

## Конверсия иранского тяжеловодного реактора ИР-40 в более устойчивый к распространению реактор

Томас Мо Виллиг, Цецилия Фуцетер и Халвор Киппе

В этой статье оценивается реализуемость и преимущества конверсии иранского тяжеловодного исследовательского реактора ИР-40 от использования природного урана к применению низкообогащенного уранового топлива. На основании нейтронно-физических расчетов для детальных моделей двух конфигураций реактора, конверсия приведет к меньшей активной зоне с последующим уменьшением и деградацией производства плутония. Утверждается, что предлагаемая конверсия предоставит Ирану исследовательский реактор, который будет лучше приспособлен для научных экспериментов и производства радиоизотопов по сравнению с первоначальной конфигурацией. Предлагается ввести требования к потреблению топлива конвертированным реактором ИР-40 как естественный предел для будущей деятельности Ирана по обогащению.

Томас Мо Виллиг и Халвор Киппе работают в Норвежской организации оборонных исследований (FFI), Кьеллер, Норвегия.

Цецилия Фуцетер работает на факультете математических наук и технологии Норвежского университета наук о живой природе, Ос, Норвегия.

Статья получена 21 мая 2012 года и принята к публикации 5 июля 2012 года.

Почтовый адрес для корреспонденции: Halvor Kippe, FFI, PO Box 25, NO-2027 Kjeller, Norway.

Электронный адрес: halvor.kippe@ffi.no

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Иране, в окрестностях города Арак, строится тяжеловодный исследовательский реактор мощностью 40 МВт (тепл.) с топливом из природного урана (ПУ). Строительство реактора началось в 2004 году, и начало его эксплуатации запланировано на 2014 год<sup>1</sup>. Оценивается, что после начала работы реактора он может ежегодно производить до 10 кг плутония оружейного качества<sup>2</sup>, предоставляя достаточно расщепляющегося материала для примерно двух ядерных боеприпасов на базе плутония, в зависимости от конструкции оружия и потерь при переработке<sup>3</sup>. Следует подчеркнуть, что до сих пор Иран не строил и официально не планировал строить никакого перерабатывающего предприятия для извлечения плутония из облученного топлива. Тем не менее, можно выделять плутоний в "горячих камерах" (камерах с манипулятором для работы с радиоактивными веществами)<sup>4</sup>. В Иране строится предприятие с горячими камерами неизвестной производительности для выделения радиоизотопов в дополнение к площадке реактора в Араке<sup>5</sup>.

По заявлениям иранских властей, целью ИР-40 является замена стареющего реактора исследовательского реактора в Тегеране (TRP) мощностью 5 МВт (эл.) для производства радиоизотопов в мирных целях<sup>6</sup>. ИР-40 также позволит проводить фундаментальные исследования и обучение ядерного персонала. Иран заявляет о строительстве реактора силами исключительно иранских инженеров<sup>7</sup>.

Идея конвертирования ИР-40 с использованием топлива с низко-обогащенным ураном (НОУ) вместо топлива с природным ураном была первоначально предложена бывшим заместителем генерального директора Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) по гарантиям Олли Хейноненем в номере журнала "Foreign Policy" от января 2011 года, как средство вернуть Иран за стол переговоров по его ядерной программе<sup>8</sup>. Эта статья конкретизирует предложение Хейнонена моделированием ИР-40 в его наиболее вероятной конфигурации и его сравнения с модифицированным ИР-40 с активной зоной с низко-обогащенным ураном. Особое внимание уделяется различию в производстве плутония и радиоизотопов.

Обязывающие резолюции Совета Безопасности Организации Объединенных Наций требуют от Ирана приостановить всю деятельность, относящуюся к тяжелой воде, переработке и обогащению. Мы предполагаем, что договорное решение иранского ядерного диспута в некоторый момент откроет путь к отмене этих запретов, делая возможным реализовать идеи, выдвигаемые в этой статье. Технические обсуждения такого рода могут даже оказаться полезными в достижении подобных соглашений<sup>9</sup>.

### Предполагаемая конструкция существующего реактора ИР-40

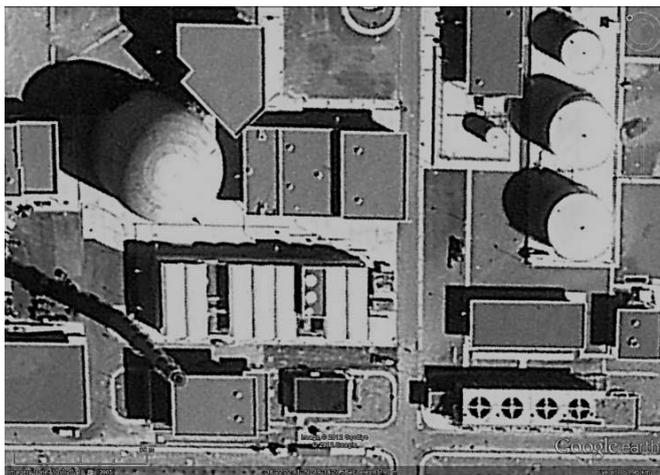
Полное описание ИР-40 недоступно. Однако, мы компилировали информацию, доступную из различных открытых источников, для того, чтобы оценить текущую конструкцию реактора. В двух отчетах 2003 года по внедрению гарантий МАГАТЭ в Иране включена первоначальная проектная информация об ИР-40. ИР-40 - это реактор с охладителем и замедлителем из тяжелой воды (оксида дейтерия). Официально ИР-40 базируется на отечественной конструкции, но Иран также консультировался с иностранными экспертами по разработке определенных деталей реактора<sup>10,11</sup>. Заявляется, что тепловая выходная мощность реактора будет равна 40 МВт (тепл.) для того, чтобы достичь нейтронного потока в  $10^{13}$  -  $10^{14}$  нейтронов на квадратный сантиметр<sup>12</sup>. Топливо для ИР-40 в настоящее время изготавливается на заводе изготовления топлива (FMP) в Исфахане, и оно будет изготавливаться из диоксида природного урана ( $\text{NUO}_2$ ) в оболочке из циркаллой<sup>13,14</sup>. Один стержень из  $\text{NUO}_2$  в, изготовленный на заводе FMP<sup>15</sup>, в настоящее время испытывается на реакторе TRP<sup>15,16</sup>.

Новые отчеты по гарантиям МАГАТЭ сообщают, что отдельные части реактора были поставлены на площадку реактора и установлены на ней<sup>17,18,19</sup>. В 2010 году был установлен нагнетатель для системы охлаждения реактора и в 2011 году были также установлены теплообменник замедлителя и теплообменник охладителя. Наличие отдельных теплообменников для охладителя и замедлителя, и накопителя указывает, что в ИР-40 может применяться конструкция трубки под давлением с отдельными контурами охладителя и замедлителя, такой, как в типах канадского реактора КАНДУ и российского реактора РБМК<sup>20</sup>.

Доказательства, собранные из спутниковых снимков строительной площадки реактора согласуются с заявленной выходной тепловой мощностью реактора. В ИР-40 будет использоваться механическая вытяжная охлаждающая башня с четырьмя вентиляторами для сброса тепла (рис. 1).

Максимальная мощность, которая может сброшена такими вытяжными башнями, составляет 0,093 - 0,116 МВт/м<sup>2</sup><sup>21</sup>. Как можно оценить из рис. 1, суммарная площадь вытяжных башен примерно равна 11 × 40 м. Поэтому мощность охлаждения оценивается в 44 МВт, что согласуется с тепловой выходной мощностью, объявленной Ираном. Спутниковый снимок (рис. 1) также устанавливает верхний предел на размеры силового корпуса реактора по отверстию в фундаменте бетонного здания. Если только корпус реактора не устанавливается по частям, или отверстие в фундаменте бетонного здания не будет увеличено, то диаметр силового корпуса не будет превышать 5 - 6 метров.

В апреле 2009 года топливная сборка, по сообщению иранскими официальными лицами во время пресс-конференции по поводу открытия завода по изготовлению топлива (FMP) (рис. 2а)<sup>22</sup>. Топливная сборка сильно напоминает топливную сборку типа РБМК. Институт науки и международной безопасности (ISIS) позднее получил подтверждение того, что показанная топливная сборка была на самом деле предназначена для ИР-40<sup>23</sup>. Длина стандартной сборки РБМК составляет 10 метров; сборка состоит из двух вертикальных топливных узлов, разделенных небольшим промежутком. Каждый топливный узел состоит из 18 топливных стержней, содержащих расположенные друг над другом таблетки из диоксида урана, и центрального несущего стержня. Топливные стержни располагаются по двум концентрическим окружностям; длина активного топлива составляет 341 см<sup>24</sup>. Тогдашний заместитель руководителя иранской организации по атомной энергии (АЕОИ) Абдулла Солатсана, заявив в 2009 году, что активная зона ИР-40 включает в целом 150 топливных сборок<sup>25</sup>.



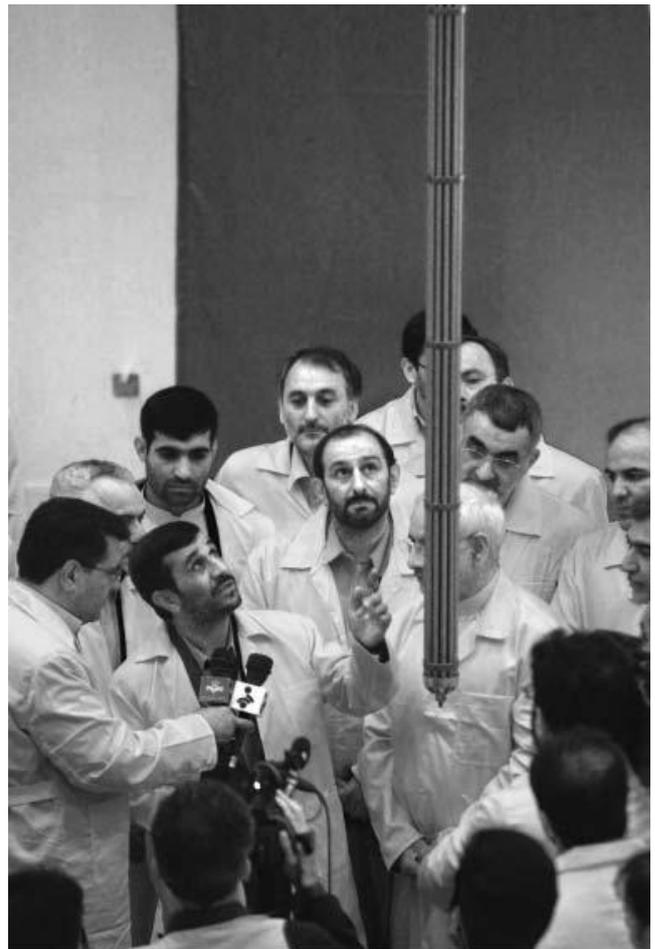
**Рис. 1:** Снимок площадки ИР-40. Реактор располагается под бетонным куполом в верхнем левом углу снимка. Механические вытяжные трубы расположены в правом нижнем углу (снимок предоставлен Google Earth).

В брошюре АЕОИ года крупным планом показана топливная сборка, похожая на представленную на заводе FMP в 2009 году (рис. 2b)<sup>26</sup>. Стержни в сборке расположены по двум концентрическим окружностям. Сборка, показанная на рис. 2b, кажется, содержит 19 стержней, что соответствует количеству стержней в одном топливном узле сборки РБМК.

В нескольких иранских научных исследованиях, опубликованных между 2007 и 2012 г.г., описываются различные особенности одного конкретного исследовательского реактора. Первое исследование, опубликованное в 2007 году, описывает тяжеловодный реактор бассейнового типа мощностью 40 МВт (тепл.), в котором замедлитель не смешивается с охладителем<sup>27</sup>. Из 40 МВт (тепл.) 37 МВт поглощаются в охладителе и 3 МВт в замедлителе. Активная зона состоит из 150 топливных сборок, расположенных в треугольной решетке с шагом 26,5 см. Температура замедлителя и охладителя равна 70 °С, а давление в них составляет 0,28 МПа.

В одном исследовании, опубликованном в 2010 году, показано расположение различных управляющих стержней, используемых в реакторе, состоящем из 150 топливных сборок, расположенных в треугольной решетке с шагом 26,5 см<sup>28</sup>. Некоторые рисунки в статье описывают реактор под названием ИР-40. Статья, опубликованная в 2011 году, описывает обобщенный тяжеловодный реактор мощностью 40 МВт (тепл.), модифицированный для использования обычной воды<sup>29</sup>. В статье топливная сборка первоначального тяжеловодного реактора состоит из 18 топливных стержней, так же, как и модифицированная сборка. Длина активного топливного узла в модифицированной сборке равна 343 см. В исследовании представлена конфигурация модифицированной топливной сборки и модифицированной активной зоны. В исследо-

вании 2012 года представлен обзор компоновки реактора, содержащего 150 топливных сборок, и описывается цилиндрическая активная зона высотой 340 см и радиусом 170 см<sup>30</sup>.



(a)



(b)

**Рис. 2:** (a) Президент Ирана Ахмадинежад рядом с топливной сборкой, показанной на открытии завода по изготовлению топлива 9 апреля 2009 года. Scanpix International–Agence France-Presse (AFP Photo). Предоставлено Atta Kenare. (b) Топливная сборка, представленная в брошюре иранской организации по атомной энергии.

По нашему мнению, весьма вероятно, что обсуждавшийся в этих статьях тяжеловодный реактор на самом деле является реактором ИР-40, и что представленные размеры близки к реальным значениям. Количество топливных стержней и длина описанной топливной сборки соответствуют размерам одного топливного узла в сборке РБМК, а также тому, что в двух случаях показывал Иран (как это описано выше)<sup>31,32</sup>. Описание отдельных контуров охладителя и замедлителя также соответствует информации из упомянутых выше отчетов МАГАТЭ по гарантиям<sup>33,34</sup>. Более того, не известно ни одного тяжеловодного реактора, планируемого или строящегося в Иране, который могли бы описывать эти статьи. Количество топливных сборок, упомянутое в нескольких исследованиях, также соответствует заявленному количеству сборок, предназначенных для реактора ИР-40<sup>35</sup>.

В 2003 году Иран информировал МАГАТЭ о том, что были проведены консультации с иностранными экспертами в отношении разработки определенных частей реактора. Основываясь на интервью с "осведомленными официальными лицами" Институт науки и международной безопасности получил свидетельство того, что российская экспертиза оказала помощь в модификации конструкции топливного стержня РБМК для использования в реакторе ИР-40<sup>36</sup>. Это вполне вероятно, учитывая тот факт, что реакторы РБМК были разработаны в Советском Союзе.

Компиляция информации, предоставленной этими источниками, позволила нам сделать предположение о конструкции ИР-40. Мы предполагаем, что топливные стержни имеют тот же радиус, что и в обычном топливе РБМК, но без характерного отверстия в середине каждой топливной таблетки<sup>37</sup>. Чистота оксида дейтерия принималась равной 99,75%<sup>38</sup>. Мы также предполагаем, что трубки под давлением были изготовлены из циркаллой и имели те же самые размеры, что у РБМК, т.е. 8 см в диаметре и толщину стенок в 4 мм. Перечень технических характеристик ИР-40 приведен в табл. 1.

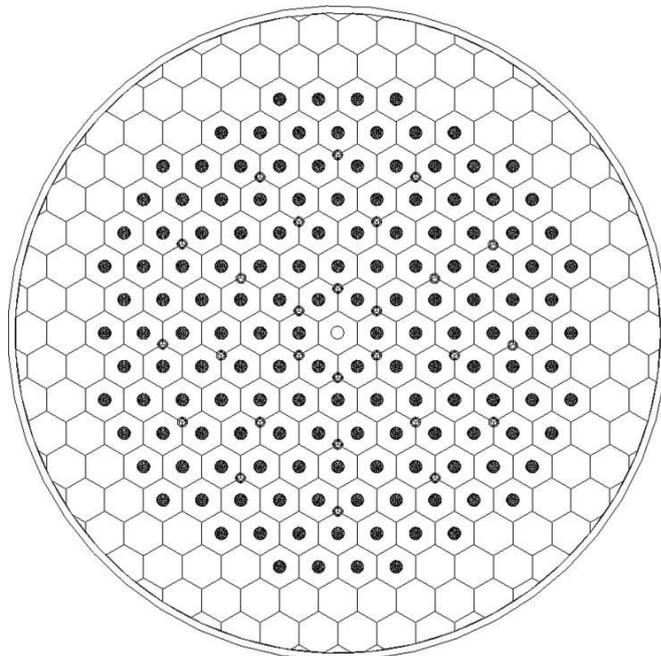
**Табл. 1:** Оцениваемые технические характеристики реактора ИР-40 с топливом из диоксида природного урана.

Мощность	40 МВт (тепл.)
Мощность, поглощаемая в замедлителе	3 МВт (тепл.)
Мощность, поглощаемая в охладителе	37 МВт (тепл.)
Охладитель/замедлитель	Тяжелая вода
Отражатель	Тяжелая вода
Чистота тяжелой воды	99,75%
Температура охладителя и замедлителя	70 °С
Шаг решетки	26,5 см
Конфигурация решетки	Треугольная
Количество топливных сборок	150
Давление в охладителе и замедлителе	0,28 МПа
Тип топлива	Диоксид урана, 0,72% <sup>235</sup> U
Радиус топлива	0,5740 см
Радиус оболочки	0,6815 см
Материал оболочки	Циркаллой
Плотность таблетки	10,4 г/см <sup>3</sup>
Геометрия сборки	Круглая
Количество стержней в сборке	19
С топливом	18
Без топлива	1
Длина стержня	350 см
Активная длина топлива	340 см
Внешний диаметр трубки под давлением	8,8 см
Внутренний диаметр трубки под давлением	8,0 см

Получившаяся активная зона показана на рис. 3. Табл. 1 указывает на активную зону высотой 3,4 м с диаметром 3,2 м, что дает отношение высоты к радиусу, равное 2,1:1<sup>39</sup>. Это соответствует общей массе топлива в 10 т диоксида урана и уровню мощности в 4,6 МВт на тонну урана. Это согласуется с планируемой годовой производительностью топлива с диоксидом природного урана за заводе изготовления топлива в соответствии с информацией, предоставленной Ираном МАГАТЭ<sup>40,41</sup>.

Оцениваемая конфигурация реактора моделировалась на программе SCALE (Стандартный компьютерный

анализ для оценки при лицензировании; версия 6.1, Ок-Риджская национальная лаборатория). Нейтронно-физические расчеты выполнялись при помощи контрольного модуля TRITON программы SCALE 6.1. Для расчета выгорания модуль TRITON соединяется с программами оценки критической безопасности по методу Монте-Карло KENO-VI и ORIGEN<sup>42</sup>.



**Рис. 3:** Иллюстрация предполагаемой конфигурации активной зоны ИР-40. Внутренние шестиугольники содержат топливные сборки внутри индивидуальных труб под давлением, а внешние шестиугольники содержат оксид дейтерия. Положения управляющих стержней показаны как небольшие кружки, расположенные между труб под давлением внутри активной зоны.

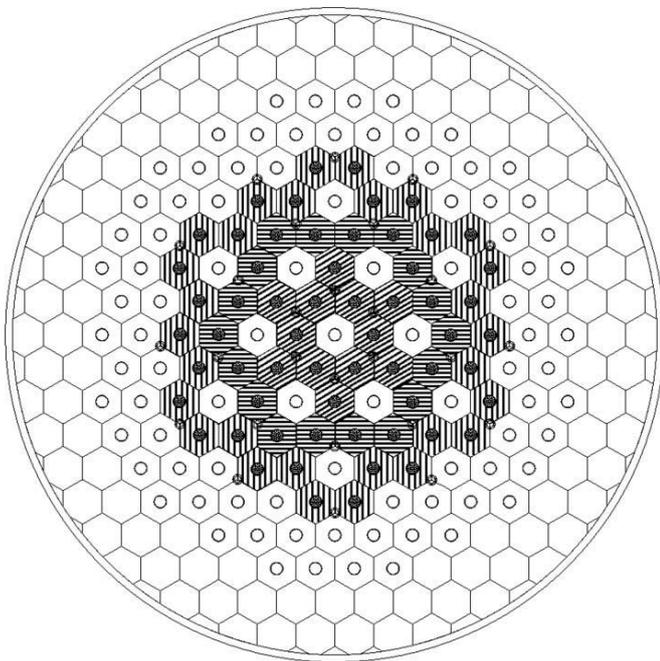
Моделирование привело к эффективному коэффициенту размножения нейтронов  $k_{eff}$ , равному 1,06 для свежей активной зоны без вставленных управляющих стержней и накопления реакторного яда, что разумно для стандартной эксплуатации реактора<sup>43</sup>. Оценка годового производства плутония оружейного качества при 100%-ом коэффициенте использования (т.е., процентной доле времени эксплуатации реактора составляет 10 кг<sup>44</sup>). Эта величина согласуется с ранее опубликованными оценками<sup>45</sup>. Количество и процентное содержание плутония-239 после 360 дней облучения показано в табл. 4. После облучения в течение 285 дней содержание плутония-239 в топливе уменьшается до 93 процентов. Максимальный поток тепловых нейтронов, измеренный в пустой центральной трубе, составляет  $1,4 \cdot 10^{14}$  нейтронов/см<sup>2</sup>с, что согласуется с заявленным потоком на мишени для ИР-40. Свободные позиции за пределами активной зоны получают поток тепловых нейтронов в  $1,9 \cdot 10^{13}$  нейтронов/см<sup>2</sup>с. Общая согласованность этих характеристик подтверждает, что наша модель должна быть достаточно точной для целей нашего обсуждения.

Главным заявленным назначением ИР-40 является производство радиоизотопов для применения в промышленности и медицине. Наиболее важным изотопом в этом контексте является молибден-99, родительский нуклид технеция-99m, используемого в диагностической ядерной медицине<sup>46</sup>. В исследовании 2003 года указывалось, что спрос на молибден-99 в Иране составляет 20 Ки в неделю<sup>47,48</sup>. Для производства молибдена-99 небольшая изготовленная из урана мишень подвергается воздействию нейтронного потока в реакторе. Молибден-99 образуется как продукт деления и позднее извлекается из мишени в "горячей" лаборатории<sup>49</sup>. В активной зоне ИР-40 есть одна свободная позиция в центре активной зоны и многочисленные свободные позиции вне активной зоны, которые могут использоваться для облучения мишеней. Центральная позиция получает намного больший поток тепловых нейтронов и лучше всего приспособлена для про-

изводства радиоизотопов. Свободные позиции вне активной зоны получают поток, меньший, чем в реакторе ТРР, который недостаточно велик для производства радиоизотопов<sup>50</sup>. Для оценки производства молибдена-99 небольшая урановая мишень с весом всего в 100 граммов, изготовленная из спрессованного диоксида урана, помещалась в середины позиции в центральной трубке, и подвергалась действию самого большого потока<sup>51</sup>. Мишень после семи дней облучения достигла активности в 75 Ки, что более, чем достаточно для удовлетворения оцениваемой еженедельной потребности Ирана в молибдене-99. Первоначальная конструкция ИР-40 поэтому кажется подходящей для достаточного для удовлетворения национальных нужд производства молибдена-99 с использованием только одной позиции. Если использовать аналогичную мишень с обогащением в 19,75 процента, то активность в одной мишени достигнет 2090 Ки<sup>52</sup>.

#### Возможная конвертированная активная зона

Для того, чтобы конверсия ИР-40 была реалистичной и осуществимой, в первоначальной конструкции следует изменить настолько мало физических особенностей, насколько это возможно. Такие важные параметры, как форма и размещение топливных сборок, и размер корпуса реактора предполагаются фиксированными. Выходная мощность в 40 МВт (тепл.) также не меняется для того, чтобы сохранить достаточно высокий поток нейтронов и избежать дорогостоящего усиления системы охлаждения<sup>53</sup>. Кроме того, мы позволяем, чтобы свойства топливных сборок РБМК определяли максимальное выгорание и выделение тепла в конвертированных топливных сборках. Мы ограничиваем выгорание величиной в 25 ГВт-день на тонну урана. Это является средним выгоранием для отработавшего топлива РБМК, которое меняется в пределах от 20 до 30 ГВт-день на тонну урана. Выделение тепла ограничивается средним линейным тепловыделением в топливных стержнях в 150 - 200 Вт/см<sup>54</sup>.



**Рис. 4:** Иллюстрация конверсии активной зоны ИР-40 в конфигурации, использующей топливо с НОУ, обогащенным до 2,50 - 3,00 процента. Шестигранники с вертикальной штриховкой содержат топливные сборки, обогащенные до 3,00 процента, с горизонтальной штриховкой - до 2,75 процента, и с наклонной штриховкой - до 2,50 процента. Шестиугольники с кружками содержат пустые трубы под давлением, а пустые шестиугольники - тяжелую воду. Положения управляющих стержней показаны как небольшие кружки, расположенные между труб под давлением внутри активной зоны.

Предполагается, что реактор конвертируется с топлива на природном уране на топливо с НОУ. Ранее кон-

версия тяжеловодного реактора с природным ураном на топливо с НОУ была проведена на национальном исследовательском универсальном реакторе (NRU) в Канаде<sup>55</sup>. Мы не предлагаем заменить тяжелую воду в охладителе и замедлителе на обычную воду. Иран уже преуспел в завершении и эксплуатации завода по производству тяжелой воды (HWPP), расположенного рядом с комплексом реактора<sup>56</sup>. Основной задачей завода является производство охладителя и замедлителя для реактора ИР-40, но он также выпускает дейтерированные растворы для применения в химии, в частности, для спектроскопии ядерного магнитного резонанса<sup>57</sup>. Маловероятно, чтобы Иран согласился закрыть свой дорогостоящий и престижный завод HWPP, или согласился ограничить производство тяжелой воды или экспортировать тяжелую воду вместо того, чтобы использовать ее по ее первоначальному назначению.

Повышенная реактивность, предоставляемая НОУ, позволяет сконструировать более компактную активную зону. Мы предлагаем активную зону из 60 топливных сборок по сравнению с первоначальными 150 сборками. Каждая сборка состоит из 18 топливных стержней с активной областью топлива в 240 см и плотностью топлива 10,1 г/см<sup>3</sup>. Это приводит к активной зоне с 2,7 тонны диоксида урана, уровнем мощности 17,6 МВт (тепл.) на тонну урана, линейным тепловыделением в 154 Вт/см и отношением высоты к радиусу 2,1:1. Чистота тяжелой воды была уменьшена до 99,00 процента, чтобы учесть деградацию во время эксплуатации. При уровне мощности 17,6 МВт (тепл.) на тонну урана топливо может облучаться в течение 1463 дней, или четырех лет при 100%-ом коэффициенте использования, прежде чем степень выгорания достигнет 25 ГВт-день на тонну урана. Предлагаемая конвертированная активная зона показана на рис. 4. В конвертированной активной зоне имеется 13 пустых труб под давлением, которые могут быть использованы для производства радиоизотопов, научных экспериментов, или размещения дополнительных управляющих стержней<sup>58</sup>. Однако, тепловые гидравлические расчеты для подтверждения способности системы охлаждения справиться с возросшим тепловыделением на топливный канал не проводились.

Различные конфигурации активной зоны с уровнями обогащения топлива в интервале от 2,5 до 19,0 процентов моделировались в программе SCALE для проверки того, при каком уровне обогащения производится наименьшее количество плутония, или плутония с наихудшим качеством, т.е. смеси изотопов с наименьшим количеством плутония-239. Результаты для трех уровней обогащения показаны в табл. 2. Уровень обогащения в 19 процентов приводит к наименьшему объему производства плутония, менее 1,23 кг после одного года, но изотопный состав плутония все еще соответствует оружейному качеству. После четырех лет облучения при 100%-ом коэффициенте использования топливо все еще будет почти оружейного качества. Топливо, обогащенное менее, чем до 5 процентов, имеет меньшее содержание плутония-239, но в целом производит больше плутония, чем при более высоких уровнях обогащения. Уровни обогащения более 5 процентов приводят к высокой избыточной реактивности, что делает такие уровни проблематичными для создания реактора<sup>59</sup>. Более высокие уровни обогащения также приводят к относительно низкому выгоранию. Поэтому далее будут рассматриваться только уровни обогащения, меньшие, или равные 5 процентам.

Поскольку применение обогащенного урана приводит к большей избыточной реактивности, обогащение было уменьшено до уровня ниже 5 процентов и для снижения реактивности были рассмотрены различные сгорающие яды<sup>60</sup>. Была исследована одна из возможных конфигураций реактора с применением топлива, обогащенного до 2,5 - 3,0 процента с добавкой 1,5 процента эрбия, равномерно распределенного по каждому топливному стержню<sup>61</sup>. В топливе РБМК использовался тот же уровень обогащения и тот же самый сгорающий яд, хотя концентрация эрбия была несколько меньшей<sup>62</sup>. Добавление 1,5 процента эрбия уменьшает эффективный коэффициент размножения нейтронов  $k_{eff}$  примерно с 1,60 до 1,07<sup>63</sup>. Во время работы  $k_{eff}$  постепенно уменьшается до единицы после примерно 810 - 870 дней работы при 100%-ом коэффициенте использования. Это соответст-

вует выгоранию топлива примерно в половину от нашего предела в 25 ГВт-день на тонну урана (от 14,2 до 15,3 ГВт-день на тонну урана). Это показывает, что в аспекте управления реактивностью добавление 1,5 процента эрбия к топливу с НОУ, обогащенным до 2,5 - 3,0 процента, обеспечивает комфортное развитие реактивности. Однако, отсутствие международного опыта работы с этим конкретным выбором топлива и концентрации эрбия означает, что придется принимать в расчет определенный период разработки и испытаний, что, вероятно, несколько задержит запуск конвертированного реактора. Доступность к российскому опыту работы с топливом РБМК может помочь и способствовать этой разработке.

Другими вариантам для понижения  $k_{eff}$  могут быть дальнейшее понижение качества тяжелой воды, или замена тяжелой воды в охладителе на обычную воду, для того, чтобы изменить энергетический спектр нейтронов и увеличить поглощение нейтронов. Однако, замена тяжелой воды в охладителе на обычную воду приведет к более высокому так называемому коэффициенту пустотности. Это представляет собой вопрос безопасности, внутренне присущий реакторам с отдельными замедлителем и охладителем, включая реакторы КАНДУ и РБМК, так же как и первоначальный и модифицированный реакторы ИР-40<sup>64</sup>. В случае мгновенной потери всего охладителя реактивность свежей активной зоны увеличится на 18 мк с  $k_{eff} = 1,108$  до  $k_{eff} = 1,126$ . В первоначальной и в модифицированной активной зоне ИР-40 есть 27 доступных позиций для управляющих стержней<sup>65,66</sup>. Если мы предположим, что управляющие стержни ИР-40 имеют те же самые размеры, что и управляющие стержни РБМК, то опускание только 15 внешних управляющих стержней обеспечит уменьшение реактивности на 220 мк и оно будет достаточно для сохранения контроля над реактором при аварии с потерей охладителя<sup>67</sup>.

Максимальный поток тепловых нейтронов в моди-

фицированном реакторе примерно равен  $1,2 \cdot 10^{14}$  нейтронов/см<sup>2</sup> в центральной свободной позиции и втором круге свободных позиций в активной зоне. В третьем круге свободных позиций поток равен  $9,0 \cdot 10^{13}$  нейтронов/см<sup>2</sup>. Поток в различных положениях активных зон приведен в табл. 3. Максимальный поток тепловых нейтронов примерно одинаков в обеих активных зонах, но в модифицированной активной зоне имеется 12 дополнительных свободных позиций для потоком, достаточно большим для производства радиоизотопов. Это означает, что модифицированная активная зона в принципе может произвести большее количество радиоизотопов, чем активная зона с природным ураном, позволяя в то же время разместить другие эксперименты.

Производство плутония в конвертированном реакторе показано в табл. 4. Масса произведенного плутония сокращается по сравнению с оригинальной конфигурацией примерно на 2/3, составляя 3,8 кг после одного года облучения при коэффициенте использования в 100 процентов. Изотопный состав плутония становится хуже оружейного качества после 240 дней облучения, и уровень плутония-239 снижается до 76,7 процента после 780 дней облучения, что близко к максимальному времени работы до перезагрузки топлива. Хотя изотопный состав плутония после 240 дней облучения уже не классифицируется как оружейное качество, он все еще пригоден для применения в оружии<sup>68</sup>, если Иран окончательно решит извлекать плутоний из отработавшего топлива для создания ядерного оружия на базе плутония. Такая конверсия будет означать, что у Ирана будет меньше расщепляющегося материала для начала работ, и будет более вероятно, что оружие взорвется с мощностью, меньшей оптимальной, из-за повышенного фона нейтронов спонтанного деления, связанным с ухудшением качества плутония.

**Табл. 2:** Масса и процентная доля плутония-239 в облученном топливе для различных уровней обогащения при коэффициенте использования в 100 процентов. Значения приводятся для одного года и четырех лет работы.

Обогащение	5%		10%		19%	
	365	1463	365	1463	365	1463
Время работы (дни)	365	1463	365	1463	365	1463
Относительное выгорание	14,7%	54,6%	7,8%	30,3%	4,2%	16,7%
Общее производство плутония (кг)	2,60	8,46	1,77	6,21	1,23	4,58
Среднее содержание плутония-239	93,4%	73,0%	96,5%	85,5%	98,1%	92,2%
$k_{eff}$	1,41	1,23	1,54	1,46	1,62	1,57

**Табл. 3:** Поток тепловых нейтронов в активной зоне с природным ураном и НОУ. Значения приводятся в нейтронах/см<sup>2</sup>с.

	Центральная позиция	Второй круг	Третий круг	Вне активной зоны
Активная зона с природным ураном	$1,4 \cdot 10^{14}$	Не применимо	Не применимо	$1,9 \cdot 10^{13}$
Активная зона с НОУ	$1,2 \cdot 10^{14}$	$1,2 \cdot 10^{14}$	$9,0 \cdot 10^{13}$	$5,0 \cdot 10^{13}$

**Табл. 4:** Производство плутония в первоначальной и в модифицированной активной зоне после 360 и 780 дней работы при коэффициенте использования в 100 процентов.

	Активная зона с природным ураном		Активная зона с НОУ	
	360	780	360	780
Время работы (дни)	360	780	360	780
Относительное выгорание	24,1%	51,5%	25,6%	51,5%
Общее производство плутония (г)	10 019	7 290	3 873	7 290
Среднее содержание плутония-239	91,4%	76,7%	89,6%	76,7%

### Естественный предел обогатительного производства в Иране

В зависимости от коэффициента использования реактора, через 810 - 870 дней потребуется заменить 2,7 тонны НОУ, обогащенного примерно на 3,0 процента (в действительности, около 50 процентов с обогащением 3,0 процента, 30 процентов с обогащением 2,75 процента, и 20 процентов с обогащением 2,5 процента). Это потребует годовой производительности обогащения в 1700 - 3400 единиц работы разделения (ЕРР), в предположении коэффициента использования от 50 до 100 процентов<sup>69,70</sup>. Первоначальная активная зона потребит приблизительно половину НОУ, который Иран уже изготовил и

хранит к марту 2012 года. Большую часть НОУ потребуется слегка разбавить до предполагаемых уровней обогащения, поскольку текущие уровни составляют до 5 процентов урана-235<sup>71</sup>.

Общая годовая производительность обогащения в Иране в марте 2012 года составляла примерно 6000 - 9000 ЕРР<sup>72</sup>. Мы предлагаем предел на общую годовую производительность обогащения в Иране, точно соответствующую потребностям модифицированного ИР-40. Такой предел может быть приемлемым для мировых держав в окончательной договоренности по определению будущей ядерной программы Ирана. Однако, этот уровень потребует значительного сокращения текущих обогатительных мощностей Ирана. Другой вариант, который

может показаться более привлекательным для руководства Ирана, и, соответственно, менее приемлемым для мировых держав, будет ограничение обогащения до потребностей все исследовательских реакторов Ирана, возможно, включая будущие исследовательские реакторы.

Раздражение от последнего варианта иллюстрируется возрастающим опасением, выразившимся несколькими странами в отношении обогащения НОУ до примерно 20 процентов для топлива TRP. Иран увеличил свое производство, хотя одним из аргументов для строительства ИР-40 была необходимость выключить TRP, возраст которого превышает 40 лет<sup>73</sup>. Любое избыточное топливо для TRP должно быть разбавлено до более низких уровней обогащения. Ограничение не только количества, но и достигнутых уровней обогащения, может быть полезным для смягчения опасений того, что Иран реализует возможность быстрого выхода из ограничений на установках, обычно производящегося на уровне, существенно превышающих 5 процентов.

### Политические последствия

Мы описали возможную конструкцию тяжеловодного исследовательского реактора ИР-40, в настоящее время строящегося в Иране вблизи Арака. Учитывая доступную информацию, мы утверждаем, что ИР-40 будет тяжеловодным реактором под давлением с топливными сборками на базе конструкции РБМК, размещенными в индивидуальных трубах под давлением. В своей текущей конфигурации ИР-40 может предоставить достаточно расщепляющегося материала для ежегодного изготовления двух ядерных боеприпасов на основе плутония.

Кроме того, мы установили при помощи нейтронно-физических вычислений техническую возможность конвертирования этого реактора для использования топлива из НОУ при сохранении большинства из его первоначальных проектных особенностей. Все еще остается необходимость подтвердить альтернативную конструкцию тепловыми гидравлическими расчетами. Очевидно, имеется много способов конструирования тяжеловодного реактора с использованием топлив с НОУ в пределах заданных ограничений. Мы выбрали один конкретный проект ради аргументации, не исключая возможности выбора совершенно иных проектных особенностей для достижения тех же самых общих преимуществ.

Модифицированный реактор, как указывается в исследовании, будет более гибким для производства радиоизотопов, чем первоначальный реактор, удовлетворяя таким образом важную и законную потребность Ирана. Особую важность для международного сообщества имеет то, что при регулярных операциях по гарантиям модифицированный реактор будет меньше подходить для производства плутония. Модифицированная активная зона приведет к уменьшению производства плутония на 2/3, а изотопный состав плутония будет менее пригодным для ядерного оружия. Свободные позиции внутри активной зоны и за ее пределами могут быть использованы для облучения природного или обедненного урана (в бланкетах или мишенях), но при наличии соответствующих гарантий МАГАТЭ любые такие отклонения не останутся незамеченными при регулярных инспекциях<sup>74</sup>. Альтернативно, может все еще быть возможно производить плутоний оружейного качества, облучая топливо в течение очевидно короткого времени, но, как для любого другого реактора под гарантиями, такое эксплуатационное отклонение будет своевременно обнаружено МАГАТЭ в согласии с текущей практикой гарантий, предоставив мировому сообществу некоторое время для организации надлежащего политического отклика до тех пор, как сможет быть реализован любой вариант ядерного оружия<sup>75</sup>.

Предлагаемые уровни обогащения топлива, также как и выбор эрбия как сгорающего яда, подводит модифицированное топливо ИР-40 ближе к коммерческому топливу РБМК. Это, в свою очередь, открывает возможность сотрудничества (или его восстановления) между иранскими и российскими экспертами в разработке и испытаниях топлива, добавляя таким образом другой уровень прозрачности.

Другим крупным техническим преимуществом предлагаемой модификации ИР-40 является увеличенное

число свободных позиций в активной зоне по сравнению с первоначальной конфигурацией. Эти дополнительные позиции предоставляют повышенные возможности для производства радиоизотопов и фундаментальных физических экспериментов.

С точки зрения мировых держав, выигрыш для нераспространения является двойным. Конверсия сделает ИР-40 менее пригодным к распространению, в аспекте уменьшенного производства плутония и соединения его потребностей в топливе с ограничением много обсуждаемых усилий по обогащению. Такое действие представляет потенциально существенный компонент для смягчения международных опасений того, что программа обогащения Ирана будет в дальнейшем наращаться, представляя таким образом Ирану вариант для быстрого производства урана оружейного качества<sup>76,77</sup>.

В идеале конверсия реактора в соответствии с этой статьей должна будет представляться Ираном как крупное национальное достижение, предоставляющее ему более современный исследовательский реактор, и в то же время дающее ему объяснение с "сохранением лица" для уменьшения огромных ресурсов, уже направленных в программу обогащения, которая через 25 после ее начала все еще кажется далекой от коммерчески жизнеспособного технологического уровня. Маломасштабная инфраструктура обогащения, соответствующая по размерам среднему исследовательскому реактору, а не крупномасштабной программе атомной энергии, все еще будет представлять реализацию "неотъемлемого права" Ирана разрабатывать технологию топливного цикла без необходимости исключительно дорогостоящего увеличения обогатительных мощностей. Обратной стороной медали с точки зрения Тегерана является то, что Иран для всех практических целей отказывается от своих амбиций топливной самодостаточности в секторе атомной энергии. Но если такое решение послужит катализатором для ослабления напряженности между Ираном и мировыми державами, то опасения Ирана в отношении дискриминации на международном рынке уранового топлива должны быть уменьшены, и возможно и предпочтительно дополнены предоставлением уверенной в поставке топлива от России или других крупных поставщиков топлива.

В целом, мы показали, что предложенная бывшим заместителем генерального директора Хейноном конверсия реактора является осуществимой. Если ее связать с усилиями Ирана по обогащению, конверсия сможет оказаться полезной для уменьшения опасений по потенциальному производству плутония оружейного качества и высокообогащенного урана в Иране, одновременно оставая Иран с более значимым топливным циклом и инфраструктурой исследовательского реактора.

### ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Сообщается, что реактор ИР-40 будет закончен в 2014 году. International Atomic Energy Agency (IAEA), "Implementation of the NPT Safeguards Agreement and relevant provisions of Security Council resolutions in the Islamic Republic of Iran," GOV/2012/9 (24 February 2012), <<http://www.iaea.org/Publications/Documents/Board/2012/gov2012-9.pdf>>.
2. Плутоний оружейного качества определяется здесь как плутоний, содержащий более 93 весовых процентов плутония-239.
3. D. Albright, and C. Hinderstein, "Iran, Player or Rogue?" *Bulletin of the Atomic Scientists*, 59(2003): 5, 52–58.
4. Исследование, проведенное в Ок-Риджской национальной лаборатории в 1977 году продемонстрировало, что страна с "минимальной индустриальной базой" может построить небольшое перерабатывающее предприятие за четыре-шесть месяцев. Это предприятие сможет переработать одну топливную сборку из реактора с водой под давлением за день. В предположении, что нет большой разницы во времени переработки для других типов сборок, для ИР-40 это означает, что переработка всей активной зоны ИР-40 займет около 150 дней. V. Gilinsky, M. Miller and H. Hubbard, "A Fresh Examination of the Proliferation Dangers of Light Water Reactors," *The Nonproliferation Policy Education Center* (October 2002), <<http://www.npolicy.org/files/20041022-GilinskyEtAl-LWR.pdf>>.

5. IAEA, "Implementation of the NPT Safeguards Agreement and Relevant Provisions of Security Council Resolutions in the Islamic Republic of Iran," GOV/2010/46 (6 September 2010) <<http://www.iaea.org/Publications/Documents/Board/2010/gov2010-46.pdf>>.
6. Section C.3, paragraph 44 of IAEA, "Implementation of the NPT Safeguards Agreement in the Islamic Republic of Iran," GOV/2003/6326, (26 August 2003) <<http://www.iaea.org/Publications/Documents/Board/2003/gov2003-63.pdf>>.
7. Иранская организация по атомной энергии (АЕОИ) раздала проспект на выставке в рамках Генеральной конференции МАГАТЭ 2011 года под заглавием "Ядерная индустрия Ирана: обзор деятельности и достижений Ирана в ядерной технологии".
8. O. Heinonen, "Can the Nuclear Talks With Iran Be Saved?," *Foreign Policy*, (27 January 2011), <[http://www.foreignpolicy.com/articles/2011/01/27/can\\_the\\_nuclear\\_talks\\_with\\_iran\\_be\\_saved?hidecomments=yes](http://www.foreignpolicy.com/articles/2011/01/27/can_the_nuclear_talks_with_iran_be_saved?hidecomments=yes)>.
9. Резолюции Совета Безопасности Организации Объединенных Наций 1696 (2006), 1737 (2006), 1747 (2007), 1803 (2008), and 1929 (2010), <<http://www.un.org/Docs/sc/>>.
10. За проектирование и строительство ИР-40 отвечает расположенная в Араке "Современная индустриально-промышленная компания" (МИТЕС), на которую вместе с другими многочисленными иранскими компаниями были наложены санкции по упомянутым выше резолюциям Совета Безопасности Организации Объединенных Наций.
11. IAEA, GOV/2003/75.
12. Иран сообщил МАГАТЭ, что выходная мощность реактора необходима для достижения нейтронного потока, достаточного для выполнения требований по производству изотопов в Араке, IAEA, GOV/2003/75.
13. В отчете по гарантиям МАГАТЭ GOV/2003/40 упоминается использование циркония в реакторе ИР-40, но здесь предполагается что оболочка будет изготовлена из циркония.
14. IAEA, "Implementation of the NPT Safeguards Agreement and Relevant Provisions of Security Council Resolutions in the Islamic Republic of Iran," GOV/2012/23, (25 May 2012) <<http://www.iaea.org/Publications/Documents/Board/2012/gov2012-23.pdf>>.
15. IAEA, "Implementation of the NPT Safeguards Agreement and Relevant Provisions of Security Council Resolutions in the Islamic Republic of Iran," GOV/2011/54, (2 September 2011) <<http://www.iaea.org/Publications/Documents/Board/2011/gov2011-54.pdf>>.
16. См. ссылку [1].
17. См. ссылку [5].
18. IAEA, "Implementation of the NPT Safeguards Agreement and Relevant Provisions of Security Council Resolutions in the Islamic Republic of Iran," GOV/2011/29, (24 May 2011) <<http://www.iaea.org/Publications/Documents/Board/2011/gov2011-29.pdf>>.
19. См. ссылку [15].
20. J. R. Lamarsh, and A. J. Baratta, *Introduction to Nuclear Engineering* (Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001) 153,163.
21. T. B. Cochran, "What Is the Size of Khushab II?," *Natural Resources Defense Council* (2006), <[http://docs.nrdc.org/nuclear/files/nuc\\_06090801a.pdf](http://docs.nrdc.org/nuclear/files/nuc_06090801a.pdf)>.
22. D. Albright, P. Brannan, and R. Kelley, "Mysteries Deepen Over Status of Arak Reactor Project," ISIS Report, Institute for Science and International Security (August 2009), <<http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/Arak-FuelElement.pdf>>.
23. D. Albright, P. Brannan, and R. Kelley, "Update on the Arak Reactor in Iran," ISIS Report, Institute for Science and International Security (August 2009), <[http://isisonline.org/uploads/isis-reports/documents/Arak\\_Update\\_25\\_August\\_2009.pdf](http://isisonline.org/uploads/isis-reports/documents/Arak_Update_25_August_2009.pdf)>.
24. "Fuel Design Data," *Nuclear Engineering International* (September 2008), 32.
25. Iranian Students' News Agency (ISNA), "Iran's FMP to be Launched Late March," (March 2009), <<http://old.isna.ir/ISNA/NewsView.aspx?ID=News-1307413&Lang=E>>.
26. См. ссылку [7].
27. F. Faghihi, E. Ramezania, F. Yousefpour, and S.M. Mirvakilia, "Level-1 Probability Safety Assessment of the Iranian Heavy Water Reactor Using SAPHIRE Software," *Reliability Engineering & System Safety*, 93(2008): 10, 1377–1409.
28. A. H. Fadaei, M. M. Fadaei, S. Kia, and S. Setayesh, "Core Design Improvement by Optimizing the Control and Protection System Elements Distribution," *Annals of Nuclear Energy*, 37(2010): 12, 1640–1648.
29. S. Tashakor, F. Javidkia and M. Hashemi-Tilhehnoee, "Neutronic Analysis of Generic Heavy Water Research Reactor Core Parameters to Use Standard Hydride Fuel," *World Journal of Nuclear Science and Technology*, 1(2011): 2, 46–49.
30. M. Moguiy, A. H. Fadaei, and A. S. Shirani, "Analysis of Different Variance Reduction Techniques in Research Reactor Beam Tube Calculations," *Annals of Nuclear Energy*, 41(2012): 104–109.
31. См. ссылку [7].
32. Scanpix International–Agence France-Presse (AFP Photo), Credit, Atta Kenare.
33. См. ссылку [5].
34. См. ссылку [18].
35. См. ссылку [25].
36. См. ссылку [23].
37. На топливных таблетках, показанных на иранских фототрафиях, не видно отверстий. Рабочая температура, указанная для ИР-40, ниже, чем у реакторов РБМК, откуда следует, что наличие отверстий в таблетках необязательно.
38. Требуемый уровень чистоты тяжелой воды для реакторов КАНДУ составляет 99,75 процента. Это означает, что оставшиеся 0,25 процента приходится на обычную воду. См. ссылку [20], 217.
39. Это отношение согласуется с геометрией реакторов с цилиндрической активной зоной, таких, как индийский реактор Дхрува и канадские реакторы КАНДУ. Отношение соответствует цилиндрической конфигурации, наиболее близко приближающейся к сфере, позволяющей достичь максимального объема на единицу площади.
40. IAEA, "Implementation of the NPT Safeguards Agreement in the Islamic Republic of Iran," GOV/2004/83, (15 November 2004), <<http://www.iaea.org/Publications/Documents/Board/2004/gov2004-83.pdf>>.
41. Предположение о том, что Иран использует одну полную активную зону в год, соответствует степени выгорания около 1,5 ГВт-день на тонну урана, что разумно для этого типа реакторов.
42. M. D. DeHart, "High-Fidelity Depletion Capabilities of The Scale Code System Using Triton," *American Nuclear Society, Transactions*, 97(2007): 598–600.
43.  $k_{eff}$  является мерой реактивности, определяемой как количество нейтронов в одном поколении деления, деленное на количество нейтронов в предыдущем поколении.  $k_{eff}$ , равное единице, соответствует критичности стационарной популяции нейтронов. Чтобы реактор смог начать работать,  $k_{eff}$  сначала должен быть больше единицы. После этого его можно будет уменьшить до единицы посредством механизмов управления критичностью, таких, как управляющие стержни, как только будет достигнут желательный поток нейтронов и уровень мощности.
44. Коэффициент использования, равный 100 процентам, применялся в этой статье для иллюстрации верхних пределов производства плутония. В действительности более вероятен коэффициент использования в 70 - 80 процентов.
45. См. ссылку [3].
46. S. Banerjee, M. R. Pillai, and N. Ramamoorthy, "Evolution of Tc-99m in Diagnostic Radiopharmaceuticals," *Seminars in Nuclear Medicine*, 31(2001): 4, 260–277.
47.  $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ , где 1 Бк соответствует одному радиоактивному распаду в секунду. Единица "Кюри" обычно используется в ядерной медицине, хотя единица "Беккерель", с другой стороны, является более общепринятой единицей для радиоактивности.
48. R. Sayareh, M. Ghannadi Maragheh, and M. Shamsaie, "Theoretical Calculations for the Production of  $^{99}\text{Mo}$  Using Natural Uranium in Iran," *Annals of Nuclear Energy*, 30(2003): 8, 883–895.
49. Иран, вероятно, будет стремиться производить на ИР-40 изотопы йода и ксенона, в дополнение к молибдену. Установка с горячими камерами в Центре ядерных исследований в Тегеране, так называемая "установка MIX", была намечена для производства молибдена, йода и ксенона, но так и не была введена в строй, поскольку на

реакторе TRP не удалось достичь уровня потока, необходимого для производства изотопов на мишенях из природного урана. См. ссылку [40].

50. Максимальный поток тепловых нейтронов на реакторе TRP по расчетам составляет  $5,7 \cdot 10^{13}$  нейтронов/см<sup>2</sup>с, см. ссылку [48].

51. Масса и размер мишени базируются на размерах, приведенных в ссылке [48]. Высота урановой мишени равна 19 см, радиус - 0,6 см, и плотность - 4,67 г/см<sup>3</sup>. Она покрыта алюминиевой оболочкой толщиной 0,2 см.

52. Другие способы увеличения выхода молибдена-99 могут использовать больший объем мишени, увеличение плотности мишени, большее количество мишеней, и (или) увеличение числа местоположения мишени.

53. Если уменьшить выходную мощность с 40 МВт (тепл.) до, например, 20 МВт (тепл.), то можно будет сконструировать еще меньшую активную зону. Но это приведет к уменьшению потока нейтронов и не будет способствовать плану Ирана использовать реактор для производства радиоизотопов.

54. Средняя линейная плотность генерации тепла равна полной мощности реактора, деленная на общую длину всех топливных стержней, см. ссылку [24].

55. Реактор НРУ сначала был переведен с топлива с природным ураном на топливо с высокообогащенным ураном, прежде чем он был конвертирован на НОУ. "NRU Heritage—AECL's NRU Reactor," (2011), <<http://www.nrucanada.ca/en/home/insidenru/nruheritage.aspx>>.

56. См. ссылку [5].

57. Брошюра АЕОИ, представленная на Генеральную конференцию МАГАТЭ в 2011 году под названием "Дейтерированные растворы для ЯМР - завод тяжелой воды в Араке." (2011).

58. Компоновка конвертированной активной зоны ИР-40 частично навеяна конструкцией реактора на кипящей воде "Халден". Это тяжеловодный реактор мощностью 20 МВт (тепл.), использующий топливо, обогащенное до 6 процентов. В реакторе имеется несколько не занятых позиций внутри активной зоны для экспериментов по облучению. Он также обладает возможностью моделировать эксплуатационные условия тяжеловодных и легководных реакторов. <<http://www.ife.no/en/ife/halden/hrpfiles/halden-boiling-water-reactor>>.

59. Для некоторых исследовательских реакторов величины допустимой избыточной реактивности в 15 процентов, или 150 мк, в то время как у коммерческого реактора AP1000 такого предела нет. Максимальная избыточная реактивность для реактора AP1000 заявлена как 328 мк. A.L. Hanson and D.J. Diamond, "Calculation of Design Parameters for an Equilibrium LEU Core in the NBSR," (September 2011), Brookhaven National Lab. "AP1000 Design Control Document," U.S. National Regulatory Commission, <[http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/designcert/ap1000/dcd/Tier%202/Chapter%204/4-1\\_r14.pdf](http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/designcert/ap1000/dcd/Tier%202/Chapter%204/4-1_r14.pdf)>.

60. "Сгорающий яд" представляет собой вещество, добавляемое в реактор для поглощения нейтронов. Термин "сгорающий" означает, что по мере того, как расходуется уран-235, расходуется и сгорающий яд, и реактивность поддерживается на стабильном уровне. См. ссылку [20], 395 - 396.

61. Природный эрбий используется в форме оксида Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Встречающийся в природе эрбий состоит из шести изотопов: 0,14 процента эрбия-162, 1,60 процента эрбия-164, 33,50 процента эрбия-166, 22,87 процента эрбия-167, 26,98 процента эрбия-168, и 14,91 процента эрбия-170. Наиболее полезным в качестве сгорающего яда является эрбий-167. Эрбий-167 может быть изолирован в процессе разделения. Используемый в этой статье изотопный состав таков: 0,07 процента эрбия-162, 1,00 процента эрбия-164, 30,0 процента эрбия-166, 33,00 процента эрбия-167, 26,8 процента эрбия-168, и 9,13 процента эрбия-170. M. L. Grossbeck, J.-P. A. Renier, and T. Bigelow, "Development of Improved Burnable Poisons for Commercial Nuclear Power Reactors, Final Report on NERI Project Number 99-0074," (September 2003), подготовленный университетом штата Теннесси для Ок-Риджской национальной лаборатории и Департамента энергетики США.

62. Топливо с содержанием эрбия до 0,6 весовых процента коммерчески используется в топливе РБМК. Для того, чтобы не уходить слишком далеко от этого значения, в качестве верхнего предела было выбрано 1,5 про-

цента эрбия, "Модернизация и продление срока службы", Rosatom, <<http://www.rosatom.ru/wps/wcm/connect/rosenergoatom/kunppen/safety/modernization/>>.

63. Значение  $k_{eff}$  было рассчитано после 30 дней эксплуатации реактора для учета накопления реакторного яда.

64. В случае аварии с потерей охладителя нейтроны все еще будут замедляться замедлителем. Но потеря охладителя будет означать меньшее поглощение нейтронов и увеличение реактивности. Повышенная реактивность и уменьшенное охлаждение могут, в наихудшем случае, привести к расплавлению активной зоны, если не будут приняты какие-либо контрмеры. Количественной мерой этого эффекта является так называемый "коэффициент паровой реактивности". Поскольку охладитель вносит некоторый вклад в замедление, потеря охладителя в действительности приведет к небольшому сдвигу к большей средней энергии нейтронов, т.е., к некоторому увеличению жесткости нейтронного спектра. Применение эрбия в качестве нейтронного яда использует преимущество этого сдвига, поскольку у эрбия-167 есть сильный резонанс поглощения на 0,47 эВ.

65. См. ссылку [27].

66. См. ссылку [28].

67. Укороченный вариант стандартного управляющего стержня РБМК полностью вставляется в активную зону реактора. Длина управляющего стержня принята равной 240 см. R. T. Perry and G. H. Meriwether, "A Wims-Nestle Reactor Physics Model for an RBMK Reactor," Los Alamos National Laboratory, LA-UR-96-1935, paper submitted to International Conference on the Physics Reactors, Mito, Japan, 16-20 September 1996. <<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/266875-7Nw46N/webviewable/266875.pdf>>.

68. J. C. Mark, "Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium," *Science & Global Security*, 4(1993): 111-128.

69. Единица работы разделения (ЕРР) является мерой работы и производительности обогащения, применимой ко всем обогащательным предприятиям и их составным частям, таким, как отдельные центрифуги (обычно задаваемой для годовой производительности). Для годового запаса обогащенного до 3 - 5 процентов топлива для стандартного легководного реактора атомной электростанции с выходной мощностью 1 ГВт (эл.) требуется приблизительно 100 000 ЕРР, в то время как производства 25 кг обогащенного до 90 процентов урана (оружейного качества) из природного урана требуется примерно 5 000 ЕРР.

70. Требования по обогащению для ИР-40 с топливом НОУ были оценены с использованием стандартного "онлайн" калькулятора, основанного на сохранении потоков массы. В обедненном уране концентрация урана-235 принималась равной 0,3 процента, а в сырье - 0,71 процента (т.е., природный уран). <<http://www.wise-uranium.org/nfcue.html>>.

71. Согласно отчету МАГАТЭ по гарантиям для урана, выпущенном до марта 2012 года, см. ссылку [1].

72. D. Albright, P. Brannan, and C. Walrond, "ISIS Analysis of IAEA Iran Safeguards Report: Production of 20% Enriched Uranium Triples; Iran Increases Number of Enriching Centrifuges at Natanz FEP by Nearly 50% and Signals an Intention to Greatly Expand the Number of Centrifuges at Both Natanz and Fordow; Advanced Centrifuge Program Appears Troubled," *ISIS*, (24 February 2012), <<http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/ISIS Analysis IAEA Report 24Feb2012.pdf>>.

73. D. Albright and C. Walrond, "Determining the Purpose of Iran's Growing Stock of 19.75 Percent Enriched Uranium: Production Should be Capped," *ISIS*, (21 September 2011), <<http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/Determining the purpose of Irans growing stock of 19.75 21Sept2011.pdf>>.

74. H. Gruemm, "Safeguards and Tamuz: Setting the Records Straight," *IAEA Bulletin*, 23(1981): 4.

75. ИР-40 и связанные с ним установки в настоящее время не подлежат регулярным гарантиям МАГАТЭ. Иран не позволяет применять регулярные гарантии к его установкам ранее, чем за 180 дней до того, как будет начата их эксплуатация, но он разрешал отдельные нерегулярные визиты МАГАТЭ в последние несколько лет на добровольной основе. Напротив, наиболее значительные действующие предприятия топливного цикла Ирана подлежат, в среднем, по крайней мере двум инспекциям

МАГАТЭ в месяц, предоставляя адекватно узкое окно обнаружения важных для нераспространения эксплуатационных отклонений.

76. /S/S, "Abbasi-Davani Interview on Iran's 20 Percent Enrichment," (31 August 2011), <<http://www.isisnucleariran.org/brief/detail/abbasi-davani-interview-onirans-20-percent-enrichment>>.

77. Подробное обсуждение различных путей распространения, связанных с возможностями обогащения урана Ираном, включено в работу D. Albright, P. Brannan, A. Stricker, C. Walrond, and H. Wood, "Preventing Iran From Getting Nuclear Weapons: Constraining Its Future Nuclear Options," The Institute for Science and International Security, (5 March 2012), <[http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/USIP Template 5March2012-1.pdf](http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/USIP_Template_5March2012-1.pdf)>.