

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Г.В. Горелова.

**Плаксиенко Елена Анатольевна** – Таганрогский институт управления и экономики; e-mail: pumka@mail.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Розы Люксембург 44, кв. 54,б; тел.: 88634613432; кафедра математики и информатики; к.т.н.; доцент.

**Plaksienko Elena Anatolyevna** – Taganrog Institute of Management and Economy; e-mail: pumka@mail.ru; 44, Roza Lyuksemburg street, app. 54,б, Taganrog, 347900, Russia, phone: +78634613432; the department of mathematics and computer science; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 620.9:519.711

**В.В. Соловьев, В.Ю. Степанова, В.В. Шадрина**

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ МНОГОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ**

*Выполнен анализ схем зависимого присоединения систем отопления. Разработана схема подключения со смесительным насосом на перемычке между прямым и обратным трубопроводом для 9-этажного жилого дома. Разработана математическая модель теплового баланса. Определены выражения для теплового потока через подмешивающий насос и регулирующий клапан. Представлена модель потерь через ограждающие конструкции. Получена полная математическая модель теплового баланса и зависимость доли открытия клапана и производительности насоса. Выполнено исследование модели для ряда температур наружного воздуха.*

*Тепловой баланс; смесительный насос.*

**V.V. Soloviev, V.Y. Stepanova, V.V. Shadrina**

### **MATHEMATICAL MODEL OF SYSTEM OF HEATING OF THE MANY-STOREYED BUILDING**

*The analysis of schemes of dependent joining of systems of heating is made. With the mixing pump on a crosspiece between the direct and return pipeline the scheme of connection is developed for 9 floor apartment houses. The mathematical model of thermal balance is developed. Expressions for a thermal stream through mixing pump and regulating valve are defined. The model of losses through protecting designs is presented. The full mathematical model of thermal balance and dependence of a share of opening of the valve and productivity of the pump is received. Research of model for a number of temperatures of external air is executed.*

*Thermal balance; the mixing pump.*

**Введение.** С увеличением стоимости энергоресурсов задача разработки энергоэффективных систем отопления зданий является актуальной. Доля затрат на отопление в коммунальных платежах доходит до 50 %. Если рассмотреть взаимодействие всех элементов наружных и внутренних инженерных систем на пути от потребителя до источника теплоты, то можно обнаружить участки, модернизация которых с помощью современных технических средств, позволит обеспечить энергосбережение и снизить финансовые затраты на отопление [1]. Безусловно, существующие теплосети не в полной мере отвечают современным условиям регулирования теплопотребления зданий. Поэтому распределение и регулирование тепловой энергии как внутри, так и снаружи зданий в соответствии с потребностью являются одними из основополагающих подходов энергосбережения. В данной работе исследуется система отопления многоэтажного здания с искусственной циркуляцией теплоносителя, позволяющая, по оценкам экспертов, снизить затраты на отопление на 20 % и обеспечить более комфортное пребывание людей в отапливаемых помещениях.

**Схема энергоэффективного абонентского пункта.** Выполним анализ схем реализации систем отопления. Можно выделить схемы: зависимые без смешения воды, зависимые со смешением воды и независимые [1]. Реализация независимой схемы присоединения систем отопления является достаточно затратной, так как требуется установка теплообменника. Кроме того, существуют сложности в монтаже и дальнейшей эксплуатации.

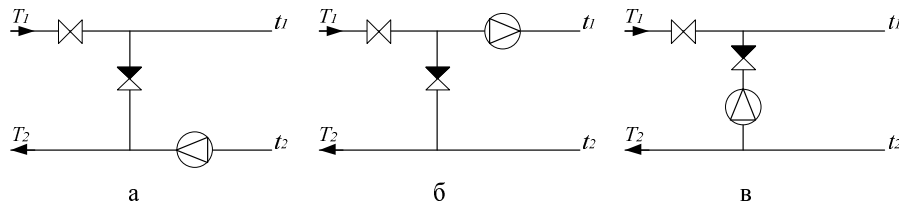


Рис. 1. Схемы включения насосов при зависимом присоединении абонента:  
а – с насосом на обратной магистрали; б – с насосом на подающей магистрали;  
в – с насосом на перемычке

подавляющее большинство зданий присоединены к наружной тепловой сети по зависимой схеме со смешением воды. В результате смешения теплоносителя из подающей магистрали с охлажденным из обратной магистрали получается смешанная вода более низкой температуры, чем вода в подающей магистрали. Ранее для смешения воды устанавливали водоструйные насосы (гидроэлеваторы) нерегулируемые и регулируемые.

Нерегулируемый гидроэлеватор сочетает в себе функции смесителя и циркуляционного насоса, но обладает низким КПД [2]. Получивший распространение в последнее время метод регулирования пропусками теплоносителя соленоидными клапанами на абонентском вводе противоречит строительным нормам и неэффективен для систем отопления многоэтажных зданий во всем температурном диапазоне отопительного периода [3].

Указанных недостатков лишены схемы присоединения с центробежным смесительным насосом (рис. 1). Некоторое увеличение капитальных и эксплуатационных затрат, обусловленное применением смесительного насоса в системе отопления здания, компенсируется повышением теплового комфорта помещений и экономией топлива, расходуемого на отопление [4]. Насос в схеме присоединения абонента позволяет применить наиболее энергосберегающие автоматизированные решения по регулированию систем абонента, учитывая погодные факторы по датчику температуры наружного воздуха, тепловые характеристики здания и тепло-гидравлические характеристики систем.

Насос на обратной (рис. 1,а) или подающей магистрали (рис. 1,б) перемещает всю воду, циркулирующую в системе. Насос включают непосредственно в магистраль системы отопления, когда разность давления в наружных теплопроводах недостаточна для нормальной циркуляции воды в системе. Насос при этом, обеспечивая помимо смешения необходимую циркуляцию воды, становится циркуляционно-смесительным. В обоих случаях происходит значительное воздействие на циркуляцию в тепловой сети, в частности, за счет изменения разницы давления в наружных трубопроводах и установленного гидравлического баланса. Также имеет место высокий расход и значительное снижение температуры поступающей в систему сетевой воды.

Вариант, изображенный на рис. 1,в, предполагает расположение насоса на перемычке между подающим и обратным трубопроводом при давлении в теплосети на вводе, превышающем статическое давление в системе отопления не менее

чем на 0,05...0,1 МПа. Такая схема считается наиболее экономичной, так как насос действует в благоприятных температурных условиях и перемещает меньшее количество воды, чем насос на обратной или подающей магистрали, и в меньшей степени влияет на изменение разницы давлений в наружных трубопроводах. Для этого варианта подключения насоса выполнялись дальнейшие исследования.

**Модель теплового баланса.** Объектом исследования являлся индивидуальный тепловой пункт (ИТП) 9-этажного жилого дома, расположенного в г. Таганроге. На рис. 2 приведена функциональная схема системы автоматического регулирования (САР) отопления здания, включающая: 1 и 2 – подающий и обратный трубопроводы, связанные с наружными тепловыми сетями, 3 – регулятор перепада давления (прямого действия), 4 – ультразвуковой расходомер, 5 – регулирующий клапан с электроприводом, 6 – обратный клапан, 7 – сдвоенный циркуляционный насос, 8 – накладные датчики температуры теплоносителя, 9 – датчик температуры наружного воздуха, 10 – датчик температуры внутреннего воздуха, 11 – регулятор подачи теплоты на отопление.

Из подающего трубопровода горячая вода поступает на регулирующий клапан 5. В случае если температура воды, измеряемая датчиком 8, в обратном трубопроводе меньше требуемой, то теплоноситель возвращается в котельную без перемешивания насосом.

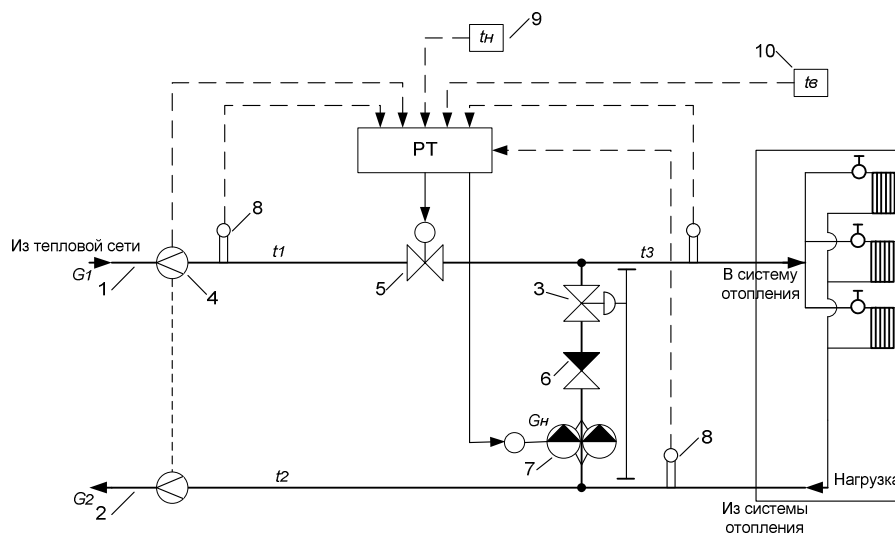


Рис. 2. Функциональная схема САР отопления здания

В противном случае часть теплоносителя с помощью подмешивающего насоса 7, проходя через обратный клапан 6, снова поступает в систему отопления здания. Регулятор 11 выполняет функции управления температурой теплоносителя, а также ограничивает максимальный расход сетевой воды, по показаниям датчика 4. Оценка внешних возмущений производится по показаниям датчика 9, по таблицам зависимости наружного воздуха и температуры теплоносителя. Если температура наружного воздуха находится в пределах от  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то регулирование осуществляется по возмущению: при снижении температуры САР пропорционально увеличивает открытие клапана 5 и соответственно уменьшается частота оборотов вала насоса 7. Если температура наружного воздуха возрастает, САР пропорционально прикрывает клапан 5 и соответственно увеличивает частоту оборотов вала насоса 7, что приводит к снижению температуры теплоносителя,

подаваемого на тепловую нагрузку. Когда температура наружного воздуха ниже  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , контроллер согласно программе управления, осуществляет регулирование по отклонению внутренней температуры воздуха в представительных помещениях. Перепад давления между подающим и обратным трубопроводами поддерживается постоянным за счет автоматического регулятора перепада давления 3.

Для исследования системы отопления необходимо составить уравнение теплового баланса. С учетом равенства суммарного входного и суммарного выходного тепловых потоков можно записать равенство

$$Q_{вх} = Q_{вых}, \quad (1)$$

где  $Q_{вх} = Q_1 + Q_n$ ,  $Q_{вых} = Q_3 + Q_2 + Q_n$

Тепловой поток  $Q_{вх}$ , поступающий в систему отопления, равен сумме тепловых потоков, переносимых в подающем трубопроводе  $Q_1$  и проходящим через подмешивающий насос  $Q_n$ . Тепловой поток из системы отопления  $Q_{вых}$  равен сумме тепловых потоков, переносимых в отапливаемом помещении  $Q_3$ , обратном трубопроводе  $Q_2$  и потерь через теплоизоляционные конструкции  $Q_n$ .

Тепловая энергия на отопление здания после регулирующего клапана может быть представлена в виде

$$Q_1 = K_k \cdot Q_k, \quad (2)$$

где максимальный тепловой поток на отопление из тепловой сети  $Q_k$  определяется по формуле

$$Q_k = c \cdot G_1 \cdot (t_1 - t_3), \quad (3)$$

где  $c = 1\text{ ккал}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$  – удельная теплоемкость воды.

Подставляя (3) в (2), получим соотношение для теплового потока в подающем трубопроводе:

$$Q_1 = K_k \cdot c \cdot G_1 \cdot (t_1 - t_3), \quad (4)$$

Учитывая, что теплоноситель протекает через клапан 5 с долей полного открытия  $K_k$ , циркулирует через контур отапливаемого здания с помощью подмешивающего насоса 7, работающего с долей полной производительности  $K_n$ , то для теплового потока  $Q_n$  можно записать соотношение:

$$Q_n = K_k \cdot K_n \cdot c \cdot G_n \cdot (t_2 - t_3), \quad (5)$$

где согласно [2] при установке подмешивающего насоса на переключке между подающим и обратным трубопроводами системы отопления подачу насоса  $G_n$  следует вычислять по формуле

$$G_n = I, I \cdot G_1 \cdot u, \quad (6)$$

где  $u$  – коэффициент смешения, определяемый по формуле

$$u = \frac{t_1 - t_2}{t_2 - t_3}. \quad (7)$$

Подставляя (7), (6) в (5), получим формулу для теплового потока в подающем трубопроводе системы отопления после подмешивания теплоносителя:

$$Q_n = I, I \cdot G_1 \cdot K_k \cdot K_n \cdot c \cdot (t_1 - t_2). \quad (8)$$

Тепловой поток, который передается в отапливаемое помещение, создает в нем номинальную температуру  $t_6 = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , согласно [3]. Так как из рабочей документации известна часовая тепловая нагрузка отапливаемого здания, то теплопередачу отопительных приборов, можно определить по формуле

$$Q_3 = Q_1 \cdot \frac{t_B - t_H}{t_B - t_{нро}}, \quad (9)$$

где  $t_{нро}$  – расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления в местности, где расположено здание, согласно [3],  $^{\circ}\text{C}$ .

Так как расход сетевой воды  $G_2=G_1$ , то тепловой поток  $Q_2$  можно рассчитать по формуле

$$Q_2 = G_1 \cdot c \cdot (t_2 - t_3). \quad (10)$$

Подставляя (4), (8), (9), (10) в (1) и принимая  $Q_n = C_1 = const$ , получили уравнение теплового баланса для отапливаемого здания [5]:

$$K_k \cdot G_1 \cdot (t_1 - t_3) + 1,1 \cdot G_1 \cdot K_k \cdot K_n \cdot (t_1 - t_2) = Q_1 \cdot \frac{t_B - t_H}{t_B - t_{HPO}} + G_1 \cdot (t_2 - t_3) + C_1. \quad (11)$$

Введя обозначения  $Q_1 \cdot \frac{t_B - t_H}{t_B - t_{HPO}} + G_1 \cdot (t_2 - t_3) + C_1 = a$ ,  $\frac{(t_1 - t_3)}{1,1 \cdot (t_1 - t_2)} = b$ ,  $1,1 \cdot G_1 \cdot (t_1 - t_2) = c$ , получим зависимость между коэффициентами  $K_n$  и  $K_k$ :

$$K_n = \frac{a}{K_k \cdot c} - b, \quad (12)$$

где  $a > 0$ ,  $b > 0$ ,  $0 < K_k < a/(b \cdot c)$ .

Согласно известному температурному графику работы котельной получена графическая зависимость по выражению (12), приведенная на рис. 3.

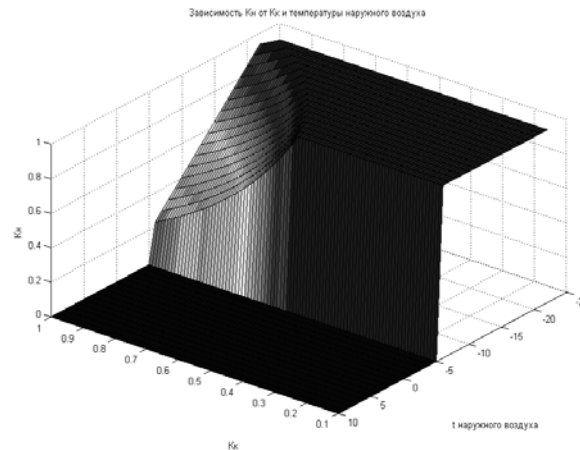


Рис. 3. Зависимость  $K_n$  от  $K_k$  и температуры наружного воздуха

В соответствии с рис. 3 при уменьшении температуры наружного воздуха увеличивается открытие клапана и соответственно уменьшается производительность подмешивающего насоса, и, наоборот, с ростом температуры наружного воздуха клапан прикрывается и соответственно увеличивается производительность подмешивающего насоса, что позволяет уменьшить расход воды на отопление.

**Вывод.** Полученная математическая модель, отражает зависимость между долями полного открытия клапана и полной производительностью насоса. Моделирование подтверждает возможность автоматизированного управления режимами отпуска теплоты в отапливаемое помещение. В дальнейшем авторами будут исследованы динамические характеристики рассматриваемого объекта, с целью получения закона регулирования теплового состояния объекта.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пырков В.В. Современные тепловые пункты. Автоматика и регулирование. – Киев: ИП «Такі справи», 2007. – 252 с.
2. Покотилев В.В. Пособие по расчету систем отопления. – Минск 2006. – 145 с.

3. *Соколов Е.Я.* Теплофикация и тепловые сети: Учебник для вузов. – 7-е изд., стереот. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 472 с.
4. *Пырков В.В.* Гидравлическое регулирование систем отопления и охлаждения. Теория и практика. – Киев: П ДП «Такі справи», 2010. – 304 с.
5. *Соловьев В.В., Степанова В.Ю.* Разработка модели теплового баланса системы центрального отопления. // Труды IX Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов "Информационные технологии, системный анализ и управление". – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 74-75.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Е. Золотовский.

**Соловьев Виктор Владимирович** – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: soloviev-tti@mail.ru; 347928, Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371773; кафедра систем автоматического управления; ст. преподаватель.

**Степанова Виктория Юрьевна** – e-mail: stevika1@rambler.ru; кафедра систем автоматического управления; студентка.

**Шадрина Валентина Вячеславовна** – e-mail: valentina\_@mail.ru; кафедра систем автоматического управления; доцент.

**Soloviev Victor Vladimirovich** – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: soloviev-tti@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371773; the department of automatic control systems; senior lecturer.

**Stepanova Viktoriya Yurievna** – e-mail: stevika1@rambler.ru; the department of automatic control systems; student.

**Shadrina Valentina Vyacheslavovna** – e-mail: valentina\_@mail.ru; the department of automatic control systems; senior lecturer.