

УДК 624.131

## ОПТИМАЛЬНОЕ (ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ) ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ ЗДАНИЯ В СИСТЕМЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО ОТОПЛЕНИЯ

**Сабденов Каныш Оракбаевич,**

д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры общей и теоретической физики  
Физико-технического факультета Евразийского национального  
университета им. Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан,  
010008, г. Астана, ул. Мунайпасова, 5. E-mail: sabdenovko@yandex.kz

**Байтасов Талгат Маратович,**

д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Технология промышленного  
и гражданского строительства», декан архитектурно-строительного  
факультета Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева,  
Республика Казахстан, 010008, г. Астана, ул. Мунайпасова, 5.  
E-mail: baitasov\_tm@enu.kz

**Цель работы:** найти условия достижения минимума потерь энергии при обогреве здания в системе центрального отопления.

**Актуальность исследования.** Быстро растущее мировое энергопотребление уже вызывает беспокойство из-за трудностей, возникающих при поставке энергии, истощения энергетических ресурсов и тяжелого воздействия на окружающую среду (разрушение озонового слоя, глобальное потепление, изменение климата и др.). Для решения возникающих проблем необходимо точное физическое и математическое моделирование транспорта и потребления энергии. Анализ такой модели с применением методов теории оптимизации позволит найти наилучшие решения снабжения энергией.

**Методы исследований:** анализ и обобщение ранее полученных теоретических результатов и формулировка новых подходов.

**Результаты.** Представлен краткий обзор стратегии и методов эффективного обеспечения энергией общественных, коммерческих и жилых зданий. Основное внимание уделяется системе центрального теплоснабжения. Обеспечение энергоэффективного теплоснабжения рассматривается как математическая минимаксная задача. Сформулирована задача оптимизации теплоснабжения здания, подключенного к системе центрального отопления. Критерием оптимальности является поддержание внутри здания комфортной температуры и минимум потерь энергии. Найдены простейшие частные решения задачи, и предложены необходимые расчетные формулы для обеспечения оптимального теплоснабжения. Получено новое уравнение для идеального температурного графика в зависимости температуры теплоносителя от температуры наружного воздуха. Существуют два наиболее важных параметра: 1) скорость теплообмена между отопительными приборами и помещениями здания; 2) скорость теплообмена между помещениями здания и наружным воздухом. В зависимой системе отопления (и без применения технологии подземного аккумулирования энергии) наилучшими решениями являются следующие: 1) снижение эффективного коэффициента теплоотдачи через наружные стены; 2) строгое соблюдение температурного графика, и он должен быть индивидуальным для каждого здания.

**Ключевые слова:**

Энергоэффективные здания, оптимизация теплоснабжения, тепловой пункт, система отопления здания, температурный график.

### Введение

В современном городе основное потребление энергии сосредоточено в жилых, общественных и коммерческих зданиях, куда энергия преимущественно поставляется по системе центрального энергоснабжения [1]. Поэтому вопрос об экономном расходовании любых видов энергии тесно связан с проектированием таких зданий, где учитываются не только прочность и устойчивость здания к различным внешним воздействиям, но и способы поддержания внутри здания комфортного микроклимата, суточное потребление электрической и тепловой энергии, тщательный подбор строительных материалов.

Новые подходы к проектированию энергоэффективных зданий подразумевают полное обеспечение энергией за счет внутренних источников [2]. Например, для сбалансированного потребления энергии предлагается «зеленая крыша» [3], установить новые нормативные требования к системе

вентиляции и кондиционирования [4], разработать общую энергетическую модель для зданий [5–7], где принимаются в качестве переменных все основные параметры, характеризующие архитектуру, строительные материалы и системы жизнеобеспечения. В энергетической модели здания может учитываться также потребление энергии, ее выработка из возобновляемых источников в разное время суток и время года [8–10].

Наиболее полный обзор исследований по теплоснабжению зданий и экономному расходованию тепловой и электрической энергии содержится в [11]. В настоящей работе основное внимание уделяется системам централизованного теплоснабжения, распространенным во многих северных странах, Средней Азии, а также в северной части Китая. Здесь особенность развития концепции энергетической эффективности зданий заключается в необходимости рассматривать их совместно с системой теплоснабжения.

Теплоснабжение зданий в системе центрального отопления должно удовлетворять следующим требованиям:

- 1) средняя температура  $\langle T_r \rangle$  в помещениях должна быть максимально близкой комфортному для человека значению  $T_{opt} = \text{const}$ ;
- 2) общие затраты (например, на работу насосов для прокачки теплоносителя) и потери энергии на участке трубопроводов ( $E_p$ , Дж/с) между поставщиком и потребителем теплоты и в самом здании ( $E_b$ , Дж/с) должны быть минимальными.

Температура  $\langle T_r \rangle$ , потери энергии  $E_p$ ,  $E_b$  зависят от многих переменных, которые являются характеристиками трубопроводов, системы автоматического регулирования теплоснабжения здания, системы отопления здания и его теплоизоляции, а также состояния погоды [11, 12]. Но если перечисленные два требования выполнены, то можно констатировать выполнение условия энергетической эффективности. Разумеется, такое понимание энергоэффективности несколько уже, чем принятое для зданий с автономным отоплением [1–5], где есть стремление к проектированию, т. н. «зданий нулевой энергии» [2].

Существуют еще несколько способов определения энергетической эффективности систем транспорта и распределения теплоты [13, 14]. Пусть  $t_p$  – срок службы системы. За этот период времени к потребителю поставляется  $Q$  Гкал теплоты и затрачивается  $P_\Sigma$  долларов США. Тогда их отношение  $W = Q/P_\Sigma$  можно принять за показатель энергетической эффективности системы [13]: чем выше  $W$ , тем система эффективнее. Таким образом, общая формулировка оптимизационной задачи имеет вид  $W \rightarrow \text{max}$ .

Следующая [14] общая постановка оптимизационной задачи включает минимизацию суммы из трех функций – затраты электроэнергии на подачу теплоты потребителю, потери теплоты в системе транспорта и распределения, затраты электроэнергии и потери тепловой энергии при аварии.

Подведем итог к краткому обзору исследований по энергоэффективности зданий и систем энергоснабжения: предложенные ранее подходы [8–10, 13, 14] формулируют задачу в общем виде, на их основе нельзя получить конкретные числовые данные или соотношения. Методы оптимизации тепловой эффективности зданий [6] подразумевают детальное моделирование распределения и переноса тепловой энергии через наружные стены. Это несколько узкая и частная формулировка задачи эффективного теплоснабжения позволяет сформулировать конкретные меры, необходимые для снижения потерь энергии в здании. Более широкая постановка задачи должна включать еще систему регулирования тепловым режимом в здании и линии подачи тепловой энергии в здание, т. е. всю систему теплоснабжения. Настоящая работа посвящена формулировке в явном виде математической задачи оптимизации теплоснабжения в смысле ее энергетической эффективности и поиску ее решений.

### Основные уравнения

Как правило, здания имеют большое число секций (помещений), каждая из них имеет свою температуру  $T_{rn}$ , где  $n$  – номер секций. Для упрощения задачи используем среднее значение температуры  $\langle T_r \rangle$  для всех секций.

На практике идеальных теплоизоляционных материалов не существует. Поэтому оптимизационную задачу приходится решать при ограниченных пределах изменения их теплофизических свойств. Точно также ограничены пределы изменения диаметров, гидравлических и теплофизических свойств трубопроводов в системе теплоснабжения.

Если известны потоки теплоты через наружные стенки трубопроводов  $J_p$  и здания  $J_b$ , то потери через стенки  $E_{p,out}$  и  $E_{b,out}$  можем записать в виде

$$E_{p,out} = \int_{S_p} J_p ds, \quad E_{b,out} = \int_{S_b} J_b ds.$$

Здесь  $S_p$ ,  $S_b$  – площади поверхности теплоизоляционного материала труб и площадь наружной поверхности здания.

Пусть  $E_{p,in} = Q_1 \Delta p_1$  – затраты энергии на прокачку теплоносителя по трубопроводам от поставщика до потребителя с объемным расходом  $Q_1$  и перепадом давления  $\Delta p_1$ ;  $E_{b,in} = Q_2 \Delta p_2$  – затраты энергии в системе регулирования теплоснабжением здания, где регулировка производится с объемным расходом  $Q_2$  и перепадом давления  $\Delta p_2$ . Тогда в общем виде задачу оптимизации можно записать как

$$E_p = E_{p,in} + E_{p,out} = Q_1 \Delta p_1 + \int_{S_p} J_p ds \rightarrow \min,$$

$$E_b = E_{b,in} + E_{b,out} = Q_2 \Delta p_2 + \int_{S_b} J_b ds \rightarrow \min,$$

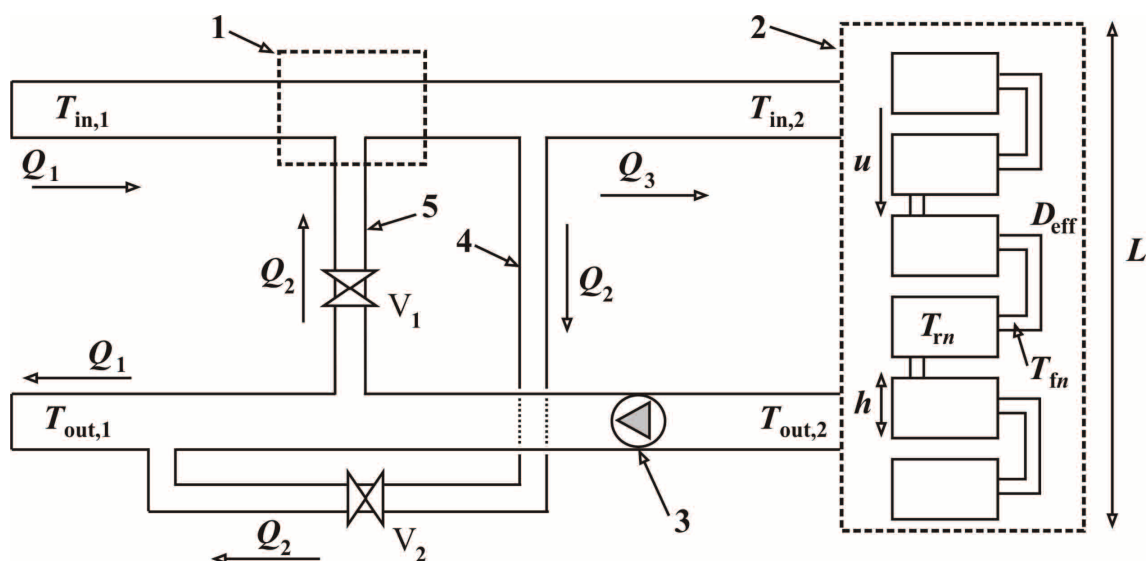
$$f = \left( \frac{\langle T_r \rangle - T_{opt}}{T_{outs}} \right)^2 \rightarrow \min,$$

где  $T_{outs}$  – температура наружного воздуха.

Разобьем всю задачу на части, предполагая, что условие  $E_p \rightarrow \min$  выполнено. Тогда в дальнейшем задача оптимизации заключается в поиске минимума величины  $E_b$  и минимизации отклонения температуры  $\langle T_r \rangle$  от комфортного значения  $T_{opt}$ .

Наиболее распространенный способ регулирования теплоснабжения здания – это смешение теплоносителя из обратного и подающего трубопровода [11, 15–19]. Новая гидравлическая схема теплового пункта (и здания), включающая также отводящий трубопровод [20], приведена на рисунке.

Здесь приняты обозначения:  $T_{in,1}$ ,  $T_{out,1}$  – температура теплоносителя на входе и выходе теплового пункта;  $T_{in,2}$ ,  $T_{out,2}$  – температура теплоносителя на входе и выходе системы отопления здания;  $u$  – скорость теплоносителя в системе отопления с длиной  $L$  и эффективным диаметром трубопроводов  $D_{eff}$ ;  $h$  – расстояние между секциями;  $Q_3$  – расход через систему отопления.



**Рисунок.** Гидравлическая схема теплового пункта (и здания), 1 – узел смешения; 2 – система отопления здания; 3 – циркуляционный насос; 4 – отводящий трубопровод; 5 – трубопровод для подачи теплоносителя в узел смешения;  $V_1, V_2$  – вентили

**Figure.** Hydraulic circuit heating unit (and building), 1 – mixing unit; 2 – heating system of a building; 3 – circulation pump; 4 – discharge line; 5 – pipeline for supplying coolant to a mixing unit;  $V_1, V_2$  – valves

Отводящий трубопровод служит для возврата части тепловой энергии в городскую сеть, позволяет не только гибко регулировать потребление тепловой энергии, но и легко избежать возможного перегрева помещений [20].

В независимой системе центрального отопления [11, 15, 16] отводящий трубопровод провести трудно, для этого в системе отопления здания необходимо поддерживать давление выше, чем в городской сети трубопроводов. Это сопряжено с рядом технических трудностей и дополнительными затратами энергии.

Если  $Q_1$  и  $Q_2$  – соответственно объемные расходы теплоносителя в подающем трубопроводе и трубопроводе смесителя, то изменение подачи тепловой энергии в здание достигается вариацией коэффициента смешения  $K=Q_2/Q_1$ . Тогда на первый план выходит поиск оптимального теплоснабжения, состоящего в выявлении таких значений коэффициента смешения  $K$ , которые обеспечивали бы температуру в помещениях, наиболее близкую к фиксированной температуре  $T_{opt}$ . Температуры на входе  $T_{in,1}$  и снаружи здания  $T_{outs}$  могут меняться. Остальные параметры процесса остаются фиксированными.

Пусть здание имеет  $N$  этажей (секций). Примем следующие допущения: все этажи имеют одинаковую планировку и равные объемы воздушного пространства (помещения); обогревающие радиаторы системы отопления на всех этажах эквивалентны; помещения и радиаторы на этаже с номером  $n$  можно характеризовать соответственно средними по пространству температурами  $T_{rn}$  и  $T_{fn}$ , причем температура радиаторов и теплоносителя в них одинакова.

Поток теплоты между средами, находящимися при различных температурах, можно представить как произведение разности их температур на коэффициент теплоотдачи [17, 18]. Тогда закон сохранения энергии (без учета внутренних источников энергии, ее радиационного переноса) для теплообмена между помещениями, системой отопления и наружным воздухом на этаже с номером  $n$  можно представить в виде [21, 22]

$$\frac{dT_m}{dt} = \alpha(T_{in} - T_m) - \gamma(T_m - T_{outs}),$$

$$\frac{dT_{fn}}{dt} = \frac{u}{h}(T_{i,n-1} - T_{fn}) - \delta\alpha(T_{fn} - T_m), \quad n = 1, 2, \dots, N;$$

$$\alpha = \frac{\alpha_1 S_1}{c_p \rho V_r}, \quad \gamma = \frac{\alpha_2 S_2}{c_p \rho V_r}, \quad \delta = \frac{c_p \rho V_r}{c_f \rho_f V}.$$

Здесь  $t$  – время;  $c_p, \rho$  – теплоемкость при постоянном давлении и плотность воздуха;  $c_f, \rho_f$  – теплоемкость и плотность теплоносителя;  $V_r$  – объем помещений в секции;  $V$  – объем теплоносителя в отопительных приборах (в радиаторах);  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи на поверхности контакта воздуха с радиаторами. Эта поверхность имеет площадь  $S_1$ , коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  между помещениями и наружным воздухом принимается как среднее значение по поверхностям наружных стен и окон помещения, имеющих суммарную площадь  $S_2$ .

Для номера  $n=1$  полагаем  $T_{i,0}=T_{in,2}$  – температура теплоносителя на входе в систему отопления здания.

Нахождение стационарного распределения температуры теплоносителя  $T_{fn}$  и в помещениях здания  $T_{rn}$  сводится к решению системы уравнений

$$\begin{aligned}
 \frac{u}{h}(T_{in,2} - T_{f1}) - \alpha\delta(T_{f1} - T_{r1}) &= 0, \\
 \alpha(T_{f1} - T_{r1}) - \gamma(T_{r1} - T_{outs}) &= 0; \\
 \frac{u}{h}(T_{f1} - T_{f2}) - \alpha\delta(T_{f2} - T_{r2}) &= 0, \\
 \alpha(T_{f2} - T_{r2}) - \gamma(T_{r2} - T_{outs}) &= 0; \\
 \dots\dots\dots \\
 \frac{u}{h}(T_{fn-1} - T_{fn}) - \alpha\delta(T_{fn} - T_{rn}) &= 0, \\
 \alpha(T_{fn} - T_{rn}) - \gamma(T_{rn} - T_{outs}) &= 0; \\
 \dots\dots\dots \\
 \frac{u}{h}(T_{fn-1} - T_{fn}) - \alpha\delta(T_{fn} - T_{rn}) &= 0, \\
 \alpha(T_{fn} - T_{rn}) - \gamma(T_{rn} - T_{outs}) &= 0. \tag{1}
 \end{aligned}$$

Уравнения (1) имеют решения

$$\begin{aligned}
 T_{in} &= T_{outs} + \frac{T_{in,2} - T_{outs}}{\left(1 + \frac{\alpha\gamma\delta h}{\alpha + \gamma u}\right)^n}, \\
 T_{rn} &= T_{outs} + \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} \frac{T_{in,2} - T_{outs}}{\left(1 + \frac{\alpha\gamma\delta h}{\alpha + \gamma u}\right)^n}, \quad n = 1, 2, \dots, N. \tag{2}
 \end{aligned}$$

На практике параметр  $\delta \sim 1$ . Случай  $\delta = 1$  рассмотрен в работе [21].

Температура  $T_{in,2}$  и температура на выходе из системы отопления здания  $T_{out,2}$  легко определяются из решения системы двух алгебраических уравнений. Первое из них следует из уравнения сохранения энергии  $Q_3 T_{in,2} = Q_2 T_{out,2} + Q_1 T_{in,1}$ , записанного для узла смешения и уравнения сохранения массы  $Q_3 = Q_1 + Q_2$ , и имеет вид

$$T_{in,2} = \frac{T_{in,1} + KT_{out,2}}{1 + K}. \tag{3}$$

Второе уравнение следует из условия равенства температуры теплоносителя на последнем этаже здания температуре  $T_{out,2}$ . Если здание имеет  $N$  этажей, то необходимо привлечь замыкающее соотношение [22]

$$T_{fn} = T_{out,2}. \tag{4}$$

Подставив (3), (4) в первую формулу из (2) при  $n=N$ , получим

$$(T_{out,2} - T_{outs}) \left(1 + \frac{\alpha\gamma\delta h}{\alpha + \gamma u}\right)^N = \frac{T_{in,1} + KT_{out,2}}{1 + K} - T_{outs}.$$

Отсюда находим  $T_{out,2}$ :

$$T_{out,2} = \frac{\frac{T_{in,1}}{1 + K} + T_{outs} \left[ \left(1 + \frac{\alpha\gamma\delta h}{\alpha + \gamma u}\right)^N - 1 \right]}{\left(1 + \frac{\alpha\gamma\delta h}{\alpha + \gamma u}\right)^N - \frac{K}{1 + K}}. \tag{5}$$

Средняя температура в помещениях

$$\begin{aligned}
 \langle T_{rn} \rangle &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_{rn} = \\
 &= T_{outs} + \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} \frac{T_{in,2} - T_{outs}}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{\left(1 + \frac{\alpha\gamma\delta h}{\alpha + \gamma u}\right)^n}.
 \end{aligned}$$

После нахождения суммы геометрической прогрессии получим

$$\begin{aligned}
 \langle T_{rn} \rangle &= T_{outs} + \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} \frac{T_{in,2} - T_{outs}}{N} \times \\
 &\times \frac{\alpha + \gamma u}{\alpha\gamma\delta h} \left[ 1 - \left(1 + \frac{\alpha\gamma\delta h}{\alpha + \gamma u}\right)^{-N} \right]. \tag{6}
 \end{aligned}$$

В выражениях (2), (5) и (6) содержится малый параметр

$$\varepsilon = \frac{\alpha\gamma\delta h}{\alpha + \gamma u} \ll 1.$$

По этой причине для относительно небольших зданий ( $N \leq 10$ ) температура в помещениях слабо меняется и практически линейно зависит от номера  $n$ . Используя разложения в ряд Тейлора, выражению в квадратных скобках в правой части (6) придадим форму

$$\frac{\varepsilon N(1 + 2\varepsilon)}{1 + \varepsilon N}.$$

Такая форма привлекательна тем, что в двух предельных случаях  $\varepsilon \rightarrow 0$  и  $N \rightarrow \infty$  сохраняет свойство исходного выражения.

Теперь среднюю температуру в помещениях  $\langle T_r \rangle$  на всех этажах можно представить как

$$\langle T_r \rangle \approx T_{outs} + \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} \frac{1 + 2\varepsilon}{1 + \varepsilon N} (T_{in,2} - T_{outs}). \tag{7}$$

Раскладывая в ряд Тейлора правую часть (5) для температуры  $T_{out,2}$  получим приближенное выражение

$$\begin{aligned}
 T_{out,2} &= T_{in,1} \left[ 1 - \chi(1 + K) \left( 1 - \frac{T_{outs}}{T_{in,1}} \right) \right], \\
 \chi &= \varepsilon N = \frac{\alpha\gamma\delta L}{\alpha + \gamma u}, \quad L = hN,
 \end{aligned}$$

Тогда из (3) следует

$$T_{in,2} = T_{in,1} \left[ 1 - \chi K \left( 1 - \frac{T_{outs}}{T_{in,1}} \right) \right]. \tag{8}$$

Из (7) и (8) находим

$$\begin{aligned}
 \langle T_r \rangle &\approx T_{outs} + \\
 &+ \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} \frac{1 + 2\varepsilon}{1 + \varepsilon N} \left( T_{in,1} \left[ 1 - \chi K \left( 1 - \frac{T_{outs}}{T_{in,1}} \right) \right] - T_{outs} \right). \tag{9}
 \end{aligned}$$

**Условия обеспечения оптимальности теплоснабжения**

Условие минимума потери энергии в здании можно записать в виде

$$E_b = Q_1 \Delta p_2 K + \alpha_2 S_2 (\langle T_r \rangle - T_{outs}) \rightarrow \min,$$

где  $\alpha_2$  имеет смысл эффективного коэффициента теплоотдачи. Параметром  $\alpha_2$  учитываются все виды потерь теплоты: конвекцией, излучением и др.

С учетом равенства  $K=Q_2/Q_1$  и уравнения (9)

$$E_b = Q_1 \Delta p_2 K + \alpha_2 S_2 \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} \times \frac{1 + 2\varepsilon}{1 + \varepsilon N} \left( T_{in,1} \left[ 1 - \chi K \left( 1 - \frac{T_{outs}}{T_{in,1}} \right) \right] - T_{outs} \right) \rightarrow \min. \quad (10)$$

Перепад давления  $\Delta p_2$  необходим для обеспечения движения теплоносителя с расходом  $Q_2$  по трубопроводу – 5 на рисунке. Для этого сначала необходимо превысить давление  $\Delta p_1$ . Поэтому

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 + \zeta \rho_f \frac{Q_2^2}{S^2} = \Delta p_1 + \zeta \rho_f \frac{Q_1^2}{S^2} K^2, \quad (11)$$

где  $\zeta$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $S$  – площадь (внутреннего) сечения трубы – 5.

С учетом (9) условие комфортности примет вид

$$f(K, u) = \frac{1}{T_{outs}^2} (\langle T_r \rangle - T_{opt})^2 = \frac{1}{T_{outs}^2} \times \left[ T_{outs} - T_{opt} + \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} \frac{1 + 2\varepsilon}{1 + \varepsilon N} \times \left( T_{in,1} \left[ 1 - \chi K \left( 1 - \frac{T_{outs}}{T_{in,1}} \right) \right] - T_{outs} \right) \right] \rightarrow \min. \quad (12)$$

Поиск минимума можно производить по любым входящим в (10)–(12) параметрам. Выбор этих параметров зависит от конкретных условий, накладываемых запросами практики. Уравнения (10)–(12) применимы как для зависимой, так и для независимой системы отопления.

Одно из простейших решений задачи (10)–(12) может быть найдено с требованием  $K=0$  [23], оно может выполняться для зависимых систем теплоснабжения [11, 15, 18]. Это равенство означает отсутствие затрат энергии на работу циркуляционного насоса – 3 (рисунок). Тогда из (12) следует

$$T_{in,1} = T_{outs} + \frac{\alpha + \gamma}{\alpha} \frac{1 + \varepsilon N}{1 + 2\varepsilon} (T_{opt} - T_{outs}). \quad (13)$$

Такая связь между  $T_{in,1}$  и  $T_{outs}$  называется температурным графиком. Примечательно, что здесь отсутствует зависимость от параметра  $\delta$ .

Если пренебречь малыми величинами  $\varepsilon N$  и  $2\varepsilon$ , то из уравнения (13) следует известное уравнение [23]

$$T_{in,1} = T_{outs} + \frac{\alpha + \gamma}{\alpha} (T_{opt} - T_{outs}).$$

Случай  $K=0$ , выполняющийся при отсутствии в тепловом пункте циркуляционного насоса, явля-

ется идеальным для экономии энергии. Если такое равенство достигнуто, то потери энергии в здании происходят только через наружные стены и окна и равны

$$E_b = \alpha_2 S_2 (T_{opt} - T_{outs}). \quad (14)$$

Дальнейшая минимизация  $E_b$  может быть обеспечена снижением эффективного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_2$  и площади  $S_2$ . Если архитектура здания не позволяет сильно снижать  $S_2$ , то технически возможное неограниченное снижение  $\alpha_2$  означает  $\gamma \rightarrow 0$ . В этом пределе температурный график становится тривиальным:

$$T_{in,1} = T_{opt}.$$

Уравнения (13), (14) справедливы для любых зданий с произвольным числом секций  $N$ . Может только меняться температурный график. Например, предельный (скорее всего гипотетический) случай очень больших зданий  $N \gg 1$  (также и  $\varepsilon N \gg 1$ ) приводит к температурному графику

$$T_{in,1} = T_{outs} + \gamma \delta \frac{hN}{u} (T_{opt} - T_{outs}). \quad (15)$$

Для дальнейшего обеспечения энергетической эффективности требуется малое числовое значение комплекса  $\gamma \delta h / u$ , что может быть достигнуто, например, не только снижением коэффициента теплоотдачи  $\alpha_2$ , но и высокой скоростью теплоносителя  $u$  в системе отопления.

При использовании уравнения (15) необходимо принимать во внимание связь  $u(K)$ , которая может иметь произвольный вид в случае наличия отводящего трубопровода – 4 (рисунок) и рабочего положения вентилей  $V_1, V_2$ . В частности, если расходы в трубопроводах – 4 и 5 равны, то

$$u = \frac{4Q_1}{\pi D_{eff}^2}.$$

Для независимых систем теплоснабжения  $K \neq 0$  [11, 15, 18] и задача поиска оптимальных режимов теплоснабжения усложняется.

**Заключение**

В настоящей работе сформулирована задача оптимизации теплоснабжения здания в системе центрального отопления, где критерием оптимальности является поддержание внутри здания комфортной для человека температуры.

Получены простейшие решения для зависимой системы теплоснабжения. Найдены выражения для температурного графика и величины потерь энергии в случае небольших ( $N \sim 1$ ) и очень больших ( $N \rightarrow \infty$ ) зданий. Для минимизации затрат электрической ( $K=0$ ) и потерь тепловой энергии и обеспечения комфортной температуры в здании необходимо строго придерживаться температурного графика и уменьшать коэффициент теплоотдачи через наружную поверхность здания. В случае небольших зданий оптимальный температурный график отопления не зависит от параметра  $\delta$ .

Изложенные выше новые теоретические данные об условиях достижения энергетически эффективных систем теплоснабжения указывают на пути решения такой задачи. *Во-первых*, можно создавать более совершенные тепловые пункты [16, 24] с целью достижения равенств  $K=0$  и  $\langle T_r \rangle = T_{\text{опт}}$ , снижения в них потерь тепла из-за увлажнения теплоизоляционного покрытия трубопроводов [25]. *Во-вторых*, можно совершенствовать строительные материалы, конструкционные элементы и архитектуру здания [2, 4–7], что означает снижение  $\alpha_2$  и площади  $S_2$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout Ch. A review on buildings energy consumption information // *Energy and Buildings*. – 2008. – V. 40. – Iss. 3. – P. 394–398.
- Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies / A. J. Marszal, P. Heiselberg, J. S. Bourrelle, E. Musall, K. Voss, I. Sartori, A. Napolitano // *Energy and Buildings*. – 2011. – V. 43. – Iss. 4. – P. 971–979.
- Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit / H.F. Castleton, V. Stovin, S.B.M. Beck, J.B. Davison // *Energy and Buildings*. – 2010. – V. 42. – Iss. 10. – P. 1582–1591.
- A review of HVAC systems requirements in building energy regulations / L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, J. F. Coronel, I. R. Maestre // *Energy and Buildings*. – 2011. – V. 43. – Iss. 2–3. – P. 255–268.
- Ryana E.M., Sanquist Th.F. Validation of building energy modeling tools under idealized and realistic conditions // *Energy and Buildings*. – April 2012. – V. 47. – P. 375–382.
- Табунщиков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. – М.: Изд-во АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
- Малявина Е.Г. Теплопотери здания: справочное пособие. – М.: Изд-во АВОК-ПРЕСС, 2007. – 265 с.
- Swan L.G., Ugursal V.I. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2009. – V. 13. – Iss. 8. – P. 1819–1835.
- McKenna E., Krawczynski M., Thomson M. Four-state domestic building occupancy model for energy demand simulations // *Energy and Buildings*. – 2015. – V. 96. – Iss. 1. – P. 30–39.
- A bottom-up stochastic model to predict building occupants' time-dependent activities / U. Wilke, F. Haldi, J.-L. Scartezzini, D. Robinson // *Building and Environment*. – February 2013. – V. 60. – P. 254–264.
- Energy Plus. Engineering Reference. Ed. E. Orlando. 2013. URL: <http://energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy> (дата обращения: 14.09.2014).
- Теплоснабжение и вентиляция / Б.М. Хрусталева, Ю.Я. Кувшинов, В.М. Копко и др. – М.: Изд-во АСВ, 2005. – 784 с.
- Оптимизация затрат при проектировании и эксплуатации тепловых схем и систем теплоснабжения потребителей / В.Р. Ведрученко, В.В. Крайнов, А.П. Стариков, Д.А. Мещеряков, П.В. Петров // *Промышленная энергетика*. – 2013. – № 2. – С. 33–37.
- Колосов М.В., Жуйков А.В. Оптимизация параметров и конфигураций тепловых сетей // *Промышленная энергетика*. – 2013. – № 7. – С. 41–48.
- Стандартные автоматизированные блочные тепловые пункты «Danfoss» / В.В. Невский, Д.А. Дудник, С.В. Семянников и др. – М.: ООО Данфосс, 2011. – 48 с.
- Пырклов В.В. Современные тепловые пункты: Автоматика и регулирование. – Киев: П ДП «Такі справи», 2007. – 250 с.
- Зингер Н.М. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 320 с.
- Апарцев М.М. Наладка водяных систем централизованного теплоснабжения: Справочно-методическое пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 204 с.
- Энергосбережение в тепловых пунктах жилых и общественных зданий. Ч. 1. Общая модель теплового пункта / Б.А. Унаспеков, К.О. Сабденов, М.Ж. Кокарев, Б.А. Игембаев // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 31–35.
- Тепловой режим в здании при наличии смещения теплоносителя прямого и обратного трубопровода / К.О. Сабденов, Б.А. Унаспеков, М. Ерзада, Б.А. Игембаев // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87. – № 1. – С. 71–78.
- Сабденов К.О., Байтасов Т.М., Ерзада М. Оптимальное регулирование теплоснабжением здания. Ч. 1. Формулировка задачи и основные формулы // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87. – № 4. – С. 814–821.
- Энергосбережение в тепловых пунктах жилых и общественных зданий. Ч. 2. Модель обогрева здания / Б.А. Унаспеков, К.О. Сабденов, М.Ж. Кокарев, Б.А. Игембаев // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 35–39.
- Сабденов К.О., Байтасов Т.М., Ерзада М. Оптимальное регулирование теплоснабжением здания. Ч. 2. Анализ и результаты // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87. – № 4. – С. 822–828.
- Лисенко О.М., Кужель Л.М., Божко І.К. Управління теплопостачанням будівлі на основі використання індивідуального теплового пункту оригінальної конструкції // *Всхідно-європейський журнал передових технологій*. – 2015. – Т. 1. – № 8 (73). – С. 61–67.
- Половников В.Ю., Губина Е.В. Тепломассоперенос в увлажненной тепловой изоляции теплопроводов, работающих в условиях затопления // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87. – № 5. – С. 1106–1112.
- Моделирование теплопереноса в водоносном горизонте при аккумуляции и отборе тепловой энергии / А.В. Инкин, И.А. Садовенко, Д.В. Рудаков, З.Н. Якубовская // *Науковий вісник НГУ*. – 2012. – № 1. – С. 40–45.
- Inkin A.V., Sadovenko I.A., Rudakov D.V. Geotechnical schemes to the multi-purpose use of geothermal energy and resources of abandoned mines // *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining* / Eds. V. Bondarenko, I. Kovalevs'ka, K. Ganushevych. – London: Taylor & Francis Group, 2014. – P. 443–450.

Поступила 16.04.2015 г.

UDC 624.131

## OPTIMAL (ENERGY EFFICIENT) HEAT SUPPLY TO BUILDINGS IN CENTRAL HEATING SYSTEM

Kanysh O. Sabdenov,

L.N. Gumilev Eurasian National University, 5, Munaitpasov Street,  
Astana, 010008, Kazakhstan. E-mail: sabdenovko@yandex.kz

Talgat M. Baitasov,

L.N. Gumilev Eurasian National University, 5, Munaitpasov Street,  
Astana, 010008, Kazakhstan. E-mail: baitasov\_tm@enu.kz

**The aim** of the research is to find the conditions for achieving minimum of energy loss when heating a building in central heating system.

**Relevance of research.** Rapidly growing world energy consumption has already raised concerns over supply difficulties, exhaustion of energy resources and heavy environmental impacts (ozone layer depletion, global warming, climate change, etc.). The solution of the arising problems requires exact physical and mathematical modeling of energy transport and consumption. The analysis of this model using the methods of optimization theory will allow finding the best solutions of energy supply.

**Research methods:** analysis and generalization of previously obtained theoretical results and formulation of new approaches.

**Results.** The paper introduces a brief review of strategies and methods of effective energy supply for public, commercial and residential buildings use. The increasing attention is paid to the central heating system. Providing power effective heat supply is considered as a mathematical minimax problem. The authors have stated the problem of optimizing heat supply of the building connected to the central heating system. The criterion of optimality is maintenance of temperature comfortable for a person in the building and minimum of energy losses. The simplest private solutions of a task are found and necessary settlement formulas for providing the optimality of heat supply are offered. A new equation for the ideal temperature chart – the dependence of the coolant temperature on the outdoor temperature – is obtained. There are two most important parameters: 1) the rate of heat transfer between the heaters and the rooms of the building; 2) the rate of heat exchange between the building and the outside air. In the dependent heating system (without technology of underground energy storage) the best solution are the following: 1) the decrease of the effective coefficient of heat transfer through external walls; 2) strict respect to the temperature chart, and it must be individualized for each building.

**Key words:**

Energy-efficient buildings, optimization of heat supply, thermal point, system of a building heating, temperature chart.

## REFERENCE

- Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout Ch. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 2008, vol. 40, Iss. 3, pp. 394–398.
- Marszal A.J., Heiselberg P., Bourrelle J.S., Musall E., Voss K., Sartori I., Napolitano A. Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, 2011, vol. 43, Iss. 4, pp. 971–979.
- Castleton H. F., Stovin V., Beck S. B. M., Davison J. B. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, 2010, vol. 42, Iss. 10, pp. 1582–1591.
- Pérez-Lombard L., Ortiz J., Coronel J.F., Maestre I.R. A review of HVAC systems requirements in building energy regulations. *Energy and Buildings*, 2011, vol. 43, Iss. 2–3, pp. 255–268.
- Ryana E.M., Sanquist Th.F. Validation of building energy modeling tools under idealized and realistic conditions. *Energy and Buildings*, April 2012, vol. 47, pp. 375–382.
- Tabunshikov Yu.A., Brodach M.M. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsia teplovoy effektivnosti zdaniy* [Mathematical modeling and optimization of thermal efficiency of buildings]. Moscow, AVOK-PRESS, 2002. 194 p.
- Malyavina E.G. *Teplopoteri zdania. Spravochnoe posobie* [Heat loss of the building. Handbook]. Moscow, AVOK-PRESS, 2007. 265 p.
- Swan L.G., Ugursal V.I. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques (Review). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, vol. 13, Iss. 8, pp. 1819–1835.
- McKenna E., Krawczynski M., Thomson M. Four-state domestic building occupancy model for energy demand simulations. *Energy and Buildings*, 2015, vol. 96, Iss. 1, pp. 30–39.
- Wilke U., Haldi F., Scartezzini J.-L., Robinson D. A bottom-up stochastic model to predict building occupants' time-dependent activities. *Building and Environment*, February 2013, vol. 60, pp. 254–264.
- Energy Plus. Engineering Reference*. Ed. E. Orlando. 2013. Available at: <http://energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy> (accessed 14 September 2014).
- Khrustalev B.M., Kuvshinov Yu.Ya., Kopko V.M. *Teplosnabzhenie i ventilyatsia* [Heating and ventilation]. Moscow, Publishing house ACB, 2005. 784 p.
- Vedruchenko V.R., Kraynov V.V., Starikov A.P., Meshcheryakov D.A., Petrov P.V. Optimizatsiya zatrat pri proektirovanii i ekspluatatsii teplovykh sistem i sistem teplosnabzheniya potrebitel'nykh [Optimization of the design and exploitation costs in developing cycle arrangement and heat supply systems]. *Promyshlennaya energetika*, 2013, no. 2, pp. 33–37.
- Kolosov M.V., Zhuykov A.V. Optimizatsiya parametrov i konfiguratsiy teplovykh setey [Optimization of the parameters and configurations of heat networks]. *Promyshlennaya energetika*, 2013, no. 7, pp. 41–48.
- Nevsky V.V., Dudnik D.A., Semannikov S.V. *Standartnye avtomatizirovannye teplovye punkty «Danfoss»* [Standard automated thermal points of «Danfoss»]. Moscow, Danfoss Publ., 2011. 48 p.
- Pyrkov V.V. *Sovremennye teplovye punkty: avtomatizatsia i regulirovanie* [Modern thermal points: Automation and regulation]. Kiev, II DP «Taki spravi», 2007. 250 p.
- Singer N.M. *Gidravlicheskie i teplovye regimy teplofikatsionnykh setey* [Hydraulic and thermal regimes of district heating networks]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 320 p.
- Apartsev M.M. *Naladka vodnykh sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniya* [Adjusting water heating systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 204 p.

19. Unaspekov B.A., Sabdenov K.O., Kokarev M.Zh., Igembaev B.A. Energoberezhenie v teplovykh punktakh zhilykh i obshchestvennykh zdaniy. Ch. 1. Obshchaya model teplovogo punkta [Energy savings in residential and public buildings. P. 1. General model of thermal point]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 31–35.
20. Sabdenov K.O., Unaspekov B.A., Erzada M., Igembaev B.A. Thermal Regime in a Building in the Presence of Mixing of Heat Carriers from Delivery and Return Pipelines. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, Iss. 1, pp. 75–83.
21. Sabdenov K.O., Baytasov T.M., Erzada M. Optimum Control of Heat Supply of a Building. 1. Formulation of the Problem and Basic Formulas. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, Iss. 4, pp. 839–847.
22. Unaspekov B.A., Sabdenov K.O., Kokarev M.Zh., Igembaev B.A. Energoberezhenie v teplovykh punktakh zilykh i obshchestvennykh zdaniy. Ch. 2. Model obogreva zdanya [Energy savings in residential and public buildings. P. 2. Building heating model]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 35–39.
23. Sabdenov K.O., Baytasov T.M., Erzada M. Optimum Control of Heat Supply of a Building. 2. Analysis and Results. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, Iss. 4, pp. 848–854.
24. Lysenko O., Kuzhel L., Bozhko I. Control of heat supply of building based on the use of individual heat point of original design (in Ukrainian). *Vostochno-evropeiskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, 2015, vol. 1, no. 8 (73), pp. 61–67.
25. Polovnikov V.Yu., Gubina E.V. Heat and Mass Transfer in a Wetted Thermal Insulation of hot Water Pipes Operating Under Flooding Conditions. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, Iss. 5, pp. 1151–1158.
26. Inkin A.V., Sadovenko I.A., Rudakov D.V., Yakubovskaia Z.N. Modelirovanie teploperenosa v vodosnom gorizonte pri akkumulirovanii i otbore teplovoy energii [Modeling of heat transfer in the aquifer during the accumulation and selection of thermal energy]. *Naukovii visnik NGU*, 2012, no. 1, pp. 40–45.
27. Inkin A.V., Sadovenko I.A., Rudakov D.V. Geotechnical schemes to the multi-purpose use of geothermal energy and resources of abandoned mines. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*. Eds. V. Bondarenko, I. Kovalevs'ka, K. Ganushevych. London, Taylor & Francis Group, 2014. pp. 443–450.

Received: 16 April 2015.