

УДК 531.7

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ ЖИДКОСТИ В РЕЗЕРВУАРЕ

© 2012 А. В. Солнцева, Б. В. Скворцов, С. А. Борминский

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Рассматриваются два метода повышения точности измерения массы жидкости в резервуарах, основанные на нелинейной интерполяции экспериментальных калибровочных данных. Первый метод заключается в нахождении функции преобразования массы и совокупности измеряемых при мониторинге параметров жидкости при помощи калибровочной модели процесса измерения. Второй метод основан на определении индивидуальной аналитической зависимости для резервуара, связывающей массу жидкости с ее качественными и количественными параметрами.

Масса жидкости, резервуар, повышение точности, калибровка, нефтепродукт, интерполяция данных.

Важной задачей при эксплуатации и разработке авиационных и космических комплексов является измерение и контроль массы топлива в заправочных емкостях летательных аппаратов. Также одной из главных задач современного нефтегазового комплекса, включающего в себя группы отраслей по добыче, транспортировке и переработке нефти и газа и распределению продуктов их переработки, является определение остаточной массы жидкого товарного продукта, находящегося в резервуаре. Представленные на данный момент на рынке системы позволяют с помощью датчиков определять уровень, температуру, плотность жидкости, уровень подтоварной жидкости, количество закачанной и израсходованной жидкости, а масса или объем оставшегося продукта определяется устройством обработки как разность между текущими показаниями уровнемеров или входного и расходного расходомеров с учетом перечисленных параметров. Главным недостатком подобных систем является низкая точность учета продукта, связанная с тем, что вычисление остаточной массы жидкости в резервуаре производится по алгоритмам, не в полной мере учитывающим взаимосвязи указанных параметров с конечным результатом. Решением возникшей проблемы повышения точности является определение функции преобразования, учитывающей изменение величины остаточной массы продукта

при изменяющихся внешних и внутренних условиях.

На рис. 1 схематично представлен резервуар 1, заполненный контролируемой жидкостью 2 на уровне H . В резервуар опускается измерительный зонд 3, в частном случае труба, с отверстиями для размещения датчиков 4. Размещение датчиков 4 на разных уровнях, определяемых координатой y ($0 < y < H$), внутри резервуара 1 позволяет получить значение градиента параметров, таких, как температура T , давление p , плотность ρ , вязкость η и др.

Полученная с датчиков 4 информация о параметрах контролируемой жидкости поступает на устройство сбора информации 5, затем через блок передачи данных 6 в устройство обработки данных 7.

В общем случае масса продукта M контролируемой жидкости связана с косвенными измеряемыми параметрами обобщенной функциональной зависимостью

$$M = F(q_1, \dots, q_k, \dots, q_n), \quad (1)$$

где q_k – совокупность параметров, измеряемых при мониторинге, например, уровень контролируемой и подтоварной жидкостей, их плотность, вязкость, температура, градиент температур по глубине, диэлектрическая проницаемость, оптическое поглощение и другие, которые можно оперативно измерить известной датчиковой аппаратурой.

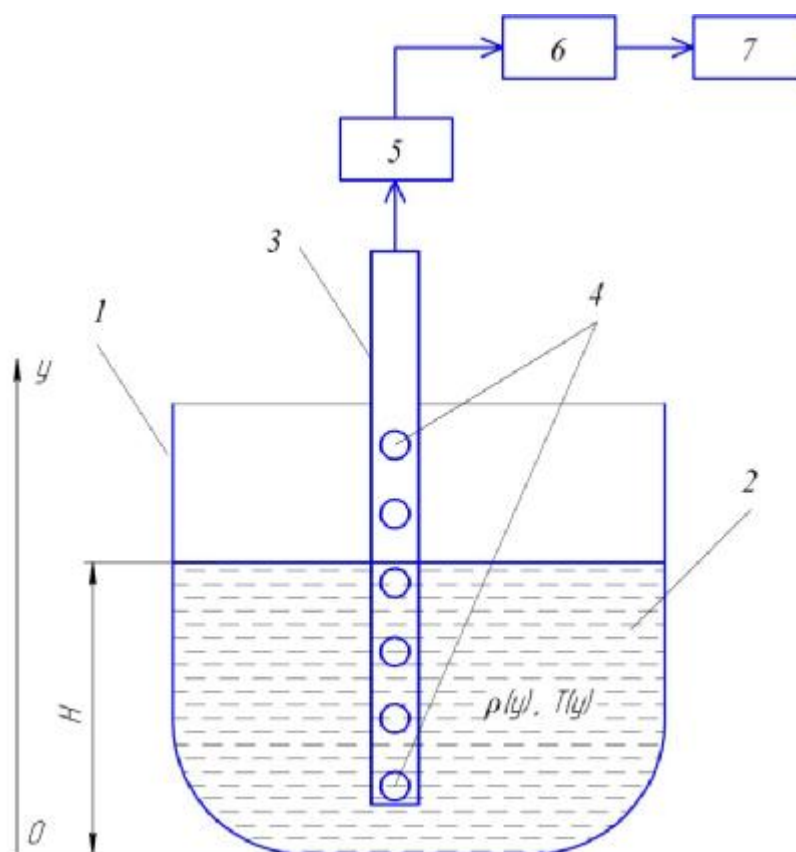


Рис. 1. Резервуар с контролируемой жидкостью: 1 – резервуар; 2 – контролируемая жидкость, параметры которой изменяются в зависимости от глубины налива; 3 – измерительный зонд; 4 – датчики; 5 – устройство сбора данных; 6 – блок передачи данных; 7 – устройство обработки данных

В общем случае функция F неизвестна. Её поиск является важнейшей задачей математического описания измерительного процесса. Учитывая, что любой измерительный процесс по определению подразумевает в себе, кроме сбора и обработки информации, также операцию калибровки по эталонам, для решения поставленной задачи предложен алгоритм измерений, показанный на рис. 2. Сущность алгоритма состоит в том, что для нахождения функции преобразования при неизвестной функции F составляется калибровочная модель процесса измерения. Для этого в резервуар i раз поэтапно наливают количество жидкости известной массы M_i , измеряют соответствующую ей совокупность контролируемых физико-химических параметров $q_{k,i}$, k – соответствует номеру измеряемого параметра ($k=1\dots m$), i – номеру калиб-

ровочного замера ($i=1\dots n$), значения которых запоминаются в центральном устройстве обработки. Количество эталонных замеров n должно быть не меньше числа контролируемых параметров m , то есть $n \geq m$ [1].

Пусть имеется n калибровочных наливов жидкости с известными значениями массы $M_1, \dots, M_i, \dots, M_n$. При этом следует помнить, что $M_i = M_{i-1} + \Delta M$, где ΔM – фиксированное приращение массы на каждом этапе калибровки. При каждом наливке контролируется совокупность параметров мониторинга резервуара $q_{k,i}$. Отметим, что при каждом очередном наливке физико-химические параметры жидкости будут меняться, так как процесс налива при больших объемах резервуара длительный, то будет меняться температура T , соответственно плотность ρ и вязкость η основного и подтоварного продукта.

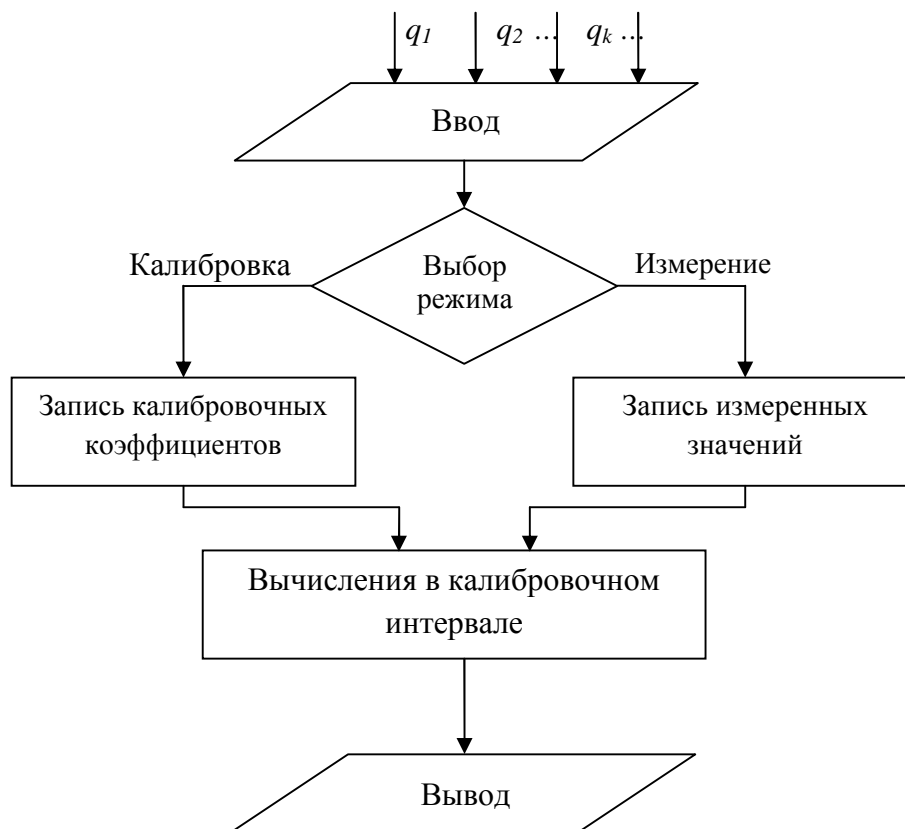


Рис. 2. Алгоритм измерений

При построении калибровочной модели для произвольных значений измеряемых параметров всегда можно подобрать такие нормирующие коэффициенты b_k , что будут выполняться равенства:

$$\begin{aligned}
 M_1 &= b_1 q_{1,1} + \dots + b_k q_{k,1} + \dots + b_m q_{m,1} = \sum_{k=1}^m b_k q_{k,1}; \\
 \dots & \\
 M_i &= b_1 q_{1,i} + \dots + b_k q_{k,i} + \dots + b_m q_{m,i} = \sum_{k=1}^m b_k q_{k,i}; \quad (2) \\
 \dots & \\
 M_m &= b_1 q_{1,m} + \dots + b_k q_{k,m} + \dots + b_m q_{m,m} = \sum_{k=1}^m b_k q_{k,m}; \\
 \dots & \\
 M_n &= b_1 q_{1,n} + \dots + b_k q_{k,n} + \dots + b_m q_{m,n} = \sum_{k=1}^m b_k q_{k,n}.
 \end{aligned}$$

Система (2) имеет n уравнений для m неизвестных b_k . Так как число эталонных замеров всегда можно сделать больше числа контролируемых параметров $n \geq m$, то из си-

стемы (2) всегда можно выбрать достаточное количество уравнений, из которых можно найти коэффициенты b_k . Желательно, чтобы выбранные для совместного решения уравнения охватывали возможно больший диапазон контролируемых параметров. Решение этой системы дает совокупность коэффициентов b_k , которые в средневзвешенной форме определяют искомый показатель качества. Система (2) имеет единственное решение, если главный определитель отличен от нуля. Решением этого уравнения являются соотношения:

$$b_k = \frac{Db_k}{D}, \quad (3)$$

где

$$D = \begin{vmatrix} q_{1,1} & \dots & q_{k,1} & \dots & q_{n,1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{1,i} & \dots & q_{k,i} & \dots & q_{n,i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{1,n} & \dots & q_{k,n} & \dots & q_{n,n} \end{vmatrix}; \quad Db_k = \begin{vmatrix} q_{1,1} & \dots & M_1 & \dots & q_{n,1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{1,i} & \dots & M_i & \dots & q_{n,i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{1,n} & \dots & M_n & \dots & q_{n,n} \end{vmatrix};$$

M_k – совокупность эталонных значений массы контролируемой жидкости, используемой при калибровке; $q_{k,i}$ – совокупность физико-химических параметров жидкости, измеренных при калибровке; k – соответствует номеру измеряемого параметра ($i=1\dots n$), i – номеру калибровочного замера ($k=1\dots n$).

Учитывая независимость получения измерительной информации и возможность варьирования сигналов датчиков, всегда можно исключить равенство нулю главного определителя в заданном диапазоне измерения.

Вычисленные таким образом коэффициенты b_k , согласно показанному на рис. 2 алгоритму, запоминаются в устройстве обработки и используются в дальнейшем в процедуре измерения. В процессе определения массы контролируемой жидкости измеряются параметры мониторинга $q_{k,X}$, а неизвестная масса нефтепродукта определяется по формуле:

$$M_X = b_1 q_{1,X} + \dots + b_k q_{k,X} + \dots + b_m q_{m,X} = \sum_{k=1}^m b_k q_{k,X}, \quad (4)$$

где M_X – искомое значение массы контролируемой жидкости; $q_{k,X}$ – совокупность измеренных параметров контролируемой жидкости.

Возможность применения формулы (4) обусловлена системой (2). Выражение (4) составляет в общем виде математическую модель измерительного процесса определения массы товарной жидкости по калибровочной модели и является конкретной формой реализации обобщенной функции преобразования (1).

Численный эксперимент показывает, что при любых значениях $\min < q_{k,i} < \max$ искомое значение находится в интервале $M_{\min} < M_X < M_{\max}$, что полностью подпадает под определение измерительного процесса, как фактора уменьшения неопределенности. Методом численного эксперимента доказано, что при любом количестве калибровочных отсчетов, равных числу используемых для мониторинга резервуара параметров, искомый параметр будет находиться в интервале $M_{\min} \div M_{\max}$. Таким образом, предложенный

способ измерений не требует точного знания функции, связывающей искомую массу жидкости с измеряемыми косвенными параметрами. Он предполагает создание математической модели в процессе калибровки. Чем больше параметров мы измеряем и чем больше число калибровочных отсчетов, тем выше точность измерений. Одним из измеряемых параметров может и должна быть температура.

Для пояснения физического смысла предложенного способа проанализируем простейший случай, когда измеряется только два параметра – уровень H и плотность жидкости ρ . При этом считаем, что температура жидкости не изменяется и равна температуре жидкости, наливаемой при калибровочном отсчете, а подтоварная жидкость отсутствует. Очевидно, что в этом случае масса жидкости будет вычисляться по формуле:

$$M_X = S H_X r_X, \quad (5)$$

где S – площадь основания емкости.

При вычислении массы по данной методике, для рассматриваемого случая калибровку достаточно проводить по двум эталонным массам, полностью перекрывающим диапазон ожидаемых значений $M_{\min} \div M_{\max}$. В формуле (3) будем иметь: $M_1 = M_{\min}$; $M_2 = M_{\max}$; $q_{11}=H_1$; $q_{12}=H_2$; $q_{21}=\rho_1$; $q_{22}=\rho_2$. Тогда выражение (2) примет вид:

$$M_X = b_1 H_X + b_2 r_X, \quad (6)$$

где

$$b_1 = \frac{r_2 M_1 - r_1 M_2}{H_1 r_2 - H_2 r_1}; \quad b_2 = \frac{H_1 M_2 - H_2 M_1}{H_1 r_2 - H_2 r_1}. \quad (7)$$

Если плотность жидкости в процессе калибровки не изменялась, что вполне может соответствовать действительности, то есть $\rho_1 = \rho_2 = \rho$, то выражения (7) и (6) примут вид:

$$b_1 = \frac{M_1 - M_2}{H_1 - H_2}, \quad b_2 = \frac{H_1 M_2 - H_2 M_1}{r(H_1 - H_2)}. \quad (8)$$

$$M_X = b_1 H_X + b_2 \rho_X = \frac{M_1 - M_2}{H_1 - H_2} H_X + \frac{H_1 M_2 - H_2 M_1}{r(H_1 - H_2)} \rho_X. \quad (9)$$

Для подтверждения правильности предложенного способа покажем, что при $\rho_X = \rho$ выражения (5) и (9) идентичны. Учи-

тывая, что $M_1 = rSH_1$, $M_2 = rSH_2$ и подставляя эти выражения в (9), получим (5).

Таким образом, доказано, что выражение (5) является частным случаем выражения (6), которое позволяет вычислять искомое значение массы при изменяющейся плотности и, очевидно, является более точным, чем подтверждается эффективность предложенного способа измерений.

Способ предусматривает возможности неограниченного нарастания точности измерений, связанной с увеличением числа контролируемых параметров. Например, если к контролю уровня и плотности в процессе калибровки и измерений добавить контроль температуры, то выражение (4) примет вид:

$$M_x = b_1 H_x + b_2 r_x + b_3 T_x, \quad (10)$$

где коэффициенты b_k определяются по формуле (3) с определителями

$$D = \begin{vmatrix} H_1 & r_1 & T_1 \\ H_2 & r_2 & T_2 \\ H_3 & r_3 & T_3 \end{vmatrix}; \quad Db_1 = \begin{vmatrix} M_1 & r_1 & T_1 \\ M_2 & r_2 & T_2 \\ M_3 & r_3 & T_3 \end{vmatrix};$$

$$Db_2 = \begin{vmatrix} H_1 & M_1 & T_1 \\ H_2 & M_2 & T_2 \\ H_3 & M_3 & T_3 \end{vmatrix}; \quad \Delta b_3 = \begin{vmatrix} H_1 & r_1 & M_1 \\ H_2 & r_2 & M_2 \\ H_3 & r_3 & M_3 \end{vmatrix}.$$

Нетрудно показать, что если температура постоянна и при измерениях такая же, как и при калибровке, то выражение (10) превращается в (6). Если температура и плотность постоянны и такие же, как и при калибровке, то выражение (10) превращается в (5), что еще раз подтверждает правильность предложенного способа измерений и возможность учета различных изменяющихся факторов при вычислении массы жидкости в резервуаре.

Аналогично в систему можно добавить учет уровня подтоварной жидкости с контролем ее температуры или учесть контроль температуры в различных точках по глубине и многие другие факторы, например, диэлектрическую проницаемость и проводимость жидкости и т.д. Важно, чтобы число калибровочных замеров было не меньше, чем число контролируемых параметров жидкости в резервуаре.

Также предлагается еще один метод определения массы жидкости, находящейся в

резервуаре.

Приведенная в формуле (5) площадь основания емкости S в реальных условиях эксплуатации не является постоянной величиной, а изменяется в зависимости от многих факторов, в том числе и от уровня наполнения [2]. Поскольку резервуар подвержен естественной деформации при его заполнении продуктом, при вычислении объема необходимо учитывать изменение площади основания S по всему участку измерения y , то есть от дна резервуара $y=0$ до максимального уровня наполнения $y=H$ (рис. 1).

Отметим также, что изменение температуры одновременно приводит к изменению и плотности, и объема жидкости, поэтому масса при изменении температуры не меняется.

Значение плотности продукта ρ также в реальных условиях не является постоянным на всей протяженности $y \in [0, H]$, поэтому справедливо выражение для определения массы:

$$M_x = \int_0^H r(y) \cdot S(y) dy. \quad (11)$$

Площадь основания резервуара и объем наполняемого продукта в общем случае математически связаны формулой:

$$V = \int_{\mp} S(y) dy, \quad (12)$$

где $S(y)$ – площадь горизонтального сечения тела с данной аппликацией y .

Согласно (12), выражение (11) переписывается следующим образом:

$$M_x = \int_{\mp} \rho(y) \cdot \frac{V(y)}{y} dy. \quad (13)$$

Для оперативного контроля емкостей, которые используются в технологических процессах, внутреннего учета нефтепродуктов и расчета внутри предприятия производится калибровка емкостей. При калибровке емкости проводится определение вместимости резервуара при пошаговом заполнении его жидкостью с одновременным фиксированием высоты уровня. Калибровка емкостей необходима для определения действительных значений метрологических характеристик резервуара.

	18-49шп ЛБ	18-49шп ПБ	49-88 шп. ЛБ	49-88 шп. Пр.Б	88-127 шп. ЛБ	88-127 шп. Пр.Б	127-165 шп. ЛБ	127-165 шп. Пр.Б
Уровень	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,01	0,19	0,19	0,71	0,71	0,74	0,74	0,7	0,7
0,02	0,38	0,38	1,43	1,43	1,48	1,49	1,41	1,42
0,03	0,58	0,58	2,15	2,15	2,23	2,24	2,12	2,14
0,04	0,78	0,78	2,88	2,89	2,98	2,99	2,84	2,86
0,05	0,99	0,99	3,62	3,63	3,74	3,76	3,57	3,6
0,06	1,21	1,2	4,36	4,37	4,5	4,52	4,29	4,33
0,07	1,43	1,43	5,1	5,11	5,27	5,29	5,03	5,07
0,08	1,66	1,65	5,85	5,86	6,05	6,08	5,76	5,82
0,09	1,89	1,88	6,62	6,62	6,83	6,86	6,51	6,57
0,1	2,13	2,11	7,38	7,39	7,62	7,64	7,27	7,32

Рис. 3. Фрагмент калибровочной таблицы на восемь емкостей

Фрагмент калибровочной таблицы, представленный на рис. 3, содержит информацию об объеме нефтепродукта, находящегося в восьми емкостях, с пошаговым изменением уровня заполнения продуктом.

Каждый элемент этой таблицы показывает соответствие между уровнем в метрах и объемом продукта, находящегося в ёмкости, в кубических метрах. Калибровочная таблица составляется при нормальной температуре.

Полученные в результате калибровки значения объема и уровня необходимо представить в виде аналитической зависимости $V(y)$. В результате применения полиномиальной регрессии, получим зависимость вида:

$$V(y) = \sum_{i=0}^n a_i y^i. \quad (14)$$

Плотность продукта может быть определена несколькими методами. Как видно из рис. 1, в измерительном зонде (трубе с открытым концом) имеется несколько отверстий, в которых установлены датчики, в том числе плотномер. Таким образом, в первом случае возможно проведение k_1 измерений плотности на уровнях расположения отверстий в измерительном зонде. Во втором случае, по мере заполнения емкости, возможно перемещение датчика плотности на величину реперного шага, таким образом, может быть произведено k_2 измерений. Способ измерения плотности определяется исходя из технического оснащения резервуарного парка.

Аппроксимируя данные, полученные о плотности жидкости, получаем зависимость (для удобства пользуемся тем же видом ре-

грессии, что и для зависимости объема от уровня):

$$r(y) = \sum_{j=0}^m b_j y^j. \quad (15)$$

С учетом (14) и (15) выражение (13) примет вид:

$$M, \int_0^H \sum_{i=0}^n a_i y^i \cdot \sum_{j=0}^m b_j y^j dy. \quad (16)$$

Определив аналитические выражения для описания зависимостей объема и плотности от уровня наполнения возможно определять массу жидкости в резервуаре при любом значении уровня H .

Интеграл вида (16) легко вычисляется даже в аналитической форме, что удобно и даёт возможность для каждой емкости получить индивидуальную аналитическую зависимость, связывающую массу топлива в баке с его уровнем с учетом изменения плотности по глубине ёмкости.

Кроме того, выражение (16) даёт возможность создать универсальный алгоритм и программу обработки данных для ЭВМ, в которую будут вводиться только данные о коэффициентах аппроксимации и текущих значениях плотности.

Изложенные в статье способы значительно повышают точность измерений массы жидкости по сравнению с известными методами, так как основаны на нелинейной интерполяции экспериментальных калибровочных данных, что, несомненно, точнее дискретного сложения и линейной интерполяции

данных, применяемых в настоящее время на всех нефтебазах РФ.

Библиографический список

1. Скворцов, Б.В. Электрофизические устройства контроля качества углеводород-

ных топлив [Текст] / Б. В. Скворцов. – Самара: Изд-во СГАУ, 2000. – 264 с.

2. Скворцов, Б.В. Импульсные методы измерений количества и качества жидких углеводородных топлив [Текст] / Б.В. Скворцов, Борминский С. А. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2010. – 220 с.

METHOD TO IMPROVE ACCURACY MASS MEASUREMENT FLUID IN THE TANK

© 2012 A. V. Solntseva, B. V. Skvortsov, S. A. Borminsky

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

Considered two methods to improve the accuracy of measuring the mass of fluid in the tank based on the non-linear interpolation of the experimental calibration data. The first method is to find a transformation function mass and the total parameters of the fluid measured by monitoring with the help of the calibration model of the measurement process. The second method is based on the determination of an individual analytical dependence for the tank, connecting a lot of fluid, with its qualitative and quantitative parameters.

Fluid mass, reservoir, improve the accuracy, calibration, petroleum, interpolation of data.

Информация об авторах

Солнцева Александра Валерьевна, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: als063@mail.ru. Область научных интересов: аналитическое приборостроение.

Скворцов Борис Владимирович, доктор технических наук, профессор, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: aps@ssau.ru. Область научных интересов: аналитическое приборостроение.

Борминский Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: b80@mail.ru. Область научных интересов: аналитическое приборостроение.

Solntseva Alexandra Valeryevna, post-graduate student of Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: als063@mail.ru. Area of research: analytical device construction.

Skvortsov Boris Vladamirovitch, doctor of technical science, professor of Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: aps@ssau.ru. Area of research: analytical device construction.

Borminsky Sergey Anatolyevich, candidate of technical science, docent of Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), doctoral of Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: b80@mail.ru. Area of research: analytical device construction.