

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТА ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ

В.В. Бурцев, А.С. Басин, Н.М. Байтингер

В работе представлена математическая модель теплового режима гражданских и общественных зданий, учитывающая взаимосвязанность характеристик окружающей среды и здания и вероятностные изменения по времени наружных и внутренних возмущающих факторов. Приведены экспериментальные данные по определению фактического коэффициента теплоаккумуляции и режимов охлаждения здания. Проведено сравнение предложенной модели с другими, рассчитаны характеристики времени, располагаемого для ликвидации аварий.

Одной из главных современных проблем централизованного теплоснабжения является автоматизация систем отопления зданий, где расходуется основная доля подаваемой тепловой энергии и где пока еще «зарыты» основные перспективы энергосбережения [1,2]. Один из двух главных путей решения этой проблемы представляет современные средства цифровой микроселектронной техники и новые электрифицированные датчики, средства подачи теплоносителя и регулирующие исполнительные механизмы. Микропроцессорная техника – малогабаритная и энергоэффективная (сама по себе) – предоставляет возможность точного регулирования теплопотребления на основе большого количества учитываемых входных параметров. Такие средства автоматизации были недоступны в эпоху массового строительства жилых зданий и развития систем централизованного теплоснабжения [1]. В настоящее время микропроцессорная техника стала сравнительно дешевой, используются многие варианты систем управления теплопотреблением, однако в системах отопления зданий еще не всегда возможности микропроцессорных устройств реализованы с достаточной внутренней эффективностью.

Целью настоящей работы является изучение закономерностей и построение достаточно полной математической модели теплового режима зданий, которую можно было бы использовать в компьютеризованной системе управления отоплением зданий и помещений старой постройки, системы отопления которых не требуют полной реконструкции, кроме автоматизации.

Математическая модель теплового режима зданий является основой быстрого реагирования системы отопления на изменения сигнала главного датчика t_b – датчика температуры внутреннего воздуха (рис. 1).

Динамика теплового режима помещения (рис. 1) может описываться в форме системы

(1-5), где основным является дифференциальное уравнение теплового баланса (1) в форме, принятой в [4].

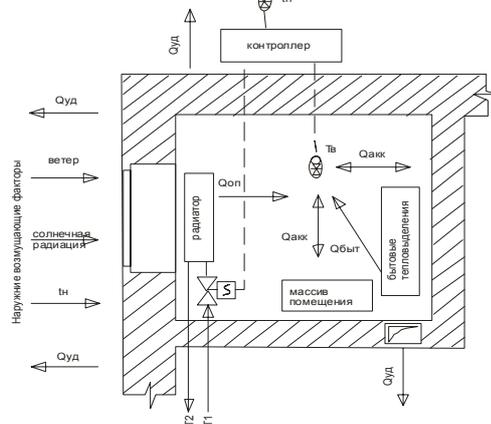


Рис. 1. Принципиальная схема объекта регулирования. t_b , t_n – датчики температур, $Q_{акк}$ – аккумулярованное тепло, остальные обозначения – в тексте

Регулируемый параметр здесь входит в величину $\vartheta \equiv t_b - t_{ny}$, где t_{ny} – условная температура наружного воздуха, которая отражает наружные и внутренние возмущения поправками в сигнал датчика t_n (рис. 1). В целом математическая модель имеет вид:

$$Q_{пр} e^{-zm} \pm C_{пом} \frac{d\vartheta}{dz} = Q_{уд} \vartheta \quad (1)$$

$$Q_{уд} = \Sigma(kF)_{но} + L(cp)_{вз} \quad (2)$$

$$z = z_{охл}; \vartheta = \vartheta_o = t_{eo} - t_{ny} \quad (3)$$

$$z = z_{наг}; \vartheta = \vartheta_n = t_{en} - t_{ny} \quad (4)$$

$$t_{ny}(z) = t_n - \Delta t_v + \Delta t_{выд} + \Delta t_s \quad (5)$$

Члены левой части уравнения (1) описывают использование тепловой энергии, выделяемой или аккумулярованной нагреватель-

ным прибором, ограждающими конструкция-ми и оборудованием помещения. Правая часть уравнения (1) описывает изменение теплопотерь помещения. Знак «плюс» в (1) соответствует процессу охлаждения помещения, знак «минус» – процессу нагревания.

Формула (2) представляет теплопотери помещения; формула (3) - начальное условие к началу охлаждения; формула (4) - начальное условие к началу нагревания; формула (5) – составляющие условной температуры: Δt_v - поправка на воздействие ветра, Δt_s - поправка на воздействие солнечного излучения и $\Delta t_{\text{выд}}$ - поправка на производственно-бытовые тепловыделения.

Другие величины в (1): $Q_{\text{оп}}$ – тепловая мощность отопительного прибора к моменту начала его охлаждения или нагревания; m – темп его охлаждения или нагревания; z – время; $C_{\text{пом}} = C_{\text{огр}} + C_{\text{об}}$ – общая теплоемкость помещения в ограждениях с оборудованием; $Q_{\text{уд}}$ – удельные теплопотери помещения; $\vartheta = t_{\text{в}} - t_{\text{н}}$ – условный перепад температур воздуха; ϑ_0 – перепад к началу охлаждения помещения; ϑ_n – перепад к началу нагревания помещения; F – площадь наружного ограждения; k – средний коэффициент теплопередачи через ограждения; L , $c_{\text{в}}$, $\rho_{\text{в}}$ – расход, удельная теплоемкость и плотность удаляемого воздуха, соответственно.

С учетом начальных условий (3) и (4) получены следующие решения уравнения (1) для процессов охлаждения (6) и нагревания (7) помещения:

$$\vartheta(z) = \frac{\vartheta_0}{1 - \beta \cdot m} \cdot e^{-z \cdot m} + \left(\vartheta_n - \frac{\vartheta_0}{1 - \beta \cdot m} \right) \cdot e^{-\frac{z}{\beta}}, \quad (6)$$

$$\vartheta(z) = -\frac{\vartheta_n}{1 + \beta \cdot m} \cdot e^{-z \cdot m} + \left(\vartheta_0 - \frac{\vartheta_n}{1 + \beta \cdot m} \right) \cdot e^{\frac{z}{\beta}}, \quad (7)$$

где $\beta = C_{\text{пом}}/Q_{\text{уд}}$ - коэффициент теплоаккумуляции помещения.

Для использования математической модели (1-7) в системе управления теплоснабжением реального объекта разработан алгоритм вычисления условной температуры наружного воздуха $t_{\text{н}}$ и проведен натурный эксперимент.

Температурная добавка Δt_v , характеризует изменение теплопотерь помещения за счет изменения инфильтрации наружного воздуха и наружной теплоотдачи при скорости ветра, отличающейся от нормативной. Эта добавка может быть вычислена по формуле (5):

$$\Delta t_v = m(t_{\text{в}} - t_{\text{н}}), \quad ^\circ\text{C}, \quad (8)$$

где μ – коэффициент инфильтрации, вычисляемый по формуле

$$m = 1.18b(v_{\text{н}} - 5), \quad (9)$$

где b – постоянная инфильтрации в здании конкретной конструкции, с/м; $v_{\text{н}}$ – реальная скорость ветра, м/с.

Температурная добавка от инсоляции помещения Δt_s , определяется формулой (6):

$$\Delta t_s = d \cdot \epsilon_0 \cdot R \cdot J, \quad (10)$$

где d - относительная площадь остекления; ϵ_0 - коэффициент пропускания солнечной радиации через остекление; R – среднее по фасаду термическое сопротивление окон; J – поток солнечной радиации [4].

Внутренние тепловыделения могут быть учтены добавкой

$$\Delta t_{\text{выд}} = \frac{Q_{\text{быт}} + \sum c_{\text{об},i} \cdot G_{\text{об},i} \cdot \Delta t}{Q_{\text{уд}}}, \quad (11)$$

где $Q_{\text{быт}}$ – бытовые тепlopоступления (по СНиП 2.04.05-91*); $c_{\text{об}}$ – удельная теплоемкость оборудования; $G_{\text{об},i}$ – масса оборудования; $\Delta t = t_{\text{об}} - t_{\text{в}}$ - перепад температур между поверхностью оборудования $t_{\text{об}}$ и внутренним воздухом; i – номер единицы оборудования.

Оценки всех поправок-добавок (8-10) могут быть сделаны на основании справочных и нормативных данных.

Изменение всех поправок-добавок во времени года и суток является случайным процессом, поэтому для учета их суточных и годовых изменений должен использоваться вероятностный подход.

Точность моделирования теплового режима помещений и зданий в значительной степени зависит от правильности определения теплоаккумулирующей способности и других тепловых характеристик. Некоторые из них могут быть определены только на основе натуральных испытаний. В частности, по экспериментальным данным может быть в значительной мере повышена точность учета теплоаккумуляции оборудованием и мебелью, проявляющейся в величине β .

Для апробации модели проведено тепловое обследование и натурные испытания крупнопанельного производственно- лабораторного здания (г. Новосибирск) с размерами в плане 66x12 кв.м, высотой 26 м и долей остекления стен 0,6. Эксперимент проводился при температуре наружного воздуха около минус 1°С в вечернее нерабочее время. Это позволило полностью отключить отопление здания (хотя и на короткое время) и провести измерения темпа охлаждения воздуха в ряде помещений, на основе чего было определено представительное помещение и график его охлаждения (рис. 2).

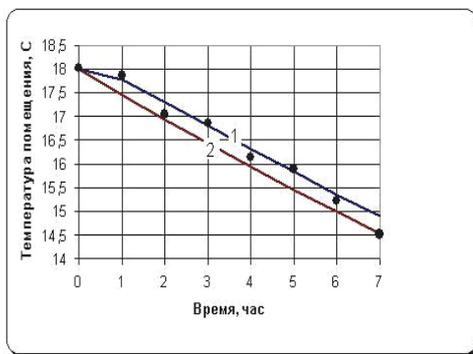


Рис.2. Результаты эксперимента: • - экспериментальные точки; 1-линии охлаждения по модели (1-11); 2-линия охлаждения по модели (12) при $\beta=34,86$ ч

По экспериментальной кривой охлаждения помещения при отключенной системе отопления определен фактический коэффициент теплоаккумуляции $\beta = 34,86$ ч [7]. С учетом найденного β для процесса охлаждения на рис.2 построены: кривая 1 по формуле (6) и кривая 2 по известной математической модели Е.Я. Соколова [5]:

$$t_{\text{в}} = t_{\text{н}} + \Delta t_{\text{н}} + \frac{[t_{\text{во}} - (t_{\text{н}} + \Delta t_{\text{н}})]}{e^{z/\beta}}, \quad (12)$$

где $t_{\text{во}}$ - температура внутреннего воздуха к моменту нарушения нормального теплового режима; $\Delta t_{\text{н}}$ - температурная надбавка, эквивалентная формуле (11). Как видно из рис.2, динамика падения температуры помещения по предложенной модели (1-5) несколько ближе к полученным экспериментальным данным.

В целях подготовки аналогичных экспериментов с налаживаемой САР отопления проведен расчет кривых охлаждения и нагрева здания по формулам (6) и (7), результаты которого представлены на рис. 3. Расчет проведен для следующих исходных данных: система отопления - однотрубная с верти-

кальная разводкой; отопительные приборы - чугунные радиаторы; темпы охлаждения $m=1,3$ и нагрева $m=3,6$, соответственно; $\beta = 34,86$ ч. Температурные характеристики соответствовали экспериментальным: $t_{\text{н}} = -1^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{в}} = 20^{\circ}\text{C}$; $v_{\text{н}} = 5\text{м/с}$; $\Delta t_{\text{в}} = 0^{\circ}\text{C}$; $\Delta t_{\text{с}} = 0,7^{\circ}\text{C}$; $\Delta t_{\text{выд}} = 1,3^{\circ}\text{C}$.

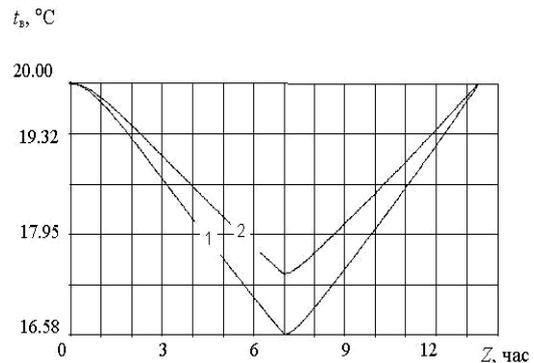


Рис. 3. Расчетные кривые охлаждения и нагрева помещения: 1-без учета возмущающих факторов; 2-с учетом возмущающих факторов (9-11)

На рис.3 (кривые 1) можно видеть, что время разогрева помещения при включении полной мощности отопления практически одинаково со временем охлаждения при полном отключении отопления. Поэтому можно отметить, что предложенная модель теплового режима помещения (1-5) достаточно хорошо характеризует не только процесс охлаждения, но и процесс нагревания объекта теплотребления. Достаточно точный учет возмущающих факторов, как видно из кривых 2, может позволить снижение расхода тепловой энергии. Это возможно, однако, только при автоматическом регулировании расходов в тепловом пункте [3].

На рис.4 показаны рассчитанные по модели (1-7) кривые охлаждения исследуемого здания после прекращения подачи тепла в систему отопления при более низких, чем на рис. 2, 3 наружных температурах. Это важно знать при наступлении нештатных ситуаций связанных с авариями в теплосетях и неполадками теплотехнического оборудования. Как видно из кривой 3, (соответствующей расчетной $t_{\text{н}}=-39^{\circ}\text{C}$ для Новосибирска) катастрофическая ситуация в системе отопления может наступить менее чем за 10 часов. С другой стороны, считая критической температуру в рабочих помещениях $t_{\text{в}}=+12^{\circ}\text{C}$ [8], меры для предупреждения аварий в технологическом оборудовании здания, эвакуации ра-

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТА ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ

ботников и “консервации” систем отопления здания должны быть приняты в течение менее чем 6 часов.

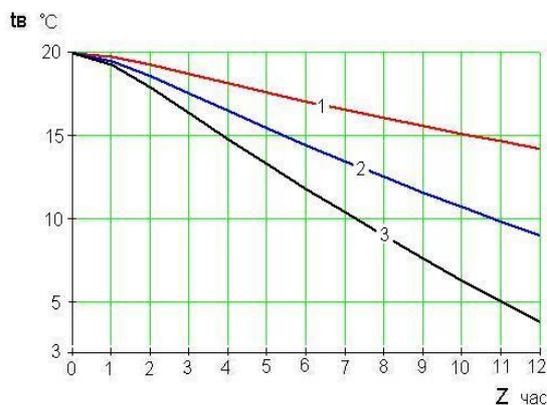


Рис.4. Закономерности охлаждения помещения, рассчитанные по математической модели (1-11): 1- при $t_{н}=-1^{\circ}\text{C}$; 2-при $t_{н}=-20^{\circ}\text{C}$; 3-при $t_{н}=-39^{\circ}\text{C}$

Таким образом, исходя из концепции энергобезопасности и обеспечения жизнедеятельности, что особенно актуально в нынешних условиях, предложенная математическая модель может быть использована также службами эксплуатации систем теплоснабжения для оценки времени и ресурсов, необходимых для ликвидации аварийной ситуации и восстановления отопления в полном объеме.

ВЫВОДЫ

В модели использован учет влияния внешних и внутренних возмущающих факторов, а также теплоаккумулирующая способ-

ность здания, являющаяся одной из главных характеристик, воздействующих на процесс регулирования.

Используемая математическая модель может быть применена в качестве основы регулирования объекта теплоснабжения с целью оптимального расходования тепловой энергии у потребителя, а также для оценки темпа охлаждения помещения после прекращения подачи тепла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ливчак В.И. За оптимальное сочетание автоматизации регулирования подачи и учета тепла // АВОК, 1998, № 4. – С.44-50.
2. Степанов В.С. Резервы энергосбережения в системе отопления // Жилищное строительство, 1999, № 10. – С.9-11.
3. Байтингер Н.М., Бурцев В.В. Система оптимального теплоснабжения как пример реализации модели энергоэффективного здания в рамках концепции «интеллектуальное здание» // Проектирование и строительство в Сибири, 2003, № 1. – С.57-58.
4. Кононович Ю.В. Тепловой режим зданий массовой застройки. – М.: Стройиздат, 1986. – 157 с.
5. Соколов Е.Я.. Теплофикация и тепловые сети. – М.: Энергоиздат, 1982. – 360 с.
6. Зингер Н.М., Бестолоченко В.Г., Жидков А.А. Повышение эффективности работы тепловых пунктов. – М.: Стройиздат, 1990. – 188 с.
7. Бурцев В.В., Климов А.М. Теплоаккумулирующая способность здания как критерий регулирования тепловой нагрузки / Энергия: экология, надежность, безопасность – Томск: Изд-во ТПУ, 2001, т.1. - С. 149-152.
8. Ионин А.А. Надежность систем тепловых сетей. – М.: Стройиздат, 1989. – 268 с.