

УДК 53.043, 536.24.01, 697.134

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ЗДАНИЯ С УЧЕТОМ ИНСОЛЯЦИОННЫХ ТЕПЛОПОСТУПЛЕНИЙ

Стрижак Павел Александрович,

д-р физ.-мат. наук, научный руководитель лаборатории моделирования процессов теплообмена, профессор каф. автоматизации теплоэнергетических процессов Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: pavelspa@tpu.ru

Морозов Максим Николаевич,

аспирант, инженер каф. автоматизации теплоэнергетических процессов Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: tpu_chm@tpu.ru

Имитационные модели применяются инженерами при проектировании климатических систем зданий и сооружений. Незаменимыми считаются модели для задачи повышения энергоэффективности как существующих, так и создаваемых объектов капитального строительства. Модель может применяться как инструмент энергетического исследования (энергомоделирования) зданий и сооружений при разработке технико-экономического обоснования в системе энергосбережения в соответствии с ISO 50001:2011 «Energy management systems – Requirements with guidance for use». Солнечное излучение – один из основных факторов, оказывающих влияние на тепловой режим здания. Внедрение интеллектуальной системы управления теплопотреблением позволяет повысить энергетическую эффективность при поддержании оптимальных климатических параметров в помещениях. **Цель исследования:** разработка комплексной модели здания и блока имитации погодных условий для проведения исследований влияния энергии солнечного излучения на тепловые процессы внутри здания, а также для оценки потенциала энергосбережения типичных зданий и сооружений.

Методы исследования: имитационное моделирование с использованием программной среды Simulink и специализированной библиотеки «акаузального» моделирования Simscape.

Результаты. Разработана комплексная модель здания. Выполнены исследования инсоляционных процессов, характерных для зимних (февраль) климатических условий Западной Сибири. Представлены результаты моделирования динамики температуры воздуха в контрольных помещениях. Полученные данные об изменении теплового режима контрольных помещений позволили изучить процессы теплообмена с окружающей средой, а также установить влияние энергии солнечного излучения на работу системы управления теплоснабжением. Представлены выводы касательно эффективности компенсации возмущающего фактора с целью достижения энергосберегающего эффекта.

Ключевые слова:

Инсоляционные теплопоступления, тепловой режим здания, имитационная модель, система управления теплопотреблением, энергоэффективность.

Введение

Не смотря на колебание цен на энергоносители, неизменным остается рост тарифов на тепловую и электрическую энергию. На этом фоне не угасает интерес к энергоэффективным и ресурсосберегающим технологиям со стороны государства, а также конечных потребителей [1–3]. В балансе мирового потребления энергии до 40 % уходит на здания и сооружения, откуда до 50 % энергии расходуется на поддержание климатических условий в помещениях, пригодных для жизнедеятельности человека [4]. Как следствие, задачи эффективного энергопотребления зданий и сооружений на протяжении многих лет остаются ключевыми.

В настоящее время усилия ведущих мировых инженерных центров (ASHRAE, ISO, ABOK и др.) направлены на разработку и модернизацию стандартов энергоэффективных зданий. Практика показывает, что при создании таких домов особое внимание требуется уделять проектированию климатических систем. Ключевым фактором для сни-

жения трудоемкости проектирования является использование специализированных программных средств [5–7].

К современным программным средствам энергомоделирования предъявляются жесткие требования к точности используемых математических моделей. Среди факторов, влияющих на адекватность модели, можно выделить следующие: детализация моделей ограждающих конструкций, инженерных систем, погодных условий: влияние ветровой нагрузки, инсоляции и др.

Стоит отметить, что в процессе проектирования здания весьма важно учитывать влияние солнечного излучения на климат помещений. Эффект от инсоляции, в зависимости от местоположения объекта и его архитектурных особенностей, может достигать 30 % в общем балансе теплопоступлений за отопительный сезон [8, 9].

Цель настоящей работы заключается в исследовании влияния инсоляционных теплопоступлений на тепловой режим типичного здания. Научный

интерес представляет наблюдение за изменением теплового режима контрольных помещений, а также за функционированием системы теплоснабжения здания и системы управления теплоснабжением при воздействии принятого основного возмущающего фактора – солнечного излучения.

Важность учета энергии солнечного излучения при исследовании климата помещений отмечается в работах [10–17]. Это позволяет, помимо поддержания оптимального теплового режима, способствовать достижению целевых показателей энергосбережения и энергоэффективности, указанных в Федеральном законе РФ № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности».

Математическая модель инсоляционных теплопоступлений

Под инсоляцией понимается [18] облучение поверхностей и пространств параллельными пучками лучей, поступающих от Солнца.

Известно, что на инсоляционные процессы влияют многие факторы, наиболее значимые из них: текущее состояние облачности в районе наблюдения, географическая широта района расположения объекта, пространственная ориентация и высота над уровнем моря облучаемых поверхностей ограждающих конструкций, действительное положение Солнца. Изменение данных факторов приводит к значительной неравномерности распределения излучения в течение суток в разные времена года [14, 19].

В общем случае при расчетах инсоляции можно руководствоваться методиками [20, 21]. На их основе разработаны специализированные программы и библиотеки, позволяющие рассчитывать продолжительность и интенсивность инсоляции для любой местности и времени года [22, 23].

Также стоит отметить, что в последнее время все чаще предлагают вводить дополнительные поправочные коэффициенты на снижение светопропускающих характеристик воздушного слоя из-за запыленности и загазованности городской атмосферы [8].

При создании математической модели для достижения поставленных исследовательских целей необходимо последовательно решить следующие задачи:

- расчет интенсивности теплового потока, поступающего на поверхности различной пространственной ориентации;
- определение параметров светопропускания и поглощения солнечной радиации прозрачных и непрозрачных ограждающих конструкций.

С учетом того, что для большинства зданий широко распространены горизонтальные и вертикальные поверхности различной ориентации по сторонам света, поверхностная плотность потока энергии солнечного излучения [24] может быть определена в соответствии с методикой [25]. Для горизонтальных поверхностей справедливо сле-

дующее выражение для нахождения среднесуточного теплопоступления суммарной солнечной радиации (прямой и рассеянной) [26]:

$$q_{hor\ i} = \frac{Q_{hor\ i}}{n_i},$$

где $Q_{hor\ i}$ – среднее, в разрезе многолетней статистики, количество энергии, приходящееся на 1 квадратный метр горизонтальной поверхности для расчетного климатического района за i -й месяц, Вт·ч/м²; n_i – количество дней, приходящееся на i -й месяц.

Аналогичное выражение для вертикальных поверхностей j -й ориентации:

$$q_{ver\ ij} = \frac{S_{hor\ i} \cdot k_{ij} + \frac{D_{hor\ i}}{2}}{n_i},$$

где $S_{hor\ i}$, $D_{hor\ i}$ – характеристики поверхностной плотности потока соответственно прямой и рассеянной солнечной радиации на горизонтальную поверхность для i -го месяца [27], Вт·ч/м²; k_{ij} – коэффициент пропорциональности, учитывающий особенности падения прямого излучения на поверхность j -й ориентации для i -го месяца, принимается согласно [25].

Для оценки инсоляционных теплопоступлений на конкретные ограждающие поверхности необходимо учитывать также цвет и состояние поверхности. Применительно к непрозрачным массивным ограждающим конструкциям справедливо следующее выражение для нахождения теплового потока, который непосредственно поглощается поверхностью рассматриваемой конструкции:

$$q_{wall\ ij} = q_{ver\ ij} \cdot K_{col},$$

где K_{col} – коэффициент теплоотражения ограждающей поверхности, зависящий от её цветности.

Инсоляционные теплопоступления в помещение через светопрозрачные конструкции (окна и фонари) определяются по формуле [28]:

$$q_{win\ ij} = \tau_j k_j A_j q_{ver\ ij},$$

где τ_j – коэффициент учета затенения непрозрачными элементами окна, имеющего j -ую ориентацию; k_j – коэффициент относительного проникновения солнечной радиации через прозрачную часть окна j -й ориентации; A_j – площадь светопрозрачной конструкции, выходящей на j -ую сторону света, м².

При моделировании инсоляционных процессов приняты следующие допущения:

- вертикальные поверхности наружных ограждающих конструкций помещений ориентированы строго в южном, западном и северном направлениях;
- интенсивность инсоляционных теплопоступлений подчиняется закону нормального распределения;
- согласно рекомендации авторов работы [26] отраженная составляющая солнечной радиа-

ции для холодного периода года в модели не учитывается;

- все удельные показатели интенсивности солнечного излучения приняты с учетом действительных условий облачности.

Описание объекта моделирования

Аналогично схеме [29] в качестве целевого объекта моделирования принято типичное здание административного плана. Для решения поставленной задачи выбрано шесть контрольных помещений, имеющих порядковые номера № 1–6: три группы, каждая включает две комнаты. Помещения имеют идентичную планировку с параметрами: площадь 41,52 м², объем 112,1 м³ (рис. 1). Коэффициент остекления K_{gl} имеет значение 0,23, что соответствует площади поверхности стены 17,85 м² и светопрозрачных конструкций 5,38 м² (за вычетом площади непрозрачного профиля стеклопакета).

Комнаты одной группы имеют одинаковую пространственную ориентацию наружных ограждающих поверхностей:

- 1-я группа (помещения № 1 и 2) – Юг;
- 2-я группа (помещения № 3 и 4) – Запад;
- 3-я группа (помещения № 5 и 6) – Север.

Далее помещения, ограждающие конструкции которых направлены на Юг, будут называться по-

мещениями южной ориентации (остальные направления ориентации – по аналогии).

Снабжение здания тепловой энергией реализовано через центральный тепловой пункт. На вводе трубопровода в здание установлен индивидуальный тепловой пункт (ИТП). Система отопления принята с верхним распределением теплоносителя, отопительные приборы соединены последовательно. Таким образом, каждая группа имеет общий вертикальный стояк: внутри группы четное (№ 2, 4, 6) помещение расположено первым по ходу движения теплоносителя, тогда как нечетное (№ 1, 3, 5) расположено ниже по стояку. Обвязка радиаторов выполнена по широко используемой схеме с байпасным каналом и регулирующим клапаном.

Система управления теплоснабжением здания принята распределенной структуры [29], включающей индивидуальные комнатные регуляторы.

Имитационная модель инсоляционных теплоступлений

Имитационная модель построена на базе приложения Simulink математического пакета Matlab. Применен блочно-ориентированный подход к моделированию и «визуальному» программированию системы теплоснабжения здания в совокупно-

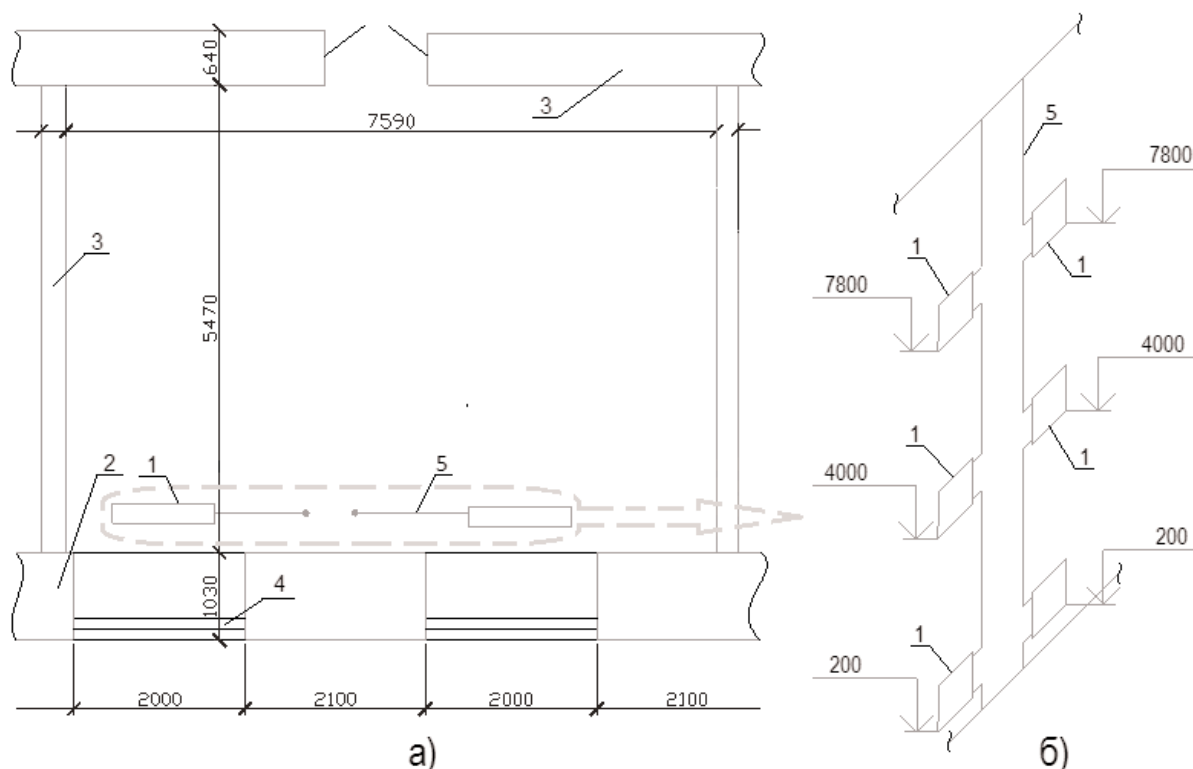


Рис. 1. Схематичное представление объекта моделирования (а – план помещения, б – часть аксонометрической схемы одно-трубной системы отопления): 1 – отопительный прибор; 2, 3 – наружные и внутренние ограждающие конструкции; 4 – стеклопакет; 5 – водопроводная труба

Fig. 1. Diagram of the modelling object: (a is the plan of building spaces; б is the part of axonometric diagram of single-pipe heating system): 1 is the heating body; 2, 3 are the external and internal building envelops; 4 is the glass unit; 5 is the water-supply pipe

сти с широким функционалом программного продукта Matlab: инструменты для анализа динамики различных по сложности систем, связь с рабочей средой Workspace и другими приложениями пакета Matlab (например, Control System Toolbox), моделирование различных возмущений (детерминированных или случайных с различными законами распределения) и ситуаций (штатных или нештатных, в том числе аварийных), возникающих в процессе эксплуатации комплексных объектов и отдельных технических систем. Также при разработке модели применен пакет расширения Simscape, реализующий концепцию «акаузального» моделирования [30]. Модель отличается универсальностью и позволяет решать задачи прогнозирования и энергомоделирования зданий и сооружений различных назначений [5, 31].

Отличие настоящей модели от ранее представленных в [29, 32] заключается в возможности варьирования ключевых параметров (поверхностная плотность потока солнечного излучения, продолжительность, смещение) потока энергии солнечного излучения в широком диапазоне. Моделирование инсоляционных явлений в приложении Simscape позволяет учесть различные механизмы теплообмена, тепловую инерцию ограждающих конструкций, что максимально увеличивает точность модели, расширяет ее функционал и сферу применения. Для этого разработаны специализированные функциональные блоки имитации солнечной радиации (рис. 2), а также доработаны модели ограждающих конструкций (рис. 3).

На рис. 2 представлена основная часть блока имитации погодных условий, содержащая 4 элемента (Юг, Север, Восток, Запад).

Рис. 3 показывает модификацию блока светопрозрачной конструкции (стеклопакет), отличающегося наличием блока распределения солнечной

радиации (выделен пунктирной линией), который служит для определения индивидуальных характеристик поверхностей наружных конструкций – коэффициенты затенения и относительного проникновения солнечной радиации и другие характеристики светопропускания и поглощения.

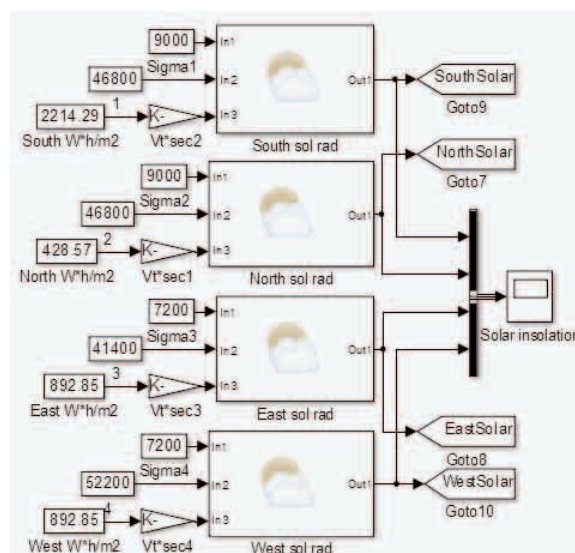


Рис. 2. Реализация блока имитации солнечной радиации в Matlab

Fig. 2. Implementation of solar radiation simulation block in Matlab

Результаты исследований

Для достижения заявленных целей проведено две серии численных экспериментов, заключающихся в исследовании распределения энергии солнечной радиации, приходящейся на массивные ограждающие конструкции (оштукатуренная сте-

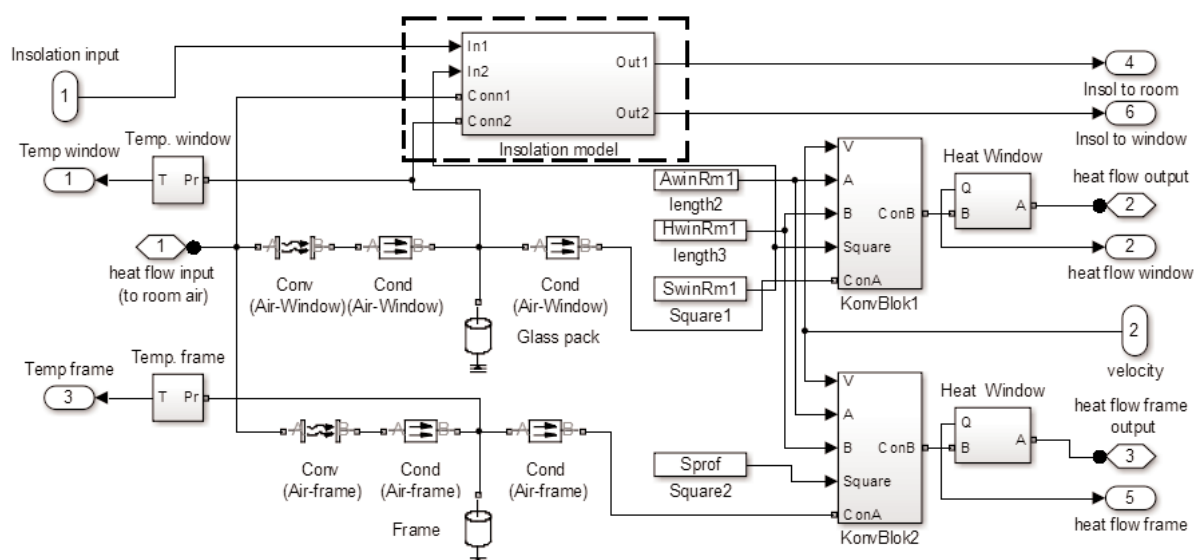


Рис. 3. Реализация модели ограждающих конструкций в Matlab

Fig. 3. Implementation of building envelop model in Matlab

на светло-серого цвета из кирпичной кладки) и окна (два двухкамерных стеклопакета с ПВХ-профилем), а также влияния инсоляции на тепловой режим помещений. Первая серия опытов проводилась при использовании интеллектуальной РСУ. Вторая – на базе одиночного контроллера ИТП без локальных контуров регулирования климата помещений.

Исходные данные:

- объект исследования: типичное здание административного плана;
- период исследования: февраль;
- место расположения объекта исследования: г. Томск.

Моделирование проводилось при условиях инсоляции, характерных для с. Александровское. Незначительное расстояние до г. Тоска (30 км на северо-восток) позволяет использовать данные о солнечном излучении применительно к объекту исследования. Вертикальные поверхности различной пространственной ориентации характеризуются следующими значениями среднесуточной поверхностной плотности потока солнечного излучения Q_{insol} [26]:

Юг – 2214,29 Вт·ч/м²;
Запад – 892,85 Вт·ч/м²;
Восток – 892,85 Вт·ч/м²;
Север – 428,57 Вт·ч/м².

В качестве основного возмущающего фактора выбрано тепlopоступление от солнечного излучения. Остальные погодные условия характеризуются постоянными значениями:

- температура наружного воздуха $T_{out} = -30$ °C;
- скорость ветра $v = 4$ м/с;
- направление ветра – с Севера на Юг.

На рис. 4 представлены характерные значения поверхностной плотности потока солнечного излучения, падающего на квадратный метр наружных конструкций различной пространственной ориентации.

Анализ данных, представленных на рис. 4, позволяет сравнить показатели удельной интенсивности потока солнечной энергии, приходящейся на горизонтальную и вертикальные поверхности. Зависимости на рис. 5 дают информацию по распределению тепlopоступлений между светопрозрачной и непрозрачной конструкциями (для примера приведены результаты моделирования для помещений южной ориентации группы № 1) с учетом их геометрических размеров, а также индивидуальных характеристик поверхностей наружных конструкций.

Инсоляция через световой проем с установленным стеклопакетом характеризуется неполным пропусканием излучения через стеклопакет и складывается из трех основных составляющих:

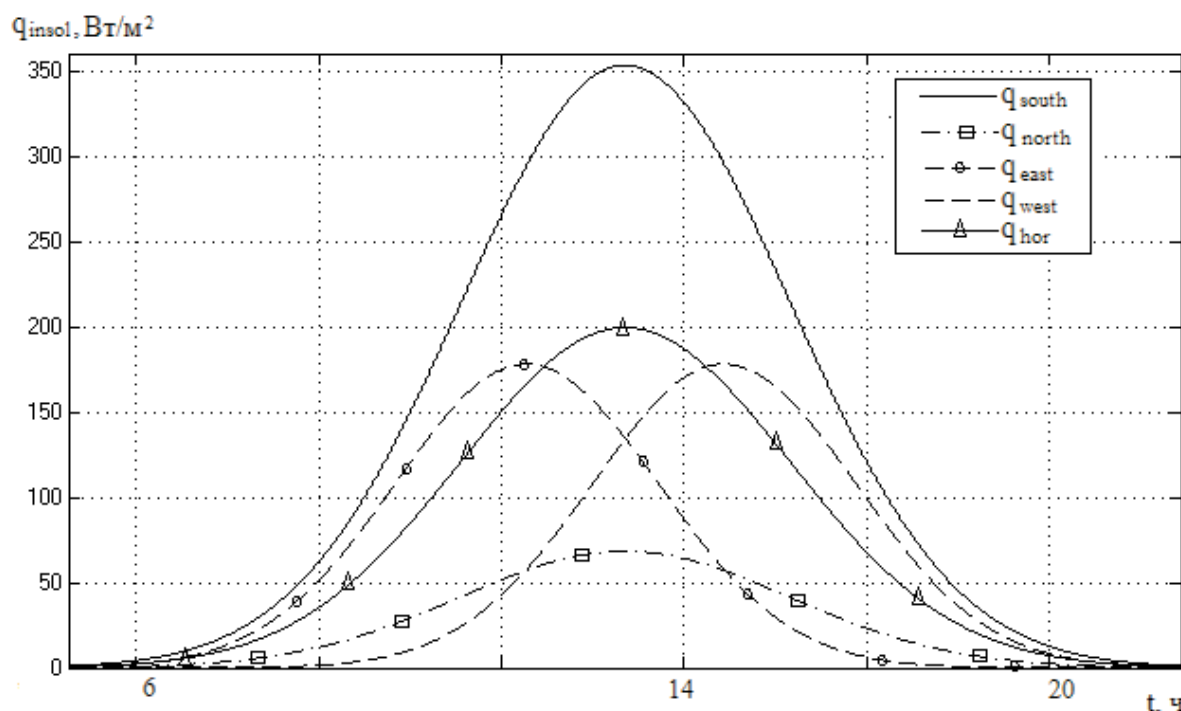


Рис. 4. Поверхностная плотность потока солнечного излучения q_{insol} (Вт/м²), поступающего на поверхности различной пространственной ориентации в течение суток (г. Томск, февраль): q_{south} – для вертикальной поверхности южной ориентации, q_{north} – северной ориентации, q_{east} – восточной ориентации, q_{west} – западной ориентации, q_{hor} – для горизонтальной поверхности

Fig. 4. Surface density of solar radiation flux q_{insol} (W/m²), entering the surfaces of different space orientation during the day (Tomsk, February): q_{south} – for vertical surface of south orientation, q_{north} – north orientation, q_{east} – east orientation, q_{west} – west orientation, q_{hor} – for horizontal surface

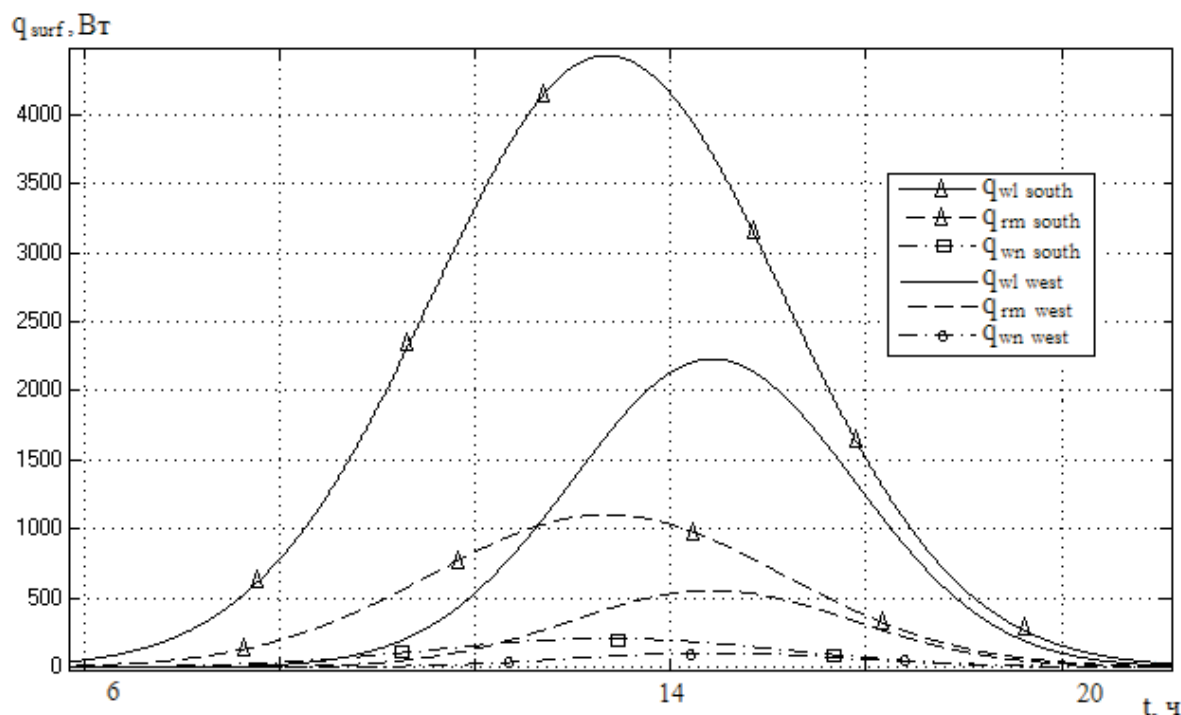


Рис. 5. Интенсивность солнечной радиации q_{surf} (Вт), поступающая на следующие поверхности (г. Томск, февраль): q_{wl} – наружных стен; q_{rm} – облучаемых объектов внутри помещений; q_{wn} – интенсивность солнечной энергии, поглощаемой стеклопакетом; индексы south и west определяют соответственно южную и западную ориентацию поверхностей

Fig. 5. Solar radiation intensity q_{surf} (W), entering the following surfaces (Tomsk, February): q_{wl} – outside walls; q_{rm} – irradiated objects inside the building; q_{wn} – intensity of solar energy absorbed by a glass unit; indices south and west determine south and west surface orientation, respectively

- отраженная от облучаемой поверхности в окружающую среду часть светового потока $q_{wn out}$;
- поглощенная конструкцией стеклопакета энергия q_{wn} ;
- оставшаяся часть энергии q_{rm} попадает непосредственно в помещение, где поглощается облучаемыми поверхностями различных объектов.

Процесс инсоляции непрозрачных конструкций протекает схоже со световыми проемами за исключением отсутствия прямого облучения объектов в помещении. Именно поэтому ошибочно считать q_{wl} прямым теплопоступлением в помещение. В процессе инсоляции происходит поглощение энергии потока солнечного излучения поверхностью массивной стены и соответственно нагрев последней. Увеличение разности температур стены и окружающего воздуха приводит к повышению теплопотерь в окружающую стену.

Рис. 6 позволяет оценить динамику теплового режима контрольных помещений различной пространственной ориентации. При воздействии принятого возмущающего фактора стабилизация температуры воздуха в помещениях T_{in} [33] происходит благодаря слаженной работе системы управления: отклонение регулируемого параметра контроллеры компенсируют изменением положения регулирующих клапанов локальных контуров отопительной системы.

Максимальное отклонение параметра T_{in} от заданного значения $T_{in set}=20^\circ\text{C}$ на протяжении цикла моделирования зафиксировано в помещении № 3 (западная ориентация, нижний этаж) на уровне $\Delta T_{in3}=0,092^\circ\text{C}$. Второе по величине отклонение – в помещении № 1 (южная ориентация, нижний этаж) $\Delta T_{in1}=0,023^\circ\text{C}$. Таким образом, полученные данные указывают на следующее противоречие: в помещении № 3 с относительно небольшим влиянием основного возмущающего фактора (40,3 % от интенсивности, характерной для южного направления) наблюдается максимальное отклонение температуры воздуха ΔT_{in3} , на 75 % большее относительно ΔT_{in1} . Такой эффект объясняется несколькими факторами:

1. Взаимное влияние тепловых режимов различных помещений, обусловленное изменением параметров теплоносителя (на рис. 6 для помещений № 3 и 4 заметно первоначальное снижение T_{in}). Стоит отметить, что снижение совпадает по времени с повышением T_{in1} и T_{in2} . Явление объясняется наличием контура циркуляции теплоносителя в отопительной системе: результатом влияния инсоляционных процессов в помещениях № 1 и 2 является повышение температуры теплоносителя в обратном трубопроводе. Далее, согласно заложенному алгоритму функционирования, контроллер ИТП увеличивает долю подмеса воды из обратного трубопровода в

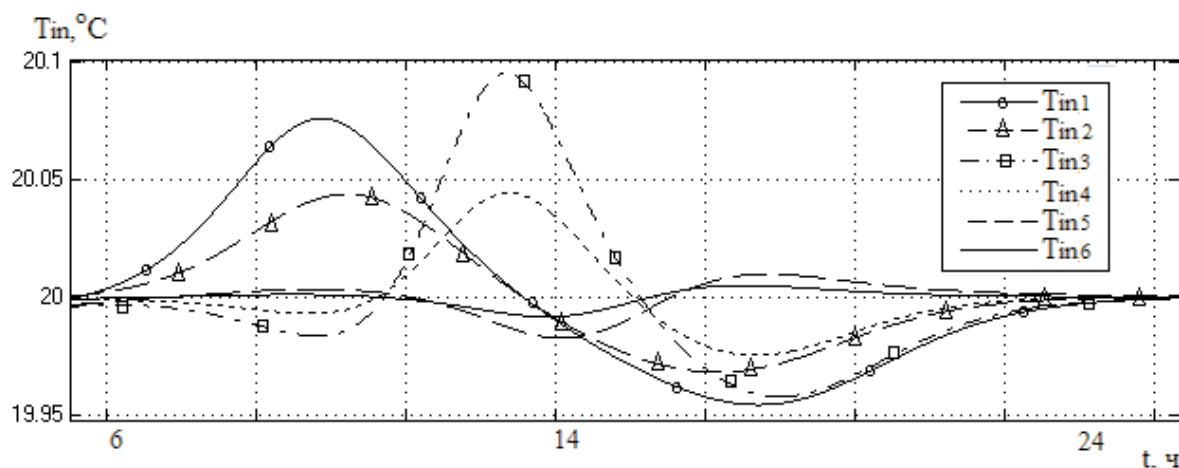


Рис. 6. Изменения температуры воздуха в помещениях при воздействии солнечного излучения: $T_{in i}$ – температура воздуха внутри i -го помещения, где $i=[1...6]$

Fig. 6. Change in air temperature in buildings affected by solar radiation: $T_{in i}$ is the air temperature inside the i building, where $i=[1...6]$

контур циркуляции отопительной системы. Следствием этого является снижение температуры подачи теплоносителя в контур (на рис. 7 показатель $T_{sup IHP}$) и, соответственно, температуры воздуха в помещениях, не подверженных влиянию солнечного излучения или подверженных в меньшей степени относительно помещения южной ориентации.

2. Различающиеся условия инсоляции (при прочих одинаковых характеристиках поглощения и светопропускания облучаемых поверхностей) обуславливают неравномерность теплоступлений в течение суток: процесс поглощения

энергии потока солнечного излучения вертикальными поверхностями различной пространственной ориентации характеризуется разными временными характеристиками (время начала и продолжительность облучения), а также интенсивностью потока q_{insol} .

Взаимное влияние указанных факторов оказывает значительное воздействие на климат помещений здания. Описанное выше снижение температур T_{in3} и T_{in4} далее сменяется резким ростом, что объясняется усилением роли второго фактора (инсоляционные теплоступления в помещения 2-й группы становятся весомыми).

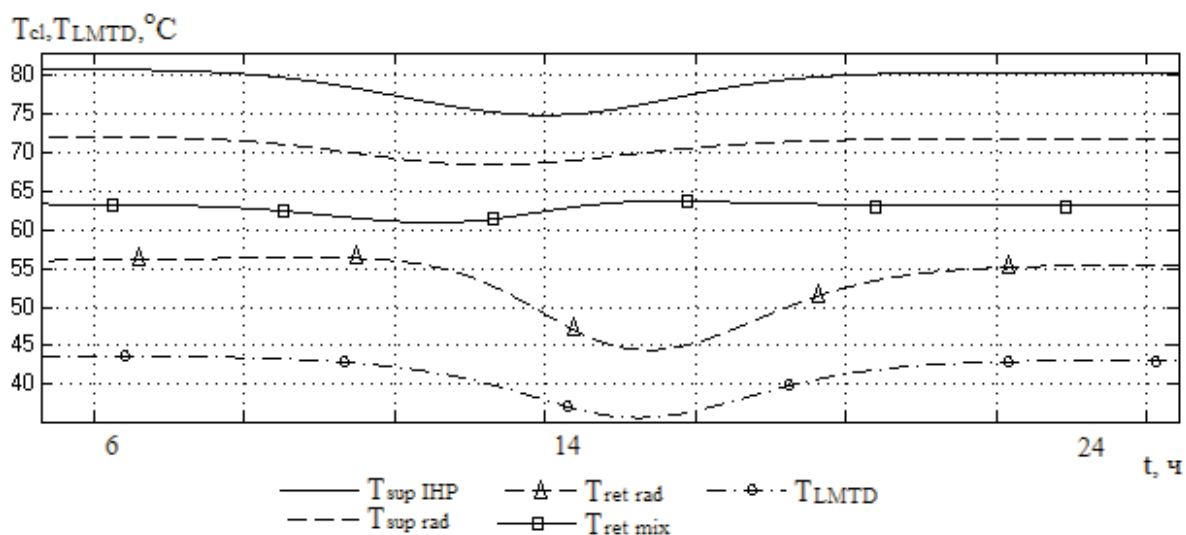


Рис. 7. Изменения температуры поверхности радиатора T_{LMTD} (°C), а также температуры теплоносителя отопительной системы T_d при влиянии солнечного излучения: $T_{sup IHP}$ – в подающем трубопроводе; $T_{sup mix}$ и $T_{ret rad}$ – на входе и выходе отопительного прибора помещения № 3 соответственно; $T_{ret mix}$ – в отходящем трубопроводе помещения № 3

Fig. 7. Change in temperature of radiator surface T_{LMTD} (°C), as well as the temperature of heating system heat conductor T_d affected by solar radiation: $T_{sup IHP}$ – in delivery piping; $T_{sup mix}$ and $T_{ret rad}$ – at the input and output of the building № 3 heating unit, respectively; $T_{ret mix}$ – in off-take piping of the building № 3

На рис. 7 представлены характерные значения температуры теплоносителя в выделенных узлах отопительной системы: подающий и обратный трубопроводы ИТП, обвязка отопительного прибора помещения № 3 (с наибольшими изменениями теплового режима).

На рис. 7 представлена динамика изменения температуры теплоносителя в наиболее важных узлах отопительной системы. Характерный профиль параметра $T_{ret\ rad}$ позволяет сделать вывод о компенсации инсоляционных теплопоступлений. При этом снижение значения температуры воды на выходе радиатора обусловлено повышением расхода теплоносителя через байпас и соответствующим снижением циркуляции через радиатор. Схожим образом реагирует температура поверхности радиатора T_{LMTD} [34]. Анализ профиля температуры возвращаемого теплоносителя $T_{ret\ mix}$ (итоговой после смешивания потоков из радиатора и байпасного канала) позволяет сделать вывод о незначительном влиянии данного параметра на работу отопительной системы и соответственно на тепловой режим здания. Изменение $T_{ret\ mix}$ для системы управления теплотреблением является возмущающим фактором, в результате действия которого меняется тепловой режим как отдельных помещений (расположенных далее по ходу движения теплоносителя), так и здания в целом.

Особый интерес для специалистов в области проектирования климатических систем представляют исследования энергоэффективности зданий и сооружений. В рамках данной работы дана оценка показателей теплотребления контрольных помещений Q_{heat} . Анализ динамики параметров Q_{heat} позволяет сделать выводы о потенциале энергосбережения, который может быть достигнут на реальном объекте при внедрении интеллектуальной системы управления теплотреблением здания [29], способной эффективно компенсировать инсоляционные теплопоступления. Результаты исследований для выбранных контрольных помещений представлены в таблице.

Таблица. Показатели суточного потребления тепловой энергии контрольными помещениями

Table. Indices of daily consumption of heat energy by the controlled buildings

Номер помещения Building number	Номер группы Group number	Ориентация наружных ограждающих конструкций Orientation of outside building envelops	Суточное энергопотребление Q_{heat} , кВт·ч Daily energy consumption, Q_{heat} , kW·h
1	1	Ю/Юг/South	41,00
2			41,03
3	2	Запад/West	46,08
4			46,11
5	3	Север/North	47,82
6			47,84

Таким образом, интеллектуальная система управления типа РСУ позволяет сэкономить до

6,84 кВт·ч на теплоснабжении одного помещения за сутки с учетом принятых погодных условий. За базовое значение принято энергопотребление для помещения № 6 северной ориентации $Q_{heat\ rms}$. Максимальный потенциал энергосбережения зафиксирован в помещении южной ориентации (14,3 %). В комнатах западной и восточной ориентации экономия достигает 3,67 % за счет компенсации влияния солнечного излучения.

Выводы

1. С использованием программной среды Simulink математического пакета Matlab разработана комплексная имитационная модель здания, состоящая из источника и системы теплоснабжения, архитектурных конструкций отдельных помещений и здания в целом. Разработан функциональный блок имитации солнечного излучения и тепловых процессов инсоляции помещений на базе приложения Simulink с применением концепции «акаузального» моделирования. Модель позволяет варьировать параметры, учитывающие как условия источника излучения и среды передачи солнечной радиации, так и характеристики процесса поглощения теплопоступлений облучаемыми конструкциями здания.
2. Применение специализированной библиотеки Simscape позволило интегрировать на единой платформе модели реальных объектов, а также интеллектуальной автоматизированной системы управления теплотреблением здания.
3. Выполнены исследования инсоляционных процессов, характерных для зимних (февраль) климатических условий Западной Сибири. Согласно принятой математической модели дана качественная и количественная оценка процессов поглощения энергии солнечного излучения, поступающей на светопрозрачные и непрозрачные поверхности ограждающих конструкций с различными физическими характеристиками.
4. Описано специфичное влияние инсоляционных теплопоступлений на динамику параметров теплоносителя отопительной системы и воздушной среды помещений с последовательным соединением отопительных приборов. Описать процессы, происходящие при функционировании принятой системы управления, помогли установленные изменения температуры теплоносителя в наиболее важных узлах отопительной системы.
5. При исследовании влияния солнечного излучения на тепловой режим здания максимальное отклонение температуры воздуха от заданной величины составило: для помещения западной ориентации 0,092 °C, южной – 0,023 °C, северной – 0,015 °C.
6. Результаты моделирования доказывают энергетическую эффективность многоконтурной системы управления с распределенной структурой относительно централизованной системы с

одним контуром регулирования. Компенсация инсоляционных теплопоступления позволяет добиться снижения потребления тепловой энергии до 14,3 % или 6,84 кВт·ч на теплоснабжении одного помещения за сутки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубягин Ю.П., Дубягина О.П., Марченко Е.М. Стратегия национальной безопасности России и ее соотносимость с энергетической безопасностью и ее важными системными составляющими: энергосбережением и водоподготовкой // Энергосбережение и водоподготовка. – 2013. – Т. 83. – № 2. – С. 11–16.
2. Парыгин А.Г., Волкова Т.А., Куличихин В.В. О энергонеэкономичности и надежности тепловых пунктов // Энергетик. – 2013. – № 3. – С. 41–43.
3. Самарин О.Д., Гришнев Е.А. Повышение энергоэффективности зданий на основе интеллектуальных технологий // Энергосбережение и водоподготовка. – 2011. – № 5. – С. 12–14.
4. Oldewurtel F., Sturzenegger D., Morari M. Importance of occupancy information for building climate control // Applied energy. – 2013. – V. 101. – № 1. – P. 521–532.
5. Developing a physical BIM library for building thermal energy simulation / J.B. Kim, W.S. Jeong, M.J. Clayton, J.S. Haberl, W. Yan // Automation in construction. – 2015. – V. 50. – № 2. – P. 16–28.
6. Djedjig R., Bozonnet E., Belarbi R. Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program // Energy and buildings. – 2015. – V. 86. – № 1. – P. 93–103.
7. Andarini R. The role of building thermal simulation for energy efficient building design // Energy procedia. – 2014. – V. 47. – P. 217–226.
8. Аваньев В.А., Балуева Л.Н., Гальперин А.Д. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика. – М.: Интердиалект, 2003. – 416 с.
9. Зорин Р.Н., Чигарева Ю.С. Обзор опыта строительства зданий с большой площадью светопрозрачных конструкций // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология. – 2012. – № 1. – С. 136–140.
10. Крупнов Б.А. Выбор энергоэффективной системы вентиляции и кондиционирования помещений со значительными теплопоступлениями через светопрозрачные ограждения за счет солнечной радиации и теплопередачи // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 405–410.
11. Ким А.А., Смольянинова Т.А. Оценка инсоляции учебных аудиторий Тихоокеанского государственного университета // Новые идеи нового века – 2014: Матер. 14-ой Междунар. науч. конф. – Хабаровск, 2014. – Т. 2. – С. 405–410.
12. Панферов С.В., Тедегин А.И., Панферов В.И. Некоторые проблемы энергосбережения и автоматизации в системах теплоснабжения зданий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2010. – Т. 198. – № 22. – С. 79–86.
13. Потапова Т.А. Критерии оценки энергоэффективности градостроительного комплекса (на примере г. Братска) // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2010. – № 2. – С. 207–209.
14. Пешкичева Н.С. К вопросу инсоляции в городах // Наука и современность. – 2011. – № 9–2. – С. 39–43.
15. Чистович С.А. Автоматическое регулирование расхода тепла в системах теплоснабжения. – СПб.: Стройиздат, 1975. – 159 с.
16. Коржнева Т.Г., Ушаков В.Я., Овчаров А.Т. Анализ теплопотерь через системы естественного освещения // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 322. – № 4. – С. 56–60.
17. Рымаров А.Г., Ботнарь М.И. Зависимость теплопотребления от динамики температуры наружного воздуха в период резкого похолодания // Строительство: наука и образование. – 2014. – № 3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2014/03/4_Rymarov.pdf (дата обращения: 20.12.2014).
18. Бахарев Д.В., Орлова Л.Н. О нормировании и расчете инсоляции // Светотехника. – 2006. – № 1. – С. 18–27.
19. Vitucci E.M., Degli-Esposti V., Capriotti L. Ray tracing to predict insolation in urban environment // Proc. of the 2012 IEEE International geoscience and remote sensing symposium. – Munich, 2012. – P. 5848–5851.
20. Кондратьев К.Я., Пивоварова З.И., Федорова М.П. Радиационный режим наклонных поверхностей. – СПб.: Гидрометеиздат, 1978. – 232 с.
21. Сивков С.И. Методы расчета характеристик солнечной радиации. – СПб.: Гидрометеиздат, 1968. – 215 с.
22. Хейфец А.В. Система автоматизированного расчета продолжительности инсоляции // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: строительство и архитектура. – 2007. – Т. 86. – № 14. – С. 52–54.
23. Сюткин В.В. Моделирование инсоляции земной поверхности в среде ArcGIS // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Серия 7: геология, география. – 2011. – № 4. – С. 126–134.
24. ГОСТ Р 51370–99 Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытание на воздействие солнечного излучения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 23 с.
25. СП 23.101.2004. Свод правил «Проектирование тепловой защиты зданий». – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 139 с.
26. Малявина Е.Г., Борщев А.Н. Расчет солнечной радиации в зимнее время // АВОК. – 2006. – № 7. URL: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3374 (дата обращения: 24.12.2014).
27. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Ч. 1–6. Вып. 1–34. – СПб.: Гидрометеиздат, 1989–1998.
28. Малявина Е.Г. Теплопотери здания: справочное пособие. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2007. – 144 с.
29. Морозов М.Н., Стрижак П.А. Оценка энергоэффективности одноконтурных систем отопления // Энергетик. – 2014. – № 7. – С. 42–45.
30. Broman D., Fritzson P. Higher-order acausal models // Proc. of the 2nd International workshop on equation-based object-oriented languages and tools. – Paphos, 2008. – P. 59–69.
31. Georgescu M., Mezić I. Building energy modeling: A systematic approach to zoning and model reduction using Koopman mode analysis // Energy and buildings. – 2015. – V. 86. – № 1. – P. 794–802.
32. Стрижак П.А., Морозов М.Н. Тепловой режим здания при аварийной работе системы теплоснабжения // Главный энергетик. – 2014. – № 7. – С. 39–45.
33. Анисимов М.В. Тепловая защита чердачного перекрытия многоквартирного жилого здания с нетиповой кровлей при проведении капитального ремонта // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 4. – С. 15–21.
34. Lauenburg P., Wollerstrand J. Modelling space heating systems connected to district heating in case of electric power failure // Proc. of the Eleventh International Building simulation Conference (IBPSA). – Glasgow, 2009. – P. 150–158.

Поступила 04.04.2015 г.

UDC 53.043, 536.24.01, 697.134

MATHEMATICAL SIMULATION OF BUILDING THERMAL REGIME INCLUDING SOLAR GAINS

Pavel A. Strizhak,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,
634050, Russia. E-mail: pavelspa@tpu.ru

Maxim N. Morozov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,
634050, Russia. E-mail: tpu_chm@tpu.ru

Simulation models are used by engineers in designing buildings climate systems. Such models are essential for solving a problem of improving energy efficiency of capital construction objects. The model can be applied as a tool for investigating building and constructions energy (energy modelling) when developing the techno-economic justification in the energy management system according to ISO 50001:2011 «Energy management systems – Requirements with guidance for use». Solar radiation is one of the major factors affecting the thermal regime of the building. Implementation of the intelligent control system of heat consumption allows increasing energy efficiency in case of maintaining optimal climatic parameters in rooms.

The main aim of the study is to develop the integrated model of building and weather conditions simulation block for carrying out subsequent studies of the solar radiation influence on thermal processes inside the building, as well as for evaluating energy saving potential.

The methods used in the study: simulation using the software package Simulink and special libraries Simscape of «acausal» modeling.

The results. The authors have developed the integrated model of building and investigated the insolation processes typical for climatic parameters of Western Siberia (February). The paper introduces the research results of the indoor air temperature dynamics in the control rooms. The received data on changing the thermal regime of the control room allowed further studying of heat exchange with the environment, as well as determining the effect of solar radiation on heat supply control system functioning. The paper introduces the conclusions on the efficiency of the disturbing factor compensation for achieving energy saving effect.

Key words:

Insolation heat gain, thermal regime of a building, simulation model, heat consumption control system, energy efficiency.

The research was financially supported by the program of competitive growth of the National research Tomsk Polytechnic University within the grants VIU (project VIU_ENIN_2014).

REFERENCES

1. Dubyagin Yu.P., Dubyagina O.P., Marchenko E.M. Strategiya natsionalnoy bezopasnosti Rossii i ee sootnosimost s energeticheskoy bezopasnostyu i ee vazhnymi sistemnymi sostavlyayushchimi: energosberezheniem i vodopodgotovkoy [The strategy of national safety of Russia and its correlation with energy security and its important system components: the energy saving and watertreatment]. *Energy saving and water treatment*, 2013, vol. 83, no. 2, pp. 11–16.
2. Parygin A.G., Volkova T.A., Kulichihin V.V. O energonezavisimosti i nadezhnosti teplovyykh punktov [About energy independence and reliability of heating units]. *Energetik*, 2013, no. 3, pp. 41–43.
3. Samarin O.D., Grishneva E.A. Povyshenie energoeffektivnosti zdaniy na osnove intellektualnykh tekhnologiy [Building energy efficiency improving based on intelligent technologies]. *Energy saving and water treatment*, 2011, no. 5, pp. 12–14.
4. Oldewurtel F., Sturzenegger D., Morari M. Importance of occupancy information for building climate control. *Applied energy*, 2013, vol. 101, no. 1, pp. 521–532.
5. Kim J. B., Jeong W. S., Clayton M. J., Haberl J. S., Yan W. Developing a physical BIM library for building thermal energy simulation. *Automation in construction*, 2015, vol. 50, no. 2, pp. 16–28.
6. Djedjig R., Bozonnet E., Belarbi R. Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program. *Energy and buildings*, 2015, vol. 86, no. 1, pp. 93–103.
7. Andarini R. The role of building thermal simulation for energy efficient building design. *Energy procedia*, 2014, vol. 47, pp. 217–226.
8. Avanev V.A., Balueva L.N., Galperin A.D. *Sistemy ventilyatsii i konditsionirovaniya. Teoriya i praktika* [Ventilation and air-conditioning. Theory and practice]. Moscow, Interdialekt Publ., 2003, 416 p.
9. Zorin R.N., Chigareva Yu.S. Obzor opyta stroitelstva zdaniy s bolshoy ploshchadyu svetoprozrachnykh konstruktsey [The review of experience of construction of buildings with big square glazing]. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. Series: High-Tech. Ecology*, 2012, no. 1, pp. 136–140.
10. Krupnov B.A. Vybore energoeffektivnoy sistemy ventilyatsii i konditsionirovaniya pomescheniy so znachitelnymi teplopostupleniyami cherez svetoprozrachnye ogradzheniya za schet solnechnoy radiatsii i teploperedachi [Selection of energy efficient ventilating and air conditioning system of premises with sufficient heat ingress through transparent enclosures by solar radiation and heat transfer]. *Academia. Architecture and Construction*, 2010, no. 3, pp. 405–410.
11. Kim A.A., Smolyaninova T.A. Otsenka insolyatsii uchebnykh auditoriy Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta [Assessment of insolation classrooms pacific national university]. *Novye idei novogo veka-2014. Materialy 14 Mezhdunarodnoy konferentsii* [The new Ideas of New Century-2014: The 14th International Scientific Conf. Proc.]. Khabarovsk, 2014. Vol. 2, pp. 405–410.
12. Panferov S.V., Tedegin A.I., Panferov V.I. Nekotorye problemy energosberezheniya i avtomatizatsii v sistemakh teplosnabzheniya zdaniy [Some problems of energy saving and automation of buildings heat systems]. *Bulletin of the South Ural State University, Series: Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics*, 2010, vol. 198, no. 2, pp. 79–86.

13. Potapova T.A. Kriterii otsenki energoeffektivnosti gradostroitel'nogo kompleksa (na primere g. Bratska) [Energy efficiency assessment criteria of urban complex (on example the Bratsk city)]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2010, no. 2, pp. 207–209.
14. Peshkicheva N.S. K voprosu insolyatsii v gorodakh [On the issue of insolation in cities]. *Nauka i sovremennost*, 2011, no. 9–2, pp. 39–43.
15. Chistovich S.A. *Avtomaticheskoe regulirovanie rashkoda tepla v sistemakh teplosnabzheniya* [Automatic control of heat consumption in heat supply systems]. St. Petersburg, Stroyizdat Publ., 1975. 159 p.
16. Korzhneva T.G., Ushakov V.Ya., Ovcharov A.T. Analiz teplopoter cherez sistemy estestvennogo osveshcheniya [Analysis of heat losses through daylight illumination systems]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 322, no. 4, pp. 56–60.
17. Rymarov A.G., Botnar M.I. Zavisimost teplopotrebleniya ot dinamiki temperatury naruzhnogo vozdukh v period rezkogo pokholodaniya [Dependence of heat consumption on the dynamics of external air temperature during cold snap periods]. *Construction: Science and Education*, 2014, no. 3. Available at: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2014/03/4_Rymarov.pdf (accessed 20 December 2014).
18. Bakharev D.V., Orlova L.N. O normirovanii i raschete insolyatsii [About normalization and calculation of insolation]. *Light and Engineering*, 2006, no. 1, pp. 18–27.
19. Vitucci E.M., Degli-Esposti V., Capriotti L. Ray tracing to predict insolation in urban environment. *Proceedings of the 2012 IEEE International geoscience and remote sensing symposium*. Munich, 2012, pp. 5848–5851.
20. Kondratev K.Ya., Pivovarova Z.I., Fedorova M.P. *Radiatsionnyy rezhim naklonnykh poverkhnostey* [The radiation regime of the angled surfaces]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1978, 232 p.
21. Sivkov S.I. *Metody rascheta kharakteristik solnechnoy radiatsii* [Methods for computing solar radiation characteristics]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1968, 215 p.
22. Kheyfets A.V. Sistema avtomatizirovannogo rascheta prodolzhitelnosti insolyatsii [Computer calculation system of the sunshine duration]. *Bulletin of the South Ural State University, Series: Construction engineering and architecture*, 2007, vol. 86, no. 14, pp. 52–54.
23. Syutkin V.V. Modelirovanie insolyatsii zemnoy poverkhnosti v srede ArcGIS [Modeling insolation of a terrain in ArcGIS software environment]. *Vestnik of St. Petersburg State University, Series 7. Geology. Geography*, 2011, no. 4, pp. 126–134.
24. GOST R 51370–99. *Metody ispytaniy na stoykost k klimaticheskim vneshnim vozdeystvuyushchim faktoram mashin, priborov i drugih tekhnicheskikh izdeliy. Ispytanie na vozdeystvie solnechnogo izlucheniya* [State Standard R 51370–99. Climatic environment stability test methods for machines, instruments and other industrial products. Test for influence of solar radiation]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 23 p.
25. SP 23.101.2004. *Svod pravil «Proektirovanie teplovoy zashchity zdaniy»* [Rulebook «Designing buildings thermal protection»]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 2004. 139 p.
26. Malyavina E.G., Borshchev A.N. Raschet solnechnoy radiatsii v zimnee vremya [Calculation of solar radiation in winter]. *ABOK*, 2006, no. 7. Available at: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3374 (accessed 24 December 2014).
27. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR* [Reference book on the USSR climate]. P. 1–6, Iss. 1–34, St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1989–1998.
28. Malyavina E.G. *Teplopoteri zdaniya: spravocnoe posobie* [Heat loss of the building: resource book]. Moscow, ABOK-PRESS, 2007. 144 p.
29. Morozov M.N., Strizhak P.A. Otsenka energoeffektivnosti odnotrubnykh sistem otopeniya [Energy efficiency analysis of single-pipe heating system]. *Energetik*, 2014, no. 7, pp. 42–45.
30. Broman D., Fritzson P. Higher-order acausal models. *Proceedings of the «2-nd International workshop on equation-based object-oriented languages and tools»*. Paphos, Cyprus, July 8, 2008, pp. 59–69.
31. Georgescu M., Mezić I. Building energy modeling: A systematic approach to zoning and model reduction using Koopman mode analysis. *Energy and buildings*, 2015, vol. 86, no.1, pp. 794–802.
32. Strizhak P.A., Morozov M.N. Teplovoy rezhim zdaniya pri avariynoy rabote sistemy teplosnabzheniya [Building thermal mode in case of emergency termination of heat supply]. *Glavny energetik*, 2014, no. 7, pp. 39–45.
33. Anisimov M.V. Teplovaya zashchita cherdachnogo perekrytiya mnogokvartirnogo zhilogo zdaniya s netipovoy krovley pri provedenii kapitalnogo remonta [Thermal protection shield of attic floor when repairing multi-apartment building with nonstandard roofing system]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 4, pp. 15–21.
34. Lauenburg P., Wollerstrand J. Modelling space heating systems connected to district heating in case of electric power failure. *Proceedings of the Eleventh International Building simulation Conference (IBPSA)*. Glasgow, Scotland, 2009. pp. 150–158.

Received: 04 April 2015.