

УДК 531.756:622.243

Г.А. Черепашук, А.П. Потыльчак, Т.В. Быкова

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТИ ПРИБОРОМ С ПОПЛАВКОМ ИЗМЕНЯЕМОЙ МАССЫ

В статье произведен расчет неопределенности измерения плотности буровой жидкости плотномером, созданным на базе ареометрического метода измерения. Выполнен анализ источников неопределенности, получено уравнение измерения и выведены формулы для коэффициентов влияния. Особенностью измерителей плотности данного типа является нелинейная статическая характеристика преобразования, линеаризация которой требует специфического подхода. В результате появляются дополнительные источники неопределенности измерений, требующие оценки и учета.

Ключевые слова: неопределенность измерений, плотномер буровой жидкости, ареометрический метод, уравнение измерения, коэффициенты чувствительности.

Постановка проблемы

Измерение плотности буровой жидкости – одно из условий безаварийного бурения скважин, так как изменение ее значения свидетельствует о поступлении в буровой раствор пластового флюида [1].

Для непрерывного измерения плотности буровой жидкости чаще всего применяются приборы, реализующие ареометрический метод [2]. Такие приборы в последнее время претерпевают некоторые усовершенствования, направленные на улучшение их метрологических характеристик. При этом возникает необходимость переоценки точности результатов измерений.

Так как в последнее время возрос интерес к оценке неопределенности измерений, что обусловлено интеграцией экономики Украины в международную экономику и принятием новой законодательной базы [3], то актуальной научной и практической задачей является расчет неопределенности результатов измерений плотности буровых растворов, полученных с помощью приборов нового поколения.

Последние публикации [1, 2], касающиеся плотномеров нового поколения, не затрагивают вопросов оценки неопределенности их результатов. Они посвящены описанию приборов, содержащих поплавки с изменяемой массой, и анализу факторов, влияющих на их точность.

Целью данной работы является обоснование методики оценивания неопределенности результатов измерений плотности буровой жидкости с помощью плотномера, реализующего ареометрический метод измерения и содержащих в своей конструкции поплавков изменяемой массы.

Расчет неопределенности измерений будем выполнять на основании [4 – 6].

Уравнение измерения

Измеритель плотности буровой жидкости, построенный на базе ареометрического метода измерения, представляет собой буюк (полое твердое тело с насыпным грузом) с известными и постоянными массой и объемом, который полностью погружается в жидкость и взвешивается в ней. По весу буйка в жидкости судят о ее плотности. Статическая характеристика преобразования (СХП) такого устройства представляет собой сумму линейной составляющей и поправки на нелинейность:

$$\rho_{\text{ж}} = \rho_{\text{изм}} + \Delta\rho_{\text{нл}}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – результат измерения плотности исследуемой жидкости; $\rho_{\text{изм}}$ – линейная составляющая результата измерения; $\Delta\rho_{\text{нл}}$ – поправка на нелинейность.

Калибровка прибора осуществляется таким образом. Линейная составляющая определяется для всего интервала измерения по двум точкам шкалы в виде:

$$\rho_{\text{изм}} = a - b\rho_{\text{изм}}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{изм}}$ – измеренный вес буйка, погруженного в исследуемую жидкость;

a, b – коэффициенты зависимости.

Коэффициенты в (2) находят по двум точкам измерения путем взвешивания буйка плотномером в воздухе и в воде. При этом в воздухе результат измерения плотности принимается равным плотности воздуха $\rho_{\text{изм}} = \rho_{\text{возд}}$, а вес буйка – $P_{\text{изм}} = P_{\text{б возд}}$. Аналогично в воде получается $\rho_{\text{изм}} = \rho_{\text{вод}}$ и $P_{\text{изм}} = P_{\text{б вод}}$.

Решение системы из двух уравнений относительно коэффициентов a и b преобразует выражение (2) к виду:

$$\rho_{\text{изм}} = \frac{\rho_{\text{вод}} P_{\text{б возд}} - \rho_{\text{возд}} P_{\text{б вод}}}{P_{\text{б возд}} - P_{\text{б вод}}} - \frac{\rho_{\text{вод}} - \rho_{\text{возд}}}{P_{\text{б возд}} - P_{\text{б вод}}} P_{\text{изм}} \quad (3)$$

Реальная СХП приборов поплавкового типа нелинейна из-за нелинейности преобразования веса буйка в электрический сигнал, поэтому с целью повышения точности измерения плотности вводится поправка $\Delta\rho_{\text{нл}}$. Она определяется на нескольких участках интервала измерения следующим образом.

По известным нижней $\rho_{\text{мин}}$ и верхней $\rho_{\text{макс}}$ границам диапазона измерения плотности калибруемого плотномера определяют допустимые изменения массы поплавка, получаемые при изменении количества насыпного груза $m_{\text{б макс}}$ и $m_{\text{б мин}}$. В этом диапазоне выбирают определенное число n калибровочных точек, зависящее от степени нелинейности СХП. Для них определяют расчетные изменения плотности поверочной жидкости относительно начального значения, отвечающие линейной СХП плотномера. По относительным изменениям веса поплавка вычисляют имитируемые относительные изменения плотности поверочной жидкости и по ним находят значения точек расчетной СХП плотномера. В процессе калибровки изменения массы поплавка осуществляют путем изменения точно измеренной с помощью лабораторных весов массы его насыпного груза.

Таким образом, поправка на нелинейность СХП рассчитывается по формуле:

$$\Delta\rho_{\text{нл}} = \frac{\rho_{\text{вод}} P_{\text{б возд}} - \rho_{\text{возд}} P_{\text{б вод}}}{P_{\text{б возд}} - P_{\text{б вод}}} - \frac{\rho_{\text{вод}} - \rho_{\text{возд}}}{P_{\text{б возд}} - P_{\text{б вод}}} \times \times P_{\text{изм}} - \rho_{\text{вод}} \left(1 + \frac{(\rho_{\text{мин}} - \rho_{\text{вод}})(m_{\text{б}} - m_{\text{б мин}})}{\rho_{\text{вод}}(m_{\text{б макс}} - m_{\text{б мин}})} \right) \quad (4)$$

где $m_{\text{б}}$ – масса буйка, соответствующая значению поправки на нелинейность на каждом интервале измерения.

Расчет неопределенности измерений

Суммарная стандартная неопределенность измерения плотности жидкости вычисляется согласно выражению:

$$u_c(\rho_{\text{ж}}) = \sqrt{u_A^2(\rho_{\text{ж}}) + u_B^2(\rho_{\text{изм}}) + u_B^2(\Delta\rho_{\text{нл}})} \quad (5)$$

где $u_A(\rho_{\text{ж}})$ – неопределенность результата измерения плотности, обусловленная случайными эффектами; $u_B(\rho_{\text{изм}})$ – неопределенность результата измерения плотности, обусловленная систематическими эффектами; $u_B(\Delta\rho_{\text{нл}})$ – неопределенность поправки на нелинейность СХП.

В ходе калибровки прибора после внесения поправки на нелинейность СХП получены результаты измерений, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений

№ наблюдения	Значение плотности жидкости, г/см ³
1	1,008
2	1,008
3	1,007
4	1,008
5	1,007
6	1,008
7	1,007
8	1,008
9	1,008
10	1,008

В качестве результата измерения принимаем среднее значение:

$$\bar{\rho}_{\text{ж}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i = 1,0077 \text{ г/см}^3,$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; $n = 10$.

По типу А определяем стандартную неопределенность, обусловленную источниками, имеющими случайный характер

$$u_A(\rho_{\text{ж}}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\rho_{\text{жи}} - \bar{\rho}_{\text{ж}})^2}{n(n-1)}} = 0,00015 \text{ г/см}^3.$$

Суммарную стандартную неопределенность измерения плотности жидкости, обусловленную источниками, имеющими систематический характер, определяем по типу В согласно выражению:

$$u_B(\rho_{\text{изм}}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_{\text{изм}}}{\partial \rho_{\text{вод}}} \right)^2 u_B^2(\rho_{\text{вод}}) + \left(\frac{\partial \rho_{\text{изм}}}{\partial \rho_{\text{возд}}} \right)^2 u_B^2(\rho_{\text{возд}}) + \left(\frac{\partial \rho_{\text{изм}}}{\partial P_{\text{б вод}}} \right)^2 u_B^2(P_{\text{б вод}}) + \left(\frac{\partial \rho_{\text{изм}}}{\partial P_{\text{б возд}}} \right)^2 u_B^2(P_{\text{б возд}}) + \left(\frac{\partial \rho_{\text{изм}}}{\partial P_{\text{изм}}} \right)^2 u_B^2(P_{\text{изм}})} \quad (6)$$

Для калибровки плотномера используется дегазированная чистая вода при температуре от 15 до 25°С. В соответствии со справочными данными значение ее плотности может находиться в границах от 0,99707 до 0,99913 г/см³. Распределение этой величины в границах интервала соответствует равномерному. Неопределенность, обусловленная неточным знанием плотности воды, равна

$$u_B(\rho_{\text{вод}}) = \frac{0,99913 - 0,99707}{2\sqrt{3}} = 0,00060 \text{ г/см}^3.$$

Значение плотности воздуха находится в границах от 0,00123 до 0,00118 г/см³. Аналогично принимается распределение этой величины равномерным и неопределенность, обусловленная неточным знанием плотности воздуха, находится по формуле

$$u_B(\rho_{\text{возд}}) = \frac{0,00123 - 0,00118}{2\sqrt{3}} = 0,0000145 \text{ г/см}^3.$$

Границы, внутри которых лежат результаты измерения плотномером веса буйка, равны ±1,25 г. Неопределенность, обусловленная неточностью измерения веса буйка, соответствует

$$u_B(P_{\text{б.возд}}) = u_B(P_{\text{б.вод}}) = u_B(P_{\text{изм}}) = 1,25/\sqrt{3} = 0,7217 \text{ (г)}.$$

Выражения для расчета коэффициентов влияния и значения соответствующих физических величин приведены в табл. 2.

Неопределенность измерения плотности буровой жидкости, обусловленная систематическими

влияющими факторами, вычисленная по формуле (6), составляет 0,0232 г.

Неопределенность поправки на нелинейность вычисляется согласно выражению

$$u_B(\Delta\rho_{\text{нл}}) = \sqrt{\sum_i C_i^2 u_{Bi}^2(x_i)}, \quad (7)$$

где C_i – коэффициент влияния i -го фактора; $u_{Bi}(x_i)$ – стандартная неопределенность, обусловленная i -м влияющим фактором.

Коэффициенты чувствительности в (7) получаются путем дифференцирования выражения (4). Все величины, входящие в выражение (4), определяются с помощью образцовых измерительных средств, имеющих соответствующие погрешности измерений. Подробные расчеты в данной статье не приводятся.

Расчет неопределенности поправки на нелинейность дал значение 0,004 г/см³.

Таблица 2

Бюджет неопределенности измерения плотности

Параметр, x	Значение параметра	Тип неопределенности	Вид распределения	Станд. неопределенность, u(x)	Выражение для коэффициента влияния, C _i	Значение коэфф. влияния	Число степ. свободы, ν _{эфф}	Вклад в суммарную неопределенность, C _i u ² (x)
Плотность жидкости	1,0077 г/см ³	A	Нормальное	0,00015 г/см ³	1	1	9	2·10 ⁻⁸ г ² /см ⁶
Плотность воды	0,9981 г/см ³	B	Равномерное	0,00060 г/см ³	$\frac{\partial \rho_{\text{изм}}}{\partial \rho_{\text{вод}}} = \frac{P_{\text{б.возд}} - P_{\text{изм}}}{P_{\text{б.возд}} - P_{\text{б.вод}}}$	1	∞	3·10 ⁻⁷ г ² /см ⁶
Плотность воздуха	0,00125 г/см ³	B	Равномерное	0,0000145 г/см ³	$\frac{\partial \rho_{\text{изм}}}{\partial \rho_{\text{возд}}} = \frac{P_{\text{б.вод}} + P_{\text{изм}}}{P_{\text{б.возд}} - P_{\text{б.вод}}}$	0	∞	0
Вес буйка в воздухе	5325 г	B	Равномерное	0,7217 г	$\frac{\partial \rho_{\text{изм}}}{\partial P_{\text{б.возд}}} = \frac{((\rho_{\text{вод}} - \rho_{\text{возд}}) \times (P_{\text{изм}} - P_{\text{б.вод}}))}{(P_{\text{б.возд}} - P_{\text{б.вод}})^2}$	0	∞	0
Вес буйка в воде	3100 г	B	Равномерное	0,7217 г	$\frac{\partial \rho_{\text{изм}}}{\partial P_{\text{б.вод}}} = \frac{((\rho_{\text{вод}} - \rho_{\text{возд}}) \times (P_{\text{б.возд}} - P_{\text{изм}}))}{(P_{\text{б.возд}} - P_{\text{б.вод}})^2}$	0,00045	∞	0,00023 г ²
Вес буйка в измеряемой жидкости	3100 г			0,7217 г	$\frac{\partial \rho_{\text{изм}}}{\partial P_{\text{изм}}} = \frac{P_{\text{вод}} - P_{\text{возд}}}{P_{\text{б.возд}} - P_{\text{б.вод}}}$	0,00045	∞	0,00023 г ²
Плотность жидкости	1,0077 г/см ³	B	Нормальное	0,0232 г	1	1	∞	0,00054 г ² /см ⁶
Поправка на нелинейность	0,009 г/см ³	B	Нормальное	0,0040 г	1	1	∞	0,000016 г ² /см ⁶
Суммарная стандартная неопределенность								0,023 г/см ³
Расширенная стандартная неопределенность (p=0.95, k _{0.95} =2)								0,046 г/см ³

Суммарная неопределенность измерения плотности буровой жидкости, вычисленная согласно выражения (5), получилась равной $0,023 \text{ г/см}^3$.

Эффективное число степеней свободы

$$v_{\text{эфф}} = \frac{u_c^2(\rho_{\text{ж}})}{\frac{u_A^4(\rho_{\text{ж}})}{n-1} + \frac{u_B^4(\rho_{\text{ж}})}{\infty} + \frac{u_B^4(\Delta\rho_{\text{нл}})}{\infty}} = 65.$$

Коэффициент охвата получаем равным

$$k_{0.95}(v_{\text{эфф}}) = 2.$$

Расширенная неопределенность равна

$$U_{0.95} = k_{0.95} u_c(\rho_{\text{ж}}) = 0,046 \text{ г/см}^3.$$

Выводы

Пересмотр процедуры оценки неопределенности плотномеров, построенных на базе ареометрического метода измерения, позволил выявить основные факторы, влияющие на их точность. Наибольший вклад в неопределенность результата измерения вносят факторы, имеющие систематический характер: неточность канала измерения веса плотнера, его нелинейность, неточность калибровки, невозможность полной компенсации нелинейности канала из-за технических трудностей воспроизведения начальной точки интервала измерения (воздух) во время определения поправок на нелинейность СХП путем увеличения веса насыпного груза в полости буйка. Тем не менее, введение этих поправок позволяет в основном компенсировать нелинейность канала измерения, так как неопределенность самой поправки на порядок ниже, чем неопределенность, обусловленная факторами, имеющими систематический характер.

Так как составляющая суммарной неопределенности, обусловленная систематическими факторами, остается наиболее весомой, то последующие исследования должны быть направлены на выявление и ком-

пенсацию этих факторов. Так предварительный анализ показывает, что существенной остается составляющая, обусловленная неточностью измерения веса буйка плотномером, что требует аппаратного усовершенствования канала измерения веса.

В целом, наработки по оценке неопределенности плотномеров необходимы для создания методик их калибровки, чего требует современное законодательство и потребность сертификации производства и систем менеджмента с целью интеграции в международную экономику.

Список литературы

1. Конев С.Н. Дифманометрический датчик плотности бурового раствора [Текст] / С.Н. Конев, В.А. Воробьев, Р.Я. Шагалов // Каротажник. – 2002. – Вып. 95. – С. 75-82.
2. Потыльчак А.П. Прибор для измерения средних значений плотности в потоке буровой жидкости [Текст] / А.П. Потыльчак, Г.А. Черепашук // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах: зб. тез доп. / ВНТУ, Вінниця, 2015. – С. 76-77. Библиогр.– с. 77.
3. Закон України від 05.06.2014 «Про метрологію та метрологічну діяльність» [Електронний ресурс] // Верховна рада України. – Режим доступа: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1314-18>
4. Guide to the Expression Uncertainty in Measurement / First Edition – ISO/Switzerland. 1993.–101 p. Руководство по выражению неопределенностей измерения. Русский перевод. Научный редактор В.А. Слаев. – Санкт-Петербург. – НПО ВНИИМ им. Менделеева, 1999. – 134 с.
5. Захаров И.П. Теория неопределенности в измерениях: учеб. пособ. [Текст] / И.П. Захаров, В.Д. Кукуш. – Харьков : Консум, 2002. – 256 с.
6. Дорожовець М. Опрацювання результатів вимірювань: навч. посіб. / М. Дорожовець. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2007. – 624 с.

Поступила в редколлегию 30.03.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ЩІЛЬНОСТІ РІДИНИ ПРИБЛОМ З ПОПЛАВЦЕМ ЗМІННОЇ МАСИ

Г.О. Черепашук, О.П. Потильчак, Т.В. Бикова

У статті зроблений розрахунок невизначеності вимірювання щільності бурової рідини щільноміром, створеним на базі ареометричного методу вимірювання. Виконаний аналіз джерел невизначеності, отримано рівняння вимірювання і виведені формули для коефіцієнтів впливу. Особливістю вимірників щільності даного типу є нелінійна статична характеристика перетворення, лінеаризація якої вимагає специфічного підходу. В результаті з'являються додаткові джерела невизначеності вимірювань, що вимагають оцінки і обліку.

Ключові слова: невизначеність вимірювань, щільномір бурової рідини, ареометричний метод, рівняння вимірювання, коефіцієнти чутливості.

MEASUREMENT UNCERTAINTY EVALUATION OF LIQUID DENSITY WITH THE HELP OF DEVICE WITH FLOAT VARIABLE MASS

G.A. Cherepaschuk, A.P. Potilchak, T.V. Bykova

In the paper the measurement uncertainty estimation of the drilling fluid density with density meter, created on the basis aerometric measurement method is made. The analysis of the measurement uncertainty sources is executed, the measurement equation is obtained and the formula for influencing factors is derived. The peculiarity of this type of density meters is the nonlinear static characteristic of conversion, which linearization requires a specific approach. As a result, the additional sources of measurement uncertainty, which required of evaluation and accounting is appeared.

Keywords: measurement uncertainty, the drilling fluid density meter, aerometric method, measurement equation, sensitivity coefficients.