

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЗДАНИЙ

Ю.А. Табунщиков, М. М. Бродач

Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, Россия

Аннотация

В соответствии с принципами системного подхода математическую модель теплового режима здания как единой теплоэнергетической системы целесообразно представить в виде трех взаимосвязанных моделей, более удобных для изучения:

- математической модели теплоэнергетического воздействия наружного климата на здание;
- математической модели теплоаккумуляционных характеристик оболочки здания;
- математической модели теплоэнергетического баланса помещений здания.

Оптимизационная задача для энергоэффективного здания имеет следующее содержание: определить показатели архитектурных и инженерных решений здания, обеспечивающих минимизацию расхода энергии на создание микроклимата в помещениях здания.

В статье представлены решения оптимизационной задачи, включающей в себя реализацию математических моделей здания как единой теплоэнергетической системы, также показано, что решение, например, задачи оптимального управления расходом энергии при отоплении помещений, обеспечивает более 70% экономии энергии.

Ключевые слова: системный анализ, математическая модель, энергоэффективное здание

SYSTEM ANALYSIS FOR DESIGNING ENERGY- EFFICIENT BUILDINGS

Yu. Tabunshchikov, M. Brodach

Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russia

Abstract

In accordance with the principles of the system approach mathematical model of the thermal behavior of the building as a single energy system should be presented in the form of three interrelated models, more convenient for the study:

- Mathematical model of heat and power impact of the outside climate on the building;
- Mathematical model of the heat accumulative characteristics of the building envelope;
- Mathematical model of heat and power balance of the building premises.

An optimization problem for the energy efficiency of buildings has the following contents: identify indicators of architectural and building engineering solutions that minimize energy consumption to create a microclimate in the premises.

The article presents the solution of the optimization problem, including the implementation of mathematical models as a single energy system. The article shows that, for example, the solution of the problem of optimal control the flow of energy during heating up period after temperature set back, provides a 70% energy saving

Keywords: system analysis, mathematical model, energy efficiency

Введение

Одним из актуальнейших направлений в мировой строительной индустрии является проектирование энергоэффективных зданий. К настоящему времени такие здания в большом количестве построены во всех странах мира [1,2,3,4]. Вместе с тем до настоящего времени не создан системный анализ и научные основы проектирования и строительства энергоэффективных зданий, а сами эти работы осуществляются «методом проб и ошибок».

С точки зрения современной науки, задача проектирования энергоэффективных зданий относится к так называемым задачам «системного анализа» или задачам «исследования операций», поиск решения которых связан с выбором альтернативы и требует анализа сложной информации различной физической природы [5]. Цель методов системного анализа или исследования операций – предварительное количественное обоснование оптимальных решений. Оптимальными здесь называются решения, которые по тем или иным признакам предпочтительнее всех других.

Исследование операций включает в себя три главных направления:

- построение математической модели, то есть описание процесса на языке математики;
- выбор целевой функции. Это исследование включает в себя определение ограничивающих условий и формулирование оптимизационной задачи;
- решение поставленной оптимизационной задачи.

Заметим, что принятие окончательного решения выходит за рамки исследования операций и относится к компетенции ответственного лица (чаще группы лиц), которому предоставлено право окончательного выбора и на которого возложена ответственность за этот выбор. Делая выбор, он может учитывать наряду с рекомендациями, вытекающими из математического расчета, еще ряд соображений количественного и качественного характера, которые в этих расчетах не были учтены.

Основная часть

Математическая модель и целевая функция для энергоэффективного здания

В соответствии с методологией системного анализа математическую модель теплового режима здания как единой теплоэнергетической системы целесообразно представить в виде трех взаимосвязанных моделей, более удобных для изучения [6]:

- математической модели теплоэнергетического воздействия наружного климата на здание;
- математической модели теплоаккумуляционных характеристик оболочки здания;
- математической модели теплоэнергетического баланса помещений здания.

Подробное описание математических моделей отдельных элементов здания и здания как единой энергетической системы дано в [6].

Оптимизационная задача для энергоэффективного здания имеет следующее содержание: определить показатели архитектурных и инженерных решений здания, обеспечивающих минимизацию расхода энергии на создание микроклимата в помещениях здания. В обобщенном математическом виде целевую функцию для энергоэффективного здания можно записать так:

$$Q_{\min} = F(a_i)$$

где $Q_{\min}$ – минимальный расход энергии на создание микроклимата в помещениях здания;

a_i – показатели архитектурных и инженерных решений здания, обеспечивающих минимизацию расхода энергии.

При реальном проектировании энергоэффективное здание в большинстве случаев не будет реализовано из-за ряда ограничений, вытекающих из конкретной строительной ситуации или из-за ряда соображений количественного или качественного характера, которые не были учтены при математическом моделировании. В этом случае целесообразно ввести показатель, характеризующий степень отличия реализованного решения от оптимального. В других случаях этот же показатель может служить критерием оценки искусства проектировщика. Назовем эту величину «показателем теплоэнергетической эффективности проектного решения» и обозначим h , так что по определению

$$h = Q_{\text{эф}}/Q_{\text{пр}}$$

где $Q_{\text{эф}}$ – расход энергии на создание микроклимата в помещениях энергоэффективного здания;

$Q_{\text{пр}}$ – расход энергии на создание микроклимата в помещениях здания, принятого к проектированию.

С учетом принятого разделения математической модели теплового режима здания как единой теплоэнергетической системы на три взаимосвязанных подмодели можно записать

$$h = h_1 \cdot h_2 \cdot h_3 ,$$

где h_1 – показатель теплоэнергетической эффективности оптимального учета воздействия наружного климата на здание;

h_2 – показатель теплоэнергетической эффективности оптимального выбора тепло- и солнцезащитных характеристик наружных ограждающих конструкций;

h_3 – показатель теплоэнергетической эффективности оптимального выбора систем обеспечения микроклимата.

Оптимизация теплоэнергетического воздействия наружного климата на тепловой баланс здания

Теплоэнергетическое воздействие наружного климата на тепловой баланс здания может быть оптимизировано за счет выбора формы здания (для зданий прямоугольной формы принимаются в расчет такие параметры, как его размеры и ориентация), расположения и площадей заполнения световых проемов, регулирования фильтрационных потоков. Например, удачный выбор ориентации и размеров здания прямоугольной формы дает возможность в теплый период года уменьшить воздействие солнечной радиации на оболочку здания и, следовательно, снизить затраты на его охлаждение, а в холодный период – увеличить воздействие солнечной радиации на оболочку здания и уменьшить затраты на отопление. Аналогичные результаты будут получены при удачном выборе ориентации и размеров здания по отношению к воздействию ветра на его тепловой баланс.

Методология проектирования систем отопления, вентиляции, кондиционирования основана на расчетах тепловых и воздушных балансов здания для характерных периодов

года. Например, для России этими периодами года являются: наиболее холодная пятидневка, отопительный период, самый жаркий месяц, период охлаждения, расчетный год. В этом случае оптимизация теплоэнергетического воздействия наружного климата на тепловой баланс здания за счет выбора его формы и ориентации даст следующие результаты:

- для наиболее холодной пятидневки – снижение установочной мощности системы отопления;
- для отопительного периода – снижение затрат теплоты на отопление;
- для самого жаркого месяца – снижение установочной мощности системы кондиционирования воздуха;
- для периода охлаждения – снижение затрат энергии на охлаждение здания;
- для расчетного года – снижение затрат энергии на обогрев и охлаждение здания.

В общем случае оптимизировать теплоэнергетическое воздействие наружного климата на тепловой баланс здания можно для любого характерного периода времени.

Важно отметить следующее: изменение формы здания или его размеров и ориентации с целью оптимизации влияния наружного климата на его тепловой баланс не требует изменения площадей или объема здания – они сохраняются фиксированными.

Решение задачи по выбору оптимальной формы здания (Рис. 1), оптимальных размеров и ориентации зданий прямоугольной, треугольной и круглой формы, а также значения показателя тепловой эффективности проектного решения приведены в [6].

Авторами были проведены исследования влияния теплоэнергетического воздействия наружного климата на тепловой баланс здания за счет выбора оптимальных значений его размеров и ориентации. Расчеты проводились для климатических условий Москвы (560 с. ш.) и Ростова-на-Дону (480 с. ш.). Исходная ориентация принималась широтной, меридиональной и диагональной. В качестве объекта исследований принималось здание прямоугольной в плане формы, общей полезной площадью 1440 м². В качестве целевой функции принята минимизация затрат энергии на обогрев здания в холодный период или на охлаждение здания в теплый период. Цель исследований – выявить, как количественно увеличивается показатель теплоэнергетической эффективности здания за счет оптимального учета воздействия наружного климата на тепловой баланс здания. Результаты исследований приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Расчет теплоэнергетической эффективности

Период расчета	Повышение теплоэнергетической эффективности, %	
	Москва	Ростов-на-Дону
Холодная пятидневка	7	8
Отопительный период	12	15
Период охлаждения	22	25
Самый теплый месяц	15	18

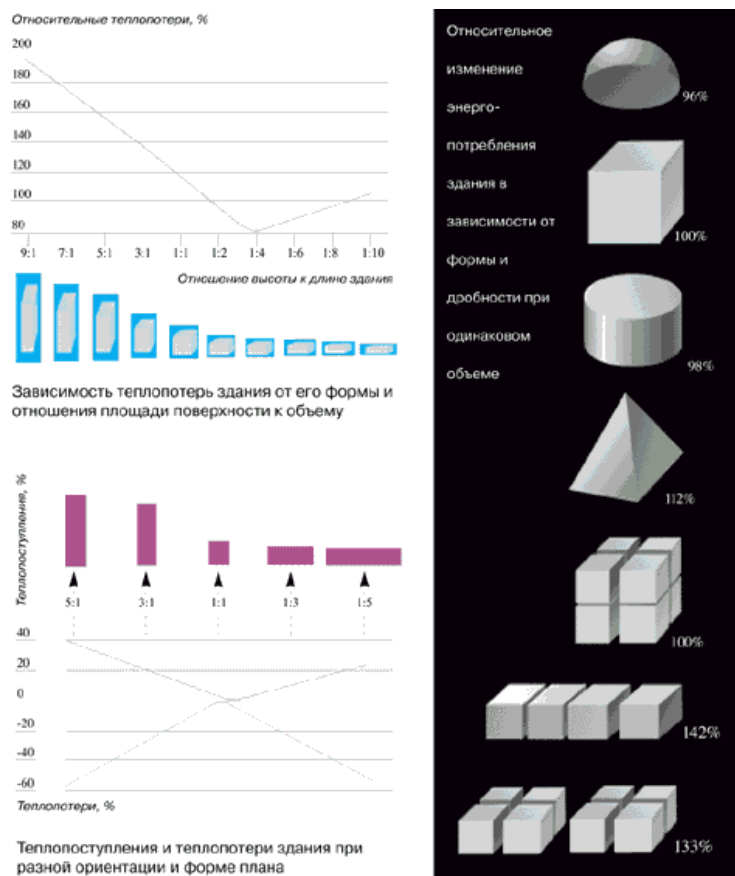


Рис. 1. Современное представление архитекторов о влиянии ориентации и формы здания на его теплопотребление

Оптимизация теплоэнергетического воздействия наружного климата на тепловой баланс здания

В традиционном понимании оптимизация теплозащиты наружных ограждающих конструкций зданий – это метод вычисления толщины теплоизоляции конструкции «по минимуму приведенных затрат». Математическая модель приведенных затрат в общем случае включает в себя два показателя: затраты на производство конструкций (единовременные затраты) и затраты на их использование (эксплуатационные затраты). Расчет теплоизоляции «по минимуму приведенных затрат» является объективным методом, признанным во всем мире, но содержит в своей сущности скрытую опасность, отражающую объективную реальность существующей в стране экономической ситуации, которая может явиться непреодолимым препятствием реализации метода на практике. Это связано с использованием в методе показателей стоимости энергии и материалов.

Многим специалистам памятна история со СНиП II-3-79 «Строительная теплотехника», который был разработан по заданию высших правительственных органов с целью существенного ужесточения требований к экономии топливно-энергетических ресурсов при эксплуатации зданий. Ожидалось, что главным достоинством этого документа явится введение в него метода приведенных затрат для выбора оптимальной теплозащиты ограждающих конструкций. При этом теплозащита ограждающих конструкций, включая заполнение световых проемов, должна была приниматься как наибольшая из двух величин, определяемых по санитарно-гигиеническим условиям и по минимуму приведенных затрат. Безусловно, предполагалось, что метод приведенных затрат даст большее значение теплозащиты, и это явится решением проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов.

Но... экономическая реальность складывалась таким образом, что энергия стоила дешевле газированной воды, и проектировщики при расчетах получили, что теплозащита по санитарно-гигиеническим требованиям превосходит величину, определенную по минимуму приведенных затрат. В строительном комплексе сложилась драматическая ситуация, которая усугублялась тем обстоятельством, что нельзя было выявить виновных. Метод был выбран правильно, но нельзя же было признать, что экономика социализма несостоятельна! Сегодня использование метода приведенных затрат сталкивается с другой, пока непреодолимой трудностью. Отсутствуют надежные, прогнозируемые на ближайшие 20–30 лет показатели стоимости энергии и материалов.

Вышеизложенное относится к проблеме экономической оптимизации теплозащиты ограждающих конструкций здания. Цель настоящей статьи – поиск решения проблемы теплоэнергетической оптимизации ограждающих конструкций.

Возможность решения этой проблемы в ее современном понимании и современными методами показана в ряде работ [6]. Современное понимание означает, что будет достигнуто решение, которое с учетом принятых ограничений является наиболее предпочтительным. Современные методы – это методы исследования операций.

Рассмотрим это более подробно.

К наружным ограждающим конструкциям предъявляется в общем случае достаточно большое количество требований. Высокий уровень теплозащиты в холодный период в условиях теплопередачи, близкой к стационарному режиму, высокий уровень теплоустойчивости в теплый и холодный периоды в условиях теплопередачи, близкой к периодическому режиму, низкая энергоемкость внутренних слоев при колебаниях теплового потока внутри помещения, высокая степень воздухо непроницаемости, низкая влагоемкость и т.д. и т.п.

Безусловно, при проектировании стремятся удовлетворить, в первую очередь, главным требованиям. Практика показывает, что количество таких требований, как правило, не более двух. В первую очередь, это теплозащита и теплоустойчивость. Здесь открываются большие возможности для оптимизации. Сущность ее состоит в том, что надо сконструировать методом исследования операций ограждающую конструкцию, которая оптимальным образом удовлетворяла бы требуемым (нормативным) значениям теплозащиты и теплоустойчивости.

В работе [6] решена задача подбора материала для многослойной ограждающей конструкции заданной фиксированной толщины, обеспечивающей наибольшее затухание наружных тепловых воздействий. Получено решение: наибольшее затухание обеспечивает материал, имеющий меньшую теплопроводность и большую объемную теплоемкость. Следствие решения: для районов с жарким климатом целесообразно выбирать конструкцию с меньшими значениями теплопроводности материалов, а для районов с холодным климатом – с большими значениями коэффициентов теплоусвоения материалов. В этой же работе приведено решение задачи определения предельных значений теплозащиты наружных ограждающих конструкций помещения при заданном значении солнцезащиты окон и заданной кратности воздухообмена. Помещение не оборудовано установкой кондиционирования. В результате решения получены следующие интересные выводы:

- теплозащита ограждающих конструкций не влияет на температурный режим помещения при определенных значениях солнцезащиты окон и кратности воздухообмена;

- увеличение теплозащиты наружных ограждающих конструкций приводит к ухудшению теплового режима помещения, если теплозащита окон недостаточна и кратность воздухообмена невелика.

Последний результат требует особой внимательности от проектировщиков, которые используют наружные ограждающие конструкции с эффективной теплоизоляцией для зданий, проектируемых для строительства в теплом климате.

Оптимизация тепловой нагрузки на систему климатизации помещений здания

Специалисту, занимающемуся проектированием и расчетом систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, очевидно, что задачей проектирования и расчета является определение двух взаимосвязанных показателей: количества энергии и способа ее распределения (раздачи). По существу, речь идет о том, чтобы рассчитать и запроектировать такую систему управления расходом и распределением энергии, чтобы обеспечить при использовании ее минимальный расход.

Таким образом, задача оптимизации теплоэнергетической нагрузки на систему обеспечения теплового режима здания будет относиться к так называемым задачам на оптимальное управление и получит следующее содержание: найти такое управление расходом энергии $Q(t)$ на обогрев помещения, удовлетворяющее уравнению теплового баланса помещения и соответствующим начальным и конечным тепловым условиям, для которого расход энергии

$$I = Q(t)dt$$

имеет наименьшее возможное значение.

Управление $Q(t)$, дающее решение поставленной задачи, называется оптимальным управлением, а соответствующая траектория изменения температуры внутреннего воздуха называется оптимальной траекторией.

Решение задачи получено авторами и приведено в [1].

Суть решения: время разогрева помещения должно быть минимизировано.

Если иметь в виду, что реальное помещение есть совокупность теплоемких ограждающих конструкций и теплоемкого внутреннего оборудования (мебели), то процесс нагрева предполагает повышение температуры всей совокупности элементов помещения, то есть ограждающих конструкций и оборудования. Элементы высокой тепловой аккумуляции потребуют большего времени на разогрев. Следовательно, минимизация времени разогрева помещения достигается минимизацией времени разогрева элементов высокой тепловой аккумуляции. Можно сразу указать два простых случая: время разогрева помещения будет стремиться к минимуму, если внутренние поверхности ограждающих конструкций имеют низкие значения коэффициента теплоусвоения материалов, а также если имеет место высокая интенсивность конвективного теплообмена между внутренним воздухом и внутренними поверхностями ограждающих конструкций. Оптимальный результат достигается, если совпадают оба случая.

Правильность этого решения получила подтверждение во время обсуждения доклада авторов по данной теме в Датском техническом университете. Датские специалисты сообщили, что во время реставрации католического собора с массивными каменными креслами для прихожан с целью экономии энергии на обогрев собора, используя понижение температуры внутреннего воздуха в ночное время, ими было принято решение разогрев собора начинать с разогрева электрическими подогревателями массивных каменных кресел. Экономия энергии составила 30 – 35%.

Авторы статьи проделали численные расчеты расхода энергии для помещения площадью 24 м² и объемом 72 м³ с двумя наружными ограждающими конструкциями и окном с двойным остеклением площадью 3 м². Рассмотрены три варианта наружных ограждающих конструкций:

- кирпичная кладка толщиной 0,56 м, коэффициент теплоусвоения 8,02 Вт/(м²•°C);
- керамзитобетонная панель толщиной 0,23 м, коэффициент теплоусвоения 3,36 т/(м²•°C);
- панель типа «сэндвич» с утеплителем из плиточного пенопласта с обшивкой с двух сторон металлическими листами, толщина панели 0,052 м, коэффициент теплоусвоения 0,77 Вт/(м²•°C).

Для сопоставления результатов расчетов ограждающие конструкции имеют одинаковое термическое сопротивление. Кратность воздухообмена принята 3⁻¹/ч. Температура наружного воздуха – 5 °C.

Начальные условия: температура внутреннего воздуха 10 °C, температура внутренних поверхностей ограждающих конструкций 10 °C.

Конечные условия: температура внутреннего воздуха 22 °C, температура внутренних поверхностей ограждающих конструкций 14 °C.

Чтобы обеспечить минимизацию времени разогрева, было принято, что разогрев осуществляется конвективными тепловыми струями, настилающимися на внутренние поверхности ограждающих конструкций. Интенсивность конвективного теплообмена соответствовала следующим трем значениям коэффициентов конвективного теплообмена:

$a_1 = 3,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$; $a_2 = 10,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$; $a_3 = 21 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$.

Результаты расчетов представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчета затрат энергии на разогрев помещения

Варианты	Время разогрева (t, ч) и затраты энергии (Q, Вт·ч) на разогрев помещения при значениях коэффициентов конвективного теплообмена											
	$a_1=3,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$				$a_2=10,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$				$a_3=21 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$			
	t	Q	Экономи я энергии, %		t	Q	Экономи я энергии, %		t	Q	Экономи я энергии, %	
			Э ₁	Э ₂			Э ₁	Э ₂			Э ₁	Э ₂
Кирпичная кладка из сплошного кирпича на цементно-песчаном растворе	9,7	58100	0	0	3,5	20970	64	0	1,2	7160	88	0
Керамзитобетонная панель	2,5	35200	0	40	0,9	12560	64	40	0,31	4330	88	40
Панель типа «Сэндвич» с утеплителем из плиточного пенопласта	0,6	15650	0	56	0,2	4715	70	62	0,08	1940	88	55

В Таблице 2 использованы условные обозначения:

Q – затраты энергии на разогрев, включая теплопотери через окна и за счет воздухообмена;

$\mathfrak{E}_1$ – экономия энергии за счет повышения интенсивности конвективного теплообмена при одной и той же ограждающей конструкции;

$\mathfrak{E}_2$ – экономия энергии за счет уменьшения теплоаккумуляционных показателей ограждающей конструкции (уменьшение коэффициента теплоусвоения).

Получен невероятный с точки зрения «здравого смысла» результат: максимальное значение экономии энергии при разогреве помещения при стремлении минимизировать время разогрева достигает 97%.

Такой результат был обеспечен выбором оптимальной стратегии распределения расходуемой энергии в помещениях, то есть нагрев начинался с разогрева теплоемких ограждающих конструкций. Практическую обоснованность такого подхода подтверждает использование потолочных теплоизлучателей «FRICO AB», производимых в Швеции (см. ИБ «Энергосбережение», 1996, № 9). Принципиальное отличие обогревателей «FRICO AB» состоит в том, что лучистое тепло направлено на нагрев пола помещения, а затем косвенным путем идет нагрев воздуха помещения. Применение потолочных теплоизлучателей «FRICO AB» обеспечивает экономию энергии до 50% по сравнению с конвективными методами обогрева.

Рассмотрение Таблице 2 позволяет сделать следующие выводы:

- экономия энергии при разогреве помещения за счет увеличения интенсивности конвективного теплообмена в 3 раза достигает 64 – 70%, а при увеличении в 6 раз – 88%. При этом время разогрева уменьшается в среднем в 3 раза;

- экономия энергии при разогреве помещения при уменьшении теплоаккумуляционных показателей ограждающей конструкции (уменьшение коэффициента теплоусвоения) в 2,4 раза достигает 40%, а в 10,4 раза – достигает 55 – 62%. При этом время разогрева уменьшается в среднем соответственно в 3,8 и 16 раз.

Литература

1. Табунщиков, Ю. А., Экспериментальные исследования оптимального управления расходом энергии / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач // АВОК. – 2006. – № 1. – С. 32-36.
2. Табунщиков, Ю. А. Энергоэффективные здания / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач, Н. В. Шилкин. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2015. – 193 с.
3. Табунщиков, Ю. А. Энергоэффективные здания – возможности московского строительства энергии / Ю. А. Табунщиков // Энергосбережение. – 2010. – № 8. – С. 34-37.
4. Шойхет, Б. М. Концепция энергоэффективного здания. Европейский опыт / Б. М. Шойхет // Энергосбережение. – 2007. – № 7. – С. 62-65.
5. Моисеев, Н. Н. Математические задачи системного анализа / Моисеев Н. Н. – М. : Наука, 1981. – 487 с.

6. Табунщиков, Ю. А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности здания / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2015. – 194 с.

References

1. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M. *Jeksperimental'nye issledovaniya optimal'nogo upravleniya rashodom jenergii* [Experimental study of optimal control of energy consumption. ABOK Journal]. Moscow, ABOK-PRESS, 2006, no. 1, p. 32-36.
2. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M., Shilkin N.V. *Jenergojeffektivnye zdanija* [Energy efficient buildings]. Moscow, ABOK-PRESS, 2015, 193 p.
3. Tabunshchikov Yu.A. *Jenergojeffektivnye zdanija – vozmozhnosti moskovskogo stroitel'stva jenergii* [Energy efficient buildings - the possibility of the construction of the Moscow. Magazine "Energy Saving"]. 2010, no. 8, pp. 34-37.
4. Shoikhet B.M. *Koncepcija jenergojeffektivnogo zdanija. Evropejskij opyt* [Concept of energy-efficient buildings. The European experience]. 2007, no. 7, pp. 62-65.
5. Moiseev N.N. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical problems of system analysis]. Moscow, 1981, 487 p.
6. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizacija teplovoj jeffektivnosti zdanija* [Mathematical modeling and optimization of thermal efficiency of the building]. Moscow, 2015, 194 p.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Табунщиков Юрий Андреевич

Доктор технических наук, член-корреспондент РААСН, президент НП «АВОК», профессор, заведующий кафедрой «Инженерное оборудование зданий», Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, Россия
e-mail: tab@abok.ru

Бродач Марианна Михайловна

Кандидат технических наук, вице-президент НП «АВОК», профессор кафедры «Инженерное оборудование зданий», Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, Россия
e-mail: brodatch@abok.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Tabunshchikov Yuri

Head of the Department of Moscow Institute of Architecture (State Academy), President ABOK, Moscow, Russia
e-mail: tab@abok.ru

Brodach Marianna

Professor, Moscow Institute of Architecture (State Academy), Vice-President ABOK, Moscow, Russia
e-mail: brodatch@abok.ru