

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.55-62>

УДК 550.360; 550.361

## Методы подавления свободной тепловой конвекции в водонаполненных скважинах при проведении температурных исследований

Д.Ю. Демежко\*, Б.Д. Хацкевич, М.Г. Миндубаев  
Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Температурные измерения в буровых скважинах широко используются в нефтегазовой геофизике, гидрогеологии, геоэкологии, геокриологии, при эксплуатации гидротермальных ресурсов. Круг задач, которые могут решаться с помощью термометрии, неуклонно растет, при этом растут и требования к точности температурных измерений. Этому однако препятствует явление свободной тепловой конвекции (СТК), возникающее в скважинах при положительном температурном градиенте и вызывающее температурный шум, уровень которого может превышать полезный сигнал.

Долгое время считалось, что течения СТК организованы в виде вертикальной последовательности замкнутых ячеек. На этих представлениях базируются существующие методы подавления конвекции горизонтальными дисками. Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные авторами, показали, что эти представления неверны. Течения СТК образуют вращающуюся спиральную систему восходящих и нисходящих струй, не ограниченную по вертикали. В этих условиях наиболее эффективно и технологично разделение скважины вертикальными полосами полимерной пленки на отдельные сегменты. Другой метод подавления конвекции использует сферические гранулы гидрогеля. Описаны результаты испытаний разработанных устройств подавления СТК в реальной скважине. Их применение позволяет снизить температурный шум в 16-20 раз (с 0,025-0,044 К до 0,002-0,003 К).

**Ключевые слова:** геотермия, термометрия скважин, свободная тепловая конвекция, температурный мониторинг

**Для цитирования:** Демежко Д.Ю., Хацкевич Б.Д., Миндубаев М.Г. (2020). Методы подавления свободной тепловой конвекции в водонаполненных скважинах при проведении температурных исследований. *Георесурсы*, 22(1), с. 55-62. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.55-62>

### Введение

Температурные исследования в скважинах используются для решения широкого круга задач. В научных исследованиях термометрия применяется для оценки плотности глубинного теплового потока при решении проблем глобальной тектоники (Поляк, Хуторской, 2018), температурный мониторинг – для оценки геодинамических процессов (Shimamura и др., 1985; Демежко и др., 2012а, 2012б). Термометрия входит в комплекс разведочных и промыслово-геофизических исследований нефтяных скважин для оценки технического состояния скважин, выделения интервалов заколонных перетоков, зон обводнения, интервалов и профилей притока и др. (Дахнов, 1982). Температурные измерения незаменимы при гидрогеологических (Anderson, 2005; Pehme и др., 2014), геоэкологических, геокриологических исследованиях, при эксплуатации месторождений геотермальных вод.

В последние годы в связи с появлением новых температурных датчиков, распределенных систем измерений (в том числе оптоволоконных), средств регистрации и передачи данных круг задач термометрии значительно

расширился. Наметилась тенденция к переходу от разовых или эпизодических измерений температуры к постоянному температурному мониторингу (Ипатов и др., 2018), разрабатываются методы активной термометрии с использованием греющего кабеля (Валиуллин и др., 2016, Vélez Márquez и др., 2018; Klerikova и др., 2018). При этом значительно повышаются требования к точности температурных измерений. Однако аппаратная точность часто не может быть реализована в реальных скважинных условиях вследствие влияния свободной тепловой конвекции (СТК) жидкости или воздуха. Температурный шум, вызываемый нестационарными конвективными потоками, по своей амплитуде может значительно превышать уровень полезного сигнала.

Очевидно, что технические устройства для подавления температурного шума, чтобы быть эффективными, должны учитывать структуру конвективных течений. В статье показано, как изменились в последнее время представления о структуре течений СТК, и описаны разработанные авторами технические устройства, позволяющие эффективно снижать уровень температурного шума.

### Условия возникновения свободной тепловой конвекции

В водонаполненных буровых скважинах СТК возникает при положительном температурном градиенте.

\* Ответственный автор: Дмитрий Юрьевич Демежко  
E-mail: [ddem54@inbox.ru](mailto:ddem54@inbox.ru)

© 2020 Коллектив авторов

Ее возникновение и характер определяются значением безразмерного числа Рэлея. Для скважинных условий (вертикальный цилиндр):

$$Ra = \frac{g\beta r^4}{\nu a} G, \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\beta$  – коэффициент объемного температурного расширения,  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $a$  – температуропроводность,  $r$  – радиус скважины,  $G$  – температурный градиент. Входящие в это соотношение параметры  $\beta$ ,  $\nu$ ,  $a$ , в свою очередь, зависят от температуры. Критическое число Рэлея  $Ra_{crit}$ , определяющее возникновение конвекции в скважине, лежит в пределах 68-216 в зависимости от отношения теплопроводностей заполняющей скважину жидкости и окружающего ее массива  $\lambda_f/\lambda_m$  (Гершуни, Жуховицкий, 1972):

$$Ra_{crit} = \frac{96}{5(1+7\lambda_f/\lambda_m)} \left[ 3(33+103\lambda_f/\lambda_m) - \sqrt{3(2567+14794\lambda_f/\lambda_m+26927(\lambda_f/\lambda_m)^2)} \right]. \quad (2)$$

Для необсаженной скважины (флюид – вода,  $\lambda_f=0,6$  Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> при 20°C, внешний массив – горные породы,  $\lambda_m=2,5$  Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>)  $Ra_{crit}=154$ , для обсаженной (стальная обсадная труба,  $\lambda_m=74$  Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>)  $Ra_{crit}=212$ .

Из (1) видно, что для снижения числа Рэлея ниже критического уровня необходимо уменьшать характерный размер, в данном случае внутренний радиус скважины.

### Традиционные представления о структуре течений СТК и методах ее подавления

Традиционные методы борьбы с СТК базируются на представлениях о структуре конвективных течений, сложившихся еще в середине прошлого века. Согласно этим представлениям (Van der Merwe, 1951; Diment, Urban, 1983; Cermak и др., 2008; Berthold, Börner, 2008), течения СТК организованы в виде вертикальной последовательности конвективных ячеек (по типу ячеек Рэлея-Бенара в плоском слое), имеющих определенный вертикальный размер (рис. 1а-в), который, в свою очередь, определяет амплитуду температурного шума.

Исходя из этих представлений, были созданы все известные технические средства подавления конвекции

в скважине. Они разделяют скважину по вертикали на отдельные интервалы с помощью пакеров (Beck и др., 1971; Colombani и др., 2016; рис. 1г), либо горизонтальных дисков (Harries, Ritchie, 1981; Vroblesky и др., 2006, Vélez Márquez и др., 2018; рис. 1д-е). Предполагалось, что для эффективного подавления конвекции этот интервал должен быть меньше вертикального размера конвективной ячейки. Однако каков этот размер – неизвестно: до настоящего времени сколь-нибудь убедительных его оценок представлено не было. Применение пакеров весьма трудоемко, а эффективность разделительных дисков признается невысокой (Павлов, 2006).

Известны и более радикальные методы решения проблемы. И.Л. Дворкин и др. (1981) предлагали опускать на исследуемый интервал колонну насосно-компрессорных труб, благодаря чему в значительной степени уменьшается эффективный радиус и, следовательно, число Рэлея. Недостатком метода является высокая стоимость исследований и большая трудоемкость. В (ГОСТ 25358-82, 1982) для подавления свободной тепловой конвекции воздуха в неглубоких (до 5 м) скважинах диаметром более 100 мм предписано после установки датчиков засыпать всю скважину песком или мелким гравием, а в (Klepikova и др., 2018) водонаполненные скважины – сухим гидрогелем. Недостатки этих методов очевидны, а в более глубоких скважинах они просто неприменимы.

### Современные представления и методы подавления СТК

Теоретические и экспериментальные исследования свободной тепловой конвекции в скважине (Миндубаев, Демежко, 2012; Хорошев, 2012; Демежко и др., 2017, 2019) показали, что течения СТК образуют вращающуюся спиральную систему восходящих и нисходящих струй и не ограничены по вертикали (рис. 2).

Учитывая выявленные особенности структуры СТК нами был разработан эффективный метод подавления СТК, основанный на разделении скважины вертикальными полосами из полимерной пленки на отдельные сегменты. Такое разделение, с одной стороны, уменьшает эффективное сечение скважины и число Рэлея, с другой – предотвращает возможность вращения системы (Хацкевич и др., 2019). Возможные реализации этого метода показаны на рис. 3а-б.

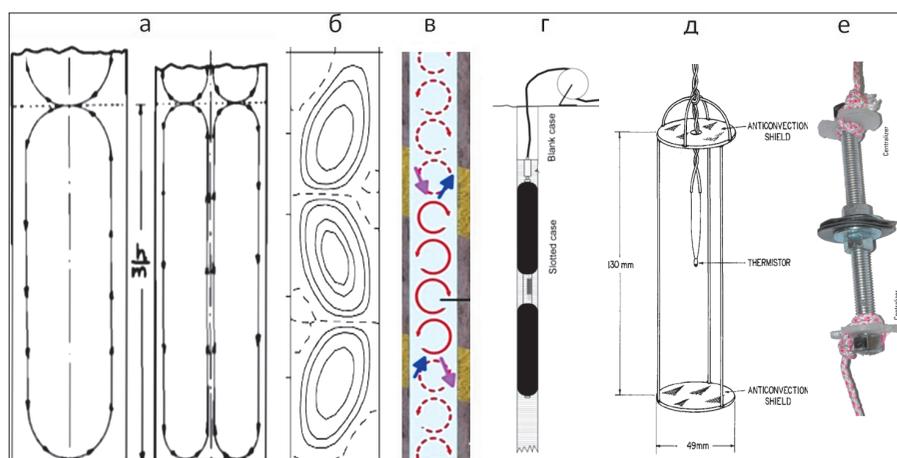


Рис. 1. Традиционные представления о структуре течений СТК (а-в) и методах ее подавления (г-е): а – Vander Merwe, 1951, б – Cermak и др., 2008, в – Berthold, Börner, 2008, г – устройство для подавления СТК с помощью пакеров – Colombani и др., 2016, д-е – с помощью горизонтальных дисков: (д) – Harries, Ritchie, 1981, (е) – Vroblesky и др., 2006.

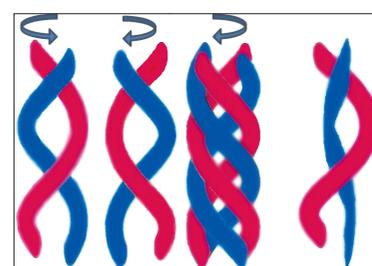


Рис. 2. Спиральные системы восходящих (выделены красным) и нисходящих (синим) потоков свободной тепловой конвекции. Черными стрелками показано направление вращения системы (Демежко и др., 2019).

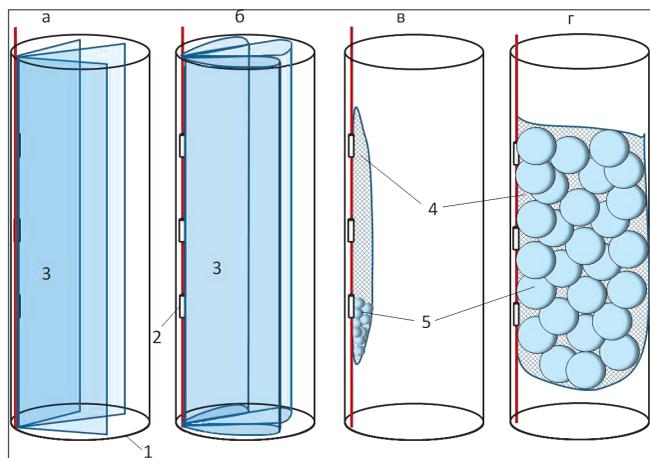


Рис. 3. Методы подавления СТК в скважине: а, б – два варианта реализации метода с помощью полос полимерной пленки (Хацкевич и др., 2019); в, г – с помощью гидрогеля (Хацкевич, Демежко, 2019). Расположение гранул гидрогеля непосредственно после установки кабеля с датчиками в интервале мониторинга (в) и через несколько часов – после набухания гранул (г). 1 – скважина, 2 – кабель с датчиками, 3 – полимерная пленка, 4 – рукав из полимерной сетки, 5 – сферические гранулы гидрогеля.

Методы, основанные на заполнении скважины сыпучим материалом (ГОСТ 25358-82, 1982; Клерікова и др., 2018), достаточно эффективны при проведении длительного температурного мониторинга, но не технологичны. Они подходят лишь для неглубоких скважин и затрудняют, если не исключают вовсе, возможность повторного проведения мониторинга, например, после калибровки. Нами разработан способ, основанный на заполнении лишь ограниченного участка скважины (интервала мониторинга) сферическими гранулами гидрогеля (Хацкевич, Демежко, 2019; рис. 3в-г). Перед установкой в скважине температурных датчиков к кабелю прикрепляют цилиндрический рукав из растягивающейся полимерной сетки с помещенными в него сферическими гранулами гидрогеля. В течение нескольких часов после установки датчиков в скважине сферические гранулы набухают и увеличиваются в размерах в 30-100 раз, растягивая сетку, пока не заполнят все пространство скважины в пределах исследуемого интервала. Так как размеры свободного пространства меньше радиуса сферических гранул, тепловая конвекция полностью подавляется даже в случае больших чисел Рэлея ( $10^5-10^8$ ). В то же время наиболее плотная упаковка сфер (гранцентрированная кубическая и гексагональная) сохраняет пористость  $e = 0,26$ , а при произвольной упаковке она увеличивается до  $e = 0,48$ . Это обеспечивает возможность вертикальных движений столба жидкости в скважине. При извлечении кабеля после проведения мониторинга рукав из полимерной сетки разрывается и гранулы опускаются в отстойник скважины.

### Результаты испытаний

Испытания устройств для подавления СТК проводились в скважине ИГФ-60 глубиной 60 м, пробуренной в 2007 г. на территории Института геофизики УрО РАН (Екатеринбург). До глубины 43 м скважина обсажена стальными трубами: в интервале 0,3-27,0 м – Ø 114 мм (внутренний Ø 105 мм), в интервале 27-43 м – Ø 108 мм.

Ниже, до глубины 60 м, расположен открытый ствол Ø 93 мм. Скважина вскрыла почвенный слой (0-0,3 м), сулинок (0,03-10,0 м), трещиноватое (10,0-43,0 м) и прочное (43,0-60,0) габбро. Уровень грунтовых вод в скважине установился на глубине 5,9-6,5 м.

Температурный мониторинг проводился в период 06.11.2008-25.10.2009 с помощью автономного цифрового 16-канального измерителя температуры (АИТ), разработанного в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука (Казанцев, Дучков, 1992). В качестве датчиков температуры применялись термисторы ММТ-4. 6 датчиков температуры были установлены в скважине ИГФ-60 на глубинах 10; 20; 30; 40; 50; 60 м (ниже уровня грунтовых вод), 4 датчика – в расположенном в метре от нее 4,5-метровом шпуре, в который была вставлена закрытая с нижнего конца и заполненная водой стальная трубка Ø 32 мм (внутренний Ø 29 мм) на глубинах 1; 2; 3; 4,38 м, 3 датчика располагались в почве на глубинах 0,2; 0,3; 0,5 м. Результаты мониторинга до глубины 10 м представлены на рис. 4. Ниже этой отметки температурное поле в течение года практически не менялось, а температурный градиент был близок к нулю.

В годовом цикле положительный температурный градиент (0,08-0,22 К/м) наблюдается в обводненной части скважины на глубинах 6-10 м в конце мая – июне. При  $T = 5^{\circ}\text{C}$  константы, входящие в (1), для воды равны:  $\beta = 1,54 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $\nu = 1,54 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{c}$ ,  $a = 1,32 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{c}$ , а соответствующие температурным градиентам числа Рэлея  $Ra = 450-1200$ . Критическое значение для обсаженной стальной трубой скважины, согласно (2)  $Ra_{cr}$ ,

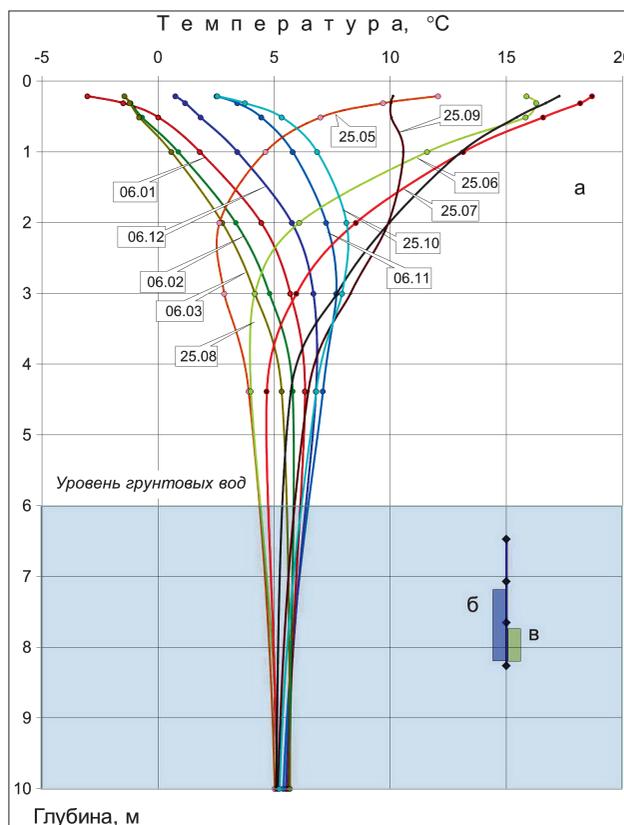


Рис. 4. Результаты температурного мониторинга в скважине ИГФ-60 в ноябре 2008 – октябре 2009 (а) и интервалы установки температурных датчиков и устройств подавления СТК: б – вертикальных пластин, в – сетки с гидрогелем.

равно 212, поэтому в рассматриваемый период на этом интервале можно ожидать развитую свободную тепловую конвекцию.

Испытания устройства для подавления СТК, использующего вертикальные пластины, проходили в конце мая – начале июня 2019 г. На первом этапе в течение недели проводился мониторинг температуры на глубинах 6,47; 7,07; 7,65 и 8,26 м с частотой опроса 30 с. Затем коса с датчиками вынималась и оборудовалась устройством для подавления СТК, состоящим из свернутых полос полиэтиленовой пленки длиной 1 м (рис. 3б, рис. 5 – фото). Середина устройства располагалась у датчика 7,65 м, поэтому соседние датчики не были им перекрыты (рис. 4б). После этого мониторинг продолжался еще 5 суток. Термограммы результатов мониторинга и оценки температурного шума приведены на рис. 5 и в табл. 1.

В условиях свободной тепловой конвекции амплитуда температурного шума составляет  $\sigma = 26\text{--}44$  мК. После установки устройства примерно через 1,5 суток она уменьшается в 6–22 раза – до  $\sigma_p = 2\text{--}4$  мК. Максимальный коэффициент подавления  $k = \sigma/\sigma_p$ , естественно, проявляется на глубине 7,65 м – на участке, перекрытом устройством подавления СТК. Впрочем, и за границами перекрытого интервала температурный шум уменьшается до 2 мК, а на глубине 6,47 м (0,68 м от верхнего края устройства) – до 4 мК.

Интересно, что после установки устройства в его средней части (7,65 м) примерно в течение 1,5 суток происходили температурные колебания, размах которых достигал 70 мК, а период увеличивался с 5 до 10 часов. Эти колебания, но с меньшим размахом, зарегистрировали и соседние датчики. Их природа нам не ясна. Можно лишь предположить появление автоколебательной системы в процессе теплообмена между устройством и окружающим его флюидом. Подобные автоколебания температур наблюдались нами и раньше (Демежко, Юрков, 2017) – они

возникали и продолжались (с периодом 14–26 часов и размахом до 300 мК) в течение нескольких месяцев, а затем внезапно исчезали. При этом никаких дополнительных устройств в скважину не вносилось.

На рис. 6 приведены амплитудные спектры температурных колебаний на глубине 7,65 м до и после установки устройства подавления СТК. Свободная тепловая конвекция наиболее заметно проявляется в диапазоне периодов 5–140 мин. Именно в этом диапазоне происходит наиболее эффективное ее подавление. В колебания с периодами более 12 часов значительный вклад вносят неконвективные факторы, например, связанные с колебаниями температуры и давления атмосферы, осадками. Здесь амплитуды до и после установки устройства сопоставимы. Они также сопоставимы для периодов менее 5 минут – в этом диапазоне температурные колебания уже связаны с аппаратным шумом.

Кроме температурного шума – колебаний относительно среднего для данной глубины значения, свободная тепловая конвекция вызывает долговременный, или квазистационарный, эффект (Демежко и др., 2017). Он выражается в закономерном уменьшении температурного градиента на участке развития конвекции и аналогичен влиянию вынужденной конвекции, например, при циркуляции скважинной жидкости в процессе бурения или промывки скважины (Астрахан, Марон, 1969; Череменский,

Глубина, м	6,47	7,07	7,65	8,26
До подавления, $\sigma$ , К	0,0271	0,0409	0,0440	0,0262
После подавления, $\sigma_p$ , К	0,0044	0,0021	0,0020	0,0019
Коэфф. подавления, $k = \sigma/\sigma_p$	6,1	19,2	21,8	13,5

Табл. 1. Амплитуды температурного шума (среднеквадратические отклонения остатков от сглаживания термограмм 6-часовым фильтром) в скважине ИГФ-60 до и после подавления СТК с помощью вертикальных пластин

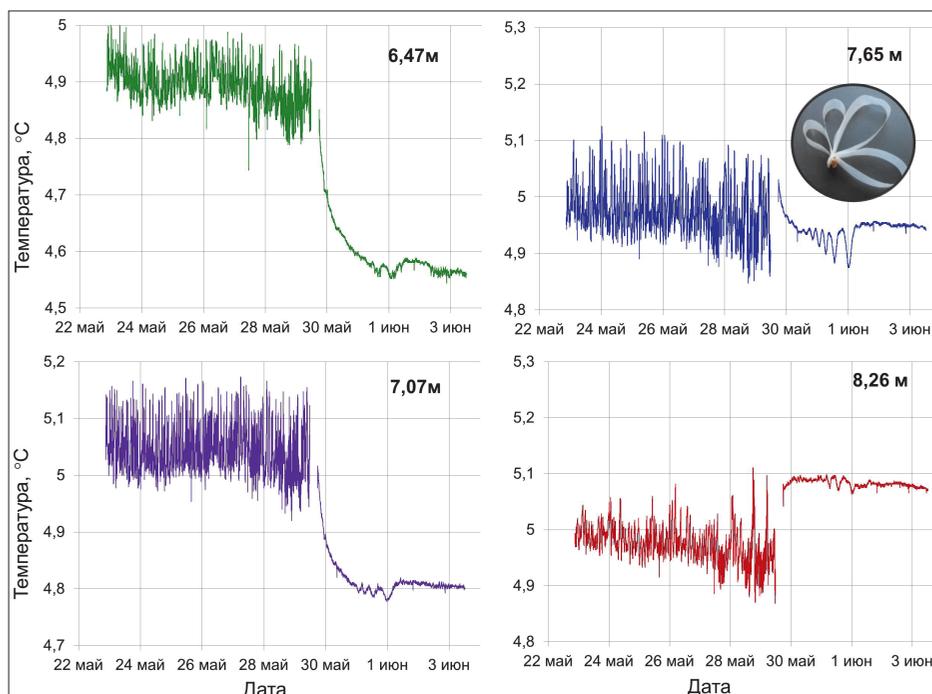


Рис. 5. Результаты температурного мониторинга в скважине ИГФ-60 при испытаниях устройства подавления СТК на основе вертикальных пластин. В правом верхнем углу – фото устройства в разрезе.

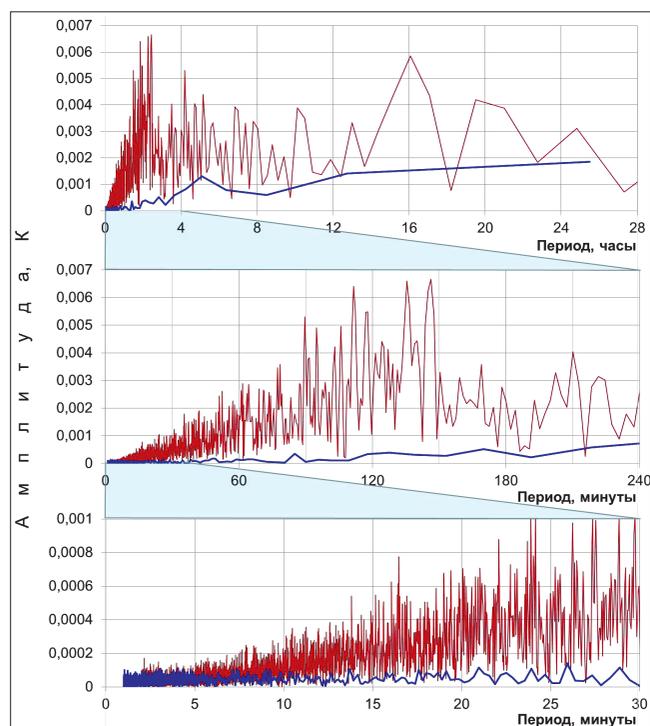


Рис. 6. Спектральный состав температурного шума без подавления конвекции (красный) и после подавления (синий)

1977; Sass и др., 1992). Математическое моделирование (Демежко и др., 2017) показало, что максимальное уменьшение градиента в скважине в сравнении с градиентом в окружающих породах наблюдается у верхней и нижней границ скважины, в то время как в средней части он сохраняется близким к породному. Значительные искажения средних температур горных пород отмечались как раз при измерениях в неглубоких скважинах (Павлов, 2006, и ссылки в этой работе).

В нашем случае измерения проводились в верхней части скважины, вблизи границы вода/воздух, и здесь также следовало ожидать проявления квазистационарного термического эффекта конвекции. Из рис. 5 видно, что после установки устройства подавления СТК температурные профили расходятся: датчики, установленные выше устройства, регистрируют снижение температуры, ниже – повышение, а датчик, расположенный на середине устройства, на глубине 7,65 м не меняет температурного тренда. На рис. 7а приведены усредненные вертикальные температурные профили, зарегистрированные в скважине ИГФ-60 до и после установки устройства подавления СТК. В условиях развитой конвекции средний измеренный температурный градиент составлял 0,03 К/м, а после подавления конвекции он вырос до 0,28 К/м – т.е. до его реального значения в горных породах. При  $T = 4,9^{\circ}\text{C}$  такому градиенту соответствует  $Ra = 1400$ . Отметим, что при среднем градиенте 0,03 К/м ( $Ra = 150$ ) конвекция не должна была возникнуть.

В доказательство того, что подавление СТК с помощью рассматриваемого устройства позволило оценить реальный геотермический градиент, рассмотрим зависимость между амплитудой температурного шума и градиентом. Эта зависимость  $\sigma/r \approx 3G$  была нами предложена по результатам математического моделирования СТК (Демежко и др., 2017) и подтверждена лабораторными

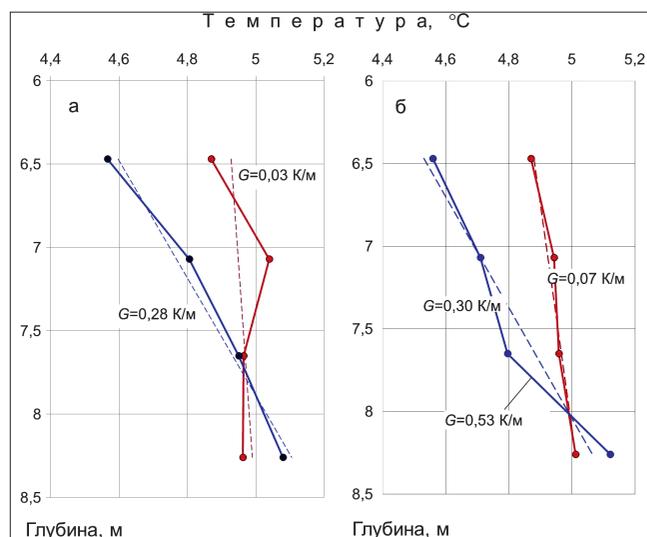


Рис. 7. Температурные профили, зарегистрированные в скважине ИГФ-60 до (красные линии) и после (синие линии) установки устройств подавления СТК: а – графики для устройства в виде вертикальных пластин, б – для устройства на основе гидрогеля. Пунктир – линейные аппроксимации профилей.

экспериментами (Демежко и др., 2019). Из нее следует, что  $G \approx \sigma/3r$ . В рассматриваемом примере (для глубины 7,65 м)  $\sigma = 0,044$  К,  $r = 0,0525$  м, что соответствует значению  $G = 0,28$  К/м, в точности равному измеренному после подавления СТК градиенту. Правда, оценки по соседним датчикам будут уже не столь точны: 0,26 К/м (7,07 м) и 0,17 К/м (8,26 м). Таким образом, даже без подавления конвекции, измеряя лишь индуцированный ею температурный шум, можно попытаться оценить невозмущенный конвекцией температурный градиент или, по крайней мере, предположить, что он значительно искажен.

Методика проведения испытаний устройства для подавления СТК с помощью гидрогеля аналогична описанной выше. Испытания проводились в середине июня 2019 г. После двухсуточного температурного мониторинга на глубинах 6,47; 7,07; 7,65 и 8,26 м (частота опроса – 1 мин.) в интервале 7,75-8,15 м на отдельном подвесе было установлено устройство – 0,4-метровый рукав из полиэтиленовой сетки, заполненный сферическими гранулами гидрогеля. Поскольку исходный размер гранул (ок. 2 мм) был меньше размеров ячеек (5 мм), гранулы были помещены внутри рукава в небольшой цилиндр из проницаемой ткани. По мере набухания гранул и увеличения их размеров (до 10-12 мм) они попадали в рукав, постепенно заполняя все пространство скважины в интервале 7,75-8,15 м. После этого мониторинг продолжался еще около 6 суток. Отметим, что в этом эксперименте ни один из датчиков не был перекрыт устройством (рис. 4в). Термограммы результатов мониторинга и оценки температурного шума приведены на рис. 8 и в табл. 2.

В условиях свободной тепловой конвекции амплитуда температурного шума составляла  $\sigma = 25-38$  мК. Устройство позволило снизить шум в 10-17 раз вблизи его установки (датчики «7,65 м» и «8,26 м») и до 3-6 раз – на удалении (датчики «6,47 м» и «7,07 м»). Примечательно, что наибольший остаточный шум зарегистрировал не самый дальний от установки датчик, а промежуточный – «7,07 м».

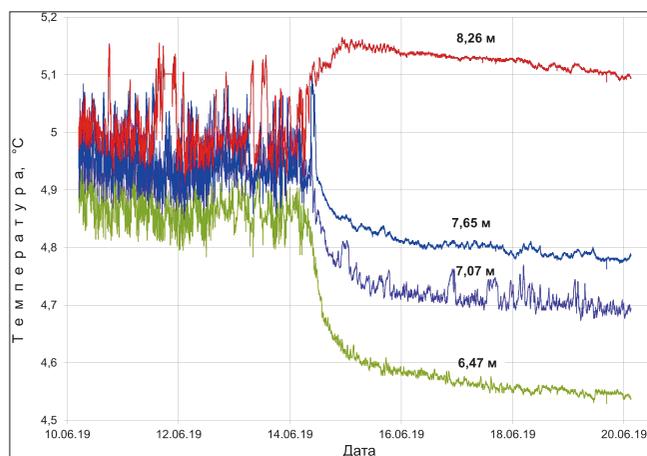


Рис. 8. Результаты температурного мониторинга в скважине ИГФ-60 при испытаниях устройства подавления СТК на основе гидрогеля

Глубина, м	6,47	7,07	7,65	8,26
До подавления, $\sigma$ , К	0,0253	0,0315	0,0362	0,0375
После подавления, $\sigma_p$ , К	0,0044	0,0119	0,0034	0,0023
Коэфф. подавления, $k = \sigma/\sigma_p$	5,8	2,6	10,8	16,3

Табл. 2. Амплитуды температурного шума (среднеквадратические отклонения остатков от сглаживания термограмм 6-часовым фильтром) в скважине ИГФ-60 до и после подавления СТК с помощью гидрогеля

При подавлении конвекции гидрогелем переходный автоколебательный процесс не наблюдался.

Как и в предыдущих испытаниях, после установки устройства средний на всем интервале температурный градиент значительно вырос (рис. 76): с 0,07 до 0,30 К/м ( $Ra = 1500$  при  $T = 4,9^\circ\text{C}$ ), а непосредственно в интервале установки устройства – до 0,53 К/м ( $Ra = 2700$  при  $T = 4,9^\circ\text{C}$ ).

## Заключение

Новейшие представления о структуре течений свободной тепловой конвекции, полученные на основе теоретических и экспериментальных исследований, позволили разработать эффективные и технологичные методы и устройства ее подавления и повышения точности температурных исследований в скважинах. Испытания показали, что они позволяют снизить температурный шум в 16-20 раз (до 0,002-0,003 К) – до аппаратурного уровня.

Установленные в скважине, эти устройства не ограничивают вертикальных движений столба жидкости, связанных с изменениями атмосферного давления, приливными деформациями, активизацией гидрогеологических процессов – движений, которые могут рассматриваться как полезный сигнал.

Конструкции разработанных устройств дешевы, просты в реализации, исключают прихваты скважинных приборов, позволяют проводить повторные исследования в неглубоких скважинах.

## Финансирование

Исследования выполнены при финансовой поддержке государственной темы НИР №0394-2019-0002

(теоретические и лабораторные исследования структуры СТК) и проекта РФФИ №19-05-00050 (обоснование, разработка и натурные испытания устройств для подавления СТК).

## Литература

- Астрахан И.М., Марон В.И. (1969). Нестационарный теплообмен при промывке скважины. *Прикладная механика и техническая физика*, 1, с. 148-152.
- Валиуллин Р.А., Шарафутдинов Р.Ф., Федотов, В.Я., Канафин, И.В. (2016). Экспериментальная установка для изучения свободной тепловой конвекции при индукционном нагреве эксплуатационной колонны. *Вестник Башкирского университета*, 21(2), с. 264-268.
- Гершуни Г.Э., Жуховицкий Г.М. (1972). Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 393 с.
- ГОСТ 25358-82. Грунты. Метод полевого определения температуры. (1982). М.: Изд-во Госкомитета СССР по делам строительства, 14 с.
- Дахнов, В. Н. (1982). Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М.: Недра, 310 с.
- Демежко Д.Ю., Юрков А.К., Уткин В.И., Клишшин А.В. (2012а). О природе температурных вариаций в скважине Кун-1 (о. Кунашир). *Геология и геофизика*, 53(3), с. 406-414. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.02.008>
- Демежко Д.Ю., Юрков А.К., Уткин В.И., Щапов В.А. (2012б). Температурные изменения в скважине Кун-1 (о. Кунашир), вызванные землетрясением Тохоку (11.03.2011 г.,  $M = 9.0$ ). *Доклады Академии наук*, 445(2), с. 200-204. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12070124>
- Демежко Д.Ю., Миндубаев М.Г., Хацкевич Б.Д. (2017). Температурные эффекты свободной тепловой конвекции в буровых скважинах. *Геология и геофизика*, 58(10), с. 1602-1610. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.10.016>
- Демежко Д.Ю., Юрков А.К. (2017). О причинах квазипериодических температурных колебаний в скважине Кун-1 (о. Кунашир). *Геофизические процессы и биосфера*, 16(1), с. 75-86. <https://doi.org/10.1134/S0001433817080023>
- Демежко Д.Ю., Хацкевич Б.Д., Миндубаев М.Г. (2019). Исследование свободной тепловой конвекции в вертикальном водонаполненном цилиндре методом инфракрасной термографии. *Геология и геофизика*, 60(7), с. 1028-1035.
- Дворкин И.Л., Филиппов А.И., Бувевич А.С., Рамазанов А.Ш., Пацков Л.Л. (1981). Способ оценки характера насыщенности пласта. Ас. 796399 СССР.
- Ипатов А.И., Кременецкий М.И., Каешков И.С., Буянов А.В. (2018). Стационарный мониторинг геофизических параметров при контроле разработки месторождений. Возможности, проблемы и перспективы использования. *Актуальные проблемы нефти и газа*, 2(21), с. 1-13.
- Казанцев С.А., Дучков А.Д. (2008). Аппаратура для мониторинга температуры и измерения теплофизических свойств мерзлых и талых пород. *Мат. межд. конф.: Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения*. Тюмень: ИКЗ СО РАН, с. 236-239.
- Миндубаев М.Г., Демежко Д.Ю. (2012). Свободная тепловая конвекция в буровых скважинах: численное моделирование и экспериментальные данные. *Мониторинг. Наука и технологии*, 4(13), с. 12-18.
- Павлов АВ. (2006). Оценка погрешностей измерений температуры грунтов в неглубоких скважинах в условиях сплошной криолитозоны. *Криосфера Земли*, 10(4), с. 9-13.
- Поляк Б.Г., Хуторской М.Д. (2018). Тепловой поток из недр – индикатор глубинных процессов. *Георесурсы*, 20(4), с. 366-376. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>
- Хацкевич Б.Д., Демежко Д.Ю., Миндубаев М.Г. (2019). Способ температурного мониторинга в водонаполненных скважинах. Пат. 2678174 РФ, МПК7: E21B47/07.
- Хацкевич Б.Д., Демежко Д.Ю. (2019). Способ температурного мониторинга в водонаполненных скважинах. Патент 2701261 РФ, МПК7: E21B47/07.
- Хорошев А. С. (2012). Численное исследование свободно-конвективных течений в протяженных вертикальных цилиндрических областях при постоянном вертикальном градиенте температуры на боковой поверхности. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*, 5-1(36), с. 46-48.
- Череменин Г. А. (1977). Прикладная геотермия. Л.: Недра, 224 с.
- Anderson M. P. (2005). Heat as a ground water tracer. *Ground water*, 43(6), pp. 951-968. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x>

Beck, A.E., Anglin, F.M. and Sass, J.H. (1971). Analysis of heat flow data – in situ thermal conductivity measurements. *Can. J. Earth Sci.*, 8, pp. 1-19. <https://doi.org/10.1139/e71-001>

Berthold S., Börner F. (2008). Detection of free vertical convection and double-diffusion in groundwater monitoring wells with geophysical borehole measurements. *Environmental geology*, 54(7), pp. 1547-1566. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0936-y>

Cermak V., Bodri L., Safanda J. (2008). Precise temperature monitoring in boreholes: evidence for oscillatory convection? Part II: theory and interpretation. *Int J Earth Sci*, 97(2), pp. 375-384. <https://doi.org/10.1007/s00531-007-0250-7>

Colombani N., Giambastiani B. M. S., Mastrocico M. (2016). Use of shallow groundwater temperature profiles to infer climate and land use change: interpretation and measurement challenges. *Hydrological Processes*, 30(14), pp. 1-20. <https://doi.org/10.1002/hyp.10805>

Diment W. H., Urban Th. C. (1983). A simple method for detecting anomalous fluid motions in boreholes from continuous temperature logs. *GRC Trans.*, 7, pp. 485-490.

Harries J. R., Ritchie A. I. M. (1981). The use of temperature profiles to estimate the pyritic oxidation rate in a waste rock dump from an open-cut mine. *Water, Air, and Soil Pollution*, 15(4), pp. 405-423. <https://doi.org/10.1007/BF00279423>

Klepikova, M. V., Roques, C., Loew, S., & Selker, J. (2018). Improved characterization of groundwater flow in heterogeneous aquifers using granular polyacrylamide (PAM) gel as temporary grout. *Water Resources Research*, 54(2), pp. 1410-1419. <https://doi.org/10.1002/2017WR022259>

Pehme P., Parker B.L., Cherry J.A., Blohm D. (2014). Detailed measurement of the magnitude and orientation of thermal gradients in lined boreholes for characterizing groundwater flow in fractured rock. *Journal of hydrology*, 513, pp. 101-114. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.015>

Sass J. H., Lachenbruch A. H., Moses T. H., & Morgan P. (1992). Heat flow from a scientific research well at Cajon Pass, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B4), pp. 5017-5030. <https://doi.org/10.1029/91JB01504>

Shimamura H., Ino M., Hikawa H., Iwasaki T. (1985) Groundwater

microtemperature in earthquake regions. *Pure and applied geophysics*, 122(6), pp. 933-946. <https://doi.org/10.1007/BF00876394>

Van Der Merwe, J.H. (1951). The influence of convection on measured borehole temperatures. *South African Journal of Science*, 47(8), pp. 235-238.

Vélez Márquez, M., Raymond, J., Blessent, D., Philippe, M., Simon, N., Bour, O., & Lamarche, L. (2018). Distributed thermal response tests using a heating cable and fiber optic temperature sensing. *Energies*, 11(11), 3059. <https://doi.org/10.3390/en11113059>

Vroblesky, D.A., Casey, C.C., and Lowery, M.A. (2006). Influence of in-well convection on well sampling. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 5247*, 13 p.

### Сведения об авторах

Дмитрий Юрьевич Демежко – доктор геол.-мин. наук, главный научный сотрудник лаборатории геодинимики Институт геофизики УрО РАН  
Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100

Хацкевич Богдан Дмитриевич – младший научный сотрудник лаборатории геодинимики Институт геофизики УрО РАН  
Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100

Миндубаев Мансур Габдрахимович – кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинимики Институт геофизики УрО РАН  
Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100

Статья поступила в редакцию 20.11.2019;  
Принята к публикации 26.02.2020; Опубликована 30.03.2020

IN ENGLISH

## Methods of suppressing free thermal convection in water-filled wells during temperature research

D.Yu. Demezhko\*, B.D. Khatskevich, M.G. Mindubaev

Institute of Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

\*Corresponding author: Dmitry Yu. Demezhko, e-mail: [ddem54@inbox.ru](mailto:ddem54@inbox.ru)

**Abstract.** Temperature measurements in boreholes are widely used in oil and gas geophysics, hydrogeology, geoecology, geocryology, and in the operation of hydrothermal resources. The number of applications of borehole temperature data is continuously growing. Requirement for temperature measurement accuracy is also growing. However, increasing the accuracy is limited by free thermal convection phenomenon (FTC). It occurs under a positive temperature gradient and causes temperature noise, the level of which may exceed the useful signal.

It was believed for a long time that the FTC currents are organized as a vertical sequence of convective cells having a certain vertical dimension. Existing methods of FTC suppressing by horizontal discs are based on these ideas. Theoretical and experimental studies conducted by the authors showed that these ideas are incorrect. FTC currents are organized as a rotating helical system of ascending and descending jets, not limited vertically. Under these conditions, the most efficient and technological way is dividing the borehole by vertical stripes of polymer film into separate segments. Another method of FTC suppressing uses spherical

hydrogel granules. The test results of the developed devices in a real borehole are described. Using of these devices allows to reduce the temperature noise by 16-20 times (from 0.025-0.044 K to 0.002-0.003 K).

**Keywords:** geothermy, borehole temperature measurements, free thermal convection, temperature monitoring

### Acknowledgements

The studies were carried out with financial support from the state budget research theme No. 0394-2019-0002 (theoretical and laboratory studies of the structure of the FTC) and the Russian Foundation for Basic Research, project No. 19-05-00050 (justification, development and full-scale testing of devices for suppressing the FTC).

**Recommended citation:** Demezhko D.Yu., Khatskevich B.D., Mindubaev M.G. (2020). Methods of suppressing free thermal convection in water-filled wells during temperature research. *Georesursy = Georesources*, 22(1), pp. 55-62. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.55-62>

## References

- Anderson M. P. (2005). Heat as a ground water tracer. *Ground water*, 43(6), pp. 951-968. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x>
- Astrakhan I.M., Maron V.I. (1969). Non-stationary heat transfer in the well washing. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1, pp. 148-152. (In Russ.)
- Beck, A.E., Anglin, F.M. and Sass, J.H. (1971). Analysis of heat flow data – in situ thermal conductivity measurements. *Can. J. Earth Sci.*, 8, pp. 1-19. <https://doi.org/10.1139/e71-001>
- Berthold S., Börner F. (2008). Detection of free vertical convection and double-diffusion in groundwater monitoring wells with geophysical borehole measurements. *Environmental geology*, 54(7), pp. 1547-1566. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0936-y>
- Cermak V., Bodri L., Safanda J. (2008). Precise temperature monitoring in boreholes: evidence for oscillatory convection? Part II: theory and interpretation. *Int J Earth Sci*, 97(2), pp. 375-384. <https://doi.org/10.1007/s00531-007-0250-7>
- Cheremenskiy G.A. (1977). Applied Geothermy. Leningrad: Nedra, 224 p. (In Russ.)
- Colombani N., Giambastiani B. M. S., Mastrocicco M. (2016). Use of shallow groundwater temperature profiles to infer climate and land use change: interpretation and measurement challenges. *Hydrological Processes*, 30(14), pp. 1-20. <https://doi.org/10.1002/hyp.10805>
- Dakhnov V.N. (1982). Interpretation of the results of geophysical surveys of well sections. Leningrad: Nedra, 310 p. (In Russ.)
- Demezhko, D.Yu.; Yurkov A.K.; Utkin V.I., Klimshin A.V. (2012a) On the nature of temperature variations in borehole KUN-1 (Kunashir Island). *Russian Geology and Geophysics*, 53(3), pp. 313-319. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.02.008>
- Demezhko D.Yu., Yurkov A.K., Outkin V.I., Shchapov V.A. (2012b). Temperature changes in the KUN-1 borehole, Kunashir Island, induced by the Tohoku Earthquake (March 11, 2011, M = 9.0). *Doklady Earth Sciences*, 445(1), pp. 883-887. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12070124>
- Demezhko D.Yu., Mindubaev M.G., Khatskevich B.D. (2017). Thermal effects of natural convection in boreholes. *Russian Geology and Geophysics*, 58(10), pp. 1270-1276. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.10.016>
- Demezhko D.Y., Yurkov A.K. (2017). On the Origin of Quasi-Periodic Temperature Variations in Kun-1 Well (Kunashir Island). *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 53(8), pp. 804-812. <https://doi.org/10.1134/S0001433817080023>
- Demezhko D.Yu., Khatskevich B.D., Mindubaev M.G. (2019). Natural Thermal Convection in a Vertical Water-Filled Cylinder: Infrared Thermography Investigation. *Russian Geology and Geophysics*, 60(7), pp. 813-818.
- Diment W. H., Urban Th. C. (1983). A simple method for detecting anomalous fluid motions in boreholes from continuous temperature logs. *GRC Trans.*, 7, pp. 485-490.
- Dvorkin I.L., Filippov A.I., Buevich A.S., Ramazanov A.Sh., Patskov L.L. (1981). A method of evaluating the nature of the formation saturation. Inventor's certificate No. 796399 SSSR. (In Russ.)
- Gershuni G., Zhukhovitskii E. (1976). Convective stability of incompressible fluids. Jerusalem: Keter Publishing House, 330 p.
- GOST 25358-82. Grunty. Field Temperature Method. (1982). State standart. Moscow: Izd-vo Goskomiteta SSSR podelamstroitel'stva, 14 p. (In Russ.)
- Harries J. R., Ritchie A. I. M. (1981). The use of temperature profiles to estimate the pyritic oxidation rate in a waste rock dump from an open-pit mine. *Water, Air, and Soil Pollution*, 15(4), pp. 405-423. <https://doi.org/10.1007/BF00279423>
- Ipatov A.I., Kremenetskiy M.I., Kaeshkov I.S., Buyanov A.V. (2018). Stationarnyy monitoring geofizicheskikh parametrov pri kontrole razrabotki mestorozhdeniy. Vozможности, problem i perspektivy ispol'zovaniya. *Aktual'nye problem nefti i gaza*, 2(21), pp. 1-13. (In Russ.)
- Kazantsev S.A., Duchkov A.D. (2008). Equipment for monitoring temperature and measuring the thermophysical properties of frozen and thawed rocks. *Proc. Int. Conf.: Cryogenic resources of the polar and mountainous regions. Status and prospects of permafrost engineering*. Tyumen: IKZ SO RAN, pp. 236-239. (In Russ.)
- Khatskevich B.D., Demezhko D.Yu., Mindubaev M.G. (2019). The method of temperature monitoring in waterfilled boreholes. Patent RF, no. 2678174.
- Khatskevich B.D., Demezhko D.Yu. (2019). The method of temperature monitoring in waterfilled boreholes. Patent RF, no. 2701261.
- Khoroshev A.S. (2012). Numerical study of free convective flows in extended vertical cylindrical areas under a constant vertical temperature gradient on the side surface. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 5-1(36), pp. 46-48. (In Russ.)
- Klepikova, M. V., Roques, C., Loew, S., & Selker, J. (2018). Improved characterization of groundwater flow in heterogeneous aquifers using granular polyacrylamide (PAM) gel as temporary grout. *Water Resources Research*, 54(2), pp. 1410-1419. <https://doi.org/10.1002/2017WR022259>
- Mindubaev M.G., Demezhko D.Yu. (2012). Free thermal convection in boreholes: numerical modeling and experimental data. *Monitoring. Science and Technologies*, 4(13), pp. 12-18. (In Russ.)
- Pavlov AV. (2006). Evaluation of temperature measurements errors of grounds in shallow boreholes in permafrost. *Kriosfera Zemli*, 10(4), pp. 9-13. (In Russ.)
- Pehme P., Parker B.L., Cherry J.A., Blohm D. (2014). Detailed measurement of the magnitude and orientation of thermal gradients in lined boreholes for characterizing groundwater flow in fractured rock. *Journal of hydrology*, 513, pp. 101-114. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.015>
- Polyak B.G., Khutorskoy M.D. (2018). Heat flow from the Earth interior as indicator of deep processes. *Georesursy = Georesources*, 20(4), pp. 366-376. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>
- Sass J. H., Lachenbruch A. H., Moses T. H., & Morgan P. (1992). Heat flow from a scientific research well at Cajon Pass, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B4), pp. 5017-5030. <https://doi.org/10.1029/91JB01504>
- Shimamura H., Ino M., Hikawa H., Iwasaki T. (1985) Groundwater microtemperature in earthquake regions. *Pure and applied geophysics*, 122(6), pp. 933-946. <https://doi.org/10.1007/BF00876394>
- Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Fedotov V.Y., Kanafin I.V. (2016). Experimental device for studying free heat convection during induction heating of the casing. *Vestnik Bashkirskogo Universiteta*, 21(2), pp. 264-268. (In Russ.)
- Van Der Merwe, J.H. (1951). The influence of convection on measured borehole temperatures. *South African Journal of Science*, 47(8), pp. 235-238.
- Vélez Márquez, M., Raymond, J., Blessent, D., Philippe, M., Simon, N., Bour, O., & Lamarche, L. (2018). Distributed thermal response tests using a heating cable and fiber optic temperature sensing. *Energies*, 11(11), 3059. <https://doi.org/10.3390/en1113059>
- Vroblesky, D.A., Casey, C.C., and Lowery, M.A. (2006). Influence of in-well convection on well sampling. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 5247*, 13 p.

## About the Authors

**Dmitry Yu. Demezhko** – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Chief Researcher, Laboratory of Geodynamics, Institute of Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

100, Amundsen st., Yekaterinburg, 620016, Russian Federation  
E-mail: [ddem54@inbox.ru](mailto:ddem54@inbox.ru)

**Bogdan D. Khatskevich** – Junior Researcher, Laboratory of Geodynamics, Institute of Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

100, Amundsen st., Yekaterinburg, 620016, Russian Federation

**Mansur G. Mindubaev** – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Laboratory of Geodynamics, Institute of Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

100, Amundsen st., Yekaterinburg, 620016, Russian Federation

*Manuscript received 20 November 2019;  
Accepted 26 February 2020; Published 30 March 2020*