

УДК 621.1: 532.5

**АНАЛИЗ РАССОГЛАСОВАНИЯ ВЕЛИЧИН
СУММАРНОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ
ЖИЛЬЦАМИ МНОГОКВАРТИРНОГО ДОМА
ПРИ ЕГО КОММЕРЧЕСКОМ УЧЕТЕ ПО ПОКАЗАНИЯМ
ИНДИВИДУАЛЬНЫХ И ОБЩЕДОМОВЫХ ПРИБОРОВ
ПУТЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

В.Г. Зезин, А.И. Новиков

Разработана стохастическая математическая модель и проведено имитационное моделирование потребления горячей воды жильцами многоквартирного дома. Проведен анализ факторов влияющих на погрешность определения суммарного потребления горячей воды по индивидуальным водосчетчикам и общедомовым приборам учета.

Ключевые слова: коммерческий учет, система ГВС, погрешность измерения, имитационное моделирование.

Неравномерность водопотребления в течение суток и недели может явиться причиной значительных расхождений в величинах суммарного водопотребления, определенных по индивидуальным водосчетчикам и по общедомовым приборам, так как погрешность измерений обычно возрастает при уменьшении расхода относительно эксплуатационного значения измерительного прибора. Зависимость погрешности измерения от расхода теплоносителя, как правило, нелинейная, поэтому определить предельные значения указанных выше расхождений, основываясь на средних значениях потребления горячей воды (ГВ), невозможно. Для корректных оценок необходимо иметь конкретную реализацию расхода ГВ, как в системе, так и у каждого потребителя по времени. Эти зависимости расхода и будем получать, используя методологию имитационного моделирования.

Смоделируем потребление ГВ каждым жильцом дома в течение суток $M_{li}(t)$ и суммарное суточное потребление $M(t) = \sum_{i=1}^N M_{li}(t)$, где N – общее количество жильцов дома, t – текущее время суток. Зная метрологические характеристики индивидуальных водосчетчиков и общедомового расходомера, можем найти предел абсолютной и относительной погрешности определения суммарного потребления ГВ $M(t)$ в случаях учета суммарного потребления горячей воды по общедомовым и индивидуальным приборам.

Рассмотрим определение предела погрешности $M(t)$ в случае учета расхода по индивидуальным приборам.

Текущее водопотребление $M_{1i}(t)$ представляет собой интеграл от мгновенных значений расхода $G_{1i}(t)$ потребляемой i -ым жильцом горячей воды:

$$M_{1i}(t) = \int_0^t G_{1i}(t) dt. \quad (1)$$

Разбив область интегрирования $[0, t]$ на интервалы t_j , в пределах которых расход $G_{1i}(t_j)$ остается приблизительно постоянным, вместо (1) получим:

$$M_{1i}(t) = \sum_j G_{1i}(t_j) t_j = \sum_j M_{1i}(t_j), \quad (2)$$

где $M_{1i}(t_j)$ – потребление ГВ i -ым жильцом на временном интервале t_j .

Максимальную оценку $\Delta M_{1i}(t)$ предела абсолютной погрешности определения потребленной ГВ i -ым жильцом на момент времени t найдем, считая, что погрешность каждого водосчетчика представляет собой неисключаемую систематическую погрешность:

$$\Delta M_{1i}(t) = \sum_j \Delta M_{1i}(t_j) = \sum_j M_{1i}(t_j) \delta_{M_{1i}} [G_{1i}(t_j)]. \quad (3)$$

где $\delta_{M_{1i}} [G_{1i}(t_j)]$ – предел относительной погрешности водосчетчика при расходе $G_{1i}(t_j)$ (находится по документации на водосчетчик).

Погрешности водосчетчиков можно считать независимыми случайными величинами, следовательно, независимыми случайными величинами будут и $\Delta M_{1i}(t)$. Тогда предел абсолютной погрешности определения суммарного водопотребления всеми жильцами дома по индивидуальным приборам на момент времени t найдется, как:

$$\Delta M(t) = \left[\sum_{i=1}^N \Delta M_{1i}^2(t) \right]^{0,5}, \quad (4)$$

а предел относительной погрешности, как:

$$\delta M(t) = \frac{\Delta M(t)}{M(t)}. \quad (5)$$

Рассмотрим определение предела погрешности $M(t)$ в случае учета расхода по общедомовым приборам. Если система ГВС закрытая или открытая без рециркуляции, тогда для измерения потребления горячей воды применяется один расходомер. В этом случае, считая что случайная составляющая погрешности мала по сравнению с неисключаемой систематической, предел абсолютной погрешности находим по формуле:

$$\Delta M(t) = \sum_j G(t_j) t_j \delta[G(t_j)], \quad (6)$$

где $\delta_G[G(t_j)]$ – предел относительной погрешности расходомера при расходе $G(t_j) = \sum_{i=1}^N G_{li}(t_j)$, равном суммарному расходу горячей воды на интервале времени t_j .

Для определения относительной погрешности используется формула (5).

Если система ГВС открытая с рециркуляцией, то в соответствии с [0] в данном случае должен измеряться расход воды в подающем и рециркуляционном трубопроводе системы ГВС, а расход потребленной ГВ определяется, как разность показаний данных расходомеров.

Тогда суммарное потребление ГВ в момент времени t_k найдется, как:

$$M(t_k) = \sum_{j=1}^k [G_{\text{п}}(t_j) - G_{\text{р}}(t_j)] t_j = \sum_{j=1}^k G_{\text{п}}(t_j) t_j - \sum_{j=1}^k G_{\text{р}}(t_j) t_j, \quad (7)$$

где $G_{\text{п}}(t_j)$, $G_{\text{р}}(t_j)$ – расходы теплоносителя в подающем и рециркуляционном трубопроводе соответственно, которые зависят от доли рециркуляционного расхода при отсутствии водоразбора $k_{\text{р}} = G_{\text{р}}^{\text{max}} / G_{\text{расч}}$ ($G_{\text{расч}}$ – максимальное расчетное секундное потребление ГВ).

Используя общее выражение для определения погрешности при косвенных измерениях [2], из (7) для абсолютной погрешности определения суммарного водопотребления получим:

$$\Delta M(t) = \sqrt{\left(\sum_j G_{\text{п}}(t_j) t_j \delta_{G_{\text{п}}}(t_j) \right)^2 + \left(\sum_j G_{\text{р}}(t_j) t_j \delta_{G_{\text{р}}}(t_j) \right)^2}, \quad (8)$$

где $\delta_{G_{\text{п}}}(t_j)$, $\delta_{G_{\text{р}}}(t_j)$ – относительная погрешность расходомеров, установленных на подающем и рециркуляционном трубопроводе, на временном интервале t_j , то есть при расходах $G_{\text{п}}(t_j)$ и $G_{\text{р}}(t_j)$ соответственно (находятся по документации на расходомеры).

Относительная погрешность определения $M(t)$ также как и в предыдущем случае находится по формуле (5).

Таким образом, если известно распределение потребления горячей воды каждым жильцом дома в течение суток $G_1(t_j)$, то погрешность определения потребленной ГВ по индивидуальным и общедомовым приборам учета может быть найдена по приведенным выше соотношениям и, следо-

вательно, оценено возможное расхождение определения суммарного потребления ГВ с использованием индивидуальных и общедомовых приборов учета.

В данной работе будем полагать, что $G_1(t_j)$ являются некоррелированными случайными величинами, моделирование которых выполним исходя из того, что периодичность потребления ГВ, при условии нахождения потребителя в квартире и его бодрствования подчиняется пуассоновскому потоку событий [3], а величина расхода ГВ, устанавливаемая потребителем, подчиняется нормально-логарифмическому закону распределения [4]. Тогда функция распределения случайной величины $G_1(t_j)$ запишется, как:

$$F_{G_1}(t_j, g_1) = \begin{cases} 1 - P_{п/б} (1 - e^{-\lambda t_j}), & g_1 = 0, \\ \frac{P_{п/б} (1 - e^{-\lambda t_j})}{\sqrt{2\pi}\sigma(t_j)} \int_0^{g_1} e^{-\frac{(x-\mu(t_j))^2}{2\sigma(t_j)^2}} dx, & g_1 > 0, \end{cases} \quad (9)$$

где g_1 – заданная величина расхода ГВ, потребляемой индивидуальным потребителем; $P_{п/б}$ – вероятность одновременного наступления событий присутствия пользователя в квартире и его бодрствования; λ – интенсивность потока событий потребления ГВ; $\sigma(t_j), \mu(t_j)$ – параметры логнормального распределения.

С использованием представленной математической модели проведено имитационное моделирование потребления ГВ жильцами типового 9 этажного дома, имеющего 72 квартиры. Предполагалось, что в каждой квартире проживают по три человека и установлен один счетчик горячей воды. Рассматривалось четыре типа различных потребителей: допенсионного возраста с дневным режимом работы; допенсионного возраста с вечерним режимом работы; допенсионного возраста с ночным режимом работы; пенсионного и детского дошкольного возраста. Параметры математической модели оценивались экспертно и при расчетах приняты равными: $\lambda = 2...3$ 1/ч для периода бодрствования и $\lambda = 0,05$ 1/ч для остального времени суток; мода логнормального распределения $g_{1\text{ mod}} = 40...80$ л/ч; предельное отклонение расхода для вероятности $\gamma = 0,95$ $g_{1\gamma} = 400...600$ л/ч. Распределение вероятности присутствия потребителя в квартире и его бодрствования приведено на рис. 1. В качестве индивидуальных приборов учета приняты водосчетчики СГВ [8], общедомовых – расходомеры ВЗЛЕТ [9, 10] и ВСТ [11]. Принято, что 70 % от общего количества жильцов – люди трудоспособного возраста, из них по 5 % работают в вечернюю

и ночную смену. При расчетах моделировалось потребление ГВ в течение 30 суток (в течение месяца). Из них 8 суток считались выходными, а остальные – рабочими. Рассмотрено три уровня интенсивности потребления: «высокий» (со средним расходом ~ 140 л/сутки на человека); «нормальный», (со средним расходом ~ 110 л/сутки на человека); «экономный», (со средним расходом ~ 80 л/сутки на человека).

Данные режимы потребления создавались варьированием параметров логнормального распределения расхода ГВ $g_{1\text{mod}}$, $g_{1\gamma=0,95}$ и интенсивностью потока событий Пуассона λ в указанных выше пределах.

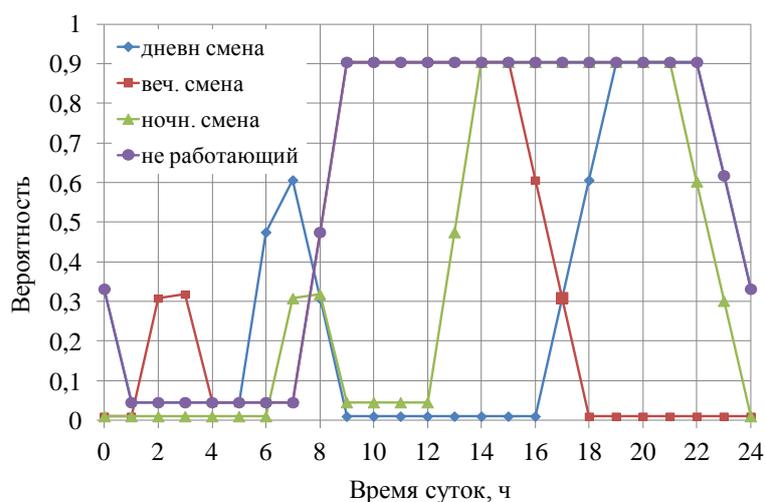


Рис. 1. Вероятность присутствия и бодрствования потребителя ГВ

Для генерирования случайных чисел с законом распределения (9) использовалось базовое – равномерное на интервале [0, 1] распределение, которое подвергалось преобразованию с целью получения желаемого распределения случайной величины [6]. Для моделирования логнормального распределения применялось преобразование Бокса-Мюллера [7].

При моделировании сутки разбивались на временные интервалы длительностью $t_j = 0,05$ ч. Приводимые ниже результаты расчетов представляют собой среднеарифметическое значение соответствующих величин при десятикратном моделировании месячного потребления ГВ. В качестве базового варианта для расчетов принято оснащение квартир водосчетчиками $D_y = 15$ мм, коэффициент рециркуляции системы ГВС $k_p = 0,3$, расходомер на подающем трубопроводе системы ГВС электромагнитный с диаметром условного прохода $D_y = 25$ мм, на рециркуляционном – $D_y = 20$ мм, режим потребления ГВ – «нормальный».

Пример изменения расхода по времени рабочих суток, полученного в результате моделирования, для ряда квартир в базовом варианте расчета показан на рис. 2, а общедомового – на рис. 3.

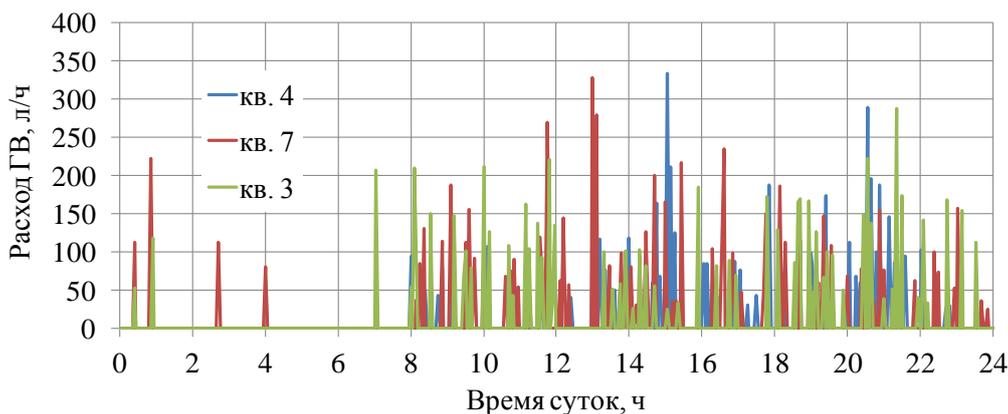


Рис. 2. Изменение по времени рабочих суток поквартирного расхода ГВ

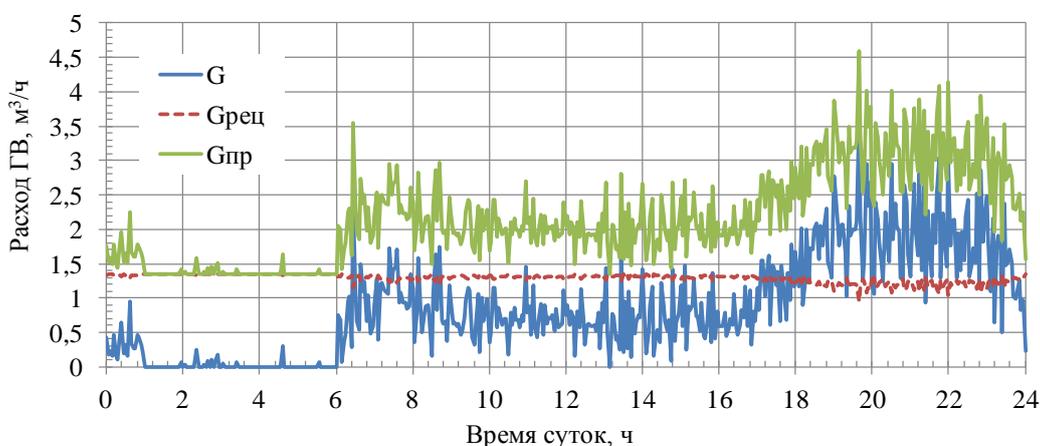


Рис. 3. Изменение по времени суток общедомового расхода ГВ

Погрешность определения месячного общедомового потребления теплоносителя в базовом варианте расчета составила:

- 0,38 % – при учете по индивидуальным водосчетчикам;
- 1,09 % – при учете по общедомовому расходомеру в открытой системе ГВС без рециркуляции (или в закрытой систем ГВС);
- 2,7 % – при учете по общедомовым расходомерам в открытой системе ГВС с рециркуляцией.

Как видим, погрешность определения общедомового потребления ГВ при учете по индивидуальным водосчетчикам оказывается существенно ниже, чем погрешность при учете водопотребления по общедомовым приборам. Это результат, кажущийся, на первый взгляд, противоречивым (ведь погрешность индивидуальных водосчетчиков в несколько раз выше погрешности электромагнитного расходомера), имеет естественное объяснение: происходит взаимная компенсация отклонений при суммировании результатов измерений, если они представляют собой независимые случайные величины. Действительно, мы суммируем близкие по абсолютному

значению величины M_i , погрешности которых ΔM_i также близки. В пределе, когда сами величины и их погрешности одинаковы, можем записать:

$$\delta M_{\Sigma} = \frac{\Delta M_{\Sigma}}{M_{\Sigma}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta M_i^2}}{\sum_{i=1}^N M_i} = \frac{\sqrt{N} \Delta M_i}{N M_i} = \frac{1}{\sqrt{N}} \frac{\Delta M_i}{M_i} = \frac{1}{\sqrt{N}} \delta M_i. \quad (10)$$

Из (10) видно, что относительная погрешность определения суммарного домового водопотребления при его учете по индивидуальным водосчетчикам убывает приблизительно обратно пропорционально корню квадратному из количества квартир дома.

Как следует из формул (3) и (4) на величину погрешности определения общедомового потребления ГВ при известном режиме потребления оказывают влияние: метрологические характеристики водосчетчиков и расходомеров, которые для выбранного типа приборов зависят от диаметра условного прохода; коэффициент рециркуляции (для открытой системы ГВС с рециркуляцией).

Зависимость погрешности определения массы ГВ, потребленной жильцами дома за месяц, по общедомовым расходомерам от этих параметров показана на рис. 4. Для системы с рециркуляцией диаметр условного прохода на рисунке обозначен дробью: в числителе приведен диаметр расходомера, установленного на подающем трубопроводе, в знаменателе – на рециркуляционном.

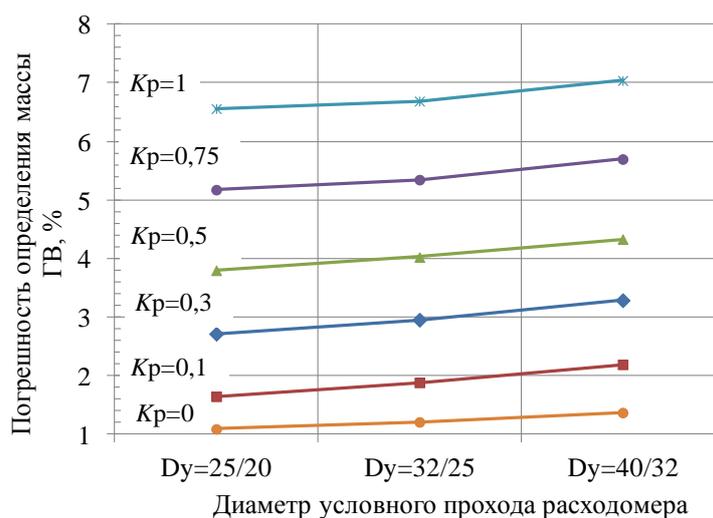


Рис. 4. Зависимость погрешности определения потребленной массы теплоносителя по общедомовым расходомерам от диаметра их условного прохода и коэффициента рециркуляции

Из рисунка видно, что погрешность практически линейно возрастает при увеличении коэффициента рециркуляции. Увеличение погрешности столь существенно, что в системах со 100 % рециркуляцией теплоносителя в рассмотренной системе ГВС уменьшить погрешность определения потребленной массы ГВ при ее учете по общедомовым приборам ниже $\sim \pm 6\%$ практически невозможно. Причиной этого роста погрешности при увеличении коэффициента рециркуляции является сам метод измерения: расход ГВС находится, как разность расходов в подающем и рециркуляционном трубопроводах. Чем меньше разность этих расходов, тем выше погрешность, что следует из формулы (8).

Из приведенных данных также следует, что установка в узле учета расходомеров «с запасом» по расходу может привести к заметному увеличению погрешности определения массы потребленного теплоносителя. Так при увеличении диаметра условного прохода на два калибра погрешность возрастает в системе ГВС без рециркуляции на $\sim 0,3\%$, в системе ГВС с рециркуляцией – на $\sim 0,5\%$. Переразмеривание индивидуальных водосчетчиков в меньшей степени сказывается на погрешности в силу действия закономерности (10), однако при малом количестве приборов учета увеличение погрешности может быть заметным.

Результаты моделирования также показывают, что применение расходомеров с более низкими метрологическими характеристиками, чем характеристики электромагнитных расходомеров, например тахометрических, приводит к увеличению погрешности приблизительно пропорционально инструментальной погрешности приборов.

В целом анализ полученных результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы:

1. При 100 % оснащении потребителей водосчетчиками и достаточно большом количестве индивидуальных приборов учета (более $\sim 30 \dots 50$) метод определения общедомового потребления горячей воды путем суммирования показаний индивидуальных приборов учета дает меньшую погрешность, чем при использовании для этой цели показаний общедомового расходомера. Оценка погрешности данного метода может быть выполнена по формуле:

$$\delta M = \frac{\delta_{\max} + \delta_{\min}}{2\sqrt{N}}, \quad (11)$$

где δ_{\min} – относительная погрешность водосчетчика в диапазоне расходов от G_t до G_{\max} ; δ_{\max} – относительная погрешность водосчетчика в диапазоне расходов G_{\min} до G_t ; N – общее количество водосчетчиков, по которым ведется учет потребления ГВ в доме.

2. Минимальная относительная погрешность, которую можно достичь при определении потребленной массы теплоносителя с использованием общедомовых расходомеров, имеющих метрологические характеристики на уровне характеристик ВЗЛЕТ ЭР, составляет $\sim 1 \dots 1,5$ %. Применение расходомеров с более высокими или низкими метрологическими характеристиками изменяет погрешности приблизительно пропорционально пределу основной допускаемой относительной погрешности прибора. Так, например, использование в узле учета тахометрических расходомеров вместо электромагнитных увеличивает погрешность определения потребленной массы теплоносителя в ~ 2 раза.

3. При установке у конечных потребителей водосчетчиков с необоснованно завышенным верхним пределом измерения высок риск появления в их показаниях систематической погрешности, занижающей результаты учета относительно фактических значений потребления горячей воды (по оценкам до $\sim 1,5$ %). Появление отрицательной систематической погрешности наиболее вероятно при экономных режимах потребления, особенно, когда потребитель намеренно стремится поддерживать режим потребления с минимальными расходами, приближающимися к порогу чувствительности.

4. Переразмеривание общедомовых расходомеров также приводит к увеличению погрешности определения месячного потребления ГВ. Степень увеличения погрешности зависит от степени переразмеривания и от типа расходомера. Так установка электромагнитных расходомеров с диаметром условного прохода на два калибра больше, чем требуется по величине максимального эксплуатационного расхода, увеличивает относительную погрешность лишь на $0,3 \dots 0,5$ %, а установка расходомера ВСТ с $D_y = 50$ мм вместо $D_y = 32$ мм приведет к увеличению относительной погрешности на $5 \dots 10$ % в зависимости от типа системы ГВС.

5. Очень сильно на погрешность определения потребленной массы горячей воды сказывается величина коэффициента рециркуляции. С увеличением коэффициента рециркуляции погрешность возрастает. При рециркуляции 10% теплоносителя от расчетного расхода погрешность измерения массы потребленного теплоносителя, например, электромагнитными расходомерами составляет $\sim \pm 1,5$ %. При 100 % рециркуляции измерение потребленной массы теплоносителя с погрешностью менее ± 6 % невозможно.

Корректно составленная схема и выбранные средства измерений обеспечат практически равноточное (с расхождением менее 1 %) определение массы потребленного теплоносителя ГВС как путем суммирования показаний индивидуальных водосчетчиков, так и по общедомовым приборам учета.

Библиографический список

1. Методика осуществления коммерческого учета тепловой энергии, теплоносителя – утверждена министром строительства и ЖКХ М.А. Миньком приказом от 17.02.14 № 99 пр.
2. Новицкий, П.Ф. Оценивание погрешностей результатов измерений / П.Ф. Новицкий, И.А. Зограф. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 304 с.
3. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
4. Айвазян, С.А. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное издание / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
5. Разработка правил построения схем измерительных систем в узлах коммерческого учета применительно к системам тепловодоснабжения: отчет о НИР / ЮУрГУ; исполн. Зезин В. Г., Новиков А.И. – Миасс, 2014. – 174 с. Библиогр. с. 140. – Инв. № 10/14.
6. Бобков, С.П. Моделирование систем: учебн. пособие / С.П. Бобков, Д.О. Бытеев; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2008. – 156 с.
7. Vox, G.E.P. A note on the generation of random normal deviates // Annals of mathematical statistics. – 1958. – 29, № 2. – Pp. 610–611.
8. Счетчики холодной и горячей воды СХВ, СГВ: паспорт ПДЕК. 407223.002 ПС – ООО ПФК «БЕТАР», 2012.
9. Расходомер-счетчик электромагнитный ВЗЛЕТ ЭР: паспорт – ЗАО «Взлет», 2008.
10. Расходомер-счетчик электромагнитный ВЗЛЕТ ЭР исполнения ЭРСВ-4××(5××)Л, ЭРСВ-4××(5××)Ф: инструкция по монтажу В41.30-00.00 ИМ – ЗАО «Взлет», 2008.
11. Счетчики холодной и горячей воды ВСХ, ВСХд, ВСГ, ВСГд, ВСТ: руководство по эксплуатации РЭ 4213-200-18151455-2001 – ТТФ «Современные приборы» [Электронный ресурс]. – URL: www.sovpribor.ru.

[К содержанию](#)