

ПРОБЛЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕЗАЯВЛЕННЫХ ПРОХОДЧЕСКИХ РАБОТ НА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ХРАНИЛИЩАХ ПОСЛЕ ИХ ЗАКРЫТИЯ

Пер Ф. Питерсон

После закрытия геологических хранилищ потребуется контроль за мерами безопасности в случае хранения отработанного топлива или иных форм отходов, для которых не определено завершение международных гарантий. Слежение за акустическим излучением от проходческой аппаратуры, периодический спутниковый надзор и посещения площадок являются основными методами, предлагаемыми для обнаружения незаявленных проходческих работ. Из их числа только акустическое слежение может обнаруживать подземную деятельность, что позволяет установить четкий периметр для наблюдения вокруг хранилища. Если можно будет преодолеть акустическое слежение и нет других способов обнаружения подземной деятельности, то наблюдения с поверхности следует проводить на более значительных, но не точно установленных расстояниях вокруг хранилища. В данной статье приводится фундаментальная схема классификации для отождествления технологий проходки. Классификация позволяет определить спектр сценариев сооружения туннелей небольшого диаметра. В анализе предполагается, что даже для плотных пород национальные группы нарушителей будут в состоянии поставить компактные, модульные машины для гидравлической или термической проходки с акустическим излучением, лежащим ниже уровня фоновых шумов. Это вызывает побуждения к дальнейшим исследованиям методов слежения за подземной деятельностью и сценариев нарушения, а также подсказывает, что выбор геологической среды для хранилища может иметь важные последствия для обнаружения незаявленных проходческих работ.

Автор работает в Центре по управлению ядерными и токсичными отходами при Калифорнийском университете (Беркли).

ВВЕДЕНИЕ

После того, как отработанное топливо или иные формы отходов, содержащие делящийся материал, который может быть извлечен, состарятся на несколько сотен лет, исчезнет радиоактивный барьер, затрудняющий кражу и химическое выделение плутония, в результате чего отработанное топливо становится приблизительно эквивалентным свежему МОХ-топливу с точки зрения привлекательности для распространения ядерного оружия. Стратегия прямого геологического захоронения таких материалов призывает к введению геологического барьера, чтобы заменить им в отдаленной перспективе радиоактивный барьер против краж и неадекватного использования¹.

Поскольку геологический барьер несовершенен и его можно обойти проходкой туннелей, подземные хранилища с делящимися материалами потребуют наблюдений и гарантий для обнаружения любой попытки использовать не по назначению или выкрасть делящийся материал путем незаявленных проходческих работ²². По сравнению с наземным хранением отработанного топлива задача гарантий для хранилища становится сложной, поскольку после закрытия хранилища учет оказывается невозможным.

¹ National Academy of Sciences, *Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium* (Washington, D.C.: National Academy Press, 1994), p. 148.

² Позиция МАГАТЭ по вопросу о гарантиях на хранилища отражена в статье А.Фаттаха и Н.Хлебникова "A Proposal for Technical Criteria for Termination of Safeguards for Materials Characterized as Measured Discards", *Journal of Nuclear Materials Management*, XIX(2), (1991), pp.29-34.

Скрытное ежедневное похищение двух сборок отработанного топлива от водяного реактора под давлением (ВРД) позволит добиться производства плутония с темпами, превышающими максимальные темпы получения плутония, которые были достигнуты в США во время холодной войны³, так что успешное скрытное сооружение туннеля небольшого диаметра, ведущего в хранилище отработанного топлива, может иметь значительные стратегические последствия. До сих пор международные усилия по определению геологических методик для подземных наблюдений после закрытия хранилищ были сосредоточены на обнаружении скорее крупного землеройного или бурового оборудования, чем меньшего по размерам оборудования, которое можно применить для проходки туннелей малого диаметра⁴. Однако, поскольку следы земляных работ зависят от объемности такой деятельности, те страны, которые попытаются проводить незаявленную проходку, выберут наименее возможный диаметр туннеля, подходящий для выноса отдельных топливныхборок. В статье изучается в качестве основного варианта туннель диаметром два метра, хотя и меньшие размеры туннеля являются еще допустимыми.

Основными методами, предложенными для обнаружения открытых или скрытных попыток проведения незаявленных земляных работ, служат микросейсмический контроль за акустическим излучением от проходческой аппаратуры и периодическое спутниковое наблюдение за поверхностной деятельностью⁵. Из них только акустический контроль позволяет обнаружить подземную активность и установить фиксированный периметр вокруг хранилища для наблюдения за подземной деятельностью. Если удастся сорвать контроль за подземной активностью, вокруг хранилища придется проводить наблюдения за наземной деятельностью на значительно больших расстояниях, устанавливаемых максимальными достоверными темпами проходки, которых могут достигнуть страны-нарушители, и максимальными временными сроками, в течение которых эти страны могли бы попытаться вести подобную деятельность.

Кроме тяжелого землеройного или бурового оборудования сейчас существуют альтернативные технологии проходки пород, имеющие дело с модульным оборудованием меньшего размера, которое производит меньше акустического шума и поэтому требует наблюдений за менее уловимыми акустическим излучением и поверхностной активностью. Другие виды человеческой деятельности могут оставить аналогичные следы на поверхности и поэтому их следует запретить или позволять только при соответствующей проверке на месте. Дальнейшие перемены в технологии проходки туннелей могут потребовать изменений видов деятельности, требующих запрета или инспекции на месте, а также изменения расстояния вокруг хранилищ, внутри которого деятельность находится под контролем.

³ П.Ф.Питерсон, "Долгосрочные гарантии для плутония в геологических хранилищах", Наука и всеобщая безопасность. т.6. вып.1. (1996). стр.3-12.

⁴ МАГАТЭ выделило средства на совместную деятельность ряда стран (SAGOR) по изучению проблем гарантий для размещения отходов в хранилищах. включая оценки геофизических методик типа слежения за микросейсмикой. которые обсуждались в Канадской программе поддержки гарантий Application of Geophysical Techniques for Geological Repository Safeguards (SAGOR Activities 5b and c), CSSP Report No.94, Atomic Energy Control Board, (1997), pp.87-96.

⁵ Например, в докладе Национального исследовательского совета США по распоряжению избыточным плутонием из оружия отмечается: "Имеются реальные технические подходы к дешевому слежению за такими площадками, например, использование сейсмических станций с автономным управлением для обнаружения буровых операций вблизи хранилища." См. [1], p.59, а также J.Myatt, "Design Information Verification for Conditioning Plant and Geologic Repositories", Transactions of the American Nuclear Society, Vol.75, (1996), pp.92-93; G.A.Ekenstam, S.-E.Larsson, and H.Forsstrom, "Spent Fuel in Geologic Repositories: Swedish Aspect of Safeguards", Transactions of the American Nuclear Society, Vol.75, (1996), pp.96-97; B.Richter, "Recent Development in Final Disposal Concepts for Spent Fuel and Related IAEA Safeguards Issues", Transactions of the American Nuclear Society, Vol.75,(1996),p.97.

Если следовать классификации Кука и Харви⁶, то доступные методы для проходки скрываемого туннеля можно разделить по трем фундаментальным категориям: механические, гидравлические и термические. Все эти методы земляных работ можно описать двумя параметрами: удельной энергией, идущей на разрушение породы, и удельной мощностью, выделяемой на забойной (рабочей) поверхности туннеля.

Эффективность любой методики проходки определяется удельной энергией - это энергия, необходимая для превращения единицы объема твердой породы в раздробленную, расплавленную или испарившуюся форму, которую можно убрать с забойной поверхности. В табл.1 приведены типичные значения удельной энергии для разных методов проходки. Удельная энергия зависит в первую очередь от свойств геологической среды и от размера кусков породы, образуемых при заданном методе проходки. В некоторых мягких средах простая ручная копка может удалять материал с очень низкой удельной энергией. Среди других механических методов буровзрывная проходка образует большие обломки породы и имеет небольшую удельную энергию, в то время как подрубка грунта алмазной фрезой дает мелкую пыль и имеет большую удельную энергию.

При гидравлической проходке с помощью водяных струй под высоким давлением удельная энергия зависит от характерных размеров частичек среды, так что мелкозернистые породы типа спекшегося туфа могут обладать высокой удельной энергией, в то время как гранит с более грубой структурой имеет меньшую величину удельной энергии. Относительно слабые материалы типа глинистых сланцев или неспекшегося туфа имеют низкие удельные энергии при подрезке водной струей, а соль является более интересным случаем из-за ее растворимости в воде. Термические методы, куда входят скорее расплавление и испарение, а не тепловое раскалывание, обычно имеют большую удельную энергию и поэтому для них из-за плохой экономичности рассматриваются только разработка прототипов для проходки пород, но они все же могут представлять интерес для попыток скрытной проходки туннелей из-за возможности иметь очень низкое акустическое излучение.

При заданной удельной энергии максимальные темпы удаления породы определяют максимальной удельной мощностью методов проходки - это максимальная скорость, с которой можно выделить энергию на единице площади забойной поверхности. Максимальная мгновенная скорость проходки для соответствующей методики дается отношением максимальной удельной мощности к удельной энергии. Возрастание скоростей проходки для механических методов за три последних десятилетия связано в основном с увеличением удельной мощности.

В статье приводится обширный перечень методов проходки и обсуждаются возможные скорости проходки, а также акустические шумы на основе доступной в технической литературе информации. Затем рассматриваются свойства геологических сред, которые сейчас предлагаются для хранилищ (спекшийся туф, гранит-порода кристаллического типа, глины и соль), и показано, что трудности при проходке и соответствующее акустическое излучение гораздо ниже в мягких породах (глинистые сланцы и соль). Затем создается стандартный сценарий похищения. В сценарии использованы имеющиеся в продаже модульное гидравлическое оборудование с конструкцией, предназначенной для сведения к минимуму акустического излучения при достижении разумных скоростей проходки в граните (и быстрой проходки в глинистых сланцах и соли). Все узлы оборудования достаточно компактны для доставки к входу в туннель в небольшом грузовичке или в пассажирском автомобиле.

Технология водяных струй под высоким давлением, выбранная для стандартного сценария, в настоящее время используется на коммерческой основе в открытых выработках для проходки гранита и глинистых сланцев, но для проходки туннелей она применялась только в песчанике из-за относительно низкой скорости проходки по сравнению с механическими методами. Однако сила, действующая на забойную поверхность под воздействием водяных струй, по крайней мере, на порядок величины меньше, чем достигается механическими инструментами, а насосное оборудование и струйные насадки компактны и их гораздо легче утаить. В сочетании с тем, что оборудование для создания водных струй имеется в продаже и эта технология относительно проще той, которая требуется для постройки и работы

⁶ Cook, N.G.W. and R.R. Harvey, "An Appraisal of Rock Excavation By Mechanical, Hydraulic, Thermal and Electromagnetic Means", in *Advances in Rock Mechanics: Proc. of the 3rd Inter. Congress on Rock Mechanics* (Denver, Colorado, Sept. 1-7, 1974), pp. 1599-1615.

ядерного реактора или установок для обогащения изотопов, указанные свойства делают струйный метод полезной сравнительной технологией для того, чтобы судить о пригодности предлагаемых методов гарантий применительно к подземным хранилищам после их закрытия. Термические методы также заслуживают дополнительного изучения.

ВСЕСТОРОННЯЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ ПРОХОДКИ

Методы проходки, которые в принципе можно использовать для сооружения туннелей, делятся на три фундаментальные категории, приведенные в Таблице 1: механические, гидравлические и термические. Полезность каждого метода зависит от того, какую породу надо проходить. Для подземных хранилищ в настоящее время активно изучаются следующие геологические среды: спекшийся туф (США), кристаллическая порода (Канада, Швеция, Финляндия, Франция), соль (Германия) и глинистые сланцы (Бельгия, Франция).

Механическая проходка

Буровзрывные методы проходки обладают одними из самых низких требований к удельной энергии, но они имеют ограниченную скорость проходки из-за усредненной величины удельной мощности, которую можно выделить на поверхности забоя - эта величина имеет типичное значение около 1.3 кВт/м^2 ⁷. Средняя удельная мощность ограничивается главным образом временем, требуемым для бурения шпуров в породе, чтобы заложить взрывчатку. Мгновенная удельная мощность гораздо выше при взрыве, когда создаются давления в диапазоне от 2000 до 50000 МПа. Приложенная к поверхности породы сила оказывается, соответственно, большой, что вызывает сильный акустический сигнал.

Машинная проходка (с лопастными и валиковыми долотами) требует на порядок величины более высокую удельную энергию по сравнению с буровзрывными методами благодаря образованию более мелких частиц породы. Однако машинная проходка позволит приложить к поверхности породы гораздо более высокую удельную мощность и тем самым иметь скорости проходки, которые более, чем на порядок величины, выше значений, достижимых при буровзрывных методах. Поэтому машинная проходка заменила буровзрывные методы в большинстве операций по проходке туннелей в мягких и умеренно твердых грунтах. Сейчас самые высокие скорости проходки туннелей достигнуты при помощи проходческих щитов с площадью, соответствующей сечению туннеля, которые содержат множество дисковых фрез, смонтированных на вращающейся головке, проникающей в породу. Самый последний рекорд по скорости проходки щитом был установлен в 1996 г. в Неваде и составил 150 м за один день (это был в туннеле диаметром 4.3 м и длиной 6.4 км при полной стоимости проекта в 20 млн.долларов⁸). Были сооружены туннели гораздо большей длины с единственным входом с поверхности; этот факт должен приниматься во внимание при установлении расстояния для поверхностного наблюдения в том случае, когда неудачи при контроле за деятельностью под поверхностью не позволяют установить относительно короткий периметр наблюдений вокруг хранилища.

В общем случае, амплитуда акустического излучения при механической проходке будет зависеть от силы, с которой режущие инструменты воздействуют на породу. Стандартные проходческие щиты имеют крупные гидравлические цилиндры, которые прижимают большое количество режущих инструментов к поверхности породы с полной силой на единицу площади (удельной силой) порядка 0.3 МПа (так, для стандартного современного щита диаметром 5.6 м с 40 фрезами дискового типа полная сила составит восемь миллионов ньютонов, что приводит к скоростям проходки около 3 м/час в умеренно твердых породах)⁹.

⁷ Там же, стр.1601.

⁸ "Tunnel Boring Records Set", Civil Engineering, (1996), p.15-16.

⁹ Nelson, P.L. et al., "Tunnel Boring Machine Performance Study", UMTA-MA-06-0100-84-1, U.S. Department of Transportation, (1984)

Гидравлическая проходка

Гидравлическая резка струями воды под высоким давлением широко использовалась в коммерческих земляных работах, в том числе для резки грунта, бетона, металла и композитов, при проходке грунта, глинистых сланцев и песчаника¹⁰; она также изучалась для бурения вертикальных скважин в граните при создании подземных хранилищ¹¹. Было показано, что водяные струи экономически конкурентоспособны при создании туннелей в мягкой породе. Например, туннели под Миннеаполисом были прорыты в песчанике при давлении воды в диапазоне, примерно, 1.7-3 МПа с соплами диаметром 0.9-1.8 см¹². Специально сконструированные тележки использовались для передвижения аппаратуры, которая создает давление в воде и направляет ее через сопла на рабочую поверхность туннеля. Водяные струи разрушают песчаник и создают пульпу, которая откачивается из туннеля. Была достигнута скорость проходки 4.5 м за восьмичасовую смену.

Водяные струи большего давления (в десятки и сотни МПа) могут резать гранит и теперь они используются на практике для этих целей, чтобы прорезать щели в граните на открытых разработках. Относительно высокая удельная энергия, требуемая для проходки твердых пород водяными струями, ограничивает возможные скорости проходки при разумных значениях удельной мощности. Низкая скорость проходки увеличивает производственные затраты, что делает гидравлическую проходку экономически неконкурентоспособной по сравнению с проходческими щитами в твердых породах. Акустические характеристики при резке водяными струями заметно отличаются от шумов при механических методах. Для стандартной системы резки гранита водяными струями, которая обсуждается далее, при скорости проходки 0.4 м/час (в отличие от 3 м/час для проходческого щита) создается удельная сила 3.2 кПа, что значительно ниже удельной силы в щите (около 300 кПа).

Термическая проходка

Для работ с разными материалами существует множество термических методов. Струи пламени вызывают тепловые расколы (это механический эффект) при использовании в качестве топлива смеси керосина с кислородом. Струи пламени широко использовались при разработке гранита, их пробовали для резки железобетонных структур¹³. Поскольку тепловой раскол вызывается термическими напряжениями и приводит к образованию относительно больших кусков твердого материала, требуемая для проходки струями пламени удельная энергия обычно меньше, чем при других термических методах, где используются плавление или испарение (см. Табл.1). Системы со струями пламени обладают высоким уровнем шумов, а продукты горения и выделяемое тепло создают тяжелую обстановку для рабочих в туннеле, что накладывает серьезные ограничения на вентиляцию туннеля или требует дистанционных операций.

При бурении скважин малого диаметра для геотермальных систем¹⁴ широко изучалось плавление породы при помощи нагреваемого тугоплавкого металлического пенетратора («подземного духа»). Были изучены технические вопросы, связанные с пенетраторами для твердых пород, конструкцией электронагревателя и определением срока работы пенетратора, но такая система не преуспела в качестве экономически конкурентоспособного метода проходки из-за относительно высоких требований к удельной энергии. Лабораторные эксперименты с плотной базальтовой породой продемонстрировали скорости проходки порядка 1 м/час с удельной мощностью (потоки тепла) 5 МВт/м² при удельной энергии базаль-

¹⁰ Summers, D.A., *Waterjetting Technology*, (London: E&FN Spon., 1995)

¹¹ Puchala, R.J., et al., "Development of Water Jetting Equipment for Excavating Large-Diameter Boreholes in Granite", 5th American Water Jet Conference, (Toronto, Canada, August 29-31, 1989), pp.27-38.

¹² См. [10], p.268.

¹³ Shimida, S., "The Cutting of Reinforced Concrete Structures by Flame Jet", *Jet Cutting Technology – Proceedings of the 10th International Conference*, (Elsevier, 1991), pp.293-304.

¹⁴ Hanold, R.J., et al., *Rapid Excavation by Rock Melting - LASL Subterrene Program*, LA-5979-SR, Los Alamos National Laboratory, (1977).

та $18\ 000\ \text{МДж/м}^3$ ¹⁵. Пенетраторы действуют путем нажима нагретой поверхности из тугоплавкого металла на забойную поверхность туннеля. В тонком расплавленном слое породы устанавливается градиент давления между металлической поверхностью и твердой породой, который заставляет расплавленную породу перетекать в выводные каналы, откуда расплав удаляется в виде остывших стеклянных шариков, стеклянных стержней или минеральной ваты. В других случаях, например, в пористых материалах типа спекшегося туфа, плавление может вызвать уплотнение на стенках туннеля, что уменьшит (или устранит) необходимость в удалении отходов. При ламинарном течении в тонком слое расплавленной породы и постоянном давлении, приложенном к пенетратору, от подобной системы можно ожидать генерацию очень малого уровня звукового излучения, связанного с вибрациями или флуктуациями сил, которые прилагаются к обрабатываемой поверхности. Акустическое излучение при проходке туннелей методом «подземного духа» будет, как можно ожидать, связано главным образом с газовым потоком, который используется для загрузки и удаления отходов, а также с микросейсмикой - потрескиванием породы от термических напряжений. Информация об акустическом излучении систем с «подземным духом» отсутствует и ее надо иметь до начала проектирования системы акустического мониторинга для конкретной площадки хранилища.

Лазерное плавление и абляция широко используются при использовании промышленного оборудования для удаления материалов, они являются предметом текущих интенсивных НИРов. Считается, что при проходке пород резка лазером оставит незначительный акустический след: абляционный факел от импульсного лазера имеет диаметра порядка долей миллиметра, так что на обрабатываемую поверхность передается очень маленькая сила, а эффекты от тепловых напряжений ограничены очень малыми глубинами щелей в прорезаемых лазером поверхностях. Для полного плавления и/или испарения всей массы породы, подлежащей удалению, потребуются очень большие удельные энергии, от которых придется отказаться (учтите также высокую цену лазерной мощности - примерно 70 долларов/ватт для CO_2 - лазеров¹⁶). Проходчики туннелей, похоже, воспользуются способностью лазеров прорезать очень тонкие щели. При прорезании близко расположенных щелей на рабочей поверхности туннеля можно будет откалывать породу в виде кусков размером порядка сантиметра (или больше). Эффективность прорезания лазером зависит от баланса между поглощаемой лазерной энергией, энергией, идущей на нагрев и плавление/испарение материала, и потерями на теплопроводность. Например, CO_2 -лазер с мощностью 1.2 кВт может прорезать щель глубиной 2 см со скоростью 0.05 см/с в оксиде алюминия¹⁷. Если использовать лазер для получения кусков породы, имеющих удельную площадь 3 см²/см³, то удельная энергия системы составит $36\ 000\ \text{МДж/м}^3$ ¹⁸. При такой удельной энергии проходка туннеля диаметром 1.5 м со скоростью 1 м/день потребует лазерную систему мощностью 74 кВт, цена которой превышает 5 млн. долларов. Прогресс в промышленной лазерной технологии снизит цену лазеров и приведет к созданию в будущем более прочных систем; тогда лазерное резание может стать привлекательным для групп, пытающихся обойти акустический мониторинг.

ОСНОВЫ ВЫБОРА СТАНДАРТНОГО СЦЕНАРИЯ ХИЩЕНИЯ

В основу подготовки систем гарантии после закрытия хранилища должен лечь спектр сценариев хищения. При отборе таких сценариев возникает ряд сложных вопросов. Можно определить физические процессы, которые, в принципе, будут использованы при проходке (см. Табл.1). Однако можно только догадываться о том, какое влияние окажет технический выбор на акустическое излучение, скорости проходки, стоимость и иные характеристики возможных проходческих технологий, а также, конечно, на технологии мониторинга, которые можно будет использовать для обнаружения операций по сооружению туннелей. Более того, в технической литературе мало информации для оценки акустического излучения от всех

¹⁵ См. [14], Fig.II-10, p.9.

¹⁶ Chryssolouris, Laser Machining: Theory and Practice, (New York: Springer-Verlag, 1991), p.87.

¹⁷ См. [16], p.240.

¹⁸ $(1.2\ \text{кВт} \cdot 3\ \text{см}^2/\text{см}^3 \cdot 10\ \text{МДж/кДж} \cdot 2\ \text{см} \cdot 0.05\ \text{см/с} \cdot 10\ \text{см}^3/\text{м}^3) = 36\ 000\ \text{МДж/м}^3$.

возможных методов проходки, так что оценка всего спектра методов потребует новых экспериментальных программ.

Система гарантий хранилища должна быть спроектирована так, чтобы обнаружить весь спектр заслуживающих доверие методов незаявленной проходки. На одном конце этого спектра система гарантий должна фиксировать грубые и недорогие методы проходки типа буровзрывной выработки или ручной копки в тех породах, где это возможно (например, в глинистых сланцах или в соли). На другом конце спектра система гарантий должна обнаруживать попытки более изощренных национальных и субнациональных групп, у которых будут мотивации, чтобы провести НИРы по более сложным методам для избежания обнаружения.

Скрытные похитители выбрали бы туннель малого диаметра для хищения отходов типа коммерческого отработанного топлива, содержащих делящиеся материалы. Типичная сборка отработанного ВРД-топлива имеет вид матрицы с 17x17 длинными стержнями диаметром 0.95 см и длиной 3.85 м - в ней содержится 4.2 кг плутония. При загрузке хранилища несколько сборок помещаются в герметически запаиваемую канистру, где закрепляются в вертикальном или горизонтальном положении и обычно засыпаются материалом с малой проницаемостью. Через 300 лет уровень излучения от сборки упадет до достаточно низкого значения, чтобы позволить осуществлять в разумных пределах ручной контакт с ней, и это даст возможность открывать канистры на месте и удалять из них вручную отдельные сборки. В типичном хранилище отработанного топлива будет содержаться от нескольких тысяч до многих тысяч топливныхборок (примерно, 2000борок накапливается за время работы АЭС).

В отличие от извлечения плутония из хранилищ, типичный крупный (3000 МВт) промышленный реактор производит плутоний в количестве 750 кг/год при капитальных затратах в несколько млрд. долларов¹⁹. Чтобы сравниться со скоростью производства четырех крупных промышленных реакторов и добиться максимальной скорости производства плутония, которую США достигли лишь во время холодной войны, скрытной группе, построившей туннель, придется открывать канистры и выносить ежедневно по две сборки с отработанным ВРД-топливом. Поскольку столь низкие темпы выемки отработанного топлива приведут к очень высоким темпам получения плутония (особенно для старого топлива, где обращение и химическое выделение становятся легкими), у всех групп, желающих тайком проложить туннель, будет мало мотиваций (или вообще никаких) построить туннель с какими-либо особенностями за исключением минимально возможного диаметра, совместимого с имеющимся оборудованием для проходки туннелей. Это тайное оборудование, без сомнения, будет иметь меньшие размеры по сравнению с тем, что было использовано во время сооружения хранилища, причем акустические и визуальные следы от такого оборудования также будут менее заметными. Акустические данные, полученные при слежении за проходческим оборудованием в период сооружения хранилища, не будут иметь большой ценности, если только не экстраполировать их соответствующим образом на другое, более мелкое по размерам оборудование, которое будет отобрано для попытки незаявленной проходки.

Выбор туннеля малого диаметра будет мотивирован также другими условиями (верными, по крайней мере, для отработанного топлива и других концентрированных видов отходов). Большая часть следов, за которыми охотятся при осуществлении гарантий (акустическое излучение, удаление отходов от земляных работ, поверхностная деятельность, излучение тепла), зависит от объемной скорости проходки породы. Наименьший возможный диаметр туннеля обеспечит максимально возможную скорость скрытной проходки при заданных объемных темпах подземной деятельности.

В соответствии с вероятным желанием тайной группы свести к минимуму размер поперечного сечения своего туннеля в Приложении выбран в качестве стандартного туннель с диаметром 2 м, хотя туннели меньшего диаметра и некруглого поперечного сечения, конечно, заслуживают внимания²⁰. Группа выберет также метод проходки, при котором будет све-

¹⁹ См. [3].

²⁰ Для таких методов, как гидравлическая проходка, не требуется иметь круглое поперечное сечение туннеля. Можно работать в туннелях даже при высоте менее 1 м. Такие небольшие туннели были обычными при разработках в старые времена из-за трудностей в проходке, что послужило причиной привлечения детей для такой работы.

дено к минимуму акустическое излучение. Национальная группа может потратить средства на разработку методов плавления или абляции (то-есть, на пенетратор или на устройство для лазерной резки) для сведения к минимуму акустического излучения. У нас недостаточно данных для оценки того, насколько успешными могли бы оказаться такие усилия, и это затрудняет анализ возможных сценариев термической проходки. Поэтому мы рассматриваем проходку при помощи водяных струй как коммерчески доступную технологию, которая поддается анализу при помощи имеющихся в литературе данных. Акустическое излучение от проходки водяными струями будет, по крайней мере, на порядок величины ниже, чем при механической проходке с обычными буровыми машинами, но все же выше акустического излучения, которое скорее всего может быть достигнуто методами термической проходки. Поначалу рассматривается сценарий хищения при гидравлической проходке гранита, а затем обсуждается распространение результата на спекшийся и неспекшийся туф, глину и соль.

Стандартный сценарий гидравлической проходки

В Приложении приведен детальный технический анализ стандартной системы водяных струй для прокладки туннеля, способной обеспечить скорость проходки туннеля двухметрового диаметра в граните около 10 м/день с вводимой мощностью 4.1 МВт и расходом воды 230 м³/час. На рис.1 схематически показано размещение оборудования, которое будет использовано, в принципе, при прокладке туннеля водяными струями. Выбрана стандартная конструкция на основе ограниченных акустических данных и сведений об удельной энергии, доступных из литературы. Группа похитителей скорее всего проведет работу по дальнейшей оптимизации конструкции системы в скрытном месте вдали от своей цели - подземного хранилища, для улучшения характеристик акустического излучения, сведения к минимуму потребления удельной энергии и получения максимальной скорости проходки туннеля.

Стандартная система создания туннеля водяными струями будет генерировать акустическое излучение четырьмя основными механизмами: прямой удар водяной струи о поверхность породы, передача шумов водяной струи и оборудования через воздушное пространство в туннеле на массу породы, передача вибраций насосов и моторов на пол туннеля через системы закрепления, изменения напряжений в породе, вызванные системами проходки и тепловыми нагрузками. Мы предполагаем, что передача шумов от смещения моторов и насосов на массу породы можно смягчить использованием соответствующей установки оборудования и методики гашения звука аналогично тому, как это делается на современных подлодках, и что изменения напряжений в породе можно свести к минимуму путем вырезания гладкого контура туннеля (при этом уменьшается концентрация напряжений), а также путем правильной ориентации туннеля относительно локального распределения напряжений в породе²¹. Поскольку область высокого давления, создаваемого водяной струей, имеет диаметр всего в несколько мм, а максимальное давление в других местах равно гидростатическому, связанному с накоплением воды, вполне разумно предположить, что вода нигде не проникнет глубоко в трещины, чтобы привести к микросейсмической активности.

При гидравлических и механических методах проходки неизбежный механизм передачи акустической энергии массе породы вызывается контактом режущей среды с обрабатываемой поверхностью породы. В случае водяных струй каждая из них возбуждает осциллирующую точечную силу на поверхности породы. В Приложении представлен анализ амплитуды смещений (в зависимости от частоты), которые эти силы будут возбуждать в сейсмодатчиках, находящихся на расстояниях 30 и 100 м от забойной стенки туннеля при стандартном сценарии. На Рис.2 показаны результаты такого анализа для гранита с относительно низкими характеристиками затухания (амплитуды флуктуаций выражены в единицах спектральной плотности мощности).

Водяные струи и насосное оборудование также возбуждают шум в воздушном пространстве туннеля и этот шум приводит к флуктуациям давления на поверхности стенок

²¹ Юнг и Мартин обсуждают возможное акустическое излучение и микросейсмичность при проходке туннелей: Young.R.P. and C.D.Martin, "Potential Role of Acoustic Emission and Microseismicity Investigations in the Site Characterization and Performance Monitoring of Nuclear Waste Repositories", Int.J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.Abst., Vol.30,(1993),pp.797-803.

туннеля. Как показывают опыты, шум насосной системы может быть значительно ниже струйного шума в широком диапазоне частот (100 Гц - 20 кГц). Уровень давления звука в резонирующей полости нарастает до тех пор, пока полная мощность звука, поглощенного поверхностями полости, не сравняется с мощностью звука, излучаемого источником.

Чтобы свести к минимуму акустический след от шума водяной струи, сооружаемая туннель группа вероятно покроет всю внутреннюю поверхность туннеля за исключением забойной поверхности (или ее части) акустическим экраном из пластиковых пленок и пластин стеклоткани или других пористых материалов, чтобы ослабить интенсивность звука, достигающего поверхности породы. При использовании дополнительных звукопоглощающих материалов на поверхности туннеля в виде свободно стоящих панелей можно еще более эффективно поглощать звуковую энергию, идущую от забойной поверхности. В этом случае передача энергии породе будет происходить в основном за счет прямой передачи от водяных струй через воздух на незащищенную часть забойной поверхности. На Рис.3 подведены итоги расчетов, представленных в Приложении, спектральной плотности мощности, которая создается стандартной водоструйной системой в граните на расстоянии 30 и 100 м от забойной поверхности туннеля. Хотя эта акустическая техника потребует некоторых усложнений, технология все еще относительно проста по сравнению с тем, что требуется для разделения изотопов урана или работы промышленного реактора.

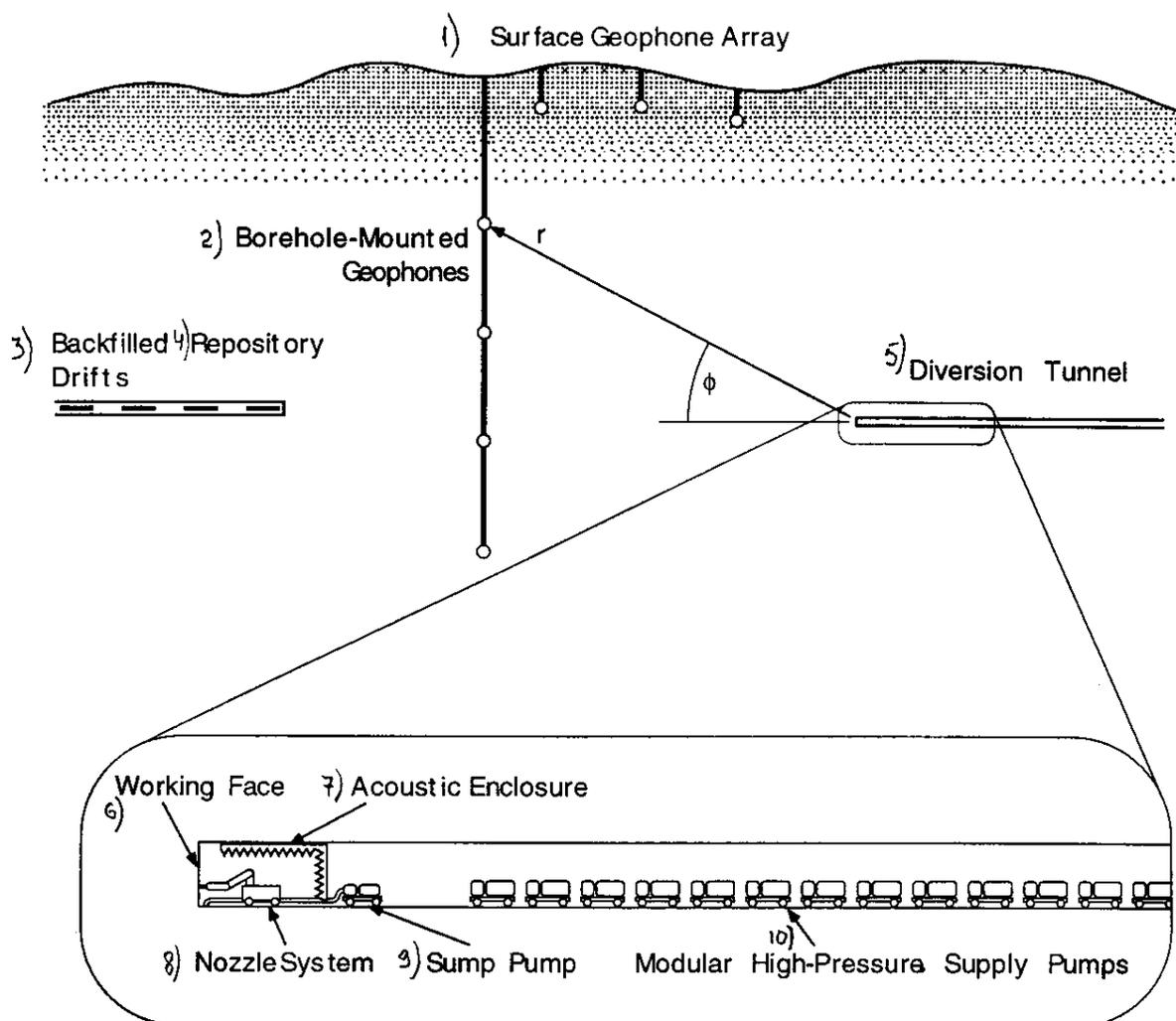


Рис.1 Схематическое изображение гидравлической проходки. 1) сейсмоприемная сеть на поверхности; 2) сейсмоприемники в скважине; 3) засыпанные штольни; 4) хранилище; 5) туннель для хищения; 6) забойная поверхность; 7) акустический экран; 8) система для создания струи; 9) дренажный насос; 10) модули насосов высокого давления.

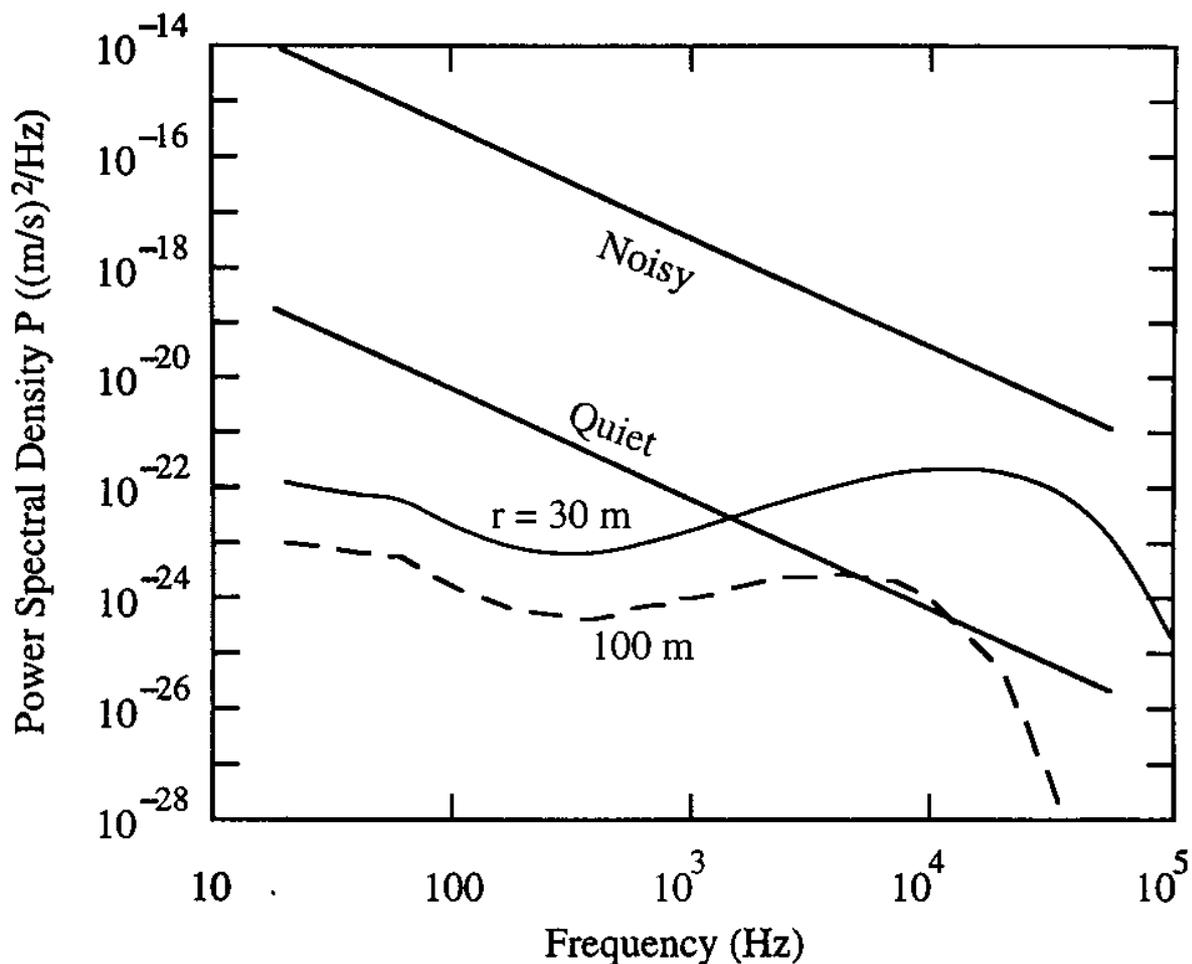


Рис.2. Спектральная плотность мощности в граните с малым затуханием при стандартном ударе водяной струи с силой 10 000 Н и спектр мощности на расстояниях 30 и 100 м (взяты из Рис.А3). Для сравнения приведены типичные спектры мощности окружающего сейсмического шума для твердой подстилающей породы.

Обнаружение деятельности по сооружению туннеля при помощи водяных струй будет зависеть от количества, расположения и чувствительности используемых детекторов, а также от уровня окружающего шума. Акустическое излучение при проходке, имеющее основной интерес, будет соответствовать частотам выше 1 кГц, где окружающий сейсмический шум на типичной станции, расположенной на твердой подстилающей породе вдали от источников человеческой деятельности, можно охарактеризовать относительно простым соотношением, которое дается уравнением (9) Приложения. Эти уровни внешних сейсмических шумов находятся далеко ниже порога чувствительности большинства имеющихся в продаже приборов, но существуют специальные сейсмографы, которые могут обнаруживать сигналы на таком низком уровне²². На Рис.2 и 3 показан типичный диапазон уровней внешних сейсмических шумов, основанных на уравнении (9) Приложения, и это позволяет провести сравнение с предсказываемыми уровнями шумов в стандартном сценарии проходки водяными струями. Кривые для внешних шумов являются приближенными, как и принятые в расчетах значения удельной энергии породы, скорости звука и коэффициента ослабления, так что в

²² Например, сейсмометры, основанные на лазерной интерферометрии A.Araya, et al., "Highly Sensitive Wideband Seismometer Using a Laser Interferometer", Rev.Sci.Instrum., Vol.64,(1993), pp. 1337-1341.

конечном счете окажутся необходимыми эксперименты на конкретных площадках для оценки фактической возможности обнаружить гидравлическую (или термическую) проходку.

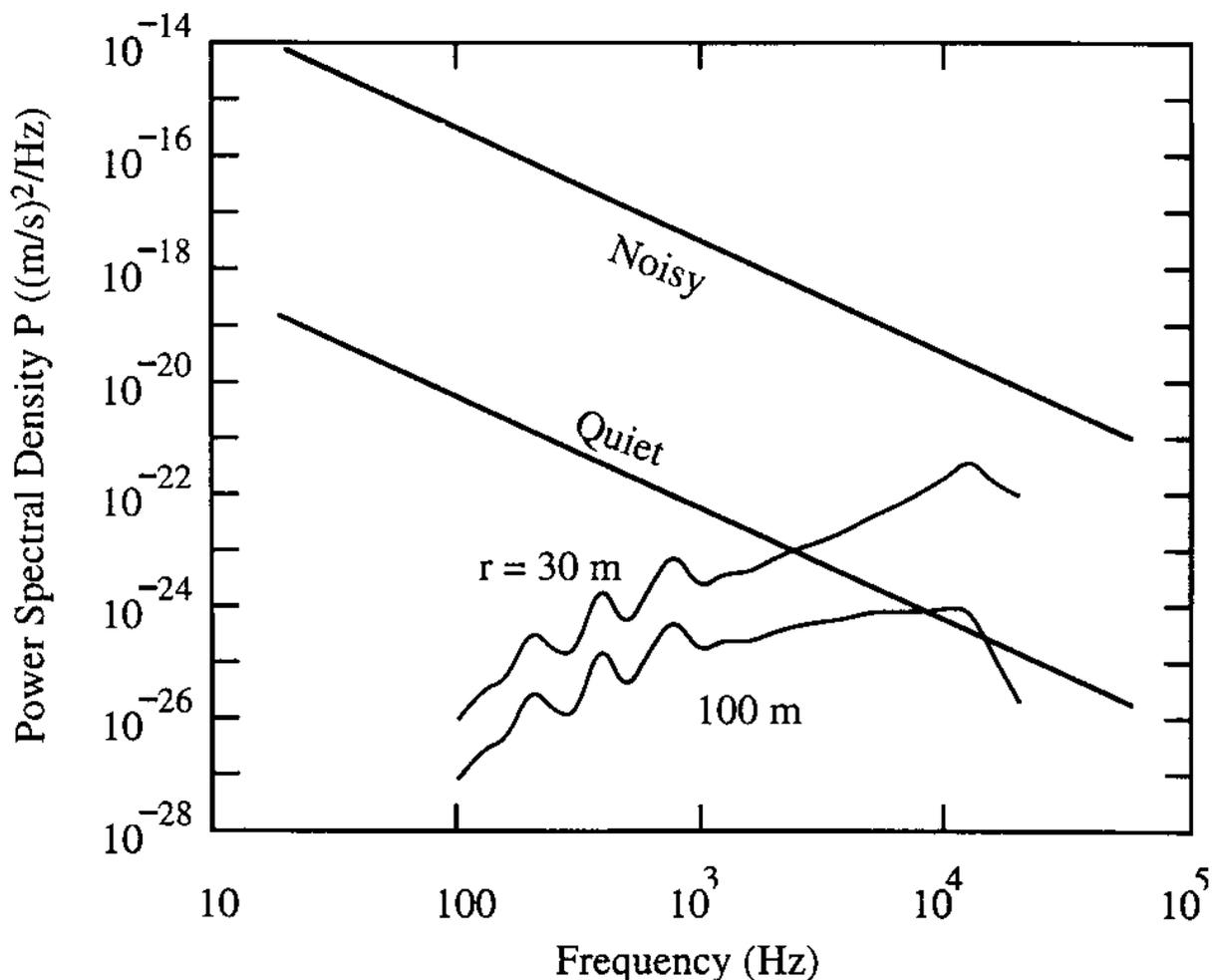


Рис.3. Спектральная плотность мощности, передаваемой в забой стандартного туннеля диаметром 2 м флуктуациями давления воздуха, которые вызваны звуком водяной струи с мощностью спектра, приведенной на Рис.А4, в граните с низким ослаблением на радиусах 30 и 100 м. Для сравнения даны типичные спектры мощности окружающего сейсмического шума в случае твердой подстилающей породы.

Ветер и человеческая деятельность могут увеличить уровни шума вблизи поверхности. Эти поверхностные эффекты затухают на глубине и обычно падают до значений порядка 10% от уровня шума на поверхности на глубине 100 м²³.

При проходке гранита создающая туннель группа может рассмотреть использование возможностей водяных струй для вырезки тонких щелей, чтобы уменьшить требования к удельной энергии и тем самым акустическое излучение при заданной скорости проходки. Эта методика потребует бурения отверстий в забое водяными струями с надежной поддержкой отрезаемого блока, чтобы избежать акустического излучения при падении свободного блока, и последующей прорезки щелей для высвобождения блока. Например, при вырезании блока размером примерно $1.0 \times 0.7 \times 0.7$ м щелями шириной в два см объем гранита, вырезаемого водяными струями, можно уменьшить в 10 раз, что уменьшает эффективную удельную энергию и акустическое излучение также в 10 раз.

²³ Aki, K. and P.G. Richards, Quantitative Seismology: Theory and Methods, (New York: W.H.Freeman and Co.,1980),p.498.

На расстояниях порядка нескольких десятков метров стандартная система водяных струй способна поддерживать акустическое излучение на уровне внешних шумов или даже ниже. Прокладывающая туннель группа скорее всего проверит собственное акустическое излучение путем установки акселерометров внутри неглубоких и небольших скважин на внутренней боковой поверхности туннеля на разных расстояниях от забоя вдоль туннеля. Группа использует либо аналитическую методику, либо данные от тайной программы по разработке системы проходки туннеля, проведенную в местах с аналогичными геологическими средами, для анализа показаний акселерометров и оценки амплитуды микросейсмичности, которую генерирует их собственная проходческая деятельность в самом ближайшем сейсмоприемнике системы гарантийного мониторинга. Так как спектральная плотность мощности увеличивается пропорционально квадрату силы удара водяной струи, которая в свою очередь линейно зависит от количества работающих сопел, группа могла бы управлять собственным акустическим излучением, изменяя число и диаметр режущих сопел и уменьшая при необходимости скорость проходки ниже принятого значения 10 м/день, чтобы попытаться оставаться незамеченной при прохождении мимо следящего за безопасностью сейсмоприемника. Отметим еще раз, что требуемые для такого самоконтроля технические трудности будут относительно малы в сравнении с тем, что надо иметь для разделения изотопов урана или для постройки специального реактора и обеспечения его работы.

Гидравлическая проходка в других средах

Приведенные на Рис.2 и 3 спектры мощности при сооружении в граните туннеля диаметром 2 м со скоростью проходки 10 м/день можно преобразовать к другим геологическим средам, которые рассматриваются для подземных хранилищ. Из уравнения (3) Приложения следует, что при фиксированном давлении P в сопле величина F силы удара о поверхность забоя растет линейно с расходом жидкости q . При заданных значениях скорости проходки и диаметра туннеля величина этой силы пропорциональна удельной энергии проходки. Из уравнения (5) вытекает, что амплитуда смещений, вызываемых этой силой, линейно зависит от силы, обратно пропорциональна плотности и квадрату скорости сжатия. Спектральная плотность мощности, как следует из уравнения (8), пропорциональна квадрату смещения. В Табл.2 дана сводка типичных значений этих параметров для гранита и других сред, что позволяет провести сравнение.

Глинистые сланцы. Водяные струи обычно применяются в больших количествах для открытых разработок глинистых сланцев, где можно получить большие скорости проходки. Используются относительно низкие давления в соплах (0.5-5 МПа) при необходимых удельных энергиях 20-40 МДж/м³, что гораздо ниже значений удельной энергии при гидравлической проходке гранита²⁴²⁴. Относительно низкие давления и удельные энергии для размывания глинистых сланцев подсказывают, что акустическое излучение при гидравлической проходке в этой породе будет на три порядка ниже, чем в граните (см. Табл.2), что делает акустические следы от гидравлической проходки в глинистых сланцах гораздо меньшими, нежели уровни фонового шума даже на близких расстояниях. Энергетические требования для глинистых сланцев также оказываются значительно пониженными, что уменьшает необходимое число насосов, общее энергопотребление и любые тепловые следы от проходческой деятельности.

Соль. Соль растворима в воде. Нет данных о требованиях к удельной энергии при гидравлической проходке соли, но такие энергии будут малы, как и для глинистых сланцев. Относительно высокая скорость волны сжатия в соли делает акустические следы от нее даже меньшими, чем от глинистых сланцев. Это приводит к заключению, что акустическое излучение при гидравлической проходке соли легко можно сделать ниже уровней фонового шума.

Спекшийся туф. Из-за очень малых размеров зерен спекшийся туф может оказаться значительно более устойчивым к резке водяными струями, нежели гранит. В экспериментах Мацуки и др. (давление - 98.1 МПа, расход воды - 2.4 м³/час, диаметр сопла - 1.6 мм) было

²⁴ Jackson, M.K. and T.W. Davies, "Optimization of Nozzle Flow//Head Requirements for China Clay Mining", Seventh Inter. Symposium on Jet Cutting Technology, (Ottawa, Canada, 1984), pp.293-314.

найден, что удельная энергия для насыщенного водой спекшегося туфа Ширакавы составляет 50 000 - 200 000 МДж/м³ в зависимости от давления в насосе и зазора между соплом и стенкой, что примерно на порядок величины выше удельной энергии, требуемой для проходки гранита²⁵. Это приводит к гораздо большим акустическим следам, чем в случае гранита (см. Табл.2), и к значительно большему потреблению энергии. Похоже, что любая попытка использовать водяные струи для проходки спекшегося туфа такого типа потребует использования абразивных частиц для уменьшения удельной энергии. Данные о резке спекшегося туфа водяными струями на Юкка Маунтин отсутствуют. Хотя горизонт предлагаемого хранилища на Юкка Маунтин лежит в спекшемся туфе, лежащие по соседству слои неспекшегося туфа могут быть пройдены при значительно меньших значениях удельной энергии, но пустынная окружающая среда могут сделать более выделяющимися следы, которые связаны с любой гидравлической проходкой. (Группа, сооружающая туннель в граните, который перемежается со слоями более мягких осадочных пород, может рассмотреть вариант сооружения туннеля через эти породы для увеличения как скорости проходки, так и расстояния от входа в туннель до хранилища).

В общем случае, акустические следы от гидравлической проходки в граните и спекшемся туфе гораздо больше следов от проходки в глинистых сланцах и соли. То же самое можно сказать и о механических методах проходки. Энергетические потребности также значительно ниже в случае глинистых сланцев и соли, что приводит к уменьшению размеров оборудования и тепловых следов от проходки. Хранилища в твердых породах обеспечивают гораздо более высокие физические барьеры против скрытной проходки туннелей, чем на участках с глинистыми сланцами и солью.

Экономика гидравлической проходки

Стоимость простейшей (и незасекреченной) щитовой проходки туннеля диаметром 2 м и длиной 2 км оценивалась в 2.5-3 млн. долларов (в ценах 1992 г.)²⁶. Стоимость тайного туннеля в твердой породе при гидравлической проходке будет значительно выше. Цена насосного оборудования для водяных струй составляет 500-775 долларов на кВт гидравлической мощности или 0.9-1.6 млн. долларов для принятой системы насосов с мощностью 2 МВт²⁷. Подходящие сопла для принятой системы (70 МПа, 52 кВт) обладают сроком годности 400 часов и стоят от 40 до 300 долларов за штуку (в ценах 1992 г.)²⁸. Для туннеля длиной 2 км при скорости проходки 10 м/день понадобятся 530 сопел с полной стоимостью 21-160 тысяч долларов. Если выделить 1.5 млн. долларов на четыре шестикоординатных робота и другое вспомогательное оборудование, то полные капитальные затраты на принятую систему гидравлической проходки составят 2.5-3.3 млн. долларов в отличие от капитальных затрат в 1.9 млн. долларов (в ценах 1992 г.) на проходческий щит диаметром 2 м²⁹.

Стоимость энергии составит относительно малую долю от операционных затрат³⁰. В предположении, что число рабочих для щитовой и гидравлической систем проходки совпадает, операционные затраты на гидравлическую проходку будет примерно в 8 раз выше по сравнению с затратами на щите, главным образом, из-за меньшей средней скорости проходки принятой гидравлической системы (0.4 м/час по сравнению с 3.0 м/час для щита). Дополнительные НИРы и иные затраты на сохранение работ по созданию туннеля в тайне могут, в принципе, увеличить стоимость туннеля еще в десять раз. Поэтому грубая оценка за-

²⁵ Matsuki, K.K. Okumura, and H. Nakadate, "Some Aspects of Slot Cutting of Rocks With High Speed Water Jets Both In Air and In Water", 9th International Symposium on Jet Cutting Technology, (Sendai, Japan, October 4-6, 1988), pp.495-511.

²⁶ См. [3].

²⁷ См. [10], p.51.

²⁸ См. [10], p.73.

²⁹ Экстраполяция капитальных затрат на проходческий щит к ценам 1987 г. приведена в US Bureau of Mines, Bureau of Mines Cost Estimating System Handbook: 1. Surface and Underground Mining, IC-9142, United States Department of the Interior, (1987), pp.368-369.

³⁰ Стоимость энергии для принятого сценария составляет 220 000 долларов при 0.1 долл/кВт-час и длине туннеля 5 км ~полная мощность – 4.1 МВт, включая 2 МВт на гидравлику, диаметр туннеля - 2 м, удельная энергия - 5000 МДж/м³.

трат на тайное создание туннеля при помощи гидравлической проходки будет в 80 раз выше затрат на создание туннеля проходческим щитом без всякой скрытности, то-есть примерно 200-240 млн. долларов (в ценах 1992 г.). Такие затраты будут неприемлемо высокими для субнациональных групп, но окажутся в рамках средств, доступных для многих национальных групп. На сооружение туннеля длиной 2 км при скорости проходки 10 м/день пойдет 200 дней без учета времени на НИР и создание помещений на поверхности.

В отличие от хранилищ в твердых породах (гранит и спекшийся туф) хранилища в мягких породах (глинистые сланцы и соль) приведут к гораздо более низкому экономическому барьеру для гидравлической прокладки туннеля, поскольку затраты на проходку, грубо говоря, пропорциональны удельной энергии и они понижаются более, чем на два порядка величины, по сравнению с гранитом. Это обстоятельство вызывает тревогу в связи с тем, что при неадекватном мониторинге с поверхности даже субнациональные группы смогут преуспеть в проходке тайного туннеля для проникновения в хранилище, которое сооружено в мягкой породе.

Для сравнения с хищением плутония из хранилищ укажем, что капитальные затраты на открытое сооружение реактора с тепловой мощностью 400 МВт, способного производить 100 кг плутония в год, с учетом затрат на добычу урана, дробление руды, химическую обработку и производство топлива лежат в диапазоне 1.0-2.2 млрд. долларов (в ценах 1992 г.). Требуются 50-75 инженеров и примерно 150-200 техников для работы в течение 5-7 лет³¹. Тайное сооружение такой реакторной системы и скрытная работа на ней будут трудными и гораздо более дорогими.

Трудно оценить капитальные затраты на специализированную обогатительную установку, поскольку выбор технологии и пути поставки оборудования обладают большей неопределенностью и поскольку наиболее доступная информация связана с очень крупными коммерческими установками, где цена единицы обогащения может быть относительно низкой. Тем не менее, приемлемую оценку затрат можно получить при рассмотрении меньших по размеру коммерческих установок. Стоимость открытой постройки установки с центрифугой, производящей 300 кг высокообогащенного урана в год, может составить от 100 до 500 млн. долларов (в ценах 1992 г.). Если включить стоимость добычи и дробления урановой руды (85 тонн урана в год), ее химического преобразования, исследовательских работ, испытаний, инженерных проблем и запуска, то капитальные затраты вырастут до 160-750 млн. долларов (в ценах 1992 г.).

При скрытном сооружении такой обогатительной установки и хранении в секрете места ее расположения капитальные затраты могут вырасти значительно³².

По сравнению с обогатительными установками или специальными промышленными реакторами скрытный туннель, позволяющий похищать ежедневно две сборки старого отработанного ВРД-топлива, сделает возможным тайное производство плутония с темпами 3400 кг/год³³. Такие темпы окажутся стратегически важными, если в соответствии с соглашениями по контролю над вооружениями размеры арсеналов ядерных стран смогут уменьшиться до нескольких сотен единиц, как это предусматривается рядом аналитиков по вопросам контроля над вооружениями³⁴. Управление по контролю над вооружениями и нераспространению при Министерстве обороны США отметило, что «стремящиеся к ядерному распространению страны, используя конструкции промежуточной сложности, могут создать ядерное

³¹ См. [3], а также Office of Technology Assessment (OTA), *Technologies Underlying Weapons of Mass Destruction*, OTA-BP-ISC-115, U.S. Government Printing Office, (1993), p.156.

³² См. доклад ОТА [31], p.158.

³³ Для старого (с возрастом несколько сотен лет) отработанного топлива можно проводить переработку с умеренными требованиями к экранировке в малозаметных строениях; выделение радиоактивного газа (например, криптона-85 с периодом полураспада 10.76 года) будет незначительным. См. [3].

³⁴ В наиболее последнем исследовании NAS-CISAC рекомендуется последовательное снижение уровня ядерных сил до нескольких сотен боеголовок как в России, так и в США, с оговоркой о необходимости иметь наготове методы верификации, которые с высокой надежностью обнаружат скрытное укрывание или приобретение незаконных ядерных боеголовок. См. National Academy of Sciences, *The Future of U.S. Nuclear Weapons Policy*, (National Academy Press, 1997), p.79.

оружие (на похищенном плутонии реакторного качества) с гарантированной мощностью выше килотонного диапазона, возможно, на основе простого ядерного устройства первого поколения». Передовая ядерная страна, «используя современные конструкции, может создавать ядерное оружие из плутония реакторного качества с надежной мощностью, весами и прочими характеристиками, которые обычно сравнимы с тем, что дает оружие из плутония оружейного качества»³⁵³⁵. В случае старых хранилищ гораздо меньшие радиоактивность и тепловыделение старого плутония хранилищного качества сделают его эффективно и эквивалентно привлекательным в такой же степени, как и плутоний оружейного качества, для национальных групп или даже для передовых ядерных государств.

С учетом возможности иметь очень высокие темпы получения плутония при относительно низких затратах и высокой степени использования плутония хранилищного качества для создания ядерной взрывчатки можно ожидать, что национальная группа внимательно рассмотрит усилия по стратегически значимому, тайному производству ядерного оружия и выделит значительные экономические ресурсы (десятки или сотни миллионов долларов) на разработку технологии скрытной проходки туннелей, если у нее будет доступ к старому хранилищу и если поверхностный мониторинг не будет явно препятствовать скрытной деятельности на поверхности, требуемой для проходки туннеля небольшого диаметра.

Неакустические следы хищения

В этом разделе обсуждаются поверхностные следы, которые могут оставить разные виды деятельности по сооружению туннеля вблизи входа в него, а также человеческая деятельность и природные особенности, обладающие возможностью замаскировать такие следы. Предполагается, что при попытке осуществить скрытное хищение будет использоваться модульное компактное оборудование для проходки туннеля небольшого диаметра, а не крупномасштабное и тяжеловесное туннельное оборудование, которое было использовано при начальном сооружении хранилища.

Использование компактного модульного оборудования для проходки позволило бы доставлять его к входу в туннель на относительно небольших машинах, возможно, даже на пассажирских автомобилях. Вход в туннель должен быть малого размера, скрытый небольшим зданием или растительностью в лесистых местах. Начальная проходка может быть осуществлена вручную с тем, чтобы обеспечить пространство под землей для хранения оборудования и свести к минимуму размер структур, требуемых для укрытия входа в туннель.

Оборудование для проходки плотных пород требует значительной мощности, как минимум, десятков кВт, а скорее всего от сотен кВт до нескольких МВт при более высоких скоростях проходки. Для гидравлических методов потребуются также значительные расходы воды. Такие потребности в энергии и воде окажутся незначительными в районах, где может развиваться легкая промышленность; их даже можно будет, в принципе, скрыть в таких местах, где разрешены отдельные поселения или постройки для ферм и скотных дворов.

Существует множество способов транспортировки и удаления отходов от проходки туннеля. Если группа с низкой технологией работ ведет проходку в мягких породах с помощью лопат в течение нескольких или многих лет, темпы накопления отходов могут оказаться низкими порядка нескольких сотен литров в день³⁶.

При более изощренных и быстрых методах проходки отходы будут образовываться гораздо более высокими темпами, например, порядка 30 кубометров/день для выбранной модели туннеля диаметром 2 м при скорости проходки 10 м/день. Транспортные потоки, требуемые для удаления отходов такими темпами, могут оказаться незначительными в районах с легкой промышленностью; их даже можно будет скрыть в населенной зоне. Транспортировка суспензий с мелкозернистыми отходами пневматическими или гидравлическими

³⁵ DOE Office of Arms Control and Nonproliferation, "Final Nonproliferation and Arms Control Assessment of Weapons-Usable Fissile Material Storage and Plutonium Disposition Alternatives", DOE/NN-0007, (1997), p.41.

³⁶ В сделанном с низкой технологией туннеле длиной 2 км и площадью поперечного сечения 1 кв.м при средней скорости проходки 14 см/день за 40 лет работы будет образовываться по 140 литров отходов в день.

методами может позволить выбрасывать отходы через вход в туннель в подземные трубы. В районе морского побережья или вблизи рек и озер соответствующее водное пространство может быть использовано для тайного захоронения отходов.

При проходке твердых пород методами с малым акустическим излучением требуются большие удельные энергии, хотя в случае гидравлической подрезки породы и отвала блоков эти требования можно значительно уменьшить. При разумных скоростях проходки выделяющееся тепло создаст значительный тепловой след, но при многих законных видах коммерческой и промышленной деятельности будет также выделяться тепло в подобных масштабах. Подземные трубопроводы могут позволить транспортировать нагретую воду на значительные расстояния. Кроме того, для удаления горячей воды можно использовать скважину или близлежащий водный массив. В случае мягких пород (глинистые сланцы и соль) удельные энергии малы и тепловыделения, соответственно, окажется низким.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в этой статье анализ поддерживает следующие выводы:

- Группа, пытающаяся без огласки проникнуть к хранилищу отработанного топлива, выберет туннель небольшого диаметра (скорее всего, не более двух метров), который сильно отличается от туннелей, вырытых для создания начальной конструкции.
- Группа, ведущая скрытную проходку туннеля, выберет компактное модульное проходческое оборудование. Вход в туннель можно будет замаскировать небольшим, не бросающимся в глаза строением.
- Опираясь на ограниченные сведения, доступные из литературы, можно создать сценарий гидравлической проходки гранита водяными струями, при котором на расстояниях в десятки метров акустическое излучение остается на уровне сейсмического фонового шума (при скорости проходки 10 м/день). В результате дополнительных разработок национальная группа могла бы иметь возможность разместить оборудование для термической или гидравлической проходки, которое нельзя будет обнаружить пассивными акустическими методами на расстояниях в несколько десятков метров или ближе.
- Многие виды человеческой деятельности на поверхности, например, легкая промышленность и строительство жилых зданий или ферм, могут скрыть от внешнего наблюдения попытки скрытного сооружения туннелей при помощи компактного модульного оборудования, если только не проводить достаточно строгие проверки на месте.
- Устойчивость мягких пород (глинистые сланцы и соль) к скрытной проходке туннелей окажется гораздо ниже, чем у твердых пород. В мягких породах скорости проходки могут быть значительно выше, а акустическое излучение и тепловыделение на порядки величины ниже. Хищение субнациональными группами гораздо более кажется непосредственно возможным для хранилищ в мягких породах.

Если окажется, что контроль за подземной деятельностью при помощи акустических или иных геофизических методов ненадежен, это будет иметь значительные отрицательные последствия для эффективности контроля за хранилищем, поскольку значительно вырастет площадь, которая должна контролироваться наблюдениями на поверхности. Это наводит на мысль о необходимости дополнительных инженерных устройств и экспериментов для изучения возможности обнаружения методов гидравлической и термической проходки. Такие исследования надо сосредоточить скорее на обнаружении туннелей небольшого диаметра, нежели туннелей большего размера, которые были использованы поначалу для размещения отходов.

Если опираться на проведенный в статье анализ, то будущие заботы по мониторингу хранилищ и их гарантиям можно было бы снизить четырьмя способами.

1. Выбирать площадки с плотными породами (гранит или спеченный туф), с минимумом окружающей растительности и отсутствием водных массивов поблизости для сведения к максимуму технических трудностей при незаявленной проходке туннелей.
2. Выбирать площадки, где будущая наземная деятельность имеет небольшую вероятность с экономической точки зрения (то-есть, малонаселенную местность) и рассматри-

вать требования, чтобы государство-владелец было согласно на постоянное запрещение там любой деятельности, включая сооружение любых наземных или подземных строений за исключением того, что непосредственно требуется для создания хранилища и обеспечения его деятельности, на разумных расстояниях от площадки хранилища (где-то около 15 км). Подготовиться к неограниченным инспекциям на месте на значительно больших расстояниях от хранилища (например, до 40 км) для защиты от долгосрочных попыток создания длинных туннелей.

3. Свести к минимуму количество хранилищ путем создания международных центров хранения отходов с высокой активностью. Хотя большинство стран могло бы найти разумные места для хранилищ на собственной территории, чтобы защитить в будущем здоровье и безопасность населения, у многих из них не найдутся площадки, удовлетворяющие первым двум критериям гарантий. Создание международных центров для размещения отходов поможет также свести к минимуму число хранилищ, за которыми придется следить будущим поколениям. Операции с отходами могли бы позволить размещение отходов с меньшей привлекательностью в хранилищах, которые обладают более низкой защитой от распространения. В качестве стран-хозяев хранилищ для представляющих интерес видов отходов можно указать США, Россию и Китай³⁷.
4. Изучать и развивать процессы обращения с отходами, значительно уменьшающие концентрации изотопов военного качества в хранимых формах отходов, чтобы увеличить массу материала, которую надо будет изъять для получения заданного количества делящегося вещества, а также величину и продолжительность радиационного барьера, защищающего материал.

Эти критерии на выбор площадки обладают возможностью снизить долгосрочные заботы, которые возлагаются на будущие поколения условиями гарантий. Запрет на все наземные и подземные строения, могущие маскировать даже небольшой вход в туннель, позволит непосредственно обнаруживать при помощи периодических спутниковых наблюдений сооружение любых зданий, то-есть явное нарушение страной-хозяином соглашения о гарантиях. Уменьшение концентрации изотопов военного качества в отходах даже в некоторых хранилищах поможет уменьшить привлекательность скрытной прокладки туннелей и сдерживать такие попытки. Можно будет также пересмотреть иные методы размещения, например, на морском дне или на заброшенном острове в океане, которые обеспечат более высокий барьер против незаявленного возврата материала.

Из тех площадок для хранилищ, которые рассматриваются в разных странах, площадка Юкка Маунтин в США наиболее полно удовлетворяет критериям гарантий для твердых пород (спекшийся туф) и имеет низкий экономический потенциал. Площадка с редкой растительностью и редким населением расположена на федеральной территории, где находятся также Невадский ядерный полигон, база ВВС Неллис и участок Бюро по землеуправлению (БЗУ). Ближайшие фермерские земли удалены на 25 км (Амаргоза Дезерт и Оазис Уэлли). В 10 км от площадки на землях, арендованных БЗУ, разводится скот. Шоссе 95 из Лас Вегаса проходит в 20 км от предложенного места хранилища, а ближайшими городками являются Амаргоза Уэлли (22 км) и Битти (30 км). Активные поверхностные и подземные земляные работы ведутся в Бэр Уэлли (20 км), а до этого они проводились в других местах, из которых ближе всего расположены участки в Амаргоза Дезерт (18 км) и Ли (22 км). Национальный парк пустынной фауны и флоры занимает большой участок к востоку от площадки³⁸.

Хотя площадка Юкка Маунтин имеет твердую породу и находится на федеральной территории с низким экономическим потенциалом, потребуются законодательная деятельность для увеличения максимальной массы отработанного топлива, которое можно хранить на этой площадке, чтобы только принять то отработанное топливо, которое существующие

³⁷ Поскольку ядерная промышленность в США очень велика, увеличение емкости планируемого американского хранилища отработанного топлива на 100% позволит поместить в одно хранилище все отработанное топливо, которое произведут все существующие реакторы в тех странах, которые пока что не планируют перерабатывать отработанное топливо.

³⁸ U.S. Department of Energy, Environmental Assessment: Yucca Mountain Site, DOE-RW-0073, Office of Civilian Radioactive Waste Management, (1986), pp.3-7, 3-23, 3-34, 3-35.

американские предприятия создадут за время действия их лицензий. Рекомендации принять также коммерческое отработанное топливо из других стран в долгосрочных целях нераспространения скорее всего натолкнутся на резкое противодействие местной общественности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Я искренне благодарю за пробуждение интереса и обсуждения покойного профессора Невилла Кука, чья статья 1974 г. привела к фундаментальной классификации методов проходки, а также Курта Нехая и Эрни Мажера из Ливермора, давших советы по сейсмическому анализу. Эта работа была проведена при содействии Министерства энергетики США и частично финансировалась Калифорнийским университетом для проведения исследований в Лос-Аламосской национальной лаборатории, а частично Центром по управлению ядерными и токсичными отходами при Калифорнийском университете в Беркли.

ПРИЛОЖЕНИЕ АНАЛИЗ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ПРОХОДКИ В ГРАНИТЕ

При резке породы водяной струей вода под высоким давлением (от десятков до сотен МПа) фокусируется посредством сопел для создания высокоскоростного водяного потока. Когда водяная струя перемещается по поверхности породы, она проникает в имеющиеся трещины, ослабляет поверхности уплотнений, зерен и кристаллов, разрывая щели и вытесняя материал. Когда встречается особенно большое, упирающееся зерно, водяные струи могут проникнуть в пространство вокруг зерна и удалить его, что делает струи, в частности, эффективными при проходке бетона, содержащего очень стойкие вкрапления. Найдено, что вращающиеся водяные струи эффективны для вырезания гранита в открытых карьерах, и их используют в коммерческих целях для вырезания длинных и глубоких щелей шириной, примерно, в 5 см в гранитных блоках. Добавление абразивных материалов может увеличить скорость резания водяными струями в 2-10 раз³⁹.

В зависимости от давления воды, ее расхода, диаметра сопла, расстояния до стенки, скорости проходки и свойств породы удельная энергия, требуемая для проходки гранита, может оказаться в диапазоне 1000-50000 МДж/м³, что гораздо выше энергии, которая потребляется буровыми машинами при прокладке туннелей (10-50 МДж/м³). Значения типичной удельной энергии для гранита группируются вокруг величины порядка 5000 МДж/м³ и эта величина используется нами.

При изучении прокладки туннелей в твердой породе водяными струями предполагалось использование имеющихся на рынке шестиосных роботов для перемещения водяной струи по поверхности породы, что позволяет вести нарезку в той же манере, какая используется на проходческом комбайне. По выдерживающим высокое давление гибким шлангам вода от насосов поступает к системе сопел⁴⁰. Эксперименты по резке только водяными струями показали, что наибольший эффект достигается при использовании меньшего числа сопел при том же расходе из-за увеличения диаметра струй⁴¹. В нашем случае, однако, рассматриваются сопла с относительно малым диаметром, поскольку только для них имеются данные по удельной энергии и звуковому шуму.

В качестве основного варианта в Приложении рассматривается система прокладки туннеля водяными струями с 44 соплами диаметром 1.53 мм, в которые поступает вода под давлением $P = 69$ МПа от насосов при полной гидравлической мощности $q = 2$ МВт. Такие параметры были подобраны, чтобы соответствовать условиям, для которых имеются опытные данные при проходке гранита⁴².

³⁹ Bortolussi, A.S.Yazicci, and D.A.Summers, "The Use of Waterjets in Cutting Granite", 9th International Symposium on Jet Cutting Technology, (Sendai, Japan, October 4-6, 1988) pp.239-254; См. также [10], pp.433-436.

⁴⁰ Vasek, J. and J.Foldyna, "Abrasive Waterjet Cutting of Hard Rocks", Jet Cutting Technology - Proceedings of the 10th International Conference, (Elsevier Science, 1991), pp.413-424.

⁴¹ См. [10], p.453.

⁴² См. Bortolussi [39].

Упомянутые 44 сопла будут разбиты на секции по 11 сопел, установленные на конце четырех плеч шестиосного робота. Если пренебречь потерей давления в насосе, то полная его мощность так связана с объемным расходом Q в каждом из n сопел

$$q = nQP \quad (1)$$

Из ур-ия (1) вытекает, что при выбранном давлении расход воды в каждом из сопел составит $2.4 \text{ м}^3/\text{час}$ (10.6 г/мин), а полный расход - $105 \text{ м}^3/\text{час}$ (466 г/мин). На основе предсказываемой Бортолулли и др.⁴³ производительности такие сопла будут вести проходку гранита с необходимой удельной энергией 5000 МДж/м^3 без добавки абразивов. При мощности насоса 2 МВт и диаметре туннеля 2 м можно будет получить скорость проходки 10 м/день для гранита, если считать, что к.п.д. составляет 90% . Были опубликованы значительно лучшие значения удельной энергии для гранита, иногда меньше 1000 МДж/м^3 ⁴⁴, а это указывает, что система прокладки туннеля водяными струями при оптимизации к местным условиям имеет возможность получить повышенную (до пяти раз) скорость проходки. При использовании абразивов удельная энергия также может стать ниже в $2-10$ раз. Проведенные в Канадской лаборатории подземных исследований работы по проходке скважин большого диаметра водяными струями показали, что местные напряжения и локализация струи могут повысить удельную энергию в $2-5$ раз⁴⁵. В принятом сценарии эта проблема облегчается путем вырезания узкой щели по периферии туннеля при более высокой удельной энергии для ослабления сжимающих напряжений в центральной части, где затем проходка производится при меньшей удельной энергии.

Кроме мощности в 2 МВт , идущей на работу насоса, около 0.4 МВт потребуется на компенсацию потерь высокого давления и еще 0.4 МВт на вспомогательные системы (вентиляторы охлаждения, насосы для откачки), а также 1.2 МВт на систему водяного охлаждения (расчеты даны для туннеля длиной 5 км на глубине до 500 м , при полном расходе воды $230 \text{ м}^3/\text{час}$, диаметре питающих шлангов 0.2 м и диаметре отводящих труб 0.15 м), что приводит к полной мощности 4 МВт . После достижения нагретого района хранилища, где для насыщенного водой гранита температура будет ниже $100 \text{ }^\circ\text{C}$, потребуется еще около 0.1 МВт дополнительной мощности, чтобы удалить тепло и установить приемлемую рабочую температуру в туннеле⁴⁶. При расходе воды $230 \text{ м}^3/\text{час}$ и мощности 4.1 МВт температура воды поднимется на $16 \text{ }^\circ\text{C}$.

Эта мощность (4.1 МВт) будет выбрасываться за пределы туннеля в окружающую среду несколькими возможными методами. Строители могут использовать реку или океан для стока тепла или же градирню. Подземный трубопровод мог бы позволить строителям туннеля локализовать место выброса тепла при относительно большом удалении от входа в туннель. Из-за довольно большой тепловой нагрузки на подземный трубопровод его можно будет обнаружить при инфракрасном контроле, если только он не будет спрятан под шоссе или длинное строение, имеющими другие значения альбедо и другую температуру относительно окружающих предметов, или же не замаскирован достаточно пышной растительностью. Слежение за тепловым излучением в месте, используемом для выброса тепла в воздух или в воду, может позволить обнаружить деятельность по сооружению туннеля, если только этот выброс не будет представлен как результат разрешенной деятельности на поверхности. Относительно малый диаметр отводящих труб выбирается для того, чтобы получить достаточно большую скорость течения воды ($3-4 \text{ м/с}$) и позволить тем самым выносить на поверхность потоками воды выработанные куски породы и оставлять их там для последующего высушивания и скрытного удаления.

⁴³ То же самое.

⁴⁴ То же самое, табл.10.

⁴⁵ См. [11].

⁴⁶ См. [3].

АКУСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ПРИНЯТОМ СЦЕНАРИИ С ГРАНИТОМ

Средняя величина сил, приложенных в точках взаимодействия с поверхностью нескольких струй, определяется изменением импульса n струй, каждый из которых равен произведению массового расхода струи и изменению ее скорости ΔV :

$$F = nm\Delta V = nQ(2\rho P)^{1/2} \quad (2)$$

Если не рассматривать отдачу струи, то изменение скорости воды можно выразить через давление в сопле P и плотность воды ρ как $\Delta V = (2P/\rho)^{1/2}$, что приводит к заключительному виду ур-ия (2). Используя (1), ур-ие (2) можно переписать в виде:

$$F = q(2\rho/P)^{1/2} \quad (3)$$

где подчеркивается преимущество от высокого давления воды P для сведения к минимуму силы взаимодействия F с поверхностью забоя при заданной мощности q . Для принятой системы водяных струй с 44 соплами создается точечная сила 250 Н при полном напоре 10 000 Н.

Водяные струи выделяют сейсмическую энергию прямо в породу из-за флуктуаций точечной силы, вызываемой струями, и при перемещении струи поперек поверхности породы. Мацуки и др.⁴⁷ направляли водяную струю под давлением 49 МПа на датчик давления для изучения флуктуаций давления в стационарной струе. На рис.А1 приведены типичные результаты для струи диаметром 1.6 мм, которые указывают на влияние расстояния L между соплом и поверхностью датчика. При более низких частотах (10-100 Гц) основным источником флуктуации силы служит флуктуация давления в поршневых насосах, используемых для сжатия воды. При меньшем удалении от датчика ($L/d < 50$) флуктуации давления в насосе на частоте 23 Гц, показанные на рис.А1, имеют среднеквадратичную амплитуду порядка 5% от полного давления струи при ударе. Сооружающая туннель группа могла бы использовать оборудование для гидравлического демпфирования, чтобы уменьшить эти низкочастотные флуктуации давления в насосе.

Для струи, проходящей по поверхности породы, дополнительные флуктуации силы струи возникнут из-за изменения передачи импульса от струй по мере того, как они отклоняются в разных направлениях из-за топологии поверхности породы, меняя при этом ΔV . При типичных размерах особенностей на поверхности породы порядка 1 мм и скорости поперечного перемещения струи порядка нескольких см/с частота таких колебаний будет ниже 100 Гц, как и у колебаний в насосе. В приведенном ниже анализе предполагается, что эти низкочастотные компоненты акустического следа будут относительно несущественными по сравнению с высокочастотными компонентами.

При более высоких частотах флуктуации силы водяной струи связаны в основном с гидродинамической неустойчивостью: волнистостью и разрывом струи - хаотическим процессом, который генерирует сигнал с непрерывным спектром частот. При больших удалениях от датчика ($L/d > 80$) аэродинамическое взаимодействие струи с воздухом начинает разрывать струю, значительно увеличивая амплитуду высокочастотных флуктуаций силы. На рис.А2 показаны данные по спектральной мощности при различных расстояниях от датчика, соответствующих временным изменениям ударного давления, которые приведены на рис.А1.

При увеличении расстояния между соплом и датчиком возрастает амплитуда флуктуаций давления на более высоких частотах (свыше 100 Гц), что главным образом связано с ростом гидродинамического разрыва струи и последующим ударом капелек по поверхности датчика.

Сооружающей туннель группе следует скорее всего оптимизировать водяные струи и поддерживать расстояние между соплами и рабочей поверхностью на достаточно низком уровне ($L/d < 80$), чтобы иметь распределение спектральной мощности, аналогичное тому

⁴⁷ См. [25].

(или даже пониженное), что изображено на рис.А2(а) для $L/d = 10$. На рис.А3 приведена функция спектральной мощности, подогнанная под данные рис.А2(а); на графике отложена величина $\Phi(f)$, которая определена следующим образом:

$$\Phi(f) = (F_{rms}/F)^2/f = (p_{rms}/p)^2/f \quad (4)$$

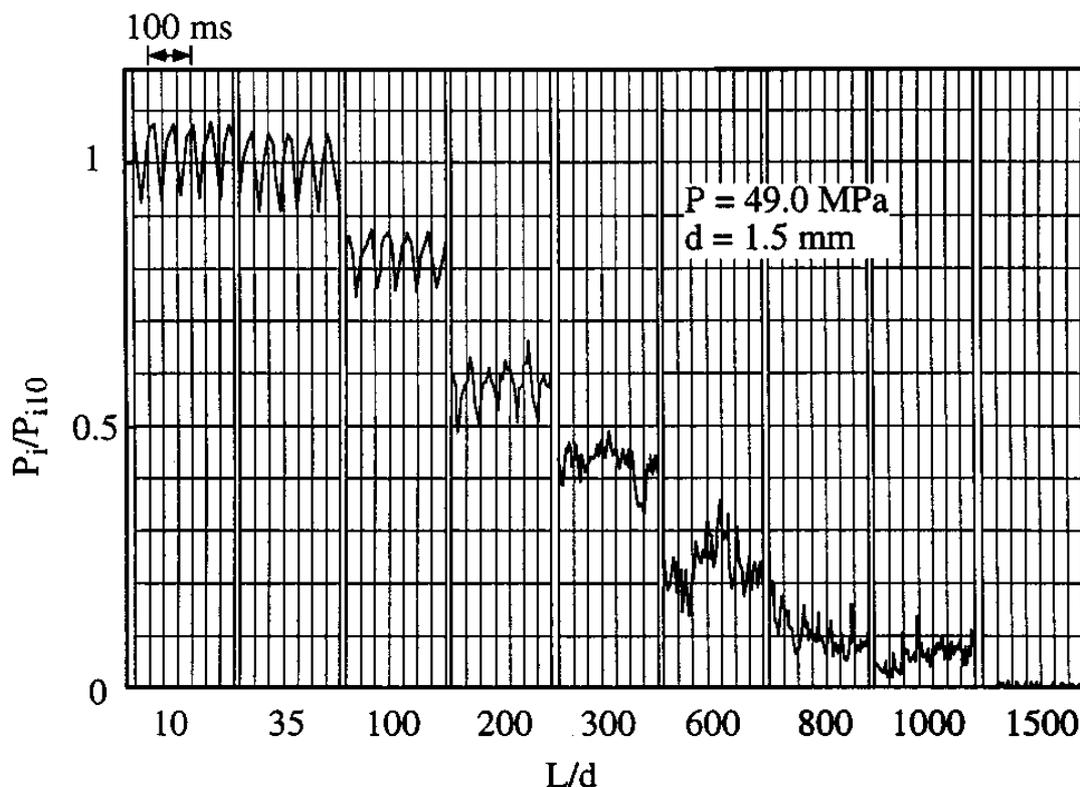


Рис..А1. Изменение во времени типичного ударного давления в водяной струе. Величина давления нормализована на значение, измеренное при удалении L от поверхности датчика на расстояние 10 см⁴⁸.

где p - среднее ударное давление (оно соответствует 49 Мпа на рис.А1), p_{rms} - среднеквадратичная амплитуда флуктуаций давления на частоте f , а F_{rms} - соответствующая среднеквадратичная амплитуда флуктуаций силы на частоте f . Можно дать следующую интерпретацию рис.А3. Например, при $f = 10$ кГц находим, что $F = 3 \cdot 10^{-9} \text{ Гц}^{-1}$. Если рассмотреть полосу частот, равную половине частоты, то среднеквадратичная амплитуда давления на частоте 10 кГц равна $[(3 \cdot 10^{-9} \text{ Гц}^{-1})(5 \cdot 10^3 \text{ Гц})]^{1/2} = 0.004$, то-есть, среднеквадратичная амплитуда флуктуаций давления на 10 кГц равна приблизительно 0.4% от среднего ударного давления.

Смещение от удара водяной струи о забойную поверхность туннеля, которое измерит сейсмограф, можно оценить, если рассматривать флуктуирующую точечную силу, приложенную к бесконечной, упругой и однородной среде. Смещение от давления на расстоянии r от точки приложения силы дается выражением⁴⁹:

$$u = [\cos \varphi / (4\pi r V^2)] F(t - r/V) \quad (5)$$

где V - скорость волн сжатия в породе, φ - угол с вектором силы. Максимальное сжатие происходит вдоль оси приложения силы, когда $\varphi = 0$. Точечная сила приводит также к сдвиговым смещениям, имеющим сходные по величине амплитуды, но с максимумом при $\varphi = 90^\circ$; в данном случае мы рассматриваем только смещения от давления.

⁴⁸ См. [25].

⁴⁹ White, J.E., Seismic Waves: Radiation, Transmission, and Attenuation, (McGraw-Hill, 1965), p.214.

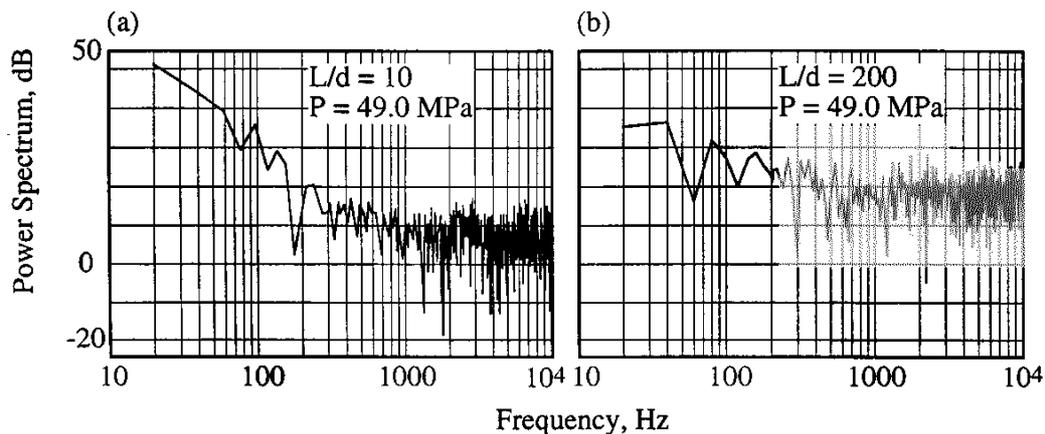


Рис.А2. Спектральная мощность ударного давления для типичной водяной струи при разных расстояниях от датчика⁵⁰.

Силовая функция водяной струи на частоте f в узкой полосе частот Δf имеет вид:

$$F(t-r/V) = R(2\Delta f\Phi(f))^{1/2} \sin[(f/2\pi)(t-r/V)+\theta] \quad (6)$$

где θ - фазовое запаздывание.

Волны сжатия экспоненциально ослабляются с расстоянием как $\exp[-(ar)]$, где коэффициент ослабления дается выражением $a = (\pi f)/(QV)$, а коэффициент Q связан с механическим качеством породы. Среднеквадратичная скорость, наведенная в соседнем сейсмографе ударами водяных струй, может быть найдена путем подстановки (6) в (5), дифференцирования для получения скорости, умножения на коэффициент ослабления для частоты f и усреднения для получения среднеквадратичного значения. Среднеквадратичная скорость вдоль оси приложения силы имеет при этом такой вид:

$$v(f) = [Ff(2\Delta f\Phi(f))^{1/2}/(8\pi^2\rho V^2r)]\exp(-ar) \quad (7)$$

Плотность спектральной мощности P для шумов, вызываемых активностью по сооружению туннеля водяными струями, дается следующим выражением:

$$P(f) = (v(f))^2/\Delta f \quad (8)$$

и измеряется в единицах $(\text{м/с})^2/\text{Гц}$.

На рис.2 показана плотность спектральной мощности, которую предсказывает (8) на расстояниях 30 и 100 м от принятой системы водяных струй с $F = 10\,000$ Н для гранита с $\rho = 2600$ кг/м^3 , $V = 5880$ м/с и при достаточно высоком коэффициенте качества $Q = 250$ (это соответствует слабому затуханию)⁵¹.

Окружающий сейсмический шум на типичной станции, расположенной на основании из твердой породы и удаленной от районов человеческой деятельности, можно описать уравнением⁵²:

$$P(f) = C/f^2 \quad (9)$$

где C может лежать в диапазоне $6 \cdot 10^{-17} - 3 \cdot 10^{-12}$ $(\text{м/с})^2/\text{Гц}$.

⁵⁰ См. [25].

⁵¹ Для полосы частот 4-8 кГц. Эти свойства характерны для гранита по данным Лаборатории подземных исследований канадской компании по атомной энергии (см. [21], стр. 799). Коэффициенты затухания в граните обычно на порядок величины выше (см. [49], стр. 89).

⁵² См. [23], стр. 497. В работе [22] рекомендуется значение $C = (10^{-7}/2\pi)^2 = 2.5 \cdot 10^{-16}$ $(\text{м/с})^2$ для тихих площадок, где ведется обнаружение гравитационных волн.

На рис.2 приведены типичные разбросы уровней внешнего сейсмического шума, вычисленные на основе (9).

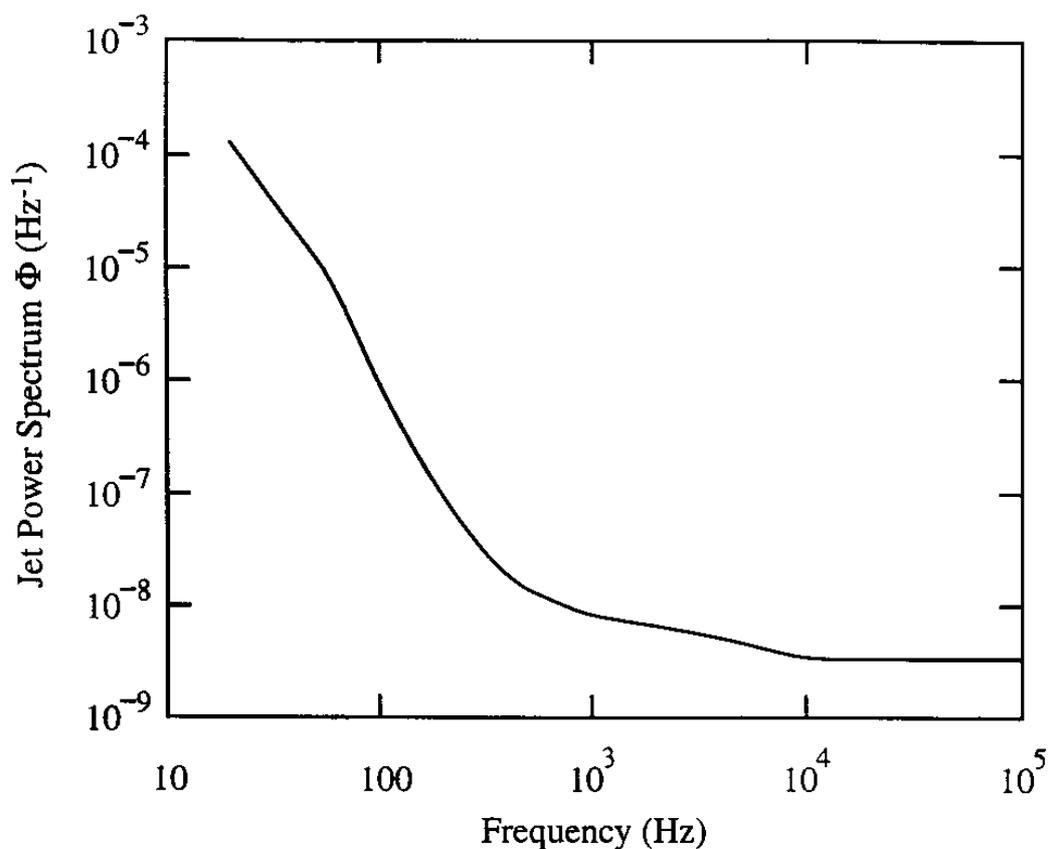


Рис.А3. Спектральная мощность ударного давления в типичной водяной струе⁵³.

Водяные струи и насосы также создают шумы в воздушном пространстве туннеля, которые вызывают флуктуации давления воздуха на поверхности стенок туннеля. Имеется мало информации о шумовых характеристиках систем для резки породы водяными струями. Мерчант и Чалупник⁵⁴ измеряли давление звука на уровне 97.1 дБ (скорректированное значение в свободных условиях равно 100.5 дБ) с пиком спектральной мощности при 10 кГц для промышленной системы водяных струй с абразивными присадками при резке алюминиевых пластин толщиной 1.3 см. Основной вклад в шум дает сама водяная струя, шум от насосов на 20-40 дБ ниже во всей измеряемой полосе частот (100 Гц - 20 кГц). Рис.А4 показывает спектр звуковой мощности L, измеренный во время этих опытов в полосе частот, равной одной трети октавы, при резке струей, попадающей на основание из стальных шариков. Эти уровни шума совместимы с теми, которые, как сообщалось, наблюдались при работе проходческого комбайна с вспомогательными водяными струями для резки более твердых пород (использовались 24 струи диаметром 0.43 мм при полной мощности 112 кВт, причем измерялись шумы в диапазоне 85-107 дБ⁵⁵).

Здесь считается, что передача энергии породе происходит главным образом путем прямой передачи от водяной струи через воздух на незащищенную поверхность забоя. Поскольку источник шумов самой струи расположен очень близко к рабочей поверхности, уро-

⁵³ См. [25]

⁵⁴ Merchant, H.C. and J.D. Chalupnik, "Sound Power Measurement of an Abrasive Water Jet Cutting System", International Conference on Noise Control Engineering, (Cambridge, Mass, 1986), pp.241-244.

⁵⁵ Sato, K., et al., "Development of Roadheader for Harder Rock", 9th International Symposium on Jet Cutting Technology, (Sendai, Japan, 1988), pp.341-356, Table 12.

вень давления звука L на рабочей поверхности является функцией радиального расстояния R от точки приложения струи. Если поверхность плоская и жесткая, то давление звука (в дБ) на радиусе R можно оценить (в МКС-единицах) следующим образом⁵⁶:

$$L_{pr} \cdot 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} = L_w r e 10^{-12} \text{ Вт} - 10 \lg(R^2) - 8 \quad (10)$$

где давление измеряется в единицах $2 \cdot 10^{-5}$ Па, а уровень мощности, выражаемый в дБ, в единицах 10^{-12} Вт.

Флуктуация силы, приложенной к рабочей поверхности, в полосе частот Δf в треть октавы с центром на частоте f может быть оценена путем интегрирования давления по площади до максимального радиуса R_m :

$$F(t) = (8n)^{1/2} \pi R_m (2 \cdot 10^{-5} \text{ Па м}) \text{antilog}((L - 8)/20) \sin(ft/2\pi + \theta) \quad (11)$$

Здесь полная сила, сообщаемая шумами от n водяных струй, находится суммированием квадратов среднеквадратичного вклада каждой отдельной струи. Если шум от струй, действующих по всей поверхности забоя, рассматривать как точечную силовую функцию внутри гораздо большей по размеру изотропной среды, то наведенное в сейсмографе (находящемся на расстоянии r) смещение можно оценить путем подстановки (11) в (5), дифференцирования и учета ослабления на частоте f , что дает для $f = 0$:

$$v(f) = [f R_m n^{1/2} (2 \cdot 10^{-5} \text{ Па м}) \text{antilog}((nL - 8)/20)/(8\pi^2 \rho V^2 r)] \exp(-ar) \quad (12)$$

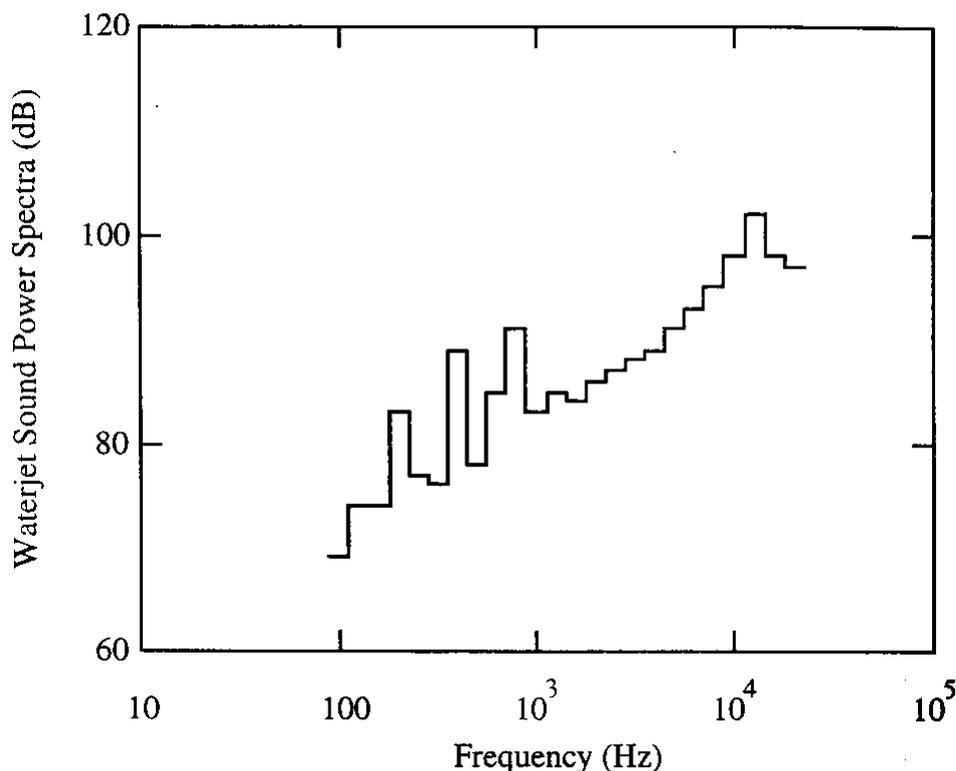


Рис.А4. Спектр звуковой мощности L , измеренный от одной водяной струи при резке алюминиевой пластины толщиной 1.3 см. Прошедшая через алюминий струя попадает в бак с водой или в ловушку.

⁵⁶ Beranek, L.L. and I.L. Ver, Noise and Vibration Control Engineering, (New York: John Wiley and Sons, 1992), pp.165--166, 222-228.

Используя (12) вместе с (8), можно подсчитать плотность спектральной мощности, вызванной n водяными струями в сейсмографе на расстоянии r от рабочей поверхности туннеля. На рис.2 даны результаты этих расчетов для принятой системы с 44 водяными струями в граните, которые основаны на спектре мощности от отдельной струи (см. рис.А3, где значение R равно 1 м - радиусу забойной поверхности туннеля). Как и в случае спектральной мощности от прямого удара водяных струй (рис.2) наиболее вероятной кажется возможность обнаружить акустическое излучение на частотах выше нескольких кГц. Сооружающей туннель группе придется скорее всего свести к минимуму этот источник шумов путем экранирования забойной поверхности для уменьшения эффективного значения R и флуктуаций звукового давления на забойной поверхности туннеля.

Табл.1. Эффективность различных методов проходки⁵⁷.

Метод проходки	Удельная энергия (МДж/м ³)	
	Мягкая	Твердая
Прочность породы на сжатие, МН/м ³		
Механический		
Ручная копка	< 6	-
Бурение и взрыв	6	6
Забивание клиньев		
Долбление	20	80
Проходческий комбайн	20	210
Ударное долбление	-	180
Резка алмазом	-	1120
Гидравлический		
Мягкая порода (сланцы, соль, не-спекшийся туф)	20	-
Крупнозернистая порода (гранит)	-	5000
Мелкозернистая порода (спекшийся туф)	-	50000
Термический		
Тепловое дробление (струя пламени)	-	3000
Плавление (нагреваемые пенетраторы)	-	18000
Испарение (лазеры, плазменные факелы)	-	30000
Примечание: В мягких породах прочность на сжатие лежит в пределах 0-50 МН/м ³ , в твердых - 100-200 МН/м ³ .		

Табл.2. Сравнение усредненных акустических параметров для гидравлической проходки в разных геологических средах⁵⁸.

Порода	E, МДж/м ³	V, м/с	ρ , кг/м ³	K/K _{гр}
Гранит	5000	5880	2600	1,0
Гранит с щелями	500	5880	2600	0,01
Спекшийся туф	500000*	3200	2200	1600
Глинистый сланец	30	2700	2300	0,001
Соль	30**	6000	2200	5·10 ⁻⁵
* Удельная энергия для неспекшегося туфа будет значительно ниже.				
** Данных об удельной энергии для соли нет - здесь использовано среднее значение для сланцев.				

⁵⁷ Взято из [6].⁵⁸ Данные по граниту взяты у Юнга [21], p.799; для сланцев и соли - в работе W.M.Telford, R.E.Sheriff, D.A.Keys, Applied Geophysics, (Cambridge: Cambridge University Press,1976), pp.25,27,257; для туфа - в работе R.S.Carmichael, Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals, (Boca Raton, Florida: CRC Press,1989),p.474.