

УДК 536:242

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПРОСТАИВАЮЩЕЙ СКВАЖИНЕ ПРИМЕНЕНИЕМ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЗАКОЛОННОГО ПЕРЕТОКА МЕТОДОМ АКТИВНОЙ ТЕРМОМЕТРИИ

Р.А. Валиуллин, А.Ш. Рамазанов, Р.Ф. Шарафутдинов, Д.В. Космылин,
Ф.Ф. Давлетшин, Р.З. Акчурин

Уфимский университет науки и технологий, 450076, Уфа, ул. Заки Валиди, 32, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований теплового поля в стволе пристаивающей (без движения жидкости в колонне) скважины применительно к определению заколонного перетока вверх методом активной термометрии. Исследования проведены на физической модели скважины, представляющей собой вертикально расположенную стальную трубу, к которой снаружи прикреплена система медных трубок, моделирующих канал заколонного перетока. Труба содержит участок локального нагрева, выше которого расположен температурный зонд для регистрации теплового возмущения от участка нагрева. Изучено влияние естественной тепловой конвекции в жидкости на температурное поле в трубе в процессе и после прекращения нагрева. Установлен факт наличия высокочастотных температурных колебаний на датчиках, регистрирующих температуру внутренней поверхности (стенки) трубы и жидкости выше участка нагрева, величина которых достигает более 2 °C и снижается с увеличением расстояния до участка нагрева. Получена эмпирическая зависимость, объединяющая время прихода фронта температурного возмущения, связанного с естественной тепловой конвекцией, и расстояние до участка нагрева трубы. Построены кривые азимутального распределения температуры на внутренней стенке трубы выше участка нагрева при отсутствии и наличии заколонного перетока жидкости. Получены качественные критерии, указывающие на наличие локализованного по азимуту заколонного перетока (секторного перетока) жидкости на основе анализа азимутального температурного распределения.

Активная термометрия, температура, остановленная скважина, заколонный переток жидкости, индукционный нагрев, обсадная колонна, естественная тепловая конвекция, экспериментальные исследования

EXPERIMENTAL STUDY OF A TEMPERATURE FIELD IN A SHUT-IN WELL IN RELATION TO DETERMINING BEHIND-THE-CASING FLOW USING ACTIVE THERMOMETRY

Р.А. Валиуллин, А.Ш. Рамазанов, Р.Ф. Шарафутдинов, Д.В. Космылин, Ф.Ф. Давлетшин, Р.З. Акчурин

This paper presents results of experimental studies of a thermal field in the barrel of a shut-in (no fluid movement in the casing) well in relation to determining a behind-the-casing upward flow using the method of active thermometry. The studies are carried out using the physical model of a well that is a vertically located steel pipe with a system of externally attached copper tubes simulating a behind-the-casing flow. The pipe contains a local heating section, above which a temperature probe is located to record thermal disturbance from the heating section. The effect of free convection in a fluid on the temperature field in the pipe during and after heating is described. It is revealed that there are high-frequency temperature oscillations on sensors that record the temperature of the inner surface (wall) of the pipe and fluid above the heating area, whose value reaches higher than 2 °C and decreases when the distance to the heating region becomes longer. There is an empirical relationship that relates the time of arrival of the temperature disturbance front associated with free convection and the distance to the pipe heating region. Azimuthal temperature distribution curves on the inner wall of the pipe above the heating section are constructed in the absence and presence of a behind-the-casing flow. Qualitative criteria have been obtained indicating the presence of an azimuthally localized behind-the-casing flow (sector flow) of fluid based on the azimuthal temperature distribution analysis.

Active thermometry, temperature, shut-in well, behind-the-casing flow, induction heating, casing, free convection, experimental studies

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность добычи нефти в значительной степени определяется техническим состоянием скважин (добычающих, нагнетательных), являющихся ключевым каналом управления работой нефтегазовых пластов и месторождений в целом. Исправное техническое состояние скважин подразумевает герметичность обсадных металлических труб и окружающего их цементного кольца, служащего для

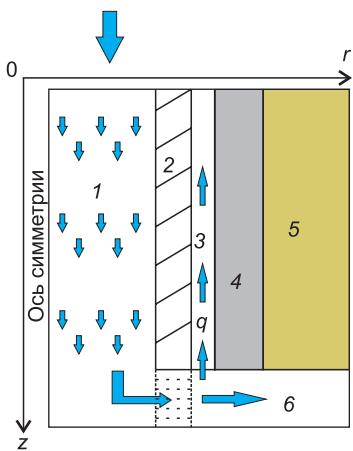


Рис. 1. Схема заколонного перетока жидкости:

1 — закачиваемая жидкость внутри обсадной колонны, 2 — обсадная колонна, 3 — канал заколонного движения жидкости, 4 — цементное кольцо, 5 — горные породы, 6 — целевой пласт, q — расход заколонного перетока, r и z — радиальная и вертикальная координаты соответственно.

укрепления стенок скважин и гидродинамического разобщения пластов [Ипатов, Кременецкий, 2022]. Однако сложности, возникающие при цементировании скважин (агрессивное действие компонентов пластовых флюидов, напряжения со стороны горных пород и обсадных труб, утечка цементного раствора в высокопроницаемые породы), являются причиной нарушения герметичности цемента на контакте с горными породами или обсадными трубами и возникновения каналов для движения жидкости в пространстве скважины за обсадной колонной (заколонных перетоков) [Гасумов и др., 2017]. Одним из таких примеров является заколонный переток жидкости, возникающий в нагнетательной скважине в процессе и после прекращения закачки жидкости в пласт (рис. 1).

В исследуемом интервале закачиваемая (из устья скважины) жидкость 1 движется внутри обсадной колонны 2 и через перфорационные отверстия в обсадной колонне и цементном кольце поступает в целевой пласт 6, создавая избыточное давление, как правило, с целью поддержания естественной энергии пласта в процессе его разработки. Вследствие наличия избыточного давления и некачественного цементирования возникает заколонный переток жидкости с некоторым расходом q . Жидкость движется вверх по каналу-перетоку 3 и, как правило, поступает в вышележащие проницаемые пласти. Заколонный переток жидкости возникает и действует при условии положительного перепада давления, действующего на жидкость, поэтому он может существовать длительное время и после прекращения закачки жидкости в скважину. Негативное влияние заколонных перетоков заключается прежде всего в утечке пластовой энергии и снижении пластового давления. Кроме того, переток жидкости, достигающий верхних пресноводных горизонтов, приводит к их экологическому загрязнению, что особенно актуально для месторождений, находящихся рядом с населенными пунктами. В этой связи задача своевременного выявления заколонных перетоков жидкости играет важную роль с точки зрения эффективной и рациональной разработки нефтегазовых месторождений.

Для определения заколонных перетоков жидкости применяются различные геофизические методы. Одним из наиболее эффективных является метод скважинной термометрии, заключающийся в измерении температуры вдоль ствола скважины [Валиуллин и др., 2015, 2022], в комплексе с термометрией применяются также акустическая шумометрия и импульсный нейтронный каротаж [Асланян и др., 2016; Vlasov et al., 2019]. В последнее время все большее распространение получают оптоволоконные системы регистрации температуры, преимуществом которых является возможность одновременной регистрации температуры во всех точках вдоль ствола скважины [Sun et al., 2018; Sfar Zaoui et al., 2020; Carpenter, 2023]. Однако следует отметить принципиальный недостаток традиционного подхода, основанного на анализе естественных тепловых полей, регистрируемых в стволе скважины и обусловленных эксплуатационными эффектами, он не позволяет решать задачу по выявлению заколонных перетоков, если температурные аномалии составляют малую величину, сотые или десятые доли градуса. Для устранения недостатков традиционной термометрии предложен метод активной термометрии [Патент..., 2002, 2023], основанный на анализе искусственных температурных полей, возникающих в результате индукционного теплового воздействия на металлическую обсадную колонну в стволе скважины. Кратковременное индукционное воздействие приводит к локальному разогреву металлической обсадной колонны и одновременно с этим к изменению температуры жидкости в стволе скважины и в заколонном пространстве, контактирующем с нагреваемым участком металла (рис. 2). В потоке жидкости в заколонном

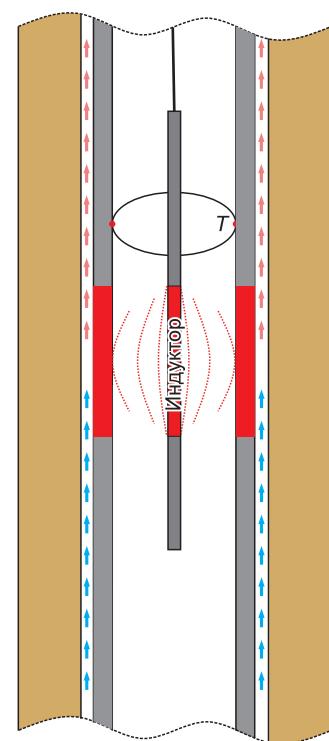


Рис. 2. Схема исследования скважины методом активной термометрии.

T — температура.

пространстве возникает тепловое возмущение (искусственная температурная аномалия) и происходит перенос тепла по направлению движения жидкости от нагреваемого участка, тепловое поле зависит от интенсивности и направления потока флюида за обсадной колонной. Регистрация температуры внутренней стенки колонны выше или ниже участка нагрева позволяет определить факт наличия заколонного перетока, направленного вверх или вниз соответственно [Рамазанов и др., 2024а, 2024б].

При определении заколонных перетоков методом активной термометрии следует учитывать тот факт, что в результате теплообмена с нагретым металлом происходит увеличение температуры пристеночных слоев жидкости, находящейся и внутри обсадной колонны. В работах [Валиуллин и др., 2016; Канафин, Космылин, 2017] на основе экспериментальных исследований показано возникновение флюктуаций температуры в жидкости внутри колонны, вызванных естественной тепловой конвекцией, в интервале нагрева и выше (верхний уровень температурных датчиков располагался на расстоянии 0.6 м от участка нагрева). В работах [Davletshin et al., 2023; Акчурин и др., 2023] на основе результатов численного моделирования в Ansys Fluent показано, что область температурных возмущений за счет естественной тепловой конвекции достигает более 2 м по вертикали. Вышесказанное осложняет интерпретацию результатов измерений температуры при определении заколонного перетока вверх, поскольку причиной увеличения температуры выше участка индукционного нагрева является не только заколонный переток, но и естественная тепловая конвекция в жидкости внутри колонны. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований теплового поля в стволе остановленной/простаивающей скважины применительно к определению заколонного перетока вверх методом активной термометрии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования проведены на физической модели скважины, представляющей собой вертикально расположенную стальную трубу длиной 2200 мм, внутренним диаметром 150 мм и толщиной стенки 7 мм. Модель заполнена жидкостью (водой). Для моделирования движения жидкости в заколонном пространстве к внешней стенке обсадной колонны по периметру прикреплены медные трубы, условно разделенные на четыре секции «А—Д», причем разделение проводится по величине азимутального угла с интервалом 90° (рис. 3). Расходомер 1 используется для определения расхода заколонного перетока, шаровые краны 2 позволяют регулировать величину потока, запорные вентили 3 и распределители потока 5 регулируют область перетока по азимуту, медные трубы 4 служат каналом заколонного перетока. Поток в модели создается за счет работы встроенного насоса в составе термостата. Для имитации горной породы используется бентонитовая мука, кольцевой слой которой обмотан полиэтиленовой пленкой для изоляции модели [Валиуллин и др., 2016, 2017].

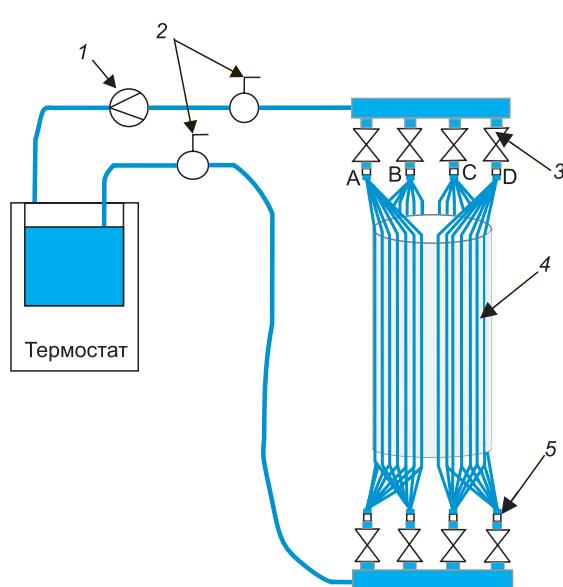


Рис. 3. Гидравлическая схема физической модели скважины:

1 — расходомер, 2 — краны шаровые, 3 — запорные вентили, 4 — медные трубы, 5 — распределители потока.

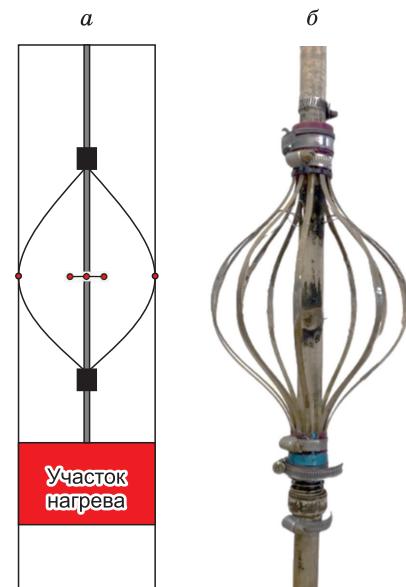


Рис. 4. Положение участка нагрева (а) и общий вид температурного зонда (б).

Длина участка нагрева в модели составляет 0.4 м, причем для имитации индукционного нагрева используется намотка никромовой ленты (шаг намотки 0.01 м) с внешней стороны трубы (нагревательная спираль). Выше участка нагрева в трубу помещен температурный зонд, состоящий из 12 датчиков (термопар), равномерно распределенных по периметру и прижатых к внутренней стенке трубы (рис. 4). Кроме того, на уровне температурного зонда регистрировалась температура жидкости внутри трубы с помощью трех центральных датчиков, расположенных вблизи оси трубы на радиальном расстоянии 20 мм от оси.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Целью экспериментов является изучение особенностей формирования температурного поля в модели в процессе нагрева и после его прекращения. Длительность нагрева в экспериментах составляет 20 мин, интервал между циклами нагрева также равен 20 мин, последовательно выполнено два цикла нагрева: 0—20 и 40—60 мин. Мощность нагревателя равна 1000 Вт. В рамках первой серии экспериментов заколонные перетоки отключены, чтобы исследовать влияние естественной тепловой конвекции на тепловое поле в трубе. Результаты измерений температуры на внутренней стенке трубы (двенадцатью прижатыми датчиками) и в жидкости (тремя центральными датчиками) на расстоянии 20 см выше участка нагрева представлены на рис. 5. На кривых приведена величина термоаномалии $\Delta T = T - T_0$, где T_0 — измеренная начальная температура, T — измеренная температура в процессе теплового воздействия.

Известно, что течения, возникающие за счет естественной тепловой конвекции, вызывают мелко-масштабные (высокочастотные) колебания температуры в скважинах размахом до 0.06 °C, обусловленные наличием ненулевого вертикального температурного градиента естественного теплового поля горных пород, составляющего не более 0.1 °C/м [Демежко и др., 2017]. Причинами возникновения температурных осцилляций в жидкости являются также: наличие примесей в жидкости, зависимость вязкости жидкости от температуры [Ильясов и др., 2005; Кулешов и др., 2019]. Неоднородность искусственно созданного теплового поля за счет работы нагревателя существенно выше: величина локально-го температурного возмущения (нагрева) трубы составила в экспериментах порядка 13.5 и 16.5 °C для первого и второго циклов нагрева соответственно, причем тепловое возмущение локализовано на участке трубы длиной 0.4 м. Наблюдаемый размах температуры (речь идет о высокочастотных температур-

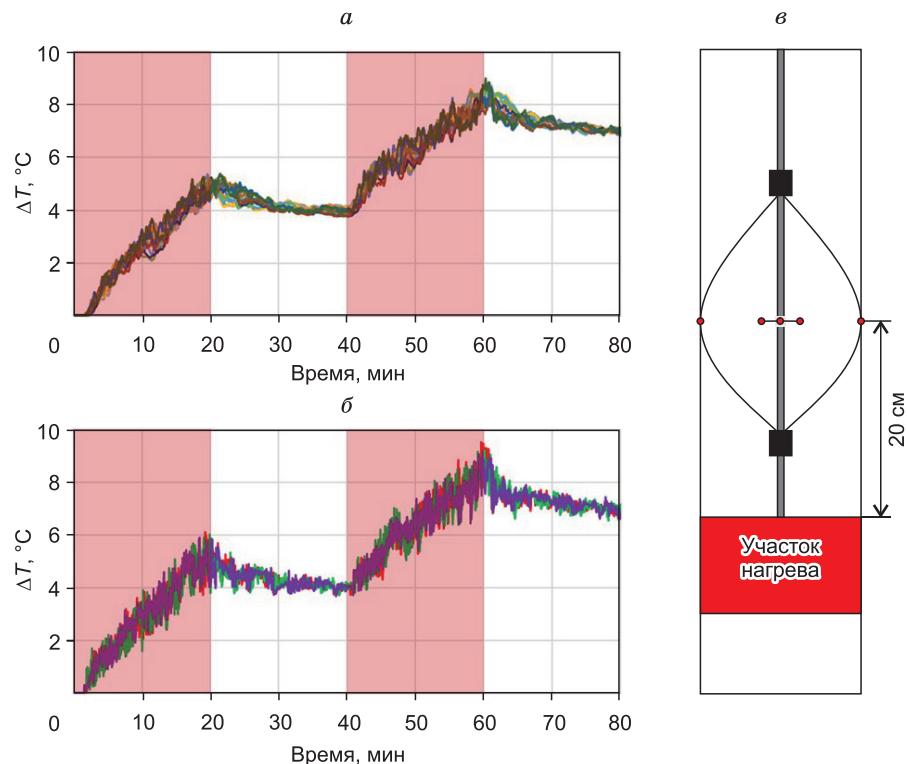


Рис. 5. Температура на внутренней стенке трубы (а), в жидкости (б) на расстоянии 20 см выше участка нагрева (в).

Временной интервал работы нагревателя выделен цветом.

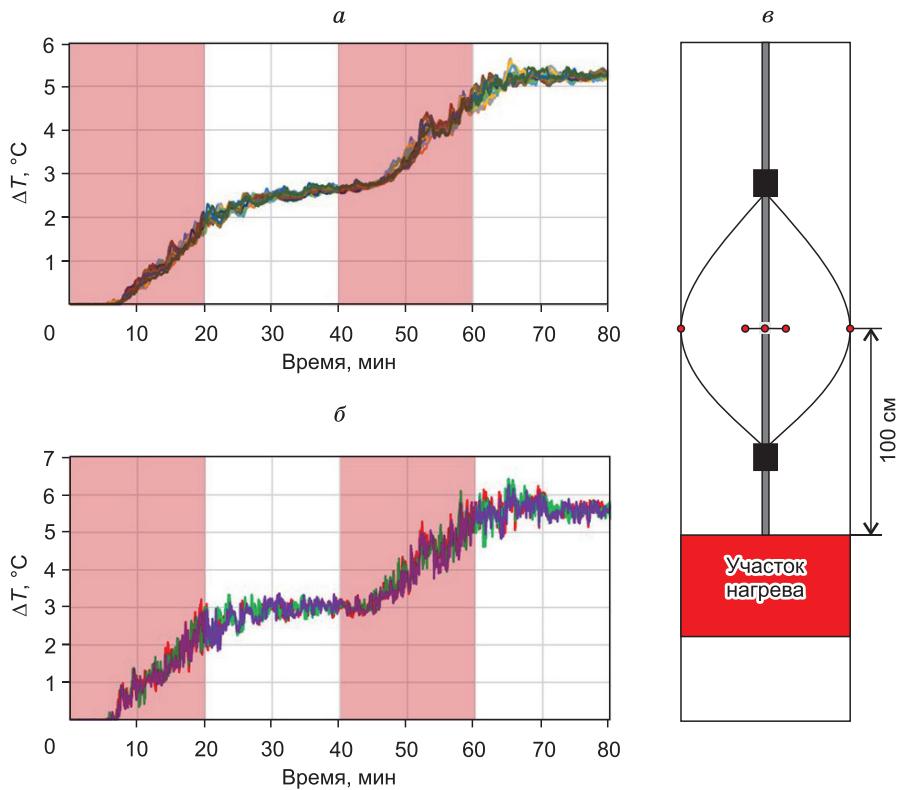


Рис. 6. Температура на внутренней стенке трубы (а), в жидкости (б) на расстоянии 100 см выше участка нагрева (в).

Временной интервал работы нагревателя выделен цветом.

ных колебаниях относительно среднего значения) на внутренней стенке трубы достигает 1.4°C , в жидкости более 2°C . Отмечается расхождение между собой показаний температурных датчиков на стенке трубы, при том что датчики расположены симметрично относительно оси трубы. Расхождение отмечается и для центральных датчиков в жидкости. Вышесказанное показывает значительное влияние естественной тепловой конвекции на температуру на расстоянии 20 см выше участка нагрева.

Результаты аналогичных измерений температуры на расстоянии 100 см выше участка нагрева представлены на рис. 6. В сравнении с расстоянием 20 см на 100 см снижается величина максимальных температурных возмущений на стенке трубы (от 9.0 до 5.6°C) и в жидкости (от 9.5 до 6.4°C), а также размах колебаний температуры на стенке трубы (от 1.4 до 0.7°C) и в жидкости (от 2.4 до 1.5°C). Однако в целом величина наблюдаемых температурных возмущений остается большой, что говорит о значительном влиянии естественной тепловой конвекции на температурное поле и на расстоянии 100 см выше участка нагрева.

Кривые динамики во времени температуры внутренней стенки трубы на различной высоте относительно участка нагрева показаны на рис. 7. Для всех уровней выбраны показания первого датчика, соответствующего условному азимутальному углу 0° .

Видно, что с увеличением расстояния до участка нагрева снижаются величина разогрева и амплитуда колебаний температуры. Кроме того, с увеличением расстояния до участка нагрева отмечается все большее запаздывание фронта температурного возмущения, связанного с естественной тепловой конвекцией. В частности, на расстоянии 20 см выше участка нагрева рост температуры внутренней стенки трубы начинается через 2.4 мин после начала нагрева. На расстоянии 100 см температура начинает расти через 8.4 мин, на расстоянии 180 см только через 17.7 мин. Отсюда следует очень важный вывод, что увеличение температуры на указанных расстояниях над участком нагрева при меньших временах может быть связано только с влиянием заколонного перетока жидкости, поскольку температурные возмущения внутри трубы при малых временах не успевают распространяться за счет свободной конвекции. Зависимость времени прохождения фронта теплового возмущения t (мин) от расстояния до участка нагрева Δz (см) может быть с высокой степенью точности (достоверность аппроксимации $R_2 = 0.998$) аппроксимирована квадратичным полиномом, приведенным на рис. 7, б.

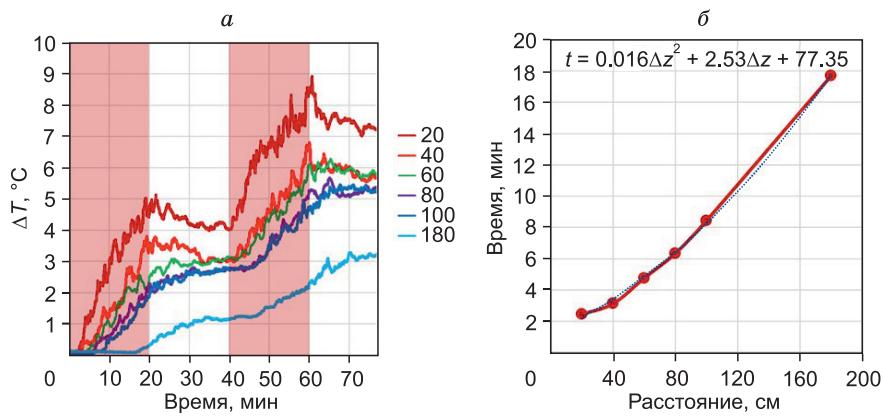


Рис. 7. Температура на внутренней стенке трубы на различном расстоянии выше участка нагрева (а); зависимость времени прохождения фронта теплового возмущения t , связанного с естественной тепловой конвекцией, от расстояния до участка нагрева Δz (б).

Шифр кривых — расстояние до участка нагрева в см, временной интервал работы нагревателя выделен цветом.

Азимутальное распределение температуры на высоте 60 см над участком нагрева при различных временах после начала нагрева представлено на рис. 8, а. Для сравнения: на рис. 8, б представлены кривые азимутального распределения температуры при наличии заколонного перетока вверх (переток в секторе с азимутальными углами 180—270°, объемный расход жидкости в канале перетока 5.6 м³/сут) и прочих равных условиях.

Анализ азимутального распределения температуры позволяет выделить ряд качественных критериев, указывающих на наличие заколонного перетока с учетом влияния естественной тепловой конвекции.

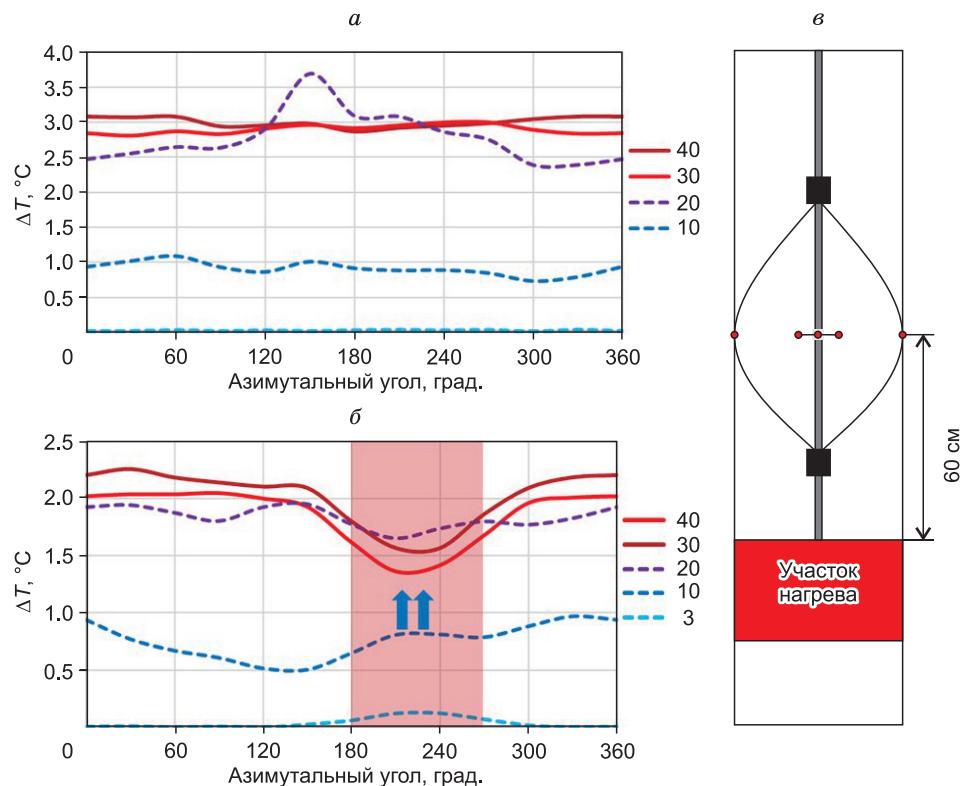


Рис. 8. Азимутальное распределение температуры на внутренней стенке трубы при отсутствии (а) и наличии (б) заколонного перетока жидкости на расстоянии 60 см выше участка нагрева (в).

Шифр кривых — время после начала нагрева в мин, штриховыми линиями выделены кривые в процессе нагрева, сплошными — после отключения нагревателя, цветом выделен сектор перетока 180—270°.

ции. Согласно рис. 7, время прихода температурных возмущений за счет естественной тепловой конвекции для уровня 60 см над участком нагрева составляет 4.8 мин, поэтому в отсутствие перетока (см. рис. 8, а) через 3 мин после начала нагрева изменения температуры не наблюдается. Однако при наличии перетока (см. рис. 8, б) на кривой азимутального распределения температуры в этот же момент времени отмечается локальная область увеличения температуры на величину около 0.2 °С, границы которой согласуются с сектором перетока. Рост температуры в указанной области обусловлен переносом тепла от участка нагрева за счет заколонного движения жидкости. В дальнейшем в процессе нагрева (кривые через 10, 20 мин после включения нагревателя) влияние естественной тепловой конвекции усиливается, азимутальное распределение становится существенно немонотонным, и возникает не связанные с перетоком расхождение температуры между прижатыми к трубе датчиками величиной более 1 °С. После прекращения нагрева азимутальное распределение выравнивается, например, для кривых с шифром 30 и 40 мин на рис. 8, а (10 и 20 мин после выключения нагревателя соответственно) неоднородность температуры по разным датчикам составляет не более 0.2 °С. При наличии же перетока на кривой азимутального распределения температуры после прекращения нагрева (кривые 30 и 40 мин на рис. 8, б) отмечается локальная область охлаждения, приуроченная к области перетока. Температурная аномалия охлаждения (относительно датчиков вне интервала перетока) составляет около 0.8 °С. Таким образом, в периоды времени, когда влияние естественной тепловой конвекции является незначительным, становится возможным диагностировать наличие секторного заколонного перетока вверх на основе анализа азимутального распределения температуры на внутренней стенке колонны выше участка индукционного нагрева.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Достоверное определение наличия заколонных перетоков в скважинах является важной задачей геофизического контроля за разработкой нефтегазовых месторождений, поскольку заколонные перетоки могут существенно снизить эффективность целевого воздействия на продуктивные пласти. В нагнетательных скважинах в продуктивные пласти осуществляется закачка жидкости, при этом утечка жидкости через заколонный переток приводит к непроизводительной закачке, к снижению пластовой энергии и давления пласта относительно запланированных значений, к экологическому загрязнению верхних пресноводных горизонтов. В добывающих скважинах, как правило, образуются заколонные перетоки от нецелевых водоносных пластов к интервалу перфорации целевого, что приводит к обводнению продукции скважины и также негативно сказывается на эффективности разработки.

Поскольку заколонный переток жидкости происходит во внешнем пространстве за обсадной колонной, традиционный метод термометрии, основанный на регистрации температуры внутри ствола скважины (в жидкости внутри колонны), зачастую оказывается малоинформативным. Рассмотренный в работе метод активной термометрии направлен на устранение недостатков традиционной термометрии. Во-первых, локальный индукционный нагрев обсадной колонны позволяет создать контрастную тепловую аномалию в заколонном пространстве (тепловую метку), движущуюся вместе с заколонным перетоком. Чередование циклов включения и выключения нагревателя обеспечивает возможность оперативного регулирования температурным полем. Во-вторых, при исследовании скважины методом активной термометрии осуществляется регистрация температуры внутренней стенки обсадной колонны, более информативной к процессам в заколонном пространстве по сравнению с температурой жидкости внутри колонны. Однако в процессе индукционного нагрева обсадной колонны неизбежно происходит передача тепла жидкости, находящейся внутри нее, что приводит к возникновению естественной тепловой конвекции. Для достоверной и обоснованной интерпретации результатов температурных исследований в процессе индукционного воздействия обязательно нужно учитывать влияние естественной конвекции на тепловое поле.

В работе на основе анализа результатов экспериментальных исследований сформулированы основные критерии определения заколонного перетока жидкости вверх в остановленной/простаивающей скважине в процессе исследования скважины методом активной термометрии. Показано, что секторный заколонный переток жидкости, локализованный по азимуту, можно выделить в начальный промежуток времени после начала нагрева, не превышающий время прихода теплового возмущения, обусловленного влиянием естественной тепловой конвекции. Переток при этом отмечается наличием локальной аномалии разогрева на кривой азимутального распределения температуры на внутренней стенке обсадной колонны, зарегистрированной выше участка нагрева. Также переток может быть выявлен после прекращения нагрева в условиях ослабления свободной конвекции. В этом случае переток будет отмечаться уже локальной аномалией охлаждения на кривой азимутального температурного распределения на внутренней стенке колонны. В обоих вариантах область неоднородности температурного поля на азимуте

тальном распределении соответствует сектору заколонного перетока. Полученные результаты могут быть использованы в скважинной промысловой геофизике при проведении исследований и интерпретации результатов термометрических исследований скважин методом активной термометрии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по теме «Разработка инновационной технологии на основе метода активной термометрии для решения задач экологии пресноводных горизонтов», соглашение № 23-17-20017 от 20 апреля 2023 г.

ЛИТЕРАТУРА

Акчурин Р.З., Давлетшин Ф.Ф., Исламов Д.Ф., Валиуллин Р.А., Шарафутдинов Р.Ф. Особенности температурного поля в скважине при индукционном нагреве обсадной колонны с учетом влияния естественной конвекции // Теплофизика и аэромеханика, 2023, № 3 (30), с. 517—529.

Асланян А.М., Асланян И.Ю., Масленникова Ю.С., Минахметова Р.Н., Сорока С.В., Никитин Р.С., Кантюков Р.Р. Диагностика заколонных перетоков газа комплексом высокоточной термометрии, спектральной шумометрии и импульсного нейтрон-нейтронного каротажа // Территория «Нефтегаз», 2016, № 6, с. 52—59.

Валиуллин Р.А., Шарафутдинов Р.Ф., Федотов В.Я., Закиров М.Ф., Шарипов А.М., Ахметов К.Р., Азизов Ф.Ф. Использование нестационарной термометрии для диагностики состояния скважин // Нефтяное хозяйство, 2015, № 5, с. 93—95.

Валиуллин Р.А., Шарафутдинов Р.Ф., Федотов В.Я., Канафин И.В. Экспериментальная установка для изучения свободной тепловой конвекции при индукционном нагреве эксплуатационной колонны // Вестник Башкирского университета, 2016, т. 21, № 2, с. 264—268.

Валиуллин Р.А., Шарафутдинов Р.Ф., Федотов В.Я., Космылин Д.В., Канафин И.В. Исследование температурного поля в скважине с индукционным нагревом колонны при наличии каналов заколонного перетока жидкости // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, 2017, т. 3, № 3, с. 17—28, doi: 10.21684/2411-7978-2017-3-3-17-28.

Валиуллин Р.А., Рамазанов А.Ш., Хабиров Т.Р., Садретдинов А.А., Закиров М.Ф., Шарафутдинов Р.Ф., Яруллин Р.К. Опыт использования симуляторов при интерпретации термических и термо-гидродинамических исследований // PROНЕФТЬ. Профессионально о нефти, 2022, т. 7, № 1, с. 99—109, doi:10.51890/2587-7399-2022-7-1-99-109.

Гасумов Р.А., Гридин В.А., Овчаров С.Н., Гасумов Э.Р. Исследование причин заколонных проявлений при цементировании скважин эксплуатационной колонны // Наука. Инновации. Технологии, 2017, № 4, с. 125—136.

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.

Ильясов А.М., Моисеев К.В., Урманчеев С.Ф. Численное моделирование термоконвекции жидкости с квадратичной зависимостью вязкости от температуры // Сибирский журнал индустриальной математики, 2005, т. 8, № 4 (24), с. 51—59.

Ишатов А.И., Кременецкий М.И. Проблемы промыслового геофизического контроля в условиях «новой экономической политики» // Актуальные проблемы нефти и газа, 2022, № 2 (37), с. 87—99, doi:10.29222/ipng.2078-5712.2022-37.art6.

Канафин И.В., Космылин Д.В. Изучение формирования теплового поля на модели скважины с локальным нагревом // Известия Кабардино-Балкарского НЦ РАН, 2017, № 2 (76), с. 44—48.

Кулемшов В.С., Моисеев К.В., Урманчеев С.Ф. Изолированные режимы течений при конвекции аномально термовязкой жидкости в плоской ячейке // Прикладная математика и механика, 2019, № 3, с. 460—470.

Патент РФ № 2194160, МПК7 E21B 47/06 от 22.01.2001. Способ активной термометрии действующих скважин (варианты) / Р.А. Валиуллин, Р.Ф. Шарафутдинов, А.Ш. Рамазанов, В.В. Дрягин, А.Р. Адиев, А.А. Шилов. 2002, 5 с.

Патент РФ № 2806672, МПК7 E21B 47/06, от 24.05.2023. Способ определения заколонного перетока жидкости в действующих скважинах / Р.Ф. Шарафутдинов, Р.А. Валиуллин, А.Ш. Рамазанов, Ф.Ф. Давлетшин, А.И. Имаев, В.В. Баженов. 2023, Бюл. № 31, 9 с.

Рамазанов А.Ш., Космылин Д.В., Акчурин Р.З., Давлетшин Ф.Ф., Валиуллин Р.А., Шарафутдинов Р.Ф., Низаева И.Г. Технология активной термометрии для решения экологических задач на месторождениях нефти и газа // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2024а, № 3 (387), с. 57 — 62.

Рамазанов А.Ш., Давлетшин Ф.Ф., Акчурин Р.З., Исламов Д.Ф. Исследование температурных полей при локальном индукционном нагреве обсадной колонны в скважине // Нефтегазовое дело, 2024б, № 1 (22), с. 6—14, doi: 10.17122/ngdelo-2024-1-6-14.

Carpenter C. Real-time fiber-optics solution opens door to the wellbore environment // *J. Petrol. Technol.*, 2023, v. 75, p. 92—94, doi: [10.2118/0123-0092-JPT](https://doi.org/10.2118/0123-0092-JPT).

Davletshin F.F., Akchurin R.Z., Sharafutdinov R.F., Islamov D.F. Nonisothermal fluid flow in a well during induction heating of the casing string // *Fluid Dyn.*, 2023, v. 58 (4), p. 586—597, [10.1134/S0015462823600505](https://doi.org/10.1134/S0015462823600505).

Sfar Zaoui W., Lauber T., Pohl C., Kerk M., Glaeser T., Jelinek W. Machine-learning distributed-temperature-sensing-based pipeline leak detection // *SPE (Society of Petroleum Engineers)* — 202905, Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference held in Abu Dhabi, United Arab Emirates, 9–12 November 2020, p. 1—11, doi: [10.2118/202905-MS](https://doi.org/10.2118/202905-MS).

Sun Y., Xue Z., Hashimoto T. Fiber optic distributed sensing technology for real-time monitoring water jet tests: Implications for wellbore integrity diagnostics // *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 2018, v. 58, p. 241—250, doi: [10.1016/j.jngse.2018.08.005](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.08.005).

Vlasov S.V., Kruchatov D.N., Podberezhny M.Yu., Azamatov M.A., Valiullin R.A., Sadreddinov A.A., Ramazanov A.S. Experience of thermo-hydrodynamic studies of wells in combination with noise logging and quantitative interpretation of data based on the simulator // *SPE (Society of Petroleum Engineers) Russian Petroleum Technology Conference (Moscow, October 2019)*, 2019, p. 1—21, doi: [10.2118/196955-MS](https://doi.org/10.2118/196955-MS).