

УДК 620.98

Дешко В. И., Шовкалюк М. М., Ленский А. В.

Национальный технический университет Украины «КПИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОТОПЛЕНИЯ

Проведено чисельне моделювання теплового стану приміщень будівель з урахуванням зміни на протязі доби значень зовнішніх та внутрішніх умов. Отримано значення теплових потоків і температур на поверхнях конструкцій та тепловтрат приміщень.

Проведено численне моделювання теплового стану приміщень будівель з урахуванням змін значень зовнішніх та внутрішніх умов. Отримано значення теплових потоків і температур на поверхнях конструкцій та тепловтрат приміщень.

Buildings apartment thermal state simulation is conducted taking into account the outdoor and interior conditions value changes during a day. The values of heat fluxes and temperatures on constructions surfaces and thermal losses of building envelope are obtained.

c – удельная теплоемкость;
 G – массовый расход;
 I – поток солнечной радиации;
 k – коэффициент теплопередачи;
 m – кратность воздухообмена;
 Q – тепловой поток;
 R – сопротивление теплопередачи;
 t – температура;
 Z – коэффициент чувствительности;
 α – коэффициент теплоотдачи;
 δ – толщина;

η – коэффициент поглощения;
 λ – коэффициент теплопроводности;
 ρ – плотность;
 τ – время;

Нижние индексы:

Ins – инсоляция;
 вн – внутренний;
 нар – наружный;
 доп – дополнительный;
 ст – стенка.

Введение

Тепловая обстановка в помещении характеризуется многими факторами. Для того, чтобы оценить соблюдение комфортных условий или эффективность введения регулирования, нужно иметь возможность определять тепловые потоки и температуры воздуха и ограждений для каждого момента времени с учетом изменения температуры внешней среды, дополнительных поступлений теплоты от бытовых приборов, людей, солнца.

Анализ последних исследований и постановка проблемы

Действующая нормативная база [1, 2] по определению теплотребления для характерных периодов года нацелена в основном на проектирование. Согласно [2] для определения расчетных расходов тепловой энергии необходимо учитывать, в отличие от [1], не только бытовые тепловыделения, но и солнечную инсоляцию. Полный учет многообразия

действующих на тепловую обстановку в помещении факторов привел бы к усложнению расчетов, поэтому любая модель имеет упрощения. В [3] при управлении отпуском тепла от источника принимаются во внимание только внешние воздействия – температура и влажность наружного воздуха, скорость ветра, но не учитывается солнечная инсоляция. А авторы [4], учитывая солнечную радиацию, отмечают, что это позволяет сэкономить значительную часть тепловой энергии на отопление (до 40%), но не анализируют влияние дополнительных тепловыделений в помещениях, хотя для общественных зданий имеет место совпадение максимума значений этих факторов в дневное время. В модели [5] не принимается во внимание величины расхода и температур теплоносителя, учитывается лишь средняя температура прибора.

Вопросы влияния реальных погодных условий и других факторов на режимы отопления зданий разных типов изучаются мало, хотя они практически представляют интерес при оценке эффективности

введения регулирования. Эффективным способом исследования тепловых режимов зданий разных типов является математическое моделирование.

Целью данной работы является разработка нестационарной математической модели и анализ с ее помощью тепловых режимов, распределения температур в ограждениях, определение тепловых потоков помещений для жилых и общественных зданий при улучшении их тепловой защиты.

Объект исследования – помещение с размерами 4x4x2,5 м. Теплообмен помещения через ограждение связан с теплопроводностью, солнечной радиацией, воздухообменом и с бытовыми теплопоступлениями (см. рис. 1).

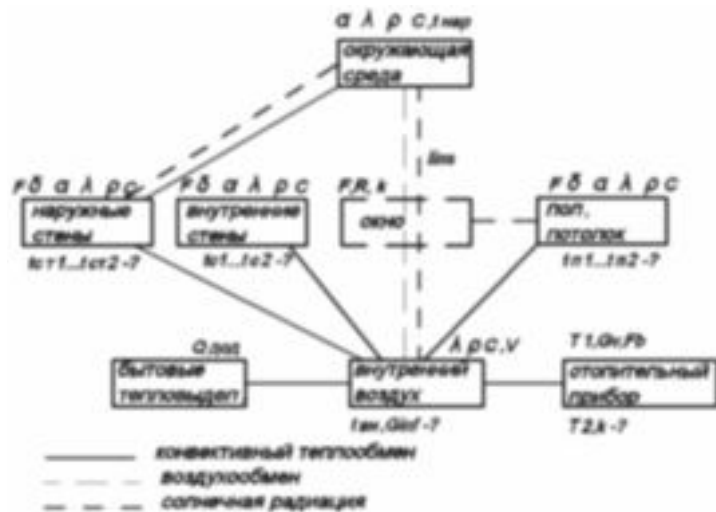


Рис.1. Схема тепловых связей в помещении

Внешние ограждающие конструкции комнаты включают стены, которые состоят из нескольких слоев и окна. Каждый слой стены представлен такими параметрами: толщина δ , м; коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К); удельная теплоемкость c , Дж/(кг·К); плотность ρ , кг/м³. Для внутренних ограждающих конструкций предусмотрен лишь один слой. В ограждающих конструкциях рассматривается кондуктивный теплообмен.

Расчеты проводились для здания типа «хрущевка» и здания с усиленной теплоизоляцией в соответствии с современными нормами [2]. Для этого к внешнему слою был введен дополнительный слой изоляции и термическое сопротивление стен составило 2,8 (м²·К)/Вт. Источник теплоты – нагревательный прибор, площадь которого определялась после моделирования теплообмена в расчетном режиме ($t_{p.o.} = -22$ °С, $t_{вн} = 18$ °С). В данном случае при-

няты чугунные радиаторы типа М-140-АО с количеством секций 7 шт.

Математическая формулировка задачи. Теплопроводность в конструкциях стен, пола, потолка описывается уравнением:

$$c_j \rho_j \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda_j \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}; \quad t = t(x, \tau), \quad x \in (\overline{0, \delta_j}), \quad (1)$$

где c , ρ , λ – соответственно теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности j -го слоя; x – пространственная координата; t – температура; τ – время.

Конечно-разностный аналог уравнения (1) по неявной схеме для внутренних узлов каждого слоя конструкции:

$$c_j \rho_j \frac{t_i^{p+1} - t_i^p}{\Delta \tau} = \lambda_j \left(\frac{t_{i+1}^{p+1} - 2t_i^{p+1} + t_{i-1}^{p+1}}{\Delta x_j^2} \right), \quad (2)$$

$i \in (\overline{2, n-1}), \quad j \in (\overline{1, m}),$

где i – номер узла по координате, для которого составляется баланс энергии; j – рассматриваемый слой, n – количество узлов, p – часовой уровень; $\Delta \tau$ – квант времени; Δx_j – квант расстояния. Для границ конструкции стен, которые граничат с внешним воздухом, задаются граничные условия:

$$\begin{cases} \alpha_{нар} (t_{нар} - t_{n,nn}) + I_{инс} \cdot \eta = -\lambda_{nn} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{n,nn}, \\ t_{нар} = f_1(\tau), \quad I_{инс} = f_2(\tau) \end{cases}, \quad (3)$$

где $\alpha_{нар}$ – эффективный коэффициент теплоотдачи с внешней стороны конструкции, $t_{нар}$ – температура внешнего воздуха; $I_{инс}$ – плотность потока солнечного излучения, которое падает на ограждение; η – коэффициент поглощения поверхности ограждения.

На оси внутренних стен, пола и потолка устанавливаются адиабатные условия. Для окон задаются условия теплопередачи и проникновения солнечной радиации, включая коэффициент относительного проникновения. Начальное распределение температур во всех узлах модели определяется после моделирования в стационарном режиме. Для нагревательного прибора задается расчетный постоянный расход и температура подачи теплоноси-

теля, рассчитанная по температурному графику [6], коэффициент теплопередачи нагревательного прибора с воздухом в помещении определяется для условий конвективно-радиационного теплообмена. Возможен учет воздухообмена в помещении через кратность или расчетную разность давлений на границах ограждений. Из уравнения теплового баланса для теплообмена воздуха в помещении с внутренними поверхностями ограждающих конструкций и с нагревательным прибором, с учетом внутренних бытовых поступлений от людей, которые находятся в помещении, работающих приборов и поступлений от солнца определяется температура внутреннего воздуха ($t_{вн}$) и значения тепловых потоков отдельных элементов системы.

Приведенная модель реализована на алгоритмическом языке C++, расчет температурных полей в ограждающих конструкциях выполняется методом конечных разностей. Проведенные расчеты для стационарных условий сравнивались с моделированием на трехмерной численной модели [7], где расчеты проводились в программной среде Fluent. Определено, что распределение температуры $t_{вн}$ по объему помещения сравнительно равномерное (кроме зоны над нагревательным прибором), что позволяет принимать одинаковое значение $t_{вн}$ при расчете теплообмена. Отличие средней температуры составляет меньше 8%, что удостоверяет возможность использования одномерной модели для анализа.

Результаты моделирования в стационарном режиме

Исходными данными для расчетов в стационарном режиме являются начальные параметры для нестационарного режима, рассмотренные ниже. Как показали результаты, температура неизолированного помещения с одной наружной стеной $t_{вн}$

составляет примерно 18,5 °С, а благодаря изоляции ограждения может повыситься на 3...4 °С при тех же параметрах теплоносителя и размерах отопительного прибора, что предоставит возможность дополнительной экономии энергоресурсов при введении регулирования. Для угловой комнаты с теми же исходными параметрами отопительного прибора $t_{вн}$ при дополнительной изоляции составит 20 °С. Для приближения температуры углового помещения без изоляции к нормативному значению $t_{вн}=20$ °С необходимо увеличить площадь радиатора до 13 секций.

Был проведен параметрический анализ чувствительности температуры внутри помещения к изменению параметров модели x_i , в качестве коэффициента чувствительности принято:

$$Z = \frac{x_i}{t_{вн}^0} \cdot \frac{\partial t_{вн}}{\partial x} \approx \frac{x_i}{t_{вн}^0} \cdot \frac{\Delta t_{вн}}{\Delta x};$$

$$\Delta t_{вн} = t_{вн}(x_i + \Delta x) - t_{вн}(x_i);$$

$$\Delta x = 0,1x_i.$$
(4)

В качестве основных параметров модели рассматривались: тепловыделения в помещении ($Q_{доп}$), солнечная радиация (I_{ins}), наружная температура ($t_{нар}$), сопротивление теплопередачи наружных стен (R), коэффициент кратности воздухообмена (m), коэффициент теплопередачи окон ($k_{ок}$). При этом при анализе влияния изменения $t_{нар}$ под x_i принимается разность температур $\Delta t = t_{вн} - t_{нар}$ во избежание ситуации, когда $t_{нар} = 0$ °С (как наиболее часто повторяющаяся [8]) и $Z \rightarrow 0$. В качестве начальных значений параметров приняты следующие значения: $t_{нар} = t_{с.о.} = -1,1$ °С; $Q_{доп} = 200$ Вт, $R = 2,8$ (м²·К)/Вт, $I_{ins} = 200$ Вт/м²; $m = 1$, $K_{ок} = 2.127$ Вт/м²·К. В табл. 1 приведены значения величин чувствительности, полученных в результате расчетов (стационарный режим).

Табл. 1. Результаты параметрического анализа чувствительности

Параметр	Величина чувствительности
Температура наружного воздуха	0,57
Кратность воздухообмена	0,35
Солнечная радиация	0,24
Дополнительные тепловыделения	0,2
Коэффициент теплопередачи окна	0,15
Сопротивление теплопередачи стен	0,08

Табл. 2. Расчетные параметры ограждающих конструкций стен

Слой	Наружная стена без изоляции				Наружная стена изолированная			
	δ , м	λ , Вт/(м·К)	c , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	δ , м	λ , Вт/(м·К)	c , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³
кирпич	0,52	0,75	879	1800	0,52	0,75	879	1800
утеплитель	-	-	-	-	0,1	0,053	840	125
штукатурка	-	-	-	-	0,01	0,8	837	1800
раствор	-	-	-	-	0,01	0,52	837	1700

Таким образом, одними из наиболее влияющих параметров модели являются температура наружного воздуха и кратность воздухообмена. Так, изменение наружной температуры на 1 °С приводит к изменению внутренней на 0,6 °С (стационар). Чувствительность внутренней температуры к изменению сопротивления теплопередачи стены при высоких R низкая, что объясняется частично тем, что для зданий, построенных согласно новым нормам, возрастает роль таких составляющих теплового баланса, как потери на инфильтрацию вентиляционного воздуха и потери теплоты через окна. Для зданий, построенных по старым нормам, величина чувствительности к изменению R доходит до 0,25 и выше.

Результаты моделирования в нестационарном режиме

Расчеты были проведены для переходного периода (октябрь 2008) для г. Киева по фактическим данным [9]. Исходные данные, принятые для расчетов, приведены в табл. 2 и на рис.2: параметры ограждающих конструкций, температура внешнего воздуха, солнечная радиация и дополнительные тепловыделения общественных или жилых зданий. Окно площадью 2 м² имеет двойное остекление в спаренных переплетах ($R=0,47$ (м²·К)/Вт).

Проведена серия расчетов для помещений с одной наружной стеной и углового помещения при разной степени тепловой защиты и разных типах зданий – общественные и жилые. Вначале оценивалось изменение тепловых потоков и $t_{вн}$ под воздействием изменения наружной температуры, потом вводились дополнительные возмущения: либо дополнительные тепловыделения, либо солнечная инсоляция, либо то и другое сразу. Далее оценивались

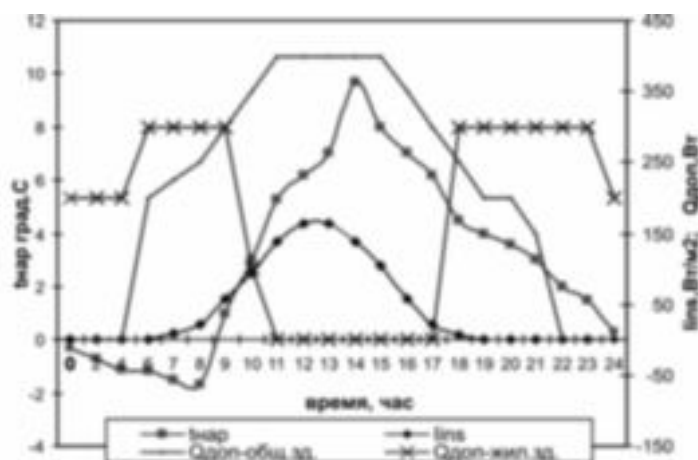


Рис. 2. Исходные данные для расчетов.

отклонения температур между текущим и начальным значением в течение суток: внутри помещения $t_{вн}$, наружной $t_{нар}$, на внутренней и наружной поверхностях стены ($t_{ст1}$ и $t_{ст2}$), результаты анализа для варианта неуглового помещения с дополнительной изоляцией представлены на рис. 3. Анализ показал, что при колебаниях наружного воздуха до 11,4 °С температура $t_{вн}$ меняется в пределах до 1 °С (причем как для здания утепленного, так и без утепления). Если учитывать другие факторы, то колебания $t_{вн}$ более значительны. В частности, благодаря тепловыделениям температура помещения может увеличиться на 3 °С, а учитывая еще и инсоляцию, которая проникает через окно и нагревает внешнюю поверхность стены, – на 4 °С. При этом изменение температуры $t_{ст2}$ достигает 16 °С (подобные результаты были получены и другими исследователями [5]). То есть, учитывая аккумулирующую способность здания, влияние колебаний наружной температуры по сравнению со стационаром уменьшается, возрастает роль других факторов – тепловыделений и инсоляции.

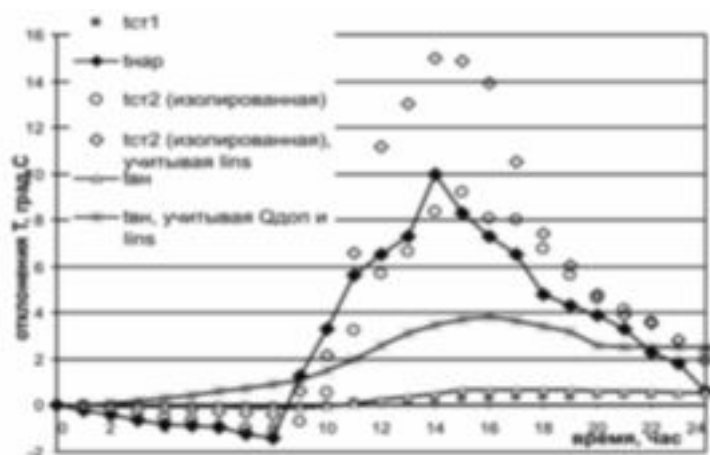


Рис. 3. Отклонения температур (помещение с изоляцией, неугловое)

На изменение температуры внутренней поверхности наружного ограждения и, соответственно, тепловые потоки, так же как и на $t_{вн}$, основное влияние имеют дополнительные тепловыделения, за счет чего температура стены может повыситься на 2 °С. При учете влияния солнечной радиации температура внешней поверхности стены увеличивается почти на 5 °С. Изоляция приводит к увеличению колебаний температуры на внешней поверхности.

На основе расчетов получены данные по тепловым потокам помещения – трансмиссионным через ограждающие конструкции и на подогрев инфильтрующегося воздуха, а также поток от отопительного прибора. Рассмотрим более детально конвективные тепловые потоки на внутренней (рис.4) и наружной поверхностях стены (рис.5). Тепловой поток со знаком «минус» показывает, что по отношению к помещению это – теплопотери. На температуру стенки и, следовательно, тепловой поток с внутренней стороны помещения более значительное влияние оказывают тепловыделения, а на температуру стенки с наружной стороны – солнечная радиация, эти потоки и были нанесены на графики.

При этом изменение теплового потока на внутренней поверхности доходит до 50% для неизолированной стены и до 100 % для изолированной.

На внешней поверхности стены при колебаниях температуры воздуха (см. рис. 3) при наличии/отсутствии инсоляции имеют место разные условия теплообмена. При $t_{нар} < t_{ст2}$ имеет место тепловой поток теплопроводностью в направлении к

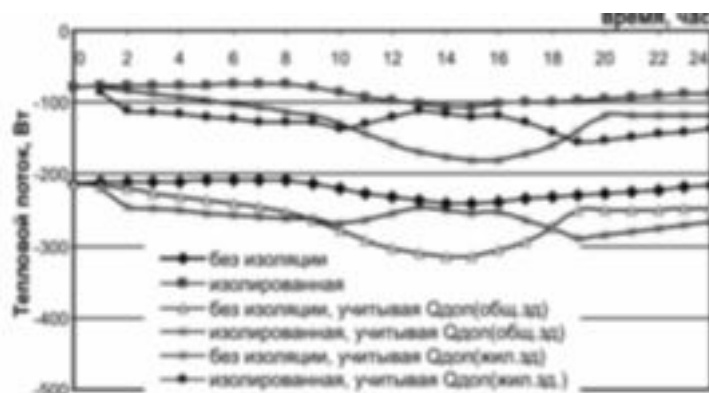


Рис.4. Конвективный тепловой поток на внутренней поверхности стены

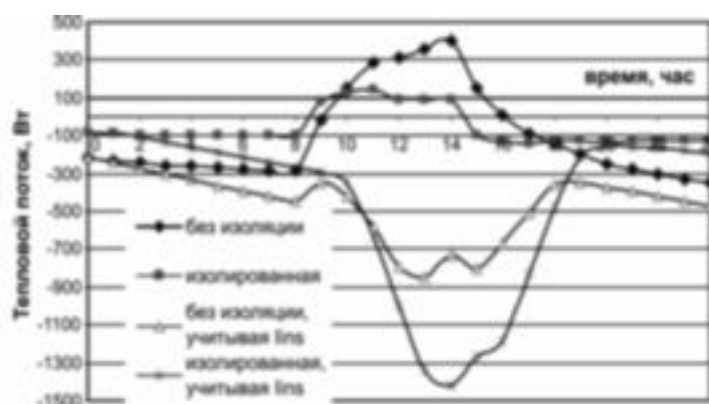


Рис.5. Конвективный тепловой поток на наружной поверхности стены

поверхности стенки и теплоотдачей от поверхности к внешнему воздуху. При отсутствии нагрева поверхности за счет солнца и $t_{нар} > t_{ст2}$ (с 9 до 14 ч.) тепловой поток направлен от воздуха к поверхности стенки и от поверхности в объем стенки (теплопроводность). По величине этот тепловой поток может превышать исходный, абсолютная величина колебаний выше для стены без изоляции. Но при учете солнечной радиации в тот же период имеет место тепловой поток инсоляцией к поверхности, увеличиваются конвективные тепловые потоки с поверхности стены за счет разницы температур окружающей среды и внешней поверхности ограждения (для стены без изоляции – в 4 раза, для изолированной – десятикратно, т.е. изоляция усиливает величину колебаний), а также тепловой поток теплопроводностью от поверхности к середине стены.

В результате моделирования были получены значения нагрузки отопительного прибора для всех вариантов расчета, некоторые из них представлены на рис. 6. Их анализ показал, что при постоянном расходе и температуре подачи теплоносителя изменение нагрузки достигает до 80 Вт за счет учета тепловыделений и инсоляции. Если усилить изоляцию наружной стены, колебания нагрузки для данного помещения составит до 150 Вт, или около 30% от начального теплоснабжения. Это еще раз подтверждает необходимость более качественного регулирования отопления для зданий с усиленной изоляцией.

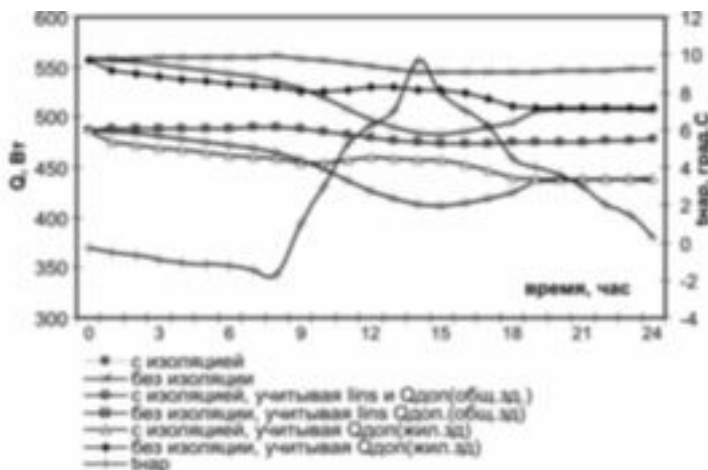


Рис. 6. Изменение нагрузки отопительного прибора

Выводы

Разработана нестационарная модель, которая позволяет получать значения теплотерь разных типов помещений, температурных полей в ограждениях, тепловых потоков на поверхностях конструкций. Проведен параметрический анализ чувствительности для наиболее влияющих параметров и соответствующие расчеты в зависимости от изменения граничных условий и тепловой защиты ограждений, проанализировано влияние дополнительных тепловыделений, солнечной инсоляции и изменения температуры наружного воздуха. Модель позволит давать количественные оценки соблюдения комфортных условий в помещениях, эффектов от регулирования отопления при определенных значениях погодных условий и тепловой защиты зданий, проводить анализ путей снижения теплотерь.

ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП 2.044.05-91*У. Отопление, вентиляция и кондиционирование.
2. ДБН В.2.6-31:2006 «Теплова ізоляція будівель».
3. Орлова Н.А. Динамическая модель управления отпуском тепла от источника. // Тезисы IV междунар. конф. «Проблемы промышленной теплотехники» 26-30 сентября 2005. – К.: ИТТФ, 2005. – С. 110-111.
4. Волощук В.А., Рокочинський А.М. Визначення тепловтрат будівель з урахуванням впливу швидкості вітру та приходу сонячної радіації // Вісник НУВГП. Збірник наук. праць: Вип.2 (32), ч.2. – Рівне: НУВГП, 2006. – С.182-191.
5. Круковский П.Г., Судак О.Ю. Расчетно-экспериментальный поход к анализу теплового состояния и теплотерь помещений //Пром. теплотехника. – 2001. – Т.23, №6. – с. 136-142.
6. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети: Учеб. для вузов. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 360 с.: ил.
7. Дешко В. І., Шовкалюк М. М., Лохманець Ю. В., Куран Ю. Р.. Числове моделювання як метод дослідження теплових режимів приміщень // Нова тема. - №4. - 2008. - С. 26-30.
8. Дешко В.І., Шовкалюк М.М., Шевченко О.М., Шналь Ю.М., Остапенко І.А., Хоренженко Ю.В. Вплив температурно-погодних факторів на показники проектів з енергозбереження // Енергетика та електрифікація. – 2007, № 3. – с. 62-68.
9. www.pogoda.ru

Получено 18.09.2009 г.