



Разработка алгоритма регулирования теплоотдачи внутрипольных конвекторов

Введение

В настоящее время наравне с типовыми проектами реализуются проекты зданий различного назначения с панорамным остеклением. Как правило, такие строительные объекты — это многоквартирные жилые дома бизнес-, премиум- и элит-классов, апартаменты и бизнес-центры. Этажность зданий с панорамным остеклением может достигать нескольких сотен метров. Примером является башня «Федерация» комплекса «Москва-Сити», высота которой составляет 374 м.

Использование панорамного остекления требует особого внимания к проектированию тепловой защиты здания и его системы отопления.

Панорамное остекление — это наружное светопрозрачное ограждение, выполненное от пола до потолка помещения. Основной характеристикой наружного ограждения является приведённое сопротивление теплопередаче R , $\text{м}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

В зависимости от конструкции светопрозрачного ограждения значения сопротивления теплопередаче лежат в диапазоне $R = 0,6\text{--}1,6 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Вт}$ [1]. Тепловая защита наружных несветопрозрачных ограждений превышает тепловую защиту

светопрозрачных в два-три раза, поэтому тепловые потери в случае панорамного остекления выше при равных отапливаемых объёмах сравниваемых зданий.

Основной характеристикой наружного ограждения здания является величина его приведённого сопротивления теплопередаче. В зависимости от конструкции светопрозрачного ограждения значения сопротивления теплопередаче лежат в диапазоне $0,6\text{--}1,6 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Вт}$

В связи с невозможностью установки отопительных приборов традиционным образом для компенсации дефицита теплоты устанавливаются отопительные приборы, смонтированные в пол.

Таковыми отопительными приборами являются внутрипольные конвекторы с естественной и вынужденной конвекцией, примеры которых представлены на фото 1. Поэтому существует особенность в циркуляции воздуха внутри помещения при панорамном остеклении.

Рецензия эксперта на статью получена 31.07.2023 [The expert review of the article was received on July 31, 2023]

УДК 628.81. Научная специальность: 2.1.3 (05.23.05).

Разработка алгоритма регулирования теплоотдачи внутрипольных конвекторов

А. А. Арбатский, к.т.н., генеральный директор Научно-исследовательского института инженерных климатических систем и электроники (г. Киржач, Владимирская область); **М. В. Горелов**, к.т.н., доцент, кафедра теплообменных процессов и установок, [Национальный исследовательский университет «МЭИ»](#) (НИУ «МЭИ»); **Е. М. Горячева**, старший преподаватель, кафедра теплообменных процессов и установок, [НИУ «МЭИ»](#)

Работа посвящена разработке алгоритма регулирования теплоотдачи внутрипольного конвектора с вынужденной конвекцией, который устанавливается в помещениях с панорамным остеклением. Выполнен анализ теоретических и экспериментальных работ, посвящённых подаче на внутреннюю поверхность светопрозрачного наружного ограждения нагретой струи воздуха. На основании этого подобраны необходимые узлы регулирования отопительного прибора и разработаны режимы его работы, позволяющие создать в помещении комфортные условия и снизить потребление энергии на отопление по сравнению с внутрипольным конвектором с естественной конвекцией.

Ключевые слова: внутрипольный конвектор, регулирование теплоотдачи, настилающиеся струи, светопрозрачное наружное ограждение, тепловой комфорт, алгоритм регулирования отопительного прибора.

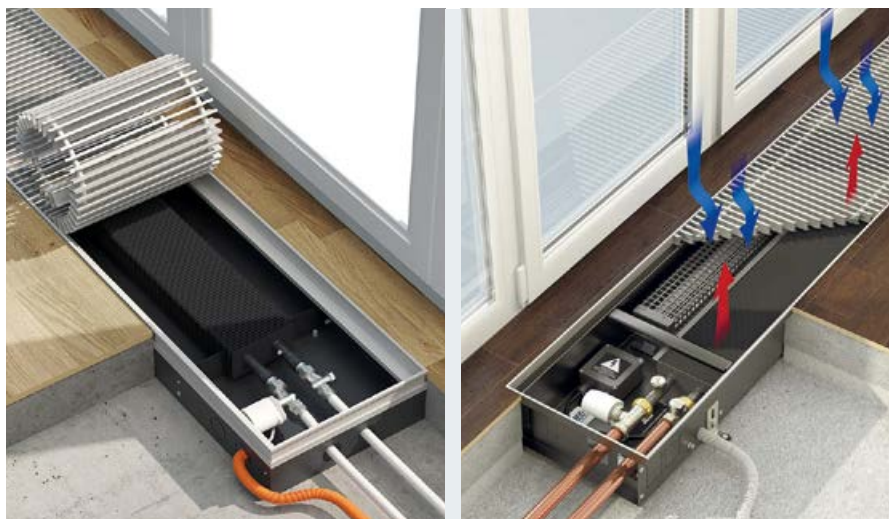
UDC 628.81. The number of scientific specialty: 2.1.3 (05.23.05).

Development of an algorithm for regulating in-floor convectors' heat transfer

A. A. Arbatsky, PhD, general director of Research Institute of Engineering Climate Systems and Electronics (Kirzhach city, Vladimir region); **M. V. Gorelov**, PhD, Associate Professor, the Department of Heat and Mass Transfer Processes and Installations, [Moscow Power Engineering Institute \(NRU "MPEI"\)](#); **E. M. Goryacheva**, senior lecturer, the Department of Heat and Mass Transfer Processes and Installations, [NRU "MPEI"](#)

The article is devoted to the development of an algorithm for regulating the heat transfer of an indoor convector with forced convection, which is installed in rooms with panoramic glazing. The analysis of theoretical and experimental works devoted to the supply of a heated air jet to the inner surface of a translucent outer fence is carried out. Based on this, the necessary control units of the heating device have been selected and its operating modes have been developed to create comfortable conditions in the room and reduce energy consumption for heating compared to an indoor convector with natural convection.

Key words: in-floor convector, heat regulation, overlapping air streams, translucent outer enclosure, thermal comfort, heating appliance control algorithm.



❖ Фото 1. Внутрипольные конвекторы с естественной (слева) и вынужденной конвекцией воздуха

Конвективный теплообмен плоской струи, настилающейся на вертикальную поверхность светопрозрачного ограждения

Панорамное остекление влияет не только на значение тепловых потерь здания, но и на тепловой комфорт в помещении. Нахождение человека рядом с большой остеклённой площадью может вызвать дискомфорт за счёт разницы температур поверхности тела и поверхности остекления. Для поддержания заданного температурно-влажностного режима внутренней поверхности остекления и защиты таких поверхностей от ниспадающих потоков холодного воздуха необходимо создать с помощью внутрипольных конвекторов настилающиеся струи.

Схема развития нагретой струи воздуха вдоль вертикальной охлаждённой поверхности ограждения представлена на рис. 1 [2].

Гидродинамику полугораниченной плоской струи несжимаемой жидкости и её теплообмен с охлаждённой поверхностью и окружающим воздухом можно описать системой дифференциальных уравнений движения, неразрывности и температурного поля. Характер плоской струи, исходящей от внутрипольного конвектора, зависит от режима его работы — начальной скорости воздуха v_0 и начальной избыточной температуры воздуха в струе:

$$T_0 = t_0 - t_b.$$

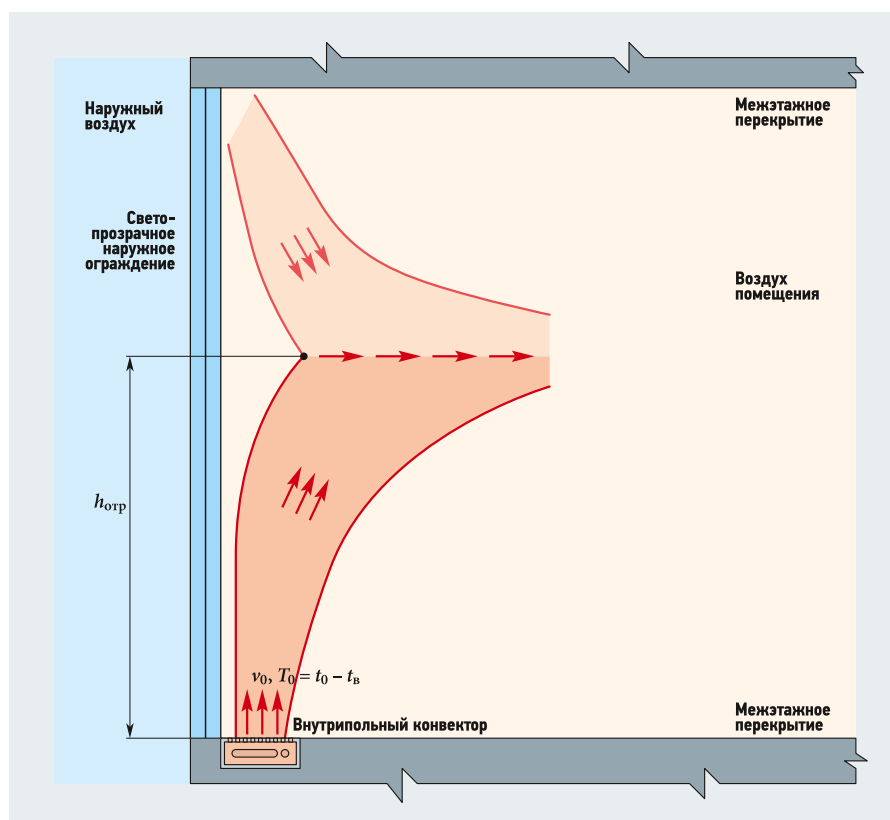
Также на интенсивность теплообмена струи со светопрозрачным ограждением влияет степень переохлаждения внутренней поверхности.

На рис. 1 на расстоянии $h_{отр}$ отмечено место отрыва пограничного пристенного слоя и возникновение застойной зоны. Выше точки отрыва развивается ниспадающий конвективный поток. При слиянии восходящей и ниспадающей струй образуется общий поток воздуха, направление которого может быть различно. Общий

ждения: «Вдоль поверхности остекления развивается основная полугораниченная турбулентная струя. Тёплые частицы воздуха в струе при её движении вдоль остекления охлаждаются. Это приводит к потере движущими частицами кинетической энергии и началу торможения. При полном торможении происходит отрыв пограничного слоя от охлаждённой поверхности остекления и изменение направления движения потока струи вглубь помещения». Однако описание эксперимента не даёт полной информации об отопительном приборе, который был использован, даже неясно, был ли он оснащён вентилятором или нет.

Ещё одним фактором, влияющим на характер настилающихся струй, является конструкция внутрипольного конвектора, а именно расположение нагревательного элемента в коробке. Исследования, проведённые автором в работе [4], показали, что наилучшее расположение нагревательного элемента в коробе — у стенки короба со стороны остекления. В этом случае достигается максимальный тепловой поток конвектора при условии расположения конвектора на расстоянии от 0 до 100 мм от стенки.

Однако данная рекомендация может быть использована при проектировании или монтаже нагревательного элемента только для внутрипольного конвектора с естественной вентиляцией.



❖ Рис. 1. Схема развития нагретой струи воздуха вдоль вертикальной охлаждённой поверхности

Регулирование теплоотдачи внутрипольного конвектора

Количество теплоты, подаваемое в здание на нужды отопления, изменяется в зависимости от параметров наружного воздуха. Регулирование осуществляется на источнике теплоты (ТЭЦ, РТС, котельная) в тепловом пункте (ИТП, ЦТП). Окончательное регулирование осуществляется потребителем непосредственно при помощи терморегуляторов на отопительных приборах. В соответствии с требованиями п. 1 [5] обязательно наличие на «подводящих теплоноситель трубах средств регулирования теплоотдачи радиаторов, таких как ручные регулирующие краны или термостатические краны».

Регулирование теплоотдачи внутрипольного конвектора при наличии вентилятора осуществляется изменением частоты вращения его оборотов — как правило, количество режимов работы зависит от используемой модели регулятора.

Базовая схема предполагает управление скоростью вентилятора от 20 % до максимальной, которая может быть изменена пользователем в настройках. Изменение скорости вращения вентилятора необходимо для достижения нужной температуры, заданной режимом работы внутрипольного конвектора

В [6] представлено описание внутрипольных конвекторов с естественной и вынужденной циркуляцией. Внутрипольный конвектор с вынужденной конвекцией оснащён тангенциальным вентилятором, который обеспечивает циркуляцию воздуха через отопительный элемент. Регулирование теплоотдачи данных конвекторов осуществляется при помощи блоков регулирования с термостатами Danfoss и Honeywell, которые могут работать в следующих режимах:

- режимы принудительной и свободной конвекции;
- три скоростных режима и режим свободной конвекции;
- три скоростных режима, режим «Авто» и режим свободной конвекции.

Для совершенствования существующих алгоритмов регулирования теплоотдачи (режимов работы) внутрипольных конвекторов в НИИ «ИКСЭл» были выполнены работы в данном направлении. Для серийно производимого внутрипольного конвектора с вентилятором был разработан алгоритм для блока управления.

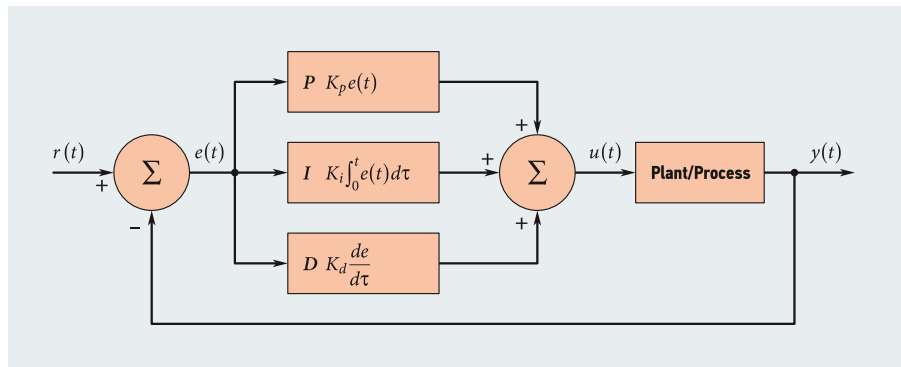


Рис. 2. Логическая схема работы ПИД-алгоритма

Базовая схема предполагает управление скоростью вентилятора от 20 % до максимальной скорости, которая может быть изменена пользователем в настройках. Изменение скорости вращения вентилятора необходимо для достижения нужной температуры, заданной режимом работы внутрипольного конвектора.

Алгоритм управления температурой реализуется по основной математической схеме, которая представлена на рис. 2.

В свою очередь, математическое описание пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) алгоритма представляется в следующем виде:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) d\tau + K_d \frac{de}{dt},$$

где $u(t)$ — значение выходного сигнала ПИД-регулятора (скорость вращения вентилятора, величина которой не должна превышать максимальную); $e(t)$ — значение невязки, которое подаётся на вход ПИД-регулятора и является разницей функций $r(t)$ (значение уставки температуры пользователя) и $y(t)$ (значение температуры согласно датчику); K_p , K_i и K_d — настраиваемые коэффициенты пропорциональности. Изменение значений коэффициентов пропорциональности возможно только при введении пароля в блоке управления, поскольку данные

коэффициенты являются определяющими для правильной работы блока управления внутрипольного конвектора.

Разработанный алгоритм позволяет регулировать теплоотдачу отопительного прибора не только за счёт изменения оборотов вентилятора, но и варьированием расхода горячего теплоносителя (воды), изменяя пропускную способность вентиля на подводке. Особенность работы вентиля — наличие циркуляции теплоносителя через отопительный прибор при любых условиях работы внутрипольного конвектора. Данная особенность позволяет обеспечить циркуляцию теплоносителя для предотвращения разморозки системы отопления.

В блоке управления пользователю доступны пять режимов работы внутрипольного конвектора: «комфорт», «эко», «ручной», «дежурный», «программируемый» (smart-режим). Все режимы, за исключением «программируемого», могут работать при условии наличия или отсутствия регулирующего вентиля на подводке.

Блок управления в режиме «комфорт» изменяет теплоотдачу внутрипольного конвектора в автоматическом режиме в соответствии с уставкой пользователя. В режиме «эко» происходит «недотоп» помещения относительно параметров, заданных пользователем.





Оценка энергосберегающего эффекта

Работа системы отопления, реализованной с применением внутрипольных конвекторов, оснащённых блоками управления, в пользовательском режиме (smart-режим) позволяет запрограммировать работу отопительных приборов в течение длительного времени. Программируемый режим позволяет автоматически переводить систему отопления в дежурный режим работы в нерабочее время, выходные и праздничные дни. Для реализации данного режима необходимо точное понимание режима функционирования отапливаемого помещения.

В работе [4] в результате эксперимента с помощью тепловизора визуализировано температурное поле нижней части наружного ограждения при обогреве помещения внутрипольным конвектором с естественной циркуляцией. Площадь участка с повышенной температурой, которая составляет примерно $+31^{\circ}\text{C}$, ориентировочно равна $0,5\text{ м}^2$. Данный участок характеризуется повышенной температурой поверхности, то есть имеет место перегрев наружного ограждения. С учётом небольшого значения сопротивления теплопередаче светопрозрачного ограждения перегрев указанного участка приведёт к увеличению тепловых потерь.

При отоплении помещения внутрипольным конвектором с вынужденной конвекцией в совокупности с блоком управления, в котором реализован разработанный НИИ «ИКСЭл» алгоритм управ-



ления, позволяет снизить температуру нижней части светопрозрачного ограждения. Это приводит к снижению тепловых потерь через указанный участок. В зависимости от площади данного участка, применение внутрипольного конвектора с блоком управления для отопления по-

мещений позволяет снизить потребление теплоты до 5 % по сравнению с внутрипольными конвекторами с естественной вентиляции без блока управления.

Выводы

Использование внутрипольного конвектора с вынужденной конвекцией в совокупности с блоком управления позволяет обеспечить требуемый уровень теплового комфорта в помещении: обеспечить равномерный прогрев и перемешивание воздуха, создать нагретую струю воздуха вдоль вертикальной охлаждённой поверхности остекления. Также за счёт работы вентилятора внутрипольного конвектора и возможности регулирования

Использование внутрипольного конвектора с вынужденной циркуляцией с блоком управления является предпочтительным при отоплении помещений с панорамным остеклением, поскольку обеспечивает комфортные условия пребывания человека и снижает расход теплоты

его теплоотдачи при помощи разработанного алгоритма управления нижняя часть светопрозрачного ограждения не перегревается относительно температуры внутреннего воздуха по сравнению с внутрипольным конвектором с естественной циркуляцией.

Использование внутрипольного конвектора с вынужденной циркуляцией с блоком управления, в котором реализован разработанный НИИ «ИКСЭл» алгоритм управления, является предпочтительным при отоплении помещений с панорамным остеклением, поскольку обеспечивает комфортные условия пребывания человека и снижает расход теплоты по сравнению с внутрипольными конвекторами с естественной конвекцией. ●

1. Верховский А.А., Нанасов И.И., Елизарова Е.В., Гальцев Д.И., Шередин В.В. Энергоэффективность светопрозрачных ограждающих конструкций // Жилищное строительство, 2012. №6. С. 60–63.
2. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): учебник для вузов. 3-е изд. — СПб.: АВОК Северо-Запад, 2006. 400 с.
3. Тульская С.Г., Сотникова О.А., Булыгина Ю.Г. Экспериментальное исследование теплового режима про-

изводственных помещений и обеденных залов ресторанных комплексов // Инженерные системы и сооружения, 2012. №3. С. 62–70.

4. Пухал В.А. Особенности применения внутрипольных конвекторов // Инженерные системы, 2017. №3. С. 16–20.
5. О требованиях энергетической эффективности товаров, используемых для создания элементов конструкций зданий, строений, сооружений, в том числе инженерных систем ресурсоснабжения, влияющих

на энергетическую эффективность зданий, строений, сооружений: Приказ Минэкономразвития России от 04.06.2010 №229 (в ред. Приказа Минэкономразвития России от 09.06.2016 №362).

6. Рекомендации по применению встраиваемых в конструкцию пола конвекторов Techno ООО «ТД «Технохолод» (г. Великие Луки). 2-е изд. / В.И. Сасин, Г.А. Бершидский, Т.Н. Прокопенко, В.Д. Кушнир, Т.Н. Санчик. — М.: ООО «Витатерм», 2015. 50 с.

References — see page 78.

Development of an algorithm for regulating in-floor convectors' heat transfer. Pp. 26–29.

Andrey A. Arbatsky, PhD, general director of Research Institute of Engineering Climate Systems and Electronics (Kirzhach, Vladimir region); **Mikhail V. Gorelov**, PhD, Associate Professor, the Department of Heat and Mass Transfer Processes and Installations, [Moscow Power Engineering Institute \(NRU "MPEI"\)](#); **Elena M. Goryacheva**, senior lecturer, the Department of Heat and Mass Transfer Processes and Installations, [Moscow Power Engineering Institute \(NRU "MPEI"\)](#).

1. A.A. Verkhovsky, I.I. Nanasov, E.V. Elizarova, D.I. Gal'tsev, V.V. Shheredin. *Jenergojeffektivnost' svetoprozrachnykh ograzhdajushchikh konstruksij* [Energy efficiency of translucent enclosing structures]. *Zhilishhnoe stroitel'stvo* ["Housing construction" Magazine]. 2012. No. 6. Pp. 60–63. [In Russian]
2. V.N. Bogoslovskij. *Stroitel'naja teplofizika (teplofizicheskie osnovy otopenija, ventiljatsii i kondicionirovanija vozdukh): uchebnik dlja vuzov* [Structural thermal physics (thermophysical fundamentals of heating, ventilation and air conditioning). A textbook for universities]. 3rd edition, rev. and exp. St. Petersburg. Izd-vo "AVOK Severo-Zapad" [Publishing House of the Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics of the north-west part of Russia ("ABOK North-West")]. 2006. 400 p. [In Russian]
3. S.G. Tul'skaja, O.A. Sotnikova, Ju.G. Bulygina. *Jeksperimental'noe issledovanie teplovogo rezhima proizvodstvennykh pomeshhenij i obedennykh zalov restorannykh kompleksov* [Experimental study of the thermal regime of industrial premises and dining halls of restaurant complexes]. *Nauchnyj zhurnal. Inzhenernye sistemy i sooruzhenija* ["Science Magazine. Engineering systems and structures" Magazine]. 2012. No. 3. Pp. 62–70. [In Russian]
4. V.A. Pukhkal. *Osobennosti primeneniya vnutripol'nykh konvektorov* [Features of the use of floor convectors]. *Inzhenernye sistemy* ["Engineering systems" Magazine]. 2017. No. 3. Pp. 16–20. [In Russian]
5. *O trebovanijakh jenergeticheskoj jeffektivnosti tovarov, ispol'zuemykh dlja sozdaniya jelementov konstruksij zdaniy, stroenij, sooruzhenij, v tom chisle inzhenernykh sistem resursosnabzhenija, vlijajushchikh na jenergeticheskiju jeffektivnost' zdaniy, stroenij, sooruzhenij* [On the requirements for the energy efficiency of goods used to create structural elements of buildings, structures, structures, including engineering resource supply systems that affect the energy efficiency of buildings, structures, structures]. *Prikaz Minjekonomrazvitiya Rossii ot 04.06.2010 №229 (v red. Prikaza Minjekonomrazvitiya Rossii ot 09.06.2016 №362)* [Order of the Ministry of Economic Development of Russia No. 229 of June 4, 2010 (as amended by Order of the Ministry of Economic Development of Russia No. 362 of June 9, 2016)]. [In Russian]
6. V.I. Sasin, G.A. Bershidskij, T.N. Prokopenko, V.D. Kushnir, T.N. Sanchich. *Rekomendatsii po primeneniju vstraivaemykh v konstruksiju pola konvektorov Techno OOO "TD "Tekhnokholod"* (g. Velikie Luki) [Recommendations for the use of Techno convectors built into the floor construction of "Trade House Tekhnokholod", LLC (Velikie Luki city)]. 2nd edition. Moscow. OOO "Vitaterm" ["Vitaterm", LLC]. 2015. 50 p. [In Russian]