

Обращение с высокоактивными отходами в Великобритании

В. Маршалл*

В последние годы внимание общественности сосредоточилось на проблеме ядерных отходов, особенно высокоактивных. Эти отходы, несомненно, поразили воображение общественности, как нечто необыкновенное, т.к. люди слышали, что они содержат элементы, радиоактивный распад которых будет продолжаться сотни тысяч или даже миллионы лет. Кроме того, противники ядерной энергии постоянно заявляют, что атомная промышленность оказалась не в состоянии решить, что же делать с этими отходами, и действительно выходит, что и двадцать лет спустя после строительства первой атомной электростанции ученые все еще спорят о том, хранить ли отходы или удалить их, удалять ли их в ту горную породу или в иную. Люди воспринимают призывы ученых к дальнейшим исследованиям как признак того, что в действительности ученые не знают, что делать с этими отходами.

Ошибочность общественных представлений по этому вопросу в Великобритании имела еще большее распространение, о чем свидетельствует изменение политики правительства относительно геологической программы бурений. Целью этой программы был сбор информации о глубоких геологических формациях как хранилищах отходов высокой активности. Появилась сильная местная оппозиция планируемым буровым работам в определенных местах, но ученые доказывали важность выполнения программы бурений для демонстрации безопасности хранилищ для окончательного удаления отходов в глубоких геологических формациях.

Правительство пересмотрело геологическую программу и объявило, что дальнейшие буровые работы не нужны. Совершенно очевидно, что общественность попала в тупик.

Для прояснения этой ситуации полезно начать с главного источника отходов высокой активности, которым является отработавшее топливо с атомных электростанций. Оно содержит невыгоревший уран и плутоний, каждый из которых является потенциально ценным топливным материалом, а также продукты деления и отходы в виде актинидов, которые являются высокорadioактивными. После периода выдержки, когда радиоактивность снизится до определенного уровня, при котором уже можно провести переработку, отработавшее топливо перерабатывается. При этом полезные материалы, уран

и плутоний, отделяются от отходов. Отходы, выделяющиеся в этом процессе в виде жидкостей, концентрируются для уменьшения объема и затем хранятся в жидкой форме. Вследствие радиоактивности, еще достаточной для выделения значительного количества тепла, баки хранения должны охлаждаться с помощью циркулирующей воды.

Хотя безопасное хранение таким способом не представляет трудностей с инженерной точки зрения и полностью приемлемо для короткого периода времени, для более долгого хранения легче, безопаснее и дешевле хранить твердые вещества, а не жидкости. Поэтому уже на ранней стадии переработки было признано целесообразным для длительного хранения жидкие отходы превращать в твердые блоки. Однако насущной необходимости для этого не было. Количество производимых отходов было мало; например, лишь около 1000 м³ отходов высокой активности, в настоящее время хранящиеся в Уиндскейле, представляют почти весь объем, накопленный более чем за 30-летний период ядерной программы Великобритании. Но все же поскольку превращение жидких отходов в твердое вещество являлось следующей логической ступенью в процессе обращения с отходами, были выполнены большие исследования в области науки и технологии перевода этих отходов в твердую форму.

Твердое вещество для „фиксации” этих отходов должно обладать рядом свойств:

- хорошей способностью принимать все элементы отходов;

- хорошей сопротивляемостью выщелачиванию водой;

- хорошей сопротивляемостью радиационным повреждениям;

- высокой теплопроводностью для рассеяния тепла, образующегося при радиоактивном распаде.

Стекло является наиболее подходящим материалом не только потому, что оно обладает многими из требуемых свойств, но также и потому, что технология его производства хорошо разработана. Поэтому в Великобритании было решено строить завод по остекловыванию отходов на основе французского процесса АVM, который демонстрируется и хорошо работает в Маркуле во Франции. Кроме стекла, также предлагается такой материал, как оксидная керамика. Профессор Рингвуд из Австралии предложил для этих целей кристаллический материал в виде искусственного камня, который он называет Синрок.

* Г-н Маршалл является председателем Управления по атомной энергии Великобритании, 11 Charles II St., Лондон SW1 4QP, и членом Научного консультативного комитета МАГАТЭ.

После перевода отходов высокой активности в твердое состояние их можно хранить на поверхности до тех пор, пока обеспечен незначительный, но необходимый контроль. Мощность тепловыделения в стеклянных блоках падает в первые несколько лет существования отходов достаточно быстро. Цифры показывают тепловую мощность блока массой 0,4 т, содержащего большую порцию отходов. Такие блоки могут быть экранированы бетоном для уменьшения излучения ядерного распада и помещены в простое хранилище сухого типа, охлаждаемое воздушным потоком. Хранилище такого типа может быть умеренных размеров и требовать минимального внимания.

Хранение отходов до захоронения

Хотя хранение на поверхности не представляет технических трудностей и изоляция отходов высокой активности от окружающей среды может быть полной, тем не менее имеются причины социального или политического характера для окончательного удаления отходов. Под удалением понимается такое размещение отходов, при котором исключается их возвращение и нет необходимости в длительном контроле. Были предложены различные способы. Один из них, представляющий наиболее привлекательным и являющийся предметом широких исследований в Великобритании и в других странах, заключается в изоляции отвержденных отходов в глубоких геологических формациях.

Захоронение блоков с отходами подвергло бы их на долгий период времени воздействию грунто-

вых вод; следовательно, возможны пути возврата отходов в окружающую человека среду. Однако выбор площадки с очень малыми потоками грунтовых вод вместе с барьерами, описанными ниже, может уменьшить любой такой риск до незначительного уровня. Другим фактором, с которым необходимо считаться, является то, что захоронение блока в первые годы его существования могло бы привести к локальному увеличению температуры, что может увеличить растворимость отходов и локальное увеличение скорости движения воды. При удалении отходов на раннем этапе необходимо предусмотреть, чтобы выделение тепла не было чрезмерным. Следует либо предусмотреть принудительное охлаждение на несколько десятилетий, пока радиоактивный распад не достигнет момента, при котором охлаждение будет не нужно, либо делать блоки меньшей величины и свободно размещать их в скальных формациях, чтобы тепло отводилось за счет естественной проводимости.

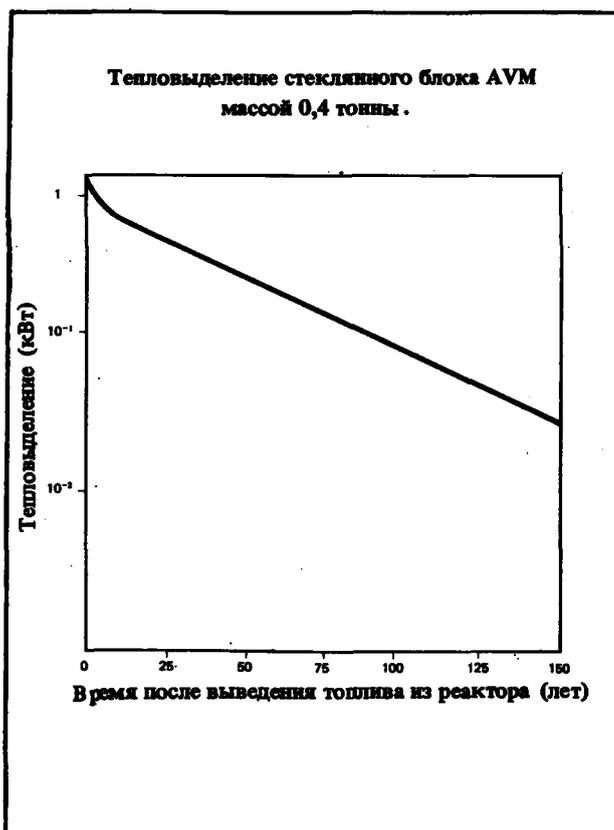
Оба способа технически возможны, но сложны. Они также имеют недостатки экономического и технического характера, по сравнению со способом окончательного удаления после выдержки отходов для остывания в течение длительного периода времени на поверхности или вблизи нее. В настоящее время в Великобритании все пришли к единому мнению, что следует хранить остеклованные отходы до тех пор, пока их тепловыделение не достигнет уровня, при котором можно рекомендовать их безопасное удаление. Как долго это может быть, является вопросом как экономического, так и технического характера, но этот период, вероятно, может длиться от 50 до 100 лет, а, возможно, и значительно дольше.

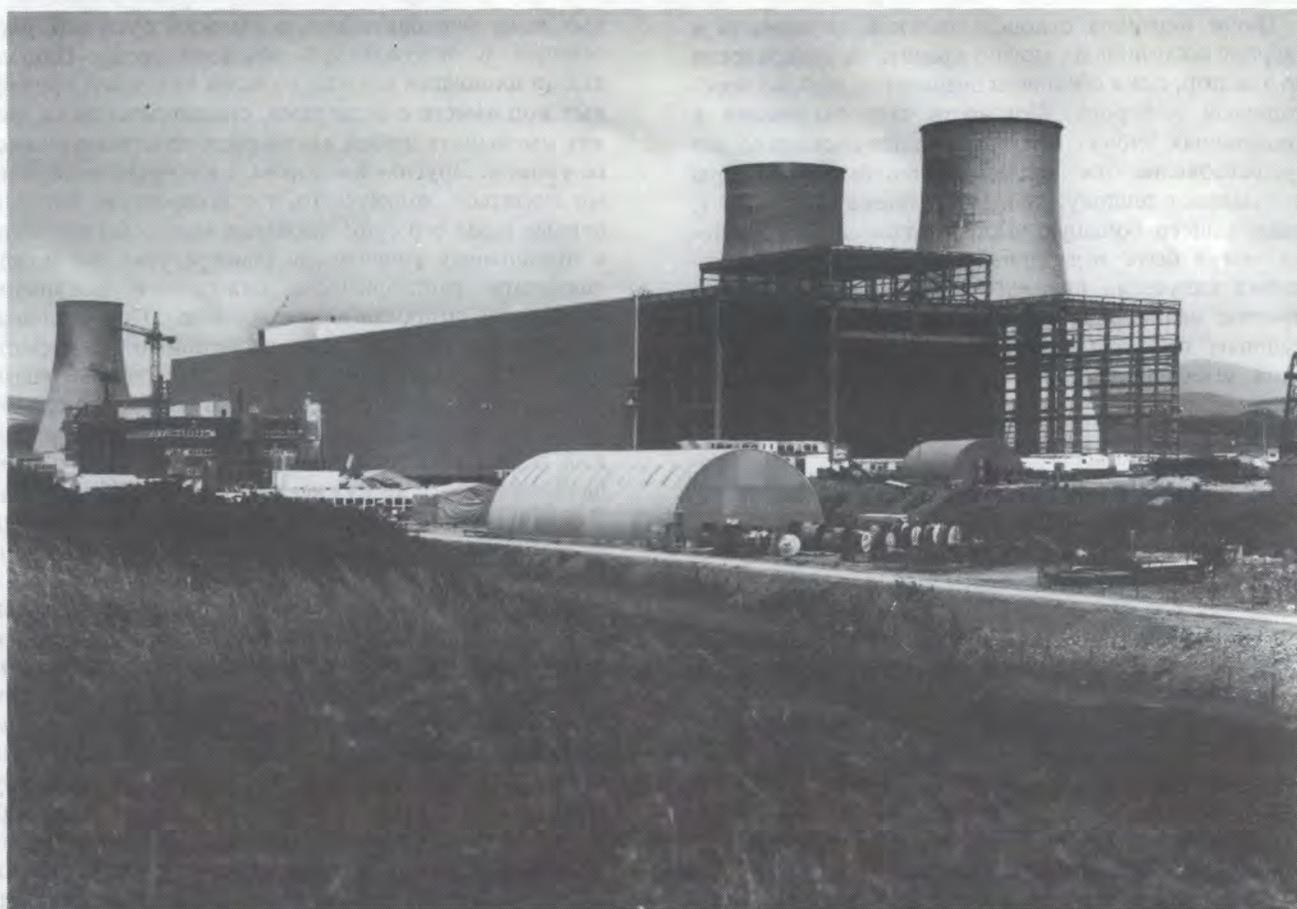
Стратегия, которой мы придерживаемся в Великобритании относительно обращения с отходами высокой активности, заключается в следующем:

- отверждение отходов, превращение их в стеклянные блоки
- хранение стеклянных блоков, пока они существенно не охладятся, возможно 50–100 лет или может быть дольше
- удаление блоков, по возможности, в глубокие геологические формации, как только тепловыделение снизится до приемлемого уровня

В число других вариантов удаления входит удаление на дно океана или под его дно, однако наши знания о них находятся на более ранней стадии исследований, по сравнению с геологическим удалением.

Такая стратегия, я надеюсь, является полностью логичной и разумной. Однако она подвергается критике, т.к. конечный элемент — стадия удаления не была продемонстрирована. Как говорят критики, вы можете придерживаться стратегии долговременного удаления отходов высокой активности, когда вы не можете продемонстрировать, что метод окончательного удаления является безопасным, — безопасным практически на неограниченное время. Это была точка зрения, высказанная в Великобритании в 1976 г. в шестом отчете Королевской комиссии

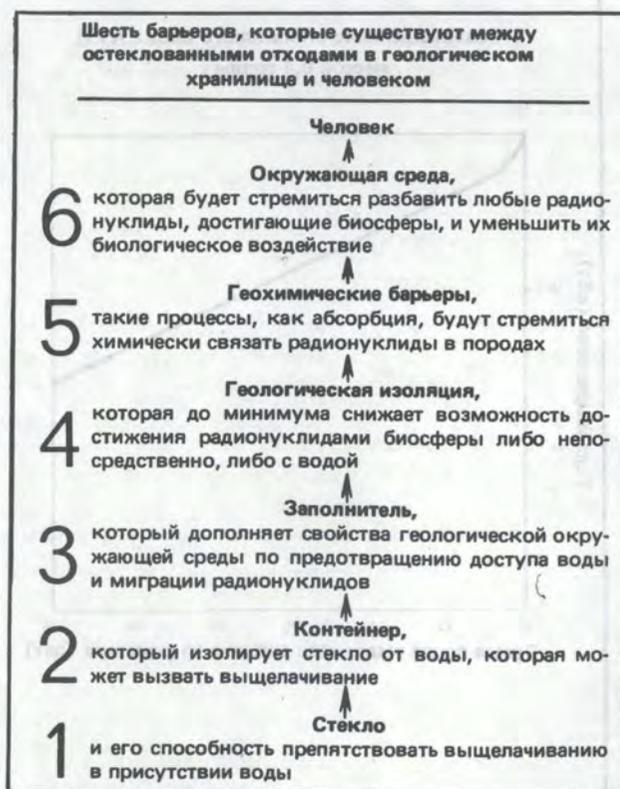




Новая установка для приема и хранения отработавшего магноксового топлива (бассейн 5), сооружаемая на площадке Бритиш Ньюклар Фьюэлс Лимитед Селлафилд (Уиндскейл), Камбрия, Англия. Отработавшее магноксовое топливо будет храниться здесь под водой до переработки.

по загрязнению окружающей среды, который рекомендовал не давать дальнейшего хода большой программе ядерной энергетики, пока не будет доказано, что существует метод обеспечения безопасного хранения долгоживущих высокорadioактивных отходов в течение неограниченного промежутка времени. Чтобы ответить на эту критику, различные страны, включая Великобританию, начали в середине 70-х годов программу исследований по осуществимости методов конечного геологического удаления. Программа Великобритании, которая осуществляется Департаментом по защите окружающей среды, составляет часть более обширной программы Комиссии Европейских Сообществ.

Я не сомневаюсь, что удаление остеклованных отходов в глубокие геологические формации может быть полностью безопасным и что количество радиоактивности, которое спустя многие тысячи лет вернется в окружающую человека среду, будет настолько мало, что им можно будет пренебречь. Мне хотелось бы здесь подчеркнуть, что те уровни, до которых снизится радиоактивность через несколько тысяч лет, будут ниже уровня активности первоначальной руды, из которой было получено топливо. Но основные причины моей веры в безопасность этой формы удаления покоятся на возможности создания нами различных барьеров на пути возвращения





Образец, имитирующий остеклованные отходы. Если бы вся электроэнергия, потребляемая одним человеком за всю его жизнь, производилась бы ядерными средствами, тогда этого количества стекла было бы достаточно для включения всех получающихся при этом высокоактивных отходов.

отходов в окружающую среду. Однако, чтобы быть полностью убежденными в безопасности, необходимо иметь доказательства, подвергнуть критическому научному изучению и экспериментальному исследованию все моменты, где существуют любые разумные основания для сомнений. Давайте, поэтому, рассмотрим барьеры, которые мы можем создать, и дополнительные работы, которые должны быть выполнены для получения большей уверенности в их эффективности.

Шесть барьеров

После помещения остеклованных отходов в окончательное хранилище, от окружающей человека среды их отделяют шесть барьеров, приведенных в рамке.

Во-первых, отходы связываются в стекле в высокостабильной и нерастворимой форме. Конечно, неизбежно будет происходить определенное выщелачивание стекла и содержащихся в нем радиоактивных элементов, если в отдаленном будущем вода войдет в соприкосновение с остеклованным блоком. Следовательно, нам необходимо знать скорость, с которой может происходить такое выщелачивание. Ра-

диация и особенно α -распад актинидов может влиять на выщелачивание, и нам необходимо понять, существенно ли это влияние. Радиация может также привести к образованию свободных радикалов в любой присутствующей воде, которые также могут увеличить скорость выщелачивания, а также к образованию азотной кислоты облучением воздуха или азота, контактирующих с водой. Ясно, что нам необходимо полностью представлять все эти процессы.

Вторым барьером является коррозионноустойчивый контейнер, который содержит в себе остеклованный блок. Он предназначен для отсрочки того момента, когда блок может подвергнуться действию воды и, следовательно, выщелачиванию. Задача заключается в сохранении этого барьера целым по крайней мере в течение нескольких сот лет, требующихся большинству радиоактивных продуктов деления, особенно цезию-137 и стронцию-90 для распада до незначительного уровня радиоактивности. Следовательно, мы должны знать, через сколько лет (500 или 1000) коррозия разрушит контейнер. Какой материал лучше всего использовать? В какой степени контейнер будет представлять барьер выщелачиванию даже после того, как коррозия нарушит его герметичность?

Третьим барьером является заполнитель, который будет размещаться вокруг контейнера в качестве дополнения к свойствам геологических структур для предотвращения миграции радионуклидов. Могут быть использованы материалы, которые будут действовать как барьеры против интрузии воды, препятствовать коррозии и вступать в химическую реакцию с любыми радиоактивными элементами, которые выщелачиваются из стекла, ограничивая их распространение. Нам необходимо знать, какие материалы использовать (для различных геологических условий могут оказаться подходящими различные материалы) и какова будет эффективность таких материалов как барьеров.

Четвертый барьер определяется характером геологической формации, выбранной для хранилища. Требуются формации, которые обладают очень низкой проницаемостью для воды (как для ограничения скорости, с которой может проходить выщелачивание, так и скорости, с которой выщелоченные радионуклиды могут проникать к биосфере). Нам необходимо иметь возможность определять скорость движения грунтовых вод, которая обычно составляет $0,1-0,2$ л/м² в год. Нам необходимо иметь возможность оценить, может ли эта скорость увеличиться, либо за счет естественного растрескивания пород, либо за счет растрескивания, вызванного теплом отходов. Кроме того, нам необходимо иметь возможность оценки вероятности сейсмических или других событий, нарушающих этот геологический барьер.

Пятый барьер определяется геохимическими свойствами пород. Многие радионуклиды будут вступать во взаимодействие с геологической средой при прохождении через нее и будут задерживаться такими процессами, как ионный обмен, поверхностная абсорбция или осаждение. В результате даже при разрушении всех других барьеров многие радионуклиды будут перемещаться по путям в геологических структурах много медленнее воды и могут распасться до того, как они достигнут биосферы. С другой стороны, определенные радионуклиды только слегка задерживаются этим процессом. Нам необходимо знать эти эффекты и иметь возможность их количественной оценки.

И, наконец, существует барьер окружающей среды. В итоге, поскольку мы всегда делаем пессимистические и консервативные допущения, чтобы ошибка была в сторону безопасности, мы должны предположить, что все другие предосторожности со временем оказались недейственными и что в результате некоторое количество радиоактивных веществ достигнет биосферы. (Мы говорим здесь о будущем, возможно, через десятки или сотни тысяч лет). Какую опасность они будут представлять, имея в виду, что радиоактивность существует всюду как природное явление и вместе с тем в биосфере любые радионуклиды из отходов окажутся в значительной степени разбавленными? Для точной оценки риска от геологического захоронения отходов нам необходимо иметь возможность количественного

определения того, насколько в действительности этот барьер окружающей среды эффективен.

Эффективность больше ожидаемой

С тех пор как в середине 70-х годов была начата широкая программа исследований в этой области, объем наших знаний по этим вопросам постоянно возрастает, и мы теперь знаем, что некоторые из этих барьеров по величине на несколько порядков более эффективны, чем когда-то считали. Большой вклад в этом направлении сделали, например, работа KBS в Швеции, исследования в Канаде и исследовательская программа Комиссии Европейских Сообществ. Была издана обширная литература.

В частности, эксперименты в Харуэлле, при которых в стекло была добавлена двуокись плутония ²³⁸PuO₂, показали, что при дозе облучения, соответствующей периоду существования остеклованных отходов магноксовых реакторов Великобритании в течение около миллиона лет, скорость выщелачивания возросла всего лишь в два раза. Эта и подобные работы по возможному действию радиации на воду, которые могут быть представлены, дают уверенность, что радиация не будет оказывать никакого существенного влияния на способность стекла удерживать отходы.

Теперь также установлено, что скорость выщелачивания, которая будет при геологических захоронениях очень мала, в действительности, вероятно, будет определяться наличием грунтовых вод. Во всяком случае, вероятно, что она будет весьма ограниченной из-за гидравлических свойств геологических пород и заполнителя.

Мы также знаем, что при воздействии выщелачивания на стеклянный блок, образующийся обедненный поверхностный слой по-разному удерживает определенные элементы; в частности, существует заметное удержание актинидов, относительно которого обнаружено, что скорость их выщелачивания по величине на несколько порядков меньше усредненной скорости выщелачивания, на которой раньше основывались расчеты.

Упомянутое ранее шведское исследование основывалось на широких экспериментах на площадках с твердыми породами. Эта работа еще продолжается. Она показала, что, безусловно, можно проектировать хранилища в твердых породах таким образом, что максимальное количество радиоактивности, которое могло бы вернуться к человеку, не будет достигнуто в течение 100 000 лет и что даже при консервативных предположениях любая результирующая доза излучения будет малой, по сравнению с естественным фоном.

Будущее программы бурений

В результате различных исследований и экспериментальных работ, проведенных в различных странах с разного типа породами, мы можем продемонстрировать высокую степень безопасности и приемлемости, с точки зрения окружающей среды, геологического захоронения, как конечного этапа нашей стратегии обращения с высокоактивными отхода-

ми. Однако обеспечение безопасности всегда является длительным процессом. Существует еще много областей, где мы нуждаемся в расширении наших знаний, уточнении наших предложений, которые мы считаем консервативными, но которые недостаточно подтверждены экспериментально. Именно поэтому в Великобритании в первую очередь проводилась программа бурений для получения дальнейших данных общего характера о глубинных свойствах различного типа пород, которые встречаются на территории страны, об их проводимости, водосодержании и трещиноватости, а также об их геохимических свойствах. Эта программа не привязана к каким-либо конкретным площадкам.

Насколько глубокие исследования необходимо проводить на этой стадии, является еще предметом дискуссии. Я думаю, что мы уже располагаем достаточной информацией, что наша главная стратегия является правильной. Нет безотлагательной необходимости удалять высокоактивные отходы — хранение остеклованных отходов является, как я показал, предпочтительным в течение первых 50—100 лет после удаления их из реактора. Департамент по защите окружающей среды, который отвечает в Великобритании за эту программу, недавно пересмотрел программу по геологическим исследованиям. Он

пришел к заключению, что возможность помещения отходов глубоко под землю в настоящий момент, в принципе, установлена и что нет свидетельств того, что оно будет неприемлемым. Поэтому он решил, что из-за отсутствия безотлагательной необходимости в такой работе и наличия призывов к ограничению ресурсов программу бурений не следовало бы расширять.

Многие ученые высказались за продолжение этих работ, чтобы еще больше увериться в том, что мы полностью понимаем и можем предсказать поведение отходов после предания их геологическому удалению; и чтобы продемонстрировать общественности, что даже наиболее маловероятные последствия учтены в рамках обеспечения безопасности; и чтобы обеспечить наших потомков, если они решат удалять эти отходы (если в конце концов это то, что они захотят делать), наиболее полной возможной информацией по этому вопросу. Я в определенной степени симпатизирую такой точке зрения. Тем не менее, это мое твердое убеждение, что правительство заняло полностью оправдываемую позицию в свете представленных ему данных и стоящей перед ним необходимости разрешения конфликта между желаемыми исследованиями и объемом ресурсов, которые оно может предоставить.