

УДК 550.360; 550.832.6

КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЙ ЭФФЕКТ СВОБОДНОЙ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ В ВОДОНАПОЛНЕННЫХ БУРОВЫХ СКВАЖИНАХ

Демежко Дмитрий Юрьевич¹,
ddem54@inbox.ru

Хацкевич Богдан Дмитриевич¹,
disaybl@yandex.ru

Миндубаев Мансур Габдрахимович¹,
mansur_mg@mail.ru

¹ Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН,
Россия, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100.

Актуальность. Температурные измерения в водонаполненных буровых скважинах используются для решения широкого круга разведочных, промыслово-геофизических, экологических, гидрогеологических, геодинамических задач. Свободная тепловая конвекция, возникающая в скважинах при геотермическом градиенте, превышающем критическое значение, вызывает два вида термических эффектов – нестационарный и квазистационарный. Нестационарный эффект проявляется непериодическими температурными колебаниями относительно некоторого среднего значения (температурный шум) и оперирует в широком диапазоне частот – от секундных до часовых. Квазистационарный эффект связан с долговременными отклонениями температуры и градиента в скважине относительно невозмущенных характеристик окружающих пород. Последний эффект приводит к ошибочным оценкам формационных температур и тепловых потоков.

Цель: обоснование применимости аппроксимационной математической модели Раменя, описывающей термический эффект вынужденных течений, для оценки квазистационарного эффекта свободной тепловой конвекции в скважине; адаптация и верификация модели на экспериментальных данных термометрии скважин.

Методы: анализ геотермических и технологических параметров, определяющих квазистационарный эффект свободной тепловой конвекции, описываемых моделью Раменя; сопоставление расчетов по модели Раменя с данными экспериментальных исследований в скважинах.

Результаты. Обосновано и экспериментально верифицировано применение модели Раменя для оценки квазистационарного термического эффекта свободной тепловой конвекции в водонаполненных скважинах. Уменьшение измеренного температурного градиента в сравнении с невозмущенным градиентом в окружающих скважину горных породах локализуется в верхнем и нижнем интервалах скважины. Эффект проявляется заметнее, а интервалы расширяются по мере увеличения скорости конвективных течений, в свою очередь, зависящей от числа Рэлея и диаметра скважины. В меньшей степени на величину эффекта влияет глубина скважины.

Ключевые слова:

Скважина, температурный кочтаж, температурный градиент, свободная тепловая конвекция, квазистационарный эффект, модель Раменя.

Введение

Явление свободной тепловой конвекции (СТК) в буровых скважинах может существенно искажать температурное поле, установившееся в окружающих скважину горных породах (так называемые формационные температуры). Между тем точное знание температуры необходимо для оценки плотности теплового потока при изучении теплового поля Земли [1–4], в гидрогеологических [5–7] и геодинамических [8, 9] исследованиях, при палеотемпературном моделировании для прогнозирования нефтегазоносности осадочных бассейнов [10–12], в палеоклиматических реконструкциях [13, 14].

Долгое время считалось, что эти искажения проявляются в виде температурных колебаний относительно реального значения температуры горных пород на данной глубине и вносят в измерения лишь случайную погрешность [2, 15]. Поэтому при оценке температуры или температурного градиента достаточно сгладить температурный шум или увеличить интервал оценки градиента. Исследованию характе-

ристик этих колебаний посвящены работы [16–24 и др.]. Ранее [25] мы показали, что конвективный температурный шум имеет нормальное распределение и на основании большой выборки экспериментальных данных предложили соотношения, позволяющие оценивать среднеквадратическое отклонение температурных колебаний СТК в зависимости от геотермического градиента, внутреннего радиуса скважины и числа Рэлея.

Однако помимо температурного шума (нестационарного термического эффекта) СТК вызывает и т. н. квазистационарный эффект [22], проявляющийся закономерным уменьшением температурного градиента относительно его значения в горных породах. Под влиянием этого эффекта измеренная термограмма «выпрямляется». Хотя численное моделирование [22] и не позволило нам надежно оценить характеристики этого явления, мы предположили, что его термический эффект аналогичен вызываемому циркуляцией скважинной жидкости в процессе бурения или промывки скважины. В настоящей статье мы впервые показали возможность количественного описания

квазистационарного эффекта СТК с помощью аналитических соотношений – аппроксимационной математической модели Рамея [26], разработанной для описания термических эффектов вынужденных течений в скважине. Различия между свободной конвекцией и принудительной циркуляцией лишь в крайне низких скоростях свободно-конвективных течений.

Модель

В 1962 г. Г.Дж. Рамей предложил аппроксимационную математическую модель для описания распределения температуры вдоль однородного потока жидкости, закачиваемой в скважину [26]. В настоящее время эта модель и ее производные успешно используются при решении многих задач промышленной геофизики, когда требуется оценить температуру скважинных флюидов, насосно-компрессорных труб и обсадных колонн в зависимости от глубины и продолжительности производственных процессов [27–30].

Распределение температуры вдоль нисходящего потока жидкости описывается формулой:

$$T^\downarrow(z, t) = T_0(z) - Gl(t) + [T_f - T_s + Gl(t)] e^{-z/l(t)}, \quad (1)$$

где z – глубина от поверхности; t – время; $T_0(z) = T_s + Gz$ – невозмущенная температура на глубине z ; T_f – температура закачиваемого флюида; T_s – температура на поверхности; G – невозмущенный геотермический градиент. Характерная длина $l(t)$ определяется через интегральный коэффициент теплопроводности $\Lambda(t)$, учитывающий теплоперенос от потока флюида к горным породам, удельную теплоемкость флюида c_f и массовый поток флюида Φ :

$$l(t) = \frac{c_f \Phi}{\Lambda(t)}.$$

В свою очередь, поток флюида зависит от его скорости V , плотности ρ_f и радиуса скважины r : $\Phi = \pi r^2 \rho_f V$. Интегральный коэффициент теплопроводности $\Lambda(t)$ равен:

$$\Lambda(t) = 2\pi \left(\frac{2}{\lambda_f Nu} + \frac{T_D(t)}{\lambda_m} \right)^{-1},$$

где λ_f, λ_m – теплопроводности флюида и массива горных пород; Nu – число Нуссельта; $T_D(t)$ – безразмерная температура, определяющая теплообмен между потоком флюида и окружающим массивом [30]

$$T_D(t) = \ln \left(1 + 1,3 \sqrt{\frac{a_m t}{r^2}} \right).$$

где a_m – температуропроводность массива горных пород. Число Нуссельта можно выразить через числа Рейнольдса и Прандтля: $Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}$ [30]. $Pr = \nu / a_f$, где ν и a_f – кинематическая вязкость и температуропроводность флюида. Число Рейнольдса определяется как $Re = 2 \Phi / (\pi r \mu_f)$; μ_f – динамическая вязкость.

Поскольку свободная тепловая конвекция не добавляет дополнительного флюида в скважину, то $T_f = T_s$ и формула (1) упрощается

$$T^\downarrow(z, t) = T_0(z) - Gl(t) (1 - e^{-z/l(t)}).$$

Для восходящего потока можно записать:

$$T^\uparrow(z, t) = T_0(z) + Gl(t) (1 - e^{-(h-z)/l(t)}),$$

где h – глубина скважины.

Термический эффект восходящих и нисходящих потоков СТК можно оценить как

$$T(z, t) = (T^\downarrow(z, t) + T^\uparrow(z, t)) / 2,$$

а относительное изменение температурного градиента

$$\eta = \frac{dT(z, t)}{dz} \frac{1}{G}.$$

Вместо скорости потока в задаче о конвекции необходимо использовать средний модуль вертикальной компоненты скорости конвективных течений. На рис. 1–3 приведены распределения температуры и относительного изменения температурного градиента вдоль скважины в зависимости от скорости течений, глубины и радиуса скважины.

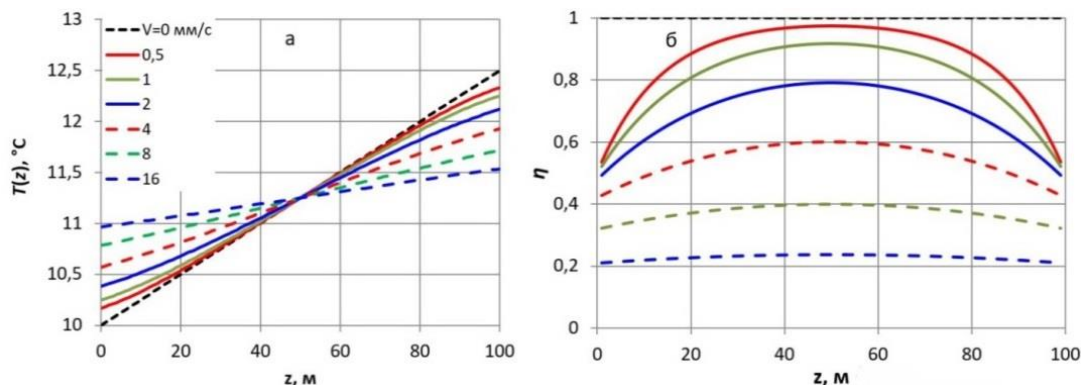


Рис. 1. Распределения температуры (а) и относительного изменения температурного градиента (б) вдоль скважины в зависимости от среднего модуля вертикальной компоненты конвективных течений. Параметры расчета: $r=0,05$ м, $h=100$ м, $T_s=10$ °С, $G=0,025$ К/м, $V=0, 0,5, 1, 2, 4, 8, 16$ мм/с, $t=1$ год

Fig. 1. Distribution of temperature (a) and the relative temperature gradient change (b) along the borehole depending on the mean modulus of the vertical component of the convective current velocity. Calculation parameters are: $r=0,05$ m, $h=100$ m, $T_s=10$ °C, $G=0,025$ K/m, $V=0, 0,5, 1, 2, 4, 8, 16$ mm/s, $t=1$ year

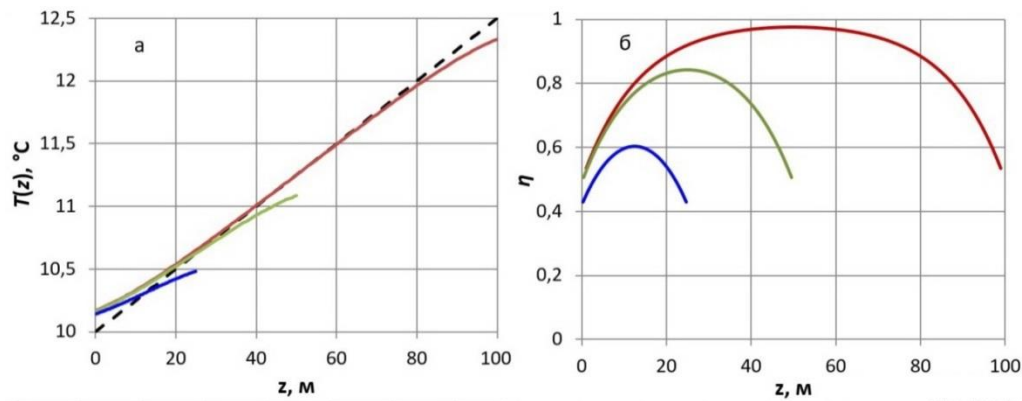


Рис. 2. Распределения температуры (а) и относительного изменения температурного градиента (б) вдоль скважины в зависимости от ее глубины. Параметры расчета: $r=0,05$ м, $T_s=10$ °С, $G=0,025$ К/м, $h=25, 50, 100$ м, $V=0,5$ мм/с, $t=1$ год

Fig. 2. Distribution of temperature (a) and relative change in the temperature gradient (b) along the borehole, depending on its depth. Calculation parameters are: $r=0,05$ m, $T_s=10$ °C, $G=0,025$ K/m, $h=25, 50, 100$ m, $V=0,5$ mm/s, $t=1$ year

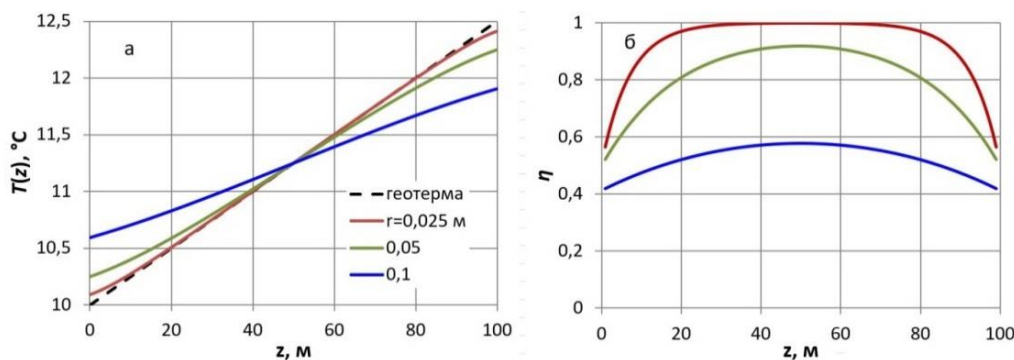


Рис. 3. Распределения температуры (а) и относительного изменения температурного градиента (б) вдоль скважины в зависимости от ее радиуса. Параметры расчета: $r=0,025, 0,05, 0,1$ м, $T_s=10$ °С, $G=0,025$ К/м, $h=100$ м, $V=1,0$ мм/с, $t=1$ год

Fig. 3. Distribution of temperature (a) and the relative change in the temperature gradient (b) along the borehole, depending on its radius. Calculation parameters are: $r=0,025, 0,05, 0,1$ m, $T_s=10$ °C, $G=0,025$ K/m, $h=100$ m, $V=1,0$ mm/s, $t=1$ year

С увеличением скорости течений и радиуса скважины температурный градиент закономерно уменьшается. Наибольшие изменения происходят вблизи верхней и нижней границ скважины (заполненного флюидом интервала). При небольших скоростях течения (среднего модуля вертикальной компоненты скорости) срединный интервал скважины сохраняет практически невозмущенный градиент. С увеличением скорости уменьшается нелинейность распределения температуры. Изначально линейный температурный профиль просто разворачивается, сохраняя постоянный градиент – так же, как и в случае циркуляции бурового раствора [15, 31, 32].

Согласно модели, температурная аномалия СТК растет со временем и достигает максимума (когда температуры в интервале конвекции полностью выравниваются, а градиент становится равным нулю) за бесконечно большой период. Однако темпы роста аномалии неодинаковы. Для условий, принятых на рис. 1, максимальное значение температурной аномалии равно 2,5 К. При $V=0,5$ мм/сек за первую минуту аномалия у границ интервала достигает 0,12 К, но уже через сутки скорость ее роста падает до 0,006 К/сутки, через год – до

0,006 К/год, то есть аномалия практически стационарируется (отсюда термин – квазистационарный эффект).

Влияние диаметра скважины на интенсивности конвекции ранее отмечалось и в неглубоких воздухо-наполненных скважинах [33].

Скорости конвективных течений

Применение модели Раменя требует знания среднего модуля вертикальной компоненты скорости. Эта характеристика СТК в настоящее время остается наименее изученной. В лабораторном эксперименте [21] оценки скоростей конвективных течений были получены путем наблюдения за движением непрозрачных частиц нулевой плавучести, помещенных в прозрачный водонаполненный цилиндр, в котором поддерживался положительный температурный градиент. С увеличением числа Рэлея от 350 до 3700 модуль полного вектора скорости возрастал от 0,1 до 1,0 мм/с. Вертикальная компонента, естественно, была меньше, но имела тот же порядок.

В численном эксперименте [22] было получено соотношение для оценки вертикальной компоненты скорости:

$$V = 1,86 \frac{a_f}{r} \sqrt{Ra - Ra_{кр}}, \quad R^2 = 0,999, \quad (2)$$

где $Ra = g\beta r^4 G/va$ – число Рэлея; g – ускорение свободного падения; β – коэффициент теплового расширения; $Ra_{кр}$ – критическое значение числа Рэлея. Для открытого ствола $Ra_{кр} = 152$, для скважины, обсаженной стальной колонной $Ra_{кр} = 212$ [34].

Проверка модели в условиях реальных скважин

Скважина ИГФ-60

На рис. 4 приведены результаты температурных измерений в скважине ИГФ-60, расположенной на территории Института геофизики УрО РАН [24]. Распространение годовой температурной волны приводит к появлению в мае–июне в обводненной части скважины (>6,2 м) положительного температурного градиента, достаточного для инициации свободной тепловой конвекции. Температурный шум СТК со среднеквадратическим отклонением $\sigma = 26\text{--}44$ мК (рис. 4, а) наблюдался в интервале 0–3 м ниже уровня воды;

еще ниже годовая волна затухала настолько, что температурный градиент уже не обеспечивал поддержки СТК. Таким образом, в условиях скважины ИГФ-60 тепловая конвекция и вызываемые ею термические эффекты проявлялись лишь ограниченное время и на ограниченном интервале. В конвективном режиме температурный градиент в исследуемом интервале был равен 0,03–0,07 К/м (рис. 4, б). Подавление конвекции с помощью устройства, представляющего собой вертикальные полиэтиленовые пластины [35], привело к уменьшению уровня температурного шума до $\sigma = 2\text{--}4$ мК и увеличению температурного градиента до 0,3 К/м.

Для условий скважины ИГФ-60 ($r = 0,0525$ м, $G = 0,3$ К/м, $\beta = 1,54 \cdot 10^{-5}$ К $^{-1}$, $a_f = 1,32 \cdot 10^{-7}$ м 2 /с, $\nu = 1,54 \cdot 10^{-6}$ м 2 /с) $Ra = 1680$, а средний модуль вертикальной компоненты скорости, согласно (2), $V = 0,2$ мм/с. На рис. 4, б пунктиром обозначены теоретические оценки температурных распределений при наличии и отсутствии конвекции, полученные по модели Рамея.

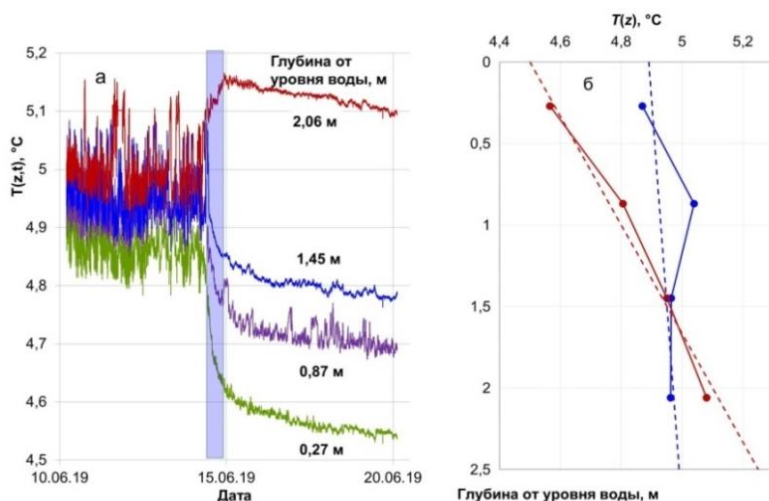


Рис. 4. Результаты температурных исследований в скважине ИГФ-60: а) графики температурного мониторинга (момент установки устройства для подавления конвекции обозначен синим прямоугольником); б) вертикальные распределения температуры до (синие маркеры) и после (красные маркеры) подавления конвекции. Пунктир – теоретические оценки по модели Рамея. Параметры расчета: $r = 0,0525$ м, $T_s = 4,5$ °С, $G = 0,3$ К/м, $h = 3$ м, $Ra = 1680$, $Ra_{кр} = 212$, $V = 0,2$ мм/с, $t = 1$ месяц

Fig. 4. Temperature investigations in the IGF-60 borehole: а) temperature monitoring (installation of the device for suppressing convection is marked with a blue rectangle); б) vertical temperature distributions before (blue markers) and after (red markers) suppression of convection. Dotted line – theoretical estimates according to the Ramey model. Calculation parameters are: $r = 0,0525$ m, $T_s = 4,5$ °C, $G = 0,3$ K/m, $h = 3$ m, $Ra = 1680$, $Ra_{cr} = 212$, $V = 0,2$ mm/s, $t = 1$ month

За исключением «выпавшей» точки на глубине 0,87 м, возможно, отражающей температурную аномалию гидрогеологической природы, теоретические распределения хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Скважина INEL-GT1

Скважина INEL-GT1 глубиной 3130 м была пробурена в 1982 г. на геотермальном полигоне в Айдахо. До глубины 2070 м скважина обсажена, ниже расположен открытый ствол диаметром 12 ¼” (156 мм). Точечные температурные измерения проводились через 0,2 м в 1990 г. [36]. Температурный градиент в от-

крытом стволе сохраняется постоянным (рис. 5), а температура на забое достигает 140 °С. Высококачественные колебания температурного градиента свидетельствуют о развитой свободной тепловой конвекции. Призабойный участок скважины демонстрирует снижение градиента, которое автор объясняет «призабойным эффектом». Такое объяснение не выглядит убедительным, поскольку этим термином (hole end effect, bottomhole temperatures) обычно обозначают не снижение, а повышение градиента, связанное с более быстрой релаксацией температурного поля в призабойной части скважины после окончания бурения ([37] и ссылки в этой работе).

Условия скважины INEL-GT1 ($r=0,156$ м, $G=0,046$ К/м, $T_{cp}=117$ °С, $\beta=7,47 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹, $a_f=1,71 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\nu=2,52 \cdot 10^{-7}$ м²/с) определяют высокие значения числа Рэлея ($Ra=3,87 \cdot 10^5$) и среднего модуля вертикальной компоненты скорости ($V=1,3$ мм/с). Рассчитанное по модели Раменя распределение градиента в призабойной части скважины приведено на рис. 5 (красная сплошная линия). Теоретическая оценка преувеличивает область проявления квазистационарного эффекта СТК, хотя амплитуда искажения градиента оценивается верно. Более или менее хорошее согласие с экспериментальным распределением обеспечивает снижение скорости течений на порядок (до $V=0,1$ мм/с). Возможно, соотношение (2), полученное численным моделированием для $Ra < 2 \cdot 10^3$, преувеличивает оценку скорости для больших Ra .

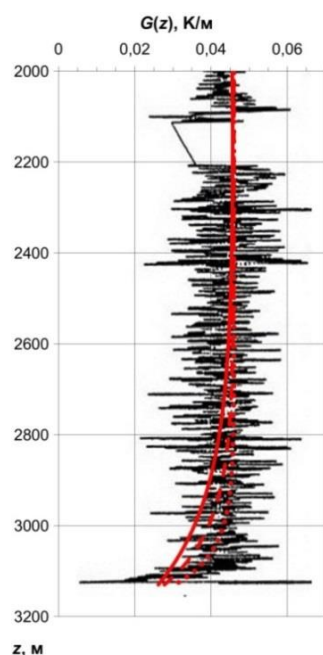


Рис. 5. Экспериментальное (черная кривая, [36]) и теоретическое (красные кривые) распределение температурного градиента в скважине INEL-GT1. $V=1,3$ мм/с (красная сплошная линия), $V=0,5$ мм/с (пунктир), $V=0,1$ мм/с (точки)

Fig. 5. Experimental (black curve, [36]) and theoretical (red curves) temperature gradient distribution in the INEL-GT1 well. $V=1,3$ mm/s (red solid line), $V=0,5$ mm/s (dotted line), $V=0,1$ mm/s (dots)

Обсуждение

Одно из главных научных приложений скважинной термометрии – оценка плотности геотермического теплового потока различных тектонических структур. Плотность теплового потока рассчитывается по данным измерений температурных градиентов и теплопроводности горных пород $q = -\lambda G$ [2, 38 и др.]. Для условий, представленных на рис. 2, вполне обычных в практике геотермических исследований, длина самого верхнего и самого нижнего интервалов, для которых ошибка η оценки геотермического градиента превышает 5 %, составляет $L_{\eta>5\%}=35$ м. Для достижения ошибки $\eta < 1$ % необходимо исключить измерения

в крайних интервалах длиной $L_{\eta>1\%}=60$ м. Величина L слабо зависит от глубины скважины. Наиболее надежные оценки теплового потока получают по данным измерений в глубоких скважинах, поэтому в случае километровой скважины остается еще достаточно места для оценки теплового потока. Длина интервалов, которые необходимо исключить из расчетов, увеличивается с ростом скорости течений. В километровой скважине при скорости 5 мм/с, достигаемой при $Ra \sim 10^6$ (остальные параметры как на рис. 2) $L_{\eta>5\%}=160$ м, а $L_{\eta>1\%}=270$ м.

Другое важное приложение температурных измерений – реконструкция температурной истории земной поверхности [13, 14, 39 и др.]. Обусловленное конвекцией уменьшение температурного градиента в верхней части термограммы может быть ложно интерпретировано как недавнее потепление. Нижняя часть, в которой наблюдается такое же уменьшение градиента, скорее всего, будет исключена из палеоклиматической интерпретации. Масштаб ложных палеоклиматических реконструкций можно оценить с помощью простой модели одноактного мгновенного увеличения температуры земной поверхности, происшедшего некоторое время до начала измерений [39, 40]. При скорости течений 0,5 мм/с (остальные параметры как на рис. 2) термический эффект конвекции примерно соответствует потеплению на 0,2 К 5 лет назад, а при $V=5$ мм/с – потеплению на 0,8 К 120 лет назад.

Таким образом квазистационарный эффект свободной тепловой конвекции, проявляющийся уменьшением температурного градиента, измеренного в скважине в сравнении с невозмущенным градиентом в окружающей скважину горных породах, необходимо учитывать при оценках теплового потока и при палеоклиматической интерпретации геотермических данных. Мы полагаем, что в большинстве существующих в настоящее время оценок потока и палеоклиматических реконструкций [41] влияние конвекции не столь велико. Большая часть оценок потока сделана вдали от границ скважины. К сожалению, в базах данных не приводятся сведения о диаметре скважины, в которой проводились измерения. Включение в них информации о конструкции скважины (внутренний диаметр, наличие обсадной колонны) позволило бы количественно оценить искажающий квазистационарный эффект СТК.

На термометрические измерения для решения задач разведочной и промысловой геофизики квазистационарный эффект СТК практически не оказывает влияния.

Заключение

Квазистационарный эффект свободной тепловой конвекции в водонаполненных скважинах выражается в уменьшении измеренного температурного градиента в сравнении с невозмущенным градиентом в окружающей скважину горных породах. Проведенные исследования позволили адаптировать аппроксимационную аналитическую модель Раменя для описания и оценки квазистационарного термического эффекта

Основные геотермические и технологические параметры, определяющие эффект: геотермический градиент, скорость конвективных течений, диаметр и глубина скважины. В глубоких скважинах эффект локализуется в ее верхнем и нижнем интервалах, длина которых определяется интенсивностью конвекции и, как следствие, вертикальной компоненты скорости течений.

Предложенная методика оценки квазистационарного эффекта позволит более эффективно планиро-

вать температурные исследования скважин и рассчитывать возможные погрешности определения формационных температур, температурных градиентов и геотермических тепловых потоков.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ, проект № 19-05-00050-а (моделирование квазистационарного эффекта, анализ данных температурного каротажа и мониторинга) и госбюджетной темы НИР № 0394-2018-0002 (проведение полевых экспериментальных исследований в скважине и исследований на лабораторной установке).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Любимова Е.А. Термика Земли и Луны. – М.: Наука, 1968. – 280 с.
2. Beardmore G.R., Cull J.P. Crustal heat flow: a guide to measurement and modelling. – Edinburgh: Cambridge University Press, 2001. – 324 p.
3. Terrestrial heat flow of continental China: updated dataset and tectonic implications / G. Jiang, S. Hu, Y. Shi, C. Zhang, Z. Wang, D. Hu // Tectonophysics. – 2019. – V. 753. – P. 36–48.
4. Burton-Johnson A., Dziadek R., Martin C. Geothermal heat flow in Antarctica: current and future directions // The Cryosphere. – 2020. – V. 14 (11). – P. 3843–3873.
5. Lapham W.W. Use of temperature profiles beneath streams to determine rates of vertical ground-water flow and vertical hydraulic conductivity. – Denver: US Geological Survey Publ., 1989. – 44 p.
6. Anderson M.P. Heat as a ground water tracer // Ground water. – 2005. – V. 43 (6). – P. 951–968.
7. Johnsson J., Adl-Zarrabi B. Modelling and evaluation of groundwater filled boreholes subjected to natural convection // Applied Energy. – 2019. – V. 253. – P. 113555.
8. Свалова В. Б. Геотермия и сейсмичность Кавказского региона и обратная задача геодинамики // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. – № 3. – С. 77–93.
9. He A., Singh R.P. Coseismic groundwater temperature response associated with the Wenchuan earthquake // Pure and Applied Geophysics. – 2020. – V. 177 (1). – P. 109–120.
10. Экспресс-районирование материнской свиты по плотности ресурсов генерированной нефти (на примере Нюрольской мегавпадины) / В.И. Исаев, О.С. Исаева, Г.А. Лобова, В.И. Старостенко, А.Н. Фомин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 3. – С. 23–37.
11. Тектоно-седиментационная интерпретация данных геотермии при выявлении и оценке позднеэоценовой эрозии на арктических месторождениях углеводородов (п-ва Ямал). / В.И. Исаев, В.И. Старостенко, Г.А. Лобова, А.Н. Фомин, А.К. Исагалиева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 19–31.
12. Прохорова П.Н., Развозжаева Е.П., Исаев В.И. Геотермия и оценка нефтегазового потенциала Буреинского бассейна (Дальний Восток России) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 65–76.
13. Демежко Д.Ю. Геотермический метод реконструкции палеоклимата (на примере Урала). – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 144 с.
14. Bodri L., Cermak V. – Amsterdam: Elsevier, 2007. – 352 p.
15. Череманский Г.А. Прикладная геотермия. – Л.: Недра, 1977. – 224 с.
16. 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.
17. Sammel E.A. Convective flow and its effect on temperature logging in small-diameter wells // Geophysics. – 1968. – V. 33 (6). – P. 1004–1012.
18. Cermak V., Safanda J., Bodri L. Precise temperature monitoring in boreholes: Evidence for oscillatory convection? Part I. Experiments and field data // International Journal of Earth Sciences. – 2008. – V. 97 (2). – P. 365–373.
19. 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.
20. 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. 1–10.
21. 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.
22. 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.
23. Демежко Д.Ю., Хацкевич Б.Д., Миндубаев М.Г. Исследование свободной тепловой конвекции в вертикальном цилиндре методом инфракрасной термографии // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60. – № 7. – С. 1028–1035.
24. Демежко Д.Ю., Хацкевич Б.Д., Миндубаев М.Г. Методы подавления свободной тепловой конвекции в водонаполненных скважинах при проведении температурных исследований // Георесурсы. – 2020. – Т. 22. – № 1. – С. 55–62.
25. Демежко Д.Ю., Хацкевич Б.Д., Миндубаев М.Г. Оценка температурного шума свободной тепловой конвекции в водонаполненных буровых скважинах по экспериментальным данным // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 136–143.
26. Ramey H.J. Jr Wellbore heat transmission // Journal of petroleum Technology. – 1962. – V. 14 (4). – P. 427–435.
27. Drury M.J., Jessop A.M., Lewis T.J. The detection of groundwater flow by precise temperature measurements in boreholes // Geothermics. – 1984. – V. 13 (3). – P. 163–174.
28. Котляр Л.А. Математическое моделирование и интерпретация нестационарных термогидродинамических процессов в системе скважина-пласт: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2013. – 145 с.
29. Kolo I., Sousa R., Zhang T. Heat transmission in a geothermal wellbore: modelling and application // 19th Australasian Fluid Mechanics Conference. – Melbourne, 2014. – P. 1–4.
30. Способ определения профиля закачки воды в нагнетательной скважине: пат. Рос. Федерация, № 2580547, заявл. 19.12.2014; опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10. – 26 с.
31. Астрахан И.М., Марон В.И. Нестационарный теплообмен при промывке скважины // Прикладная механика и техническая физика. – 1969. – Т. 10. – № 1. – С. 148–152.
32. Heat flow from a scientific research well at Cajon Pass, California / J.H. Sass, A.H. Lachenbruch, T.H. Moses, P. Morgan // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1992. – V. 97 (B4). – P. 5017–5030.
33. Borehole diameter controls thermal-induced convection and evaporation from a shallow water table / E. Levintal, M.I. Dragila, N.G. Lensky, N. Weisbrod // Geophysical Research Letters. – 2020. – V. 47 (18). – P. e2020GL089411.
34. Гершуни Г.Э., Жуховицкий Г.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. – М.: Наука, 1972. – 393 с.
35. Способ температурного мониторинга в водонаполненных скважинах: пат. Рос. Федерация, № 26781746, заявл. 12.03.2018, опубл. 23.01.2019, Бюл. № 3. – 8 с.

36. Blackwell D.D. Temperatures and heat flow in INEL-GT1 and WO-2 boreholes, Snake River Plain, Idaho. – Dallas, Southern Methodist University Publ., 1990. – 29 p.
37. Prenskey S. Temperature measurements in boreholes-An overview of engineering and scientific applications // The Log Analyst. – 1992. – V. 33 (3). – P. 313–333.
38. Pollack H.N., Hurter S.J., Johnston J.R. Heat loss from the earth's 1025 interior: analysis of the global data set // Review of Geophysics and Space Physics. – 1993. – V. 31. – P. 267–280.
39. Lachenbruch A.H., Marshall B.V. Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic // Science. – 1986. – V. 234 (4777). – P. 689–696.
40. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
41. International Heat Flow Commission (IHFC). URL: <http://ihfc-iugg.org> (дата обращения 02.12.2020).

Поступила 16.06.2021 г.

Информация об авторах

Демежко Д.Ю., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории геодинамики Института геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН.

Хацкевич Б.Д., младший научный сотрудник лаборатории геодинамики Института геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН.

Миндубаев М.Г., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики Института геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН.

UDC 550.360; 550.832.6

QUASI-STATIONARY EFFECT OF FREE THERMAL CONVECTION IN WATER-FILLED BOREHOLES

Dmitry Yu. Demezhko¹,
ddem54@inbox.ru

Bogdan D. Khatskevich¹,
disaybl@yandex.ru

Mansur G. Mindubaev¹,
mansur_mg@mail.ru

¹ Yu.P. Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
100, Amundsen street, Yekaterinburg, 620016, Russia.

The relevance. Temperature measurements in water-filled boreholes and wells are used for solving a wide range of exploration, geophysical, environmental, hydrogeological, and geodynamic problems. Free thermal convection that occurs in boreholes with a geothermal gradient exceeding a critical value causes two types of thermal effects – non-stationary effect and quasi-stationary one. The non-stationary effect is manifested by non-periodic temperature fluctuations relative to a certain average value (temperature noise) and operates in a wide range of frequencies – from seconds to hourly. The quasi-stationary effect is associated with long-term deviations of temperature and gradient in the borehole relative to the undisturbed characteristics in the surrounding rocks. The last effect leads to erroneous estimates of formation temperatures and heat flows.

The main aim of the research is justification of the applicability of the Ramey's approximation model describing the thermal effect of forced fluid flows to assess the quasi-stationary effect of free thermal convection. Adaptation and verification of the model by experimental borehole temperature data.

Methods: analysis of geothermal and technological parameters determining the quasi-stationary effect of free thermal convection described by the Ramey's model; comparison of calculations based on the Ramey's model with data from experimental studies in boreholes.

Results. The application of the Ramey's model for evaluating the quasi-stationary thermal effect of free thermal convection in water-filled boreholes has been substantiated and experimentally verified. The decrease in the measured temperature gradient in comparison with the undisturbed gradient in the surrounding rocks is localized in the upper and lower intervals of the borehole. The effect is more pronounced and intervals are wider as the convective flow velocity increases, which in its turn depends on the Rayleigh number and the borehole diameter. The effect is less dependent on the total depth of the borehole.

Key words:

Borehole, temperature logging, temperature gradient, free thermal convection, quasi-stationary effect, Ramey's model.

The research was supported by the RFBR, project no. 19-05-00050-a (modelling quasi-stationary effect, analysis of the temperature logging and monitoring data) and state-financed subject R&D no. 0394-2018-0002 (field experimental investigations in a well and studies on the laboratory unit).

REFERENCES

- Lubimova E.A. *Termika Zemli I Luni* [Thermics of the Earth and Moon]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 280 p.
- Beardsmore G.R., Cull J.P. *Crustal heat flow: a guide to measurement and modelling*. Edinburg, Cambridge University Press, 2001. 324 p.
- Jiang G., Hu S., Shi Y., Zhang C., Wang Z., Hu D. Terrestrial heat flow of continental China: Updated dataset and tectonic implications. *Tectonophysics*, 2019, vol. 753, pp. 36–48.
- Burton-Johnson A., Dziadek R., Martin C. Geothermal heat flow in Antarctica: current and future directions. *The Cryosphere*, 2020, vol. 14 (11), pp. 3843–3873.
- Lapham W.W. *Use of temperature profiles beneath streams to determine rates of vertical ground-water flow and vertical hydraulic conductivity*. Denver, US Geological Survey Publ., 1989. 44 p.
- Anderson M.P. Heat as a ground water tracer. *Ground water*, 2005, vol. 43 (6), pp. 951–968.
- Johnsson J., Adl-Zarrabi B. Modelling and evaluation of ground-water filled boreholes subjected to natural convection. *Applied Energy*, 2019, vol. 253, p. 113555.
- Svalova V.B. Geothermics and seismicity of the Caucasus region and inverse problem of geodynamics. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2019, vol. 9 (3), pp. 79–93. In Rus.
- He A., Singh R.P. Coseismic groundwater temperature response associated with the Wenchuan earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 2020, vol. 177 (1), pp. 109–120.
- Isaev V.I., Isaeva O.S., Lobova G.A., Starostenko V., Fomin A.N. Express zoning of the parent suite on density of generated oil resources (by the example of Nyuroilka megadepression). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 3, pp. 23–37. In Rus.
- Isaev V.I., Starostenko V.I., Lobova G.A., Fomin A.N., Issagaliyeva A.K. Tectonic-sedimentation interpretation of the geothermics data when identifying and assessing the late eocene erosion on the arctic hydrocarbon fields (Yamal peninsula). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 7, pp. 19–31. In Rus.
- Prokhorova P.N., Razvozhayeva E.P., Isaev V.I. Geothermy and estimation of hydrocarbon potential of the Bureya basin (Russian Far East). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 65–76. In Rus.
- Demezhko D.Yu. *Geotermicheskiy metod rekonstruktsii paleoklimata (na primere Urala)* [Geothermal method for paleoclimate reconstruction (examples from the Urals, Russia)]. Yekaterinburg, UB RAS Publ., 2001. 144 p.
- Bodri L., Cermak V. *Borehole climatology: a new method how to reconstruct climate*. Amsterdam, Elsevier, 2007. 352 p.
- Cheremensky G.A. *Prikladnaya geotermiya* [Applied geothermy]. Leningrad, Nedra Publ., 1977. 181 p.
- 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, vol. 32, pp. 720–726.

17. Sammel E.A. Convective flow and its effect on temperature logging in small-diameter wells. *Geophysics*, 1968, vol. 33 (6), pp. 1004–1012.
18. Cermak V., Safanda J., Bodri L. Precise temperature monitoring in boreholes: Evidence for oscillatory convection? P. I. Experiments and field data. *International Journal of Earth Sciences*, 2008, vol. 97 (2), pp. 365–373.
19. Cermak V., Bodri L., Safanda J. Precise temperature monitoring in boreholes: evidence for oscillatory convection? P. II. Theory and Interpretation. *International Journal of Earth Sciences*, 2008, vol. 97 (2), pp. 375–384.
20. 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, vol. 8 (1), pp. 1–10.
21. Berthold S., Resagk C. Investigation of thermal convection in water columns using particle image velocimetry. *Experiments in fluids*, 2012, vol. 52 (6), pp. 1465–1474.
22. Demezhko D.Yu., Mindubaev M.G., Khatskevich B.D. Thermal effects of natural convection in boreholes. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58 (10), pp. 1270–1276.
23. Demezhko D.Yu., Khatskevich B.D., Mindubaev M.G. Natural thermal convection in a vertical water-filled cylinder: infrared thermography investigation. *Russian Geology and Geophysics*, 2019, vol. 60 (7), pp. 813–818.
24. Demezhko D.Yu., Khatskevich B.D., Mindubaev M.G. Methods of suppressing free thermal convection in water-filled wells during temperature research. *Geosurvey=Georesources*, 2020, vol. 22 (1), pp. 55–62.
25. Demezhko D.Yu., Khatskevich B.D., Mindubaev M.G. Experimental estimation of temperature noise caused by free thermal convection in water-filled boreholes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 8, pp. 136–143. In Rus.
26. Ramey H.J. Jr Wellbore heat transmission. *Journal of petroleum Technology*, 1962, vol. 14 (04), pp. 427–435.
27. Drury M.J., Jessop A.M., Lewis T.J. The detection of groundwater flow by precise temperature measurements in boreholes. *Geothermics*, 1984, vol. 13 (3), pp. 163–174.
28. Kotliar L.A. *Matematicheskoe modelirovanie i interpretatsiya nestatsionarnykh termogidrodinamicheskikh protsessov v sisteme skvazhina-plast*. Diss. Kand. nauk [Mathematical modelling and interpretation of non-stationary thermo-hydrodynamic processes in the «well-bed» system. Cand. Diss.]. Moscow, 2013. 145 p.
29. Kolo I., Sousa R., Zhang T. Heat transmission in a geothermal wellbore: modelling and application. *19th Australasian Fluid Mechanics Conference*. Melbourne, 2014. pp. 1–4.
30. Pimenov V.P., Sidorova M.V., Shako V.V., Theuveny B., George A.B. Sposob opredeleniya profilya zakachki vody v nagnetatelnoy skvazhine [Method for determining profile of water injection in injection well]. Patent RF, no. 2580547, 2014.
31. Astrakhan I.M., Maron V.I. Nestatsionarny teploobmen pri promyvke skvazhiny [Non-stationary heat exchange under well flushing]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1969, vol. 10, no. 1, pp. 148–152. In Rus.
32. Sass J.H., Lachenbruch A.H., Moses T.H., Morgan P. Heat flow from a scientific research well at Cajon Pass, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1992, vol. 97 (B4), pp. 5017–5030.
33. Levintal E., Dragila M.I., Lensky N.G., Weisbrod N. Borehole diameter controls thermal-induced convection and evaporation from a shallow water table. *Geophysical Research Letters*, 2020, vol. 47 (18), p. e2020GL089411.
34. Gershuni G., Zhukhovitskii E. *Convective stability of incompressible fluids*. Jerusalem, Keter Publ. house, 1976. 336 p.
35. Khatskevich B.D., Demezhko D.Yu., Mindubaev M.G. *Sposob temperaturnogo monitoringa v vodonapolnennykh skvazhinakh* [The way to temperature monitoring in water filled boreholes]. Patent RF, no. 2678174, 2019.
36. Blackwell D.D. *Temperatures and heat flow in INEL-GT1 and WO-2 boreholes, Snake River Plain, Idaho*. Dallas, Southern Methodist University Publ., 1990. 29 p.
37. Premsky S. Temperature measurements in boreholes – an overview of engineering and scientific applications. *The Log Analyst*, 1992, vol. 33 (03), pp. 313–333.
38. Pollack H.N., Hurter S.J., Johnston J.R. Heat loss from the earth's interior: analysis of the global data set. *Review of Geophysics and Space Physics*, 1993, vol. 31, pp. 267–280.
39. Lachenbruch A.H., Marshall B.V. Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic. *Science*, 1986, vol. 234 (4777), pp. 689–696.
40. Carslaw H.S., Jaeger J.C. *Conduction of heat in solids*. 2nd ed. New York, Oxford Univ. Press, 1959. 510 p.
41. *International Heat Flow Commission (IHFC)*. Available at: <http://ihfc-iugg.org> (accessed 2 December 2020).

Received: 16 June 2021.

Information about the authors

Dmitry Yu. Demezhko, Dr. Sc., chief research scientist, Yu.P. Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences.

Bogdan D. Khatskevich, junior research scientist, Yu.P. Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences.

Mansur G. Mindubaev, Cand. Sc., senior research scientist, Yu.P. Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences.