

## ВЫБОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИЗМЕРЕНИЙ ПОТОЧНЫМ ПЛОТНОМЕРОМ

### ANNOTATION:

One of the physical properties that needs to be measured during a process, especially in the petroleum industry, is product density. Indicators of the density of raw materials are used as one of the main indicators when carrying out trade operations between the consumer and the supplier and are included in the scope of state metrological control. The main device involved in the technological process itself is an in-line density meter. Various types of density meters are used, which have different designs and measurement methods. Due to the participation of density meters in trade operations, an important role is given to their accuracy characteristics, which are controlled during verification with an established verification interval. Verification is carried out at the site of operation of the device without dismantling it from the production line. In addition to the measurement error, the accuracy characteristics also include the uncertainty of the measurement results. This characteristic is intended to assess the boundaries within which the measurement results of the density meter being verified are located. The article analyzes modern theoretical, methodological and technical achievements of domestic and foreign science in the field of improving the verification processes of in-line density meters used at the site of their operation, with the development of a methodology for assessing the uncertainty of measurement results.

### АҢДАТПА:

Технологиялық процесте, әсіресе мұнай өнеркәсібінде өлшенетін физикалық қасиеттердің бірі-өнімнің тығыздығы. Шикізат тығыздығының көрсеткіштері тұтынушы мен өнім беруші арасындағы сауда операцияларын жүзеге асыру кезінде негізгі көрсеткіштердің бірі ретінде саналады және мемлекеттік метрологиялық бақылау саласына кіреді. Технологиялық процестің өзіне қатысатын негізгі құрылғы-бұл ағымды тығыздық өлшеуіш. Тығыздық өлшеуіштердің конструкциясы мен өлшеу тәсіліне қарай түрлі типтері қолданылады. Сауда операцияларында тығыздық өлшеуіштердің қатысуына байланысты олардың дәлдік сипаттамалары маңызды рөл атқарады, олар бекітілген салыстырып тексеру аралығына сәйкес салыстырып тесеру барысында бақыланады. Салыстырып тексеру құрылғыны пайдалану орнында өндірістік желіден бөлшектемей жүргізіледі. Өлшеу қателігінен басқа, өлшеу нәтижелерінің белгісіздігі де дәлдік сипаттамаларына жатады. Бұл сипаттама салыстырылып тексерілетін тығыздық өлшеуіштің нәтижелері орналасқан шекараларды бағалауға арналған. Мақалада өлшеу нәтижелерінің белгісіздігін бағалау әдістемесін әзірлей отырып, пайдалану орнында жүзеге асатын ағымдық тығыздық өлшеуіштердің салыстырып тексеру процестерін жетілдіру саласындағы отандық және шетелдік ғылымның заманауи теориялық, әдістемелік және техникалық жетістіктері талданады.

### АННОТАЦИЯ:

Одним из физических свойств, которые необходимо измерять в ходе технологического процесса, особенно в нефтяной промышленности, является плотность продукта. Показатели плотности сырья задействованы как один из основных показателей при осуществлении торговых операций между потребителем и поставщиком и входят в сферу государственного метрологического контроля. Основным устройством, участвующим в самом технологическом процессе, является поточный плотномер. Используются различные типы плотномеров, которые имеют разную конструкцию и способ измерения. В связи с участием плотномеров в торговых операциях важная роль отводится их точностным характеристикам, которые контролируются при поверке с установленным межповерочным интервалом. Поверка проводится на месте эксплуатации устройства без демонтажа с производственной линии. Помимо погрешности измерения, к точностным характеристикам относится также неопределенность результатов измерений. Данная характеристика предназначена для оценки границ, в которых находятся результаты измерений поверяемого плотномера. В статье проанализированы современные теоретические, методические и технические достижения отечественной и зарубежной науки в области совершенствования процессов поверки поточных плотномеров, используемых на месте их эксплуатации, с разработкой методики оценки неопределенности результатов измерений.

**Ключевые слова:** измерение, погрешность, концепция неопределенности измерения, поточный плотномер, проверка на месте эксплуатации.



## ВВЕДЕНИЕ

Достоверность и единство результатов контроля обеспечиваются единой научной базой метрологического обеспечения испытаний и контроля, нормативно-технической документацией, регламентирующей применение средств измерений с нормируемыми метрологическими характеристиками, валидированием и верифицированием методов измерений и контроля. В связи с увеличением спроса на продукцию нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности на первый план вышли вопросы измерения количества и оптимизации распределения нефти и нефтепродуктов. Политика разумного использования природных ресурсов и учет этих ресурсов на всех стадиях, включая добычу, транспортировку, переработку и реализацию, являются неразделимыми и актуальными процессами. Контроль точностных характеристик количества добытых ископаемых напрямую влияет на прибыль добывающей компании и, таким образом, позволяет контролировать технологические процессы.

Качество измерений характеризуется точностью, достоверностью, правильностью и погрешностью измерения. Точность измерений зависит от погрешностей, возникающих в процессе измерения. Все эти факторы, а также требования к системам учета определяют появление методик измерения. Увеличение результатов измерений с известной погрешностью или с погрешностью, не превышающей допустимые пределы, является одним из важнейших условий обеспечения единства измерений и тем самым повышения качества. Для этого разрабатываются методики измерений. Также любой измерительный прибор должен пройти поверку, которая показывает, что

погрешность этого средства измерений находится в нормируемых пределах, а результаты измерений достоверны. Для этого при поверке уровень достоверности полученных значений показаний средства измерений осуществляется через оценку ее неопределенности, в соответствии с международными требованиями «Руководства по выражению неопределенности в измерениях» (GUM), что является обязательным условием признания результатов измерений международных организаций, а также условием выполнения требований ГОСТ ИСО/МЭК 17025 [1,2].

Плотность является ключевым параметром как при контроле качества, так и при коммерческом учете количества нефти и нефтепродуктов. Раньше этот параметр определяли либо с помощью ареометров, либо пикнометров. Но прогресс не стоит на месте, и сейчас самым эффективным прибором для таких измерений является поточный измеритель плотности нефтепродуктов - плотномер. Принцип его работы основан на вибрационном аспекте: в зависимости от плотности проходящей через преобразователь жидкости исходная резонансная частота колебаний вибрирующего элемента изменяется, в свою очередь частота этих колебаний с помощью различных электронных средств преобразовывается в выходной сигнал плотности жидкости.

В настоящее время Казахстан, как полноправный член международных метрологических организаций, должен при оценке точности результатов измерений широкого диапазона руководствоваться понятием неопределенности измерений.



Актуальность появления новой концепции оценки точности результатов измерений в процессе испытаний была вызвана отсутствием единства по этим вопросам как на международном, так и на региональном уровне. Понятие неопределенности явилось результатом развития теоретической метрологии и в настоящее время наиболее полно отвечает современным требованиям технического прогресса и является единственной международно признанной мерой оценки точности [6]. В связи с этим в наших исследованиях по разработке методики расчета неопределенности измерений для контроля показателей точности при проверке поточных плотномеров на месте были применены требования «Руководства по выражению неопределенности измерений» (GUM). [7].

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

В данной статье в качестве объекта исследования мы выбрали поточный плотномер (Solartron 7835). Плотномер предназначен для непрерывного измерения плотности в системах коммерческого учета сырой нефти, нефтепродуктов и неагрессивных технологических жидкостей. Он имеет высочайшую точность и отличную повторяемость в условиях эксплуатации на технологических трубопроводах. Мы выбрали принцип потока. Вибрирующий элемент изготовлен из Ni-Span-C, что обеспечивает превосходную долговременную стабильность показаний и низкую температурную зависимость проводимых измерений. Остальные детали, контактирующие с рабочей средой, изготовлены из нержавеющей стали ANSI 316L [8]. В качестве нормативного документа применяется СТ РК 2.147-2014 «Государственная система обеспечения единства измерений Республики Казахстан. Поточные плотномеры на месте эксплуатации с применением пикнометрической установки. Методика поверки». В качестве методики оценки используется «Руководство по выражению неопределенности измерений» (GUM).

Принципы, разработанные для данного руководства, предназначены для применения к широкому спектру измерений и испытаний, включая те, которые необходимы для поддержания контроля и обеспечения качества в производстве, фундаментальных и прикладных научно-технических исследованиях, процессах разработки и оперативной поддержке, а также процедуры сравнения международных и национальных

эталонов единиц физических величин.

Неопределенность выражается стандартным отклонением, ее еще называют стандартной неопределенностью или интервалом и определяют на основе ряда экспериментальных данных типом А или на основе дополнительной информации с помощью типа Б.

Неопределенность — это количественная мера того, насколько надежна оценка измеренного значения и полученный результат. Неопределенность не означает сомнения в результате, а, наоборот, неопределенность предполагает повышение степени достоверности результата.

### АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ. В ЦЕЛОМ ПРОЦЕСС ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ СОСТОИТ ИЗ СЛЕДУЮЩИХ ЭТАПОВ [9]:

1. Описание процесса измерения и построение его модели;
2. Оценка значений и стандартных отклонений входных величин;
3. Корреляционный анализ;
4. Составление бюджета неопределенности;
5. Расчет результата измерения;
6. Расчет полной стандартной неопределенности;
7. Расчет расширенной неопределенности;
8. Представление окончательного результата измерения.

Этап моделирования измерений чрезвычайно важен, поскольку от правильности модели измерений зависит правильный учет всех составляющих неопределенности, а, следовательно, и расширенной неопределенности измерений. Должно быть четко представлено, что именно измеряется, включая связь между измеряемой величиной и параметрами, от которых она зависит.

Измеренная величина должна быть представлена через функциональную зависимость, которая в общем случае имеет вид:

$$Y=f(X_1, X_2, \dots, X_N), \quad (1)$$

где,  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) - называются входными величинами, а измеренное значение  $Y$  является выходным значением.



Набор входных величин  $X_1, X_2, \dots, X_N$  можно разделить на следующие категории:

- величины, значения неопределенности и которых определяются непосредственно при текущем измерении. Эти значения и могут быть получены, например, в результате однократного наблюдения, повторных наблюдений или вывода, основанного на опыте. В этом случае может возникнуть необходимость определения поправок к показаниям приборов и поправок, учитывающих влияющие величины, например температуру окружающей среды, атмосферное давление и влажность;

- величины, значения неопределенности и которых вводятся в измерение из внешних источников, например, значения, взятые из сертификатов о калибровке на эталоны, стандартными образцами или стандартными справочными данными.

Выходное значение может быть выражено как:

$$Y = x + P_1 + P_2 + \dots + P_m, \quad (2)$$

где,  $P_i$  – поправки, например, ошибка оператора, условия окружающей среды и т. д. Необходимо определить все источники неопределенности.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На основе алгоритма расчета погрешности измерений плотномера были получены следующие результаты:

На этапе 1 была построена математическая модель (3), в которой определялась абсолютная погрешность плотномера  $\Delta\rho_i$ , кг/м<sup>3</sup> при измерении плотности поверочной жидкости одновременно с плотномером и комплектом пикнометров.

$$\Delta\rho_i = \rho_{nni} - \rho_{nnip} \quad (3)$$

где,  $\rho_{nni}$  - плотность  $i$ -ой поверочной жидкости, кг/м<sup>3</sup>, вычисленная по результатам измерений периода колебаний выходного сигнала плотномера;

$\rho_{nnip}$  - результат измерения плотности поверочной жидкости пикнометрами, приведенное к температуре жидкости в плотномере, кг/м<sup>3</sup>.

Так как приведенные в формуле (3) величины определяются с помощью ряда иных величин (коэффициентов и данными полученными в ходе измерения), дальнейшие действия были разделены на этапы, из которых и был сформирован конечный результат измерений.

На этапе 2 и 3 были проанализированы источники неопределенности, к которым относятся масса тел из комплекта пикнометра, атмосферное давление, температура и плотность поверочной жидкости, плотность в условиях датчика, а также рассчитаны значения их входных величин и неопределенностей.

В ходе ряда вычислений получены значения:

для  $\rho_{nni} = 793,98$  кг/м<sup>3</sup>;

для  $\rho_{nnip} = 794,06$  кг/м<sup>3</sup>;

А их суммарная стандартная неопределенность равна 0,002197149 кг/м<sup>3</sup> и 0,002197149 кг/м<sup>3</sup>.

Этап 4 называется «Анализ корреляции». В данном случае принято предположение что величины не коррелированы.

А на этапе 5 составляется бюджет неопределенности результатов измерений, который представлен в таблице 1.

Измеряемая величина	Оценка величины	Отклонение	Тип неопределенности	Вид распределения	Стандартная неопределенность, $u_c$	Коэффициент чувствительности	Вклад неопределенности
$\rho_{nnip}$	794,06203	-	B	нормальное	0,127507551	-1	-0,1275
$\rho_{nni}$	793,98171	-	B	нормальное	0,002197149	1	0,0022
$\Delta$	-0,08032				0,127526479		

■ Таблица 1 – Бюджет неопределенности результатов измерений

В исходном расчете в бюджете неопределенности приводятся все составляющие величины, которые были учтены при расчете конечных данных.

6-ой этап показывает формулу расчета суммарной стандартной неопределенности, которая, при использовании полученных данных, составила  $u_c = 0,128$  кг/м<sup>3</sup>.

На этапе 7 рассчитывалась расширенная

неопределенность.

Так как из бюджета неопределенности видно, что один из вкладов в неопределенность может быть идентифицирован как доминирующий  $\rho_{nnip}$ , то коэффициент охвата  $k$  в данной ситуации определяется по формуле  $k = P \times \sqrt{3}$ , а доверительную вероятность  $P$  принимаем равную 0,95.



$$k = P \times \sqrt{3} = 0,95 \times \sqrt{3} = 1,65 \quad (4)$$

С учетом этого рассчитаем расширенную неопределенность:

$$U_{0,95} = k \times u_c = 1,65 \times 0,128 = 0,21 \quad (5)$$

8-ой этап представляется как окончательный результат измерения:

$$\Delta = (-0,08 \pm 0,21) \text{ кг/м}^3, \text{ при } k = 1,65 \text{ и } P = 0,95.$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Концепция неопределенности измерений в общем своем понимании направлена на оценку уровня доверия к полученным при измерениях результатам. Так во всем мире значение неопределенности измерений является чуть ли не ключевым

показателем при выборе и покупке оборудования стандартных образцов и применении методик измерений.

Полученные в ходе наших измерений значения показывают уровень достоверности к полученному результату в пределах от минус 0,29 кг/м<sup>3</sup> до 0,13 кг/м<sup>3</sup>, и указывает, что даже при учете что пределы допустимой погрешности датчиков плотности жидкости модели Solartron 7835 в ( $\pm 0,3$ ) кг/м<sup>3</sup>, полученные значения остаются в допусках, и результат не может трактоваться как ложно отрицательный или ложно положительный.

Можно сделать вывод, что при проведении поверки плотномера использованы надлежащие по характеристикам средства и методы измерения.

### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Т.С. Горбунова, «Измерения, испытания и контроль. Методы испытания» 2012 – 215 стр.
2. Метрологическое обеспечение нефтегазовой отрасли. <https://umcrostov.ru/metrologicheskoe-obespechenie-neftegazovoy-otrasli/>
3. Преобразователь плотности solartron 7835. <https://electric-machines.ru/preobrazovatel-plotnosti-solartron-7835/>
4. СТ РК 2.147-2014 «Государственная система обеспечения единства измерений Республики Казахстан. Поточные плотномеры на месте эксплуатации с применением пикнометрической установки. Методика поверки»
5. Н.Ю. Ефремова, Оценка неопределенности в измерениях. Практическое пособие. 2015 - 154 стр.
6. Введение в «Руководство по выражению неопределенности измерений» и сопутствующие документы. Оценка данных измерений/ Переведено с английского под научной редакцией доктора технических наук, проф. В.А. Слаева, доктора технических наук А.Г. Чуновкиной - 2017 - 58 стр.
7. Н.Ю. Ефремова, С.А. Качур, «Примеры оценивания неопределенностей из различных областей измерений и испытаний. Практическое пособие». 2016 – 60 стр.