей.** Один из возможных путей использования энергии ядерных реакторов при преобразовании энергоносителей — применение их для газификации угля. На базе энергии ядерных реакторов могут быть

осуществлены процессы гидрогенизационной и паровой газификации угля. Возможные варианты принципиальных энерготехнологических схем этих процессов приведены на рис. 3.

При гидрогенизационной газификации угля (рис. 3, а) тепло от высокотемпературного ядерного реактора может использоваться в процессе паровой каталитической конверсии метана и для производства пара, при паровой (рис. 3, б) — для обогрева газогенератора и производства пара.

Экономическая эффективность применения ядерных реакторов для газификации углей пока остается недостаточно ясной. В техническом отношении при реализации этих процессов также может найти применение паровая каталитическая конверсия метана на базе ядерных реакторов.

Наиболее важной проблемой для преобразования энергоносителей в перспективе является крупномасштабное производство водорода — наиболее чистого топлива будущего. Принципиально ядерные реакторы в качестве источников тепла могут применяться во всех основных обсуждаемых в настоящее время способах получения водорода: электролиз воды, конверсионные методы, термохимическое разложение.

### Высокотемпературные ядерные реакторы и проблемы включения их в промышленную технологию

Использование тепла высокотемпературных ядерных реакторов в энерготехнологических промышленных процессах связано с решением ряда технических проблем, из которых главными являются: создание и обработка надежных ядерных реакторов с температурой теплоносителя на выходе из активной зоны 900—1400°C с общим ресурсом работы высокотемпературных узлов 10—15 лет при их годовом использовании до 8000 ч; создание надежных и эффективных технических средств для передачи тепла из активной зоны ядерного реактора в рабочий объем технологических агрегатов.

Определенную трудность представляет предотвращение попадания продуктов деления ядерного топлива в технологический контур и продуктов технологического контура в активную зону ядерного реактора.

В зависимости от потребности в тепле высоко- и среднего потенциала и соотношения параметров в реакторном и технологических контурах могут быть использованы различные технические решения (рис. 4):

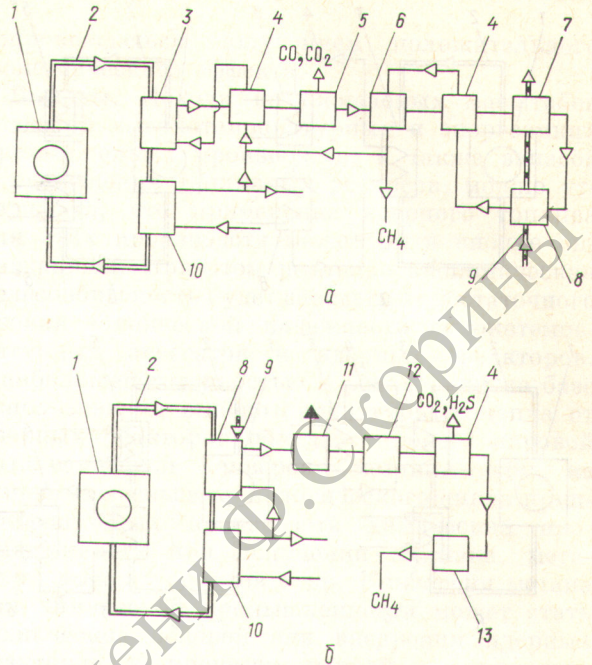


Рис. 3. Использование ядерных реакторов в преобразовании энергоносителей:

1 — реактор; 2 — контур теплоносителя; 3 — конвертер; 4 — регенератор; 5 — очистка; 6 — сепаратор; 7 — сушилка; 8 — газогенератор; 9 — уголь; 10 — парогенератор; 11 — очистка от твердых и жидких примесей; 12 — утилизатор; 13 — метанатор

введение промежуточного теплообменника с контуром промежуточного теплоносителя (рис. 4, а);

использование специальных теплообменников с «двухслойной» конструкцией теплопередающей поверхности, с заполнением межслойного пространства промежуточным теплоносителем (например, жидким металлом) и организацией контроля за составом и параметрами промежуточного теплоносителя (рис. 4, б);

комбинированное использование этих средств (рис. 4, в, г);

использование двух типов ядерных реакторов — специализированного высокотемпературного и энергетического.

В схемах (4, а, в) температура ядерного топлива и реакторного теплоносителя имеет максимальные значения. В схеме (рис. 4, б) тепловая мощность высокотемпературного теплообменника может быть существенно снижена (в 3—5 раз) по сравнению с вариантом (рис. 4, а). В варианте (4, г) легче решаются вопросы с выбором конструкционных материалов для промежуточного теплообменника. Для снижения температуры ядерного топлива и тепло-

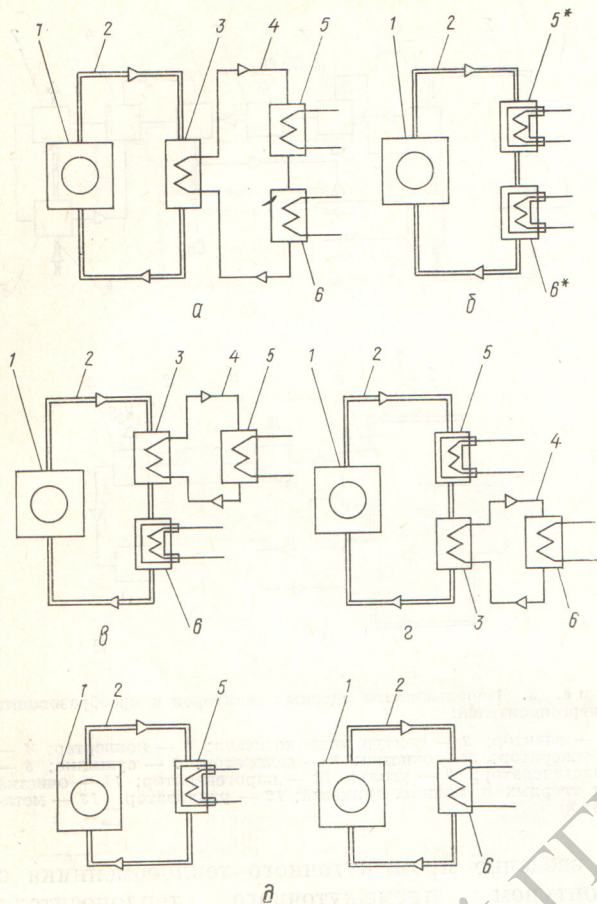


Рис. 4. Возможные схемы включения ядерных реакторов в технологические процессы:

1 — реактор; 2 — контур теплоносителя реактора; 3 — промежуточный теплообменник; 4 — контур промежуточного теплоносителя; 5 — технологический аппарат; 4 — парогенератор; 5\* — аппараты с двухслойной конструкцией теплопередающей поверхности

носителя реакторного контура могут быть рекомендованы схемы (см. рис. 4, б, г, д).

Вариант (рис. 4, б) позволяет отказаться от использования высокотемпературного ядерного реактора для производства тепла среднего потенциала, однако он экономичен только при потребностях в высокотемпературном тепле на уровне 500—1000 МВт и выше.

Среди известных тепловых реакторов перспективными для достижения высоких температур теплоносителя являются высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР). Основные сложности при включении ВТГР в энерготехнологические схемы промышленных производств, как известно, возникают при передаче тепла из активной зоны ядерного реактора в рабочий объем технологических агрегатов.

На данном этапе задачу создания высокотемпературных реакторных установок для технологических целей вряд ли следует решать, ориентируясь заранее на единственный тип ядерного реактора. Даже при создании энергетических реакторов для АЭС с температурой теплоносителя на уровне 300°C одновременно разрабатывалось несколько типов ядерных реакторов, и долгое время сравнительные преимущества каждого из них были неясны.

Имеются конструктивные решения высокотемпературных ядерных реакторов для технологических целей, основанные на использовании лучистого теплообмена и твердого теплоносителя и позволяющие выявить возможности транспортировки дисперсного твердого теплоносителя газовым потоком; использования гравитационных сил для перемещения дисперсного твердого теплоносителя на наиболее горячем участке тракта и применение механических средств для принудительного возвращения его в активную зону ядерного реактора; циркуляции дисперсного твердого теплоносителя между активной зоной ядерного реактора и технологическим потребителем.

Такие ядерные реакторы в конструктивном отношении имеют следующие положительные качества: околоатмосферное давление в корпусе реактора; передача тепла из активной зоны ядерного реактора к технологическому потребителю при отсутствии давления в контуре реакторного теплоносителя; возврат теплоносителя в активную зону при высоких температурах, т. е. подвод тепла к технологическому потребителю в узком диапазоне высоких температур.

Во всех указанных случаях наибольшие трудности связаны с организацией принудительной циркуляции дисперсного твердого теплоносителя. Это обусловлено тем, что, отказавшись от конвективного теплообмена в реакторном контуре и перейдя от газообразного (или жидкого) теплоносителя к твердому, авторы этих предложений стремились придать твердому теплоносителю свойство «текучести» и вписать его в более или менее традиционные для энергетических реакторов конструктивные решения. Эти трудности могут быть преодолены при использовании крупноэлементного твердого теплоносителя — графитовых элементов, циркуляция которых осуществляется кинематическим приводом.

**Экономические аспекты.** Замена энергоисточников на органическом топливе ядерными сопровождается изменением структуры стоимости конечной продукции, которое связано с сокра-

щением затрат на топливо и возрастанием удельных капитальных вложений, резко зависящих от мощности реактора. Поэтому экономическая эффективность использования ядерных энергоисточников тем выше, чем больше удельное вытеснение органического топлива ядерным, ниже удельный расход ядерного топлива на выработку единицы тепла, выше коэффициент использования тепла в энерготехнологическом цикле рассматриваемого производства, больше единичная мощность используемых ядерных реакторов и производительность технологических агрегатов, проще и дешевле технические средства для передачи тепла из активной зоны ядерного реактора в рабочий объем технологического агрегата, меньше тепловые потери и энергозатраты на циркуляцию теплоносителя.

Первые три условия определяют предельную величину допустимого увеличения капитальных вложений в производство с ядерными энергоисточниками при сохранении их экономической конкурентоспособности. Последние два условия указывают путь для поисков технических решений по включению ядерных энергоисточников в энерготехнологическую схему рассматриваемого производства.

В целом экономические условия для использования тепла от ядерных реакторов в высокотемпературных технологических процессах благоприятны, поскольку удельное вытеснение органического топлива существенно выше, чем в случае с АЭС и, как правило, вытесняется более высококачественное и, следовательно, более дорогое органическое топливо, чем энергетические углы. Удельный расход ядерного топлива у высокотемпературных ядерных реакторов заметно ниже, чем у энергетических реакторов современных АЭС и, как правило, имеется возможность повысить коэффициент использования в технологическом цикле тепла от энергоисточника за счет устранения тепловых потерь с дымовыми газами. Предельно допустимая величина удельных капиталовложений в высокотемпературные реакторные установки для технологических целей существенно (в 1,5—2,0 раза) превышает фактическую величину удельных капиталовложений в энергетические реакторы АЭС. Если удельные капиталовложения в высокотемпературные ядерные реакторы не выйдут из указанного интервала, то их внедрение в промышленную технологию будет

сопровождаться получением положительного экономического эффекта.

**Выводы.** Исходя из ожидаемых масштабов развития высокотемпературных и энергоемких промышленных производств, а также запасов и размещения топливных ресурсов, можно утверждать, что применение ядерного топлива для этих производств может быть вполне оправданным. При этом реальная экономическая целесообразность будет зависеть от достаточного уровня технической надежности высокотемпературных агрегатов и ядерных реакторов. Наибольшей готовностью к реализации на базе использования высокотемпературного тепла от ядерных реакторов обладает процесс паровой каталитической конверсии метана — один из основных звеньев технологического цикла крупномасштабных производств химической промышленности при получении аммиака, метанола, высших спиртов и др. Конверсия метана для химической промышленности может стать технической основой для внедрения ядерных реакторов в процессы черной металлургии, преобразования энергоносителей, производства водорода. Основные технические проблемы лежат в области передачи высокотемпературного тепла из активной зоны в рабочий объем для проведения технологического процесса при соблюдении условий радиационной защиты продукции, обслуживающего персонала и окружающей среды. Поиск эффективного решения проблем целесообразно осуществлять как в направлении разработки теплопередающих технических средств, которые позволили бы использовать для промышленной технологии газоохлаждаемые ядерные реакторы, так и в направлении разработки новых типов высокотемпературных ядерных реакторов, непосредственно ориентированных на внедрение в промышленную технологию, например, основанных на выносе и передаче тепла из активной зоны лучистым теплообменом с помощью крупноэлементного твердого теплоносителя.

Предварительная оценка показала, что внедрение высокотемпературных ядерных реакторов в промышленную технологию может сопровождаться положительным экономическим эффектом, если удельные капиталовложения в них не будут превышать удельные капиталовложения в энергетические реакторы АЭС более чем в 1,5—2,0 раза.