

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 620.9.004.18

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ СИСТЕМЫ «REFLOW»

Антипов Евгений Алексеевич, к.т.н., доцент,
Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины
Ievgeniy Antypov, PhD, ievgeniy_antypov@ukr.net
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Осуществлена оценка влияния сопротивления ограждающих конструкций на эффективность работы системы «REFLOW», которая позволяет осуществлять «умное» распределение и транспортировку теплоносителя по системе отопления зданий и сооружений ВУЗов с учетом влияния внешних и внутренних климатических параметров в динамическом режиме.

Ключевые слова: *поток, балансировка, энергосберегающая технология, система отопления, динамический режим.*

Острота проблемы энергообеспечения для украинских высших учебных заведений (ВУЗ) связана с ограниченным бюджетным финансированием расходов (прежде всего на коммунальные услуги, среди которых наиболее значимыми являются расходы на энергообеспечение) и низкой энергоэффективностью инженерных систем и зданий ВУЗов. Основная часть внутримановых сетей зданий ВУЗов, по своим конструктивным особенностям, относятся к однотрубным с вертикальной разводкой. Такие системы, в отличие от двухтрубных, менее металлоемкие но более гидравлически разбалансированные, что в свою очередь приводит к возникновению так называемых явлений «перетопов»/«недотопов» помещений как по «стоякам», так и по этажам здания в зависимости от использования той или другой схемы подачи теплоносителя. Описанную проблему частично решают известные технические решения компаний «Danfoss» и «HERZ» [1]. Однако, известные технические устройства не учитывают влияние внешних (температура, интенсивность солнечного излучения, скорость и направление ветра) и внутренних (влажность, присутствие человека) факторов, не позволяет осуществлять «качественную» корректировку режимов работы системы отопления в зависимости от влияния того или иного фактора. Кроме того, в случае изменения типа и площади поверхности отапливаемых приборов, в условиях динамического изменения режима работы системы отопления здания и параметров окружающей среды, даже с использованием балансировочной арматуры, проблема «перетопов» и «недотопов» помещений по этажам здания до сих пор остается нерешенной. Поэтому с целью снижения уровня энергопотребления зданий ВУЗов и приведением его к нормативному, с одновременным сохранением показателей комфорта в помещениях, целесообразным представляется проведение работ и мероприятий по модернизации их внутримановых инженерных сетей.

При проектировании сложных систем «источник теплоты – распределительное устройство – отопительный прибор» основное внимание должно быть также уделено и «умному» распределению теплоносителя по системе отопления в зависимости от потребностей пользователя – человека [2]. В этом направлении, авторами статьи, ранее был проведен ряд исследований, в частности по анализу состояния энергопотребления на объектах Национального университета биоресурсов и природопользования Украины в течение последних лет, проведен мониторинг параметров микроклимата в помещениях учебных корпусов и в общежитиях университета. В частности, осуществлялись измерения профилей температур внутреннего воздуха как по этажам, так и по фасадам зданий до и после выполнения работ по термомодернизации, которые заключались в утеплении наружных ограждающих конструкций и модернизации индивидуальных тепловых пунктов в отдельных корпусах. Установлено, что потенциал теплоносителя, «пройдя» путь от верхнего/нижнего до нижнего/верхнего этажей, существенно снижается и, как следствие, отопительные

приборы не прогреваются до номинального режима работы, в помещениях первого/последнего этажей температурный режим не соответствует нормативам [3, 4]. На практике, чтобы устранить это несоответствие повышают температуру теплоносителя в «подающем» трубопроводе, но не всегда такой метод является действенным, поскольку с ростом температуры теплоносителя, растут и цифры в «платежках», но никак не улучшается комфорт в помещениях здания.

С целью решения описанных проблем, предложена новая система «REFLOW», которая позволит устранить «недогрев» нижних/верхних и «перегрев» верхних/нижних этажей переключением схемы подачи теплоносителя в систему отопления с верхней на нижнюю и наоборот в автоматическом режиме в зависимости от времени и/или температуры теплоносителя в «обратном» трубопроводе. Использование последней является особенно целесообразным в периоды значительного снижения температуры наружного воздуха, а также высоких порывов ветра. Как следствие, использование системы «REFLOW» способствует более равномерному прогреванию отопительных приборов (на указанных этажах здания) теплоносителем более высокого потенциала в циклическом режиме, в отличие от существующих односторонних режимов подачи теплоносителя в систему отопления дома.

Для оценки влияния сопротивления ограждающих конструкций на эффективность работы системы, рассмотрим нестационарную теплопередачу через n -слойную среду (стену). Контакт между слоями в общем случае будем считать неидеальным. Теплопроводности и удельные теплоемкости в каждом слое принимаем линейно зависимыми от температуры по формулам:

$$\lambda_i = \lambda_{0i}(1 + \varepsilon_i t_i), \quad (1)$$

где λ_{0i} – значение коэффициента теплопроводности для i -того слоя при температуре t_0 , Вт/(м·°C); ε_i – постоянная для i -того слоя, которая определяется опытным путем; t_i – температура i -того слоя, °C; i – номер слоя в n -слойной среде.

Для теплоемкости:

$$C_i = C_{0i}(1 + \beta_i t_i), \quad (2)$$

где C_{0i} – значение коэффициента теплоемкости для i -того слоя при температуре t_0 , Дж/(кг·°C); β_i – постоянная для i -того слоя, которая определяется опытным путем.

На свободных поверхностях n -слойных сред задаются граничные условия III рода. При этом задаются температуры внешней среды t_e и закон теплообмена между наружной поверхностью ограждающей конструкции и внешней средой. Граничные условия III рода характеризует закон теплообмена между поверхностью и внешней средой в процессе охлаждения или нагрева ограждающей конструкции. Для описания процесса теплообмена между поверхностью и средой используется закон Ньютона–Рихмана:

$$q = \alpha(t_e - t_s), \quad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи (характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью ограждающей конструкции и средой), Вт/(м²·°C); t_s – температура поверхности ограждающей конструкции, °C; t_e – температура внешней среды, °C.

Исходное температурное поле задается произвольно функциями $F_i(x)$.

Система дифференциальных уравнений, описывающих теплопередачу через n -шаровую стенку, имеет вид:

$$C_i(t_i) \frac{\partial t_i}{\partial \tau} = \text{div}[\lambda(t_i) \nabla t_i] + f(p_i, \tau), \quad (4)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

где div – дивергенция; C_i – теплоемкость i -того слоя при температуре t_i , кДж/(кг·°C); ∇ – оператор Лапласа в декартовой системе координат; p_i – удельная мощность внутренних источников теплоты для i -того слоя, Вт/м³; τ – время, с.

Для ограждающей конструкции система (4) будет одномерной без источников теплоты. С учетом линейной зависимости теплофизических характеристик от температуры по (1) и (2), считая ε_i и β_i малыми параметрами в том смысле, что можно пренебречь их квадратами и произведениями, система (4) примет обобщенный вид:

$$\frac{\partial t_i}{\partial \tau} = a_{0i} \left[\frac{\partial^2 t_i}{\partial x^2} + \frac{\Gamma}{x} \frac{\partial t_i}{\partial x} \right] + \varepsilon_i \frac{a_{0i}}{2} \left[\frac{\partial^2 t_i^2}{\partial x^2} + \frac{\Gamma}{x} \frac{\partial t_i^2}{\partial x} \right] - \frac{\beta_i}{2} \frac{\partial t_i^2}{\partial \tau}, \quad (5)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

где Γ – коэффициент формы, для пластины (стены) $\Gamma = 0$; a – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Соответственно, начальные и граничные условия запишутся следующим образом:

$$-\frac{\partial t_i(l_0, \tau)}{\partial x} + H_{00} [t_i(l_0, \tau) - \varphi_1(\tau)] - \varepsilon_1 H_{01} t_i(l_0, \tau) \times \\ \times [t_i(l_0, \tau) - \varphi_1(\tau)] = 0, \quad (6)$$

$$t_i(x, 0) = F_i(x), \quad (7)$$

$$-\frac{\partial t_n(l_n, \tau)}{\partial x} + H_{0n} [t_n(l_n, \tau) - \varphi_n(\tau)] - \varepsilon_n H_{0n} t_n(l_n, \tau) \times \\ \times [t_n(l_n, \tau) - \varphi_n(\tau)] = 0, \quad (8)$$

где l_0 – расстояние от начала координат до внешней поверхности стены; l_n – расстояние от начала координат до внутренней поверхности стены; H – относительный коэффициент теплообмена:

$$H_{ij} = \frac{\alpha_i}{\lambda_j}. \quad (9)$$

$\varphi_1(\tau)$ – функция изменения температуры на внешней поверхности первого слоя; $\varphi_n(\tau)$ – функция изменения температуры на внешней поверхности n -го слоя.

Условия на контактах между слоями с учетом (8) и (9) определяются так:

$$\lambda_{0i} \left[\frac{\partial t_i(l_i, \tau)}{\partial x} + \frac{\varepsilon_i}{2} \frac{\partial t_i^2(l_i, \tau)}{\partial x} \right] = \lambda_{0(i+1)} \times \\ \times \left[\frac{\partial t_{i+1}(l_i, \tau)}{\partial x} + \frac{\varepsilon_{i+1}}{2} \frac{\partial t_{i+1}^2(l_i, \tau)}{\partial x} \right], \quad (10)$$

$$\lambda_{0i} \left[\frac{\partial t_i(l_i, \tau)}{\partial x} + \frac{\varepsilon_i}{2} \frac{\partial t_i^2(l_i, \tau)}{\partial x} \right] = \frac{1}{R_i} \times [t_{i+1}(l_i, \tau) - t_i(l_i, \tau)], \quad (11)$$

$i = 1, 2, \dots, (n-1)$,

где λ_{0i} – теплопроводность i -го слоя для задачи нулевого приближения, Вт/м²·°C; $\lambda_{0(i+1)}$ – теплопроводность $(i+1)$ -го слоя для задачи нулевого приближения, Вт/м²·°C; l_i – расстояние до предела i -го слоя (точка контакта слоев), м; R_i – термическое сопротивление на границе раздела двух слоев, (м·°C)/Вт.

Результаты расчетов по формулам (1) – (11), приведены на рис. 1.

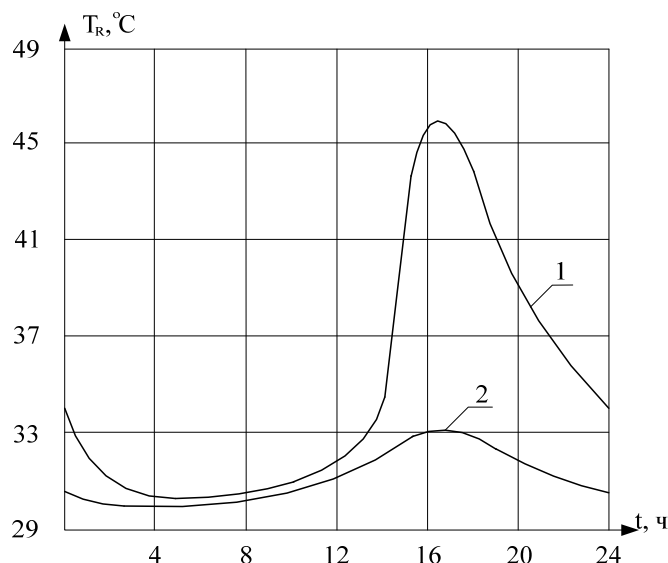


Рисунок – Изменение температуры внутреннего воздуха помещения в течение суток:
1 – ограждающие конструкции выполнены из многослойных стеновых панелей;
2 – ограждающие конструкции выполнены из кирпичной кладки.

Оценивая влияние сопротивления ограждающих конструкций на эффективность работы системы в условиях нестационарной теплопередачи через n -слойную среду (стену), установлено, что математическая модель теплопотерь через внешние стены здания учитывает влияние климатических факторов на теплофизические характеристики материалов, из которых она состоит. Уравнения описывающие процесс теплопередачи являются нелинейными и нестационарными (температура наружного воздуха меняется во времени).

Таким образом, приведенная модель теплопередачи через стены сооружений с учетом зависимости их теплофизических характеристик материалов от температуры повышает точность решений указанных задач до 15 ÷ 30 % по сравнению с обычными линейными методами. Указанное позволяет более точно корректировать «умное» распределение и транспортировку теплоносителя по внутридомовой системы отопления в динамическом режиме и экономить до 12–15 % тепловой энергии, а в сочетании с «пофасадным» регулированием – до 20–25 % (при условии отсутствия погодозависимого регулирования) добиться сокращения потребляемых ресурсов в отличие от известных систем.

По предварительной оценке, использование системы «REFLOW» в ВУЗах всей страны позволит: улучшить комфортные условия в помещении при работе системы отопления в импульсном режиме; сократить расходы на отопление ВУЗов Украины до 944 тыс. Гкал в год. Срок окупаемости предлагаемых мероприятий не превышает 2–3 отопительных периодов.

Список использованных источников

1. Покотиллов В.В. Регулирующие клапаны автоматизированных систем тепло– и холодо-снабжения: учебное пособие для инженеров, проектировщиков и студентов. – Вена: «HERZ Armaturen», 2017. – 232 с.
2. Радько И. П. Повышение мер по энергоэффективности и энергосбережению в высших учебных заведениях [Текст] / И. П. Радько, В. А. Наливайко, А. В. Окушко, А. В. Мищенко, Е. А. Антипов // Научный вестник Национального университета биоресурсов и природопользования Украины. Серия «Техника и энергетика АПК». – 2018. – № 283. – С. 275 – 280.
3. Радько И. П. Методика и оборудование для проведения энергетического аудита: [Электронный ресурс] / И. П. Радько, В. А. Наливайко, А. В. Окушко, А. В. Мищенко, Е. А. Антипов // Энергетика и автоматика. – 2018. – № 1. – С. 123–134.
4. Козырский В. В. Результаты упрощенного энергоаудита объектов НУБиП Украины: [Электронный ресурс] / В. Козырский, А. Н. Берека, А. В. Шелиманова, Е. А. Антипов // Энергетика и автоматика. – 2012. – № 1 (11). – С. 55–63.
5. Драганов Б.Х., Черних Л.Ф., Ферт А.Р. Методика расчета теплового режима наружных ограждающих конструкций сельскохозяйственных зданий. – К.: УСХА, 1991. – 126 с.