

УДК 629.42

Б. С. ФРЕНКЕЛЬ, ассистент, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-УЧЕТНЫХ ОПЕРАЦИЙ В ТОПЛИВНОМ ХОЗЯЙСТВЕ ЛОКОМОТИВНОГО ДЕПО

Приведена математическая модель измерительно-учетных операций, предназначенная для проведения исследований, направленных на совершенствование работы топливного хозяйства локомотивных депо. Модель позволяет проводить исследования эффективности работы топливного хозяйства при различных технических средствах и методах измерения массы дизельного топлива. Даны описания математических моделей средств измерения для определения уровня заполнения, плотности, объема и массы топлива, а также модели формирования показаний счетчиков раздаточных колонок с объемными и массовыми расходомерами. Описаны математические модели косвенных измерений для определения массы дизельного топлива при различных результатах первичных прямых измерений, принципы составления топливного баланса локомотивного депо, способы исследования эффективности работы топливного хозяйства локомотивного депо, основанные на составлении топливных балансов.

**И**змерения количества дизельного топлива производятся на всех этапах работы топливного хозяйства локомотивного депо. При приходе дизельного топлива на склад ГСМ определяется масса топлива в каждой цистерне для последующего определения соответствия товарно-транспортной накладной. При хранении топлива на складе периодически определяется масса топлива в каждом складском резервуаре для уточнения топливного баланса локомотивного депо. Отпуск дизельного топлива потребителям производится на пунктах экипировки тепловозов и дизель-поездов, а также на участках ТО-2. При отпуске количество выданного топлива определяется по показаниям счетчиков раздаточных колонок. Расход топлива тепловозами и дизель-поездами за поездку определяется как разница количества топлива в баке до поездки и по ее окончанию.

Все измерительные устройства моделируются на основании данных из модели движения дизельного топлива по объектам топливного хозяйства [1]. Результат любого измерения – случайная величина. Она представляет собой функцию измеряемой величины  $x$  [2]:

$$Y(x) = m_y(x) + \overset{\circ}{E}, \quad (1)$$

где  $m_y(x) = M[Y(x)]$  – функция математического ожидания случайной функции  $Y(x)$ ;  $\overset{\circ}{E}$  – центрированная составляющая;  $x \in [x_0, x_{01}]$ ,  $[x_0, x_{01}]$  – диапазон измерения средства измерений.

В случае моделирования значения результата измерений при заданном истинном значении измеряемой величины (1) можно представить в виде

$$Y(x) = x + E(x), \quad (2)$$

где  $E(x)$  – погрешность средства измерения.

**Формирование погрешности при прямых измерениях** При определении количества дизельного топлива в цистернах и складских резервуарах основываются на результатах измерения уровня заполнения. При измерении уровня метрштоком, мерной линейкой или рулеткой с грузом модель измерения имеет вид

$$h^n = h^\phi + \varepsilon h, \quad (3)$$

где  $h^\phi$  – фактическое (истинное) значение уровня наполнения емкости, м;  $\varepsilon h$  – абсолютная погрешность измерения уровня, м.

При моделировании измерения уровня результат измерения округляется до ближайшего значения кратного цене деления шкалы средства измерений. Максимальная инструментальная погрешность измерения уровня для различных средств измерения уровня составляет  $\pm(1...10)$  мм [3, 4].

Мерные линейки и мерные стекла для измерения объема топлива в баке тепловоза отградуированы в объемных единицах (литрах). Для этих средств измерения моделирование погрешности измерения уровня не имеет смысла, а значение измеренного объема топлива в баке определяется по формуле

$$V^{\text{ин}} = V^{\phi} + \varepsilon V^{\phi}, \quad (4)$$

где  $V^{\phi}$  – фактическое (истинное) значение объема топлива в баке тепловоза, м<sup>3</sup>;  $\varepsilon V^{\phi}$  – абсолютная погрешность измерения объема топлива в баке тепловоза, м<sup>3</sup>.

В этом случае максимальная инструментальная погрешность определяется ценой деления мерной рейки или мерного стекла. Например, для мерных реек тепловозов серии ТЭ10 она составляет  $\pm 25$  л.

Плотность дизельного топлива измеряют с помощью ареометра. Погрешность ареометра обычно указывается в процентах относительно максимального значения шкалы прибора. Поэтому мо-

дель измерителя плотности будет задаваться выражением

$$\rho^n = \rho^\phi + \varepsilon\rho = \rho^\phi + \frac{\varepsilon\rho^\%}{100}\rho^\phi, \quad (5)$$

где  $\rho^\phi$  – фактическое (истинное) значение плотности топлива, кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon\rho$  – абсолютная погрешность измерения плотности топлива, кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon\rho^\%$  – относительная погрешность измерения плотности топлива, %.

Выражение (5) записано в предположении о том, что величина погрешности измерения неизменна во всем пределе измерений. Однако статическая характеристика средства измерений, как правило, задается выражением  $\varepsilon(x) = kx$ , где  $k = \varepsilon_{\max}/x_{\max}$  – коэффициент чувствительности средства измерения, определяемый отношением максимальной погрешности к максимальному значению шкалы [2]. Тогда (5) преобразуется к виду

$$\rho^n = \rho^\phi + \frac{\varepsilon\rho^\%}{100\rho^{\text{III}}}\rho^\phi, \quad (6)$$

где  $\rho^{\text{III}}$  – максимальное значение шкалы ареометра, кг/м<sup>3</sup>.

Максимальная инструментальная погрешность для различных ареометров составляет от нескольких сотых до трех процентов. При моделировании измерения плотности результат измерения округляется до ближайшего значения, кратного цене деления шкалы ареометра.

При непосредственном измерении массы топлива модель измерительного устройства представляется выражением, аналогичным (6):

$$m^n = m^\phi + \frac{\varepsilon m^\%}{100m^{\text{III}}}\rho^\phi, \quad (8)$$

где  $m^\phi$  – фактическое (истинное) значение массы топлива, кг;  $m^{\text{III}}$  – максимальное значение шкалы измерителя массы (весов), кг;  $\varepsilon m^\%$  – относительная погрешность измерения массы топлива, %.

На пунктах экипировки количество дизельного топлива, выданного потребителю, определяется по показаниям счетчиков раздаточных колонок. Раздаточные колонки, используемые на железнодорожном транспорте, имеют в своем составе объемные или массовые расходомеры с различными принципами действия.

Модель измерения объема топлива, выданного раздаточной колонкой с объемным расходомером на каждом шаге модельного времени  $t$ :

$$V^{\text{KH}}(t) = V^{\text{KH}}(t - \Delta t) + \left( V_t^k \Delta t + V_t^k \Delta t \frac{\Delta V^k\%}{100} \right), \quad (8)$$

где  $V^{\text{KH}}(t - \Delta t)$  – показания счетчика раздаточной колонки на предыдущем шаге моделирования, м<sup>3</sup>;  $V_t^k$  – производительность раздаточной колонки, м<sup>3</sup>/мин;  $\Delta V^k\%$  – относительная погрешность измерения расхода топлива счетчиком раздаточной колонки, %.

Аналогичное выражение имеет место для раздаточных колонок с массовыми расходомерами:

$$m^{\text{KH}}(t) = m^{\text{KH}}(t - \Delta t) + \left( m_t^k \Delta t + m_t^k \Delta t \frac{\Delta m^k\%}{100} \right), \quad (9)$$

где  $m^{\text{KH}}(t - \Delta t)$  – показания счетчика раздаточной колонки на предыдущем шаге моделирования, кг;  $m_t^k$  – производительность раздаточной колонки, кг/мин;  $\Delta m^k\%$  – относительная погрешность измерения расхода топлива счетчиком раздаточной колонки, %.

Максимальная погрешность измерения для раздаточных колонок с объемными и массовыми счетчиками может достигать нескольких процентов. Фактически погрешность измерения для расходомера имеет сложную зависимость от расхода топлива. В модели принято, что расход топлива через раздаточную колонку является величиной постоянной и равной производительности колонки. В этом случае погрешность измерения можно считать постоянной величиной.

При моделировании измерения расхода топлива результат измерения округляется до ближайшего значения, кратного цене деления шкалы раздаточной колонки.

**Формирование погрешности при косвенных измерениях.** Все учетные операции в топливном хозяйстве локомотивного депо ведутся в массовых единицах. Однако результатами прямых измерений являются уровень заполнения резервуара, плотность топлива, объем топлива (при измерениях в баках тепловозов или на пунктах экипировки). Вследствие этого появляется необходимость в выполнении косвенных измерений, что приводит к возникновению дополнительных погрешностей.

Измерение массы дизельного топлива в вертикальном резервуаре топливного склада основывается на результатах прямых измерений уровня заполнения резервуара и плотности топлива в объединенной пробе, взятой из резервуара. Объем топлива определяют по уровню заполнения при помощи калибровочных таблиц, а массу топлива – как результат произведения значений объема и плотности топлива в резервуаре.

Математическая модель косвенного измерения массы дизельного топлива в вертикальном резервуаре склада ГСМ имеет вид

$$m^{\text{HP}} = V^{\text{HP}}\rho^{\text{HP}}, \quad (10)$$

где  $V^{np}$  – измеренное значение объема топлива в резервуаре, м<sup>3</sup>;  $\rho^{np}$  – измеренное значение плотности топлива в резервуаре, кг/м<sup>3</sup>.

Измеренное значение объема топлива определяется в соответствии с геометрическими размерами резервуара:

$$V^{np} = h^{np} \frac{\pi D^2}{4}, \quad (11)$$

где  $h^{np}$  – измеренное значение уровня заполнения резервуара, м;  $D$  – диаметр резервуара, м.

Округление значения  $h^{np}$  при моделировании измерений уровня заполнения резервуара соответствует пересчету уровня топлива в его объем по калибровочным таблицам.

Подставив (11) и (6) в (10), получим

$$m^{np} = h^{np} \frac{\pi D^2}{4} \left( \rho^{фр} + \frac{\varepsilon \rho^{\%}}{100 \rho^{\text{ш}}} \rho^{фр} \right), \quad (12)$$

где  $\rho^{фр}$  – фактическое значение плотности топлива в резервуаре, кг/м<sup>3</sup>.

Далее подставим (3) в (12):

$$m^{np} = (h^{фр} + \varepsilon h) \frac{\pi D^2}{4} \left( \rho^{фр} + \frac{\varepsilon \rho^{\%}}{100 \rho^{\text{ш}}} \rho^{фр} \right), \quad (13)$$

где  $h^{фр}$  – фактическое значение уровня заполнения резервуара, м.

Фактическое значение уровня заполнения резервуара  $h^{фр}$  определяется исходя из фактических значений массы  $m^{фр}$  и плотности  $\rho^{фр}$  топлива в резервуаре, а также геометрических размеров резервуара:

$$V^{фр} = \frac{m^{фр}}{\rho^{фр}} \Rightarrow h^{фр} = 4 \frac{V^{фр}}{\pi D^2} = 4 \frac{m^{фр}}{\pi D^2 \rho^{фр}}. \quad (14)$$

Подставив (14) в (13), получим

$$m^{np} = \left( 4 \frac{m^{фр}}{\pi D^2 \rho^{фр}} + \varepsilon h \right) \frac{\pi D^2}{4} \left( \rho^{фр} + \frac{\varepsilon \rho^{\%}}{100 \rho^{\text{ш}}} \rho^{фр} \right). \quad (15)$$

При измерении массы топлива в баке тепловоза используется значение объема топлива, измеренное при помощи мерной рейки или мерного стекла, а также значение плотности топлива, устанавливаемое дважды в год (летнее и зимнее значения). В этом случае измеренное значение массы топлива описывается выражением

$$m^{нб} = V^{нб} \rho^{нб}, \quad (16)$$

где  $V^{нб}$  – измеренное значение объема топлива в баке тепловоза, м<sup>3</sup>;  $\rho^{нб}$  – расчетное значение плотности топлива для расчета расхода топлива тепловозами, кг/м<sup>3</sup>.

Подставив (4) в (16), получим

$$m^{нб} = (V^{фб} + \varepsilon V^{\%}) \rho^{нб}, \quad (17)$$

Фактическое значение объема топлива в баке тепловоза определяется по фактическим значениям массы  $m^{фб}$  и плотности  $\rho^{фб}$ :

$$V^{фб} = \frac{m^{фб}}{\rho^{фб}}. \quad (18)$$

Подставив (18) в (17), получим

$$m^{нб} = \left( \frac{m^{фб}}{\rho^{фб}} + \varepsilon V^{\%} \right) \rho^{нб}. \quad (19)$$

**Оценка эффективности работы топливного хозяйства локомотивного депо методом топливных балансов.** На основании измерительных средств и методов, применяемых в исследуемых системах измерения и учета дизельного топлива, построена математическая модель универсальной измерительной системы. Таким образом, разработанный комплекс математических моделей позволяет провести оценку эффективности различных систем измерения и учета дизельного топлива в полностью идентичных условиях, как если бы исследуемые системы работали параллельно. В реальных условиях эксплуатации проведение такой проверки достаточно трудоемко, не всегда возможно и далеко не всегда оправдано с экономической точки зрения. Следовательно, возможность проведения сравнительного анализа нескольких измерительно-учетных систем является еще одним достоинством разработанного комплекса.

Оценку эффективности систем измерения и учета дизельного топлива предлагается проводить с использованием метода топливных балансов. Этот метод основан на уравнениях, приведенных ниже:

$$\Delta m^p = \sum_{i=1}^n m_i^{\text{н}}, \quad (20)$$

$$\Delta m^p = \sum_{j=1}^m m_j^{\%} = \sum_{k=1}^q m_k^{\text{н}} = \sum_{k=1}^q (m_k^{\text{б}} + m_k^{\text{с}}), \quad (21)$$

где  $\Delta m^p$  – изменение количества топлива в складских емкостях, кг;  $\sum_{i=1}^n m_i^{\text{н}}$  – суммарное количество топлива, слитого на склад из  $n$  цистерн, кг;  $\sum_{j=1}^m m_j^{\%}$  – суммарное количество топлива, выданного на пунктах экипировки через  $m$  раздаточных колонок, кг;  $\sum_{k=1}^q m_k^{\text{н}}$  – суммарное количество топлива, набранного на  $q$  тепловозов, кг;  $\sum_{k=1}^q (m_k^{\text{б}} + m_k^{\text{с}})$  – суммарное количество топлива, находящегося в текущий момент времени в баках  $q$  тепловозов и израсходованного ими, кг.

Уравнение (20) справедливо для исследования прихода топлива на склад, уравнение (21) – для расхода топлива со склада.

В этих уравнениях сделан ряд допущений. Во-первых, предполагается, что потребителями дизельного топлива являются только магистральные тепловозы. Во-вторых, то, что к моменту начала эксперимента баки тепловозов пусты.

Исследования показали, что доля дизельного топлива, расходуемого со склада на тягу поездов, составляет более 80 %, из них на долю маневрового, вывозного и хозяйственного движения приходится не более 20 %. Таким образом, остальными потребителями можно пренебречь.

Вышеприведенные уравнения справедливы для идеальной измерительной системы, полностью свободной от погрешностей. Для реальной измерительной системы в уравнения (20) и (21) будут вноситься значения дисбалансов, характеризующие неидеальность системы. По величинам этих дисбалансов можно судить об эффективности исследуемой системы измерения и учета дизельного топлива, а также о наиболее «узких» местах в системе. Уравнения топливных балансов для реальной измерительной системы имеют следующий вид:

$$\Delta m^p = \sum_{i=1}^n m_i^u + \varepsilon^{pu}, \quad (22)$$

$$\Delta m^p = \sum_{j=1}^m m_j^3 + \varepsilon^{p3}, \quad (23)$$

$$\sum_{j=1}^m m_j^3 = \sum_{k=1}^q m_k^h + \varepsilon^{3h}, \quad (24)$$

$$\sum_{k=1}^q m_k^h = \sum_{k=1}^q (m_k^b + m_k^c) + \varepsilon^{hb}, \quad (25)$$

где  $\varepsilon^{pu}$  – дисбаланс между количеством топлива, слитым из цистерн (по измерениям в цистернах), и изменением количества топлива в складских резервуарах (по измерениям в резервуарах), кг;  $\varepsilon^{p3}$  – дисбаланс между изменением количества топлива в складских резервуарах (по измерениям в резервуарах) и количеством топлива, выданном на пунктах экипировки (по показаниям счетчиков раздаточных колонок), кг;  $\varepsilon^{3h}$  – дисбаланс между количеством топлива, выданном на пунктах

экипировки (по показаниям счетчиков раздаточных колонок) и количеством топлива, набранного на тепловозы (по измерениям в баках тепловозов), кг;  $\varepsilon^{hb}$  – дисбаланс между количеством топлива, набранного на тепловозы (по измерениям в баках тепловозов до и после экипировки) и суммой количества топлива в баках тепловозов и количества топлива, израсходованного на тягу (по измерениям в баках тепловозов до и после поездки), кг.

Аналогично уравнениям (22)–(25) составляются уравнения для определения дисбалансов, например, между изменением количества топлива на складе и количеством топлива, набранном на тепловозы и т. п.

По величинам дисбалансов  $\varepsilon^{pu}$ ,  $\varepsilon^{p3}$ ,  $\varepsilon^{3h}$  и  $\varepsilon^{hb}$  можно судить о наиболее узких местах в исследуемой системе. Наибольшие значения дисбалансов указывают наиболее «узкие» места, на которые необходимо обращать внимание в первую очередь при совершенствовании системы измерения и учета дизельного топлива. Кроме того, приведенный метод и разработанный комплекс математических моделей позволяет выбрать наиболее эффективную систему для условий конкретного локомотивного депо или наиболее оптимальный путь совершенствования существующей.

#### Список литературы

1 Френкель, Б. С. Математическая модель движения дизельного топлива в локомотивном депо / Б. С. Френкель // Совершенствование конструкции и системы обслуживания локомотивов : межвуз. сб. науч. тр. / С.-Петерб. гос. ун-т путей сообщения ; под ред. А. В. Грищенко. – СПб. : ПГУПС, 2003. – С. 64–72. – ISBN 5-7641-0131-X.

2 Назаров, Н. Г. Метрология. Основные понятия и математические модели : учеб. пособие для вузов / Н. Г. Назаров. – М. : Высш. шк., 2002. – 348 с. – ISBN 5-06-004070-4.

3 Измерения параметров потока, расхода, уровня, объема [Электронный ресурс] / ООО ИТЦ «ПромКомплекИнжиниринг», 2006. – Режим доступа: [http://www.pkimpex.ru/producth016\\_1.htm](http://www.pkimpex.ru/producth016_1.htm). – Яз. рус.

4 Погрешности в измерении уровня подтоварной воды, или два миллиметра денег для АЗС [Электронный ресурс] / «Пангея Экспосервис», 2004. – Режим доступа: <http://www.paste.ru/delta.htm>. – Яз. рус.

5 Измерения в промышленности. Кн. 2. Способы измерения и аппаратура : справ. изд. В 3 кн. : пер. с нем. / под ред. П. Профоса. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1990. – 384 с. – ISBN 5-229-00434-7.

Получено 22.11.2006

**B. S. Frenkel.** Modeling of the measuring discount operations of the fuel management of the locomotive depot.

The account of the measuring discount operations mathematical model is adduced. The model is intended for the investigation carrying out, which are aimed at the improvement of the fuel management operation of the locomotive depots. The model allows carrying out the investigations of the operation efficiency of the fuel management under different technical means and diesel mass measuring methods. The account of measuring means mathematical models for determination of the filling level, density, volume and mass of fuel as well as the model of the index forming of the petrol pump counters with the volume and mass expense meters are adduced. The descriptions of the mathematical models of indirect measures for the diesel mass determination under different results of the primary direct measurements are adduced. The principles of the fuel balance compiling for the locomotive depot are accounted. The description of the investigation method of the work efficiency of the locomotive depot's fuel management based on compiling of the balances is adduced.