

РАСЧЕТ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОДЯНОГО ТЕПЛОГО ПОЛА

М.И. Низовцев, И.А. Сахаров

В статье приведены результаты компьютерного численного моделирования системы отопления "водяной теплый пол" при различном шаге укладки греющих трубок и разной температуре теплоносителя. В результате расчетов исследовано взаимное влияние конструктивных и тепловых параметров водяного теплого пола. Даны рекомендации по выбору шага укладки греющих трубок и температуры теплоносителя, а также оптимальной толщины теплоизоляции для снижения тепловых потерь.

Ключевые слова: панельно-лучистое отопление, водяной теплый пол, распределение температуры, метод конечных элементов.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в строительстве все чаще в качестве основных отопительных систем применяются панельно-лучистые системы отопления, 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 их использование позволяет получить более равномерное распределение температуры воздуха в помещении по сравнению с традиционными системами отопления. Кроме того, в отличие от обычных систем отопления они имеют пониженную температуру греющих поверхностей за счет более низкой температуры теплоносителя, что позволяет сократить затраты на подготовку теплоносителя и снизить потери энергии при его транспортировке в водяных системах отопления. Совместное использование теплого пола с системой кондиционирования позволяет снизить ее мощность на 80% [2].

Греющие элементы панельно-лучистой системы отопления могут располагаться на различных внутренних поверхностях помещения: на полу, потолке или на стенах, однако, наибольшее распространение получила система напольного отопления. Она создает наиболее комфортные условия, так как при ее применении на уровне ног человека температура воздуха оказывается на 3–5 градусов выше, чем на уровне головы. Такое распределение температуры является более естественным для организма человека и не создает ощущения перегрева [3]. Энергопотребление данной системы меньше по сравнению с конструкциями, расположенными в

стенах или на потолке [4]. За счет более низкой разности температур между греющей поверхностью и воздухом по сравнению с традиционными системами отопления с применением конвекторов и радиаторов снижается интенсивность конвективных процессов, что приводит к уменьшению скорости воздушных потоков, объемов перемещаемых загрязняющих веществ, а также к повышению относительной влажности воздуха в помещении [5].

По типу источника тепла напольные системы отопления делятся на два основных вида: электрические и водяные. В электрических системах используются электрические кабели или карбоновые пленки, выделяющие тепло при протекании тока, в основание пола при их монтаже укладывается утеплитель. Электрический кабель заливается цементной стяжкой, которая способствует равномерному распределению тепла на поверхности пола и защищает кабель от механических повреждений. Карбоновую пленку можно укладывать непосредственно под напольное покрытие, что упрощает процесс монтажа.

В водяных теплых полах обычно используют в качестве греющих элементов трубки из металла, сшитого полиэтилена или маты из капиллярных трубок, по которым течет горячая вода. В многоквартирных жилых домах установка водяных теплых полов требует специального согласования [6]. В целом, электрические системы быстрее устанавливаются и проще ремонтировать, но затраты на оплату электроэнергии электрических систем отопления существенно превышают затраты на эксплуатацию водяных систем [7]. При укладке электрического теплого пола необходимо учитывать расположение мебели на

поверхности во избежание перегрева тепло-выделяющих элементов, а при монтаже водяного теплого пола греющие трубки обычно размещают по всей поверхности пола. В [3] обращено внимание, что при работе электрический пол создает электромагнитное поле, которое может воздействовать на организм человека. Ремонт водяного теплого пола достаточно сложен из-за необходимости разрушения стяжки для поиска и устранения протечек. Помимо «тяжелых» конструкций с цементной стяжкой разработаны варианты «легких» теплых водяных полов. В последнее время в строительстве все чаще в качестве основных отопительных систем применяются панельно-лучистые системы отопления, 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 их использование позволяет получить более равномерное распределение температуры воздуха в помещении по сравнению с традиционными системами отопления. Кроме того, в отличие от обычных систем отопления они имеют пониженную температуру греющих поверхностей за счет более низкой температуры теплоносителя, что позволяет сократить затраты на подготовку теплоносителя и снизить потери энергии при его транспортировке в водяных системах отопления. Совместное использование теплого пола с системой кондиционирования позволяет снизить ее мощность на 80% [2].

Греющие элементы панельно-лучистой системы отопления могут располагаться на различных внутренних поверхностях помещения: на полу, потолке или на стенах, однако, наибольшее распространение получила система напольного отопления. Она создает наиболее комфортные условия, так как при ее применении на уровне ног человека температура воздуха оказывается на 3–5 градусов выше, чем на уровне головы. Такое распределение температуры является более естественным для организма человека и не создает ощущения перегрева [3]. Энергопотребление данной системы меньше по сравнению с конструкциями, расположенными в стенах или на потолке [4]. За счет более низкой разности температур между греющей поверхностью и воздухом по сравнению с традиционными системами отопления с применением конвекторов и радиаторов снижается интенсивность конвективных процессов, что приводит к уменьшению скорости воздушных

потоков, объемов перемещаемых загрязняющих веществ, а также к повышению относительной влажности воздуха в помещении [5].

По типу источника тепла напольные системы отопления делятся на два основных вида: электрические и водяные. В электрических системах используются электрические кабели или карбоновые пленки, выделяющие тепло при протекании тока, в основание пола при их монтаже укладывается утеплитель. Электрический кабель заливается цементной стяжкой, которая способствует равномерному распределению тепла на поверхности пола и защищает кабель от механических повреждений. Карбоновую пленку можно укладывать непосредственно под напольное покрытие, что упрощает процесс монтажа.

В водяных теплых полах обычно используют в качестве греющих элементов трубки из металла, сшитого полиэтилена или маты из капиллярных трубок, по которым течет горячая вода. В многоквартирных жилых домах установка водяных теплых полов требует специального согласования [6]. В целом, электрические системы быстрее устанавливаются и проще ремонтировать, но затраты на оплату электроэнергии электрических систем отопления существенно превышают затраты на эксплуатацию водяных систем [7]. При укладке электрического теплого пола необходимо учитывать расположение мебели на поверхности во избежание перегрева тепло-выделяющих элементов, а при монтаже водяного теплого пола греющие трубки обычно размещают по всей поверхности пола. В [3] обращено внимание, что при работе электрический пол создает электромагнитное поле, которое может воздействовать на организм человека. Ремонт водяного теплого пола достаточно сложен из-за необходимости разрушения стяжки для поиска и устранения протечек. Помимо «тяжелых» конструкций с цементной стяжкой разработаны варианты «легких» теплых водяных полов с теплораспределительными пластинами [8]. Греющие трубки в таких системах укладывают на деревянную основу или в пазы теплоизоляционных плит. Данные системы быстро монтируются и обладают малой теплоинерционностью, однако, недостатком таких систем на сегодняшний день является их высокая стоимость.

При проектировании теплых полов требуется, чтобы температура поверхности пола отвечала определенным требованиям, так согласно [9] максимальная температура по-

РАСЧЕТ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОДЯНОГО ТЕПЛОГО ПОЛА

верхности пола в жилых помещениях не должна превышать 26°C. Комфортную температуру на поверхности пола с различными покрытиями можно определить с использованием рекомендаций [10].

В литературе достаточно мало информации об общих методиках расчета систем водяного напольного отопления. Одной из причин этого является многообразие существующих на рынке систем, что затрудняет создание универсальных методик их расчета. С развитием математических методов численного моделирования появилась возможность повысить точность при проведении расчетов тепловых параметров таких систем. В данной статье приводятся результаты расчетов взаимного влияния тепловых и конструктивных параметров водяного теплого пола.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При расчетах рассматривалась часто встречающаяся конструкция водяного теплого пола (Рисунок 1). На железобетонной плите перекрытия толщиной 0.16 м уложен слой экструдированного пенополистирола толщиной 0.045 м, на нем расположены металлопластиковые греющие трубки с наружным диаметром 0.02 м и шагом между ними d . Трубки залиты цементной стяжкой толщиной 0.05 м. На стяжку уложен слой ламината толщиной 0.008 м.

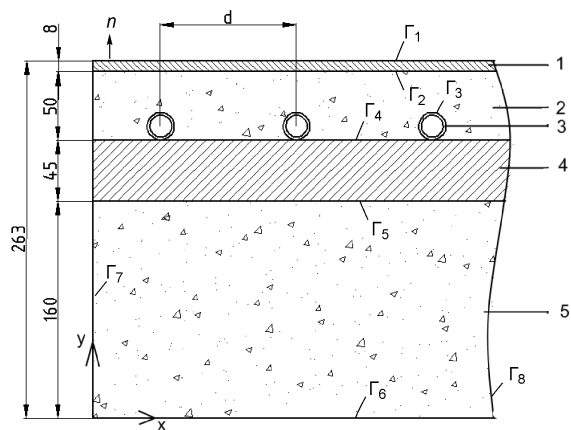


Рисунок 1 - Конструкция водяного теплого пола:

- 1- ламинат, 2- цементная стяжка,
- 3- металлопластиковые трубки,
- 4- экструдированный пенополистирол,
- 5- плита перекрытия, Г1-Г8 - границы

Математическая модель для расчёта температурного поля в стационарном режиме в двумерной постановке описывается уравнением Лапласа

$$\frac{\partial^2 t(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t(x,y)}{\partial y^2} = 0; \quad (1)$$

при граничных условиях 3-рода на поверхности пола (2) и нижней поверхности плиты перекрытия (3)

$$-\lambda_1 \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{\bar{A}_1} = \alpha_1 (t - t_{air \varphi}), \quad (2)$$

$$-\lambda_5 \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{\bar{A}_5} = \alpha_2 (t - t_{air \varphi}). \quad (3)$$

При условиях идеального контакта на границах между разными материалами имеем:

$$\text{на } \Gamma_2 \quad t_{\bar{A}_2^-} = t_{\bar{A}_2^+}, \quad \lambda_1 \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{\bar{A}_2^-} = \lambda_2 \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{\bar{A}_2^+}; \quad (4)$$

$$\text{на } \Gamma_3 \quad t_{\bar{A}_3^-} = t_{\bar{A}_3^+} = t_{air \varphi}, \quad \lambda_2 \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{\bar{A}_3^+} = \lambda_3 \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{\bar{A}_3^-}; \quad (5)$$

$$\text{на } \Gamma_4 \quad t_{\bar{A}_4^-} = t_{\bar{A}_4^+}, \quad \lambda_4 \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{\bar{A}_4^-} = \lambda_3 \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{\bar{A}_4^+},$$

$$\lambda_4 \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{\bar{A}_4^-} = \lambda_2 \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{\bar{A}_4^+}; \quad (6)$$

$$\text{на } \Gamma_5 \quad t_{\bar{A}_5^-} = t_{\bar{A}_5^+}, \quad \lambda_4 \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{\bar{A}_5^+} = \lambda_5 \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{\bar{A}_5^-}; \quad (7)$$

и при адиабатных условиях на вертикальных боковых границах имеем

$$\left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{\bar{A}_7} = \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{\bar{A}_8} = 0, \quad (8)$$

где t – температура пола, $t_{воз}$ – температура воздуха в помещении, $t_{вод}$ – температура воды, α – эффективный коэффициент теплообмена с учетом излучения и конвекции, λ – коэффициент теплопроводности.

Расчеты проводились при температуре воздуха в помещении $t_{в} = 21^\circ\text{C}$, эффективных коэффициентах теплоотдачи на верхней поверхности пола и нижней поверхности плиты перекрытия $\alpha = 8.7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ [11]. Расчеты выполнялись при варьировании шага укладки греющих трубок d и различной температуре греющей воды $t_{вод}$. Для расчетов использовался программный пакет COMSOL Multiphysics 4.2. Ниже приведены некоторые результаты расчетов.

2 РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рисунке 2 показано распределение температуры на поверхности пола при температуре теплоносителя $t_{в} = 35^\circ\text{C}$ и различном шаге укладки греющих трубок.

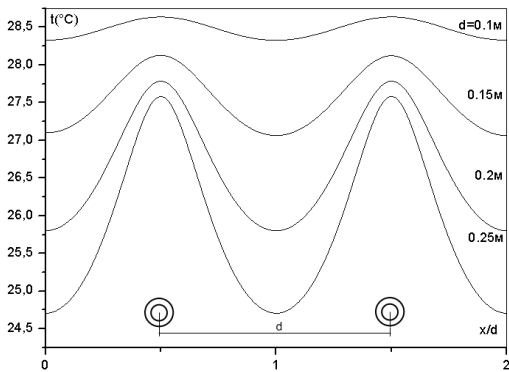


Рисунок 2 - Температура на поверхности водяного теплого пола

Как следует из результатов расчетов, зоны поверхностей пола с наиболее высокой температурой располагаются над греющими трубками, с увеличением шага укладки снижается температура поверхности пола и увеличивается ее неравномерность.

Одной из основных характеристик теплого пола является средняя температура его поверхности и ее зависимость от шага укладки греющих трубок. Зависимость средней температуры поверхности греющего пола от шага укладки трубок согласно результатам расчетов имела линейный характер (Рисунок 3).

Наряду со средней температурой поверхности теплого пола важной эксплуатационной характеристикой является равномерность распределения температуры по поверхности пола.

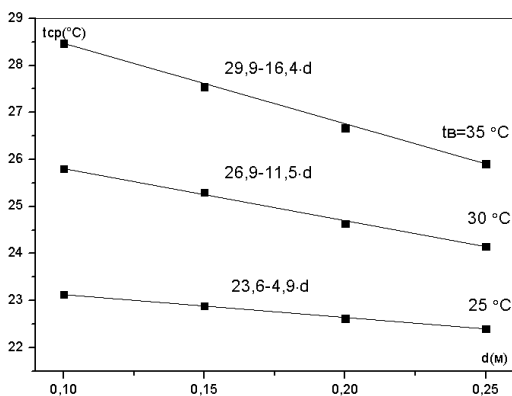


Рисунок 3 - Зависимость средней температуры поверхности теплого пола от шага укладки и температуры теплоносителя.

Согласно [10] перепад температуры по поверхности пола $>2^{\circ}\text{C}$ воспринимается человеком, как дискомфортный. Поэтому, для рассматриваемой конструкции водяного теп-

лого пола по результатам расчетов рекомендована укладка трубок с шагом от 0.1 м до 0.25 м при температуре теплоносителя $25\text{--}30^{\circ}\text{C}$ (рисунок 4).

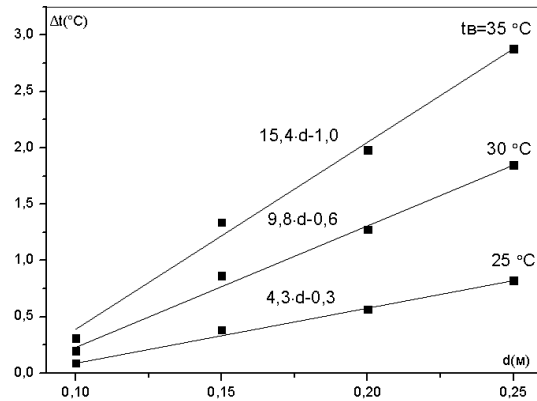


Рисунок 4 - Зависимость максимального перепада температуры на поверхности теплого пола от шага укладки и температуры теплоносителя.

Для снижения тепловых потерь и повышения эффективности использования тепловой энергии в конструкциях теплого пола применяется утеплитель.

Относительную величину тепловых потерь можно характеризовать отношением плотности тепловых потерь на единицу поверхности теплого пола $q_{\text{пот}}$ пола к полной плотности теплового потока, выделяемой греющими трубками на единицу площади пола $q_{\text{полн}}$.

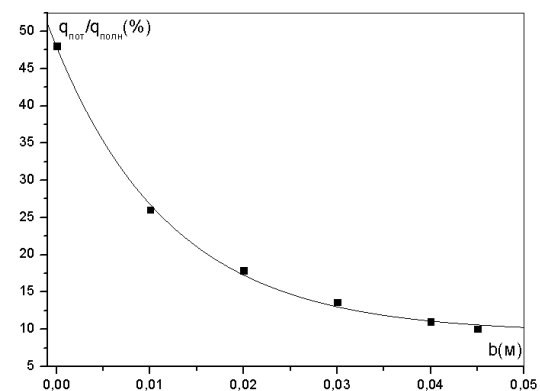


Рисунок 5 - Зависимость тепловых потерь от толщины теплоизоляции теплого пола.

Согласно результатам расчетов (рисунок 5) использование в качестве теплоизоляции в водяном теплом полу экструдированного пенополистирола толщиной 0.03 м позволяет снижать величину тепловых потерь до значе-

РАСЧЕТ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОДЯНОГО ТЕПЛОГО ПОЛА

ния <15%. Дальнейшее увеличение толщины теплоизоляции дает существенно меньший эффект в снижении тепловых потерь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены численные расчеты взаимного влияния тепловых и конструктивных параметров водяного теплого пола, установленного на железобетонной плите перекрытия. В результате расчетов определены линейные зависимости средней температуры поверхности пола и ее неравномерности от шага укладки греющих трубок при разных температурах теплоносителя.

Для рассмотренной конструкции теплого пола на основании выполненных расчетов и рекомендаций по комфортности определены оптимальные шаг укладки греющих трубок 0,1–0,25 м и температура теплоносителя 25–30°C.

По результатам расчета тепловых потерь рекомендуемая толщина теплоизоляции теплого пола составила 0,03 м экструдированного пенополистирола.

Выбранную математическую модель расчета и апробированное программное обеспечение планируется в дальнейшем использовать для сравнительных расчетов режимных и конструктивных параметров различных вариантов теплых полов.

Следует отметить, что применение новых систем отопления, таких как водяные полы, позволяющие снизить тепловые потери, должно сочетаться с другими методами управления климатом жилого помещения, например, таких как окна с регулируемыми тепловыми характеристиками [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. W. Olesen. Теория и практика напольного лучистого отопления // АВОК. 2003, №1. С. 44–52.

2. R. Hu, J.L. Niu. A review of the application of radiant cooling and heating systems in Mainland China // Energy and Buildings. 2012, № 52, P. 11–19.

3. Писарев Е. Теплый пол. Водяной или электрический // Самиздат. 2012. 48 с.

4. Milorad Bojić. Performances of low temperature radiant heating systems // Energy and Buildings. 2013, № 61, P. 233–238

5. Bearzi V. Теплые полы. Теория и практика // АВОК. 2005, №7, С. 70–82.

6. Жилищный кодекс РФ. М.: ЭКСМО. 2011, 96 с.

7. Почему водяной теплый пол, а не электрический. // Электронный ресурс. <http://www.vantuboservice.ru/neelectro>.

8. Néstor Fonseca, Cristian Cuevas, Vincent Lemort. Radiant ceiling systems coupled to its environment part 1: Experimental analysis // Applied Thermal Engineering. 2010, № 30, P. 2187 – 2195.

9. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. СПб.: ДЕАН, 2010, 144 с.

10. ГОСТ 13732-2-2008. Эргономика термальной среды. Методы оценки реакции человека при контакте с поверхностями. Часть 2. Контакт с поверхностью умеренной температуры.

11. СНиП II-3-79. Строительная теплотехника.

12. Низовцев М.И., Терехов В.И. Светопрозрачные конструкции с регулируемыми тепловыми характеристиками // Ползуновский вестник, - 2010.- № 1.- С. 44–54.

Низовцев М.И., д.т.н., зав. лабораторией,
e-mail: nizovtsev@itp.nsc.ru,

Сахаров И.А., магистр.

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск,
тел. (8383)3165336.