

# 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](mailto: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, известны 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  $\lambda_{0i}$  – значение коэффициента теплопроводности для  $i$ -того слоя при температуре  $t_0$ , Вт/(м·°C);  $\varepsilon_i$  – 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);  $\beta_i$  – 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  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи (характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью ограждающей конструкции и средой), Вт/(м<sup>2</sup>·°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  $\text{div}$  – дивергенция;  $C_i$  – теплоемкость  $i$ -того слоя при температуре  $t_i$ , кДж/(кг·°C);  $\nabla$  – оператор Лапласа в декартовой системе координат;  $p_i$  – удельная мощность внутренних источников теплоты для  $i$ -того слоя, Вт/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – 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  $\varepsilon_i$  и  $\beta_i$  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  $\Gamma$  – коэффициент формы, для пластины (стены)  $\Gamma = 0$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/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:

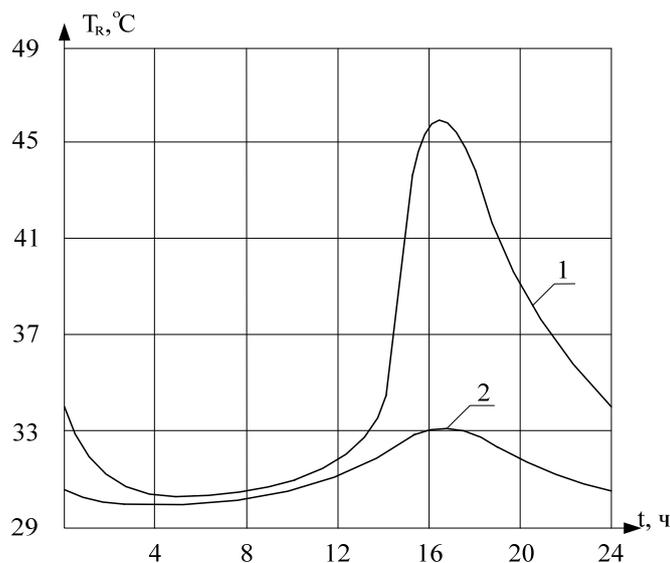
$$\lambda_{0i} \left[ \frac{\partial t_i(l_i, \tau)}{\partial x} + \frac{\varepsilon_i}{2} \frac{\partial t_i^2(l_i, \tau)}{\partial x} \right] = \lambda_{0(i+1)} \times \\ \times \left[ \frac{\partial t_{i+1}(l_i, \tau)}{\partial x} + \frac{\varepsilon_{i+1}}{2} \frac{\partial t_{i+1}^2(l_i, \tau)}{\partial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

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

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

где  $\lambda_{0i}$  – теплопроводность  $i$ -го слоя для задачи нулевого приближения, Вт/м<sup>2</sup>·°С;  $\lambda_{0(i+1)}$  – теплопроводность  $(i+1)$ -го слоя для задачи нулевого приближения, Вт/м<sup>2</sup>·°С;  $l_i$  – расстояние до предела  $i$ -го слоя (точка контакта слоев), м;  $R_i$  – термическое сопротивление на границе раздела двух слоев, (м·°С)/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.