В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ

УДК 699.86

© А. Е. Стахов, канд. техн. наук, доцент

© С. Ю. Кадокова, ст. преподаватель

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: stahov_andrey@list.ru, kadokova@mail.ru

© А. А. Андреев, инженер

(ООО «Энергострой»)

E-mail: andreenko.anna@list.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-3-219-222

© А. Е. Stakhov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© S. Yu. Kadokova, senior lecturer

(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: stahov_andrey@list.ru, kadokova@mail.ru

© А. А. Andreenko, engineer

(LLC «Energostroy»)

E-mail: andreenko.anna@list.ru

ОЦЕНКА КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ПО ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЕ ЗДАНИЙ ЭКОНОМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

EVALUATION OF CONSTRUCTIVE SOLUTIONS ON THERMAL PROTECTION OF BUILDINGS BY ECONOMIC METHODS

Рассматриваются варианты конструктивных решений ограждающих конструкций зданий. Вычислены тепловые потери стен, покрытий, окон с различными коэффициентами теплопередачи. Построены графики теплотерь для вариантов «покрытие–стена», «окна–стена». Разработан метод оптимизации капитальных затрат на утепление зданий.

Ключевые слова: тепловые потери, функция «полезности» тепловой изоляции, кривые «безразличия», бюджетная линия.

The paper considers some variants of constructive designs of building enclosure structures. There have been calculated the thermal losses of walls, coatings, windows with different heat transfer coefficients. Thermal loss graphs for the «cover-wall», «window-wall» variants have been constructed. A method for optimizing the capital costs on the insulation of buildings has been developed.

Keywords: thermal losses, the «utility» function of thermal insulation, the «indifference» curves, budget line.

Вопросам тепловой защиты наружных ограждений зданий посвящены как фундаментальные труды [1–8], так и статьи в профильных журналах [9–13]. Наряду с техническими вопросами в данных источниках освещался вопрос экономической оптимизации принятых конструктивных проектных решений. В качестве основного критерия оценки рассматривалась минимизация срока окупаемости капитальных вложений в ограждающие конструкции в зависимости от стоимости сэкономленной тепловой энергии. При этом нормативные требования к ограждающим конструкциям в части сопротивления теплопередаче определялись исходя из величины градусо-суток отопительного периода в данной

местности независимо от архитектурного разнообразия зданий.

В то же время имеется достаточное многообразие строящихся зданий по высотности, площади стен и покрытий, площади светопрозрачных конструкций. Представляет интерес анализ изменения теплотерь конкретных зданий в зависимости от соотношений коэффициентов сопротивления стен и покрытий, стен и светопрозрачных конструкций, которые в конечном счете определяют их стоимость.

В экономической науке для изучения факторов, определяющих объем спроса на тот или иной товар, используется количественный подход, связанный с измерением величины «полез-

ности» данного товарного набора. Эта величина является функцией объемов потребления конкретных товаров в единицу времени. Используем этот кардиналистский подход для анализа «полезности» тепловой защиты конкретного здания. Целью такой защиты является минимизация потерь тепловой энергии через ограждающие конструкции. Теплотери стен, покрытий, окон, балконных дверей выступают как объемы потребления товара (в виде тепловой энергии) в единицу времени. Определим характер функции общей полезности (величины теплотери Q), для чего рассмотрим, как изменяется Q в зависимости от эффективности стеновых конструкций здания (сопротивления теплопередаче R). Расчетная функция $Q = f(R)$ убывающая, выпуклая вниз. Каждый шаг увеличения сопротивления теплопередаче уменьшает теплотребление здания. Предел «полезности» дополнительных слоев тепловой защиты показывает, как убывают теплотери при увеличении R на одну единицу. Математически предельная «полезность» увеличения R есть частная производная $\partial Q / \partial R$. Геометрически она равна тангенсу угла наклона касательных к кривой $Q = f(R)$ в плавающей точке A и обозначается MU (marginal utility). С увеличением R угол наклона этой касательной уменьшается и, следовательно, понижается и предельная «полезность», т. е. экономическая выгода от увеличения толщины изоляционного слоя в строительных конструкциях. На рис. 1 представлены графики тепловых потерь в зависимости от сопротивления теплопередаче стен и, соответственно, предельная полезность в теплоизоляции при увеличении толщины ее слоя. Данные получены расчетным путем для 5-этажного жилого дома в пригороде Санкт-Петербурга с площадями стен 1470 м^2 , покрытия — 990 м^2 , светопрозрачных конструкций — 492 м^2 .

Кроме количественного подхода, применяется и порядковый (ординалистский) подход к анализу полезности и спроса [14]. Суть такого подхода заключается в выборе потребителем наиболее предпочтительного товарного набора из всех доступных. При анализе используются так называемые «кривые безразличия», т. е. объединение точек, каждая из которых представляет собой такой набор из двух товаров, что потребителю безразлично, какой из этих наборов выбрать.

В качестве «товаров» выступают характеристики R ограждающих конструкций, определяющие уровни теплотери зданий.

В нашем случае выбор осуществляется из теплотехнических свойств стен ($R_{\text{ст}}$), покрытий ($R_{\text{п}}$), окон и балконных дверей ($R_{\text{свт}}$). Расчет теплотери через ограждающие конструкции выполнен попарно для стен–покрытий, стен–светопрозрачных конструкций для ранее упомянутого объекта-представителя. На основании расчетов построены графики зависимости теплотери от двух парных аргументов (рис. 2 и 3). Анализ графиков показывает, что общие теплотери одинаковы при различных комбинациях величин $R_{\text{ст}}$, $R_{\text{п}}$ и $R_{\text{свт}}$. Например, величина $Q = 65\,000 \text{ Вт}$ может быть обеспечена не только нормативными $R_{\text{свт}} = 0,5 \frac{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$, но и другими сочетаниями $R_{\text{свт}}$ и $R_{\text{ст}}$. По мере увеличения теплозащиты ограждающих конструкций темпы уменьшения трансмиссионных потерь тепла падают.

С другой стороны, степень выпуклости кривых теплотери показывает, насколько парные

Рис. 1. Общая и предельная полезность дополнительного утепления стен здания-представителя

Рис. 2. Зависимость тепловых потерь здания от сопротивления теплопередаче светопрозрачных конструкций и стен

Рис. 3. Зависимость тепловых потерь здания от сопротивления теплопередаче покрытий и стен

параметры теплозащиты являются взаимозаменяемыми. Соответственно, существует и предельная норма замещения уровня теплозащиты одной конструкции на усиление другой.

Вопрос о взаимозаменяемости конструкций должен быть решен исходя из наличия денежных средств у потребителя. Множество доступных потребителю товарных наборов записывается в виде

$$J = P_x \cdot x + P_y \cdot y, \quad (1)$$

где J — объем денежных средств; P_x , P_y — стоимость единицы товара; x , y — количество товара.

В качестве товара выступают дополнительные теплоизоляционные слои (в м^3) и рыночные стоимости конкретных видов изоляции (светопрозрачных конструкций), а также площади и стоимости оконных блоков, имеющие различные приведенные сопротивления теплопередаче в расчете на 1 м^2 их поверхности. Очевидно, что каждое значение R соответствует определенной стоимости материальных ресурсов, а это означает, что бюджетная линия, построенная по преобразованному выражению (1), может быть совмещена с кривыми безразличия на рис. 2, 3. Оптимум потребителя, т. е. минимизация капитальных вложений, будет определен в точке касания бюджетной линии с конкретной линией безразличия.

Заключение

1. Требования к тепловой защите зданий вызывают необходимость в экономической оцен-

ке применения конкретных строительных конструкций для определенных архитектурных решений.

2. Установлено, что энергоэффективность оболочки здания может быть обеспечена различными комбинациями инженерных решений.

3. Оптимальное решение для заказчика строительства выбирается исходя из совместного анализа кривых безразличия по теплотерям и бюджетного уравнения расходов для объекта строительства по предложенному алгоритму.

Библиографический список

1. Богословский В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). СПб.: АВОК Северо-Запад, 2000. 400 с.
2. Дмитриев А. Н., Табунчиков Ю. А., Ковалев И. Н., Шилкин Н. В. Руководство по оценке экономической эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия. М.: АВОК-ПРЕСС, 2005. 120 с.
3. Еремкин А. И., Королева Т. И. Тепловой режим зданий. М.: АСВ, 2000. 368 с.
4. Савин В. К. Строительная физика: энергоперенос, энергоэффективность, энергосбережение. М.: Лазурь, 2005. 432 с.
5. Самарин О. Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность. М.: АСВ, 2011. 296 с.
6. Табунчиков Ю. А., Бродач М. М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. 194 с.

7. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М., Шилкин Н. В. Энергоэффективные здания. М.: АВОК-ПРЕСС, 2003. 200 с.

8. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих конструкций зданий / под ред. Ю. А. Табунщикова, В. Г. Гагарина. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.

9. Васильев Г. П., Личман В. А. Эффективный уровень теплозащиты зданий с учетом стоимости жизненного цикла // АВОК. 2015. № 6.

10. Горшков А. С. Об окупаемости инвестиций на утепление фасадов существующих зданий // Энергосбережение. 2014. № 4.

11. Горшков А. С., Муравьев П. А., Таракин А. В. Повышение уровня изоляции наружных стен малоэтажного дома // Энергосбережение. 2016. № 8.

12. Ливчак В. И. Реальный путь повышения энергоэффективности за счет утепления зданий // АВОК. 2010. № 3.

13. Ливчак В. И. Экономическая оптимизация теплозащиты зданий // АВОК. 2015. № 6.

14. Цены и ценообразование в рыночной экономике. Теория цены / под ред. В. М. Гальперина, В. Е. Есипова. СПб.: Изд-во СПбУЭФ, 1992. 233 с.

References

1. Bogoslovskiy V. N. *Stroitel'naya teplofizika (teplofizicheskie osnovy otopleniya, ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukh)* [Building thermophysics (thermophysical basics of heating, ventilation and air conditioning)]. ST. Petersburg, AVOK Severo-Zapad Publ., 2000, 400 p.

2. Dmitriev A. N., Tabunshchikov Yu. A., Kovalev I. N., Shilkin N. V. *Rukovodstvo po otsenke ehkonomicheskoy ehffektivnosti investitsiy v ehnergoberegayushchie meropriyatiya* [Guide to assess the economic efficiency of investments in energy-saving measures]. Moscow, AVOK-PRESS Publ., 2005, 120 p.

3. Eremkin A. I., Koroleva T. I. *Teplovoy rezhim zdaniy* [Thermal operation mode of buildings]. Moscow, ASV Publ., 2000, 368 p.

4. Savin V. K. *Stroitel'naya fizika: ehnergoperenos, ehnergoehffektivnost', ehnergoberezhenie* [Building

physics: energy transfer, energy efficiency, energy saving]. Moscow, Lazur' Publ., 2005, 432 p.

5. Samarin O. D. *Teplofizika. Ehnergoberezhenie. Ehnergoehffektivnost'* [Thermophysics. Energy saving. Energy Efficiency]. Moscow; Publisher ASV, 2011, 296 p.

6. Tabunshchikov Yu. A., Brodach M. M. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya teplovoy ehffektivnosti zdaniy* [Mathematical modeling and optimization of thermal efficiency of buildings]. Moscow, AVOK-PRESS Publ., 2002, 194 p.

7. Tabunshchikov Yu. A., Brodach M. M., Shilkin N. V. *Ehnergoehffektivnye zdaniya* [Energy efficient buildings]. Moscow, AVOK-PRESS Publ., 2003, 200 p.

8. Fokin K. F. *Stroitel'naya teplofizika ograzhdayushchikh konstruktsey zdaniy* [Building heat engineering of enclosing constructions of buildings]. Ed. by Tabunshchikov Yu. A., Gagarin V. G. Moscow, AVOK-PRESS Publ., 2006, 256 p.

9. Vasilev G. P., Lichman V. A. *Ehffektivnyy uroven' teplozashchity zdaniy s uchetom stoimosti zhiznennogo tsikla* [Efficient level of thermal protection of buildings considering the life cycle cost]. AVOK, 2015, no. 6.

10. Gorshkov A. S. *Ob okupaemosti investitsiy na uteplenie fasadov sushchestvuyushchikh zdaniy* [On the recoupment of investments for the insulation of the facades of existing buildings]. *Ehnergoberezhenie – Energy saving*, 2014, no. 4.

11. Gorshkov A. S., Murav'ev P. A., Tarakin A. V. *Povyshenie urovnya izolyatsii naruzhnykh sten maloehtazhnogo doma* [Increasing the level of isolation of the external walls of low-rise buildings]. *Ehnergoberezhenie – Energy saving*, 2016, no. 8.

12. Livchak V. I. *Real'nyy put' povysheniya ehnergoehffektivnosti za schet utepleniya zdaniy* [The real way to increase energy efficiency through the insulation of buildings]. AVOK, 2010, no. 3.

13. Livchak V. I. *Ehkonomicheskaya optimizatsiya teplozashchity zdaniy* [Economic optimization of building heat protection]. AVOK, 2015, no. 6.

14. *Tseny i tsenoobrazovanie v rynochnoy ehkonomike* [Prices and pricing in the market economy]. *Teoriya tseny* [Theory of prices]. Ed. by Gal'perin V. M., Esipov V. E. St. Petersburg, SPbUEhF Publ., 1992, 233 p.