

Результаты экспериментальных и расчётных исследований показывают, что в материале эластичной прокладки из ВГО-1, предназначенной для защиты датчиков ударных ускорений от неизмеряемых воздействий, существует дополнительный (кроме демпфирования) механизм подавления нижней собственной частоты. Вполне вероятно, что эту функцию выполняет изменяющаяся жёсткость эластомера в зависимости от скорости деформирования.

Л и т е р а т у р а

1. **А. С. 558218 СССР.** Способ защиты акселерометра от неизмеряемых воздействий / И. Б. Синани, Б. О. Ирашин // Бюл. изобрет. 1977. № 18.
2. **ENDEVCO,** Instrumentation Catalog. Shock, Vibration, Pressure. Piezoresistive Accelerometer Model 7270 AM6.

3. **Пат. 2410704 РФ.** Механический фильтр для пьезоакселерометра / Т. Д. Зинченко, Д. Б. Клещев, А. Г. Ремезов и др. // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 3.

4. **Колесникова Л. А., Мальгун М. М., Скрыпникова Л. Ф., Соболев М. Д.** Способ защиты датчиков ускорений от неизмеряемых воздействий // Измерительная техника. 1990. № 2.

5. **Лассан В. Л., Пеллинец В. С.** О влиянии демпфирования на динамическую погрешность пьезоэлектрических ударных акселерометров // Измерительная техника. 1978. № 1.

6. **Иванов А. И., Лупша В. А.** Квазистатическая и динамическая характеристики кольцевых прокладок круглого сечения // Расчётно-экспериментальные методы отработки конструкции на стойкость к внешним воздействиям: Сб. докл. VI объединенной конф. ВНИИЭФ и ВНИИТФ. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003.

Дата принятия 07.10.2015 г.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

519.233.5:523.57

Адекватность результатов измерений в задачах учёта тепловой энергии

В. П. ЧИПУЛИС

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,
Владивосток, Россия, e-mail: chip@vira.dvo.ru

Рассмотрена задача метрологического обеспечения учёта тепловой энергии и теплоносителя на примере перетока воды из системы холодного водоснабжения в систему отопления. Приведены пути повышения адекватности измерений с использованием регрессионной модели объекта.

Ключевые слова: переток воды, система холодного водоснабжения, система отопления, регрессионная модель.

The problem of metrological control for the accounting of thermal energy and heat agent in the situations when water overflows from the system of cold water supply to the heating system is considered. The ways to improve the adequacy of measurement results using a regression model of the object are demonstrated.

Key words: overflow of water, cold water supply, heating system, regression model.

Основным требованием, предъявляемым к результатам измерений в системах технологического и коммерческого учёта тепловой энергии, является их достоверность [1, 2]. Требование достоверности является необходимым, но недостаточным условием для решения задач учёта. Непосредственное использование недостоверных результатов изме-

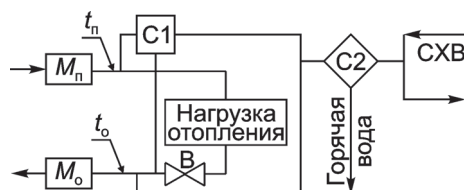


Рис. 1. Открытая система теплоснабжения:

C1 — смеситель (клапан прямого действия); C2 — крановый смеситель; В — вентиль; СХВ — система холодного водоснабжения

рений, например, для коммерческого учёта тепловой энергии и теплоносителя, в ряде случаев может сопровождаться недопустимыми искажениями результатов. Их вызывают: существенные нарушения требований нормативной базы при проектировании и эксплуатации систем тепло- и водоснабжения; отклонения от проекта; старение объекта, сопровождаемое деградацией его технических характеристик (возможностей); непредусмотренные проектом врезки в систему теплоснабжения; несанкционированный водозабор в закрытой системе теплоснабжения. К недопустимым будем относить такие искажения результатов измерений, которые превышают допустимую погрешность измерительных приборов. Достоверные результаты измерений, сопровождаемые недопустимыми искажениями при их непосредственном использовании в учёте потребляемых ресурсов, назовём неадекватными.

Рассмотрим более подробно ситуацию перетока воды из системы холодного водоснабжения (СХВ) в систему теплоснабжения. Такая ситуация приводит к неадекватным измерениям. Перетоки нередко наблюдаются в дошкольных образовательных учреждениях. Их причина — некачественные, устаревшие смесители, через которые происходит соответствующий переток, если давление в СХВ превышает давление в системе теплоснабжения. На рис. 1 представлена схема открытой системы теплоснабжения, из которой осуществляется отбор теплоносителя на нужды горячей водоснабжения (ГВС). Вентиль *В* отключает нагрузку отопления в межотопительный период. Смеситель *С1* (элеватор или клапан прямого действия) поддерживает нормативное значение температуры горячей воды в результате смешения теплоносителя из подающего и обратного трубопроводов системы. Крановый смеситель *С2* смешивает горячую воду (после *С1*) с холодной в пропорции, необходимой потребителю. Именно через крановые смесители возможен переток из СХВ в систему теплоснабжения. Следует учитывать, что значение перетока не постоянно и зависит от соотношения давлений в системе отопления и СХВ, меняющихся во времени.

Измерения потребления тепловой энергии и горячей воды в открытой системе теплоснабжения. Тепловую энергию Q , потребляемую открытой системой теплоснабжения в исправном техническом состоянии, см. рис. 1, можно определить следующим образом [3]:

$$Q = M_n \Delta t + M_{ГВС} (t_o - t_{СХВ}); \Delta t = t_n - t_o, \quad (1)$$

где M_n , M_o — расход теплоносителя в подающем и обратном трубопроводе системы, соответственно; $M_{ГВС}$ — расход горячей воды; t_n , t_o — температура теплоносителя в подающем и обратном трубопроводе системы, соответственно; $t_{СХВ}$ — температура холодной воды в СХВ.

В исправном техническом состоянии системы переток холодной воды из системы СХВ в систему теплоснабжения невозможен.

Выражение (1) является приближённым, в нём вместо энтальпий теплоносителя представлены его температуры. Однако вносимая при этом погрешность вычислений весьма незначительна (меньше допустимой погрешности измерений тепловой энергии). Использование (1) оправдано, так как в примере фигурируют измеряемые значения температур и расходов теплоносителя для конкретного объекта.

При коммерческом учёте потребляемых ресурсов обычно разделяют измерения (и дальнейшую оплату) тепловой энергии и горячей воды. Для определения тепловой энергии отопления используют первое слагаемое выражения (1), а для расчёта оплаты за потреблённую горячую воду — $M_{ГВС}$. Тариф на горячую воду включает все расходы, связанные с нагревом воды до нормативного значения. Как правило, они определяются весьма приближённо и подразумевают соблюдение нормативного значения температуры горячей воды и конкретного значения температуры холодной воды. Такая система измерений параметров теплоснабжения и оплаты принята, в частности, в Приморском крае, где расположен анализируемый объект — муниципальное дошкольное учреждение народного образования г. Владивостока (МДОУ № 34). На рис. 2 представлены графики измеренных среднечасовых значений параметров M_n , M_o , t_n , t_o и вычисленных на их основе ΔM , Δt , ΔQ за период времени с 12.06.2012 по 08.07.2012 по

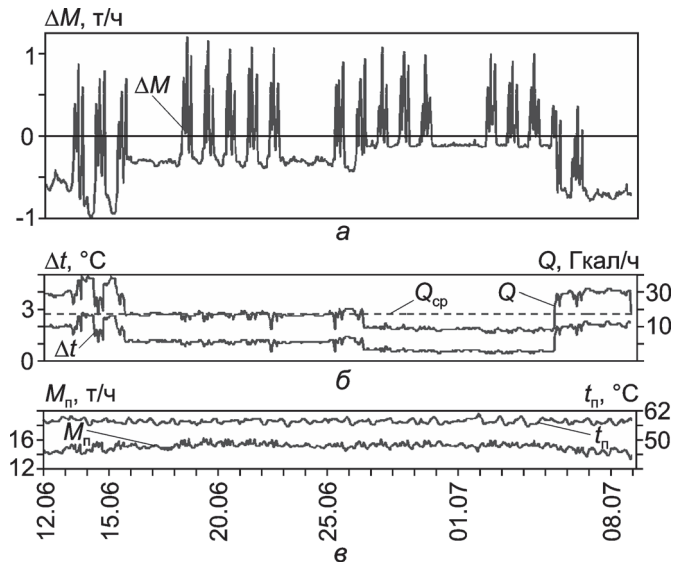


Рис. 2. Графики среднечасовых значений параметров ΔM (а), Δt , Q (б), M_n , t_n (в) теплоснабжения на анализируемом интервале времени с 12.06.2012 г. по 08.07.2012 г.

08.07.2012 г. Значения всех параметров, как измеренных, так и вычисленных, взяты из архива теплосчётчика, установленного в тепловом узле объекта. Погрешность измерений расхода M_n , M_o и температуры t_n , t_o не превышала допустимого значения, вследствие чего измерения следует считать достоверными. Это подтверждается установленными в тепловом узле объекта поверенными расходомерами и датчиками температуры. Проанализируем влияние перетока холодной воды из СХВ в систему теплоснабжения с точки зрения адекватности результатов измерений Q , $M_{ГВС}$.

Адекватность измерений потребления горячей воды при перетоке. Влияние перетока на адекватность измерений потребления горячей воды оценить достаточно просто. Очевидно, что переток увеличивает расход теплоносителя в обратном трубопроводе и, тем самым, уменьшает измеренное значение потребления горячей воды. Анализ графика разности расходов на рис. 2 свидетельствует о том, что ΔM в основном находится в области отрицательных значений. Для

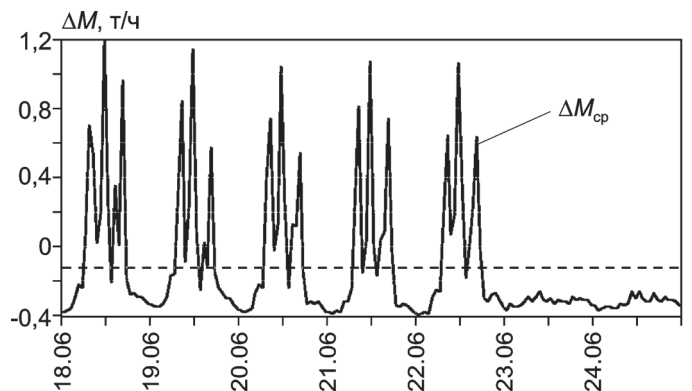


Рис. 3. Графики среднечасовых значений разности расходов ΔM на интервале времени с 18.06.2012 г. по 24.06.2012 г.

более детального анализа выделим одну из недель анализируемого периода — с 18.06.13 г. по 24.06.13 г. включительно (рис. 3). Пики значений ΔM соответствуют потреблению горячей воды в будние дни с 7.00 до 18.00. В остальное время значение ΔM определяется лишь перетоком холодной воды в обратный трубопровод системы теплоснабжения.

Напомним, что выражение (1), в том числе в части, касающейся потребления горячей воды, справедливо для объекта, находящегося в исправном техническом состоянии, т. е. исключающем переток из СХВ. При перетоке не соблюдается равенство $\Delta M = M_{\text{ГВС}}$. Действительно, в случае перетока $M_o = M_n - M_{\text{ГВС}} + M_{\text{СХВ}}$ и, следовательно

$$\Delta M = M_n - M_o = M_n - (M_n - M_{\text{ГВС}} + M_{\text{СХВ}}) = M_{\text{ГВС}} - M_{\text{СХВ}} \quad (2)$$

Из (2) следует, что значение ΔM нельзя использовать для определения количества потребленной горячей воды, поскольку оно занижает фактическое потребление на переток $M_{\text{СХВ}}$. Это подтверждается и примером недельного потребления горячей воды. Просуммировав ΔM_i для всех 168 ч. недельного интервала (или, что то же самое, умножив отмеченное на рис. 3 среднечасовое значение $\Delta M_{\text{ср}} = -0,12$ т/ч на 168), получим измеренное значение потребления горячей воды (с учётом перетока):

$$\Delta M = \sum \Delta M_i = 168 \Delta M_{\text{ср}} = -20,16 \text{ т/ч}, \quad i = 1, 2, \dots, 168.$$

Очевидно, что результат измерений неадекватный, поскольку из него следует, что поставщик должен заплатить потребителю за горячую воду. Предположим, что в ночные часы потребление горячей воды близко к нулю, что согласуется с режимом работы дошкольного учреждения. Из гра-

фика на рис. 2, а следует, что результаты измерений ΔM занижены приблизительно на $\delta = 0,4$ т/ч. Поэтому фактическое среднечасовое потребление горячей воды $M_{\text{ГВСср}} = \Delta M_{\text{ср}} + 0,4 \text{ т/ч} = (-0,12 + 0,4) \text{ т/ч} = 0,28 \text{ т/ч}$ и, как следствие, фактическое потребление горячей воды за анализируемый интервал времени $M_{\text{ГВС}} = 168 M_{\text{ГВСср}} = 47,04 \text{ т}$. Следовательно, непосредственное использование результата измерения ΔM для определения потребления горячей воды приводит, для рассматриваемого примера, к занижению реального потребления приблизительно на 67,2 т.

Адекватность измерений тепловой энергии при перетоке. В отличие от ситуации с потреблением горячей воды оценка адекватности измерения тепловой энергии при перетоке не столь очевидна и требует более детального анализа. Период времени для анализа (с 12.06.2012 по 08.07.2012 гг.) выбран из следующих соображений. Количество потребляемой тепловой энергии существенно зависит от двух параметров — расхода M_n и температуры теплоносителя t_n в подающем трубопроводе (1). Выявить зависимость теплоснабжения Q от перетока весьма проблематично на фоне значительного изменения этих параметров в отопительный период. Однако на выбранном интервале времени межотопительного периода (вентиль B закрыт, нагрузка отопления отключена) параметры M_n , t_n относительно стабильны (см. рис. 2, в). При этом теплоснабжение ограничено только потерями тепла при обеспечении циркуляции теплоносителя для нужд ГВС.

Переток холодной воды из СХВ понижает температуру теплоносителя в обратном трубопроводе и, как следствие, повышает разность температур Δt . В такой же степени переток повышает значение измеряемой (но не фактически потребляемой!) тепловой энергии Q (1). На графиках (см. рис. 2), прослеживаются эти тенденции. Формы графиков параметров Q и Δt , а также пропорции изменения этих величин во времени практически тождественны. На графиках отчетливо видна связь параметров Q и Δt с ΔM .

Поставим задачу поиска аналитической зависимости измеряемой тепловой энергии от перетока и количественной оценки связанных с ним искажений в измерении значения Q по формуле (1). Для этого воспользуемся регрессионным анализом, и построим аппроксимацией результатов измерений модели фактических зависимостей между параметрами анализируемого объекта [4, 5].

Решение задачи осложняется тем, что результаты измерений не содержат перетока в явном виде (величина $M_{\text{СХВ}}$). Однако $M_{\text{СХВ}}$ — вычитаемое в выражении (2). И если выделить периоды времени, в течение которых не было потребления горячей воды ($M_{\text{ГВС}} = 0$), то соответствующие им результаты измерений разности расходов ΔM будут соответствовать перетоку, т. е. $\Delta M = -M_{\text{СХВ}}$. Из графика на рис. 2, а следует, что потребления горячей воды не происходило (или оно было на уровне допустимой погрешности расходомеров) в субботние и воскресные дни, с 19.00 до 6.00 в будние дни, а также в праздничный день 12 июня. Это согласуется с режимом работы дошкольных образовательных учреждений. Исключим в дальнейшем из анализа соответствующие этим периодам времени результаты измерений.

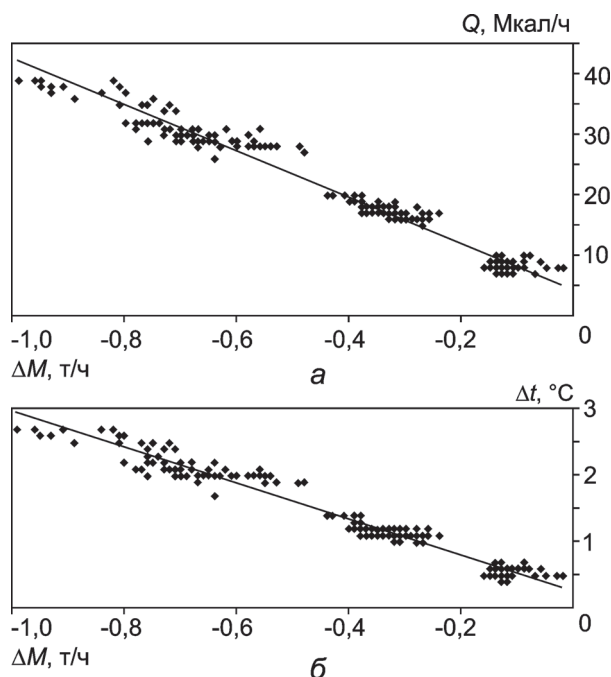


Рис. 4. Распределение среднечасовых значений потребляемой тепловой энергии Q (а) и разности температур Δt (б), а также тренды зависимостей Q от ΔM (а) и Δt от ΔM (б)

На рис. 4, а приведено распределение значений результатов измерений параметров Δt , ΔM , а также тренд регрессионной зависимости Δt от ΔM за анализируемый период времени с 12.06.2012 по 08.07.2012 гг. На рис. 4, б показано распределение значений Q , ΔM и тренд регрессионной зависимости Q от ΔM за этот же период времени. Зависимости Δt от ΔM и Q от ΔM имеют следующий вид:

$$\Delta t = -2,71\Delta M + 0,25; \quad R^2 = 0,967; \quad (3)$$

$$Q = -38,4\Delta M + 4,2 \cdot 10^{-3}; \quad R^2 = 0,973. \quad (4)$$

В приведённых зависимостях единицы измерения тепловой энергии — гигакалории (Гкал), разности температур — градусы Цельсия ($^{\circ}\text{C}$), разности расходов — т/ч. Эти зависимости получены аппроксимацией оставшихся после описанного выше исключения среднечасовых значений Q , ΔM , Δt объекта. Значения R^2 коэффициента Пирсона, близкие к 1, свидетельствуют о высокой достоверности регрессионных зависимостей.

В (3) коэффициент при ΔM определяет скорость изменения разности температур Δt , а в (4) — скорость изменения теплопотребления Q от перетока. Свободный член даёт значение Δt или Q соответственно при отсутствии перетока. При повышении перетока на каждые 0,1 т увеличивается разность температур Δt на $0,271^{\circ}\text{C}$ и, как следствие, теплопотребление Q повышается на $38,4 \cdot 10^{-3}$. Максимальное среднечасовое значение перетока (максимальное по модулю значение ΔM) на анализируемой выборке, с учётом отфильтрованных значений, равно 1,02 т ($\Delta M = -1,02$ т/ч). Подставив найденное ΔM в (4), получим $Q = 42,6 \cdot 10^{-3}$ Гкал. Следовательно, из-за перетока холодной воды измеренное теплопотребление объекта на анализируемом интервале времени повышается с $4,2 \cdot 10^{-3}$ Гкал (при $\Delta M = 0$) до $Q = 42,6 \cdot 10^{-3}$ Гкал (при $\Delta M = -1,02$ т/час), т. е. приблизительно в 10 раз. Такие измерения теплопотребления нельзя признать адекватными.

На графике изменения Q (см. рис. 2) отмечено (завышенное по сравнению с фактическим) среднечасовое теплопотребление объекта $Q_{\text{ср}} = 17,6 \cdot 10^{-3}$ Гкал. Попробуем повысить адекватность теплопотребления, используя полученные результаты измерений. Предварительно учтём, что переток холодной воды не может увеличить теплопотребление, а температура и расход теплоносителя за рассматриваемый (летний, межотопительный) интервал времени относительно стабильны. Именно от этих параметров напрямую зависит теплопотребление. С учётом отмеченного выше логично предположить, что среднечасовое теплопотребле-

ние объекта относительно постоянно и приближенно определяется значением свободного члена из (4), т. е. равно $4,2 \cdot 10^{-3}$ Гкал. Сравним его с $Q_{\text{ср}} = 17,6 \cdot 10^{-3}$ Гкал, отметим более чем четырёхкратное превышение измеренного теплопотребления (по сравнению с полученным с помощью регрессионной модели теплопотреблением).

Закключение. На примере реального объекта показано, что переток воды из СХВ в систему отопления может сделать абсолютно неприемлемым непосредственное использование результатов измерений для оплаты потребления горячей воды и тепловой энергии. Показаны возможности повышения адекватности результатов измерений в отопительный период, в течение которого происходят значительные изменения температуры теплоносителя t_n (в соответствии с температурой наружного воздуха), а также расхода теплоносителя M_n . Исследование влияния перетока на адекватность результатов измерений теплопотребления с учётом межотопительного периода является гораздо более сложной и интересной для практики задачей. Для её решения необходимо усложнять регрессионную модель объекта, вводя в неё помимо ΔM переменные t_n , M_n .

Л и т е р а т у р а

1. Чипулис В. П. Оценка достоверности результатов измерений в теплоэнергетике // Измерительная техника. 2005. № 5. С. 53—58.
2. Чипулис В. П. О достоверности и допустимости результатов измерений в задачах учёта теплоты // Коммерческий учет энергоносителей: Материалы 15-й Междунар. науч.-практ. конф. 2002. С. 138—141.
3. Глухов А. П., Канев С. Н. Анализ и пути решения проблем, возникающих при эксплуатации узлов учёта тепла // Коммерческий учёт теплоносителей: Материалы 13-й Междунар. конф. 2001. С. 210—219.
4. Чипулис В. П., Кузнецов Р. С. Использование регрессионных моделей в информационно-аналитических системах объектов теплоэнергетики // Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях (АИТА-2011): Труды Междунар. науч.-практ. конф. М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2011. С. 400—406.
5. Kuznetsov R., Chipulis V. Regression Analysis in Energy Systems // Advanced Materials Research. Materials, Mechatronics and Automation II. 2013. V. 740, P. 772—777.

Дата принятия 01.07.2015 г.