

УДК 629.4.082.25.003.3

Б. С. ФРЕНКЕЛЬ, магистр технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В СИСТЕМАХ УЧЁТА ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

С вводом в действие нового стандарта СТБ 8030-2006 ужесточились требования к точности измерений массы дизельного топлива. Приведён анализ требований стандарта к точности, проведена оценка пределов допускаемой относительной погрешности измерений массы дизельного топлива в системах с различной степенью автоматизации. Показана невозможность обеспечения требований стандарта без замены ручных средств измерения на микроэлектронные с дополнительными блоками обработки измерительной информации.

**Т**ребования к точности выполнения измерений массы дизельного топлива содержатся в стандарте СТБ 8030–2006 «Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Масса нефти и нефтепродуктов. Общие требования к методикам выполнения измерений». Требования стандарта к максимально допустимой относительной погрешности, вступившие в силу в 2007 г., в ряде случаев ужесточились по сравнению с действовавшими ранее требованиями ГОСТ 26976–86. Так, при выдаче дизельного топлива на пунктах экипировки необходимо обеспечивать погрешность измерения не более 0,25 %, в то время как ранее допускалось – 0,5 %. Максимально допустимая относительная погрешность при статических измерениях массы топлива до 120 т должна обеспечиваться на уровне 0,65 %, тогда как утративший силу стандарт допускал 0,8 %. Аналогичные требования к точности измерительной информации действуют в большинстве стран СНГ и Евросоюза, а также в США и Канаде. Однако ещё в 90-е годы прошлого столетия ряд авторов отмечал серьёзные трудности в обеспечении требуемых пределов погрешности измерений [1, 2].

В последние десятилетия появились микроэлектронные средства измерений, обеспечивающие дополнительную обработку измерительной информации и, как следствие, существенное повышение точности измерений. Однако, несмотря на это, проблема обеспечения требований действующего стандарта остаётся. Это отмечают работники баз топлива не только Белорусской железной дороги, но и других предприятий, обеспечивающих снабжение потребителей нефтепродуктами.

Оценить предельные значения погрешности измерений можно аналитическим способом, учитывая особенности применения средств и методов измерений. Один из таких способов приведён в СТБ 8030–2006 [3, С. 11].

**Прямые методы измерений.** При использовании прямых методов статических и динамических измерений массы дизельного топлива значение предела допускаемой относительной погрешности принимают равным погрешности весов или массового расходомера [3]. Следовательно, для выполнения требований стандарта максимально допустимая погрешность статических весов должна быть не более 0,40 %, а динамических весов – не более 0,50 %. Для массовых расходомеров максимально допустимая относительная погрешность не должна быть более 0,25 %.

В большинстве существующих систем измерения и учёта дизельного топлива реализованы косвенные методы измерений, требующие измерения объёма и плотно-

сти топлива или измерения гидростатического давления.

**Косвенный метод динамических измерений** применяют на пунктах экипировки тепловозов дизельным топливом, а также при выполнении измерений расходами, установленными в топливных магистралях тепловозов. Пределы допускаемой относительной погрешности измерений массы дизельного топлива при косвенном методе динамических измерений вычисляют по формуле

$$\delta m_d = \pm 1,1 \left( \delta V^2 + G^2 (\delta \rho^2 + \beta^2 10^4 \Delta T_p^2) + \beta^2 10^4 \Delta T_V^2 + \delta N^2 \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\delta V$  – относительная погрешность измерений объёма дизельного топлива, %;  $\delta \rho$  – относительная погрешность измерений плотности дизельного топлива, %;  $\beta$  – коэффициент объёмного расширения продукта,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $\Delta T_p$  – абсолютная погрешность измерения температуры дизельного топлива при измерении его плотности,  $^\circ\text{C}$ ;  $\Delta T_V$  – абсолютная погрешность измерения температуры дизельного топлива при измерении его объёма,  $^\circ\text{C}$ ;  $\delta N$  – предел допускаемой относительной погрешности устройства обработки информации или измерительно-вычислительного комплекса (ИВК), %;  $G$  – коэффициент, вычисляемый по формуле,

$$G = \frac{1 + 2\beta T_V}{1 + 2\beta T_p},$$

$T_V$  – температура продукта при измерении его объёма,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_p$  – температура продукта при измерении его плотности,  $^\circ\text{C}$ .

Пределы допускаемой относительной погрешности можно снизить, приводя плотность не к нормальным условиям, а к условиям измерения объёма. Плотность при таких измерениях можно определять при помощи лабораторного ареометра или поточного преобразователя. В этом случае пределы погрешности вычисляют по формуле

$$\delta m_d = \pm 1,1 \sqrt{\delta V^2 + \delta \rho^2 + \Delta T_{Vp}^2 + \delta N^2}, \quad (2)$$

где  $\Delta T_{Vp}$  – составляющая относительной погрешности измерений массы дизельного топлива за счёт абсолютных погрешностей измерения его температуры при измерении объёма и плотности, %, вычисляемая по формуле

$$\Delta T_{Vp} = \pm \left[ \frac{100\beta}{1 + \beta(T_V - T_p)} \right] \sqrt{\Delta T_p^2 + \Delta T_V^2}.$$

Результаты оценки пределов относительной погрешности измерений различными средствами при косвенном методе динамических измерений приведены в таблице 1.

ном методе динамических измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты оценки пределов относительной погрешности при косвенном методе динамических измерений

| Средства измерений и их основные погрешности   | Формула | Условия проведения измерений   | Относительная погрешность, % |
|--|---------|--|------------------------------|
| Счётчики жидкости типа ППО-40 (0,25 %), ареометры АН (0,5 кг/м <sup>3</sup> , диапазон – 30 кг/м <sup>3</sup> ), термометры ТЛ-4 (0,1 °С)  | (1)     | Все измерения однократные, температура при измерениях плотности и объёма одинакова ( $G = 1$ ), идеальное устройство обработки информации ( $\delta N = 0$ ) | 0,78                         |
| Те же что и в п. 1, но ареометр АНТ-1 (0,5 кг/м <sup>3</sup> , диапазон – 60 кг/м <sup>3</sup> )   | (1)     | Те же, что и в п. 1  | 0,77                         |
| Те же, что и в п. 2.   | (2)     | Те же, что и в п. 1  | 0,71                         |
| Те же, что и в п. 2, но счётчик жидкости идеальный ( $\delta V = 0$ )  | (1)     | Те же, что и в п. 1, но счётчик жидкости идеальный   | 0,55                         |
| Счётчик жидкости с погрешностью не более 0,2 %, средство измерения плотности с погрешностью не более 0,18 % ( $\pm 0,11$ кг/м <sup>3</sup> ), ИВК с погрешностью не более 0,05 % | (1)     | Подбор погрешностей средств измерений при заданной величине погрешности измерения массы  | 0,25                         |

Как видно из таблицы 1 (варианты измерений 1–4), требования СТБ 8030–2006 невыполнимы в том случае, если применяются однократные измерения. Даже если предположить, что в качестве основного средства измерений используют идеальный счётчик жидкости (вариант 4), то и в этом случае невозможно обеспечить точность измерений на уровне 0,25 %. Требуемую точность можно обеспечить, используя, например, средства измерений, имеющие в своём составе дополнительный модуль обработки измерительной информации. Требуемые выходные характеристики таких средств измерений соответствуют условиям пятого варианта измерений.

**Косвенный метод статических измерений** применяют при определении массы дизельного топлива в емкостях баз топлива и топливных баках тепловозов. Пределы допускаемой относительной погрешности измерений массы дизельного топлива при косвенном методе статических измерений вычисляют по формуле [3]

$$\delta m_{c1} = \pm 1,1 \left( \delta K^2 + (K_{\Phi} \delta H)^2 + G^2 (\delta \rho^2 + \beta^2 10^4 \Delta T_{\rho}^2) + \beta^2 10^4 \Delta T_V^2 + \delta N^2 \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $\delta K$  – относительная погрешность градуировочной таблицы, %;  $\delta H$  – относительная погрешность измерения уровня заполнения ёмкости, %;  $K_{\Phi}$  – коэффициент, учитывающий геометрическую форму ёмкости,

$$K_{\Phi} = \frac{\Delta V_{20} H}{V_{20}},$$

$H$  – уровень заполнения, мм;  $\Delta V_{20}$  – объём дизельного топлива, приходящийся на 1 мм высоты наполнения ёмкости на измеряемом уровне заполнения, м/мм;  $V_{20}$  – объём продукта в мере вместимости на измеряемом уровне заполнения, м.

Относительная погрешность измерения уровня заполнения для метрштоков и измерительных рулеток

$$\delta H = \frac{\Delta H}{|H_{\max} - H_{\min}|},$$

где  $\Delta H$  – абсолютная погрешность измерения уровня заполнения, мм;  $H_{\max}$  и  $H_{\min}$  – соответственно верхний и нижний пределы измерения метрштока или рулетки, мм.

Абсолютная погрешность измерительной рулетки в соответствии с ГОСТ 7502–98

$$\Delta H = \pm(0,30 + 0,15(L - 1)),$$

где  $L$  – количество полных и неполных метров в измерительном отрезке рулетки.

Мерные рейки и мерные стёкла тепловозов представляют собой средства измерения уровня жидкости в топливном баке, отградуированные в единицах объёма. Для таких средств измерения оценку пределов допускаемой относительной погрешности измерения массы проводят по формуле [3]

$$\delta m_{c2} = \pm \left( \delta V_T^2 + G^2 (\delta \rho^2 + \beta^2 10^4 \Delta T_{\rho}^2) + \beta^2 10^4 \Delta T_V^2 + \delta N^2 \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где  $\delta V_T$  – относительная погрешность измерения объёма при помощи мерной рейки или мерного стекла, %.

Значение относительной погрешности  $\delta V_T$  определяют в соответствии с выражением

$$\delta V_T = \frac{\Delta V_T}{|V_{T_{\max}} - V_{T_{\min}}|},$$

где  $\Delta V_T$  – абсолютная погрешность измерения объёма, л;  $V_{T_{\max}}$  и  $V_{T_{\min}}$  – соответственно верхний и нижний пределы измерения мерной рейки или мерного стекла, л.

Плотность дизельного топлива для расчёта его массы в баке тепловоза в условиях Белорусской железной дороги устанавливается приказом начальника дороги дважды в год. С учётом разброса действительных значений плотности в зависимости от температуры дизельного топлива абсолютная погрешность измерения может достигать 20 кг/м<sup>3</sup>. Если привести это значение к диапазону измерений стандартного ареометра, получим относительную погрешность ~33,3 %.

Результаты оценки пределов относительной погрешности измерений при косвенном методе статических измерений приведены в таблице 2.

Очевидно, что наибольшую погрешность в измерение массы в резервуарах баз топлива вносят калибровочная таблица и средство измерения плотности (варианты измерений 1–3). Повышение точности уровнемера практически не сказывается на точности измерения

массы топлива. Кроме того, при построении ИВК невозможно влиять и на точность составления градуировочных таблиц. Следовательно, основное внимание при обработке измерительной информации следует уделять

информации от плотномера. Для достижения точности измерения массы дизельного топлива, требуемой стандартом, достаточно снизить максимальную абсолютную погрешность измерения плотности на  $0,05 \text{ кг/м}^3$ .

Таблица 2 – Результаты оценки пределов относительной погрешности при косвенном методе статических измерений

| Средства измерений и их основные погрешности  | Формула | Условия проведения измерений  | Относительная погрешность, % |
|---|---------|---|------------------------------|
| Градуировочная таблица (0,15 %), рулетка по ГОСТ 7502–98, ареометры АНТ-1 ( $0,5 \text{ кг/м}^3$ , диапазон – $60 \text{ кг/м}^3$ ) | (3)     | Резервуары типа РВС-3000 ( $K_\Phi = 1$ ), все измерения однократные, температура при измерениях плотности и объёма одинакова ( $G = 1$ ), идеальное устройство обработки информации ( $\delta N = 0$ ) | 0,55                         |
| Те же, что и в п. 1, но вместо рулетки уровень типа «Струна» ( $\pm 2 \text{ мм}$ )   | (3)     | Те же, что и в п. 1   | 0,54                         |
| Те же, что и в п. 1, но с плотномером «Струны» (1 %)  | (3)     | Те же, что и в п. 1   | 1,04                         |
| Мерная рейка ( $\pm 25 \text{ л}$ ), плотность – по приказу начальника Дороги   | (4)     | Тепловозы 2ТЭ10у, все измерения однократные, идеальное устройство обработки информации ( $\delta N = 0$ )   | 36,69                        |
| Те же, что и в п. 4, но со стационарным плотномером типа ДП-5 (1,5 %)   | (4)     | Те же, что и в п. 4.  | 2,02                         |
| Градуировочная таблица (0,15 %), датчик гидростатического давления (1,0 %)  | (5)     | Резервуары типа РВС-3000 ( $K_\Phi = 1$ ), все измерения однократные, идеальное устройство обработки информации ( $\delta N = 0$ )  | 1,11                         |
| Те же, что и в п. 4, но датчик гидростатического давления (0,25 %)  | (5)     | Те же, что и в п. 6   | 0,33                         |

Способ измерений на тепловозах, применяемый сегодня на Белорусской железной дороге обеспечивает крайне низкую точность (вариант 4). Здесь имеет место не просто несоблюдение требований стандарта, а весьма существенное расхождение результатов измерений с действительностью. В то же время, оборудовав тепловозы стационарными плотномерами (вариант измерения 4) можно уменьшить погрешность на порядок. Аналогичные результаты можно получить, измеряя температуру топлива, используемую далее для корректировки его плотности по фактической температуре.

**Косвенный метод, основанный на гидростатическом принципе**, как и косвенный метод статических измерений, применяют для измерения массы дизельного топлива в баках тепловозов и резервуарах баз топлива. Пределы допускаемой относительной погрешности измерения массы дизельного топлива при этом методе вычисляют по формуле [3]

$$\delta m_{TC} = \pm \sqrt{\delta P^2 + \delta K^2 + (K_\Phi - 1)^2 \delta H^2 + \delta N^2}, \quad (5)$$

$\delta P$  – относительная погрешность измерения гидростатического давления дизельного топлива, %.

Для оценки пределов допускаемой относительной погрешности измерения массы дизельного топлива в баке тепловоза по данной методике данных недостаточно. Так, в условиях эксплуатации тепловозов довольно сложно получить значение относительной погрешности составления градуировочной таблицы топливного бака ( $\delta K$ ).

В результате исследований, проведённых специалистами ПГУПС и ООО «Транс-Ойл» (Санкт-Петербург, Россия), установлено, что относительная погрешность измерения массы топлива в баке тепловоза гидростатическими измерителями не превышает  $0,076 \%$  для теп-

ловозов серии ЧМЭЗ и  $1,44 \%$  для тепловозов серии 2ТЭ116 [4]. Эти данные указывают на невозможность применения гидростатических измерителей для тепловозов с топливными баками относительно большого объёма и сложной формы (2ТЭ116, 2ТЭ10у и т. п.) без дополнительной обработки измерительной информации при помощи ИВК. Для тепловозов серии ЧМЭЗ и им подобных (с топливными баками относительно небольшого объёма и достаточно простой формы, при которой поперечное сечение достаточно плавно изменяется по высоте) гидростатические измерители можно применять и без дополнительной обработки измерительной информации.

**Заключение.** Анализ вариантов измерений массы дизельного топлива (см. таблицы 1, 2) позволяет сделать следующие выводы:

1) требования действующего стандарта СТБ 8030–2006 невозможно выполнить средствами и методами измерений массы дизельного топлива, применяемыми в локомотивных депо Белорусской железной дороги. Достичь необходимой точности измерений можно, применяя современные средства измерений, содержащие специальные блоки обработки измерительной информации;

2) применение стационарных уровнемеров типа «Струна» взамен измерительных рулеток не даёт существенного увеличения точности измерений. Однако применение таких уровнемеров позволяет уменьшить влияние человеческого фактора на результаты измерений, а также позволяет программным способом снижать погрешность измерений;

3) методика оценки пределов допускаемой относительной погрешности, рекомендованная СТБ 8030–2006, не позволяет проводить оценку точности измерения массы дизельного топлива в баке тепловоза. Таковую

оценку можно выполнить экспериментальным способом, либо воспользовавшись аппаратом математического моделирования.

#### Список литературы

1 Автоматизация учёта жидкого топлива на базах нефтепродуктов и пунктах экипировки тепловозов / Б. М. Левин [и др.] // Измерительная техника. – 1989. – № 8. – С. 34–37.

2 **Коваленко, В. П.** Борьба с потерями нефтепродуктов при транспортировании и сливо-наливных операциях /

В. П. Коваленко, К. Я. Лесной // Транспорт: Наука, техника, управление / ВИНТИ. – 1990. – № 1. – С. 53–56.

3 Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Масса нефти и нефтепродуктов. Общие требования к методикам выполнения измерений : СТБ 8030-2006. – Введ. 01 мая 2007 г. – Минск : Государственный комитет по стандартизации Респ. Беларусь, 2006. – 28 с.

4 Оценка точности измерения количества топлива в баке тепловоза гидростатическим измерителем / В. В. Грачёв [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – 2008. – № 5. – С. 29–32.

Получено 04.11.2011

**B. S. Frenkel.** Evaluation of measuring accuracy in the diesel fuel accounting system.

The recently released procedure STB 8030-2006 made accuracy requirements of diesel fuel measurement far tougher. There are the requirements for the above accuracy to meet, as well as estimated limits of tolerances for systems with various automatics. Article shows impossibility to secure requirements of the standard without replacement of the manual measuring tools by microelectronic devices with additional blocks of measuring data processing.