

ОСОБЕННОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ ДЕТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ГИДРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УЧАСТКА «ЕНИСЕЙСКИЙ» НИЖНЕКАНСКОГО МАССИВА

В. Г. Тесля, А. В. Расторгуев

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 24 ноября 2020 г.

В ближайшие годы начнется строительство подземной исследовательской лаборатории на участке «Енисейский» Нижнеканского скального массива. В связи с этим приоритетной задачей является организация мониторинга состояния недр для получения необходимых параметров массива в ненарушенном состоянии. Особенности гидрогеологических условий скального массива на Енисейском участке диктуют необходимость осуществления поинтервального мониторинга в глубоких скважинах с открытыми стволами с помощью мультипакерных систем. Для определения интервалов мониторинга необходимы детальные исследования разрезов с дискретностью 1–2 м. В статье приводится описание зарубежного опыта детальных исследований на объектах-аналогах, характеризуется применяемое оборудование. Важной частью исследований является интерпретация получаемых данных, методика которой применительно к методу поинтервальных нагнетаний при постоянном давлении дается в статье.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, подземная исследовательская лаборатория, гидрогеологические и гидрохимические условия, мониторинг состояния недр, поинтервальные исследования в скважинах, мультипакерные системы, дифференциальная расходометрия, поинтервальные нагнетания.

Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве (Красноярский край) предусматривает значительный объем работ по изучению и характеристике участка недр «Енисейский», включая зону потенциального влияния ПГЗРО. Особое внимание уделяется изучению гидродинамических и гидрохимических условий массива, без учета которых невозможен прогноз долговременной безопасности ПГЗРО.

Большой объем работ по этому направлению на участке «Енисейский» был выполнен в 2003–2014 гг. в рамках оценочной и поисковой стадий

геологоразведочных работ. В этот период на участке пройдены 24 скважины глубиной от 100 до 700 м, часть из которых вскрывают целевой горизонт, планируемый для захоронения РАО. К настоящему времени из 12 глубоких скважин на участке осталось 8, остальные ликвидированы или подлежат ликвидации по техническому состоянию.

Опытно-фильтрационные работы на предыдущих стадиях выявили неоднородность гидрогеологических свойств массива при весьма низкой проницаемости пород. В гидрогеологическом отношении массив в плане и разрезе характеризуется блоковой структурой с отсутствием или затрудненной гидравлической связью

между блоками. Вследствие этого величина напоров подземных вод в различных частях разреза, а также на одинаковых отметках в плане отличается на десятки метров. Общая тенденция в распределении напоров, отмечаемая авторами исследований [1–3], свидетельствует о их снижении с глубиной, что говорит о нисходящем движении подземных вод.

Однако результаты обработки фактических данных не позволяют однозначно утверждать о снижении напоров с глубиной, поскольку на части скважин, напротив, напоры с глубиной увеличиваются (рис. 1). Эти данные подчеркивают тезис о затрудненной или отсутствующей гидравлической связи между отдельными блоками в массиве. Представленные на рис. 1 данные получены при исследованиях в достаточно длинных интервалах по 50 м, каждый из которых может включать по несколько элементов геологического строения и зон повышенной проницаемости, мощность которых может изменяться от 0,2 до 13 м [4]. Это позволяет предположить наличие в пределах интервалов исследований зон с различными напорами.

Особенностью гидрогеологических свойств массива, отмечаемую авторами отчетов [1–3], является отсутствие связи между модулем трещиноватости и коэффициентом фильтрации пород, что не согласуется с результатами детальных исследований на зарубежных объектах-аналогах [5] и является следствием осреднения данных в длинных интервалах.

Неопределенности в распределении напоров по стволу скважин и зон повышенной проницаемости диктуют необходимость детальных

гидрогеологических исследований, важнейшей целью которых является организация мониторинга скального массива в преддверии начала строительства ПИЛ. Классические подходы к мониторингу подземных вод неприменимы к особым условиям скальных массивов с различным напором в разрезе, когда ствол скважины гидравлически связывает отдельные блоки пород, обуславливая перетоки из одних блоков в другие вследствие разницы напоров. При этом интенсивность и направление перетоков остаются неизвестными. В таких условиях установившийся в стволе скважины уровень воды является осредненной величиной, не привязанной к какому-либо интервалу, и его значения не могут использоваться в прогнозных расчетах.

По этой же причине невозможна интерпретация данных анализа проб воды, отобранных из общего ствола, даже при соблюдении условия отбора. В таких случаях принадлежность пробы к тому или иному интервалу разреза остается неизвестной, что является неприемлемым с учетом важности гидрохимических опробований для обоснования долговременной безопасности захоронения РАО.

Если говорить о мониторинге какого-либо интервала скважины с изоляцией остального ствола, то выбор такого интервала невозможен без предварительных детальных исследований разреза. Поэтому на зарубежных объектах-аналогах выработан единый подход к мониторингу скальных массивов, основанный на поинтервальном мониторинге с помощью мультипакерных систем [5–7]. Эти системы позволяют контролировать одновременно до 8 интервалов в одной скважине, поэтому их установке предшествуют детальные исследования разреза с большой дискретностью для определения интервалов мониторинга.

На участке «Енисейский» поинтервальный мониторинг может и должен быть осуществлен в существующих глубоких скважинах. Особую важность поинтервальный мониторинг приобретает на этапе до начала строительства ПИЛ с целью изучения исходного состояния массива, в том числе для определения фоновых показателей качества подземной воды. В связи с этим первоочередной задачей является выполнение детальных исследований разрезов в существующих скважинах, выбранных для ведения поинтервального мониторинга. Целью подробных исследований является выявление зон и отдельных трещин с наибольшей проницаемостью и определение водопроводимости этих зон, изучение распределения напоров в разрезе с детальностью, достаточной для качественного определения зон перетоков и их направлений

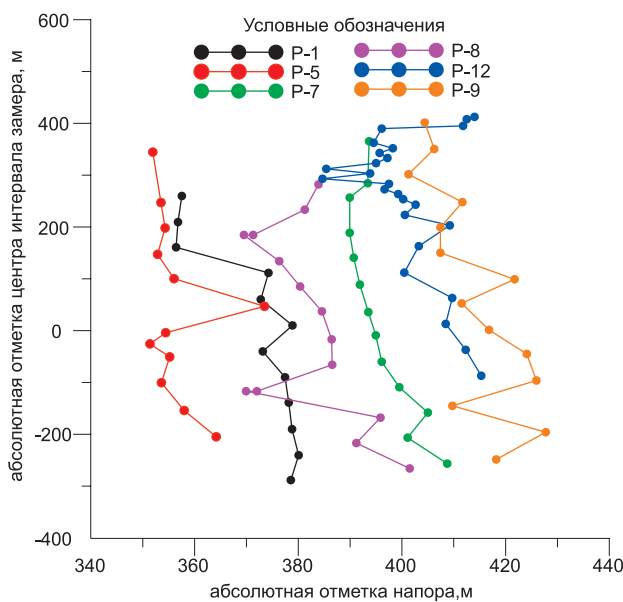


Рис. 1. Распределение напоров по глубине в скважинах участка «Енисейский»

(в скважину или из скважины). Последнее обстоятельство имеет важное значение для выбора интервалов гидрохимического опробования, поскольку отбор проб из интервалов, в которые вода поступает из скважины, не имеет смысла.

Поинтервальные исследования гидрогеологических свойств низкопроницаемых скальных массивов с дискретностью 1–2 м ранее не проводились в России, что заставляет в подобных условиях ориентироваться на зарубежный опыт. Наибольший объем информации о методике и результатах детальных исследований в аналогичных Нижнеканскому массиву геологических и гидрогеологических условиях представлен в материалах компаний Posiva (Финляндия) и SKB (Швеция).

Деятельность компаний Posiva (Posiva Oy and Posiva Solutions Oy) и SKB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company) связана с разведкой и комплексным изучением перспективных площадок для подземного захоронения РАО, осуществлением мониторинга, решением задач оценки долговременной безопасности подземных хранилищ. В Финляндии впервые в мире выдана лицензия на захоронение РАО в ПГЗРО ONKALO на участке Olkiluoto (2016 г.); в Швеции на участке Forsmark, выбранном для создания ПГЗРО, построена ПИЛ, выполнен весь необходимый комплекс исследований и вопрос выдачи лицензии на захоронение РАО находится на рассмотрении в правительстве Швеции.

Исследования скальных массивов в Финляндии ведутся с 80-х годов прошлого века, на середину–конец 90-х годов приходится развитие новых методов и направлений исследований в скважинах, что связано с образованием компании Posiva (1995 г.). Геологическое строение перспективных для захоронения РАО участков в Финляндии аналогично Нижнеканскому массиву. На участке Olkiluoto разрез сложен метаморфическими породами, представленными преимущественно гнейсами различного состава с интрузиями гранитных пегматоидов и диабазовых даек [9]. Разрез изучен до глубин немногим более 1000 м. Основными методами детальных исследований в скважинах являются дифференциальная расходометрия и поинтервальные нагнетания с постоянным давлением.

Гидродинамические исследования

Метод дифференциальной расходометрии

Метод дифференциальной расходометрии и оборудование для его реализации были разработаны небольшой геофизической фирмой PRG-Tec Oy, которая впоследствии была привлечена компанией Posiva для работы на своих объектах

[10, 11]. Метод получил название Posiva Flow Log (PFL). Отличием дифференциальной расходометрии от традиционных методов расходометрии, применяемых в скважинной геофизике, является возможность измерения малых и сверхмалых расходов за счет использования метода термоимпульсов, разработанного Геологической службой США в 80-х годах прошлого века.

В скважинном приборе установлен сенсор расхода, состоящий из трех вертикально расположенных термисторов, средний из которых служит источником термоимпульсов, а два соседних фиксируют распространение температурного фронта, параметры которого напрямую зависят от скорости движения воды. Благодаря наличию двух крайних термисторов появляется возможность одновременно исследовать направление потока.

Прибор позволяет выполнять (рис. 2) дискретные поинтервальные определения гидродинамических параметров трещин в изолированных интервалах открытого ствола скважины, при этом изоляция интервала обеспечивается за счет применения эластичных резиновых дисков. В отличие от изоляции интервалов с помощью разжимных пакеров, применение резиновых дисков существенно сокращает время измерений на одном интервале и исключает силовое воздействие за счет разжимного усилия пакеров на стенки скважины рядом с интервалом измерений. При отсутствии на стенках скважины значительных каверн резиновые диски обеспечивают требуемую изоляцию интервала, в том числе и за счет того, что напоры в изолируемом интервале и в стволе скважины равны, что достигается байпасированием основного потока воды по стволу.

Помимо сенсора расхода прибор оснащен датчиками давления и температуры, датчиком удельной электропроводности воды, электродом токового каротажа.

Основные задачи, решаемые с помощью скважинного прибора:

- идентификация всех проводящих трещин и определение расхода воды в них;
- определение направления движения воды (в скважину или из скважины);
- распределение напоров в стволе скважины;
- определение (расчет) коэффициентов фильтрации трещин;
- распределение температуры воды в скважине;
- определение электропроводности воды в трещинах;
- расчленение пород в разрезе методом токового каротажа.

Прибор опускается в скважину на многожильном геофизическом кабеле, лебедка оснащена



Рис. 2. Схема прибора для дифференциальной расходомерии

системами контроля глубины спуска с использованием механических и оптических счетчиков. Благодаря большой точности, с которой токовый каротаж фиксирует границы различных пород, эти границы являются дополнительными метками для уточнения местоположения прибора в скважине, что важно при сериях последовательных измерений с различными параметрами.

Некоторые характеристики прибора для дифференциальной расходомерии даны в табл. 1.

Измерения расхода осуществляются при ступенчатых перемещениях прибора снизу вверх. На каждом интервале прибор останавливают и после стабилизации скорости потока перемещают на следующий интервал. Время измерения на одном интервале зависит от скорости потока и может составлять 10–15 минут.

Исследования осуществляются в два этапа. На первом прибор перемещают вдоль ствола в статических условиях. На этом этапе обнаруживают интервалы поглощения воды из скважины. На втором этапе в скважине создается фиксированное понижение уровня, обычно 10–20 м, и измерения повторяются.

Представление результатов измерений показано на рис. 3.

Таблица 1. Характеристики прибора

Параметры	Значения
Диаметры скважин	56, 66, 76 мм. Возможно применение в скважинах больших диаметров
Глубина исследуемых скважин	До 1500 м
Длина изолируемого интервала	0,5–2,0 м
Измеряемые расходы	0,1–10 мл/мин (термальные импульсы), 2–5000 мл/мин (постоянный нагрев)
Датчик давления для фиксации статического уровня в интервале	Druck 1830, 200 кПа, точность $\pm 0,1\%$
Датчик температуры	0–40 °С, точность $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$
Датчик электросопротивления воды	0,2–100 см/м, точность $\pm 5\%$
Сопротивление породы (токовый каротаж)	1–100000 Ом
Определяемые параметры	Коэффициент фильтрации, напор в интервалах, положение поглощающих трещин

Метод PFL нашел также широкое применение на объектах СКВ. Исследования выполняются в мелких и глубоких скважинах, причем они повторяются при изменении параметров, фиксируемых мультипакерным мониторингом. В большинстве глубоких скважин результаты PFL дублируются поинтервальными нагнетаниями с постоянным давлением, поскольку последний метод считается более точным при определении водопроводимости интервалов.

Метод поинтервальных нагнетаний

Метод поинтервальных нагнетаний, названный HTU (Hydraulic Testing Unit), и оборудование для его реализации разработаны фирмой Geopros OY, которая выполняет исследования для Posiva. Оборудование предназначено для определения гидродинамических параметров скальных массивов в глубоких скважинах (рис. 4) [12].

Скважинная часть оборудования включает двойной пакер, блок датчиков и электрод токового каротажа. Блок датчиков включает 3 датчика давления, контролирующих давление в секции, над и под ней, датчики температуры и возможных утечек в нагнетательной линии. В блоке датчиков расположен также активный регулятор давления. Нагнетание воды в секцию осуществляется по полиамидной трубке 14/10 мм, по второй трубке 10/6 подается вода для расширения пакеров. Изолированный электрод токового каротажа является вспомогательным элементом для маркировки глубины установки пакеров. Трубки и сигнальные провода расположены

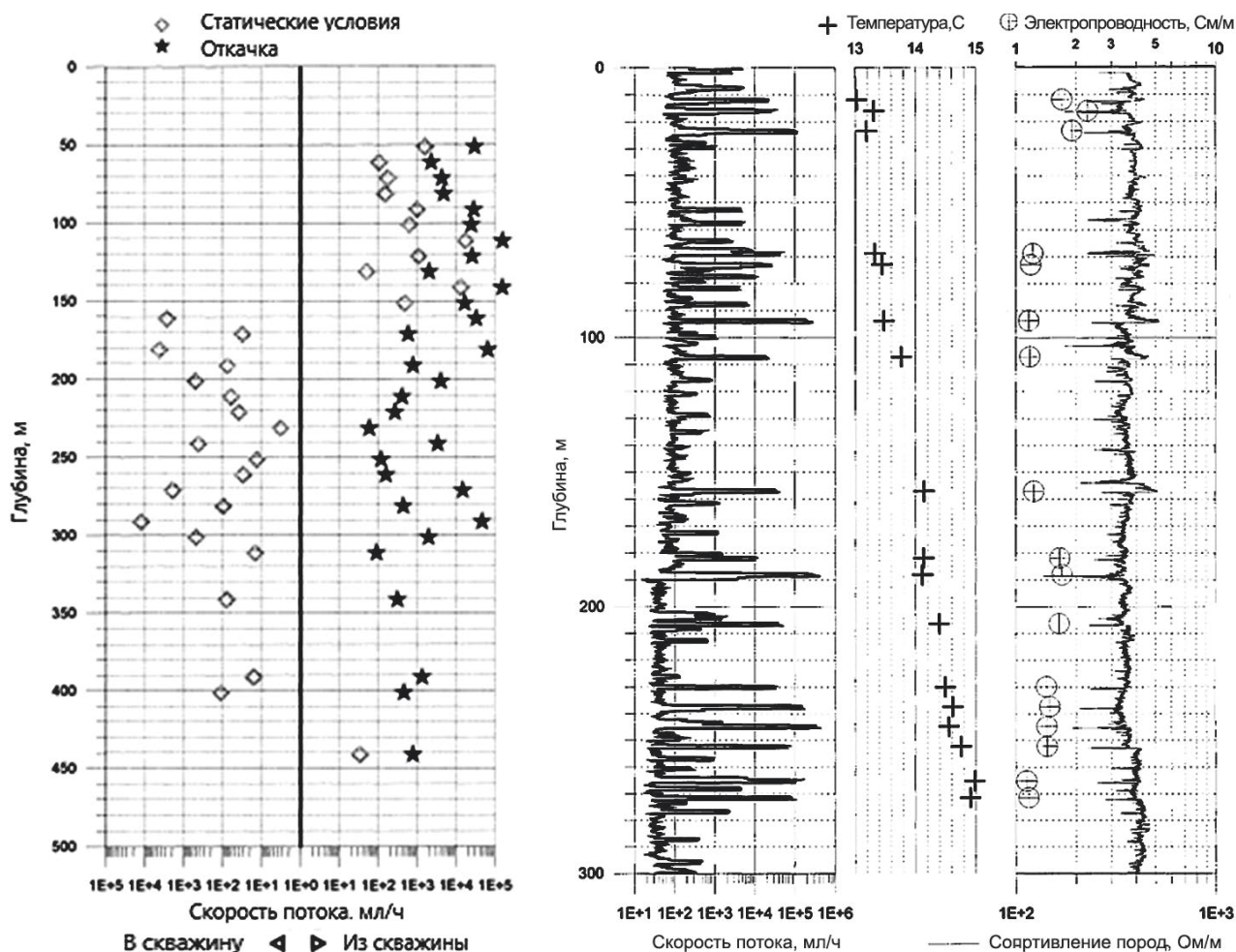


Рис. 3. Результаты дифференциальной расходомерии

внутри умбиликального рукава, диаметр внешней оболочки которого составляет 34,4 мм.

На поверхности земли оборудование размещено в трейлере на шасси стандартной каротажной станции. Оно включает лебедку, блок из четырех автоматически подключаемых расходомеров, компрессор и напорную емкость с водой. Закачка воды в интервал осуществляется из напорной 500-литровой емкости сжатым воздухом.

Оборудование НТУ рассчитано для исследований в скважинах глубиной 1020 м минимальным диаметром 56 мм. Стандартная длина интервала измерения — 2 м, при необходимости может быть увеличена путем наращивания межпакерной штанги. Пределы определяемых коэффициентов фильтрации — $10-10^{-6}$ м/сут, диапазон измеряемых расходов — от 3,6 мл/ч до 468 л/ч. Глубина установки пакеров контролируется с помощью маркеров, нанесенных на умбиликальный рукав через 1 м, а также маркерами более контрастного цвета, нанесенных через 25 м. Кроме того, имеется счетчик длины рукава, установленный на лебедке.

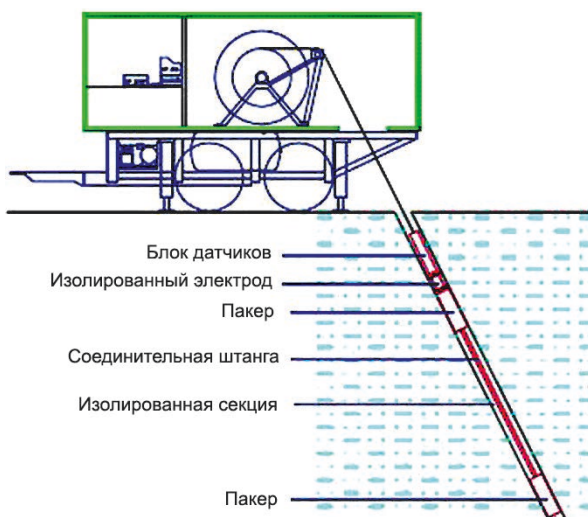


Рис. 4. Схема оборудования НТУ для поинтервальных нагнетаний

Определение гидродинамических параметров интервала основано на интерпретации данных, полученных при наливах с постоянным напором, поэтому поддержание постоянного давления является наиболее значимой функцией

установки. В зависимости от фильтрационных свойств интервала в исследованиях используются два метода поддержания постоянного давления. При средних и относительно высоких значениях коэффициента фильтрации задействуется активный регулятор давления, установленный над верхним пакером и контролирующий падение давления в нагнетательной линии до себя. Регулятор работает достаточно точно при заметном потоке воды через него.

Если падение давления в нагнетательной линии слишком большое, контроль давления становится нестабильным, и в этом случае большое значение имеет начальное давление в напорной емкости, откуда вода поступает в нагнетательную линию. Давление в емкости устанавливается до начала налива в секцию, и его значение определяется оператором, исходя из опыта. Во многих случаях характер стабилизации давления в секции после расширения пакеров дает оператору представление о возможной величине коэффициента фильтрации, исходя из которой он задает начальное давление в напорной емкости.

Типичный график нагнетания в интервал показан на рис. 5.

В шведской компании SKB метод поинтервального нагнетания является основным методом детальных исследований скальных массивов, дифференциальная расходомерия применяется реже, поскольку это требует привлечения финских специалистов. В отличие от оборудования NTU, двойной пакер монтируется на колонне алюминиевых труб $D=33/21$ мм со стальными резьбовыми соединениями с двойным уплотнением. Установка и метод названы PSS (Pipe String System) [13]. Имеется несколько модификаций оборудования — PSS-2, PSS-3 без особых отличий. Схемы наземного и внутрискважинного оборудования показаны на рис. 6.

Спускоподъемная мачта может устанавливаться под любым углом к вертикали, обеспечивая работу в наклонных скважинах. Все оборудование размещено в стальном контейнере с разборной крытой надстройкой для подъема мачты и вырезом в полу для установки над кондуктором скважины.

Максимальная нагрузка, выдерживаемая установкой, составляет 2,2 т. Контейнер разделен на 2 отсека, в одном из которых размещается монтажная установка, трубы, три барабана для многожильного кабеля и полиамидных трубок управления контрольным клапаном и пакерами, напорная емкость, насос, расходомеры и другое оборудование, а во втором размещен компьютер и пульт управления пакерами и контрольными

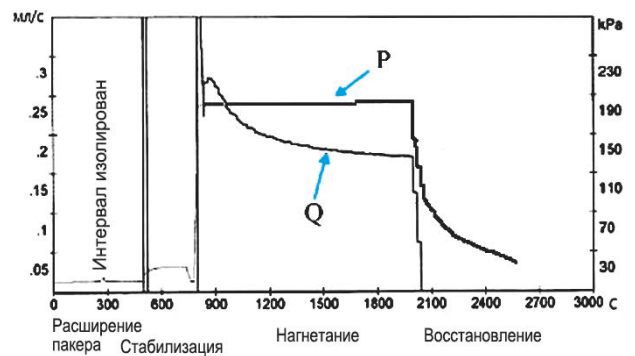


Рис. 5. Типичный график нагнетания в интервал с постоянным давлением

клапанами. Расширение пакеров осуществляется водой из напорной емкости, клапаны для проведения тестов являются соленоидными и управляются программным обеспечением системы сбора данных.

Система закачки воды в интервал включает емкость для воды, насос и расходомеры. При малых расходах нагнетание воды в интервал осуществляется с помощью напорной емкости, подключенной к баллону с инертным газом через регулятор давления. Внутрискважинное оборудование включает три датчика давления, расположенные между пакерами, над и под ними, и датчик температуры. На колонне труб установлены специальные прослабленные соединения, разрывное усилие которых ниже, чем остальных резьбовых соединений. Это позволяет в случае заклинивания пакеров в скважине извлечь колонну труб и часть внутрискважинного оборудования. Конечным элементом является индикатор глубины погружения.

Стандартная процедура налива включает следующие этапы:

- 1) спуск инструмента в конкретный интервал;
- 2) расширение пакеров;
- 3) стабилизация давления после герметизации интервала;
- 4) предварительный импульсный налив;
- 5) нагнетание с постоянным давлением;
- 6) восстановление давления;
- 7) снятие давления в пакерах, перемещение на следующий интервал.

Предварительный импульсный налив осуществляется с целью качественной оценки проницаемости интервала исследований. Для этого после стабилизации давления закрывается контрольный клапан на колонне труб перед верхним пакером, трубопровод вакуумируется, после чего в нем создается избыточное давление воды 20 м над статическим. Клапан открывается и контролируется восстановление уровня. Если восстановление уровня составляет менее 50 % за

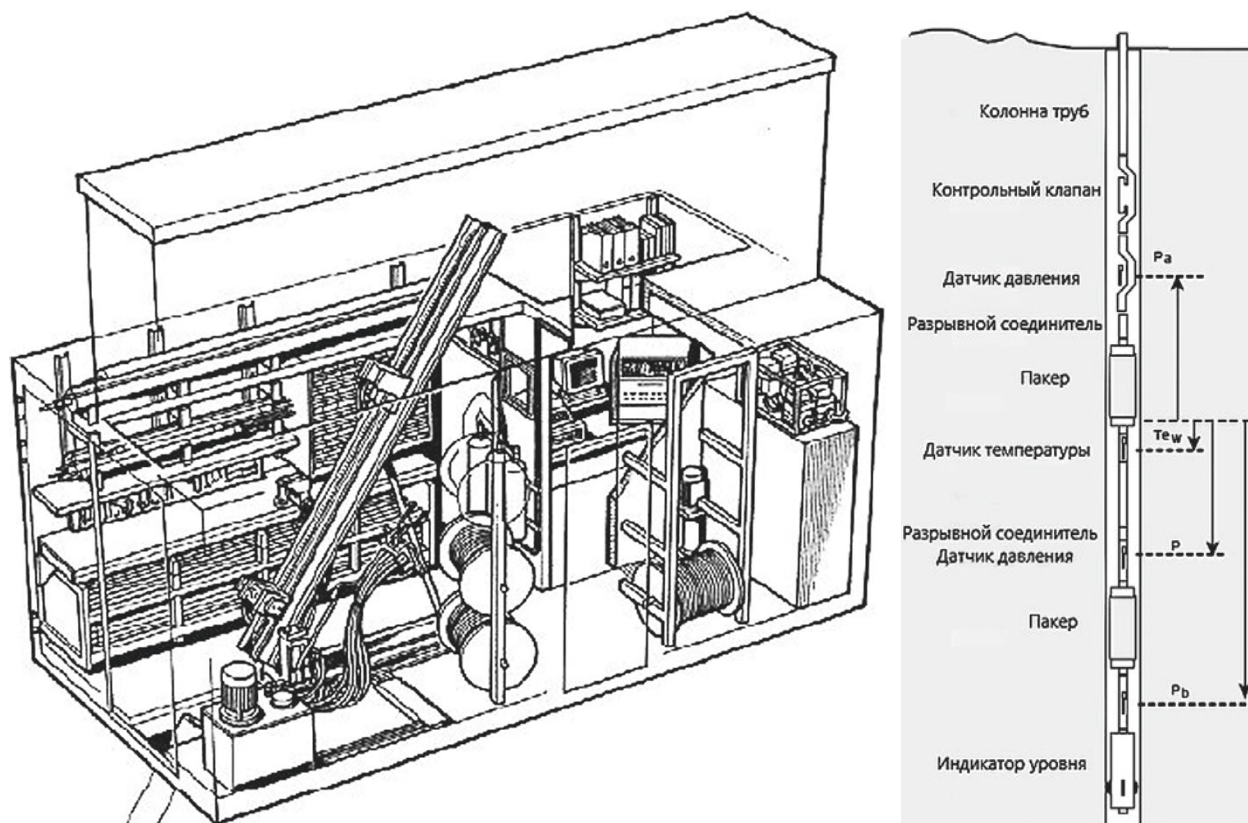


Рис. 6. Схема установки для поинтервальных нагнетаний PSS

первые 10 минут, интервал считается низкопроницаемым и дальнейшее нагнетание воды с постоянным давлением не производится, продолжается прослеживание восстановления уровня. Если интервал более проницаем, следующим шагом является закачка с постоянным избыточным давлением 20 м и контролем расхода, который продолжается около 20–30 мин. Контрольный клапан закрывается и осуществляется запись восстановления давления.

Величина интервалов исследований является стандартной и составляет 100, 20 или 5 м в зависимости от проницаемости и степени изученности разреза в скважине. Время, затрачиваемое на тестирование одного интервала, составляет от 105 минут (100 м) до 70 минут (20 и 5 м) [13].

Интерпретация поинтервальных нагнетаний

Поинтервальные нагнетания широко используются для исследования водопроницаемости скальных пород отечественными гидротехниками и даже регламентируются ГОСТом [14]. Основным результатом этих исследований чаще всего оказывается удельное водопоглощение — качественный параметр, полезный для выделения зон повышенной проницаемости, но недостаточный для выполнения прогнозов. В случае, когда удастся определить коэффициент фильтрации, используют приближенные

зависимости для стационарного режима, не учитывающие историю проведения опыта и период восстановления. В шведской компании SKB отработана методика интерпретации, позволяющая использовать результаты нагнетаний и восстановления, полученные при неустановившемся режиме.

Наиболее простым случаем является нагнетание с постоянным давлением в интервал, соответствующий изолированной трещиноватой зоне значительного простираения (плановые размеры зоны значительно больше радиуса влияния). Решение этой задачи было получено Джейкобом и Логманом [15]. Они же показали, что при относительно небольшой длительности опыта решение для скважины с заданным напором (давлением) аппроксимируется формулой Тейса, логарифмическое приближение которой в данном случае равно:

$$\frac{H}{Q(t)} = \bar{H} = \frac{1}{4\pi T} \left(\ln \frac{t}{r_w^2} + \ln 2,25a \right), \quad (1)$$

где H — избыточный напор в исследуемом интервале, $Q(t)$ — изменяющийся в процессе опыта расход нагнетания, T и a — коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности исследуемого интервала соответственно, r_w — радиус скважины, t — время от начала нагнетания. Для

интерпретации эксперимента по зависимости (1) используется графоаналитический метод. На графике \bar{H} , $\ln(t/r^2)$ экспериментальные данные ложатся на прямую с угловым коэффициентом $C = \Delta\bar{H} / \Delta \ln(t/r^2)$, что позволяет найти водопроницаемость — $T=1/(4\pi C)$ и упругую емкость $S=2,25T(1/r^2)$. Здесь $(1/r^2)_0$ — точка пересечения графика с осью $\ln(1/r^2)$.

В более сложном случае, когда существует сопротивление прискважинной зоны (вызванное, например, технологией бурения), используется решение Харста—Кларка—Брауэра [16]. Решение этой задачи получено в изображениях по Лапласу, и для его использования необходимы обратные преобразования, которые реализуются с помощью программы AQTESOLV [17] вместе с определением параметров методом наименьших квадратов.

Пример представления результатов интерпретации опытных нагнетаний с помощью программы AQTESOLV приведен на билогарифмическом графике (рис. 7). Как видно, на рисунке 7 приведены два графика, один из которых является временным прослеживанием $\bar{H} \div t$ (синие точки), другой (черные точки) $\frac{\partial \bar{H}}{\partial \ln t} \div t$ — диагностический.

Форма графика позволяет выбрать модель и расчетную зависимость для интерпретации опытных нагнетаний. Горизонтальная линия на рис. 7 соответствует изолированному интервалу. В том случае, если интервал не изолирован, а связан с соседним, форма диагностического

графика имеет вид, представленный на рис. 8. Решение для этого случая было получено Хантушем [18].

Для случая изоляции вертикальной трещины диагностический график имеет вид линии, проходящей под углом менее 45° (рис. 9).

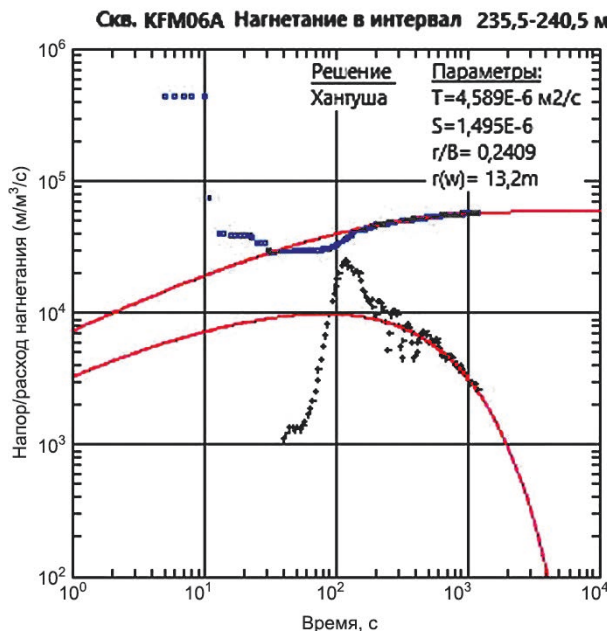


Рис. 8. Результаты интерпретации нагнетания в трещиноватый интервал, связанный с соседним. Схема Хантуша. Синие точки — временное прослеживание, черные точки — диагностический график

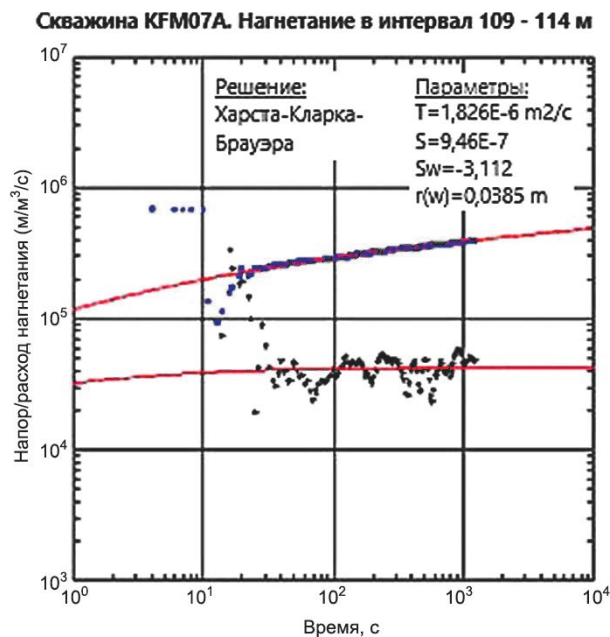


Рис. 7. Результаты интерпретации нагнетания в изолированный трещиноватый интервал с помощью программы AQTESOLV. Синие точки — временное прослеживание, черные точки — диагностический график

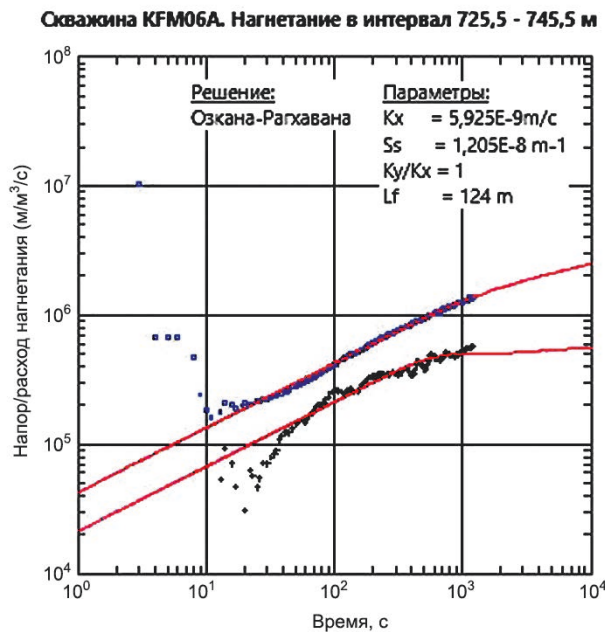


Рис. 9. Результаты интерпретации нагнетания в вертикальную трещину. Синие точки — временное прослеживание, черные точки — диагностический график

Аналитическое решение для нагнетания с постоянным давлением в вертикальную трещину было получено Озканом и Рагханом [19].

Особенностью интерпретации нагнетаний с заданным давлением является период восстановления. В этот период в интервале перестают поддерживать постоянное давление и граничное условие на скважине меняется. Так, если нагнетание интерпретируется на основе решения Хантуша с постоянным давлением, то восстановление — на основе решения того же Хантуша, но с постоянным расходом.

После нагнетаний в различные интервалы и их интерпретации, проводится сопоставление полученных данных для каждой скважины. Главным результатом исследований является выделение интервалов с повышенными фильтрационными свойствами, что необходимо для последующего построения гидрогеологических моделей.

Гидрохимические исследования

Гидрохимический мониторинг является важнейшей частью всей системы мониторинга площадок ПГЗРО, поскольку подземные воды являются основной субстанцией, способной переносить радионуклиды из мест захоронения в наземную биосферу. Кроме того, качество подземной воды в целевом интервале определяет степень потенциального риска коррозионного воздействия на материалы контейнеров и инженерных барьеров. Особое значение придается выбору интервалов гидрохимического мониторинга, что является одной из главных задач предварительных детальных исследований в скважинах.

Основным критерием выбора интервалов гидрохимического мониторинга является приток воды в скважину, а не из скважины. Задача определения интервалов притока воды в скважину легко решается дифференциальной расходомерией, которая одновременно позволяет построить профиль удельной электропроводности воды в различных интервалах. Анализ значений удельной электропроводности воды в интервале, расхода и направления потока облегчает задачу выбора интервала для гидрохимического мониторинга.

При отсутствии возможности проведения дифференциальной расходомерии выбор интервалов гидрохимического мониторинга может быть осуществлен на основе анализа профиля напоров в скважине — интервалы с наибольшими напорами представляют интерес. При равенстве напоров в нескольких

интервалах предпочтение отдается интервалу с наибольшей водопроницаемостью. На зарубежных объектах-аналогах в одной скважине, как правило, не более двух интервалов гидрохимического мониторинга. Причем эти интервалы остаются неизменными на весь период мониторинга. Исключением являются ситуации заметного перераспределения напоров в скважине в результате различных действий в подземном сооружении.

Особое значение на стадии детальных исследований придается определению фоновых показателей качества подземной воды. Критерием откачки из интервала пластовой воды является отсутствие в пробах индикатора (уранина), который является обязательной добавкой в промывочную воду при бурении скважин. Добавка в буровую воду уранина является требованием внутренних нормативных документов компаний Posiva и SKB, что связано с проникновением буровой жидкости в проницаемые зоны пласта при бурении скважин. В последующем при откачке из интервала в первую очередь поступает буровая жидкость, и критерием полного ее удаления является отсутствие индикатора в анализах. Но и при отсутствии индикатора откачки могут продолжаться длительное время до стабилизации какого-либо изменяющегося показателя качества воды.

Учитывая низкие расходы воды в интервалах, откачки могут продолжаться несколько суток до отбора пробы. Из опыта гидрохимического мониторинга на объектах Posiva и SKB, общепризнанный критерий минимального объема откачки для отбора пробы, составляющий 3—5 объемов интервала и трубопроводов, только в редких случаях оказывается достаточным. В большинстве случаев приходится откачивать значительно большие объемы для отбора репрезентативной пробы [20, 21].

Отсутствие каких-либо индикаторов в буровых жидкостях при бурении и расширении глубоких скважин на Енисейском участке осложняет задачу определения достаточного объема откачки из интервалов перед отбором пробы. В таких случаях был бы полезным анализ образцов воды, используемой в качестве промывочной жидкости. По всей видимости, потребуются длительные откачки воды из интервалов с контролем быстроменяющихся показателей качества воды, стабилизация некоторых из них послужит критерием отбора пробы на анализ.

Откачки из интервалов осуществляются мембранными насосами, специально сконструированными для отбора проб из скважин малых

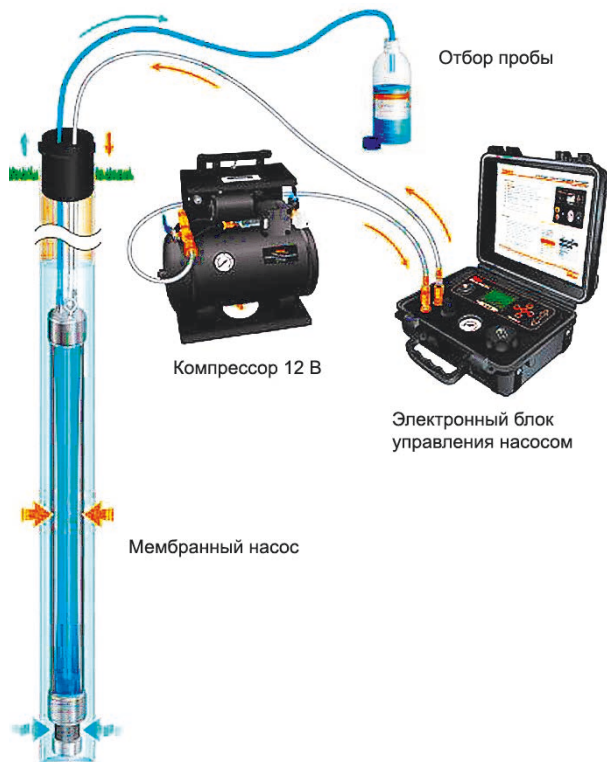


Рис. 10. Общий вид мембранного насоса и элементов управления его работой

диаметров (рис. 10). Насос состоит из двух цилиндров, один внутри другого, внутренний цилиндр перфорирован снаружи. Каждый из цилиндров присоединен к своей полиамидной трубке диаметром 8–10 мм. Трубка внутреннего цилиндра служит для подачи сжатого воздуха, во вторую трубку вытесняется вода из полости между цилиндрами. Полость между цилиндрами снабжена снизу обратным клапаном, второй обратный клапан установлен на входе в трубку подачи воды. Когда насос опущен под уровень воды, пространство между цилиндрами и трубка подачи заполнены водой из интервала. Во внутренний цилиндр нагнетается воздух, расширяя мембрану и вытесняя воду из межцилиндрового пространства в трубку подачи воды. В этот момент обратный клапан на входе в полость между цилиндрами закрывается, а верхний обратный клапан открывается. При сбросе давления воздуха верхний клапан закрывается, а нижний открывается, вода заполняет полость между цилиндрами. Затем циклы повторяются. Управление работой насоса автоматизировано. Насосы изготавливаются диаметрами 25–40 мм и способны откачивать воду с глубины 150 м с производительностью 10–100 л/ч.

Оборудование для отбора проб состоит из двойного пакера, межпакерный интервал которого соединен с полиамидной трубкой диаметром 8–10 мм, которая в свою очередь

присоединена к пластиковой трубке диаметром 30–50 мм и длиной 40–50 м, выходящей на устье скважины. В пластиковую трубку опускается мембранный насос для откачки воды из интервала. Использование для связи интервала с насосом полиамидной трубки существенно сокращает объем воды в системе «интервал – устье скважины» и, соответственно, объем откачиваемой воды.

Подходы к определению интервалов гидрохимического мониторинга и откачивающее оборудование сходны в компаниях Posiva и SKB, отличия имеются во внутрискважинном оборудовании. В компании Posiva с 1997 г. отбор проб осуществляется с применением оборудования PAVE (Pressurized water sampling equipment), которое обеспечивает одновременный отбор до трех образцов воды из одного интервала объемом по 100–150 мл под давлением точки отбора, что важно для анализа газового состава воды [22].

В компании SKB над мембранным насосом установлен контейнер с селективными датчиками Eh, pH, электропроводности, датчиками давления и температуры, а выше – проточный цилиндр для пробы, закрываемый с поверхности земли. Оборудование опускается на устье скважины, обеспечивающем все необходимые коммуникации с устьем скважины [23].

Выводы

В связи с началом в ближайшие годы строительства ПИЛ на участке «Енисейский», особую актуальность приобретает задача организации мониторинга недр в ближней зоне сооружения. Зарубежная практика мониторинга в аналогичных условиях основана на многозонных наблюдениях с применением мультипакерных систем, что диктуется разобщенностью гидрогеологических блоков в разрезе. Выбор интервалов мониторинга в каждой скважине осуществляется по результатам детальных исследований с дискретностью до 1–2 м.

Детальные исследования выполняются с применением эксклюзивного оборудования, сконструированного специально для таких работ и изготовленного в единичных экземплярах. Разработка и изготовление аналогов в России потребует затрат времени, в связи с чем целесообразно на начальном этапе рассмотреть вопрос применения доступного стандартного оборудования. Первоочередной задачей является организация многозонного мониторинга в части существующих скважин в 2021 г. с использованием доступного стандартного оборудования.

Из представленных методов детальных исследований на зарубежных объектах-аналогах наиболее доступным для реализации на участке «Енисейский» является метод поинтервальных нагнетаний при постоянном давлении. Для осуществления детальных исследований потребуется двойной пакер с изменяемым межпакерным расстоянием, высоконапорный насос для нагнетания воды в пакеры, комплект полиамидных трубок, расходомеры малых расходов, устройства поддержания давления и пр. Для исследований в широком диапазоне интервалов потребуется монтаж пакеров на трубах с использованием спускоподъемного механизма соответствующей грузоподъемности.

В составе детальных исследований гидрохимическое опробование интервалов, определенных для этой цели, является обязательным. Для этого монтаж пакеров на колонне труб может быть осуществлен при условии сообщения межпакерного интервала с поверхностью с помощью полиамидных трубок и изоляции трубного объема. Более практичным представляется вариант с монтажом пакерного снаряда на кабеле каротажной станции, лебедка которой позволяет контролировать глубину спуска. Мембранные насосы для откачки также доступны на российском рынке.

Выполнение детальных исследований в ближайшие годы должно сопровождаться поиском специализированных организаций, способных спроектировать и изготовить аналоги оборудования, широко используемого компаниями Posiva и SKB. В первую очередь дифференциального расходомера, существенно облегчающего детальные исследования для определения интервалов многозонного мониторинга, имеющего решающее значение для прогноза долговременной безопасности ПГЗРО.

Заключение

1. Особенности гидрогеологических условий на участке «Енисейский» Нижнеканского скального массива обуславливают необходимость перехода на многозонный мониторинг интервалов с наибольшими значениями водопроницаемости.

2. Для определения интервалов мониторинга в каждой скважине необходимо проведение детальных гидродинамических и гидрохимических исследований. Наиболее доступным методом детальных исследований являются поинтервальные нагнетания с постоянным давлением с дискретностью до 2 метров.

3. Особую важность приобретают гидрохимические исследования в интервалах с

наибольшими напорами для определения фоновых показателей качества воды.

4. Поинтервальные нагнетания являются наиболее достоверным способом выделения интервалов повышенной проницаемости скальных массивов, что необходимо для разработки прогнозных моделей при обосновании безопасности.

Литература

1. Озерский А. Ю., Заблоцкий К. А. Геологические исследования (поисковая стадия) объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов на Нижнеканском массиве (участок «Енисейский») / ОАО «Красноярскгеология», Красноярск, 2010.

2. Озерский А. Ю., Заблоцкий К. А. Геологические исследования (оценочная стадия) объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов на Нижнеканском массиве (участок «Енисейский») / ОАО «Красноярскгеология», Красноярск, 2011.

3. Караулов В. А., Заблоцкий К. А. Геологическое доизучение (оценочная стадия) горного массива участка «Енисейский» для обоснования расширения интервала захоронения радиоактивных отходов до глубин 450–525 метров (+5 – –70 м БС) объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижнеканский массив) / ОАО «Красноярскгеология», Красноярск, 2015.

4. Морозов О. А., Расторгуев А. В., Неуважаев Г. Д. Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 46–62.

5. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2019. Hydrology and Hydrogeology. Working Report 2020-43. Posiva, 2020. 704 p.

6. Installation of Multi-Packer Equipment into Drillholes at Olkiluoto Since 1999. Working Report 2007-59. Posiva, 2007. 55 p.

7. Forsmark site investigation. Hydrochemical monitoring of percussion and core drilled boreholes. P-07-47. SKB, 2007. 49 p.

8. Закон Российской Федерации «О недрах» от 21.02.1992 № 2395-1.

9. Geology of Olkiluoto. 2016-16. Posiva, 2016. 396 p.

10. Komulainen J. Posiva Flow Log (PFL). Tool for detection of groundwater flows in bedrock. Mine Water and Circular Economy, IMWA, 2017, pp. 556–563.

11. Ohberg A., Rouhiainen P. Posiva Groundwater flow Measuring Techniques. Posiva 2000-12, 2000. 83 p.

12. Monitoring Hydraulic Conductivity with HTU at Eurajoki, Olkiluoto, Drillholes OL-KR31 and OL-KR32, in 2011. Working Report 2013-07. Posiva, 2013. 53 p.

13. Method evaluation of single-hole hydraulic injection tests at site investigations in Forsmark, P-07-80, SKB, 2007. 162 p.

14. ГОСТ 23278-2014. Грунты. Методы полевых испытаний проницаемости. М., Стандартинформ, 2015. 31 с.
15. Jacob C. E., Lohman S. W. Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer. Trans., AGU (Aug. 1952), pp. 559–569.
16. Hurst W., Clark J. D., Brauer E. B. The skin effect in producing wells // Journal of Petroleum Technology. 1969. № 11. Pp. 1483–1489.
17. Duffield G. M., 2007. AQTESOLV for Windows Version 4.5 User's Guide, HydroSOLVE Inc., Reston, VA.
18. Hantush M. S. Non-steady flow to flowing wells in leaky aquifer // J. Geophys. Research. 1959. Vol. 64. No. 8. Pp. 1043–1052.
19. Ozkan E., Raghavan R. New solutions for well test analysis; Part 1, Analytical considerations // SPE Formation Evaluation. 1991. Vol 6. No. 3. Pp. 359–368.
20. Groundwater Sampling at Olkiluoto, Eurajoki, from the Borehole OL-KRB during a long-Term Pumping Test in 2003. Working Report 2004–69. Posiva, 2005, 66 p.
21. Hydrochemical monitoring of groundwaters and surface waters. Results from water sampling in the Forsmark area, January–December 2009. P-10-40. SKB, 2010, 224 p.
22. Representativity of Gas Samples Taken with the Pressurized Water Sampling System (PAVE) 1995–2004. Working Report 2005-55. Posiva, 2005, 117 p.
23. Groundwater sampling and chemical characterization of the Laxemar deep borehole KLX02. Technical report 95-05. SKB, 1995, 76 p.

Информация об авторах

Тесля Валерий Григорьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: newwells@yandex.ru.

Расторгуев Александр Владиленович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: alvr9@mail.ru.

Библиографическое описание статьи

Тесля В. Г., Расторгуев А. В. Особенности планирования детального изучения гидродинамических и гидрохимических свойств участка «Енисейский» Нижнеканского массива // Радиоактивные отходы. 2020. № 4 (13). С. 58–70. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-58-70.

FEATURES OF PLANNING A DETAILED STUDY OF THE HYDRODYNAMIC AND HYDROCHEMICAL PROPERTIES OF THE “YENISEISKIY” SITE OF THE NIZHNEKANSKIY MASSIF

Teslia V. G., Rastorguev A. V.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on November 24, 2020

In the coming years, an underground research laboratory will start being constructed at the Yeniseiskiy site within the Nizhnekanskiy rock mass. In this regard, arranging for subsoil monitoring is seen as a priority task to identify the required parameters of undisturbed rock mass. Specific features of hydrogeological setting within the rock mass at the Yeniseiskiy site necessitate interval monitoring in deep wells with open holes using multipacker systems. In-depth studies of sections with a discreteness of 1–2 m are required to identify the monitoring intervals. However, Russia has no hands-on experience in this matter. The article discusses international practice for arranging detailed research at analogue facilities and describes the equipment used. Interpretation of the data obtained is seen as an important part of the research with relevant technique associated with interval injection at constant pressure being discussed in the article.

Keywords: radioactive waste, underground research laboratory, hydrogeological and hydrochemical conditions, subsoil monitoring, interval studies in wells, multipacker systems, differential flow metering, interval injection.

References

- Ozerskiy A. Yu., Zablotskiy K. A. *Geologicheskoye issledovaniya (poiskovaya stadiya) obyektov okonchatel'noy izolyatsii radioaktivnykh otkhodov na Nizhnekanskom massive (uchastok Eniseyskiy)* [Geological Investigations (Prospecting Stage) for Radioactive Waste Final Isolation Facility in the Nizhnekanskiy Rock Mass (Yeniseyskiy site)]. Krasnoyarsk, JSC Krasnoyarskgeologiya Publ., 2010.
- Ozerskiy A. Yu., Zablotskiy K. A. *Geologicheskoye issledovaniya (otsnochnaya stadiya) ob'ekta okonchatel'noy izolyatsii radioaktivnykh otkhodov na Nizhnekanskom massive (uchastok Yeniseyskiy)* [Geological Investigations (Assessment Stage) for Radioactive Waste Final Isolation Facility in the Nizhnekanskiy Rock Mass]. Krasnoyarsk, JSC Krasnoyarskgeologiya Publ., 2011.
- Karaulov V. A., Zablotskiy K. A. *Geologicheskoye doizucheniye (otsnochnaya stadiya) gornogo massiva uchastka Eniseyskiy dlya obosnovaniya rasshireniya intervala zakhroneniya radioaktivnykh otkhodov do glubin 450–525 metrov (+5 – –70 m BS) ob'ektov okonchatel'noy izolyatsii radioaktivnykh otkhodov (Krasnoyarskiy kray, Nizhnekanskiy massiv)* [Additional Geological Studies (Assessment Stage) of the Rock Mass at the Yeniseyskiy Site to Demonstrate the Feasibility of Expanding the Radioactive Waste Disposal Interval to a Depth of 450–525 meters (+5 – –70 m) for Radioactive Waste Final Disposal Facilities (Krasnoyarsk Territory, Nizhnekanskiy Rock Mass)]. Krasnoyarsk, JSC Krasnoyarskgeologiya Publ., 2015.
- Morozov O. A., Rastorguev A. V., Neuvazhaev G. D. *Otsenka sostoyaniya geologicheskoy sredy uchastka Eniseyskiy (Krasnoyarskiy kray)* [Assessing the State of Geological Environment at the Eniseyskiy Site (Krasnoyarsk Territory)]. *Radioaktivnye otkhody – Radioactive waste*, 2019, no. 4 (9), pp. 46–62.
- Results of Monitoring at Olkiluoto in 2019. Hydrology and Hydrogeology*. Working Report 2020-43. Posiva, 2020. 704 p.
- Installation of Multi-Packer Equipment into Drillholes at Olkiluoto Since 1999*. Working Report 2007-59. Posiva, 2007. 55 p.
- Forsmark site investigation. Hydrochemical monitoring of percussion and core drilled boreholes*. P-07-47. SKB, 2007. 49 p.
- Zakon Rossiyskoy Federatsii “O nedrakh” [Law of the Russian Federation “On the Subsoil”] of February 21, 1992, No. 2395-1.
- Geology of Olkiluoto*. 2016-16. Posiva, 2016. 396 p.
- Komulainen J. Posiva Flow Log (PFL). Tool for detection of groundwater flows in bedrock. *Mine Water and Circular Economy*, IMWA, 2017, pp. 556–563.
- Ohberg A., Rouhiainen P. *Posiva Groundwater flow Measuring Techniques*. Posiva 2000-12, 2000. 83 p.
- Monitoring Hydraulic Conductivity with HTU at Eurajoki, Olkiluoto, Drillholes OL-KR31 and OL-KR32, in 2011*. Working Report 2013-07. Posiva, 2013. 53 p.
- Method evaluation of single-hole hydraulic injection tests at site investigations in Forsmark*. P-07-80, SKB, 2007. 162 p.
- GOST 23278-2014. *Grunty. Metody polevykh ispytaniy pronitsaemosti* [Soils. Field methods for determining permeability]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 31 p.
- Jacob C. E., Lohman S. W. *Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer*. Trans., AGU (Aug. 1952), pp. 559–569.
- Hurst W., Clark J. D., Brauer E. B. The skin effect in producing wells. *Journal of Petroleum Technology*, 1969, no. 11, pp. 1483–1489.
- Duffield G. M., 2007. *AQTESOLV for Windows Version 4.5 User's Guide*, HydroSOLVE Inc., Reston, VA.
- Hantush M. S. Non-steady flow to flowing wells in leaky aquifer. *J. Geophys. Research.*, 1959, vol. 64, no. 8, pp. 1043–1052.
- Ozkan E., Raghavan R. New solutions for well test analysis; Part 1, Analytical considerations. *SPE Formation Evaluation*, 1991, vol. 6, no. 3, pp. 359–368.
- Groundwater Sampling at Olkiluoto, Eurajoki, from the Borehole OL-KRB during a long-Term Pumping Test in 2003*. Working Report 2004-69. Posiva, 2005, 66 p.
- Hydrochemical monitoring of groundwaters and surface waters*. Results from water sampling in the Forsmark area, January–December 2009. P-10-40. SKB, 2010, 224 p.
- Representativity of Gas Samples Taken with the Pressurized Water Sampling System (PAVE) 1995–2004*. Working Report 2005-55. Posiva, 2005, 117 p.
- Groundwater sampling and chemical characterization of the Laxemar deep borehole KLX02*. Technical report 95-05. SKB, 1995, 76 p.

Information about the authors

Teslia Valeriy Grigor'evich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (115191, Moscow, Bolshaya Tulskaaya st., 52), e-mail: newwells@yandex.ru.

Rastorguev Alexander Vladilinovich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (115191, Moscow, Bolshaya Tulskaaya st., 52), e-mail: alvr9@mail.ru.

Bibliographic description

Teslia V. G., Rastorguev A. V. Features of Planning a Detailed Study of the Hydrodynamic and Hydrochemical Properties of the “Yeniseyskiy” Site of the Nizhnekanskiy Massif. *Radioactive Waste*, 2020, no. 4 (13), pp. 58–70. (In Russian). DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-58-70.