

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛОГО ПОЛА «ГРЕЮЩИЙ КАБЕЛЬ»

М.И. Низовцев, В.Ю. Бородулин, В.Н. Летушко

*В работе рассмотрен электрический теплый пол «греющий кабель». Приведены результаты экспериментального определения его тепловых характеристик и энергопотребления. Предложена физико-математическая модель теплого пола. Проведено сопоставление результатов численного моделирования и экспериментов.*

*Ключевые слова: электрический тёплый пол, греющий кабель, тепловые характеристики, мощность тепловыделений, математическая модель.*

### ВВЕДЕНИЕ

В связи с повышением требований к теплозащитным характеристикам ограждающих конструкций зданий и применению энергосберегающих систем вентиляции энергозатраты на отопление помещений снижаются, и появляется возможность в качестве основных отопительных систем применять панельно-лучистые. Ранее они традиционно использовались, как дополнительные к обычным системам отопления для создания комфортных условий в помещениях [1]. Наиболее важное преимущество данных систем заключается в том, что они позволяют получить более равномерное распределение в помещении температуры воздуха и внутренних поверхностей по сравнению с традиционными системами отопления [2].

Греющие элементы панельно-лучистой системы отопления могут располагаться на полу, потолке или на стенах, однако, наибольшее распространение получила система напольного отопления [3]. Она создает наиболее комфортные условия, так как при ее применении на уровне ступней ног человека температура воздуха оказывается на 3–5 градусов выше, чем на уровне головы. Такое распределение температуры является комфортным для организма человека [4].

По типу источника тепла напольные системы отопления делятся на два основных вида: электрические и водяные [5]. В настоящее время в качестве греющих элементов в теплых полах используются греющие кабели, нагревательные маты, ИК-пленки, трубки «XL-PIPE». В статье будут приведены результаты экспериментальных и расчетных исследований тепловых и энергетических параметров электрического теплого пола типа «греющий кабель».

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАБЕЛЬНОГО ТЕПЛОГО ПОЛА

Укладка греющего кабеля теплого пола осуществляется с определенным шагом, например, как показано на рисунке 1. Регулярная укладка кабеля по полу позволяет выделить для изучения отдельную ячейку с интервалом  $L_x$ , равным шагу укладки греющего кабеля.

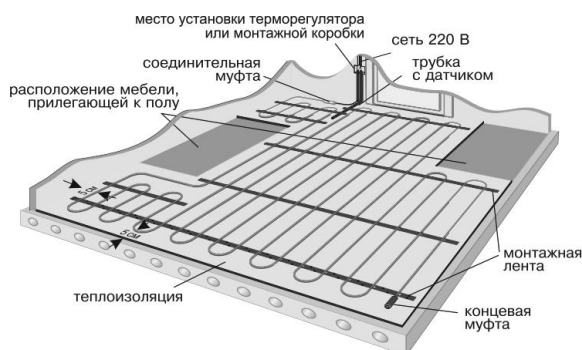


Рисунок 1 – Схема укладки греющего кабеля

Греющий кабель в такой ячейке размещен в плоскости симметрии внутри слоя стяжки (рисунок 2). В непосредственной близости от кабеля расположен температурный датчик, с помощью которого регулируется включение и отключение напряжения питания на теплый пол. Конструкция тёплого пола, рассматриваемого в работе, представляла собой слоистую структуру из различных материалов (рисунок 2). Слои размещались на поверхности межэтажной плиты перекрытия в следующей последовательности: утеплитель, греющий электрический кабель, цементно-песчаная стяжка, которая защищает кабель от механических повреждений, а также способствует равномерному распределению те-

пла, и слой наружного покрытия. Малый диаметр греющего кабеля по сравнению с толщинами слоев материалов позволял пренебречь его поперечными размерами и рассматривать его в качестве точечного источника.

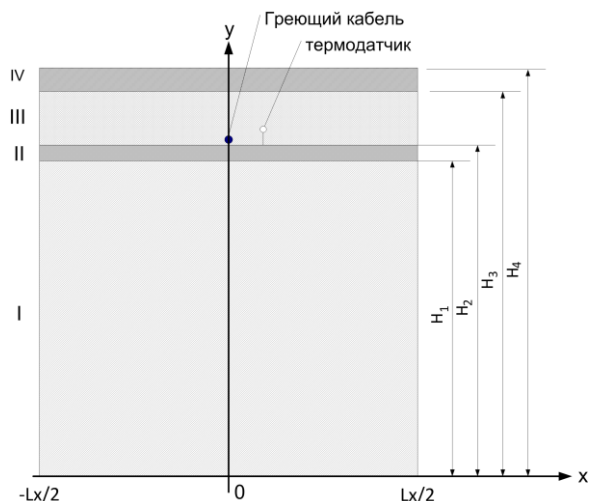


Рисунок 2 – Конструкция тёплого пола.  
I – плита перекрытия, II – слой утеплителя,  
III – цементно-песчаная стяжка с греющим кабелем, IV – слой линолеума

Характеристикой режима работы кабеля является мощность тепловыделений на единицу длины кабеля  $q$ :

$$q = \frac{W}{L_{cab}},$$

где  $W$  – мощность кабеля,  $L_{cab}$  – длина кабеля. Мощность тепловыделений является функцией времени  $t$ , поэтому уравнение, для описания тепловых процессов в слое цементно-песчаной стяжки (III) можно записать в виде:

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_3 \Delta T + q(t) \cdot \delta(x - x_s) \cdot \delta(y - y_s),$$

где  $\rho_3, c_3, \lambda_3$  плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность стяжки,  $x_s, y_s$  – координаты источника. Для других слоёв можно записать:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_i \Delta T,$$

где  $\rho_i, c_i, \lambda_i$  плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность  $i$ -го слоя, исключая стяжку. Таким образом, в нашем случае, теплообмен описывается системой из трех однородных уравнений теплопроводности и одного с точечным источником. Уравнения

системы связаны между собой граничными условиями, которые выражаются в равенстве на горизонтальных плоскостях при  $y = H_1, H_2, H_3$  температур и тепловых потоков. Для вертикальных граничных плоскостей при  $x = -\frac{L_x}{2}$  и  $x = \frac{L_x}{2}$  из соображений сим-

метрии задавались адиабатные граничные условия в виде равенства нулю тепловых потоков. На наружных поверхностях принимались граничные условия 2-го рода в форме закона Ньютона-Рихмана. Таким образом, в двумерной постановке система уравнений записывалась в виде:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \text{ при}$$

$$-L_x / 2 \leq x \leq L_x / 2, 0 \leq y < H_1,$$

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \text{ при}$$

$$-L_x / 2 \leq x \leq L_x / 2, H_1 \leq y < H_2$$

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_3 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q(t) \cdot \delta(x - x_s) \cdot \delta(y - y_s) \text{ при}$$

$$-L_x / 2 \leq x \leq L_x / 2, H_2 \leq y < H_3,$$

$$\rho_4 c_4 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_4 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \text{ при}$$

$$-L_x / 2 \leq x \leq L_x / 2, H_3 \leq y < H_4$$

Граничные условия:

а) на правой и левой границе для всех четырех слоёв

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L_x} = 0;$$

б) на линиях сопряжения слоёв  $J$  и  $J + 1$  для значений  $J = 1, 2, 3$

$$T^{(J)}(x, y) \Big|_{y=H_J} = T^{(J+1)}(x, y) \Big|_{y=H_J},$$

$$\left. \frac{\partial T^{(J)}}{\partial y} \right|_{y=H_J} = \left. \frac{\partial T^{(J+1)}}{\partial y} \right|_{y=H_J},$$

где  $T^{(J)}$  – поле температуры в  $J$  слое;

в) на наружных поверхностях при  $y = 0$  и при  $y = H_4$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛОГО ПОЛА «ГРЕЮЩИЙ КАБЕЛЬ»

$$-\lambda_1 \frac{\partial T^{(1)}}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha \cdot (T^{(1)}(x, y) - T_a) \Big|_{y=0},$$

$$-\lambda_4 \frac{\partial T^{(4)}}{\partial y} \Big|_{y=H_4} = \alpha \cdot (T^{(4)}(x, y) - T_a) \Big|_{y=H_4},$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $T_a$  – температура окружающей среды.

При приведении уравнений и граничных условий к безразмерному виду в качестве пространственного масштаба  $L_{00}$  выбиралось среднее геометрическое значение толщин слоёв. Масштаб времени  $\tau_{00j}$  для каждого  $j$ -го слоя определялся отношением квадрата толщины слоя к его теплопроводности. В качестве окончательного значения  $\tau_{00}$  для всей задачи выбиралось минимальное из этих времён, за масштаб температуры  $T_{00}$  принималась температура окружающей среды.

Решение разностной задачи осуществлялось на равномерной прямоугольной сетке с помощью неявной локально-одномерной схемы [6]. Каждому слою, который не содержит источника, соответствовала разностная система:

$$\frac{\tilde{T}_{ij} - T_{ij}}{\tau} = A_1 \cdot \frac{\tilde{T}_{i+1,j} - 2\tilde{T}_{ij} + \tilde{T}_{i-1,j}}{h_x^2},$$

$$\frac{T_{ij}^{n+1} - \tilde{T}_{ij}}{\tau} = A_1 \cdot \frac{T_{i,j+1}^{n+1} - 2T_{ij}^{n+1} + T_{i,j-1}^{n+1}}{h_y^2}.$$

Здесь  $i$  – индекс по  $x$  – координате,  $j$  – по  $y$  – координате,  $n$  – индекс по времени. Символ « $\sim$ » указывает, что значение параметра берётся на промежуточном временном слое. Для слоя материала, содержащего источник, в правых частях уравнений добавлялись источниковые члены:

$$\bar{q} = \frac{q(t_j)\tau_{00}}{2\rho_3 c_3 T_{00} L_{00}^2} \cdot \delta(\bar{x}) \cdot \delta(\bar{y} - \bar{y}_s) \quad \text{и}$$

$$\bar{q} = \frac{q(\tilde{t})\tau_{00}}{2\rho_3 c_3 T_{00} L_{00}^2} \cdot \delta(\bar{x}) \cdot \delta(\bar{y} - \bar{y}_s),$$

здесь  $\tilde{t} = t^{j+1/2}$  значение  $t$  на промежуточном временном слое,  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  – безразмерные пространственные координаты,  $\bar{y}_s$  –  $\bar{y}$  координата источника. Для моделирования  $\delta$ -функций использовались формулы:

$$\delta(\bar{x}) = \varepsilon_{i0} \cdot \frac{1}{h_x},$$

$$\delta(\bar{y} - \bar{y}_s) = \varepsilon_{js} \cdot \frac{1}{h_y},$$

где  $h_x, h_y$  – шаги пространственной сетки по соответствующим осям,  $\varepsilon_{nk}$  – символ Кронекера, индекс  $i$  пробегает значения по оси  $\bar{x}$ , индекс  $j$  – по оси  $\bar{y}$ , индекс  $s$  – индекс координаты источника по оси  $\bar{y}$ .

Условия равенства температур и тепловых потоков на линиях сопряжения слоёв с первым порядком точности привело к записи:

$$T_{iN_y}^{(J)} = T_{i0}^{(J+1)} = T_i^*,$$

$$\lambda_j \frac{T_i^* - T_{i,N_y-1}^{(J)}}{h_y} = \lambda_{j+1} \frac{T_{i1}^{(J+1)} - T_i^*}{h_y}.$$

Здесь  $T_i^*$  – температура на границе между слоями,  $T_{ij}^{(J)}$  – температура для  $J$ -го слоя,

$N_y$  – индекс самого крайнего узла по оси  $y$  вверху слоистой системы пола. На самом верхнем и самом нижнем слое граничные условия записывались в виде:

$$\frac{T_{i1}^{n+1} - T_{i0}^{n+1}}{h_y} = Bi_1 \cdot (T_{i0}^{n+1} - T_{\text{int}}),$$

$$-\frac{T_{iN_y}^{n+1} - T_{i,N_y-1}^{n+1}}{h_y} = Bi_2 \cdot (T_{iN_y}^{n+1} - T_{\text{int}}).$$

Здесь  $T_{\text{int}}$  – температура окружающей среды, числа Био  $Bi_1$  и  $Bi_2$  определялись обычным образом, как  $Bi = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}$  и относились к нижнему и верхнему слоям.

В начальный момент времени принималась одинаковая температура всех элементов пола, равная температуре окружающей среды  $T_a$ .

Задание теплового режима осуществлялось с помощью терморегулятора системы теплого пола. Устанавливались пороговые значения температурного датчика теплого пола. Первый порог – температура  $T_{on}$ , при которой происходило включение греющего кабеля. Второй порог – температура  $T_{off}$ , при которой происходило выключение греющего кабеля. При этом  $T_{off} > T_{on}$ . Таким образом,

нагрев пола осуществлялся при выполнении для температуры датчика  $T_{ts}$  условия:

$$T_{on} < T_{ts} < T_{off}.$$

Расчет задачи по данной схеме осуществлялся методом прогонки. Погрешность

вычислений из-за упрощения записи граничных условий имела первый порядок точности. Характеристики материалов (таблица 1), принятые для расчётов, соответствовали характеристикам материалов в экспериментальных исследованиях данной работы.

Таблица 1 – Характеристики материалов

№ слоя	Наименование материала	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·м <sup>3</sup> )	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Толщина, мм
1	Железобетон (пуст. плита)	1364	840	1.32	220
2	Вспененный полиэтилен	30	1800	0.039	2
3	Цементно-песчаная стяжка	1800	840	0.76	50
4	Линолеум	1600	1470	0.33	3

При расчетах все параметры выбирались максимально приближенными к условиям экспериментов. В качестве температуры окружающей среды бралось значение температуры воздуха в помещении: +20 °С. Коэффициент теплоотдачи на поверхности пола и низа плиты перекрытия принимался 8.7 Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Моделирование работы пола осуществлялось в температурном диапазоне термодатчика  $T_{ts}$  от +28 до +30 °С. При достижении в окрестности греющего кабеля температуры +30 °С происходило отключение источника электроснабжения пола, а при +28 °С – наоборот его включение. Термодатчик был установлен в горизонтальном сечении кабеля в 16 мм от него. Плотность мощности источника на единицу длины греющего кабеля составляла 16.9 Вт/м из расчёта полной мощности кабеля 2372 Вт при его длине 140 м.

### ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ КАБЕЛЬНОГО ТЕПЛОГО ПОЛА

Электрический кабельный теплый пол модели DW140С был смонтирован для проведения теплотехнических испытаний в одном из офисных помещений ИТ СО РАН специалистами ООО «Дэу Энертек Рус». Схема расположения греющего кабеля на полу комнаты показана на рисунке 3. Кабель длиной 140 м, омическим сопротивлением 20.4 Ом подключался к сети переменного тока напряжением 220 В, мощность кабеля составляла 2372 Вт. Площадь поверхности

пола, занятая кабелем, по краям зоны его укладки была 12.7 м<sup>2</sup> при общей площади пола комнаты 22.5 м<sup>2</sup>. Электропитание на греющий кабель подавалось через терморегулятор UTH-90, термодатчик которого устанавливался непосредственно вблизи греющего кабеля.

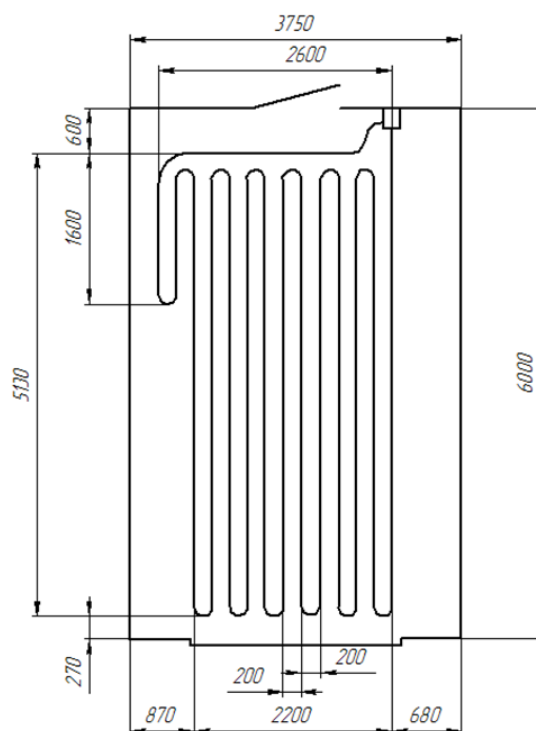


Рисунок 3 – Схема расположения греющего кабеля

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛОГО ПОЛА «ГРЕЮЩИЙ КАБЕЛЬ»

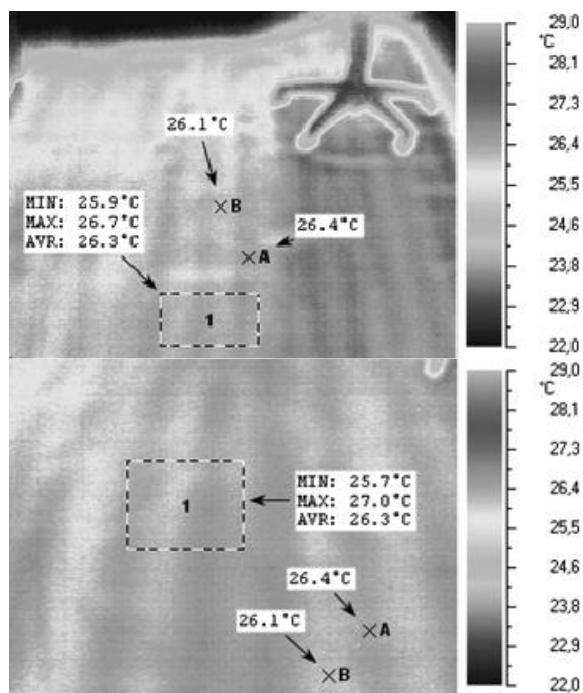


Рисунок 4 – Термограммы поверхности пола

Греющий кабель укладывался на слое «Пенотерм НПП ЛП» толщиной 3 мм и заливался слоем цементно-песчаной стяжки толщиной 50 мм. Выше располагался слой линолиуму толщиной 2 мм.

Во время работы теплого пола батарея отопления в комнате отключалась. На регуляторе датчика температуры теплого пола устанавливалось значение температуры 32 °С, что обеспечивало поддержание температуры воздуха в помещении 20–21 °С. При измерениях использовалось следующее оборудование:

- электросчетчик ЭСО – 07М для измерения расхода электроэнергии при работе теплого пола,
- термодатчик включения теплого пола с запоминающим устройством,
- тепловизионная камера «NEC TH7102» для фиксации распределения температуры на поверхности теплого пола,
- датчики температур и тепловых потоков, подключаемые к персональному компьютеру через аналого-цифровой преобразователь «TERMOLAB».

В качестве датчиков для измерения температуры воздуха в помещении использовались хромель–капелевые термопары из проволоки диаметром 0.2 мм, они устанавливались в две линии: одна линия – в центре помещения, другая линия – на расстоянии 0.5 м от окна. В каждой линии было 4 датчика на высоте от пола 100 мм, 600 мм,

1700 мм. и 100 мм от потолка. Датчики температур и тепловых потоков устанавливались на полу для измерения температур и тепловых потоков на поверхности пола. В качестве датчиков тепловых потоков применялись термоэлектрические биметаллические преобразователи тепловых потоков типа вспомогательной стенки диаметром 20 мм и толщиной 2 мм. Одна из термопар была выведена на улицу для измерения температуры воздуха на улице.

Измерения температур и тепловых потоков проводились непрерывно в многочасовом режиме по следующему алгоритму: в течение 3 минут выполнялось 75 измерений, затем среднее значение фиксировалось в памяти компьютера. В результате за 1 час накапливалось 20 значений измеряемой величины с каждого датчика температур и тепловых потоков. Одновременно измерялся расход электроэнергии теплого пола.

С применением тепловизионной камеры «NEC TH7102» проводилась фиксация распределения температуры поверхности теплого пола в различные моменты его работы. Перед выключением теплого пола на его поверхности над местами расположения кабеля фиксировались зоны с наиболее высокими температурами поверхностей (рисунок 4), однако, неравномерность температурного поля греющей поверхности пола была незначительной и не превышала 0.5–1 °С.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИСПЫТАНИЙ КАБЕЛЬНОГО ТЕПЛОГО ПОЛА

Ряд результатов расчетов и испытаний кабельного теплого пола приведены на рисунках 5–14. На рисунке 5 показано изменение относительного напряжения на греющем кабеле  $u/u_0$ , где  $u_0 = 220$  В. Из результатов расчета следует, что после включения греющий пол работал непрерывно без отключений около 2 часов. В этот промежуток времени происходил его разогрев, а затем он начал периодически отключаться. С течением времени период, в течение которого теплый пол находился в отключенном состоянии, увеличивался, а период его работы соответственно сокращался.

Результаты расчета изменения частоты включений в час теплого пола показаны на рисунке 6.

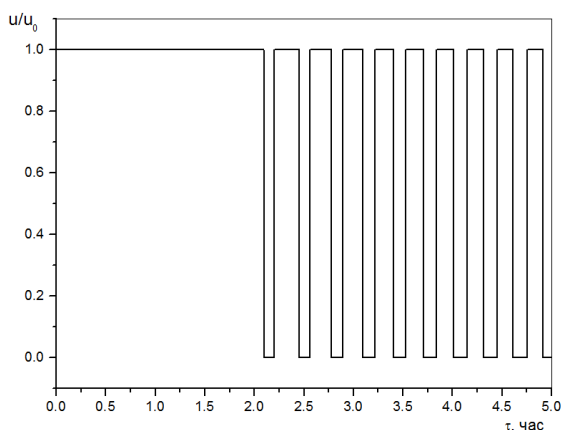


Рисунок 5 - Напряжение на греющем кабеле. Расчет

Через 4 часа с начала работы теплого пола частота включений незначительно превышала 3.3 1/час, затем постепенно снижалась до этого значения. Символами «●» показаны средние значения частоты включения теплого пола, полученные в результате испытаний за 14 часов с 18 часов до 8 часов утра следующего дня с 11 по 16 февраля 2014 г. Осредненная по результатам испытаний частота включений теплого пола составила 3.1 1/час, что было достаточно близко к расчетному значению.

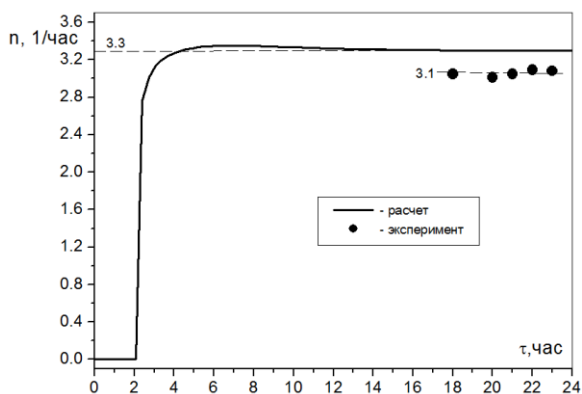


Рисунок 6 – Частота включений теплого пола. Расчет и эксперимент

На рисунке 7 представлены результаты расчета относительного времени работы теплого пола  $\tau_n/\tau$ , где  $\tau_n$  – суммарное время подачи напряжения на теплый пол, а  $\tau$  – время наблюдения. За сутки происходил выход на постоянное значение  $\tau_n/\tau = 0.44$ , что достаточно хорошо совпадало с осредненным значением, полученным при испытаниях теплого пола  $\tau_n/\tau = 0.43$ . Согласно результатам расчетов максимальная температура поверхности пола над кабелем достигала значения 26 °С с

периодическими незначительным снижением на 0.15 °С, из-за теплоинерционности слоя цементно-песчаной стяжки (рисунок 8).

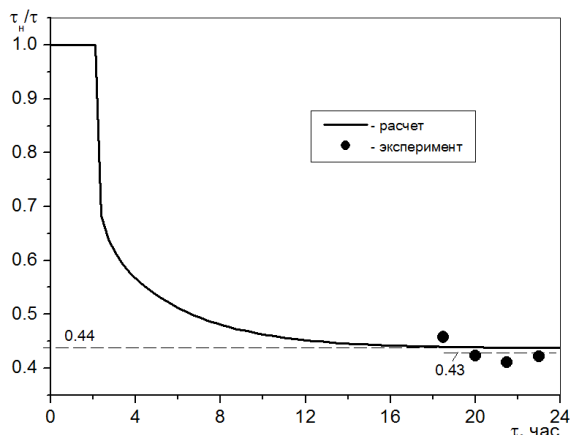


Рисунок 7 – Время работы теплого пола. Расчет и эксперимент

Изменения температуры поверхности пола в течение 1 часа, полученные с использованием контактных датчиков температуры приведены на рисунке 9. Один из датчиков был установлен над греющим кабелем, а другой смещен на половину шага укладки кабеля. Изменение температуры пола над греющим кабелем при его работе составляло 0.2 °С, что хорошо согласовалось с результатами расчетов. Разница средних температур зон пола над кабелем и между кабелями была 0.6 °С.

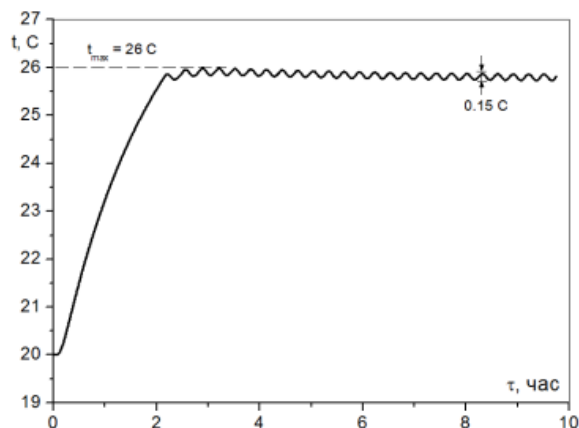


Рисунок 8 – Температура поверхности пола над кабелем. Расчет

Результаты расчета средней плотности теплового потока на поверхности пола показаны на рисунке 10. Средняя плотность теплового потока была около 50 Вт/м<sup>2</sup> и имела незначительные периодические колебания, что согласовалось с результатами измерений при испытаниях (рисунок 11).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛОГО ПОЛА «ГРЕЮЩИЙ КАБЕЛЬ»

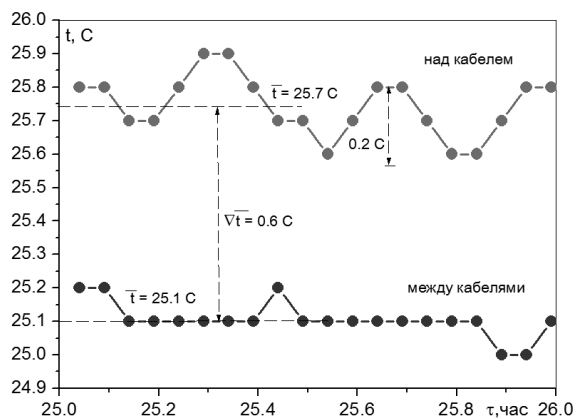


Рисунок 9 – Температура поверхности пола. Эксперимент

На рисунке 11 показаны результаты измерений плотностей тепловых потоков на поверхности пола, при этом один из датчиков был установлен над греющим кабелем, а другой – между кабелями. Средняя плотность теплового потока по результатам измерений над кабелем составила  $54.9 \text{ Вт/м}^2$  при амплитуде колебаний около среднего значения  $3 \text{ Вт/м}^2$ , а между кабелями  $51.4 \text{ Вт/м}^2$  при амплитуде колебаний  $1 \text{ Вт/м}^2$ .

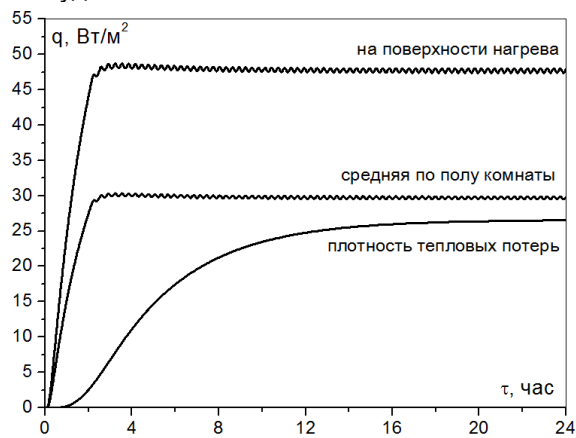


Рисунок 10 – Средние плотности тепловых потоков поверхностей пола и низа плиты перекрытия. Расчет

При анализе результатов расчетов изменения температур с течением времени в вертикальном сечении над кабелем (рисунок 12) можно отметить их циклический характер с временным сдвигом максимума температуры относительно максимума температуры кабеля для центра стяжки на 2 минуты, а для поверхности пола на 6 минут.

Изменение средней мощности греющего кабеля по результатам расчетов приведено на рисунке 13. Из представленных данных следует, что с течением времени мощность

снижалась и выходила на значение  $1038 \text{ Вт}$ , причем она состояла из «полезной мощности»  $666 \text{ Вт}$  на обогрев рассматриваемого помещения и «мощности потерь»  $372 \text{ Вт}$ , которая шла на отопление нижележащего помещения 2 этажа через плиту перекрытия, на которой монтировался теплый пол.

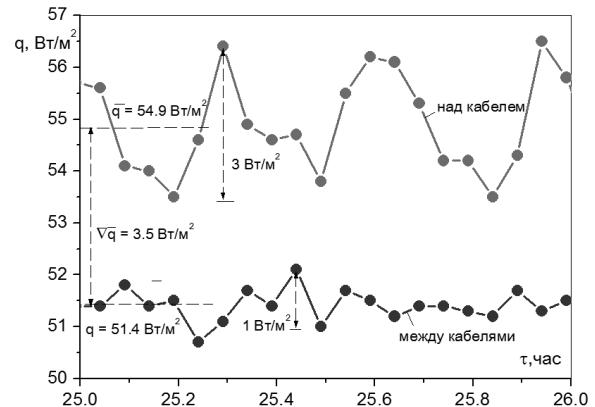


Рисунок 11 – Плотности тепловых потоков на поверхности пола. Эксперимент

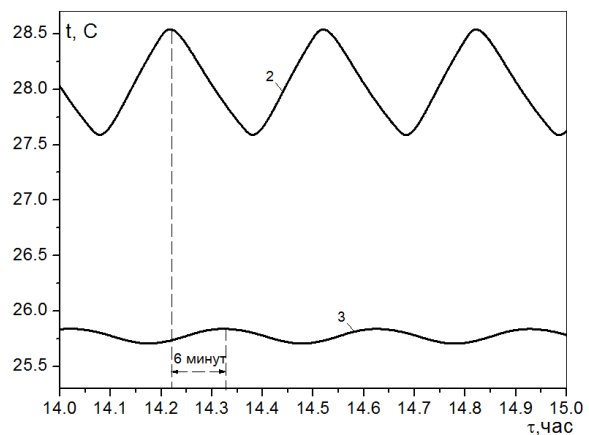
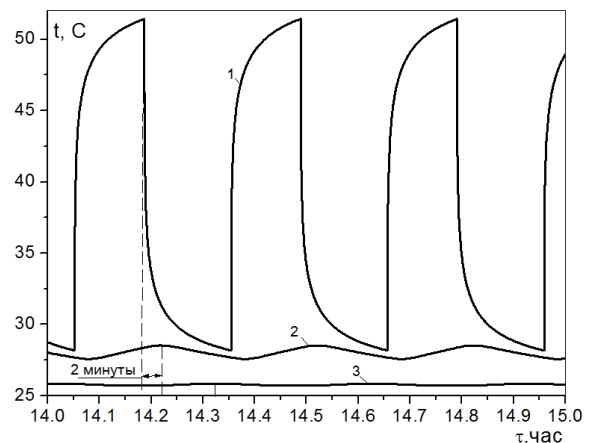


Рисунок 12 – Изменение с течением времени температуры в вертикальном сечении кабеля: 1) в месте расположения кабеля, 2) в центре стяжки, 3) на поверхности пола

Осредненная мощность теплого пола с греющим кабелем по результатам 6-ти дневных 14-ти часовых измерений также приведена на рисунке 13, она составила 1037 Вт, что практически совпало с расчетным значением.

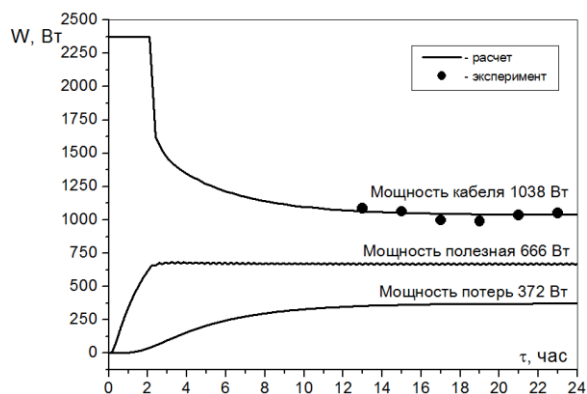


Рисунок 13 – Изменение мощности греющего кабеля. Расчет и эксперимент

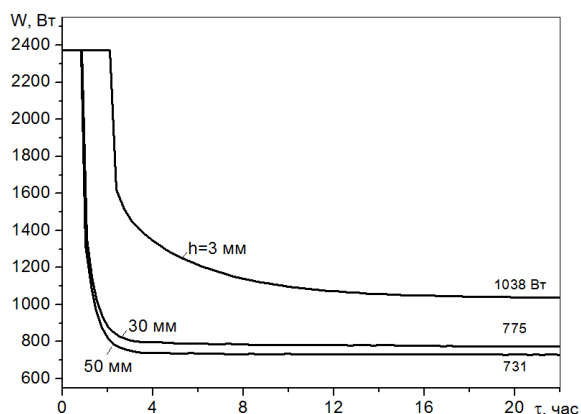


Рисунок 14 – Зависимость мощности греющего кабеля от толщины утеплителя. Расчет

По результатам испытаний и расчетов отмечено, что значительную долю мощности теплого пола составляла «мощность потерь» через межэтажную плиту перекрытия, это было связано с малой толщиной слоя утеплителя (3 мм, «Пенотерм»), который использовался при монтаже теплого пола. Были выполнены расчеты теплого пола при увеличении толщины слоя утеплителя под цементно-песчанную стяжку (рисунок 14). Как показали расчеты, с увеличением толщины утеплителя мощность теплого пола, необходимая для отопления помещения, снижалась. Так, при толщине утеплителя 30 мм она составляла 775 Вт (снижение на 25 %), а при 50 мм – 731 Вт (снижение на 30 %).

## ВЫВОДЫ

1. Проведены измерения средних и локальных тепловых характеристик при отоплении помещения теплым полом типа «греющий кабель».
2. Обращено внимание на существенную зависимость мощности электрической теплого пола от толщины слоя утеплителя. Показана возможность снижения на 30 % электрической мощности теплого пола при увеличении слоя утеплителя с 3 до 50 мм.
3. Предложена и апробирована расчетная математическая модель совместно с разработанным программным обеспечением, которая может быть использована для расчета теплых полов типа «греющий кабель».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Olesen, B. W. Теория и практика напольного лучистого отопления / B. W. Olesen. // АВОК. – 2003. – № 1. – С. 44–52.
2. Bearzi, V. Теплые полы. Теория и практика / V. Bearzi // АВОК. – 2005. – № 7. – С. 70–82.
3. Bojic, M. Performances of low temperature radiant heating systems / M. Bojic, D. Cvetkovic, V. Marjanovic, M. Blagojevic, Z. Djordjevic // Energy and Buildings. – 2013. – № 61. – P. 233–238.
4. Писарев, Е. Теплый пол. Водяной или электрический / Е. Писарев. – Самиздат, 2012. – 48 с.
5. Низовцев, М. И. Расчет взаимного влияния тепловых и конструктивных параметров водяного теплого пола / М. И. Низовцев, И. А. Сахаров // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4/3. – С. 33–37.
6. Фрязинов, И. В. О разностной аппроксимации граничных условий для третьей краевой задачи / И. В. Фрязинов // ЖВММФ. – 1964. – Т. 4, № 6. – С. 1106–1111.

**Низовцев М.И.**, д.т.н., институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, e-mail: nizovtsev@itp.nsc.ru.

**Бородулин В.Ю.**, ведущий инженер института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, e-mail: v\_u\_b@mail.ru.

**Летушко В.Н.**, ведущий инженер института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, e-mail: lvn321@yandex.ru.