

УДК 532.542,550.8.014

DOI: 10.21685/2307-9150-2017-2-6

М. С. Гаязов

МЕТОД ТЕМПЕРАТУРНЫХ МЕТОК ОЦЕНКИ СКОРОСТИ ПОТОКА И ОБЩЕГО РАСХОДА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ ДЕЙСТВУЮЩИХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН

Аннотация.

Актуальность и цели. Одна из задач современной промысловой геофизики в действующих горизонтальных скважинах – определение фазовых расходов. Для измерения дебита в скважинной геофизике традиционно используют механические расходомеры, но данный метод имеет существенные ограничения. Целью нашей работы является разработка и тестирование метода температурных меток при оценке фазовых расходов.

Материалы и методы. На базе ИЦ «Технопарк» Башкирского государственного университета проведен ряд экспериментов на термогидродинамическом стенде с использованием распределенных датчиков температуры (термопар). Регистрация по 18 термопарам велась с помощью регистрационного модуля National Instruments.

Результаты. Экспериментально показана возможность оценки линейной скорости расслоенного неизотермического потока по движению искусственных температурных меток. Экспериментально установлено, что увеличение измерительной базы приводит к повышению точности оценки скорости по верхней образующей с потерей информации в целом по сечению за счет расформирования температурной метки. Подтвержден факт термогравитационного расслоения неизотермического потока в условиях горизонтальной трубы, возникающий при постановке температурных меток. Проведена оценка погрешности метода температурной метки при расчете суммарного расхода в условиях однофазного потока.

Выводы. Экспериментальные исследования показали принципиальную возможность использования метода температурных меток для оценки расхода потока флюида в действующих горизонтальных скважинах. Для более точной оценки фазовых расходов необходима совместная (попарная) установка и использование датчиков состава и температуры. Для уменьшения величины неопределенности рассчитываемого дебита имеет смысл размещать датчики температуры в сечении на интервалы, при которых будут равны эффективные сечения движения.

Ключевые слова: горизонтальные скважины, тепловые метки, многофазные потоки, локальные скорости, фазовые расходы, контроль за разработкой месторождений.

A METHOD OF TEMPERATURE LABELS FOR FLOW RATE AND TOTAL FLOW RATE EVALUATION IN CONDITIONS OF THE EXISTING HORIZONTAL WELLS

Abstract.

Background. One of the tasks of modern field geophysics in operating horizontal wells is phase costs determination. Mechanical flowmeters are traditionally used to measure production rates in downhole geophysics, but this method has significant limitations. The aim of our work is to develop and test a method of temperature labels for estimating phase costs.

Materials and methods. On the basis of the Technopark Information Center of the Bashkir State University, a number of experiments were conducted on a thermohydrodynamic bench using distributed temperature sensors (thermocouples). The registration for 18 thermocouples was carried out using the National Instruments registration module.

Results. The possibility of estimating the linear velocity of a stratified non-isothermal flow from the motion of artificial temperature labels is experimentally shown. It is experimentally established that an increase in the measuring base leads to an increase in the accuracy of the rate estimation along the upper generatrix with a loss of information as a whole across the section due to the disintegration of a temperature label. The fact of the thermogravitational stratification of a non-isothermal flow in conditions of a horizontal pipe, which occurs when temperature labels are established, is confirmed. The error of the temperature label method was calculated when calculating the total flow rate under single-phase flow conditions.

Conclusions. Experimental studies have shown the principal possibility of using the method of temperature labels to estimate the flow rate of fluid in existing horizontal wells. For a more accurate estimation of phase costs, a joint (pairing) installation and the use of sensors of composition and temperature is necessary. To reduce the uncertainty of the calculated production rate, it makes sense to place the temperature sensors in the section at such intervals, at which the effective cross sections of the motion will be equal.

Key words: horizontal wells, thermal labels (marks), multiphase flows, local speed phase costs, control of field development.

Введение

Одна из актуальных задач современной промышленной геофизики в действующих горизонтальных скважинах – определение фазовых расходов с оценкой поинтервального дебита. В настоящее время для измерения дебита в скважинной геофизике традиционно используют механические расходомеры. К сожалению, метод имеет существенные ограничения, особенно в условиях многофазного потока. Механическая турбинка критична к составу флюида, а расслоение фаз в наклонной или горизонтальной скважине добавляет неопределенность за счет неконтролируемого его положения относительно границ раздела фаз [1].

Вопрос частично решается за счет применения распределенных механических расходомеров, обеспечивающих послойное измерение локальной скорости потока в действующих горизонтальных скважинах в комплексе

с датчиками состава [2]. Однако в условиях обводнения продукции и малых скоростей потока, характерных для горизонтальных скважин на большинстве месторождений РФ, данная аппаратура малоэффективна и не решает поставленную задачу.

Для выявления локальных притоков при малом удельном расходе может использоваться метод термоанемометрии, который имеет высокую чувствительность на радиальную составляющую потока. Однако данный метод критичен к составу флюида и не дает количественные параметры расхода в условиях многофазного потока [3].

Помимо перечисленных датчиков скорости, в скважинной геофизике есть примеры применения метода меченой жидкости, когда в потоке формируется контрастная по физическим свойствам метка и прослеживается ее движение по стволу скважины. При этом метка формируется путем впрыска порции контрастной жидкости (например химическая, оптическая или электрическая) или проводится активация изотопов при работе импульсного генератора нейтронов [4, 5].

В последнее время в скважинной геофизике находит применение метод активной термометрии, когда в потоке флюида формируется температурная метка за счет работы индукционного нагревателя, выделяющего энергию в металле эксплуатационной колонны [6]. Результаты опробования показали высокую эффективность метода при решении ряда задач, связанных с контролем технического состояния скважины, и показали возможность оценки расхода в условиях низкодебитной вертикальной и слабо наклонной скважины.

При этом метод активной термометрии не требует использования дорогостоящего импульсного генератора, отсутствует необходимость применения контрастных жидкостей, а управление работой индуктора выполняется по кабелю и неограниченное число раз за один спуск, имеется перспектива его применения в условиях действующих горизонтальных скважин.

1. Физические основы метода температурных меток

Экспериментальные работы, выполненные на термогидродинамическом стенде в БашГУ и материалы скважинных исследований в действующих горизонтальных скважинах показали, что температурная метка, сформированная в горизонтальном стволе скважины, перемещается по латерали, сохраняя значимую величину достаточно длительное время, позволяющее проследить ее продвижение за счет потока. При этом термоаномалии, сформированные в условиях расслоенного водонефтяного потока, в нефти и в воде, движутся независимо друг от друга, а процесс межфазного теплообмена пренебрежимо мал. Таким образом, наблюдая процесс перемещения температурной метки вдоль горизонтального ствола с помощью распределенных датчиков температуры, можно оценить линейную скорость каждой из фаз, что в комплексе с распределенными датчиками состава позволяет оценить и фазовые расходы. Для успешности метода необходимо иметь комплекс датчиков температуры, находящихся на верхней и на нижней образующей трубы. Для оценки фазозаполнения с выходом на фазовые расходы необходим комплекс датчиков состава, распределенных вертикально по сечению трубы.

Данный метод измерения может быть реализован с применением традиционных датчиков состава и группы датчиков температуры, разнесенных на некоторое расстояние по длине прибора.

Однако в условиях ламинарного неизотермического течения, независимо от состава флюида, в горизонтальном потоке наблюдается эффект термогравитационного расслоения, когда более горячий флюид движется по верхней образующей трубы и возникает значительный вертикальный градиент скорости [7]. Данное обстоятельство усложняет прямое перенесение опыта вертикальных скважин на условия горизонтальных потоков и требует проведения дополнительных экспериментальных исследований.

2. Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования по наблюдению движения температурных моток проводились на термогидродинамическом стенде в Башкирском государственном университете [8]. На первом этапе работы выполнялись в условиях однофазного потока на технической воде. Стеклопластиковая труба с внутренним диаметром 150 мм и длиной 12 м располагалась строго горизонтально. Вода подавалась с торца стенда через систему линеризатора потока для исключения локальных струй.

По длине стенда размещены три группы малоинерционных датчиков температуры (рис. 1) на основе термопары к-типа, фирмы «Тесей». Датчики подключены к единому измерительному комплексу на основе модуля NI 9214 и работают в среде Lab View. Коэффициент тепловой инерции датчиков менее 1 с, разрешающая способность измерительной системы не хуже 0,03 К.

На каждом сечении в вертикальной плоскости размещены пять датчиков температуры с постоянным шагом по 30 мм. Крайние датчики для снижения краевых эффектов отнесены от стенок трубы на 15 мм (рис. 2). Такое расположение датчиков позволяет наблюдать и регистрировать на ПК динамику движения температурной метки как по длине стенда, так и наблюдать эффект формирования термогравитационного расслоения потока по вертикали.

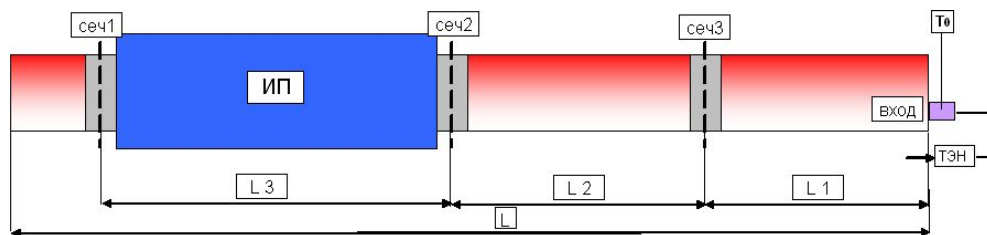


Рис. 1. Конфигурация гидродинамического стенда с вертикальными термосканерами: сеч1, сеч2, сеч3 – места размещения датчиков T ; ТЭН – проточный нагреватель, T_0 – точка контроля входной температуры, $L = 12$ м, $L_1 = L_3 = 3$ м, $L_2 = 2,8$ м

Для оценки вклада от элементов конструкции скважины, между вторым и третьим сечениями находился макет интервала перфорации, выполненный из стальной перфорированной колонны.

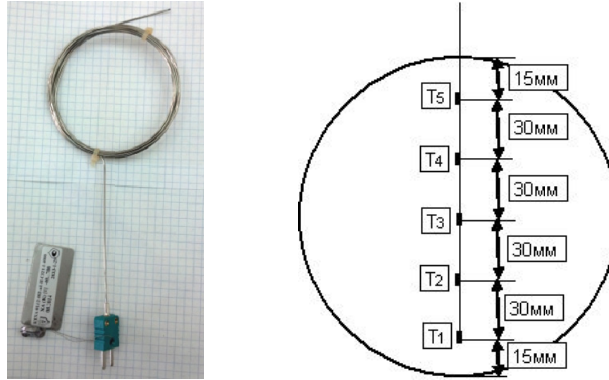


Рис. 2. Общий вид и схематичное расположение термопар по вертикальному сечению колонны

Формирование температурных меток выполнялось работой проточного нагревателя в импульсном режиме с пиковой мощностью $P = 2$ кВт, время нагрева $t_{\text{раб}} = 120$ с, пауза $t_{\text{прост}} = 300$ с. Расход воды задавался работой насоса и контролировался с точностью до $0,01$ м³/ч. На рис. 3 приведена совмещенная диаграмма напряжения питания на нагревателе и динамика изменения температуры воды на входе стенда, контролируемая входным датчиком температуры T_0 . Амплитуда температурной метки при расходах, обеспечивающих ламинарный режим течения $Q < 0,6$ м³/ч ($Re < 1500$), по результатам эксперимента не превышала 2,5 К.

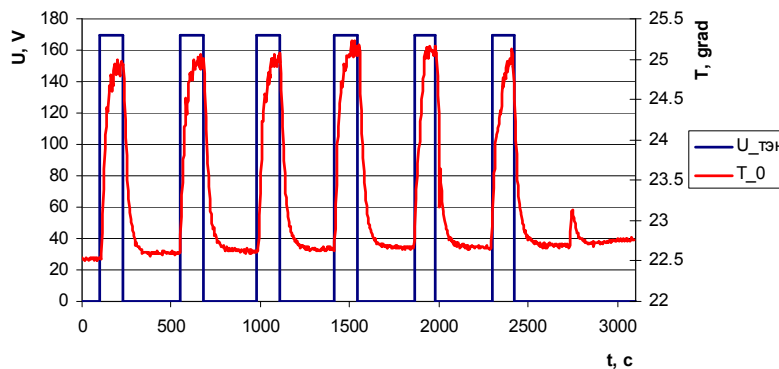


Рис. 3. Импульсы напряжения питания ТЭН:
 T_0 – температура на входе

Ранее выполненные результаты визуального наблюдения формирования потока на входе стенда с применением оптической метки показали, что, несмотря на незначительную разницу температуры закачиваемой воды и воды в объеме стенда, «горячая» вода на выходе из линеаризатора устремляется к верхней образующей трубы, формируя существенный вертикальный градиент линейной скорости. Аналогичный эксперимент, проведенный с «холодной» водой, показал движение холодного потока по нижней образующей (рис. 4).

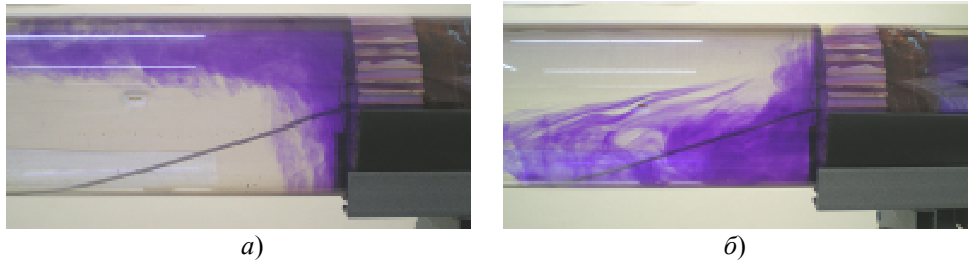


Рис. 4. Формирование потока «горячей» (а) и «холодной» (б) воды на входе стенда в условиях ламинарного течения

Таким образом, в условиях неизотермического течения ожидаемо наблюдается значительный вертикальный градиент по температуре и скорости, который необходимо учитывать при анализе данных эксперимента.

3. Обсуждение результатов эксперимента

Основная задача экспериментов – оценить перспективы применения метода температурных меток при измерении локальной скорости потока и суммарного расхода в условиях горизонтального трубного течения. Для этого на входе формировалась температурная метка и наблюдалась ее эволюция в потоке по реакции трех групп датчиков расположенных на различном расстоянии от входа (рис. 5). Локальная скорость в слое рассчитывалась путем измерения времени подхода фронта термоаномалии к разным сечениям с учетом расстояния между ними

$$v = \frac{Li}{t},$$

где v – скорость потока в слое, Li – базовое расстояние между сечениями, t – время прохождения фронта термоаномалии между точками наблюдения.

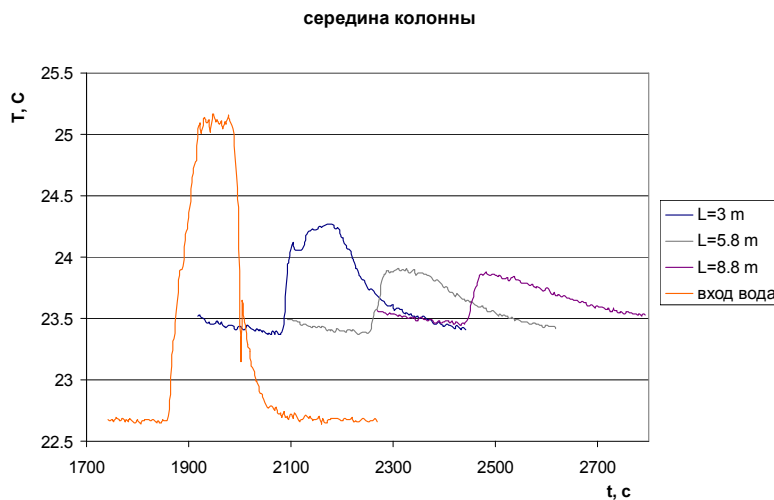


Рис. 5. Эволюция одиночного импульса по длине стенда, регистрируемая на оси трубы датчиком T_3

Как показали результаты исследований, форма и амплитуда наблюдаемой температурной метки, формируемой при работе ТЭН, существенно зависят от положения датчиков в вертикальной плоскости (рис. 6), причем нижние датчики T_1 и T_2 не регистрируют момент прохождения термоаномалий. Необходимо отметить, что при постановке серии меток (см. рис. 3) амплитуда отдельных меток меняется в пределах единого пакета и наблюдается общее повышение средней температуры потока, что связано с работой ТЭН и теплообменом между слоями в ламинарном потоке.

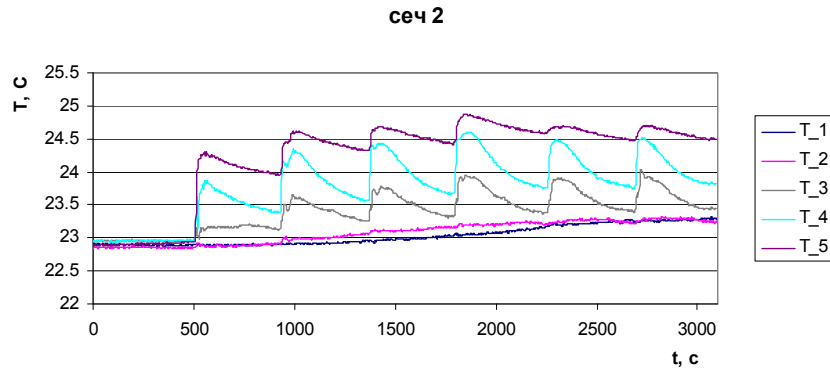


Рис. 6. Амплитуда тепловых меток в вертикальном сечении 2: T_1 – показания первого снизу датчика; T_2, T_3, T_4, T_5 – показания 2-го, 3-го, 4-го и 5-го термопар соответственно

На рис. 7 приведены результаты наблюдения за реакцией датчиков температуры T_4, размещенных на одном уровне в вертикальной плоскости на сечениях № 1, 2 и 3.

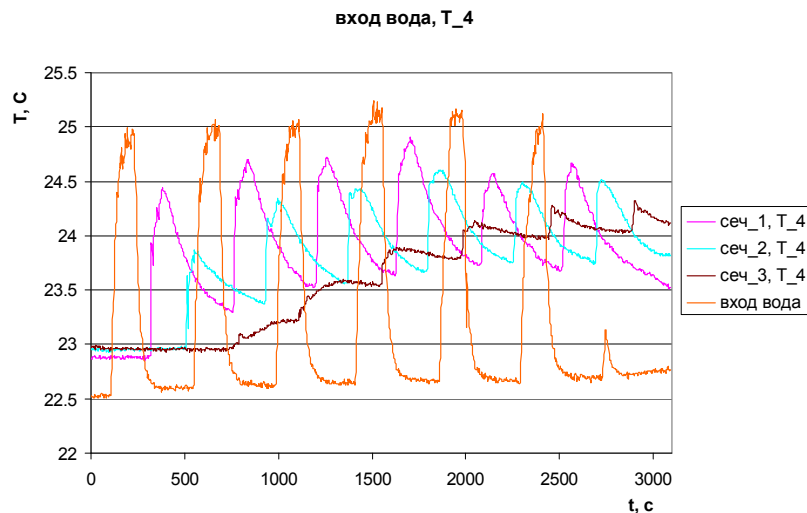


Рис. 7. Эволюция температурных меток во времени для T_4

Как видим, с увеличением расстояния от входа амплитуда аномалий существенно снижается. При этом наблюдается повышение средней температуры потока за счет объемного прогрева потока, а момент прихода **первой**

термоаномалии на отдельных датчиках плохо локализуется. Для повышения точности экспериментов все последующие измерения выполнялись путем формирования серии термоаномалий с осреднением результатов по нескольким импульсам в пределах единого пакета. Результат измерения локальной скорости в слое по итогам наблюдения термоаномалий приведен в табл. 1.

Таблица 1
Результаты измерения локальной скорости в потоке

Номер датчика	База измерения / линейная скорость (см/с)			
	L1	L2	L3	L1 + L2
T_5	1,54–1,58	1,52–1,54	1,56–1,62	1,52–1,57
T_4	1,49–1,52	1,48–1,54	1,49–1,55	1,49–1,53
T_3	1,40–1,44	1,40–1,45	1,43–1,50	1,44–1,48
T_2	0	0	0	0
T_1	0	0	0	0

По результатам анализа экспериментальных данных установлено, что наблюдение процесса эволюции серии термоаномалий в горизонтальном потоке, формируемых в виде пакета из 5–7 импульсов, обеспечивает возможность измерения локальной скорости в слое с точностью не хуже 4 %.

Увеличение измерительной базы приводит к повышению точности, но сопровождается снижением величины амплитуды термоаномалии.

Скважность импульса, обеспечивающая необходимую для регистрации величину термоаномалии, должна быть не менее 2.

Для перехода от линейных скоростей расслоенного потока к дебиту необходимо выделить границу подвижной/неподвижной жидкости. Для этого можно использовать эффект исчезновения тепловых меток в вертикальном сечении на датчике T_2 и T_1 (рис. 6), что может быть обусловлено отсутствием движения флюида по латерали в зоне этих датчиков, и поток «горячей» воды не проходит через эти два датчика. При данном предположении высота сегмента подвижного флюида $h = 75 \div 105$ мм.

Оценив h (с погрешностью ± 15 мм), можно оценить площадь сегмента с подвижной водой по следующим формулам:

$$S_{\text{сег}} = S_{\text{сек}} - S_{\Delta}; \quad (1)$$

$$S_{\text{сег}} = \frac{R^2}{2}(\alpha - \sin \alpha); \quad (2)$$

$$\alpha = 2 \arccos \left(\frac{R-h}{R} \right), \quad (3)$$

где $S_{\text{сег}}$ – площадь сегмента, занимаемая разогретой жидкостью, м^2 ; $S_{\text{сек}}$ – площадь сектора, м^2 ; R – внутренний радиус трубы, м; угол α – в радианах.

Оценив распределение линейной скорости потока в слоях методом температурных меток, рассчитывается суммарный дебит:

$$Q_i = v_i \cdot S_{\text{сег}}^i;$$

$$Q = \sum_i Q_i. \quad (4)$$

Таблица 2

Послойный дебит

База измерения	База измерения / дебит (м ³ /ч)			
	Q_1	Q_2	Q_3	$Q_{\text{общее}}$
L1	0,049	0,187	0,232	0,468
L2	0,054	0,206	0,256	0,516
L3	0,048	0,186	0,230	0,464

Q_1 – дебит, рассчитанный для слоя воды $h = 0–15$ мм; Q_2 – дебит, рассчитанный для слоя воды $h = 15–45$ мм; Q_3 – дебит, рассчитанный для слоя воды $h = 45–75$ мм.

Результаты измерения профиля скорости и общего расхода с учетом неоднозначности определения границы подвижной жидкости приведены на рис. 7 и в табл. 2. Как и следовало ожидать, поток «горячей» воды движется по верхней образующей, движения жидкости по нижней образующей не наблюдается или оно имеет пренебрежимо малую скорость.

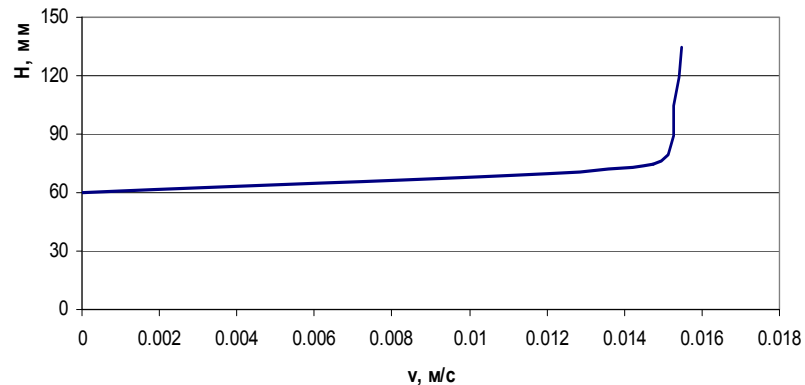


Рис. 7. Распределение линейной скорости потока по вертикали, построенное методом температурных меток (нужно два распределения 75 и 105 мм)

Распределение температуры в потоке по вертикали на разных участках стенда при установке температурных меток приведено на рис. 8 и в табл. 3.

Как показал эксперимент, основная составляющая погрешности при количественной оценке расхода в условиях расслоенного течения формируется за счет погрешности определения границы подвижной/неподвижной жидкости или градиента скорости. Эта погрешность может быть уменьшена путем увеличения числа датчиков. Причем целесообразно увеличивать плотность датчиков в средней части трубы, где незначительная погрешность оценки границы раздела приводит к существенному изменению площади сечения потока.

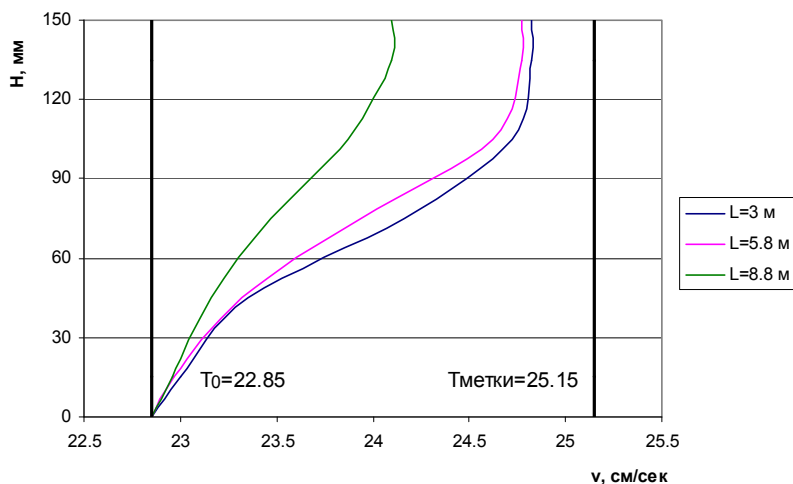


Рис. 8. Распределение средней температуры потока по вертикали для сечений $L = 3$ м, $L = 5,8$ м, $L = 8,8$ м

Таблица 3

Результаты оценки суммарного расхода методом температурных меток

Q_0 – фактический расход	0,500 м ³ /ч
Измеренный Q_{\min} – (при $h = 75$ мм)	0,480 м ³ /ч
Измеренный Q_{\max} – (при $h = 105$ мм)	0,717 м ³ /ч
ΔQ – интервал неопределенности	0,237 м ³ /ч

Второй вариант повышения точности измерения – предварительная аппроксимация отдельных точек по скорости кусочно-гладкой функцией с последующим расчетом расхода с применением специального программного обеспечения.

Заключение

Экспериментально показана возможность оценки линейной скорости расслоенного неизотермического потока по движению искусственных температурных меток.

Экспериментально установлено, что увеличение измерительной базы приводит к повышению точности оценки скорости по верхней образующей с потерей информации в целом по сечению за счет расформирования температурной метки.

Подтвержден факт термогравитационного расслоения неизотермического потока в условиях горизонтальной трубы, возникающий при постановке температурных меток.

Проведена оценка погрешности метода температурной метки при расчете суммарного расхода в условиях однофазного потока.

Библиографический список

1. Валиуллин, Р. А. Тестирование скважинной аппаратуры на стенде как обязательный элемент испытания при разработке и передаче ее в производство /

- Р. А. Валиуллин, Р. К. Яруллин, А. Р. Яруллин // Нефтегазовое дело. – 2012. – № 3. – С. 300–308.
2. Flow Scan Imager (FSI), US Patent 7424366, Schlumberger Technology Corporation. September 9, 2008. – URL: <http://www.slb.ru/>
3. **Костин, А. И.** Применение компенсированного термокондуктивного расходомера жидкости для решения геолого-технических задач / А. И. Костин, К. К. Лауфер, С. В. Новопашин // Научно-технический вестник «Каротажник». – 2005. – № 135. – С. 134–144.
4. **Ленн, К.** Промысловый каротаж горизонтальных скважин / К. Ленн, Дж. Каденхэд, Р. Сандер, В. Ашуров // Официальный сайт компании Шлюмберже. – 2004. – Декабрь. – URL: <http://www.slb.ru>
5. **Воронков, Л. Н.** Геофизический контроль насыщенности терригенных коллекторов на поздней стадии разработки нефтяных месторождений Республики Татарстан / Л. Н. Воронков, Р. И. Юсупов, В. В. Баженов, В. А. Лифантьев // Научно-технический вестник «Каротажник». – 2003. – № 109. – С. 298–313.
6. **Шарафутдинов, Р. Ф.** Опыт использования метода активной термометрии при диагностике состояния эксплуатационных скважин / Р. Ф. Шарафутдинов, Р. А. Валиуллин, В. Я. Федотов, М. Ф. Закиров // Научно-технический вестник «Каротажник». – 2010. – № 193. – С. 5–12.
7. SPE 136272 Разработка критериев выделения работающих интервалов в низкодебитных горизонтальных скважинах на основе физического эксперимента и скважинных исследований / Р. А. Валиуллин, Р. К. Яруллин, А. Р. Яруллин, В. С. Шако, А. Д. Паршин // Российская техническая нефтегазовая конференция и выставка SPE по разведке и добыче (2010 г., г. Москва, ВВЦ). – М., 2010.
8. **Яруллин, А. Р.** Результаты экспериментальных исследований двухфазного расслоенного потока в горизонтальном стволе скважины со знакопеременной траекторией / А. Р. Яруллин // Научно-технический вестник «Каротажник». – 2014. – № 243. – С. 72–76.

References

1. Valiullin R. A., Yarullin R. K., Yarullin A. R. *Neftegazovoe delo* [Oil and gas industry]. 2012, no. 3, pp. 300–308.
2. *Flow Scan Imager (FSI), US Patent 7424366, Schlumberger Technology Corporation. September 9, 2008.* Available at: <http://www.slb.ru/>
3. Kostin A. I., Laufer K. K., Novopashin S. V. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik «Karotazhnik»* [“Karotazhnik” scientific and technical bulletin]. 2005, no. 135, pp. 134–144.
4. Lenn K., Kadenkhed Dzh., Sander R., Ashurov V. *Ofitsial'nyy sayt kompanii Shlyumberzhe* [The official website of Schlumberger corporation]. 2004, December. Available at: <http://www.slb.ru>
5. Voronkov L. N., Yusupov R. I., Bazhenov V. V., Lifant'ev V. A. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik «Karotazhnik»* [“Karotazhnik” scientific and technical bulletin]. 2003, no. 109, pp. 298–313.
6. Sharafutdinov R. F., Valiullin R. A., Fedotov V. Ya., Zakirov M. F. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik «Karotazhnik»* [“Karotazhnik” scientific and technical bulletin]. 2010, no. 193, pp. 5–12.
7. Valiullin R. A., Yarullin R. K., Yarullin A. R., Shako V. S., Parshin A. D. *Rossiyskaya tekhnicheskaya neftegazovaya konferentsiya i vystavka SPE po razvedke i dobyche (2010 g., g. Moskva, VVTs)* [Russian technical oil-and-gas conference and exhibition on prospecting and extraction (2010, Moscow, All-Russian Exhibition Center)]. Moscow, 2010.
8. Yarullin A. R. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik «Karotazhnik»* [“Karotazhnik” scientific and technical bulletin]. 2014, no. 243, pp. 72–76.

Гаязов Марат Сальманович

аспирант, Башкирский государственный университет (Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32)

E-mail: gaiver28@mail.ru

Gayazov Marat Salmanovich

Postgraduate student, Bashkir State University (32 Zaki Validi street, Ufa, Russia)

УДК 532.542,550.8.014

Гаязов, М. С.

Метод температурных меток оценки скорости потока и общего расхода применительно к условиям действующих горизонтальных скважин / М. С. Гаязов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. – 2017. – № 2 (18). – С. 44–55. DOI: 10.21685/2307-9150-2017-2-6