

ВОЗМОЖНОСТЬ ПЕРЕВОДА РЕАКТОРОВ РОССИЙСКИХ ЛЕДОКОЛОВ С ВЫСОКООБОГАЩЕННОГО УРАНОВОГО ТОПЛИВА НА НИЗКООБОГАЩЕННОЕ

*Анатолий С. Дьяков, Александр М. Дмитриев, Юнгмин Канг, Алексей М. Шуваев,
Фрэнк Н. фон Хиппель*

Накоплено большое количество опыта по переводу компактных исследовательских реакторов с высокообогащенного урана (ВОУ) на низкообогащенный уран (НОУ). Хотя детали конструкции реакторов на морских судах представляют собой тщательно хранимые военные секреты, во время правления Горбачева Советский Союз передал норвежскому правительству некоторые основные сведения, включая размеры активной зоны работающего на ВОУ реактора КЛТ-40, применявшегося на некоторых российских атомных ледоколах, и содержание урана-235 в активной зоне. Группа норвежских аналитиков использовала эту информацию при разработке простой модели активной зоны реактора КЛТ-40. Мы провели расчеты поведения нейтронов в разных вариантах модели этой активной зоны в зависимости от степени выгорания урана-235 и пришли к заключению, что реакторы могут быть загружены НОУ без уменьшения сроков жизни активной зоны. Мы показываем также, что для таких исследований могут применяться упрощенные расчеты бесконечной активной зоны.

Статья получена редакцией 4 апреля 2005 г. и принята к публикации 26 декабря 2005 г.

А.С. Дьяков и А.М. Шуваев работают в Центре по контролю над вооружениями, Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская область, Россия.

А.М. Дмитриев работает в Научно-инженерном Центре по ядерной и радиационной безопасности, Москва, Россия.

Фрэнк Н. фон Хиппель работает по программе по науке и всеобщей безопасности Принстонского университета, Принстон, Нью-Джерси, США.

Юнгмин Канг проживает в Сеуле, Республика Корея.

Адрес для связи: Анатолий Степанович Дьяков, Центр по контролю над вооружениями, МФТИ, Институтский переулок, 9, Долгопрудный, Московская область, 141700, Россия. Электронная почта: das@armscontrol.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Применение ВОУ в реакторном топливе создает опасность кражи или использования ВОУ для создания оружия. В результате с 1978 г. предпринимались крупные международные усилия по переводу исследовательских и испытательных реакторов с ВОУ-топливом на НОУ-топливо (содержащее уран-235 со степенью обогащения менее 20 %), которое не рассматривается как материал, непосредственно используемый для создания оружия¹. Но до сих пор не было предпринято аналогичных усилий для преобразования реакторов силовых установок на кораблях и подводных лодках². Поскольку имеется больше информации о конструкции активной зоны реактора КЛТ-40, применяющегося на ряде российских атомных ледоколов, чем для реакторов на иных морских судах, мы провели предварительное исследование для этого реактора и пришли к выводу, что его можно перевести на НОУ-топливо без сокращения сроков работы активной зоны.

КОНСТРУКЦИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА

Некоторая информация о конструкции активной зоны реактора российского транспортно-го ледокола «Севморпуть» была передана советским правительством правительству Норве-

¹ The Reduced Enrichment Research and Test Reactor program, Argonne National Laboratory. <http://www.rertr.anl.gov>.

² Для обсуждения продолжения применения ВОУ в морских реакторах смотрите, например, "Ending the production of highly enriched uranium for naval reactors" Chunyan Ma and Frank von Hippel, *Nonproliferation Review* 8(2001):86.

гии в связи с визитом в Тромсе в 1990 г. (см. Табл.1). Впрочем, в отдельных случаях различная информация становилась доступной из других источников. Наиболее значительной является публикация норвежского фонда «Беллуна», где приведено сообщение Мурманской судоходной компании, которая обслуживает атомные ледоколы, о том, что обогащение ледокольного топлива сейчас составляет 30-40%, но не 90 %³.

Доклад о безопасности «Севморпути» предполагает также, что топливные сборки находятся в каналах, где содержится вода, протекающая через сборки – эта вода отделена от воды, находящейся между каналами с топливными сборками⁴. Такое расположение применялось в реакторах на первом российском атомном ледоколе «Ленин». Его преимуществом является то, что вода между каналами с топливными сборками может находиться при относительно постоянной температуре, что уменьшает влияние на реактивность, когда холодная вода накачивается в топливные сборки после возобновления работы насоса⁵.

Табл. 1: Данные по конструкции активной зоны реактора КЛТ-40 на ледоколе «Севморпуть», предоставленные норвежскому правительству советским правительством (*Информация о безопасности ледокола, 1982* – речь идет о контейнеровозе «Севморпуть» с ядерной двигательной установкой)

Мощность	135 тепловых мегаватт (МВт)
Масса урана-235	150.7 кг в уране с обогащением 90 % в виде сплава U-Zr
Высота активной зоны	H = 1 м
Радиус	R ₀ = 0,606 м
Площадь теплопередачи от топлива	233 м ²
Топливные сборки	Полное количество – 241. Диаметр 6 см в треугольной решетке, расстояние между центральными осями – 7.2 см.
Управление	19 стержней, по одному на 16 топливных сборок.
Материал для поглотительных стержней	Естественный гадолиний
Нейтронный источник для запуска	BeO (при поглощении гамма- лучей возникают нейтроны)
Размеры топливного стержня (внешний диаметр и расстояние между центрами)	0.58 см /0.7 см
Отношение пиковой и средней мощности	1.27 в радиальном направлении, 2.07 по оси
Максимальная температура на поверхности топлива	335°C
Проектный рабочий срок	10000 эквивалентных часов при максимальной мощности (417 дней)

НОРВЕЖСКАЯ МОДЕЛЬ

На основе информации, приведенной в Табл.1, группа норвежских аналитиков разработала умозрительную конструкцию активной зоны⁶. Они предположили треугольную плотную упаковку топливныхборок, каждая из которых окружена цилиндрическим циркониевым экраном толщиной 0.15 см. Треугольная плотная упаковка цилиндрических топливных стержней позволяет разместить 55 топливных стержней внутри каждой сборки (Рис. 1). Цен-

³ *Sources of radioactive contamination in Murmansk and Arkhangel'sk counties* by Thomas Nilsen and Nills Bohmer (Bellona Foundation, 1994), p.79.

⁴ «Чтобы уравновесить нагрев теплоносителя в разных топливных сборках, обеспечивается гидравлическое профилирование, соответствующее распределению выделения энергии в активной зоне. Топливная сборка... помещена в оболочку – трубу из циркониевого сплава». *Информация о безопасности ледокола Севморпуть*, стр. 40-41.

⁵ «Эксперименты по созданию и обслуживанию реакторных систем для гражданских судов», В.И. Макаров, Б.Г. Пологих, Н.С. Хлопкин, Ф.М. Митенков, Ю.К. Панов, В.И. Полуничев и О.Ф. Яковлев, *Атомная энергия* 89 (2000), 692.

⁶ *Criticality Calculations on Russian Ship Reactor and Spent Nuclear Fuel* by M. B. Maerli, S. Borresen, K. Gussgard, and S. Hobratten. Norwegian Radiation Protection Authority report 1998:7.

тральная область в каждой сборке предполагается пустой для размещения фотонейтронного источника, помогающего запустить цепную реакцию. Шесть позиций во внешнем круге с 12 топливными элементами предназначены для выгорающих поглотителей нейтронов из окиси гадолиния (Gd_2O_3). Предполагается, что топливо помещено в оболочку из циркония толщиной 0.06 см, а само топливо изготовлено в виде сплава из урана с цирконием (эффективная плотность урана равна 4.5 г/см^3), имеющего форму полого цилиндра с внешним и внутренним радиусами 0.23 см и 0.21 см, соответственно. Норвежская группа показала, что при такой конструкции, действительно, можно генерировать 135 МВт в течение 417 дней и все еще иметь значительный запас избыточной реактивности ($k_{\text{eff}} > 1.2$). Она нашла также, что при возрастании температуры охлаждения реактивность снижается – это является важной характеристикой безопасности для реакторов с водяным охлаждением⁷.

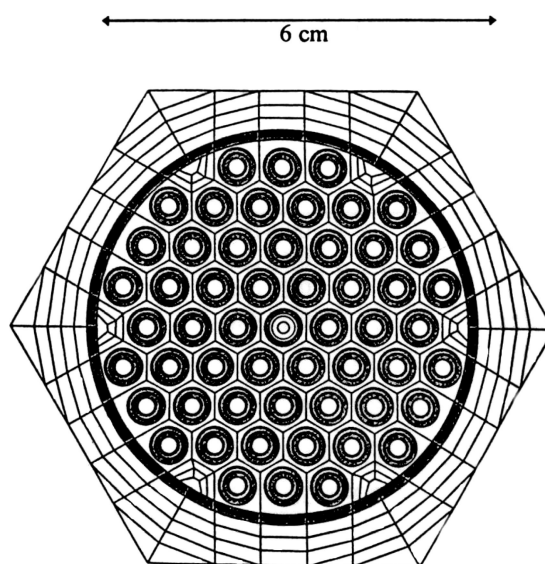


Рис.1: Поперечное сечение норвежской модели топливной сборки ледокола *Севморпуть*. Шестиугольная схема линий между топливными стержнями не является физической структурой. Она добавлена, чтобы подчеркнуть гексагональное размещение. Аналогично, шестиугольник вокруг цилиндрического экрана показывает количество наружной воды для каждой топливной сборки (ссылка 6, рис. 5.2).

Как видно на рис. 1, заполненное водой пространство между топливными сборками больше, чем пространство между топливными стержнями внутри сборок. В результате, входящим в топливные сборки из окружающего пространства нейтронам придется испытать больше столкновений с молекулами воды, чем нейтронам внутри топливных сборок, и они (внешние нейтроны) в среднем будут иметь меньшую энергию, чем внутренние нейтроны. Поскольку вероятность деления при взаимодействии нейтронов с делящимся ядром растет обратно пропорционально скорости нейтронов, частота деления в наружных топливных стержнях будет выше, чем в центральных стержнях. Это может быть исправлено путем уменьшения плотности урана-235 (либо понижением плотности урана, либо степенью его обогащения) в наружном кольце топливных стержней и увеличением этого параметра в двух центральных кольцах по отношению к среднему значению обогащения во втором кольце (если считать снаружи)⁸. Фактически считается, что активные зоны, по крайней мере, третьего поколения российских реакторов для подводок содержат топливные стержни с разными уровнями обогащения⁹.

⁷ В докладе о безопасности ледокола *Севморпуть* (стр.42) сообщается, что температурный коэффициент реактивности примерно равен $5 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$. В норвежском докладе этот коэффициент оценивается на 40 % выше.

⁸ Это предположение высказано нам Александром Глейзером.

⁹ Смотрите статью Олега Бухарина и Джошуа Хэндлера «Снятие с эксплуатации российских атомных подводных лодок», *Наука и всеобщая безопасность* 5 (1995), выпуск 2. Но описанная авторами картина относится ко всей активной зоне с внешним кольцом, содержащим уран с обогащением 43-45 %, и внутренним кольцом, где обогащение урана составляет 21 %.

Если полые топливные стержни, которые предполагаются в исходной норвежской модели, заменить на цельные стержни, количество топлива возрастет в достаточной степени и поэтому уран оружейного качества с обогащением 90 % можно заменить на уран с обогащением 20 % при той же плотности металла (4.5 г/см^3), увеличив в то же самое время загрузку ураном-235 в 1.13 раза¹⁰. Мы называем этот вариант норвежской модели «твердотопливной норвежской моделью»¹¹.

Содержание урана 4.5 г/см^3 кажется осуществимым. Исследовательский институт неорганических материалов имени Бочвара в Москве, ответственный за разработку новых топлив для российских ядерных реакторов, разработал возможные варианты топлива для КЛТ-40¹² с высокой теплопроводностью и содержанием урана до 10 г/см^3 . Французский ВМФ уже использует в своих малых ударных подлодках класса *Rubis* «карамельное» НОУ-топливо¹³ со степенью обогащения 7% (пластины UO_2 , покрытые циркониевым сплавом) со средней плотностью урана в топливе 8.7 г/см^3 .

Предлагаемая схема топливных сборок в активной зоне показана на рис. 2.

Очевидный вопрос со сплошными топливными стержнями заключается в том, что температура на оси будет выше, чем в топливе с полыми стержнями, которое рассматривала норвежская группа. Средняя выделяемая мощность с топливных стержней составляет примерно 12 кВт/м с максимальным значением в центре активной зоны при начале работы примерно в 2.6 раза выше (около 30 кВт/м). Впрочем, испытания в отделе теплопроводности Бочваровского института с их конструкциями НОУ-топлива нашли приемлемыми температуры на оси для топливных стержней с выделяемой мощностью вплоть до 46 кВт/м ¹⁴.

РОССИЙСКАЯ МОДЕЛЬ

Альтернативная модель была разработана российскими соавторами этой статьи¹⁵. Они предположили, что современная степень обогащения активных зон ледоколов равна 40 % - это соответствует упомянутому ранее докладу фонда «Беллуна». Они предположили также только 37 мест для стержней на топливную сборку вместо 55 в норвежской модели. Наконец, они допустили крестообразную геометрию топливных стержней (см. рис. 3а).

¹⁰ При расчетах предполагаются 225 топливных сборок с 48 топливными стержнями, причем в 16 сборках имеются управляющие стержни и всего 36 топливных стержней. Поэтому усредненное количество топливных стержней на сборку равно 47.2. Полный объем топливной массы равен 189 литров.

¹¹ Вариант с твердым топливом кратко рассмотрен в норвежском докладе ([6], стр. 28). Там же рассмотрена замена на уран с обогащением 20 % и 40 % (стр. 35-36).

¹² "Designing a New Generation Fuel Element for Different Purpose Water Reactors" by A. Vatulin, V. Ly-senko, and A. Savchenko, Research Institute for Inorganic Materials, Moscow, *Proceedings of the International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*, Jackson Yoke, Wyoming, 5-10 October 1997. Топливная масса содержит небольшие гранулы, содержащие уран, диаметром до 1 мм. Рассмотрены два типа гранул: (1) пористый оксид урана UO_2 , заключенный в алюминиевые сплавы (температуры плавления $580 \text{ }^\circ\text{C}$ и выше), создающий топливную массу с плотностями $4.6\text{-}5.1 \text{ г/см}^3$ (по урану), и (2) урановый сплав (температура плавления чистого урана $1135 \text{ }^\circ\text{C}$), покрытый цирконием (температура плавления $855 \text{ }^\circ\text{C}$) и образующий топливную массу с плотностями $9.3\text{-}10.9 \text{ г/см}^3$ (по урану).

¹³ Впрочем, известно только, что это топливо испытывалось до среднего по элементам выгорания 60 МВт.д/кгU , "Osiris, a MRT adopted and well fitted to LEU utilization, qualification and development" by M. Barnier and J. P. Baylot, Experimental Reactors Department, Saclay, France, *Proceedings of the International Meeting on reduced Enrichment for Research and Test Reactors*, JAERI-M 84-073, Tokai, Japan, October 24-27, 1983. Среднее выгорание НОУ-топлива в реакторе ледокола *Севморпуть* составит около 75 МВт.д/кгU за 417 дней работы при полной мощности.

¹⁴ Смотрите [12]. Для топливного элемента с радиусом 0.455 см и поверхностным потоком тепла 1.6 МВт/м^2 расчетная температура на центральной линии составила $507 \text{ }^\circ\text{C}$ при топливе, изготовленном из сплава урана с цирконием, и $620 \text{ }^\circ\text{C}$ при топливе, изготовленном из гранул оксида урана. При заданном составе топлива температура на центральной линии не зависит от диаметра топливного стержня при заданном линейном выходе тепла.

¹⁵ Более полное представление о предположениях и расчетах для российской модели (на русском языке) можно найти по адресу <http://www.armscontrol.ru/pubs/heu-leu-reactors.pdf>.

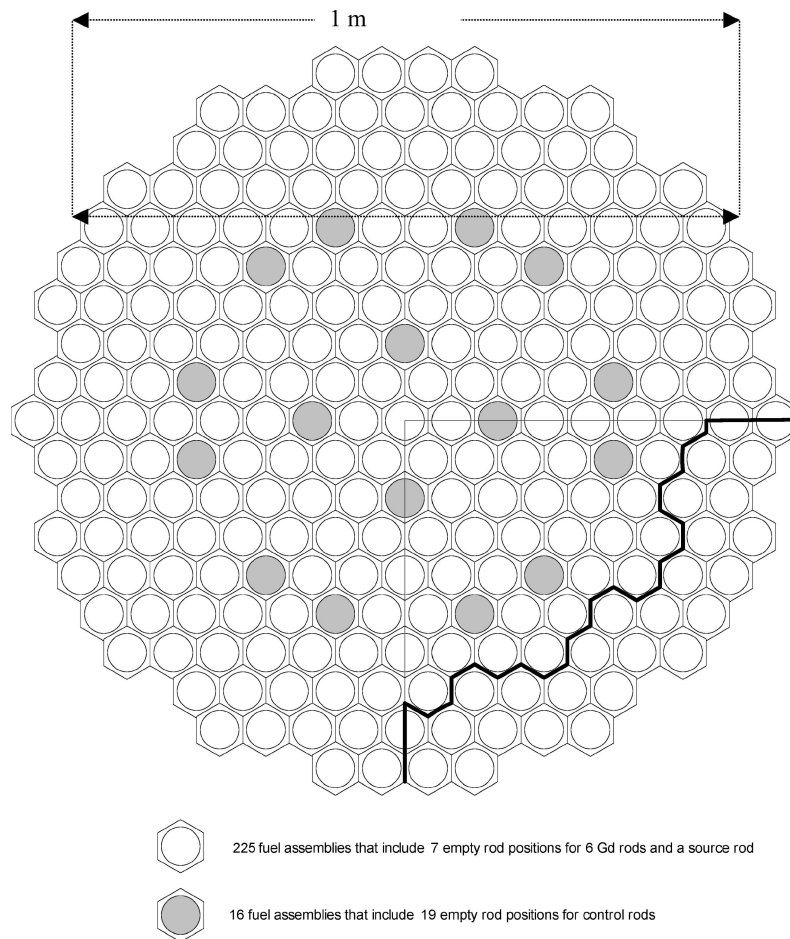


Рис. 2: Размещение топливных сборок в норвежской модели активной зоны ледокола *Севморпуть* (горизонтальное поперечное сечение). Границы шестиугольника являются математическими, а не физическими. Затемненные топливные сборки, как считается, имеют пространство для 19 управляющих стержней (на центральной оси и в двух кругах вокруг нее). Одна восьмая часть активной зоны была промоделирована при расчетах переноса нейтронов – это радиальный клин с углом раствора 90° в верхней половине активной зоны. Если считать, что внутренние радиальные поверхности этого клина являются отражателями, то при этом моделируется влияние оставшейся части активной зоны. Два внешних слоя топливных сборок, а также верхние и нижние слои топливных стержней (толщиной по 20 см) включены в состав внешней зоны при расчетах модели с двумя зонами. Показано 225 топливных сборок (незатемненных), которые имеют 7 пустых мест для шести гадолиниевых стержней и одного стержня с запускающим источником. Показано 16 топливных сборок (затемненных), которые имеют 19 пустых мест для управляющих стержней.

Такой тип топлива применяется в российских исследовательских реакторах, работающих при аналогичных температурах охладителя, как и в реакторе *Севморпуть*¹⁶. Форма центральных стержней создается путем протягивания пустого цилиндра через штамп. При этом остается пустой объем вблизи центральной оси, где могут накапливаться газообразные продукты деления¹⁷. Внешняя поверхность крестовидного стержня закручивается по спирали, а

¹⁶ Смотрите, например, “The fuel cycle of reactor PIK” by Yu. V. Petrov, A. N. Erykalov and M. S. Onegin, *Proceedings of the 2002 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*, Bariloche, Argentina, Nov. 3-8, 2002. См. также “PIK high-flux reactor” by K. A. Konoplev, V. A. Nazarenko, and Yu. V. Petrov, где давление охладителя задано величиной 5 МПа в соответствии с температурой около 270 °С, <http://nrd.pnpi.spb.ru/facilities/menu.aboutpik.html>.

¹⁷ Ряд продуктов деления относятся к благородным газам. Другие (например, йод с температурой плавления 184 °С) превращаются в газы при рабочих температурах реактора. Некоторые из этих изотопов имеют достаточно большие периоды полураспада (например, 10.7 лет для криптона-85) и накапливаются в топливе. Если в твердом топливе нет пор или иных пустых объемов, куда могут стекаться газы,

это приводит к тому, что внешние поверхности соседних топливных стержней соприкасаются в нескольких точках по своей длине – это делает ненужными специальные средства обеспечения расстояния между стержнями. Крестообразная форма уменьшает также толщину топливной массы при заданном объеме топлива и поэтому снижает падение температуры поперек топливной массы. Во всех случаях предполагается, что оболочка топливных стержней и вставок из гадолиния изготовлена из нержавеющей стали толщиной 0.017 см.

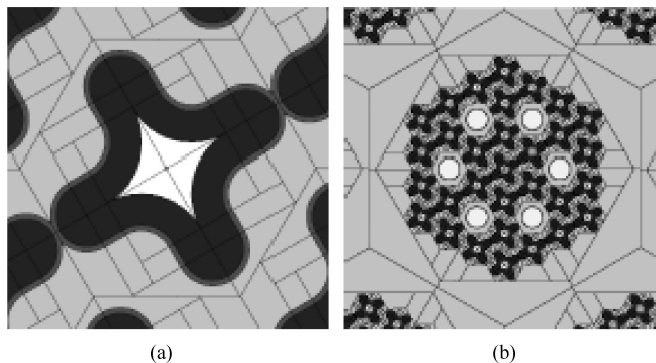


Рис. 3: (а) Поперечное сечение топливного стержня в российской модели; (б) поперечное сечение топливной сборки в российской модели (оба примера для модели 2).

В Табл. 2 приведены параметры активной зоны для четырех вариантов российской модели (мы приводим только информацию, отличающуюся от того, что представлено в Табл. 1). В отличие от наших расчетов для норвежской модели, где количество урана-235 в активной зоне с уровнем обогащения 20 %, как считается, на 13 % выше, чем в активной зоне с обогащением 90 %, при расчетах российской активной зоны считалось, что количество урана-235 одинаково для уровней обогащения активной зоны 20 % и 40 %. Модель 1 соответствует более компактной активной зоне (такой вариант может подходить для подложки¹⁸). Как и для норвежской модели, предполагается, что шесть мест в топливной сборке предназначены для гадолиниевых стержней, поглощающих нейтроны (см. рис. 3б)¹⁹.

В одной из российских моделей топливная масса представляла собой частицы UO_2 , рассеянные в алюминиевой среде. В остальных трех моделях предполагались сплавы урана с алюминием. По мере того, как отношение числа атомов алюминия к числу атомов урана уменьшается до четырех, теплопроводность топлива падает до очень низких значений²⁰. Поэтому топливные массы топлив с более высокой плотностью (рассмотренные в российских моделях 1-3) должны быть сделаны из других материалов тех типов, какие рассматривались в институте Бочвара (см. выше). Модели 2 и 4 с НОУ требуют таких же плотностей урана, какие использовались в твердоотопливной норвежской модели.

эти газы собираются в пузырьки и вызывают разбухание материала. В некоторых материалах пузырьки сливаются, что приводит к значительной вероятности повреждения топлива выше некоторого уровня выгорания.

¹⁸ В модели 1 расстояние между топливными стержнями больше максимальной ширины стержня. Поэтому нужны прокладки для сохранения жесткости активной зоны.

¹⁹ Стержни изготовлены из твердого гадолиния (плотность 7.89 г/см³) и имеют радиус 0.27 см.

²⁰ Уран реагирует с алюминием, образуя соединения типа UAl_n , где $n = 2,3,4$. Если доля алюминия по отношению к урану превышает четверку, топливо принимает вид смеси Al , UAl_3 и UAl_4 . Теплопроводность линейно уменьшается с увеличением доли урана от 2.2 Вт/см-°С для чистого алюминия до, примерно, 0.25 Вт/см-°С для UAl_4 , плотность которого (по урану) составляет около 3.6 г/см³, *Research reactor core conversion guidebook, Vol. 4: Fuels*, Appendix I, "Selected thermal properties and uranium density relations for alloy, aluminide, oxide, and silicide fuels" by J. T. Matos and J. L. Snelgrove, RERTR Program, ANL, (www.td.anl.gov/Programs/RERTR/FuelProperty/FuelProp.pdf). Наивысшая плотность урана в алюминиевых сплавах, которая применялась в топливе исследовательского реактора, равна 2.3 г/см³. Россия допускает для применения в исследовательских реакторах топливо в виде UO_2-Al с плотностью по урану 2.5 г/см³, "Status and progress of the RERTR program in the year 2003" by Armando Travelli, *Proceedings of the 2003 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*, Chicago, Ill. October 5-10, 2003, p.1.

Табл. 2: Параметры российских моделей.

	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Высота активной зоны (м)	0,9	0,9	0,9	0,9
Диаметр активной зоны (м)	0,45	0,6	0,6	0,6
Диаметр (расстояние между центрами) топливной сборки (см)	4,2/5,4	5/7,2	5/7,2	5/7,2
Расстояние между топливными стержнями (см)	0,7	0,81	0,81	0,81
Максимальный диаметр топливного стержня (см)	0,58	0,81	0,81	0,81
- толщина ребра (см)	0,23	0,23	0,15	0,23
- площадь топливной массы (см ²)	0,140	0,221	0,146	0,221
Полная плотность топливной массы (г/см ³)				
- обогащение 40 %	6,13	4,86	5,97	4,69
- обогащение 20 % (НОУ)	9,79	7,17	9,46	6,69
Плотность урана (г/см ³)				
- обогащение 40 %	3,60 (U-Al _{6,2})	2,27 (U-Al ₁₀)	3,44 (U-Al _{6,5})	2,27 (UO ₂ -Al)
- обогащение 20 % (НОУ)	7,19 (U-Al _{3,2})	4,53 (U-Al _{5,1})	6,88 (U-Al _{3,3})	4,53 (UO ₂ -Al)

ВЫЧИСЛЕННЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ РАЗМНОЖЕНИЯ НЕЙТРОНОВ, $k_{эфф}$

Чтобы реактор заработал, входящие в его активную зону нейтроны должны воспроизводить себя, вызывая деления, поскольку они теряются при поглощении или при утечке через поверхность реактора. Мерой такого воспроизведения служит коэффициент размножения нейтронов – $k_{эфф}$. У реактора, работающего с установившейся мощностью, $k_{эфф} = 1$. В конструкцию активной зоны включены «управляющие стержни», поглощающие нейтроны, чтобы позволить оператору компенсировать изменения $k_{эфф}$, связанные с изменением температуры охлаждающей воды и с изменением концентраций короткоживущих продуктов деления, что зависит от уровня мощности реактора. Значение $k_{эфф}$ устанавливается путем более глубокого введения контрольных стержней в активную зону или путем их выведения. Все наши расчеты $k_{эфф}$, приведенные ниже, выполнены для модели активной зоны, где контрольные стержни полностью выдвинуты. Получаемые значения поэтому обязательно должны быть больше единицы²¹.

Величина $k_{эфф}$ активной зоны без контрольных стержней или других добавленных нейтронных «поглотителей» постоянно уменьшается по мере расходования делящегося изотопа уран-235 в топливе, а затем наступает заметное *увеличение* реактивности, когда обедненное топливо заменяется свежим. Стержни из поглощающего нейтроны материала вводятся в сборки свежего топлива для уменьшения таких редких изменений реактивности. По мере расходования урана-235, что уменьшает реактивность активной зоны, вступает в игру нейтронный поглотитель, ослабляющий такое отрицательное влияние на реактивность. В некоторых последующих случаях мы будем оценивать значение $k_{эфф}$ при отсутствии подобных «выгорающих нейтронных ядов» и увидим уменьшение реактивности свежего топлива по мере расходования урана-235. Значение коэффициента размножения нейтронов $k_{эфф}$ будет рассчитано в зависимости от количества дней выгорания при полной мощности.

Расчеты производились для клина с углом раствора 90° в верхней половине активной зоны, а остальная часть активной зоны была представлена отражающими нейтроны границами. Предполагается, что активная зона находится в центре цилиндрического бака с водой, находящейся под давлением (полная высота бака – 2.4 м, а радиус – 1 м). Программа переноса нейтронов MCNP²² применялась для расчета $k_{эфф}$ активной зоны ледокола *Севморпуть* с использованием поперечных сечений для температуры 295 °С в случае норвежской моде-

²¹ Как сказано в докладе по безопасности реактора ледокола *Севморпуть*, «компенсационная способность пяти блоков контрольных стержней равна 25%».

²² *Los Alamos National Laboratory, Monte Carlo N-Particle Transport Code System* (Radiation Safety Information Computational Center, CCC-660 MCNP4B2 1998).

ли и 300 °С для российских моделей. Программа ORIGEN2²³ применялась для подсчета уменьшения и нарастания содержания изотопов в топливе.

Норвежская модель

Расчеты критичности для норвежской модели, прежде всего, были проведены для усредненного по объему выгорания, а затем для двух зон. При расчетах для двух зон во внешнюю зону входили по 20 см верхней и нижней частей активной зоны и 102 внешние сборки, как показано на рис. 2. В эту зону входило 53 % всего урана активной зоны.

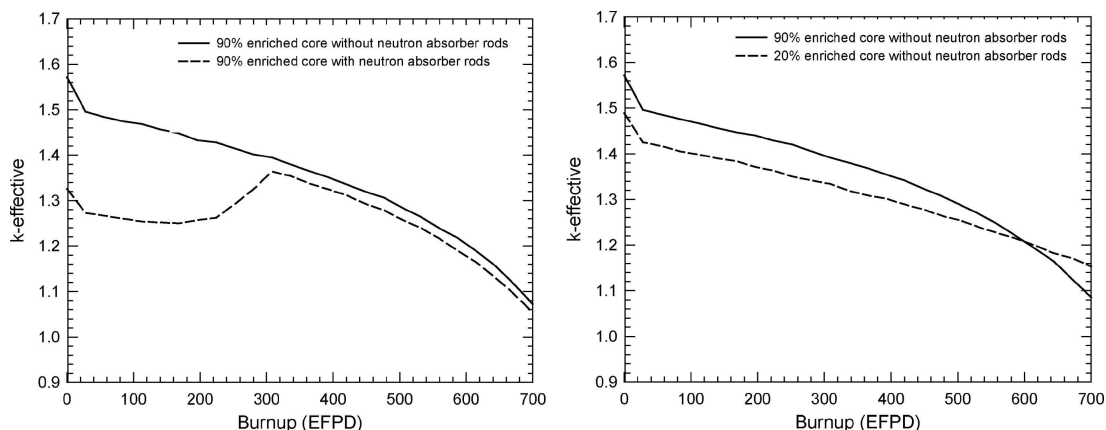


Рис. 4: Значения $K_{эфф}$ для норвежской модели активной зоны: а) (слева) активная зона с топливом, имеющем обогащение 90 % (со стержнями для поглощения нейтронов или без них) в зависимости от выгорания; б) (справа) урановое топливо с обогащением 90 % и 20 % без нейтронных поглотителей.

По оси X отложены эффективные дни работы при максимальной мощности (показатель выгорания). По оси Y отложены значения $K_{эфф}$.

Сплошная линия на графике рис. 4а соответствует отсутствию нейтронных поглотителей, а штрихованная линия – присутствию нейтронных поглотителей.

Сплошная линия на рис. 4б соответствует топливу с обогащением 90 %, а штрихованная – топливу с обогащением 20 % (в обоих случаях отсутствуют стержни с поглотителями нейтронов).

На рис. 4а показаны значения $K_{эфф}$, рассчитанные для полной активной зоны и первой зоны для уранового топлива с обогащением 90 % как с поглощающими нейтроны стержнями из гадолиния, так и без них²⁴. При наличии поглотителей реактивность поначалу падает, но гадолиний вырабатывается быстрее, чем уран-235, в результате чего значение $K_{эфф}$ достигает максимума примерно за 300 дней, а затем начинает уменьшаться по мере того, как выгорает делящийся материал. Падение реактивности при начале работы связано с образованием продуктов деления, обладающих большими поперечными сечениями захвата нейтронов. На рис. 4б сравниваются значения $K_{эфф}$, полученные для уранового топлива с обогащением 90 % и 20 % в отсутствие поглотителей нейтронов. Будет показано, что хотя начальная избыточная реактивность активной зоны из НОУ меньше, чем у ВОУ-зоны, реактивность НОУ-зоны при значительных выгораниях становится больше из-за вклада плутония, полученного из дополнительного количества урана-238. Мы нашли очень небольшое различие для расчета в одной или в двух зонах и поэтому не приводим результаты для второй зоны.

²³ Oak Ridge National Laboratory, *ORIGEN 2.1: Isotope Generation and Depletion Code Matrix Exponential Method*, (Radiation Safety Information Computational Center CCC-371, 1996).

²⁴ Стержни, поглощающие нейтроны состоят, как считается, из смеси гадолиния (22.92 % по весу) и циркония (77.08 %). Плотность смеси равна 6.83 г/см³, радиус стержня – 0.23 см, а толщина циркониевой оболочки – 0.06 см.

Российская модель

На рис. 5 показаны графики зависимости $K_{эфф}$ от выгорания для модели 2. Соответствующие значения для топлива с обогащением 20% лежат слегка ниже значений для обогащения 40% из-за поглощения нейтронов в избыточном уране-238 (содержание урана-235 в активной зоне одинаково для обоих случаев). Но снова повторяется перекрытие графиков при значительных выгораниях из-за большего количества плутония, образованного при захвате нейтронов в уране-238 в НОУ.

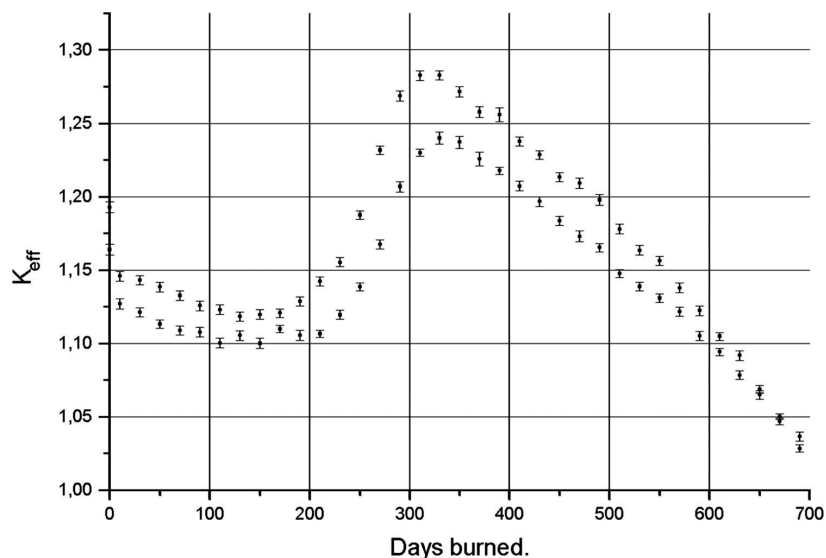


Рис. 5: Значения $K_{эфф}$ для российской модели 2 активной зоны. Сверху расположен график для урана с обогащением 40%, а снизу график для обогащения 20%. По оси X отложен уровень выгорания (в днях), по оси Y – значения $K_{эфф}$.

В табл. 3 приведены расчетные результаты для $K_{эфф}$ в начале работы активной зоны и через 417 дней для каждой модели. Будет показано, что для российских моделей реактивность становится большей при 417 днях, чем при начале работы из-за того, что уменьшение поглощения нейтронов заведомо превосходит влияние выработки урана-235. Неопределенность всех значений $K_{эфф}$ (одно стандартное отклонение) менее 0.3 %.

В Приложении будет показано, что большинство таких же результатов можно получить с помощью упрощенных моделей бесконечной активной зоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наши результаты означают, что российские ледокольные реакторы КЛТ-40 могут пользоваться топливом в виде НОУ без уменьшения сроков работы активной зоны, *если* топливо с предлагаемой плотностью урана может работать до предполагаемого уровня выгорания. Плотности НОУ, требуемые для норвежской модели твердотопливной активной зоны и для российских моделей 2 и 3, одни и те же – это 4.5 г U/cm³. Плотности урана, требуемые российскими моделями 1 и 4, оказываются более высокими.

ПРИЛОЖЕНИЕ: РАСЧЕТЫ $K_{эфф}$ В ПРИБЛИЖЕНИИ БЕСКОНЕЧНОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

В этом приложении мы сначала рассмотрим формулы, относящиеся к расчетам для бесконечных и конечных активных зон. Затем мы проведем ряд расчетов для бесконечной зоны, основанных на моделях с одиночными стержнями и с топливными сборками, которые окружены поверхностями, отражающими нейтроны.

Табл. 3: Сравнение расчетных значений $k_{эфф}$ для активной зоны ледокола *Севморпуть* при свежем топливе и при проектном уровне выгорания (в случае высокого и низкого обогащения урана).

Модель \ Количество дней работы с полной мощностью	0		417	
	90%	20%	90%	20%
Норвежская модель (обогащение топлива)				
- одна зона	1,572	1,489	1,338	1,283
- две зоны	1,572	1,489	1,343	1,290
Российские модели (обогащение топлива)				
Модель 1	1,07	1,05	1,13	1,08
Модель 2	1,15	1,13	1,23	1,20
Модель 3	1,13	1,10	1,25	1,22
Модель 4	1,13	1,10	1,23	1,19

Вычисление коэффициентов размножения нейтронов для конечной активной зоны на основе данных для бесконечной зоны²⁵

Стандартная формула из учебника по ядерной инженерии, связывающая постоянную размножения нейтронов в бесконечной активной зоне k_{inf} со значением $k_{эфф}$ для активной зоны конечного размера, имеет следующий вид

$$k_{эфф} = k_{inf} / [1 + M^2 B^2]. \quad (A-1)$$

Множитель $[1 + M^2 B^2]$ – это вероятность того, что нейтрон не выйдет за пределы активной зоны. Этот множитель учитывает потери нейтронов через конечную поверхность активной зоны. Произведение $M^2 B^2$ является мерой важности утечек нейтронов. B^2 – это «лапласиан» (дивергенция градиента нейтронного флюенса в активной зоне), характеризующий поток нейтронов к поверхности активной зоны. Он имеет размерность квадрата обратной длины и уменьшается по мере увеличения размера активной зоны. M^2 – это квадрат «миграционной длины», равный одной шестой среднеквадратичного расстояния между точками рождения и поглощения нейтрона в активной зоне.

Для цилиндрической активной зоны с *эффективными* значениями высоты H и радиуса R

$$B^2 = (2.405/R)^2 + (\pi/H)^2. \quad (A-2)$$

Эффективные высота и радиус больше чем *геометрические* высота H_0 и радиус R_0 физической активной зоны из-за отражения нейтронов от воды, окружающей активную зону ($H_0 = 1$ м и $R_0 = 0.6$ м для активной зоны реактора на ледоколе *Севморпуть*).

Величину этого эффекта можно увидеть для реактора в виде бесконечной пластины толщиной H_0 . Распределение флюенса в таком реакторе имеет следующий вид

$$\Phi = \Phi_0 \cos(Bz) \quad (A-3)$$

При отсутствии материалов выше и ниже реактора флюенс стремится к нулю на верхней и нижней границах пластины при $z = \pm H_0/2$. Отсюда следует, что $B = \pi/H_0$.

Мы воспользовались программой MCNP для вычисления значения лапласиана B для реактора, имеющего вид бесконечной пластины толщиной 1 м, со слоями воды толщиной по 0.7 м сверху и снизу от пластины. В табл. A-1 показаны расчетные значения нейтронного флюенса для слоев, расположенных от центральной плоскости на расстояния 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 и 0.475 м. Приведены также значения лапласиана B , полученные при подгонке результатов в каждой строке под уравнение A-3. Как будет показано, наилучшая подгонка получается для $B = 2.70 \text{ м}^{-1}$, то есть $H = \pi/B = 1.16$ м. Это примерно соответствует хорошо известному

²⁵ Мы следуем изложению, представленному в книге S. Glasstone and A. Sesonske, *Nuclear Reactor Engineering* (Van Nostrand Reinhold, 1967), chapter 4.

результату, что наличие водяного отражателя увеличивает эффективную высоту активной зоны следующим образом²⁶

$$H = H_0 + 2\delta, \text{ где } \delta \approx 0.097 \text{ м} \quad (\text{A-4})$$

Радиус реактора увеличивается похожим образом

$$R = R_0 + \delta \quad (\text{A-5})$$

Если использовать значение $\delta = 0.08$, полученное из наших расчетов, и подставить его в параметры активной зоны ледокола *Севморпуть*, то из полученных значений $H = 1.16$ м и $R = 0.68$ м получаем согласно уравнению (A-2), что $B^2 = 21.1 \text{ м}^{-2}$.

Табл. А-1: Вычисление лапласиана по программе MCNP на основе распределения флюенса для реактора, имеющего форму бесконечной пластины толщиной 1 м, со слоями воды толщиной по 0.7 м над и под пластиной.

z – расстояние от средней плоскости (м)	Относительный флюенс (Φ/Φ_0)	$B = \cos^{-1}(\Phi/\Phi_0)/z$
0.0 – 0.05	1,00	-
0,05 – 0,15	0,95	3,18
0,15 – 0,25	0,86	2,68
0,25 – 0,35	0,67	2,79
0,35 – 0,45	0,47	2,70
0,45 – 0,50	0,31	2,64

После того, как зафиксировано значение B^2 для реактора, имеющего форму пластины, можно подсчитать величину M^2 на основе уравнения (A-1), если подсчитать одновременно значения $k_{эфф}$ и k_{inf} при помощи программы MCNP. Если подставить в уравнение (A-1) значения, полученные для восьми пар расчетов бесконечной активной зоны и активной зоны в виде пластины с отражателем (эти данные приведены в табл. А-2), получим среднюю вероятность удержания нейтронов в реакторе в виде пластины с отражателем – эта вероятность равна 95.35 %, то есть

$$(1 + M^2B^2)^{-1} = k_{эфф}/k_{inf} = 0.9535 \quad (\text{A-6})$$

для реактора в виде пластины, что дает $M^2 = 0.00669 \text{ м}^2$ и

$$(1 + M^2B^2)^{-1} = 0.876$$

для реактора ледокола *Севморпуть*.

Наконец, можно использовать эту вероятность сохранения нейтронов для получения оценки $k_{эфф}$ для реактора ледокола *Севморпуть*, имеющего цилиндрическую форму и конечный размер, а также внешний отражатель, на основе значения k_{inf} , полученного для бесконечного реактора, который можно представить в виде единичного стержня, полностью отражающего нейтроны, или единичной топливной сборки, обладающей аналогичной особенностью: $k_{эфф} = 0.876k_{inf}$.

Расчеты k_{inf} для активной зоны реактора ледокола *Севморпуть*

Эти вычисления проводились для активных зон с бесконечными размерами, созданных из наборов единичных топливных стержней активной зоны ледокола *Севморпуть* и единичных топливныхборок. Виды стержней иборок были основаны на норвежской модели активной зоны²⁷.

При расчетах бесконечной активной зоны компьютер подсчитывал коэффициент размно-

²⁶ Там же, стр. 209.

жения нейтронов для единичного стержня или единичной топливной сборки, помещенных внутри свой доли воды из состава реальной активной зоны и окруженных поверхностями, поток нейтронов через которые нейтроны одинаков как вовнутрь, так и наружу (Рис. 6). Это условие осуществляется тем, что указанные поверхности считаются идеальными нейтронными «отражателями». Каждый раз, когда нейтрон ударяется о поверхность, он, как предполагается, упруго отскакивает назад.

В приближении единичного стержня считается, что вся активная зона состоит из единичных топливных стержней с утолщенной оболочкой (внешний радиус равен 0.268 см), чтобы принять во внимание цирконий в кожухе активной зоны. Считается, что стержень окружен водой, заключенной в отражающей нейтроны цилиндр (его радиус равен 0.51 см). В приближении единичной сборки эта сборка помещается внутри цилиндра с водой, имеющего шестиугольное поперечное сечение при расстоянии между противоположными стенками 7.2 см.

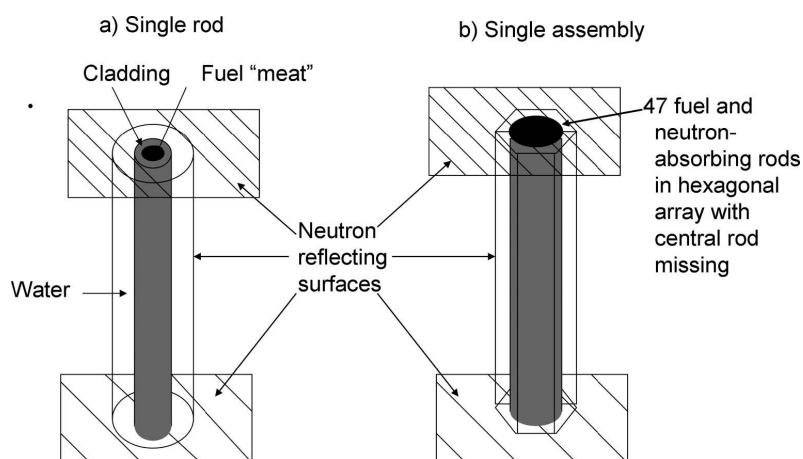


Рис. 6: Приближение бесконечной активной зоны: а) Единичный стержень с увеличенной толщиной (с учетом своей доли материала дополнительного в реальной активной зоне), б) единичная топливная сборка, окруженная своей долей воды, находящейся в реальной активной зоне. Остальная часть активной зоны моделируется помещением стержня и сборки внутри замкнутой поверхности, которая отражает нейтроны так, что количество входящих вовнутрь нейтронов равно количеству выходящих наружу.

Подписи на рисунке (слева направо и сверху вниз): а) единичный стержень - б) единичная сборка; оболочка - топливная масса - 47 топливных и поглощающих нейтроны стержней, расположенных в шестиугольной геометрии (стержень в центре отсутствует); вода - поверхности, поглощающие нейтроны.

²⁷ Результаты, следовавшие из расчетов единичной сборки в приближении бесконечной активной зоны, ранее были представлены в докладе "Feasibility of converting Russian icebreaker reactors" by Jungmin Kang and Frank von Hippel, *Global 2001 International Conference on the Back End of the Fuel Cycle*, Paris, Sept. 9-13, 2001.

Расчеты активной зоны, имеющей вид бесконечной пластины

При таких вычислениях принимается во внимание конечная длина топливного стержня. Длина топливных стержней и топливных сборок считается равной 0.5 м, что соответствует половине их реального размера. Их днища примыкают к поверхности, отражающей нейтроны, которая является средней плоскостью активной зоны. Поскольку нижняя часть активной зоны лежит ниже этой плоскости, через эту поверхность проходят вверх столько же нейтронов, сколько и вниз.

Предполагается, что над вершиной (и под днищем) активной зоны находятся слои воды толщиной 0.7 м, а за водой расположен вакуум (см. Рис. 7). Водный слой служит отражателем нейтронов, но не совершенным. Некоторые нейтроны рассеиваются молекулами воды и возвращаются в топливо, но некоторые выходят через поверхность воды после нескольких рассеиваний.

В Табл. А-2 приведено сравнение значений $k_{эфф}$, полученных при помощи программы MCNP для полной активной зоны в начале и в конце проектного срока работы активной зоны, с оценками, проведенными на основании уравнения А-1 (где использовано значение K_{inf} , вычисленное в приближении бесконечной активной зоны). Видно, что различия, как правило, лежат в пределах одного процента при максимальной разнице 4 %. Поэтому упрощенные расчеты бесконечной активной зоны должны оказаться адекватными при определении масштаба явлений, аналогичных рассмотренным в этой статье.

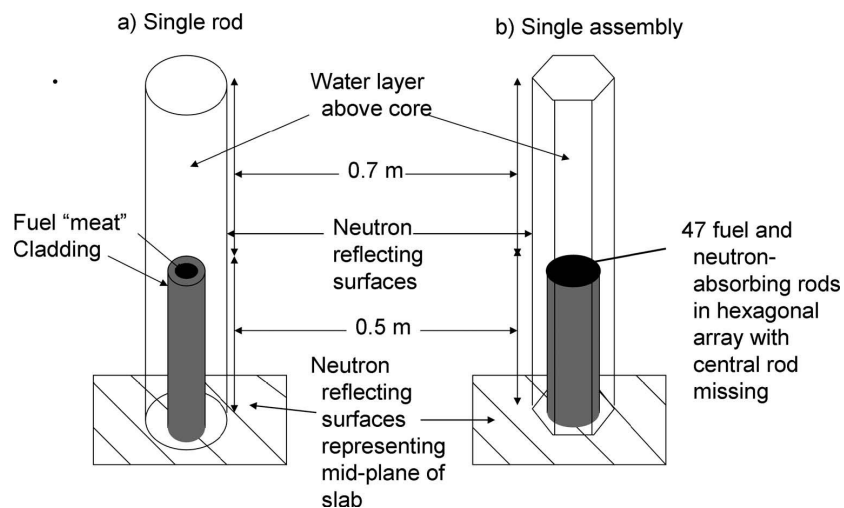


Рис. 7: Приближение активной зоны в виде бесконечной пластины. Все поверхности, окружающие топливный стержень или топливную сборку (за исключением верхней поверхности), являются идеальными отражателями нейтронов. Предполагается, что окружающая топливный стержень или топливную сборку вода поднята выше верхнего уровня на 0.7 м, а над водой предполагается вакуум. Поэтому нейтроны, выходящие через верхнюю поверхность воды, не возвращаются обратно.

Подписи к рисунку (слева направо и сверху вниз): единственный стержень – единичная сборка; уровень воды над активной зоной; 0.7 м; топливная масса – поверхности, отражающие нейтроны, - 47 топливных стержней и стержней, поглощающих нейтроны а шестиугольной сборке (стержень в центре отсутствует); оболочка; 0.5 м; поверхности, отражающие нейтроны, являются часть средней плоскости пластины.

Табл. А-2: Сравнение значений $k_{эфф}$, полученных для норвежской модели активной зоны реактора на ледоколе *Севморпуть* (без поглотителей нейтронов) в двух случаях: а) расчеты полной активной зоны и б) расчеты на основе уравнения А-1 и значения k_{inf} , полученного для единичных сборок и единичных стержней, заключенных в нейтронные отражатели.

Модель/Количество рабочих дней	0		417	
	k_{inf}	$k_{эфф}$	k_{inf}	$k_{эфф}$
Топливо с обогащением 90 %				
Полная активная зона (одна зона)	-	1,572	-	1,572
Полная активная зона (две зоны)	-	1,572	-	1,572
Единичная сборка (пластина и 0.7 м отражателя)	1,696	-	1,488	-
Единичная сборка (бесконечная активная зона)	1,779	1,559	1,558	1,365
Единичный стержень (пластина и 0.7 м отражателя)	1,735	-	1,520	-
Единичный стержень (бесконечная активная зона)	1,824	1,595	1,600	1,402
Топливо с обогащением 20 %				
Полная активная зона (одна зона)	-	1,489	-	1,283
Полная активная зона (две зоны)	-	1,489	-	1,200
Единичная сборка (пластина и 0.7 м отражателя)	1,604		1,412	
Единичная сборка (бесконечная активная зона)	1,677	1,470	1,476	1,293
Единичный стержень (пластина и 0.7 м отражателя)	1,634		1,437	
Единичный стержень (бесконечная активная зона)	1,714	1,502	1,511	1,324