

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНОЙ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ВОДОНАПОЛНЕННОМ ЦИЛИНДРЕ МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

Д.Ю. Демежко, Б.Д. Хацкевич, М.Г. Миндубаев

Институт геофизики УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, Россия

Основным источником информации в геотермических исследованиях являются данные температурных измерений в скважинах. Появление современных температурных датчиков и систем регистрации, обеспечивающих высокую точность, стабильность, пространственное и временное разрешение температурных измерений, значительно расширяет сферу геологических приложений скважинной термометрии. Однако возможности этих приложений часто не могут быть полностью реализованы из-за влияния свободной тепловой конвекции (СТК). Нестационарный характер конвекции вызывает температурные колебания, представляющие значительные помехи при проведении высокоточных температурных измерений. В статье описан новый лабораторный метод изучения структуры течений СТК и температурных эффектов в условиях, приближенных к скважинным. Метод основан на инфракрасной термографии температурных аномалий, возникающих на внешних стенках вертикальной водонаполненной трубы, в которой поддерживаются условия конвекции. Геотермический градиент на внешних стенках трубы обеспечивает восходящий поток теплого воздуха от тороидального нагревателя. Эксперимент с трубой с внутренним диаметром 20 мм показал, что при значениях числа Рэлея в пределах 280—2800 течения СТК представляют собой спиральную систему, вращающуюся вокруг вертикальной оси. При возрастании числа Рэлея от 280 до 2800 шаг спирали уменьшается от 270 до 130 мм. Напротив, угловая скорость вращения спиральной системы возрастает от $0.7 \cdot 10^{-2}$ до $3.4 \cdot 10^{-2}$ рад/с. Эксперимент подтвердил ранее теоретически полученную зависимость среднеквадратического отклонения температурных вариаций от геотермического градиента и внутреннего радиуса скважины: $\sigma_T = 3Gr$.

Геотермия, свободная тепловая конвекция, буровая скважина, инфракрасная термография.

NATURAL THERMAL CONVECTION IN A VERTICAL WATER-FILLED CYLINDER: INFRARED THERMOGRAPHY INVESTIGATION

D.Yu. Demezhko, B.D. Khatskevich, and M.G. Mindubaev

Temperature logging furnishes the essential part of geothermal data. Its applications are progressively expanding owing to advanced temperature loggers and data acquisition systems that ensure precise and stable measurements at high spatial and temporal resolution. However, it may be hard to achieve the full effect of the available logging facilities because of noisy temperature oscillations produced by natural convection in water-filled boreholes. A new laboratory method is suggested to study the structure of convection flows and their thermal effect by infrared thermography in conditions close to those of real temperature logging. Thermographic cameras image temperature anomalies on the outer wall of a water-filled pipe, which are imprints of the convection processes in the water column. The temperature gradient on the pipe wall maintains flow of warm air ascending from a toroidal heater. It is shown experimentally, using a pipe 20 mm in inner diameter, that convection of fluid in the pipe forms a helical system rotating around a vertical axis at Rayleigh numbers in the range of 280 to 2800. As the Rayleigh numbers increase from 280 to 2800, the helical pitch decreases from 270 to 130 mm, while the angular velocity increases from $0.7 \cdot 10^{-2}$ to $3.4 \cdot 10^{-2}$ rad/s. The experiment confirms the theoretically predicted dependence of the standard deviation of temperature fluctuations on the temperature gradient and inner radius of the logged borehole: $\sigma_T = 3Gr$.

Geothermics, convection, borehole, infrared thermography

ВВЕДЕНИЕ

Температурные измерения в скважинах — основной источник информации в геотермических исследованиях. Благодаря появлению современных температурных датчиков и систем регистрации, обеспечивающих высокую точность, стабильность, пространственное и временное разрешение температурных измерений, сфера применения скважинной термометрии значительно расширилась. В дополнение к традиционным приложениям термометрии были разработаны приложения, требующие более высокой точности и временного разрешения, например, исследования тонких гидрогеологических эффектов

[Lapham, 1989; Anderson, 2005; Cermak et al., 2010; Pehme et al., 2014], изучение геодинамических процессов в сейсмоактивных районах с помощью скважинного температурного мониторинга [Shimamura et al., 1985; Buntebarth et al., 2005; Демежко и др., 2012а, б]. Однако возможности этих приложений часто не могут быть реализованы в полной мере вследствие влияния свободной тепловой конвекции (СТК) жидкости в скважинах. Нестационарный характер СТК ведет к температурным вариациям, что является значительным источником температурного шума. Поэтому изучение структуры и тепловых эффектов СТК представляет не только научный, но и практический интерес.

Термические эффекты СТК в водонаполненных скважинах отмечались многими исследователями [Gretener, 1967; Diment, 1967; Sammel, 1968; Девяткин, Кутасов, 1973; Urban et al., 1978; Solodov et al., 2002; Cermak et al., 2008а; Cermak, 2009; Демежко и др., 2012а]. Экспериментальные исследования СТК *in situ*, однако, лимитируются целым рядом факторов. Среди них: сложность регулировки условий эксперимента (диаметр скважины, температура, температурный градиент, число Рэлея), влияние на структуру СТК датчиков и проводов. Лабораторный эксперимент может предоставить дополнительную информацию к данным, полученным в реальных скважинах.

Известные лабораторные методы исследования СТК в буровых скважинах обычно используют стеклянную водонаполненную трубу, внешние стенки которой теплоизолированы, а необходимый температурный градиент обеспечивается подогревом воды в нижней части трубы [Остроумов, 1952; Berthold, Börner, 2008; Berthold, Resagk, 2012]. Отметим, что в реальных скважинах температурный градиент, напротив, поддерживается теплообменом с породами. Информацию о структуре СТК получают либо с температурных датчиков, внедренных непосредственно в трубу [Остроумов, 1952], либо путем наблюдения (фото- и видеорегистрации) за движением непрозрачных частиц через стеклянные стенки [Остроумов, 1952; Berthold, Börner, 2008; Berthold, Resagk, 2012]. В первом случае детальность получаемой картины ограничивается количеством датчиков, внедренных в трубу. Кроме того, сами датчики могут значительно исказить картину СТК. Второй способ оказался эффективным при оценке скоростей течений, однако не дает ясной картины их пространственной организации. Мы разработали лабораторный метод моделирования СТК, позволяющий преодолеть некоторые из перечисленных недостатков.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В водонаполненных буровых скважинах СТК возникает, когда вследствие положительного температурного градиента более теплый и, следовательно, более легкий флюид располагается ниже холодного и тяжелого. Восходящие и нисходящие потоки стремятся выровнять плотностные и температурные неоднородности, однако температурное поле в горных породах поддерживает положительный градиент.

Возникновение и развитие СТК определяется 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, β — коэффициент объемного температурного расширения, ν — кинематическая вязкость, a — температуропроводность, r — радиус скважины, G — температурный градиент. Параметры β , ν , a , в свою очередь, зависят от температуры. Критическое число Рэлея Ra_{crit} , определяющее возникновение конвекции, для скважины лежит в пределах 68-216 в зависимости от отношения теплопроводностей заполняющей скважину жидкости и окружающего ее массива λ_f/λ_m [Гершуни, Жуховицкий, 1972]:

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

В случае, когда стенки скважины теплоизолированы ($\lambda_f/\lambda_m \rightarrow \infty$), $Ra_{crit} = 68$; если же массив представляет собой идеальный проводник тепла ($\lambda_f/\lambda_m = 0$), тогда $Ra_{crit} = 216$.

Условия возникновения конвекции могут быть также определены через критический температурный градиент [Diment, 1967; Gretener, 1967]:

$$G_{crit} = \frac{g\beta T}{C} + \frac{B\nu a}{g\beta r^4}. \quad (3)$$

Здесь T — абсолютная температура, C — удельная теплоемкость, β — коэффициент объемного температурного расширения, B — константа, которая при больших соотношениях длина/диаметр скважины

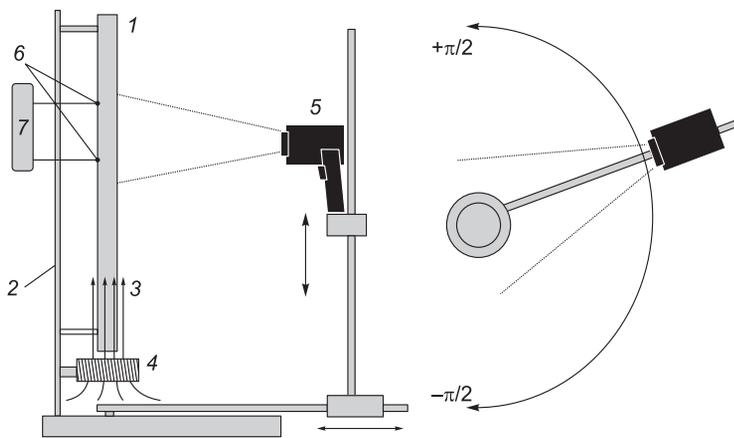


Рис. 1. Схема лабораторного стенда для моделирования СТК в водонаполненной скважине.

Пояснение см. в тексте. Слева — вид сбоку, справа — вид сверху.

равна критическому значению числа Рэлея. Первый член в уравнении — адиабатический градиент, величина которого для водонаполненных скважин достаточно мала ($\sim 10^{-4}$ К/м). Второй член учитывает вязкость флюида и радиус скважины.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

В основе метода исследования структуры течений СТК лежит инфракрасная термография внешних стенок вертикальной водонаполненной керамической трубы. Если в трубе поддерживается положительный температурный градиент, значение которого выше критического (3), возникающие в колонне воды температурные аномалии «отпечатываются» на внешних стенках трубы и могут быть зарегистрированы инфракрасной камерой — тепловизором. Опытным путем было установлено, что температурные возмущения внутри трубы лучше всего передаются на ее внешние стенки при использовании мулитокерамических труб. Метод был реализован в лабораторном стенде (рис. 1).

Керамический водонаполненный цилиндр (1) установлен вертикально на штативе (2). Восходящий поток воздуха (3) от тороидального нагревателя (4) обеспечивает температурный градиент на внешних стенках цилиндра. Пространственно-временное распределение температуры на внешней стенке цилиндра измеряется с помощью инфракрасной камеры (5). Система установки инфракрасной камеры обеспечивает возможность ее перемещения вертикально, горизонтально и вокруг цилиндра в пределах $\pm \pi/2$. Для измерений температуры на внутренней стенке трубы в нее введены две термодатчики (6), подключенные к регистратору (7).

В реальных буровых скважинах диаметром 75—150 мм критический температурный градиент невелик: (10^{-3} — 10^{-5}) К/м. Такой градиент сложно поддерживать в лабораторных условиях на фоне естественного отрицательного температурного градиента в воздухе порядка (10^{-1} — 10^0) К/м. Однако при уменьшении диаметра трубы критический градиент резко возрастает. В экспериментах была использована керамическая труба длиной 1 м с внутренним диаметром 20 мм, для которой критический градиент равен ~ 1 К/м. Амплитуда температурных колебаний СТК также возрастает пропорционально увеличению температурного градиента [Sammel, 1968; Diment, Urban, 1983; Eppelbaum, Kutasov, 2011; Демежко и др., 2017], что позволяет надежно регистрировать температурные аномалии на фоне шумов с помощью инфракрасной камеры, обладающей невысоким температурным разрешением (~ 0.1 К). В то же время результаты эксперимента, полученные в трубах малого диаметра, можно обобщить на условия реальных скважин, используя принципы подобия.

Измерения проводились с помощью инфракрасной камеры Testo 875 в центральной части цилиндра после двухчасового прогрева и наступления установившегося конвективного режима. Температурный градиент регулировался изменением мощности нагревателя. Измерения включали 45-минутный температурный мониторинг с минутной дискретизацией снимков при заданном положении камеры. По результатам мониторинга были построены временные развертки температурных аномалий (рис. 2). Аномалии на стенках оценивались для центрального профиля каждого снимка вычитанием невозмущенного распределения температур, соответствующего среднему значению градиента, из наблюдаемого распределения. Перед началом мониторинга, на 16-й и 31-й минутах и после его окончания производилась съемка азимутальной развертки (от $-\pi/2$ до $+\pi/2$ через $\pi/4$). На рис. 3 приведены азимутальные развертки температурных аномалий, полученные на 16-й минуте мониторинга.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Устойчивые температурные неоднородности на внешних стенках начинают проявляться при $Ra = 279$. Наклонные аномалии на азимутальной развертке (см. рис. 3) указывают на то, что восходящие и нисходящие потоки СТК организованы в виде винтовых струй. Наклон аномалий на временной развертке отчетливо проявляется при $Ra \geq 322$ и указывает на вращение всей спиральной системы вокруг

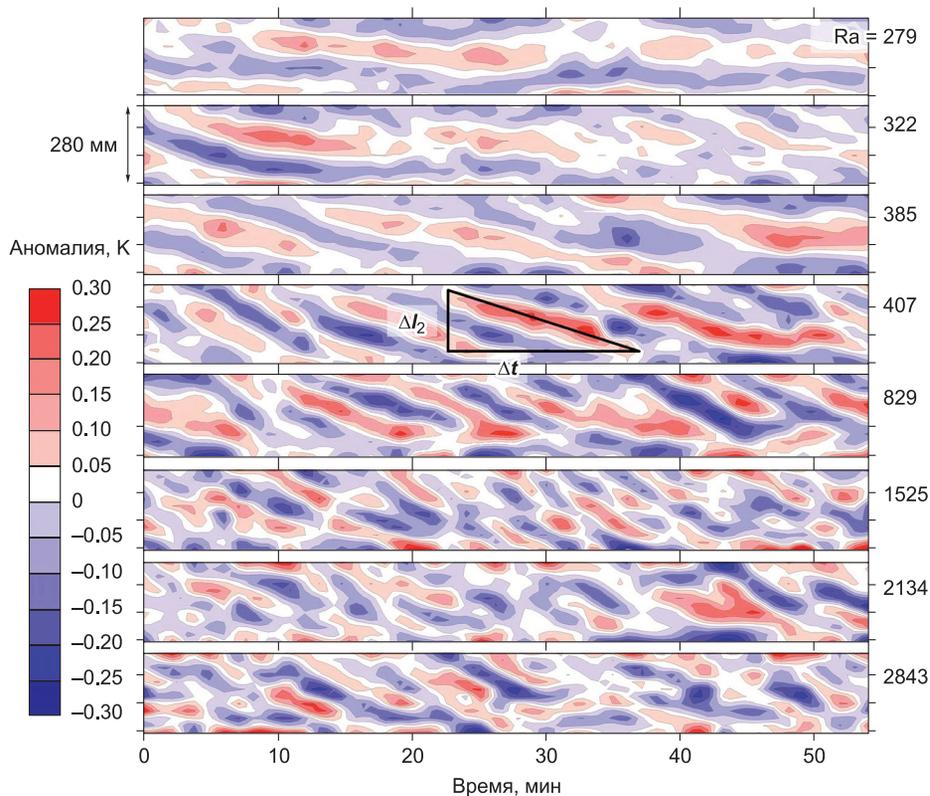


Рис. 2. Временные развертки температурных аномалий, вызываемых свободной тепловой конвекцией в вертикальной водонаполненной трубе при различных числах Рэлея.

Приведен пример оценки наклона аномалий η_2 .

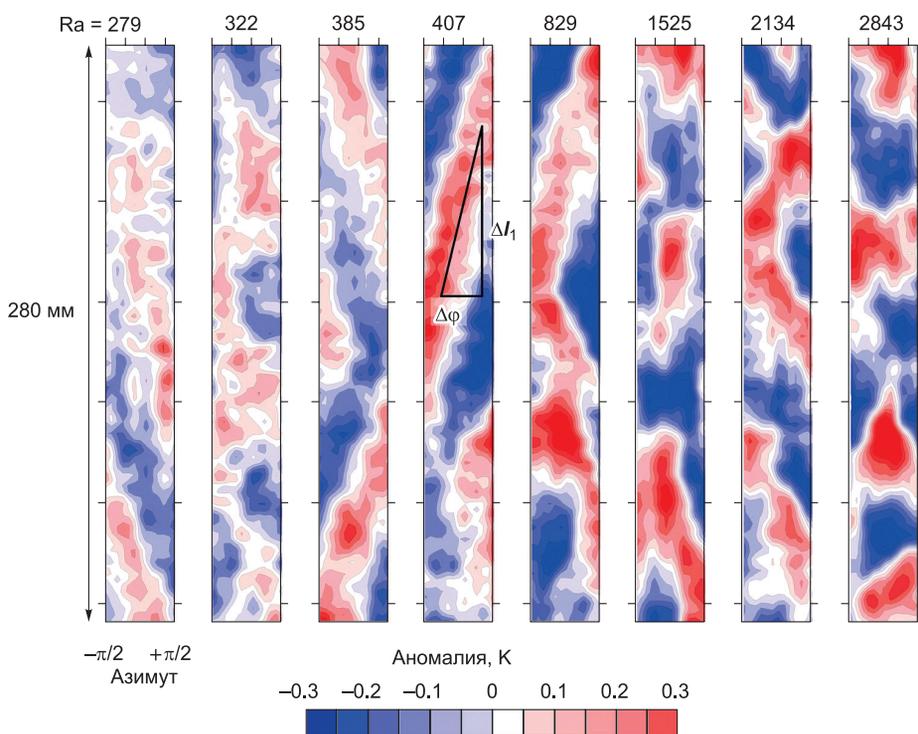


Рис. 3. Азимутальные развертки температурных аномалий, вызываемых свободной тепловой конвекцией в вертикальной водонаполненной трубе при различных числах Рэлея.

Приведен пример оценки наклона аномалий η_1 .

Условия экспериментов и средние значения параметров СТК по данным инфракрасной термографии

Условия эксперимента			Средние значения оценок параметров СТК					
<i>N</i>	Количество оценок	Мощность нагревателя (<i>W</i>), Вт	Температура (<i>T</i>), °С	Градиент (<i>G</i>), К/м	Число Рэлея (<i>Ra</i>)	Шаг спирали (<i>h</i>), мм	Угловая скорость (ω), рад/с	Период (τ), с
1	4	11.1	29.9	1.12	279	257	Вращение отсутствует	
2	5	17.4	28.6	1.65	385	276	0.0071	882
3	2	25.0	24.1	1.76	322	214	0.0126	498
4	4	34.0	24.6	2.16	407	222	0.0162	386
5	5	44.4	25.4	4.19	829	193	0.0186	337
6	4	56.3	32.0	5.58	1525	127	0.0316	199
7	5	69.4	35.4	6.86	2134	157	0.0291	216
8	3	84.0	35.6	9.08	2843	152	0.0344	183

оси цилиндра. Для количественной оценки параметров винтовой системы необходимо выделить оси аномалий и рассчитать их наклоны. Наклон аномалии на азимутальной развертке $\eta_1 = \Delta l_1 / \Delta \phi$ определяет направление закрутки спирали ($\eta_1 > 0$ для правой спирали, $\eta_1 < 0$ для левой спирали) и шаг винта $h = 2\pi \eta_1$. Наклон аномалии на временной развертке $\eta_2 = \Delta l_2 / \Delta t$ и шаг винта h позволяют оценить период полного оборота системы $\tau = h / \eta_2 = 2\pi \eta_1 / \eta_2$ или угловую скорость вращения $\omega = 2\pi / \tau = \eta_2 / \eta_1$. В каждом эксперименте было получено от 2 до 5 оценок параметров *T*, *G*, *Ra*, ω , τ и *h* в зависимости от того, сколько пар аномалий (на временной и азимутальной развертках) с хорошо выраженными осями удалось выделить. В таблице приведены усредненные значения этих параметров.

Эксперименты показали, что при небольших превышениях критического числа Рэлея течения СТК представляют собой вращающуюся винтовую систему. Точно определить критическое число Рэлея, описываемое выражением (2), для данной экспериментальной установки сложно, так как необходимо знать теплопроводность массива. Здесь же речь может идти лишь об эффективной теплопроводности, учитывающей конвективный теплообмен между внешней стенкой трубы и потоком воздуха. Поскольку конвективный механизм намного эффективнее кондуктивного, можно предположить, что критическое число ближе к верхней оценке $Ra_{crit} = 216$.

На рисунке 4 приведена 3D реконструкция течений свободной тепловой конвекции. Двух- и четырехструйные системы соответствуют так называемой асимметричной локализации течений, согласно [Гершуни, Жуховицкий, 1972]. На основании проведенного эксперимента можно утверждать, что асимметричная (в сечении) локализация на самом деле представляет собой симметрию более высокого порядка — винтовую симметрию.

Примерно с равной вероятностью наблюдались как правые, так и левые винтовые системы. Шаг винта в экспериментах варьировал от 127 до 276 мм. По мере роста числа Рэлея выше критического значения шаг винта уменьшался (рис. 5) — спираль сжималась. Угловая скорость вращения спиральной системы, напротив, возрастала. При $Ra = 294$ вращения еще не наблюдалось. При $Ra = 347$ угловая скорость вращения в среднем составляла $7 \cdot 10^{-3}$ рад/с ($\tau \approx 15$ мин), а при $Ra = 2843$ возрастала до $34 \cdot 10^{-3}$ рад/с ($\tau \approx 3$ мин). Зависимость скорости вращения от превышения числа Рэлея над критическим значением

хорошо аппроксимируется логарифмической кривой (рис. 6). Замедление темпов роста скорости может быть объяснено влиянием вязкого трения. Также было обнаружено, что направление вращения всегда согласовано с направлением закручивания: правые винты вращались против часовой стрелки (если смотреть на трубу сверху), левые — по часовой.

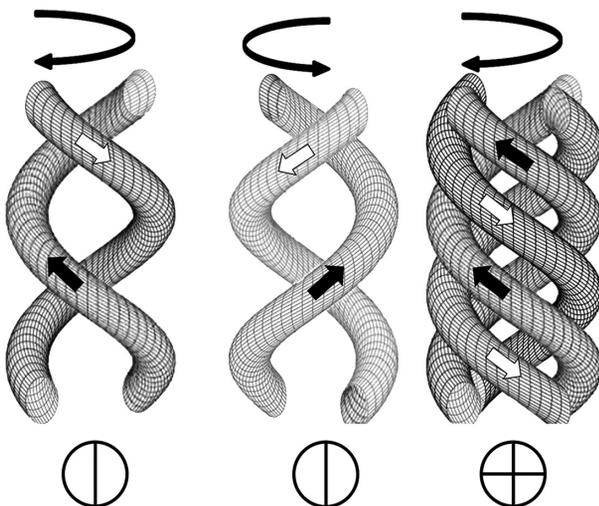


Рис. 4. Трехмерная реконструкция системы течений СТК.

Черными стрелками обозначены восходящие потоки, белыми — нисходящие. Стрелки над рисунками указывают направление вращения. Кружки иллюстрируют возможные варианты асимметричной локализации течений в поперечном сечении скважины, по [Гершуни, Жуховицкий, 1972].

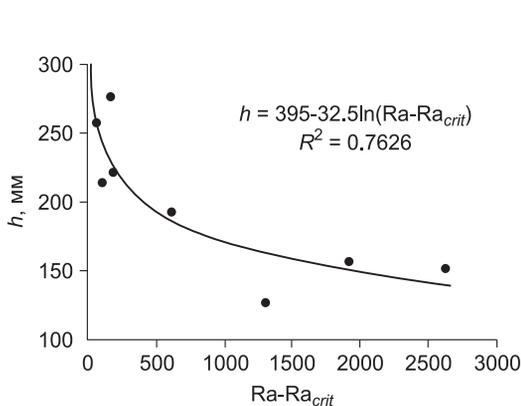


Рис. 5. Зависимость шага спирали h от превышения числа Рэлея над критическим значением.

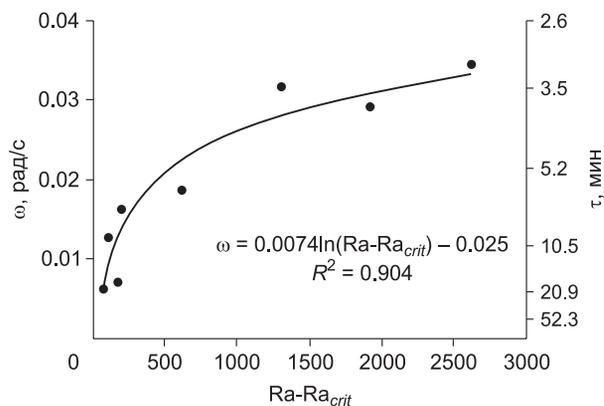


Рис. 6. Зависимость угловой скорости вращения спиральной системы (ω) и периода полного оборота (τ) от превышения числа Рэлея над критическим значением.

Данные о температурных вариациях внутри цилиндра (на его внутренних стенках) были получены с помощью термопар. В работе [Дежежко и др., 2017] на основании численного моделирования СТК в канале квадратного сечения было показано, что стандартное отклонение температурных колебаний в диапазоне $Ra = 500\text{—}20\,000$ практически полностью определяется температурным градиентом G и полушириной канала r : $\sigma_T = 3Gr$. Проведенный нами эксперимент подтвердил справедливость этого соотношения также для цилиндра с внутренним радиусом r (рис. 7).

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

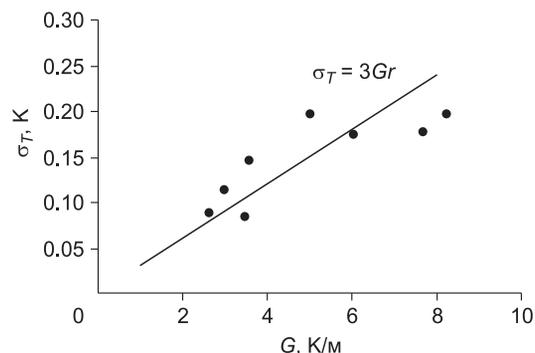
Разработан новый экспериментальный лабораторный метод изучения структуры течений СТК в условиях, приближенных к скважинным. Метод основан на инфракрасной визуализации температурных аномалий, возникающих на внешних стенках вертикального водонаполненного керамического цилиндра, в котором поддерживаются условия конвекции. Температурный градиент на внешних стенках трубы создается восходящим потоком воздуха от нагревателя.

Согласно сложившимся представлениям [Diment, Urban, 1983; Cermak et al., 2008b; Berthold, Börniger, 2008], течения СТК организованы в виде вертикальной последовательности конвективных ячеек (по типу ячеек Рэлея—Бенара в плоском слое). Математическое моделирование, проведенное двумя группами авторов [Миндубаев, Дежежко, 2012; Хоршев, 2012; Дежежко и др., 2017], показало возможность реализации течений СТК в виде винтовых струй. В настоящей работе эта возможность впервые доказана экспериментально. Кроме того, впервые было обнаружено, что система винтовых струй вращается вокруг вертикальной оси. С увеличением числа Рэлея скорость вращения возрастает, а шаг спирали уменьшается. Таким образом, понятия «конвективная ячейка» и «вертикальный размер ячейки» некорректны по отношению к структуре СТК в скважине. Между тем термин «вертикальный размер ячейки» используется для описания температурных эффектов СТК. Так, авторы работы [Diment, Urban, 1983] предложили оценивать максимальную амплитуду температурных колебаний с помощью соотношения $\Delta T_{\max} = A \cdot G \cdot r$, где безразмерная константа A определена как отношение вертикального размера конвективной ячейки к радиусу скважины. Убедительных экспериментальных оценок величины вертикального размера ячейки с тех пор получено не было.

Неверные представления о структуре СТК реализованы во всех известных технических средствах подавления конвекции в скважине. Они сводятся к разделению

Рис. 7. Зависимость среднеквадратического отклонения температурных колебаний СТК от геотермического градиента (для трубы с внутренним радиусом $r = 10$ мм).

Линией показана теоретическая зависимость, предложенная в [Дежежко и др., 2017].



скважины по вертикали на отдельные интервалы с помощью пакеров [Beck et al., 1971; Colombani et al., 2016] либо горизонтальных дисков [Harries, Ritchie, 1981; Vroblesky et al., 2006]. Предполагается, что этот интервал должен быть меньше вертикального размера ячейки. Проведенные нами экспериментальные исследования показали, что конвективные струи не ограничены по вертикали рамками ячеек. В этих условиях, возможно, более эффективным способом подавления конвекции является разделение скважины не горизонтальными, а вертикальными пластинами. Такие пластины предотвращают вращение спиральной системы и разделяют скважину по сечению на отдельные сектора (сегменты), уменьшая эффективный радиус скважины и число Рэлея.

ЛИТЕРАТУРА

Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М., Наука, 1972, 393 с.

Девяткин В.Н., Кутасов И.М. Влияние свободной тепловой конвекции и обсадных труб на температурное поле в скважинах // Тепловые потоки из коры и верхней мантии. М., Наука, 1973, № 12, с. 99—106.

Демежко Д.Ю., Юрков А.К., Уткин В.И., Климшин А.В. О природе температурных вариаций в скважине Kup-1 (о. Кунашир) // Геология и геофизика, 2012а, т. 53 (3), с. 406—414.

Демежко Д. Ю., Юрков А. К., Уткин В. И., Шапов В. А. Температурные изменения в скважине kun-1 (о. Кунашир), вызванные землетрясением Тохоку (11.03.2011 г., $M=9.0$) // ДАН, 2012б, т. 445, № 2, с. 200—204.

Демежко Д.Ю., Миндубаев М.Г., Хацкевич Б.Д. Температурные эффекты свободной тепловой конвекции в буровых скважинах // Геология и геофизика, 2017, т. 58 (10), с. 1602—1610.

Миндубаев М.Г., Демежко Д.Ю. Свободная тепловая конвекция в буровых скважинах: численное моделирование и экспериментальные данные // Мониторинг. Наука и технологии, 2012, № 4(13), с. 12—18.

Остроумов Г.А. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи. М.; Л., Гостехиздат, 1952, 286 с.

Хорошев А.С. Численное исследование свободно-конвективных течений в протяженных вертикальных цилиндрических областях при постоянном вертикальном градиенте температуры на боковой поверхности // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2012, № 5—1 (36), с. 46—48.

Anderson M.P. Heat as a ground water tracer // Ground water, 2005, v. 43, № 6, p. 951—968.

Beck A.E., Anglin F.M., Sass J.H. Analysis of heat flow data — in situ thermal conductivity measurements // Can. J. Earth Sci., 1971, v. 8, p. 1—19.

Berthold S., Börner F. Detection of free vertical convection and double-diffusion in groundwater monitoring wells with geophysical borehole measurements // Environ. Geol., 2008, v. 54, № 7, p. 1547—1566.

Berthold S., Resagk C. Investigation of thermal convection in water columns using particle image velocimetry // Exp. Fluids, 2012, v. 52, № 6, p. 1465—1474.

Buntebarth G., Chelidze T., Middleton M. Time-dependent microtemperature and hydraulic signals associated with tectonic/seismic activity. Tbilisi, 2005, p. 4—108.

Cermak V. Recurrence quantification analysis of borehole temperatures: evidence of fluid convection // Int. J. Bifurcat. Chaos, 2009, v. 19, № 3, p. 889—902.

Cermak V., Safanda J., Bodri L. Precise temperature monitoring in boreholes: Evidence for oscillatory convection? Part I. Experiments and field data // Int. J. Earth Sci., 2008а, v. 97, № 2, p. 365—373, doi:10-1007/s00531-007-0237-4.

Cermak V., Bodri L., Safanda J. Precise temperature monitoring in boreholes: evidence for oscillatory convection? Part II: theory and interpretation // Int. J. Earth Sci., 2008b, v. 97, № 2, p. 375—384.

Cermak V., Safanda J., Bodri L. Thermal instability of the fluid column in a borehole: application to the Yaxcopoil hole (Mexico) // Int. J. Earth Sci., 2010, v. 99, № 6, p. 1437—1451.

Colombani N., Giambastiani B.M.S., Mastrocicco M. Use of shallow groundwater temperature profiles to infer climate and land use change: interpretation and measurement challenges // Hydrol. Processes, 2016, v. 30, № 14, p. 2512—2524.

Diment W.H. Thermal regime of a large diameter borehole: instability of the water column and comparison of air- and water-filled conditions // Geophysics, 1967, v. 32, p. 720—726.

Diment W.H., Urban Th.C. A simple method for detecting anomalous fluid motions in boreholes from continuous temperature logs // GRC Trans., 1983, v. 7, p. 485—490.

- Eppelbaum L.V., Kutasov I.M.** Estimation of the effect of thermal convection and casing on the temperature regime of boreholes: a review // *J. Geophys. Engin.*, 2011, v. 8, № 1, p. 1—10.
- Gretener P.E.** On the thermal instability of large diameter wells—an observational report // *Geophysics*, 1967, v. 32, p. 727—738.
- Harries J.R., Ritchie A.I.M.** The use of temperature profiles to estimate the pyritic oxidation rate in a waste rock dump from an opencut mine // *Water Air Soil Pollut.*, 1981, v. 15, № 4, p. 405—423.
- Lapham W.W.** Use of temperature profiles beneath streams to determine rates of vertical ground-water flow and vertical hydraulic conductivity. *US Geol. Surv. USGPO*, 1989, 35 p.
- Pehme P.E., Parker B.L., Cherry J.A., Blohm D.** Detailed measurement of the magnitude and orientation of thermal gradients in lined boreholes for characterizing groundwater flow in fractured rock // *J. Hydrol.*, 2014, v. 513, p. 101—114.
- Sammel E.A.** Convective flow and its effect on temperature logging in small-diameter wells // *Geophysics*, 1968, v. 33, № 6, p. 1004—1012.
- Shimamura H., Ino M., Hikawa H., Iwasaki T.** Groundwater microtemperature in earthquake regions // *Pure Appl. Geophys.*, 1985, v. 122, № 6, p. 933—946.
- Solodov I., Malkovsky V., Pek A., Benson S.** New evidence for the combined influence of vapor condensation and thermal convection on groundwater monitoring wells // *Environ. Geol.*, 2002, v. 42, № 2—3, p. 145—150.
- Vroblecky D.A., Casey C.C., Lowery M.A.** Influence of in-well convection on well sampling. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 5247*, 2006, 13 p.
- Urban T.C., Diment W.H., Nathenson M.** East Mesa geothermal anomaly, Imperial County, California: Significance of temperatures in a deep drill hole near thermal equilibrium // *Geotherm. Resour. Council Trans.*, 1978, v. 2, № 2, p. 667—670.

*Рекомендована к печати 25 апреля 2018 г.
А.Д. Дучковым*

*Поступила в редакцию 14 марта 2018 г.,
после доработки — 16 апреля 2018 г.*