УДК 550.360

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СВОБОДНОЙ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ В ВОДОНАПОЛНЕННОЙ СКВАЖИНЕ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Демежко Д.Ю., Хацкевич Б.Д., Миндубаев М.Г. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Разработан экспериментальный лабораторный метод изучения структуры течений свободной тепловой конвекции в условиях, приближенных к скважинным. Он основан на инфракрасной визуализации температурных аномалий, возникающих на внешних стенках вертикальной водонаполненной керамической трубы, в которой поддерживаются условия конвекции. Температурный градиент на внешних стенках трубы создается восходящим потоком воздуха от тороидального нагревателя. Проведенные эксперименты впервые показали, что при небольших закритичностях (Ra = 294–516) течения СТК представляют собой систему, состоящую из 2–4-х винтовых струй, вращающихся вокруг вертикальной оси.

Свободная тепловая конвекция, скважина, температурные аномалии, инфракрасная визуализация.

A LABORATORY SETUP FOR INVESTIGATION OF FREE THERMAL CONVECTION FLOWS IN WATER FILLED BOREHOLE: FIRST RESULTS

Demezhko D.Yu., Khatskevich B.D., Mindubaev M.G. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. An experimental laboratory method for studying the structure of the free thermal convection flows in conditions approached to the borehole's one has been developed. The methods based on infrared imaging of temperature anomalies appearing on the outer walls of the vertical water-filled ceramic pipes, where conditions free thermal convection are maintained. Upward flow of air from the toroidal heater produces temperature gradient on the outer wall of the pipe. The experiments have shown that when the critical Rayleigh number is slightly exceeded (Ra = 294–516), the flows of thermal convection constitute a system consisting of 2–4 spiral jets, rotating around the vertical axis.

Free thermal convection, borehole, temperature anomaly, infrared imaging.

Введение

Температурные измерения в буровых скважинах являются одним из главных методов геотермических исследований. Появление современных датчиков, аппаратуры и систем регистрации, обеспечивающих высокую точность, стабильность, пространственное и временное разрешение температурных измерений, позволило существенно расширить сферу применения скважинной термометрии. К традиционным приложениям термометрии, таким как оценка работы добывающих и нагнетательных скважин на месторождениях углеводородов, исследование геотермических тепловых потоков, реконструкция температурной истории земной поверхности, в настоящее время добавились приложения, требующие более высокой точности и временного разрешения. К ним можно отнести оценку достаточно тонких гидрогеологических эффектов (Lapham, 1989; Anderson, 2005; Cermak et al., 2010), в том числе с помощью пространственно распределенных датчиков температуры (Pehme et al., 2014) и изучение геодинамических процессов в сейсмоактивных районах с помощь скважинного температурного мониторинга (Shimamura et al., 1985; Time-dependent … , 2005; Демежко и др., 2012а, б). Однако возможности этих приложений не всегда 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 погрешностей при проведении высокоточных темпера-

турных измерений в скважинах. Поэтому изучение структуры СТК представляет не только научный, но и практический интерес.

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):

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

где g – ускорение свободного падения; β – коэффициент объемного температурного расширения; ν – кинематическая вязкость; a – температуропроводность; r – радиус скважины; G – температурный градиент. Входящие в это соотношение параметры β, ν, a, в свою очередь, зависят от температуры. Конвекция возникает, когда Ra превышает некоторое критическое значение Ra_{crit}. Последнее 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):

$$\mathrm{Ra}_{crit} = \frac{96}{5(1+7\lambda_f/\lambda_m)}\Big[3(33+103\lambda_f/\lambda_m) - \sqrt{3(2567+14794\lambda_f/\lambda_m+26927(\lambda_f/\lambda_m)^2}\Big]. \qquad (2)$$

Когда стенки скважины теплоизолированы ($\lambda_f / \lambda_m \to \infty$), Ra_{crit} = 68; если же массив представляет собой идеальный проводник тепла ($\lambda_f / \lambda_m = 0$), тогда $\mathrm{Ra}_{crit} = 216$.

Организовать систему наблюдений в реальной буровой скважине, позволяющую детально оценить структуру течений при различных числах Рэлея и температурных градиентах, весьма проблематично. Известные лабораторные методы исследования структуры СТК довольно приблизительно имитируют реальные условия буровой скважины. Обычно используется стеклянная водонаполненная труба, внешние стенки которой теплоизолируются, а необходимый температурный градиент обеспечивается подогревом воды в нижней части трубы (Остроумов, 1952; Berthold, Börner, 2008; Berthold, Resagk, 2012). В реальных же скважинах температурный градиент поддерживается именно теплообменом с породами. Информацию о структуре СТК получают либо с температурных датчиков, внедренных непосредственно в трубу (Остроумов, 1952), либо – путем наблюдения (фото и видео регистрации) 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 показал себя эффективным при оценке скоростей течений, однако дает весьма невнятную картину их пространственной организации. Мы разработали лабораторный метод моделирования СТК, позволяющий преодолеть некоторые из перечисленных недостатков.

Метод исследований

В основе метода исследования структуры течений СТК лежит инфракрасная визуализация температурных аномалий, возникающих на внешних стенках вертикальной водонаполненной керамической трубы, в которой поддерживаются условия конвекции. Опытным путем было установлено, что температурные возмущения внутри трубы лучше всего передаются на ее внешние стенки при использовании керамики. Метод был реализован в лабораторном стенде (рис. 1). Температурный градиент на внешних стенках трубы (1), установленной вертикально на штативе (5) создается восходящим потоком воздуха (2) от тороидального нагревателя (3), а пространственно-временное распределение температуры на внешней стенке трубы из-

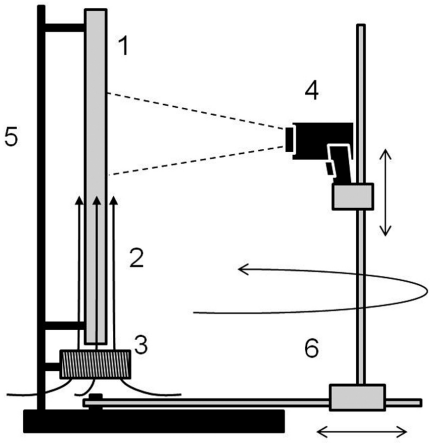

Рис. 1. Лабораторный стенд для моделирования СТК в водонаполненной скважине:
1 – керамическая труба; 2 – поток нагретого воздуха; 3 – нагреватель; 4 – инфракрасная камера Testo 875; 5 – штатив; 6 – система установки камеры

меряется с помощью инфракрасной камеры (4). Система установки инфракрасной камеры (6) обеспечивает возможность ее перемещения вертикально, горизонтально и вокруг трубы.

В реальных буровых скважинах диаметром 75–150 мм критический температурный градиент, при котором начинается конвекция, невелик: $n\cdot(10^{-3} – 10^{-4})$ К/м. Воссоздать и поддерживать его в лабораторных условиях довольно сложно. Но при уменьшении диаметра критический градиент резко возрастает. Для трубы с внутренним диаметром 20 мм (как в описываемом эксперименте) он составляет ~1 К/м. Температурные эффекты СТК также возрастают пропорционально увеличению градиента (Sammel, 1968; Diment, Urban, 1983; Eppelbaum, Kutasov, 2011), и их можно надежно регистрировать на фоне помех с помощью инфракрасной камеры. В то же время результаты эксперимента, используя принципы подобия, несложно обобщить на условия реальных скважин.

Измерения проводились с помощью инфракрасной камеры Testo 875 в центральной части трубы 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, левая колонка). 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 -π/2 до +π/2 через π/4). На рис. 2 (правая колонка) приведены азимутальные развертт-

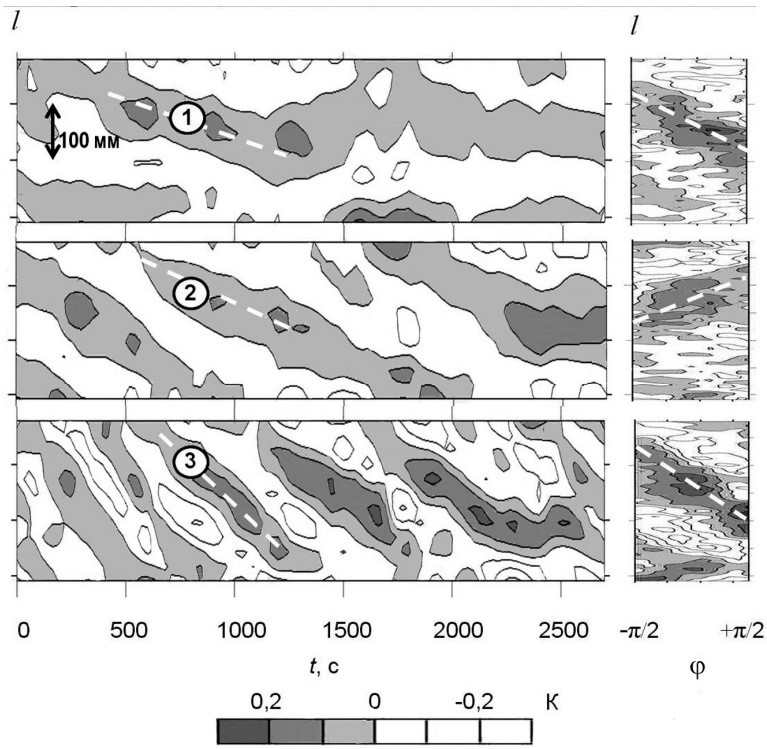

Рис. 2. Временная (левая колонка) и азимутальная (правая колонка) развертки температурных аномалий, вызываемых свободной тепловой конвекцией в вертикальной водонаполненной трубе при различных числах Рэлея. Условия эксперимента и результаты интерпретации участков аномалий, обозначенных цифрами 1–3, приведены в таблице и на рис. 3. Белым пунктиром выделены оси аномалий

Таблица. Условия экспериментов, характеристики аномалий и оценки параметров СТК

№ эксперимента	Условия эксперимента			Характеристики аномалий (по рис. 2)			Параметры течений СТК			
	T, °C	G, К/м	Ra	η_2, мм/с	η_1, мм/рад	τ_{nei}, с	h, мм	τ, с(мин)	n	направление закрутки: + правое – левое
1	29,8	1,2	294	0,124	32,9	1545	207	1667(27,8)	2	–
2	28,5	1,5	347	0,168	22,0	855	138	822(13,7)	2	+
3	24,4	2,8	516	0,368	41,7	364	262	712(11,9)	4	–

ки температурных аномалий, полученные на 16-й минуте мониторинга.

Результаты и интерпретация

Условия экспериментов и интерпретация результатов приведены в таблице и на рис. 2, 3. Устойчивые температурные неоднородности на внешних стенках начинают проявляться при Ra = 294. Картина аномалий однозначно указывает на то, что восходящие и нисходящие потоки СТК организованы в виде винтовых струй, вращающихся вокруг оси скважины (рис. 3). Для оценки параметров винтовой системы необходимо выделить оси аномалий и рассчитать их наклоны. Наклон аномалии на азимутальной развертке $\eta_1 = \Delta l_1/\Delta\varphi$ определяет шаг винта $h = 2\pi\cdot\eta_1$. Наклон аномалии на временной развертке $\eta_2 = \Delta l_2/\Delta t$ и шаг винта h позволяют оценить период полного оборота системы $\tau = h/\eta_2 = 2\pi\ \eta_1/\eta_2$

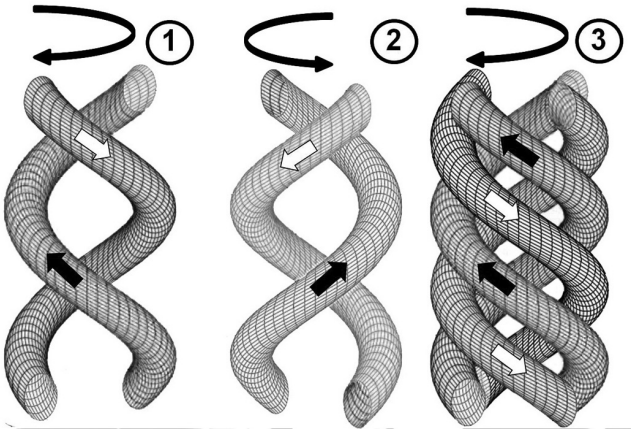

Рис. 3. Трехмерная реконструкция системы течений СТК. Черными стрелками обозначены восходящие потоки, белыми – нисходящие. Стрелки над рисунками указывают направление вращения. Цифры 1–3 соответствуют номеру эксперимента в таблице и на рис. 2

или угловую скорость вращения $\omega = 2\pi/\tau = \eta_2/\eta_1$. В простейшем случае, когда система состоит из двух струй – восходящей и нисходящей, – период оборота можно оценить непосредственно по временной развертке: он равен временному интервалу между одноименными аномалиями t_{nei} (см. таблицу). Однако при Ra ≈ 516 такая оценка занижает реальный период оборота примерно в два раза. Это свидетельствует о трансформации двухструйной системы в четырехструйную (рис. 3). В общем случае количество струй можно определить с помощью соотношения $n = 2\left\lfloor t/t_{nei}\right\rfloor$, в котором $\lfloor\cdot\rfloor$ – оператор округления до ближайшего целого.

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, т. к. необходимо знать теплопроводность массива. Здесь же речь может идти лишь об эффективной теплопроводности, учитывающей конвективный теплообмен между внешней стенкой трубы и потоком воздуха. Так как конвективный механизм намного эффективнее кондуктивного, можно предположить, что критическое число ближе к верхней оценке $Ra_{crit} = 216$.

Шаг винта в экспериментах варьировал от 138 до 262 мм; при этом не было обнаружено его зависимости от числа Рэлея. Примерно с равной вероятностью наблюдались как правые, так и левые винтовые системы. Напротив, скорость враще-

ния, по крайней мере, при небольших закритичностях зависела от числа Рэлея. При Ra = 294 наблюдалось неустойчивое вращение, минимальный период полного оборота достигал 28 минут, при Ra = 347 период уменьшался до 14 минут, при Ra = 516 – до 12 минут. В многочисленных опытах (помимо представленных здесь примеров) было обнаружено, что направление вращения всегда согласовано с направлением закручивания: правые винты вращались против часовой стрелки (если смотреть на трубу сверху), левые – по часовой (см. рис. 3).

Заключение

Впервые разработан экспериментальный лабораторный метод изучения структуры течений СТК в условиях, приближенных к скважинным, основанный на инфракрасной визуализации температурных аномалий, возникающих на внешних стенках вертикальной водонаполненной керамической трубы, в которой поддерживаются условия конвекции. Температурный градиент на внешних стенках трубы создается восходящим потоком воздуха от нагревателя.

Согласно сложившимся представлениям (Diment, Urban, 1983; Cermak et al., 2008; Berthold, Börner, 2008), течения СТК организованы в виде вертикальной последовательности конвективных ячеек (по типу ячеек Рэлея-Бенара в плоском слое). Математическое моделирование, независимо проведенное двумя группами авторов несколько лет назад (Миндубаев, Демежко, 2012; Хорошев, 2012), показало возможность реализации течений СТК в виде винтовых струй. В настоящей работе эта возможность впервые доказана экспериментально. Таким образом, термины: «ячейка» и «вертикальный размер ячейки» некорректны по отношению к исследуемому процессу. Единственным «характерным» вертикальным размером является шаг винта. В эксперименте он составил 140–260 мм или 7–13 в единицах внутреннего диаметра трубы.

Проведенные эксперименты впервые показали, что течения СТК в условиях, приближенных к условиям в буровых скважинах, представляют собой систему двух или четырех винтовых струй, вращающихся вокруг вертикальной оси.

Литература

Гершуни Г.Э., Жуховиций Г.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 393 с.

Демежко Д.Ю., Юрков А.К., Уткин В.И., Климшин А.В. О природе температурных вариаций в скважине KUN-1 (о. Кунашир) // Геология и геофизика. 2012а. Т. 53. № 3. С. 406–414.

Переводная версия: Demezhko, D.Yu., Yurkov, A.K., Utkin, V.I., Klimshin, A.V. On the nature of temperature variations in borehole kun-1 (Kunashir Island) / Russian Geology and Geophysics. 2012. V. 53. issue 3. P. 313–319. DOI: 10.1016/j.rgg.2012.02.008.

Демежко Д.Ю., Юрков А.К., Уткин В.И., Щапов В.А. Температурные изменения в скважине kun-1 (о. Кунашир), вызванные землетрясением Тохоку (11.03. 2011. M = 9,0) // ДАН. 2012б. Т. 445. № 2. С. 200–204.

Переводная версия: D.Yu. Demezhko, A.K. Yurkov, V.I. Outkin, V.A. Shchapov. Temperature changes in the KUN-1 borehole, Kunashir Island, induced by the Tohoku Earthquake (March 11, 2011, M = 9.0) // Doklady Earth Sciences. 2012. V. 445 (1). С. 883–887.

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 протяжённых 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.

Berthold S., Börner F. Detection of free vertical convection and double-diffusion in groundwater monitoring wells with geophysical borehole measurements // Environmental geology. 2008. V. 54 (7). P. 1547–1566.

Berthold S., Resagk C. Investigation of thermal convection in water columns using particle image velocimetry // Experiments in fluids. 2012. V. 52 (6). P. 1465–1474.

Cermak V., Bodri L., Safanda J. Precise temperature monitoring in boreholes: evidence for oscillatory convection? Part II: theory and interpretation // International Journal of Earth Sciences. 2008. V. 97(2). P. 375–384, doi:10-1007/s00531-007-0250-7.

Cermak V., Safanda J., Bodri L. Thermal instability of the fluid column in a borehole: application to the Yaxcopoil hole (Mexico) // International Journal of Earth Sciences. 2010. V. 99(6). P. 1437–1451.

Diment W. H. and 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 // Journal of Geophysics and Engineering. 2011. V. 8(1). P. R1–R10.

Lapham W.W. Use of temperature profiles beneath streams to determine rates of vertical ground-water flow and vertical hydraulic conductivity. – Dept. of the Interior, US Geological Survey; USGPO; Books and Open-File Reports Section, US Geological Survey [distributor]. 1989. №. 2337.

Pehme P., Parker B., Cherry J., Blohm D. Detailed measurement of the magnitude and orientation of thermal gradients in lined boreholes for characterizing groundwater flow in fractured rock // Journal of Hydrology. 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 and applied geophysics. 1985. V. 122(6). P. 933–946.

Time-dependent microtemperature and hydraulic transients associated with tectonic/ seismic activity – a review // Time-dependent microtemperature and hydraulic signals associated with tectonic/seismic ac-tivity / Eds. G. Buntebarth, T. Chelidze, M. Middleton. Tbilisi, 2005. P. 4–1.