УДК 53.088:621.317:628.171

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО СЧЕТЧИКА РАСХОДА ВОДЫ ПРИ ЕЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В ЗАМКНУТОМ КОНТУРЕ

Левцев А.П., Макеев А.Н., Макеев Н.Ф., Рогачёв М.П., Широв М.С.
ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», Саранск, e-mail: dep-general@adm.mrsu.ru

В статье рассматривается вопрос оценки погрешности механического счетчика расхода жидкости в случае её импульсной циркуляции в замкнутом контуре. Актуальность вопроса продиктована необходимостью сопоставления эффективности работы теплоэнергетического оборудования в стационарном и импульсном режимах циркуляции теплоносителя. Приведены факты, указывающие на то, что стандартные средства измерения расхода жидкости в случае ее пульсирующей циркуляции не способны к адекватной оценке. Представлены результаты поиска нестандартных средств и методов оценки расхода жидкости в случае её пульсирующей циркуляции в замкнутом контуре. На примере лабораторного стенда описан процесс измерения расхода жидкости в замкнутом контуре оригинальным методом, на основе которого произведена оценка погрешности механического счетчика расхода воды при ее пульсирующей циркуляции в замкнутом контуре.

Ключевые слова: система теплоснабжения, располагаемый напор, стационарный и импульсный режимы циркуляции теплоносителя, коэффициент теплопередачи, расход жидкости

TO QUESTION OF MEASURING OF EXPENSE OF LIQUID WITH PULSATING CIRCULATION IN THE RESERVED CONTOUR

Levtsev A.P., Makeev A.N., Makeev N.F., Rogacheov M.P., Shirov M.S.
Mordovsky the State University of N.P. Ogareov, Saransk, e-mail: dep-general@adm.mrsu.ru

The article discusses the error estimates for mechanical liquid flow meter in the case of her pulse circulating in a closed circuit. The urgency of the matter is dictated by the need to matching the efficiency of thermal power equipment in stationary and pulsed modes of circulation of the coolant. Results are indications that the standard flow rate measuring means in the case of pulsatile circulation are not capable of adequate evaluation. It presents the results of non-standard means and the fluid flow estimation techniques in the case of its pulsating circulation in a closed circuit. In the example described laboratory bench measuring process fluid flow in a closed circuit by the original, based on which the estimation error of the mechanical water meter at its pulsating circulation in a closed circuit.

Keywords: system of heat supply, the located pressure, stationary and impulse modes of circulation of the heat carrier, heat transfer coefficient, expense of liquid

Анализ текущего состояния в сфере обеспечения потребителей теплом свидетельствует о том, что традиционная система теплоснабжения не отвечает требованиям сегодняшнего дня в части обеспечения ее эффективности на заданном уровне по времени эксплуатации. Это обусловлено тем, что стабильное движение теплоносителя, которое является основой для проектирования элементов таких систем теплоснабжения, в то же время губительно сказывается на состоянии трубопроводов и других элементов системы, поскольку способствует образованию отложений и накипи, которые не только ухудшают теплопередачу, но и отрицательно влияют на гидравлику. Сужение проходного сечения канала для истечения теплоносителя приводит к гидравлической разбалансировке самой системы теплоснабжения. Чтобы преодолеть это возросшее гидравлическое сопротивление, приходится поддерживать избыточный располагаемый напор [1]. В свою очередь, это снижает сроки эксплуатации оборудования системы и приводит к авариям и разрыву трубопроводов на фоне повышенных затрат электроэнергии, потребляемой насосами [5].

Выходом из сложившейся ситуации может служить переход на импульсный режим циркуляции теплоносителя [10], при котором реализуется эффект самоочищения на фоне интенсификации процесса теплопередачи [2] и открываются возможности для трансформации напора из одного контура в другие [3].

В указанных работах количество теплоты, воспринятое теплоэнергетическим оборудованием в случае стационарного и импульсного режимов подачи через него теплоносителя, определяется по уравнению

$$Q_x = G_x c_x \left(t_x'' - t_x'\right),$$

где Q_x – количество теплоты, воспринятое нагреваемой средой теплообменника, кДж; $G_x = G_{x0} + \overline{G}_x$ – сумма постоянной составляющей и отклонения массового расхода

нагреваемого теплоносителя, кг/с; c_x – теплоемкость холодного (нагреваемого) теплоносителя, кДж/(кг·К); t'_x – температура нагреваемого теплоносителя на входе в теплообменник, °С; t''_x – температура нагреваемого теплоносителя на выходе из теплообменника, °С.

Таким образом, задача сопоставления эффективности стационарного и импульсного режимов сводится к оценке отклонения расхода через, например, исследуемый теплообменник.

Целью научного исследования являлось получение оценки погрешности механического счетчика расхода в контуре с пульсирующей циркуляцией жидкости с применением метода замещения объемов. В процессе достижения цели были решены следующие задачи:

– анализ традиционных средств измерения расхода жидкости применительно к ее пульсирующей циркуляции;

– изыскание возможного технического решения для адекватной оценки пульсирующего расхода жидкости;

– экспериментальная оценка погрешности механического счетчика расхода воды при ее пульсирующей циркуляции в замкнутом контуре;

– выработка рекомендаций по практическому применению полученных теоретических и экспериментальных данных.

Материалы и методы исследования

Работа выполнялась на базе учебно-научной лаборатории «Импульсные системы тепло- и водоснабжения» ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н.П. Огарёва». В ходе ее выполнения были задействованы следующие научные методы исследования:

– анализ имеющихся к проведению научного эксперимента информации, средств и условий;

– синтез технического решения для адекватного измерения пульсирующего расхода жидкости;

– планирование эксперимента для оценки погрешности механического счетчика расхода воды в случае ее пульсирующей циркуляции в замкнутом контуре;

– статистический метод обработки экспериментальных данных;

– индукция полученных теоретических и экспериментальных данных применительно к поставленным задачам исследования.

Результаты исследования и их обсуждение

В случае со стационарной подачей теплоносителя, когда он в сечении ограничивающей его поверхности истекает относительно равномерно, для измерения его расхода можно прибегнуть к наиболее распространенным средствам, используя механические счетчики и электронные расходомеры (рис. 1).

Однако в случае нестационарной импульсной или пульсирующей циркуляции теплоносителя использовать показания расходомеров и всякого рода счетчиков для адекватной оценки не представляется возможным. Дело в том, что эти средства измерения расхода являются достаточно инерционными и дают значительную погрешность. Величину данной погрешности можно оценить на основании расхождения показаний стандартных средств измерения и фактического расхода импульсно-движущегося потока, сливаемого в мерное ведро за единицу времени [4].

В некоторых гидравлических схемах реализации импульсного и пульсирующего режимов движения жидкости использование метода прямого слива в мерное ведро для последующей оценки расхода пульсирующего потока также не представляется возможным. На рис. 2 приведено такое техническое решение, в основе которого используется принцип гидравлического тарана [9].

а б

Рис. 1. Стандартные средства измерения расхода жидкости: а – механический счетчик; б – электронный расходомер

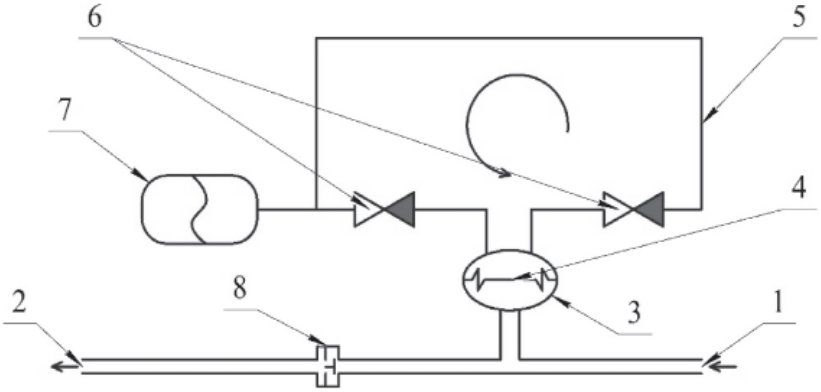


Рис. 2. Схема замкнутого контура с пульсирующей циркуляцией жидкости: 1, 2 – вход и выход жидкости в трубопровод импульсной подачи жидкости; 3 – импульсный нагнетатель; 4 – диафрагма; 5 – замкнутый контур пульсирующей циркуляции жидкости; 6 – обратные клапаны; 7 – гидроаккумулятор; 8 – ударный узел

Схема работает следующим образом. При подаче жидкости на вход 1 трубопровода импульсной циркуляции она поступает в ударный узел 8 [7], который автоматически закрывает и открывает проходное сечение этого трубопровода при движении жидкости из него к выходу 2. Генерируемые импульсы количества движения жидкости в трубопроводе её импульсной подачи обеспечивают возвратно-поступательное движение диафрагмы 4 импульсного нагнетателя 3, которое посредством системы обратных клапанов 6 и гидроаккумулятора 7 преобразуется в пульсирующую циркуляцию жидкости по замкнутому контуру 5 [6, 10].

Очевидно, что в представленной схеме оценка пульсирующего расхода жидкости затруднена. Прежде всего, это вызвано следующими обстоятельствами:

1. Стандартные средства измерения расхода (вследствие их инерционности) не способны к адекватной оценке расхода потока жидкости, движущегося в импульсном, а также в пульсирующем режиме.

2. Любое изменение избыточного давления в контуре с пульсирующей циркуляцией жидкости 5 приводит к смещению положения диафрагмы 4 импульсного нагнетателя 3 и, соответственно, мгновенно влияет на расход жидкости в этом контуре. Поэтому метод измерения расхода пульсирующей жидкости путем её прямого слива в мерное ведро не применим.

Одним из возможных решений данной задачи может служить следующее. В замкнутый контур пульсирующей циркуляции жидкости последовательно с расходомером или счетчиком воды (рис. 1) устанавливается полая емкость, гидравлически разделенная подвижной перегородкой на две части (рис. 3).

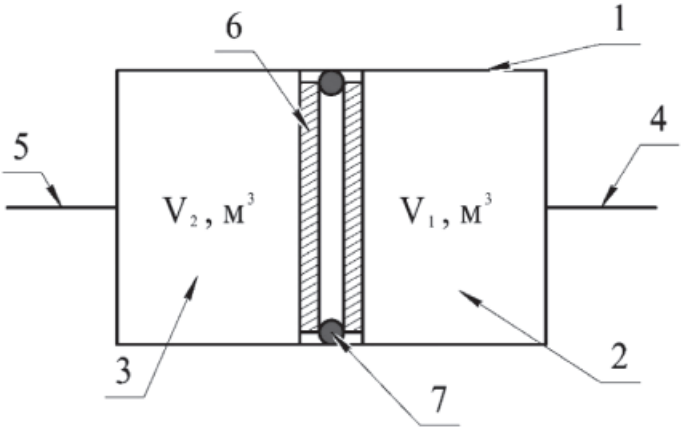


Рис. 3. Устройство для измерения расхода с подвижной перегородкой: 1 – полый корпус; 2 – первая полость; 3 – вторая полость; 4 – вход (выход) первой полости; 5 – вход (выход) второй полости; 6 – подвижная перегородка; 7 – уплотнение

Объем первой V_1 и второй V_2 полостей, где $V_1 + V_2 = V$, следует определить предварительно до включения измерительного устройства в контур 5 пульсирующей циркуляции жидкости (рис. 2). Сопоставление этого заблаговременно определенного объема V, вытесняемого за промежуток времени (условия для определения которого приведены ниже) при перемещении подвижной перегородки из крайнего левого положения в правое, со значениями расхода жидкости, определенного по показанию традиционных средств измерения, позволит определить величину поправки.

Промежуток времени, за который производится вытеснение объема из одной полости V_1 в другую V_2, отсчитывается с начала запуска пульсирующей циркуляции в замкнутом контуре до момента, когда показания расходомера, при работе системы, представленной на рис. 2, перестанут изменяться (в случае использования механического расходомера) или станут равны нулю (электронный расходомер). Это событие означает, что циркуляция жидкости в замкнутом контуре прекратилась, поскольку подвижная перегородка, смещенная в свое крайнее положение (противоположное исходному), будет выступать уже в качестве запорной арматуры. Для повторения эксперимента, с целью уточнения поправочного коэффициента, следует развернуть устройство, представленное на рис. 3, на 180° или поменять направление жидкости в контуре с её пульсирующей циркуляцией на противоположное путем переключения обратных клапанов 6.

При этом действительный расход $\vartheta_д$, м^3/с в замкнутом контуре с пульсирующей циркуляцией жидкости будет определяться как

$$\vartheta_д = \frac{V}{t}, \qquad (1)$$

где V – объем жидкости, вмещаемый полым корпусом при нахождении подвижной перегородки в его крайнем положении, м^3; t – время вытеснения объема, с.

В качестве устройства, представленного на рис. 3, возможно использовать гидравлический аккумулятор (рис. 4).

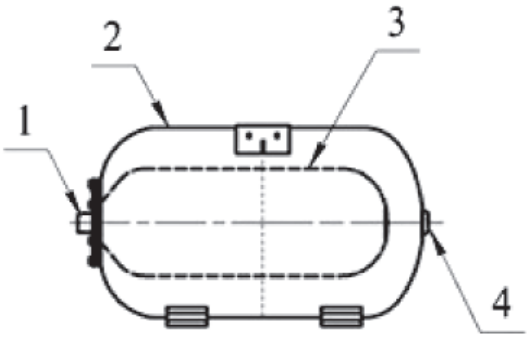
Для этого в его корпусе 2 в месте установки золотника 4 выполнено отверстие под установку дополнительного штуцера аналогично соединительному штуцеру 1.

Внешний вид экспериментальной установки для измерения пульсирующего расхода жидкости в замкнутом контуре, смонтированной в учебно-научной лаборатории «Импульсные системы тепло- и водоснабжения» ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н.П. Огарева», представлен на рис. 5. Контур пульсирующей циркуляции выполнен из PPR-трубы $d_у$ = 20 мм, включает счетчик воды «Taunut» на $d_у$ = 15 мм и обратные клапаны $d_у$ = 15 мм. В трубопроводе импульсной подачи рабочей среды установлен ударный узел $d_у$ = 20 мм оппозитного исполнения [8] и импульсный нагнетатель с диафрагмой ∅ = 70 мм.

Графики пульсаций давлений в контурах импульсной и пульсирующей циркуляции жидкости, подтверждающие работоспособность схемы (рис. 2), представлены на рис. 6.

Заключение

Данные, представленные на графике (рис. 6), свидетельствуют о наличии расхода жидкости в замкнутом контуре с пульсирующей циркуляцией, результат практического измерения которого в сопоставлении с погрешностью механического счетчика воды приведен на рис. 7.



а

б

Рис. 4. Гидравлический аккумулятор:
а – схема гидроаккумулятора; б – внешний вид;
1 – соединительный штуцер; 2 – корпус; 3 – диафрагма; 4 – золотник для подкачки воздуха

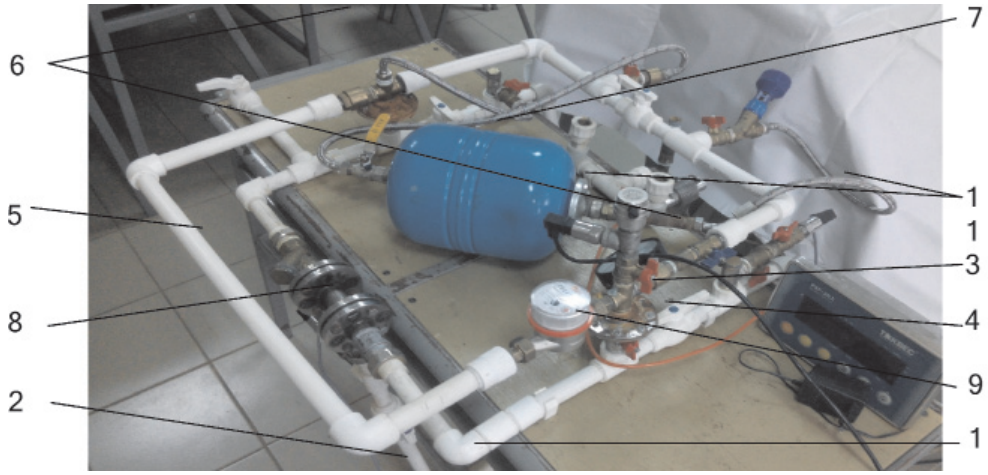


Рис. 5. Внешний вид экспериментальной установки:
1, 2 – вход и выход жидкости в трубопровод импульсной подачи жидкости;
3 – импульсный нагнетатель; 4 – диафрагма; 5 – замкнутый контур пульсирующей циркуляции жидкости; 6 – обратные клапаны; 7 – гидроаккумулятор; 8 – ударный узел;
9 – механический счетчик воды; 10 – преобразователи давления

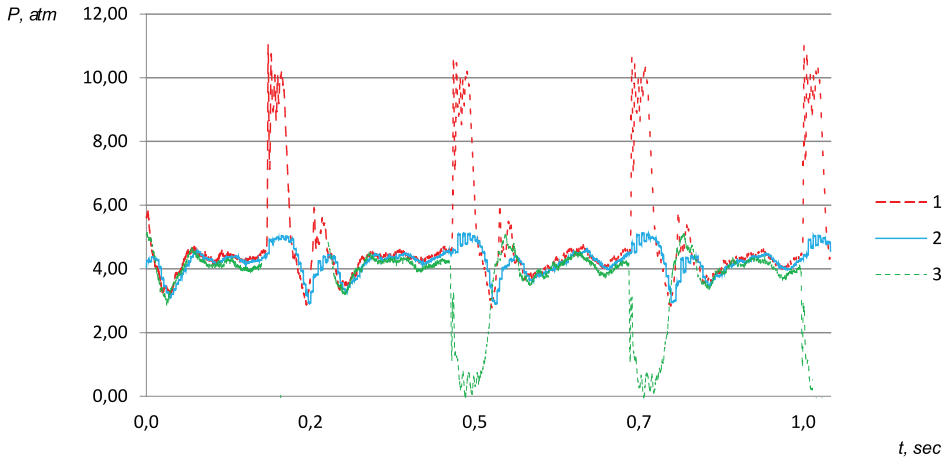


Рис. 6. График изменения давлений:
1 – пульсация давления перед ударным клапаном; 2 – изменение давления в контуре с пульсирующей циркуляцией жидкости; 3 – пульсация давления после ударного клапана

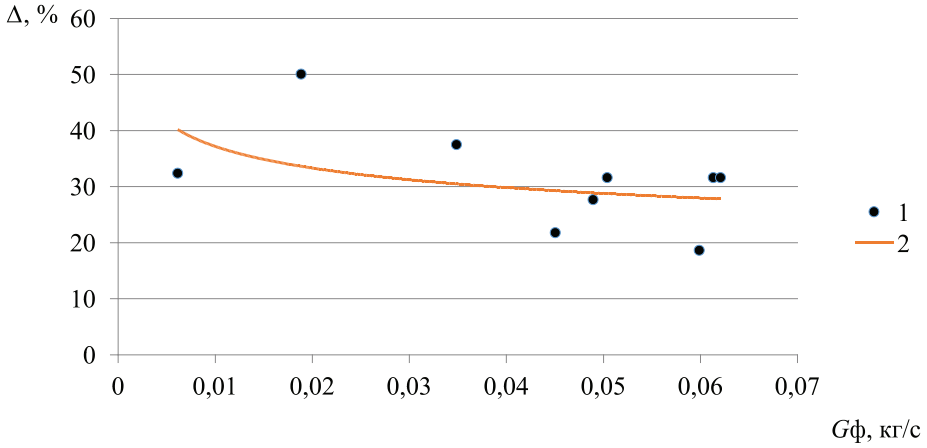


Рис. 7. Результат оценки погрешности механического счетчика воды при ее пульсирующей циркуляции:
1 – результаты практических измерений; 2 – полиномиальная зависимость

Из графика, представленного на рис. 7, видно, что при малых расходах жидкости (до 0,02 кг/с) в контуре с пульсирующей циркуляцией счетчик воды «Taunut» характеризуется наибольшей погрешностью до 50 %. Очевидно, вызвано это тем, что единичный импульс количества движения жидкости раскручивает его крыльчатку, связанную со счетчиком, которая по инерции продолжает вращаться даже при фактическом отсутствии расхода жидкости. При увеличении расхода жидкости в контуре ее пульсирующей циркуляции погрешность счетчика воды снижается до 25 %.

Полученные в ходе решения приведенных выше научных задач теоретические и экспериментальные данные были использованы к разработке технического решения для адекватной оценки расхода жидкости в случае ее пульсирующей циркуляции. Подробное описание работоспособности названного устройства будет отражено в заявке на полезную модель.

Список литературы

1. Левцев А.П. Импульсные системы тепло-, водоснабжения сельскохозяйственных объектов / А.П. Левцев, А.Н. Макеев, С.Ф. Кудашев // Вестн. ФГОУ ВПО «Московский государственный аграрный университет имени В.П. Горячкина». – 2010. – № 2 (41). – С. 91–95.

2. Левцев А.П., Кудашев С.Ф., Макеев А.Н., Лысяков А.И. Влияние импульсного режима течения теплоносителя на коэффициент теплопередачи в пластинчатом теплообменнике системы горячего водоснабжения // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2; URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12664 (дата обращения: 03.02.2016).

3. Левцев А.П., Макеев А.Н., Нарватов Я.А., Голянин А.А. Корректирующий контур с импульсной циркуляцией теплоносителя в составе теплового пункта системы теплоснабжения // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2–1; URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=20925 (дата обращения: 03.02.2016).

4. Макеев А.Н. Импульсная система теплоснабжения общественного здания: автореф. дис. … канд. техн. наук. – Саранск, 2010. – 20 с.

5. Макеев А.Н. Импульсные системы теплоснабжения общественных зданий / А.Н. Макеев, А.П. Левцев // Региональная архитектура и строительство. – 2010. – № 2 (9). – С. 45–51.

6. Пат. 2423650 Российская Федерация, МПК F24D 3/00. Способ теплоснабжения / А.Н. Макеев, А.П. Левцев; заявители и патентообладатели А.Н. Макеев, А.П. Левцев. – № 2010112729/03; заявл. 01.04.2010; опубл. 10.07.2011, Бюл. № 19.

7. Пат. 2484380 Российская Федерация, МПК F24D 3/02. Ударный узел / А.П. Левцев, А.Н. Макеев, С.Ф. Кудашев; заявитель и патентообладатель федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва». – № 2012111639/12; заявл. 26.03.2012; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 16.

8. Пат. 2558740 Российская Федерация, МПК F15B 21/12. Ударный узел / А.П. Левцев, А.Н. Макеев, С.Н. Макеев, С.И. Храмов, С.Ф. Кудашев, А.М. Зюзин, Я.А. Нарватов; заявитель и патентообладатель НОУ «Саранский Дом науки и техники РСНИИОО». – № 2014107201/06; заявл. 25.02.2014; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 22.

9. Пат. 82798 Российская Федерация, МПК F04F 7/02. Таран гидравлический / А.Н. Макеев, А.П. Левцев; заявитель и патентообладатель гос. образоват. учреждение высш. проф. образования «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва». – № 2008150029/22; заявл. 17.12.2008; опубл. 10.05.2009, Бюл. № 13.

10. Пат. 98060 Российская Федерация, МПК F24D 3/00. Система теплоснабжения / А.П. Левцев, А.Н. Макеев, А.М. Зюзин; заявитель и патентообладатель ННОУ «Саранский Дом науки и техники РСНИИОО». – № 2010122249/03; заявл. 31.05.2010; опубл. 27.09.2010, Бюл. № 27.