

ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМА ИМПУЛЬСНОГО ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЕГО РАБОТЫ

А.Б. Дегтярь, В.И. Панферов

В статье описываются наиболее вероятные пути экономии тепловой энергии при импульсном режиме отопления зданий, механизм проектирования импульсного отопления, а также описывается математическая модель управления данным режимом функционирования отопления.

Ключевые слова: отопление зданий, импульсное отопление, режимы отопления, экономия тепловой энергии.

Снижение затрат энергии на обеспечение микроклимата в зданиях и сооружениях является весьма актуальной проблемой. Её грамотное решение может быть выполнено лишь на основе всестороннего анализа теплоэнергетического процесса, реализуемого в здании. При этом под теплоэнергетическим процессом понимается последовательная цепь взаимообусловленных энергетических превращений, связанных с переносом внутренней энергии (теплоты) от источника в окружающую среду.

1. Построение алгоритма реализации импульсного режима отопления зданий

Теоретическое обоснование закономерностей формирования теплового режима зданий и сооружений позволяет грамотно подходить к его моделированию, исследованию и оптимизации. При этом основной целью оптимизации данного режима является снижение затрат энергии на обеспечение микроклимата в зданиях и сооружениях.

В связи с этим разработан алгоритм импульсного отопления зданий [1]. Целесообразность такого направления работы обусловлена тем, что импульсный режим отопления промышленных печей, как это достаточно достоверно установлено, характеризуется, в частности, заметной экономией тепловой энергии. Поэтому вполне оправданным является и ожидание того, что применение такого режима для отопления зданий также будет энергетически выгодным. Предполагается, что импульсное отопление целесообразно применять в следующих случаях.

1. При теплоснабжении здания от тепловых сетей. Данный вид теплоснабжения осуществляется по существующему температурному графику, согласно которому температура теплоносителя в тепловой сети зависит от температуры наружного воздуха. И существует, так называемая, срезка температурного графика, ниже которой темпера-

тура в тепловой сети не регулируется. В этом случае целесообразно применять местное импульсное отопление с целью экономии тепла.

2. График качественного регулирования тепловых сетей рассчитан на характеристики, так называемого, усредненного здания с радиаторной системой отопления. Вместе с тем теплотехнические характеристики конкретного здания могут выгодно отличаться от усредненных характеристик, поэтому применение импульсного отопления приведет к экономии тепловой энергии.

Также во время действия импульса через систему отопления пропускается расчетный расход теплоносителя, а во время паузы расход теплоносителя равен нулю. Этим самым исключается возможность гидравлической разрегулировки системы отопления. Кроме того, как показали исследования последних лет [2], изменение параметров воздуха с определенной частотой благоприятно воспринимается человеком - снижает утомляемость и повышает производительность труда. Такая концепция получила название «динамического микроклимата», под которым понимается периодическое колебание параметров воздуха в помещении около их средних значений. Данные колебания могут наблюдаться в период включения и отключения системы отопления, то есть работе ее в импульсном режиме. Скважность импульсов (отношение длительности включения ко всему периоду) определяется, исходя из текущей тепловой потребности отапливаемого здания. При этом используется разработанная модель отопительного прибора [3]. Для оценки качества регулирования температуры внутреннего воздуха необходима разработка математической модели теплового режима здания, включающей подсистему импульсного управления.

Рассмотрим режим функционирования импульсного отопления в период срезки температурного графика. Периодом срезки будем считать период, когда температура в подающей линии тепловых сетей не поддерживается ниже 70 °С. В данном случае наиболее подходящим будет импульсное регулирование, когда через систему отопления пропускается всегда расчетный расход, а количество передаваемо-

Дегтярь Александр Борисович - аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции ЮУрГУ; tgsiv@susu.ac.ru.

Панферов Владимир Иванович - д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции ЮУрГУ; tgsiv@susu.ac.ru.

го тепла регулируется длительностью включения и выключения системы в зависимости от температуры наружного воздуха. Такой способ является наиболее эффективным, так как количественное регулирование привело бы к разрегулировке системы отопления, а качественное регулирование невозможно.

Систему отопления конкретного здания можно условно заменить эквивалентным отопительным прибором. Параметры эквивалентного отопительного прибора можно найти следующим образом. Во-первых, необходимо вычислить расчетные теплотери здания. Для этого используется известная формула:

$$Q_p = q_0 V (t_{\text{в}} - t_{\text{нр}}), \quad (1)$$

где q_0 – удельные теплотери здания; V – объем помещения; $t_{\text{в}}$ – температура воздуха в помещении; $t_{\text{нр}}$ – расчетная температура наружного воздуха для зимнего периода.

Далее известно, что коэффициент теплопередачи отопительных приборов можно вычислять по соотношению:

$$K_{\text{пр}} = m \left(\frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}}{2} - t_{\text{в}} \right)^n, \quad (2)$$

где m и n – экспериментальные числовые коэффициенты, зависящие от типа прибора и характера циркуляции в нем воды; $t_{\text{вх}}$ – температура теплоносителя на входе в отопительный прибор; $t_{\text{вых}}$ – температура теплоносителя на выходе из отопительного прибора.

Затем, для того типа отопительных приборов, которые установлены в конкретном здании по параметрам расчетного режима следует найти коэффициент теплопередачи K по формуле (2).

Площадь отопительного прибора F , как известно, можно найти используя следующую зависимость:

$$F_{\text{пр}} = \frac{Q_p}{\left[\frac{(t_{\text{вхр}} + t_{\text{выхр}})}{2} - t_{\text{в}} \right] K_{\text{пр}}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{вхр}}$ – температура теплоносителя на входе в отопительный прибор в расчетном режиме; $t_{\text{выхр}}$ – температура теплоносителя на выходе из отопительного прибора в расчетном режиме.

Нами установлено, что распределение температуры по площади поверхности отопительного прибора имеет вид [3]:

$$t(F) = t_{\text{в}} + (t_{\text{вх}} - t_{\text{в}}) \exp \left(- \frac{K_{\text{пр}} F_{\text{пр}}}{G_{\text{расч}} c} \right), \quad (4)$$

где $K_{\text{пр}}$ – коэффициент теплопередачи отопительного прибора; $F_{\text{пр}}$ – площадь поверхности отопительного прибора; c – теплоемкость теплоносителя; $G_{\text{расч}}$ – массовый расчетный расход теплоносителя.

Мощность отопительного прибора определяется по формуле:

$$Q = cG(t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}}), \quad (5)$$

где $t_{\text{вых}}$ – температура теплоносителя на выходе из отопительного прибора.

Подставив (4) в (5) и полагая под F всю площадь поверхности отопительного прибора найдем количество тепла, которое подается в период срезки температурного графика:

$$Q_{\text{ср}} = cG_{\text{расч}} (t_{\text{вх}} - t_{\text{в}}) \left[1 - \exp \left(- \frac{K_{\text{расч}} F_{\text{расч}}}{cG_{\text{расч}}} \right) \right]. \quad (6)$$

Тепловые потери здания при температуре наружного воздуха, отличной от расчетной, можно определить следующим образом:

$$Q = Q_p \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{t_{\text{в}} - t_{\text{нр}}}, \quad (7)$$

где $t_{\text{н}}$ – текущая температура наружного воздуха.

Разделим (7) на (6) и получим тем самым скважность импульсов для периода «срезки» температурного графика в зависимости от температуры наружного воздуха. Скважность импульсов – это отношение времени включения системы отопления к общему периоду импульса:

$$\frac{t_{\text{вкл}}}{T} = \frac{Q_p \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{t_{\text{в}} - t_{\text{нр}}}{cG_{\text{расч}} (t_{\text{вх}} - t_{\text{в}}) \left[1 - \exp \left(- \frac{K_{\text{пр}} F_{\text{пр}}}{cG_{\text{расч}}} \right) \right]}. \quad (8)$$

Расчетный расход теплоносителя определяется по Q_p и, очевидно, равен:

$$G_{\text{расч}} = \frac{Q_{\text{расч}}}{c(t_{\text{вхр}} - t_{\text{выхр}})}. \quad (9)$$

2. Расчет и исследование работы системы отопления в импульсном режиме

Расчет производится на примере жилого здания с характеристиками. Наружная стена трехслойная: кирпич $\delta = 0,12$ м, $\lambda = 0,76$ Вт/м²С; теплоизоляция (минеральная вата) $\delta = 0,14$ м, $\lambda = 0,043$ Вт/м²С; кирпич $\delta = 0,12$ м, $\lambda = 0,76$ Вт/м²С. Площадь наружных стен 120 м². Площадь перекрытия 36 м², сопротивление теплопередаче $R_{\text{пер}} = 5,939$ м²С/Вт. Площадь окон 8 м², сопротивление теплопередаче $R_{\text{ок}} = 0,502$ м²С/Вт. Площадь двери 3 м², сопротивление теплопередаче $R_{\text{дв}} = 0,588$ м²С/Вт. Расчетная температура наружного воздуха для г. Челябинска $t_{\text{нр}} = -34$ °С. Температура внутреннего воздуха в здании $t_{\text{в}} = 20$ °С. Температуры на входе и выходе из отопительного прибора в расчетном режиме $t_{\text{вхр}} = 95$ °С, $t_{\text{выхр}} = 70$ °С. Экспериментальные коэффициенты для чугунного секционного радиатора $m = 1$, $n = 0,3$. Удельная теплоемкость воды $c = 4187$ Дж/кг⁰С.

На основании исходных данных найдены расчетные теплотери здания $Q_p = 3200$ Вт, коэффициент теплопередачи отопительных приборов $K = 3,46$ Вт/м²С, площадь поверхности отопительных приборов $F = 14,81$ м² и расчетный расход $G_{\text{расч}} = 0,031$ кг/с.

Пользуясь найденными данными на основании уравнения (8) построим график зависимости $t_{вкл}/T$ от t_n , изображенный на рис. 1.

Из рис. 1 следует, что для периода «срезки» температурного графика, то есть в диапазоне температур $-10...+5$ °С скважность импульсов системы отопления уменьшается с увеличением температуры наружного воздуха.

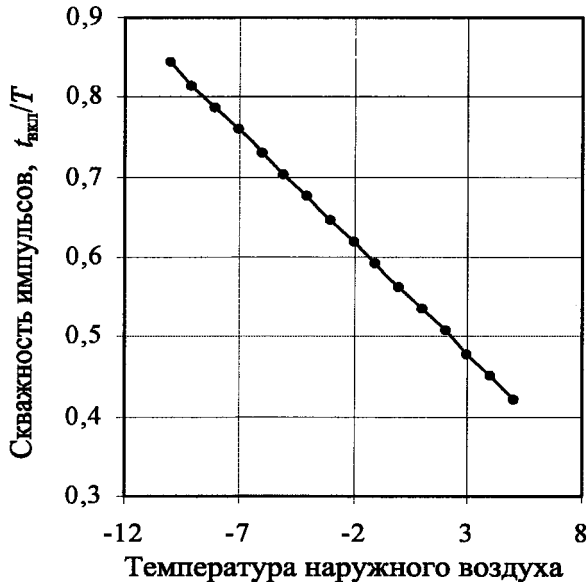


Рис. 1. График зависимости скважности импульсов от температуры наружного воздуха

Зная алгоритм проектирования импульсного отопления (скважность импульсов) можно более детально описать механизм управления импульсным режимом отопления, воспользовавшись дифференциальным уравнением, описывающим изменение температуры внутреннего воздуха в здании в импульсном режиме. В работе [4] с использованием разработок Е.Я. Соколова [5] найдена структура математической модели теплового режима помещения:

$$T \frac{dt_n}{d\tau} + t_n = kW_0 + T \frac{dt_n}{d\tau} + t_n, \quad (10)$$

где κ - коэффициент передачи по каналу «мощность системы отопления - температура внутреннего воздуха»;

$$k = \frac{1}{q_0V}, \quad (И)$$

T - постоянная времени:

$$T = \frac{c\rho F\delta}{q_0V} \left(\frac{\delta}{2R\lambda} + \frac{1}{\alpha_n R} \right), \quad (12)$$

где δ , R - соответственно толщина и термическое сопротивление теплопередаче наружной стены здания; λ - коэффициент теплопроводности материала стены; α_n - коэффициент теплоотдачи для наружной стены здания; F - площадь наружных стен здания.

При $t_n = \text{const}$, уравнение (10) переписывается в следующем виде:

$$\frac{dt_n}{d\tau} = \frac{1}{T} (t_n - t_n + kW_0), \quad (13)$$

Для численного решения уравнения (13) использовался метод Рунге-Кутты, при этом полагалось постоянство температуры наружного воздуха ($t_n = 3$ °С). Начальная температура внутреннего воздуха принималась равной 20 °С. Пользуясь исходными данными для жилого здания, изложенными выше, нашли $T = 83\ 925$ с; $k = 0,0169$; $W_0 = Q_{ср} = 2070,6$ Вт; при $t_n = 3$ °С: $Q = 1007$ Вт.

Численное решение поставленной задачи получено с применением компьютерной программы MathCAD. Результаты расчета изменения температуры внутреннего воздуха t_n во времени при импульсном режиме отопления приведены на рис. 2.

По нашим оценкам качество регулирования температуры внутреннего воздуха получается достаточно приемлемым. При этом в установившемся режиме t_n колебалась в пределах от 19,55...19,85 °С. Некоторое несоответствие средней температуры внутреннего воздуха расчетному значению 20 °С вероятнее всего обуславливается несовершенством методик расчета. Так например, рис. 2 построен для расчетной скважности импульсов, которая равна $t_{вкл}/T = 0,477$ для $t_n = 3$ °С. Однако, при увеличении скважности импульсов отклонение средней температуры внутреннего воздуха от расчетного значения уменьшается. Если вместо $t_{вкл}/T = 0,477$ принять $t_{вкл}/T = 0,485$ отклонение температуры от заданного значения будет равно нулю.

Также прослеживается зависимость, что при уменьшении периода следования импульса T , амплитуда колебаний t_n уменьшается. Так при $T = 1$ ч, амплитуда колебаний t_n равна 0,3 °С, а при $T = 0,5$ ч, амплитуда колебаний t_n равна 0,2 °С.

Применение импульсного отопления для периода, когда наблюдается перетоп помещения, то есть температура внутреннего воздуха равна $t_n = 25$ °С, позволяет ликвидировать этот перетоп и выйти на расчетный режим. График этой зависимости изображен на рис. 3.

Если бы импульсное отопление не применялось, то дифференциальное уравнение, описывающее изменение t_n было бы следующим:

$$T \frac{dt_n}{d\tau} = t_n - t_n + kW_0 + kcG_{расч} (t_{вх} - t_n) \left[1 - \exp\left(-\frac{K_{пр} F_{пр}}{cG_{расч}}\right) \right]. \quad (14)$$

Решая это дифференциальное уравнение найден график изменения температуры внутреннего воздуха. Этот график приведен на рис. 4.

Из графика видно, что в установившемся режиме превышение температуры внутреннего воздуха над заданным значением (20 °С) составляет 11 °С.

Используя дифференциальное уравнение (14) можно более точно рассчитать температуру внутреннего воздуха, которая установится в помещении ($t_{вы}$), а также оценить экономию тепла при ис-

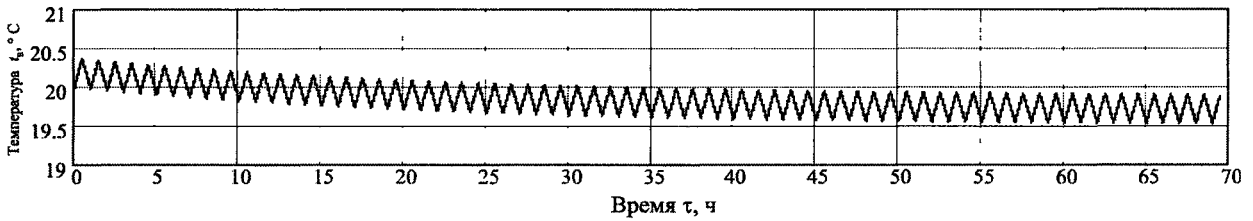


Рис. 2. График изменения температуры внутреннего воздуха во времени при использовании режима импульсного отопления

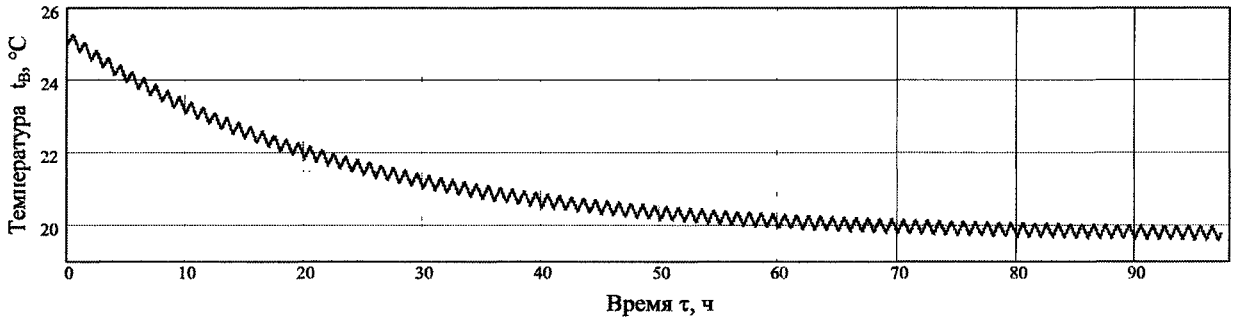


Рис. 3. График изменения температуры внутреннего воздуха во времени при использовании режима импульсного отопления при превышении фактической температуры в помещении над заданной

пользовании импульсного отопления. Выражение для $t_{в,у}$ будет иметь вид:

$$t_{в,у} = \frac{t_n + kcG_{расч}t_{вх} \left[1 - \exp\left(-\frac{K_{пр}F_{пр}}{cG_{расч}}\right) \right]}{1 + kcG_{расч} \left[1 - \exp\left(-\frac{K_{пр}F_{пр}}{cG_{расч}}\right) \right]} \quad (15)$$

Вычислив $t_{в,у}$ по формуле (15), получаем, что $t_{в,у} = 30,933$ °C.

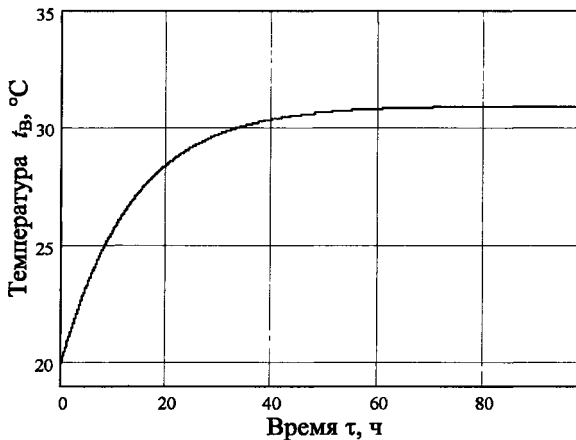


Рис. 4. График изменения температуры $t_{в}$ во времени без импульсного отопления

Заключение

В установившемся режиме расход теплоты следует вычислять по формуле (6), подставляя в нее $t_{в,у}$. Тогда подставив значение $t_{в,у}$ в уравнение (6), получаем: $Q_y = 1653$ Вт. А расход теплоты при

применении импульсного режима отопления равен $Q_n = Q_{ср}(t_{вкл}/T) = 2070,6 \cdot 0,477 = 987,4$ Вт.

То есть при использовании импульсного отопления экономия теплоты составляет 665,6 Вт.

Литература

1. Панферов, В. И. Исследование режима импульсного отопления / В. И. Панферов, А. Б. Дегтярь // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — Магнитогорск: МГТУ, 2006.
2. Калмаков, А. А. Автоматика и автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции: учебник для вузов / А. А. Калмаков. - М.: Стройиздат, 1986. - 479 с.
3. Панферов, В. И. Погрешность определения среднего значения температурного напора отопительного прибора / В. И. Панферов, А. Б. Дегтярь, Ю. Н. Денисенко // Материалы 5-й Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности». — Ульяновск: УлГТУ, 2006. — Т.1.
4. Нагорная, А. Н. Моделирование и управление тепловым режимом здания / А. Н. Нагорная, В. И. Панферов, Е. Ю. Пашина // Материалы Международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции». — М: МГСУ, 2005. — 280 с.
5. Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов / Е. Я. Соколов. — М.: Изд-во МЭИ, 1999.-472 с.

Поступила в редакцию 11 октября 2007 г.