

УДК 697.1

## Влияние структуры микрорайона на особенности внешнего теплообмена и теплопотребление однотипных зданий

Г. Н. Афолина, В. С. Глазов, Э. К. Фелкер

### Сведения об авторах

**Афолина Галина Николаевна** — студент кафедры Теплообменных процессов и установок МЭИ**Глазов Василий Степанович** — кандидат технических наук, доцент Теплообменных процессов и установок МЭИ, e-mail: mamurik@bk.ru**Фелкер Эдуард Константинович** — научный сотрудник Бранденбургского технического университета Котбус — Зенфтенберг

Предметом исследования стал сопряженный теплообмен между зданием и внешней средой, параметры которой (температура и скорость) определяются особенностями городской среды.

Объект исследования — два однотипных здания, расположенные в двух разных микрорайонах Москвы, имеющих разную плотность и структуру городской застройки.

Представлен краткий обзор теплопотребления зданий по действующим нормам и нормам, актуальным на момент их возведения. Определено, что величина тепловых потерь через наружные ограждения, вычисленная по действующим нормам, а также величина соответствующих денежных затрат на отопление для углового помещения, может в 1,5 — 2 раза превышать аналогичные величины для центрального помещения.

Приведены результаты математического моделирования внешнего теплообмена однотипных зданий в разных районах Москвы с учетом близлежащих конструкций и сооружений. Получены поля скоростей ветра, распределения температуры и наружного коэффициента теплоотдачи по внешней поверхности зданий.

Доказано, что наибольшая неравномерность распределения температуры и коэффициента теплоотдачи по наружной поверхности зданий наблюдается в горизонтальном направлении. Это означает, что для поддержания комфортных условий в помещениях, расположенных на одном и том же этаже здания, потребуется разное количество теплоты. Таким образом, стоимость проживания в квартирах определяется не только стоимостью тепловой энергии, а и топологией городской застройки.

Отмечено, что поквартирный учет потребления тепловой энергии в здании позволяет выявить разницу в оплате за отопление одинаковых помещений, наружные стены которых находятся под разным воздействием внешней среды, формируемой городской застройкой.

Дана оценка средств, необходимых для поддержания комфортных условий для разных помещений двух зданий одинаковой серии, но находящихся в различных условиях городской застройки.

Отмечено, что в рамках проведенных исследований влияние городской застройки на теплопотребление здания в целом незначительно, однако наблюдается её локальное воздействие на теплопотребление отдельных помещений в рассмотренных зданиях. Так, разница в теплопотреблении угловых помещений зданий, расположенных в разных микрорайонах Москвы, может достигать 15 — 18%, а у центральных помещений, находящихся на одинаковых этажах рассматриваемых зданий, она составляет 10 — 12%.

Ключевые слова: теплопотребление и теплозащита зданий, математическое моделирование.

---

## The effect of urban microdistrict structure on the external heat transfer and heat consumption in similar-type buildings

G. N. Afonina, V. S. Glazov, E. K. Voelker

### Information about authors

**Afonina Galina N.** — Student of Heat-and-Mass Transfer Processes and Installations Dept., MPEI**Glazov Vasily S.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Heat-and-Mass Transfer Processes and Installations Dept., MPEI, e-mail: mamurik@bk.ru**Voelker Eduard K.** — Research Worker of Brandenburgische Technische Universität (BTU) Cottbus — Senftenberg

The article deals with conjugate heat transfer between a building and the environment, the parameters of which (temperature and velocity) are determined by the features of the urban environment.

The subject of the study includes two similar-type buildings located in two different microdistricts of Moscow having different density and structure of the urban environment.

The heat consumption in buildings according to the regulations that are currently in force and according to those that were valid at the time the buildings were constructed is briefly reviewed. It is shown that heat losses through the external enclosing structures calculated according to the current regulations, as well as the costs for heating (in money terms) of the premise in the building's corner may be a factor of 1.5–2 higher than those for premises located in the building's central part.

Results from mathematical modeling of external heat transfer in similar-type buildings in different districts of Moscow taking into account the nearby buildings and structures are presented. The fields of wind velocity and the distributions of temperature and external heat transfer coefficient over the outer surfaces of buildings are obtained.

It is shown that the highest nonuniformity in the distribution of temperature and heat transfer coefficient over the building outer surfaces is observed in the horizontal direction. This means that different amounts of heat will be required in order to maintain comfortable conditions in the premises located at the same floor of a building. Thus, the cost of living in apartments is determined not only by the cost of thermal energy, but also by the topology of urban environment.

It is pointed out that, by monitoring the heat consumption in each individual apartment in a building, it is possible to identify the difference in payment for heating the same premises, the outer walls of which are subjected to different effects of the environment formed by the urban surroundings.

Means required to maintain comfortable conditions for different premises in two buildings of a similar design but located in different conditions of urban neighborhood are evaluated.

It is noted that, according to the results obtained within the framework of the performed study, the influence of urban environment on the heat consumption in a building is on the whole rather insignificant; nonetheless, its local effect on the heat consumption in individual premises within the considered buildings is observed. Thus, the difference between the amounts of heat consumed by premises located in the corners of buildings located in different districts of Moscow can reach 15 — 18%, and for central premises located at the same floors of the considered buildings this difference makes 10 — 12%.

Key words: heat consumption in buildings and their thermal shielding, mathematical modeling.

## Введение

Основанием для проведения данной работы стали данные Аналитического центра при Правительстве Российской Федерации, согласно которым потребление тепловой энергии в жилых домах даже одинаковых серий осуществляется крайне неоднородно, и может отличаться в 4 и более раз.

Вот несколько причин, по которым здания одной серии могут иметь разную эффективность: неодинаковая ориентация здания по сторонам света, разная роза ветров (искаженная городской застройкой), человеческий фактор (регулирование параметров комфорта по субъективному ощущению), технологический фактор (время, способ и погодные условия возведения здания, а также качество строительных материалов).

Актуальность работы также обусловлена следующими причинами.

Имплементацией Федерального закона от 23.11.2009 г. №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [1].

Следованием основной цели СОВК (систем отопления, вентиляции и кондиционирования) — при минимальных капитальных затратах обеспечить комфортные условия для пребывания работающих или отдыхающих людей.

Наличием высокой доли (порядка 30 — 40%) зданий «старой» постройки, возведение которых проводилось без учета современных требований по их энергетической эффективности.

Отсутствием учета в нормативных документах [2] наличия городской застройки, которая способна повлиять на температурные и скоростные характеристики

внешней воздушной среды у рассматриваемого здания и, следовательно, может приводить к необходимости корректировки его теплопотребления, для поддержания заданных условий в помещениях.

В связи с вышеизложенным, цель настоящей работы заключается в оценке влияния городской застройки на теплопотребление одного из её зданий.

Был проведен сравнительный анализ затрат тепловой энергии и денежных средств на отопление центрального и углового помещений здания по действующим нормам и нормам, актуальным на момент его возведения.

Выполнено математического моделирования теплообмена между зданием и внешней средой в условиях разной городской застройки.

Рассчитано теплопотребление однотипных зданий в соответствии с действующими и актуальными, на момент их возведения, нормативными требованиями.

Проанализированы результаты, полученные с помощью нормативных методов и математического моделирования для зданий одной серии, расположенных в разных районах городской среды.

Выявлены проблемы, связанные с введением поквартирного учета потребления тепловой энергии, необходимой для поддержания комфортных условий в помещениях.

Объектами исследования стали два однотипных здания, расположенные в двух разных микрорайонах Москвы, имеющих разную плотность и структуру городской застройки.

Предметом исследования — сопряженный теплообмен между зданием и внешней средой, параметры которой (температура и скорость) определяются особенностями городской среды.

## Обзор

### Теплопотребление

Согласно данным [3] на теплоснабжение зданий в настоящее время затрачивается около 430 млн т.т., или примерно 45% всех энергетических ресурсов, расходуемых в стране. Это в 2,3 раза больше, чем на производство электроэнергии. В холодные зимы эта цифра вырастает еще на 30 — 50 млн т.т. Годовое производство теплотенергии оценивается в 2400 — 2460 млн Гкал. На рис. 1 представлено ее долевое распределение по потребителям в г. Москве.

В [3] предложен инструмент, позволяющий выявить дома, в которых удельное потребление тепловой энергии на цели отопления существенно выше среднего по анализируемой территории. Только после определения этой величины авторы рекомендуют целенаправленно проводить энергоаудиты, планировать энергосервисные мероприятия и искать инвесторов конкретно для этих домов. Под указанным инструментом подразумевается расчет удельного потребления тепловой энергии на 1 м<sup>2</sup> площади дома.

Применение данного подхода к домам в ЮАО показало [3]:

— среднее удельное потребление тепловой энергии на 1 м<sup>2</sup> полезной площади дома — 0,226 Гкал на 1 м<sup>2</sup> в год;

— 322 многоквартирных дома, удельное потребление которых превышает среднее по ЮАО более чем в 2 раза.

Если бы удельное потребление по таким домам было на уровне среднего, то суммарное потребление тепловой энергии составило бы 260 694 Гкал. «Пере-

потребление» тепловой энергии по этим 322 домам составило 526 566 Гкал или в денежном эквиваленте «переплата» составила почти 906 млн рублей (в тарифах 2014 г.).

Таким образом, фактически имеется финансовый ресурс в размере не менее 900 млн руб. ежегодно, который можно использовать для приведения этих же 322 домов в надлежащее теплотехническое состояние.

### Нормативные методы расчета

Современные нормативные методы расчета тепловой энергии, необходимой для поддержания комфортных условий в помещениях, не в полной мере учитывают особенности протекания процесса теплообмена в теплозащитной оболочке зданий. Приведем несколько примеров.

Большинство методик опираются на одномерное описание процессов переноса, несмотря на то, что доля площади, где применима одномерная теплопередача, очень мала (рис. 2).

Сопrotивление теплоотдачи на поверхностях наружного ограждения много меньше его термического сопротивления, при рассмотрении одномерного случая теплопередачи. На этом основании делается вывод о необязательном или приближенном учете коэффициентов теплоотдачи, при выполнении теплотехнического расчета оболочки здания. Однако такое приближение является грубым, поскольку на теплоотдачу влияют: температура и степень черноты стенки, скорость и направление ветра, влажность воздуха и теплозащитной оболочки здания, её состав и рельеф, а также ориентация здания по сторонам света и его расположение среди других сооружений. Близко стоящие здания разной высоты могут создавать участки с разной скоростью и степенью турбулентности потока воздуха и, следо-

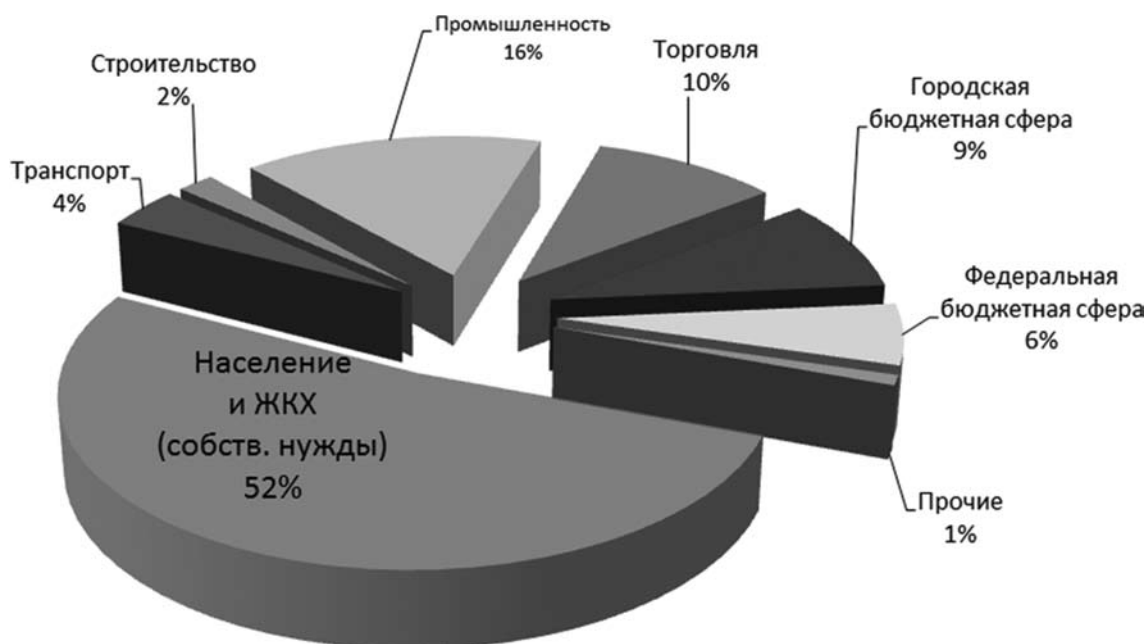


Рис. 1. Распределение теплопотребления по потребителям в Москве

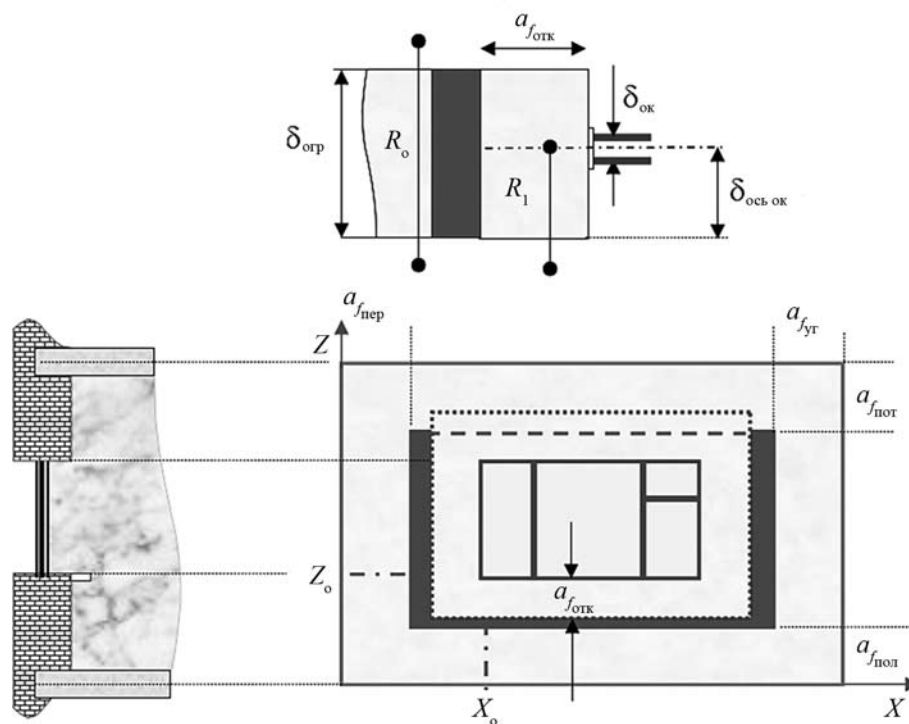


Рис. 2. Однооконное наружное ограждение. Темным цветом выделена область с одномерным температурным полем

вательно, иные условия теплообмена на их поверхностях. Не малую роль играют терморрадиационные свойства элементов, входящих в теплозащитную оболочку здания, которые могут значительно отличаться друг от друга, как по величине, так и по направлению.

Рекомендуемые методы расчета, основанные на понятиях фактора формы [4, 10] или коэффициенты неоднородности [5] не могут быть использованы в местах, где процесс переноса теплоты имеет трехмерный характер, например, в зоне сопряжения наружного ограждения с окнами и отопительными приборами. Поэтому ряд исследователей разрабатывают [6, 7] или используют [8] современные программные среды для моделирования сложного теплообмена, протекающего в элементах теплозащитной оболочки здания и на её границах.

#### Поквартирный учет теплопотребления

Поквартирный учет потребления тепловой энергии в здании позволяет не только установить места с нерациональным использованием тепловой энергии, но и выявить разницу в оплате за отопление центральных и угловых помещений, находящихся под разным воздействием внешней среды. Последнее является очень важным для собственников квартир. Если для поставщика тепловой энергии ему все равно, как она распределяется по помещениям, то для собственников, в помещениях которых установлены счетчики, её величина указывает на количество денег, которые нужно ежемесячно выплачивать поставщику за обеспечение требуемого комфорта. Ясно, что собственники центральных и угловых помещений находятся не в равных условиях.

Целесообразность учета данного факта подтверждает нормативный расчет, который указывает, что плата за отопление углового помещения может в 1,5 — 2 раза превышать плату за отопление центрального помещения.

Заметим, что в [3], как и в [9], не учтено влияние городской застройки, которая формирует условия теплообмена на наружной поверхности теплозащитной оболочки зданий.

Следовательно, современные методы расчета, основанные на нормативных требованиях, не учитывают влияние городской застройки на величину наружного коэффициента теплоотдачи при расчете теплозащитной оболочки здания, что необходимо учитывать при определении теплопотребления помещениями зданий и сооружений.

Нормативные методы расчета теплозащитной оболочки зданий и системы отопления приводят к разному количеству тепловой энергии, необходимой для поддержания комфортных условий в угловом и центральном помещениях здания. Это связано с неодинаковой площадью наружных ограждений, размером и мощностью отопительных приборов, используемых для обеспечения требуемых параметров воздуха в сравниваемых помещениях.

Здания, возведенные по старым нормативным требованиям, не удовлетворяют современным требованиям, что требует проведения энергосберегающих мероприятий для снижения и учета теплопотребления.

Введение поквартирного учета теплопотребления порождает проблему для жильцов, связанную со сто-

имостью квартир и услуг, необходимых для поддержания в них комфортных условий, чувствительных к условиям внешнего теплообмена.

Таким образом, для решения указанных проблем необходимо выполнить расчет теплозащитной оболочки существующих зданий в соответствии с действующими нормами, а также провести моделирование внешнего теплообмена для конкретного типа здания, расположенного в разных условиях городской застройки. Полученные результаты сравнить и предложить мероприятия по снижению теплопотребления для рассматриваемого типа зданий.

### Оценка затрат тепловой энергии и денежных средств на отопление центрального и углового помещений здания по действующим нормам

Исходные данные: в соответствии с индивидуальными требованиями и санитарно-гигиеническими нормами в качестве комфортной температуры выбрано значение:  $t_{\text{вн}} = 22$  °С. В качестве наружной — температура наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92 для города Москвы [10]:  $t_{\text{нар}} = -28$  °С. Нормируемые значения сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций (НОК) приняты по табл. 4 из [9]:  $R_{W_{\text{норм}}} = 3,2$  (м<sup>2</sup>·°С)/Вт (для стен),  $R_{F_{\text{норм}}} = 0,54$  (м<sup>2</sup>·°С)/Вт (для окон).

Коэффициенты теплоотдачи внутренней поверхности ОК приняты по табл. 7 из [9]: для стен:  $\alpha_{\text{внутр}_W} = 8,7$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С) (для стен),  $\alpha_{\text{внутр}_F} = 8$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С) (для окон).

Коэффициент теплоотдачи внешней поверхности ОК принят по [9]:  $\alpha_{\text{внеш}} = 23$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

**Параметры помещения.** Высота, длина и площадь окна:  $h_F = 1,85$  м;  $l_F = 1,4$  м;  $A_F = h_F \cdot l_F = 1,85 \cdot 1,4 = 2,59$  м<sup>2</sup>. Высота помещения  $h = 2,7$  м. Длина каждой стены  $l = 4$  м, соответственно, площадь стены (без окна)  $A_W = h_W \cdot l_W - h_F \cdot l_F = 2,7 \cdot 4 - 1,85 \cdot 1,4 = 8,21$  м<sup>2</sup>.

#### Расчет

Определение коэффициентов теплопередачи наружной стены и окна:

$$k_W = 1/R_W = 1/3,36 = 0,3 \text{ Вт/(м}^2\text{·°С)};$$

$$k_F = 1/R_F = 1/0,71 = 1,41 \text{ Вт/(м}^2\text{·°С)},$$

где сопротивления теплопередаче через элементы НОК рассчитаны по следующим формулам:

для стены:

$$R_W = 1/\alpha_{\text{внутр}_W} + R_{W_{\text{норм}}} + 1/\alpha_{\text{внеш}} = 1/8,7 + 3,2 + 1/23 = 3,36 \text{ (м}^2\text{·°С)/Вт};$$

для окна:

$$R_F = 1/\alpha_{\text{внутр}_F} + R_{F_{\text{норм}}} + 1/\alpha_{\text{внеш}} = 1/8 + 0,54 + 1/23 = 0,71 \text{ (м}^2\text{·°С)/Вт}.$$

Определение потерь тепла через элементы НОК равно:

$$Q = kA\Delta t(1 + \Sigma\beta)n,$$

где  $k$  — коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $A$  — площадь конструкции, м<sup>2</sup>;  $\Delta t$  — разность температур между помещением и окружающей средой, °С;  $\Delta t = t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}} = 50$  °С;  $n = 1$  — коэффициент, учитывающий ориентацию наружной поверхности ОК по отношению к наружному воздуху;  $(1 + \Sigma\beta)$  — поправка на добавочные потери через ограждения [11].

Для центрального помещения рассмотрены 2 случая:  $\beta_{\text{ц1}} = 0,05$  и  $\beta_{\text{ц2}} = 0,1$ , для углового —  $\beta_{\text{угл}} = 0,15$ .

**Решение.** На рис. 3, 4 представлены суммарные потери тепла через НОК центрального и углового помещений, а также разница в тепловых потерях между этими помещениями.

#### Экономический расчет

Поскольку 1 Гкал = 4186,8 МДж, а цена  $\mu_{\text{Гкал}} = 1720,9$  руб./мес, то цена за 1 Дж в месяц равна  $\mu_{\text{Дж}} = \mu_{\text{Гкал}}/(4186800000 \text{ Дж}) = 4,11 \cdot 10^{-7}$  руб.



Рис. 3. Суммарные потери тепла через НОК, Вт

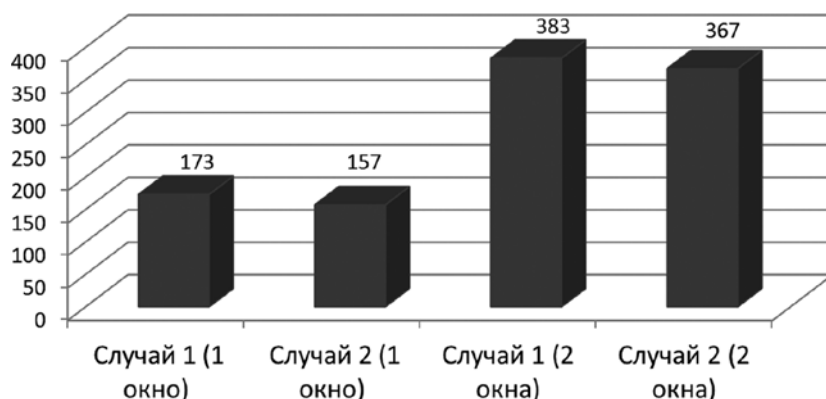


Рис. 4. Разница в тепловых потерях между угловыми и центральными помещениями, Вт

Поскольку  $1 \text{ Вт} = 2592 \cdot 10^3 \text{ Дж/мес.}$ , значит цена за  $1 \text{ Вт}$  в месяц составит  $\mu_{\text{Вт}} = 1,07 \text{ руб.}$

Поэтому, стоимость отопления в месяц для центрального помещения для каждого из двух вариантов будет выглядеть следующим образом:

$$M_{\text{ц1}} = \mu_{\text{Вт}} \cdot \Sigma Q_{\text{ц1}} = 1,07 \cdot 321 = 344 \text{ руб.};$$

$$M_{\text{ц2}} = \mu_{\text{Вт}} \cdot \Sigma Q_{\text{ц2}} = 1,07 \cdot 337 = 361 \text{ руб.};$$

для углового помещения с одним и двумя окнами:

$$M_{\text{угл1}} = \mu_{\text{Вт}} \cdot \Sigma Q_{\text{угл1}} = 1,07 \cdot 494 = 529 \text{ руб.};$$

$$M_{\text{угл2}} = \mu_{\text{Вт}} \cdot \Sigma Q_{\text{угл2}} = 1,07 \cdot 704 = 753 \text{ руб.}$$

Разница в стоимости отопления между угловым (1 окно) и центральным помещениями в месяц составит:

$$\Delta M_{\text{угл1\_ц1}} = M_{\text{угл1}} - M_{\text{ц1}} = 529 - 344 = 185 \text{ руб.};$$

$$\Delta M_{\text{угл1\_ц2}} = M_{\text{угл1}} - M_{\text{ц2}} = 529 - 361 = 168 \text{ руб.}$$

Разница в стоимости отопления между угловым (2 окна) и центральным помещениями в месяц равна:

$$\Delta M_{\text{угл2\_ц1}} = M_{\text{угл2}} - M_{\text{ц1}} = 753 - 344 = 409 \text{ руб.};$$

$$\Delta M_{\text{угл2\_ц2}} = M_{\text{угл2}} - M_{\text{ц2}} = 753 - 361 = 392 \text{ руб.}$$

Как видно из расчета, величина тепловых потерь через элемент ограждающей конструкции, а также величина соответствующих денежных затрат на отопление для углового помещения, может в 1,5 — 2 раза превышать аналогичные величины для центрального помещения.

### Численное моделирование теплообмена между зданием и внешней средой с разной топологией городской застройки

#### Математическая модель

Процесс теплообмена в условиях городской застройки описывается системой дифференциальных уравнений.

Неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U}{\partial x} + \frac{\partial \rho V}{\partial y} + \frac{\partial \rho W}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

Сохранения импульса по координате  $x$  (скорость  $U$ ):

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + U \frac{\partial \rho U}{\partial x} + V \frac{\partial \rho U}{\partial y} + W \frac{\partial \rho U}{\partial z} =$$

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{\text{ЭФ}} \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{\text{ЭФ}} \frac{\partial U}{\partial y} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_{\text{ЭФ}} \frac{\partial U}{\partial z} \right) + g_x \rho \beta \Delta T;$$

по координате  $y$  (скорость  $V$ ):

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + U \frac{\partial \rho V}{\partial x} + V \frac{\partial \rho V}{\partial y} + W \frac{\partial \rho V}{\partial z} =$$

$$= \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{\text{ЭФ}} \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{\text{ЭФ}} \frac{\partial V}{\partial y} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_{\text{ЭФ}} \frac{\partial V}{\partial z} \right) + g_y \rho \beta \Delta T;$$

по координате  $z$  (скорость  $W$ ):

$$\frac{\partial \rho W}{\partial t} + U \frac{\partial \rho W}{\partial x} + V \frac{\partial \rho W}{\partial y} + W \frac{\partial \rho W}{\partial z} =$$

$$= -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{\text{ЭФ}} \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{\text{ЭФ}} \frac{\partial W}{\partial y} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_{\text{ЭФ}} \frac{\partial W}{\partial z} \right) + g_z \rho \beta \Delta T.$$

сохранения энергии:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} =$$

$$= \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{\text{ЭФ}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{\text{ЭФ}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) +$$

$$+ \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{\text{ЭФ}} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v.$$

Кинетической энергии турбулентных пульсаций:

$$\frac{\partial \rho K}{\partial t} + U \frac{\partial \rho K}{\partial x} + V \frac{\partial \rho K}{\partial y} + W \frac{\partial \rho K}{\partial z} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial K}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial K}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma \frac{\partial K}{\partial z} \right) + Gk - \rho \epsilon,$$

где  $Gk = \mu_t \frac{\partial u}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right)$ ,  $\mu_t = C_\mu \frac{\rho K^2}{\epsilon}$ ,  $\mu_{\text{ЭФ}} = \mu + \mu_t$ ,

$\Gamma = \mu_{\text{ЭФ}} / \sigma_K$ .

Диссипации турбулентной энергии:

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + U \frac{\partial \rho \epsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \rho \epsilon}{\partial y} + W \frac{\partial \rho \epsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + C_1 Gk \frac{\epsilon}{K} - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{K},$$

где  $\Gamma_\epsilon = \mu_{\text{ЭФ}} / \sigma_\epsilon$ .

Для описания движения воздуха в городской застройке использована стандартная  $k$ - $\epsilon$ -модель турбулентности, константы которой имеют следующие значения:  $\sigma_K = 1,0$ ;  $\sigma_\epsilon = 1,3$ ;  $C_1 = 1,44$ ;  $C_2 = 1,92$ ;  $C_\mu = 0,09$ . Расчет коэффициента теплоотдачи рассчитывался по алгоритму, представленному на рис. 5.

Численное моделирование процесса, описываемого уравнениями (1) — (7), в условиях городской застройки выполнено в программном комплексе PHOENICS, при этом учитывались следующие условия на границах воздушной среды моделируемого микрорайона:

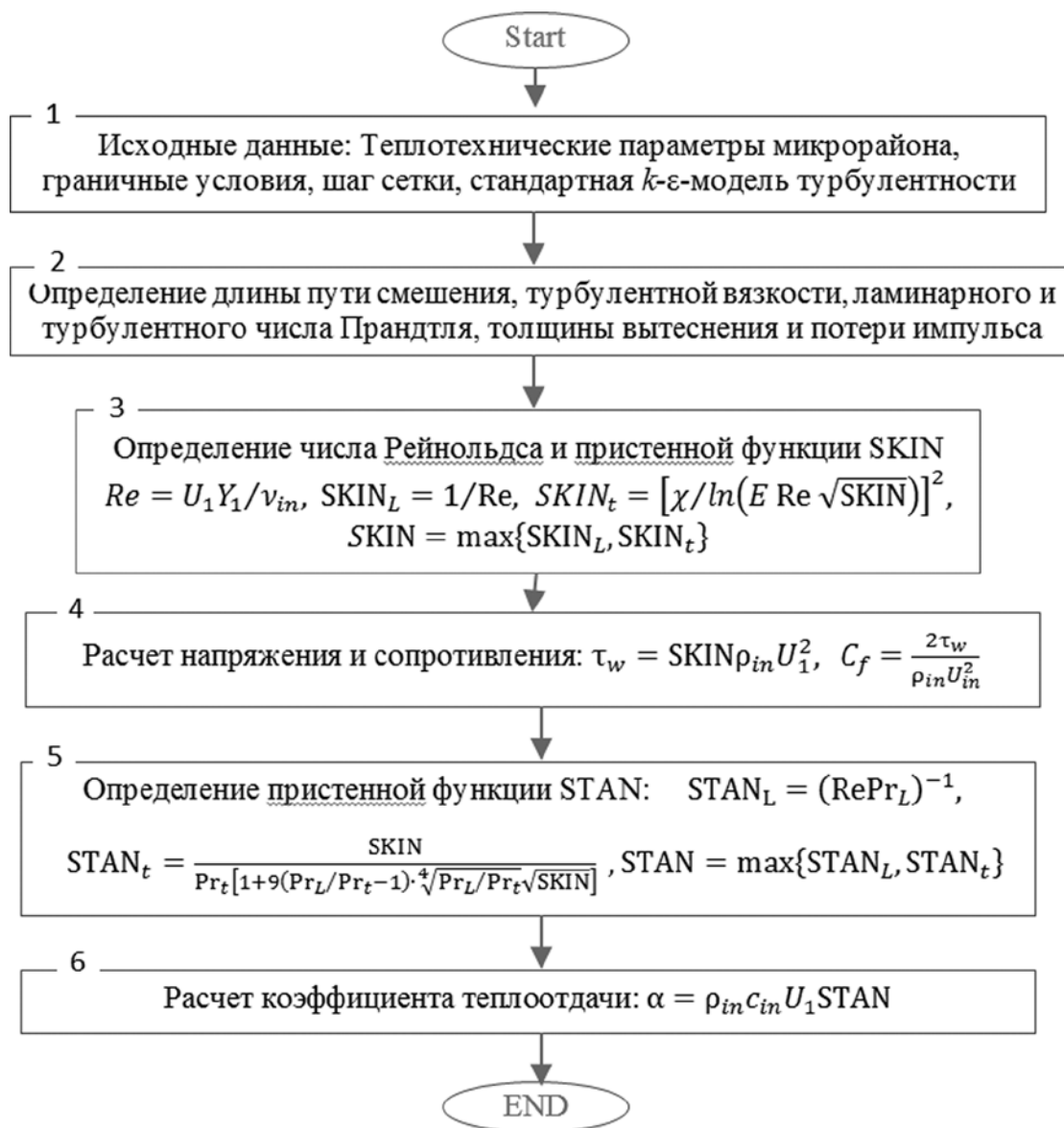


Рис. 5. Алгоритм расчета коэффициента теплоотдачи в среде PHOENICS

— изменение скорости ветра по высоте — по степенному закону [12];

— доминирующее направление ветра для Москвы — ЮЗ [10];

тепловая оболочка здания заменялась эквивалентной (по термическому сопротивлению) и однородной по каждой стороне здания.

#### Результаты численного моделирования в среде PHOENICS

Сопоставительный анализ результатов, полученных для зданий одной серии, расположенных в разных микрорайонах Москвы, показал, что наибольшая неравномерность распределения коэффициента теплоотдачи наблюдается на наружной поверхности равно-высотных зданий в горизонтальном направлении (рис. 6).

Это означает, что для поддержания комфортных условий в помещениях, расположенных на одном и том

же этаже здания, потребуется разное количество теплоты, т. е. на стоимость проживания в квартирах будет влиять плотность и структура городской застройки.

Поэтому при планировании энергосберегающих мероприятий, повышающих энергетическую эффективность зданий, необходимо учитывать топологию городской застройки, которая формирует поле скоростей воздушной среды (рис. 7) и тем самым определяет интенсивность теплообмена на поверхностях теплозащитной оболочки зданий.

#### Сопоставительный анализ результатов

В табл. 1 представлены данные натурных исследований [3], а также результаты расчетов, полученных по нормативному методу и данным математического моделирования.

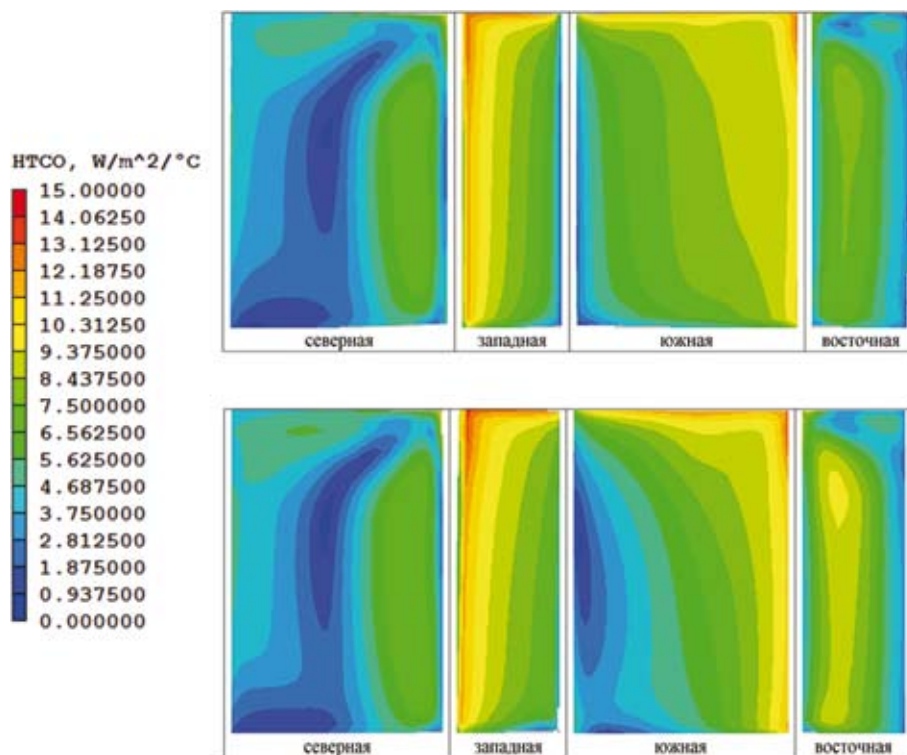


Рис. 6. Распределение коэффициента теплоотдачи по сторонам

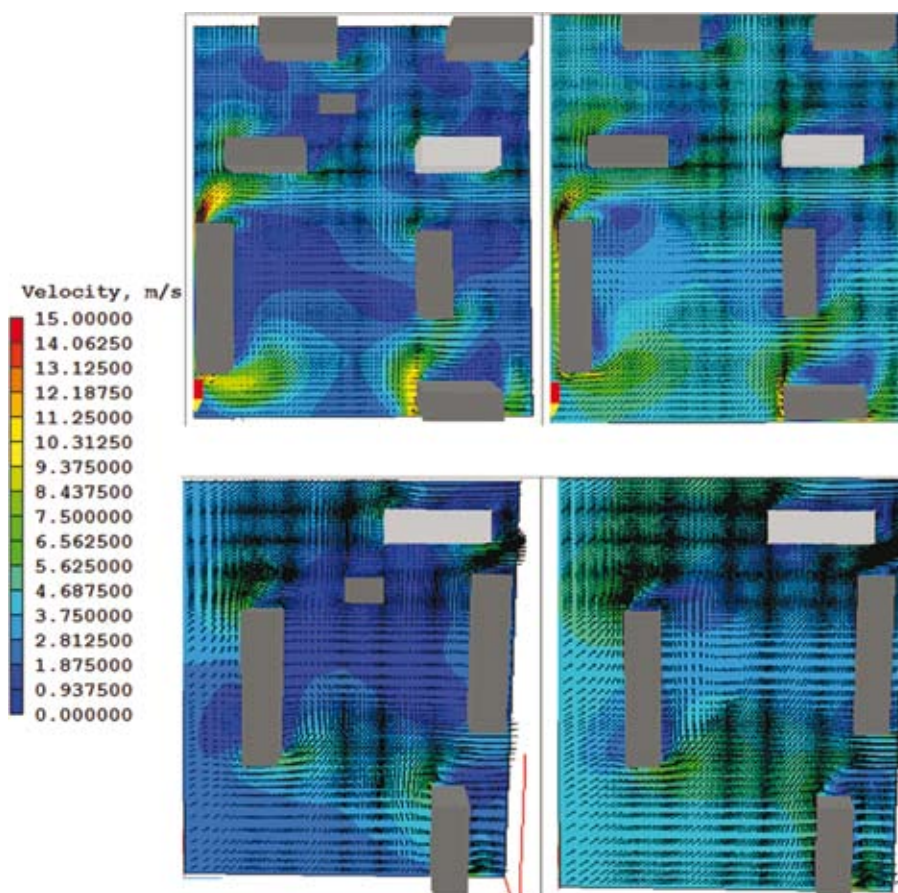


Рис. 7. Поле скоростей на высоте 2 (а, в) и 25 м (б, з) в 1 (а, б) и во 2 (в, з) микрорайонах



Таблица 1

Удельные тепловые потери зданий серии П-68-01, расположенных в разных микрорайонах ЮАО г. Москвы

Параметр	Здание в 1 микрорайоне			Здание во 2 микрорайоне		
	факт	нормативный метод	ММ	факт	нормативный метод	ММ
$q$ , кВт·ч/м <sup>2</sup>	535	154	130	628	154	135

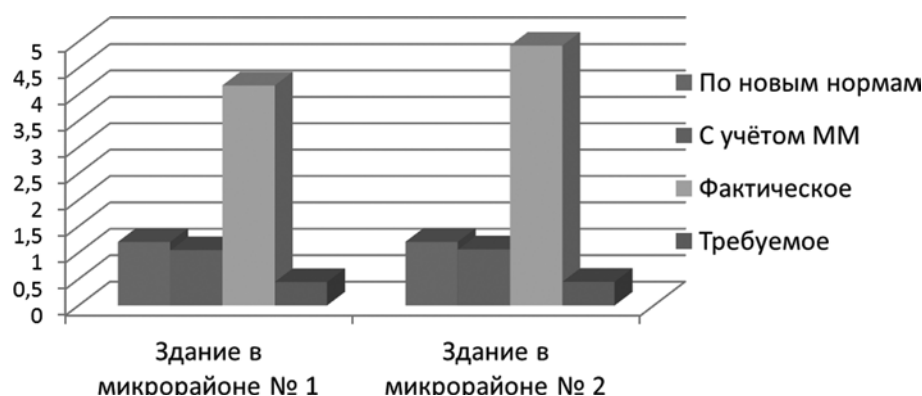


Рис. 8. Затраты на теплотребление однотипных зданий в разных микрорайонах

Учитывая, что нормируемое значение целевого удельного показателя энергетической эффективности в Москве с 01.01.2016 составляет 57 кВт·ч/м<sup>2</sup> [13], а также, что отклонение расчетного и фактического значений удельного расхода тепловой энергии от нормативного значения составляет более 50%, приходим к выводу, что рассматриваемые здания имеют класс энергетической эффективности  $E$ . В этом случае органам администраций субъектов РФ рекомендуется «немедленное утепление здания».

На рис. 8 сопоставлены затраты на теплотребление зданий одной серии, расположенных в разных микрорайонах Москвы. Видно, что для здания в 1 микрорайоне экономия составляет 13% от годового теплотребления, а для здания во 2 микрорайоне — 12%, т.е. влияние городской застройки на теплотребление здания в целом незначительно.

В табл. 2 сведены значения тепловых потерь для центральных и угловых помещений, расположенных на «средних» и «верхних» этажах зданий в рассматриваемых микрорайонах.

На рис. 9, 10 показана разница в тепловых потерях между помещениями в рамках одного здания и между зданиями, расположенными в разных микрорайонах Москвы

Из рис. 9, 10 видно локальное влияние городской застройки на теплотребление помещениями рассматриваемых зданий.

### Заключение

Сопоставительный анализ результатов, полученных для зданий одной серии, расположенных в разных микрорайонах Москвы, показал, что наибольшая неравномерность распределения температуры и коэф-

Таблица 2

Тепловые потери средними, верхними и угловыми помещениями однотипных зданий, расположенных в первом и втором микрорайонах

Помещение	$\Sigma Q$ , Вт	$\Sigma q$ , Вт/м <sup>2</sup>
Норматив		
Центральное	339	35
Угловое	537	39
Здание № 1. Средние этажи		
Центральное 1	303	31
Центральное 2	312	32
Угловое	464	32
Здание № 1. Верхние этажи		
Центральное 1	310	32
Центральное 2	312	32
Угловое	490	35
Здание № 2. Средние этажи		
Центральное 1	273	28
Центральное 2	307	32
Угловое	396	25
Здание № 2. Верхние этажи		
Центральное 1	307	32
Центральное 2	312	32
Угловое	482	34

фициента теплоотдачи по наружной поверхности зданий наблюдается в горизонтальном направлении. Это означает, что для поддержания комфортных условий в помещениях, расположенных на одном и том же этаже здания, потребуется разное количество теплоты. Та-

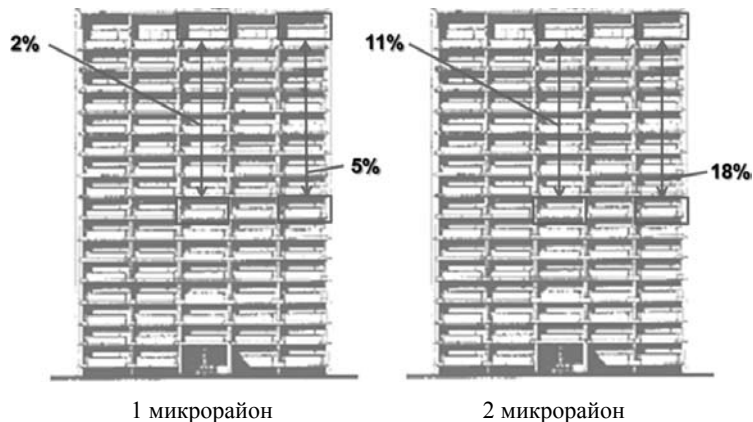


Рис. 9. Отличие удельных тепловых потерь для центральных и угловых помещений в зависимости от высоты этажа (средние/верхние), %

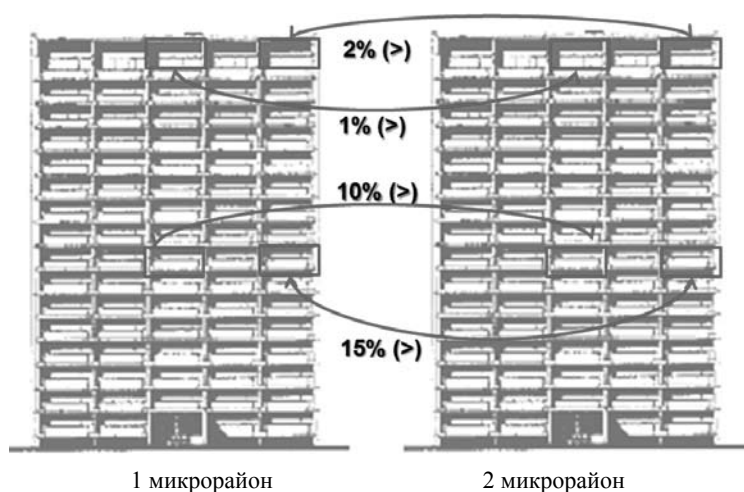


Рис. 10. Отличие удельных тепловых потерь для центральных и угловых помещений на средних/верхних этажах в зависимости от микрорайона, %

ким образом, стоимость проживания в квартирах будет определяться не только стоимостью тепловой энергии, но и топологией городской застройки.

Поквартирный учет потребления тепловой энергии в здании позволяет выявить разницу в оплате за отопление одинаковых помещений, наружные стены которых находятся под разным воздействием внешней среды, формируемым воздействием городской застройкой. Разная плата за отопление одинаковых помещений должна сказаться на их стоимости. Ясно, что покупатель выберет помещение с минимальной платой за отопление, если эта информация будет ему доступна.

Поскольку изменение топологии городской застройки (возведение/снос зданий и сооружений) может изменить внешние условия теплообмена, т.е. повлиять на величину тепловой энергии, необходимой для поддержания комфортных условий в помещениях зданий, потребуется согласие их владельцев на указанные мероприятия.

Поземлетное введение энергосберегающих мероприятий может восприниматься как «доильный» аппарат или способ удержания потребителя на крюч-

ке поставщика таких услуг. Постепенный ввод энергосберегающих мероприятий, при котором решение одной проблемы порождает другую проблему, которая может быть решена с помощью новой услуги, обеспечивает постоянный доход фирмы, осуществляющей такой подход. Ясно, что подобный способ оказания энергосберегающих услуг, может быть достаточно продолжительным и иметь спиралевидный характер. Поэтому, учитывая, что поставщик заинтересован в том, чтобы процесс шел как можно дольше, потребитель должен сразу оговорить время, вид услуг и их стоимость, которые не должны превосходить научно-обоснованные показатели.

### Литература

1. **Федеральный закон** от 23.11.2009 г. №261-ФЗ. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
2. **СП 50.13330.2012.** Тепловая защита зданий.
3. **Гашо Е.** Инструменты анализа эффективности потребления тепловой энергии на цели отопления Энергосбережение — теория и практика: Труды 7 Междунар. школы-семинара молодых ученых и специалистов. М.: Издательский дом МЭИ, 2014.
4. **Богословский В.С.** Строительная теплофизика. М.: Стройиздат, 1982.
5. **Глазов В.С., Колибаба О.Б., Насонова Е.Н.** Фактор формы» в теплотехническом расчёте однооконного наружного ограждения. Иваново: Ивановская государственная архитектурно-строительная академия, 2002.
6. **Фокин К.Ф.** Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: АВОК-ПРЕС, 2006.
7. **Табунщиков Ю.А., Бродач М.М.** Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. М.: АВОК-ПРЕС, 2002.
8. **Pavitskiy N.I., Yakushin A.A., Zhubrin S.V.** Vehicular Exhaust Dispersion around group of the buildings // J. Computational Fluid Dynamics and its Appl. 1993. V. 6. N 3. P. 270 — 285.
9. **СНиП 23-02—2003.** Тепловая защита зданий.
10. **СНиП 23-01—99.** Строительная климатология.
11. **СНиП 41-01—2003.** Отопление, вентиляция и кондиционирование.
12. **Табунщиков Ю.А., Шилкин Н.В.** Аэродинамика высотных зданий. М.: АВОК-ПРЕСС, 2004.
13. **Постановление** Правительства Москвы № 900-ПП от 5 октября 2010 г. «О повышении энергетической эффективности жилых, социальных и общественно-деловых зданий в городе Москве».

Статья поступила в редакцию 21.06.2016