

М. Н. НИКИТИН

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛОТДАЧИ ОТОПИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПОСОБА УСТАНОВКИ

STUDY OF HEAT TRANSFER OF A HEATER FOR VARIOUS INSTALLATION METHODS

*Работа посвящена анализу результатов численного моделирования поверхностного теплообмена для отопительного прибора при различных способах его установки. Показаны результаты критического анализа существующего подхода к оценке действительной эффективности с помощью эмпирических коэффициентов. Приведены верифицированные расчетные значения относительных коэффициентов теплоотдачи для восьми вариантов установки отопительного прибора. Подтверждена адекватность полученных результатов на основании заимствованных опытных данных. Сделан вывод о чувствительности интенсивности теплоотдачи к температуре теплоносителя при различных способах установки отопительного прибора.*

**Ключевые слова:** теплоотдача, отопительный прибор, численное моделирование, способ установки, температура теплоносителя

*Analysis of numerically simulated convective heat transfer for a variety of heater installations is presented. A critical review of the existing method of energy efficiency assessment, which is based on empirical coefficients, is given. Numerically verified nondimensional heat transfer coefficients for eight installations of the heater are presented. The results were validated with the adopted experimental data. Sensitivity analysis of heat transfer intensity towards heat carrier temperature for a variety of heater installations is presented.*

**Keywords:** heat transfer, heater, numerical modeling, installation type, heat carrier temperature

### Введение

Эффективность работы отопительных приборов является значимым фактором общей энергоэффективности здания. Нормативная документация СП 60.13330.2016 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» не предписывает учет действительной эффективности отопительных приборов при проектировании систем отопления. При этом действительное значение интенсивности теплоотдачи может значительно отличаться от расчетного и определяется целым рядом факторов: способ установки, температура теплоносителя [1, 2], проходимость внутренних каналов [3], состояние поверхности теплообмена (как наружной, так и внутренней) и т. д.

В справочной литературе приводятся корректирующие коэффициенты для учета указанных выше факторов. В частности, известны значения эмпирического коэффициента  $\beta_4$ , учитывающего способ установки отопительного прибора [4, с. 69]. Значения приводятся для наиболее распространенных способов установки с шаговыми значениями размеров основных элементов ограждений (подоконника и экрана). Однако на значение коэффициента  $\beta_4$  большое влияние оказывают отступы от ограждений, а также размеры щелей в них. Даже небольшое отклонение (10–15 %) может существенно изменить значение  $\beta_4$  при этом экстраполяция

крайне ограничена. В результате в целом ряде случаев корректировка эффективности теплоотдачи по имеющимся данным носит ярко выраженный приближенный характер.

Известны методы определения эффективности теплоотдачи с использованием математических моделей [5–8]. Однако эти модели построены на простейших одномерных выражениях, не учитывающих условия расположения отопительного прибора.

Отдельно следует отметить некорректную интерпретацию коэффициента  $\beta_4$ , приведенную в справочнике [4, с. 69], которая часто встречается на различных информационных порталах [9]. Так, понижающий коэффициент  $\beta_4$  (при  $\beta_4 > 1$  интенсивность теплоотдачи снижается) рассматривается как повышающий. В результате, согласно инфографике [9], установка радиатора под глухим подоконником и за экраном с двумя щелями оказывается предпочтительнее варианта открытой установки.

В настоящей работе представлены результаты численного исследования поверхностного теплообмена применительно к различным способам установки отопительного прибора. Полученные результаты были подтверждены заимствованными опытными данными и показали возможность достоверного определения действительной эффективности отопительного прибора на этапе проектирования системы отопления.

### Методика исследования

Исследование интенсивности поверхностного теплообмена для различных способов установки отопительного прибора было проведено методом численного моделирования. Для описания поверхностного теплообмена и конвективного переноса использовались следующие основные уравнения:

$$\operatorname{div}(\vec{U}) = 0,$$

$$\rho \frac{\partial \vec{U}}{\partial \tau} + \rho \cdot \vec{U} \cdot \operatorname{div}(\vec{U}) = -\operatorname{grad} p + \mu \cdot \operatorname{div} \operatorname{grad} \vec{U} + \vec{F}_g,$$

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + \operatorname{div}(T\vec{U}) \right) = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \operatorname{grad} \vec{U} : \sigma,$$

где  $\vec{U}$  – скорость потока, м/с;  $\rho = p/RT$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $p$  – давление воздуха, Па;  $R = 8,31$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура воздуха, К;  $\tau$  – время, с;  $\mu = 1,935$  Па·с – молекулярная вязкость воздуха;  $\vec{F}_g = \rho \vec{g}$  – гравитационные силы, Н;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;  $c_p = 1005$  Дж/(кг·К) – теплоемкость воздуха;  $\lambda = 0,028$  Вт/(м·К) – теплопроводность воздуха;  $\operatorname{grad} \vec{U} : \sigma$  – комплекс сил сдвигового трения.

Задача решалась в нестационарной постановке с использованием вихревой модели Смагоринского [10] для описания турбулентных пульсаций.

В исследовании была использована двумерная прямоугольная расчетная область (750x1500 мм), содержащая ограждающие конструкции (подоконник и декоративный экран) и отопительный прибор (пятисекционный регистр). Были рассмотрены восемь вариантов установки отопительного прибора (рис. 1).

Для всех рассмотренных случаев были приняты единообразные начальные и граничные условия, которые обеспечили наилучшее приближение разработанной численной модели и реальные условия эксплуатации отопительного прибора. Начальная температура в расчетной области была задана 20 °С. На поверхностях наружной стены (слева) и регистров отопительного прибора была задана фиксированная температура 10 и 50 (70) °С соответственно. Данное допущение было принято исходя из необходимости определения интенсивности теплоотдачи с нагретой поверхности. Остальные поверхности были приняты адиабатными. Открытые границы расчетной области (справа и сверху) были заданы с условием свободного входа/выхода так, что принимался нулевой градиент скорости ( $\operatorname{grad} \vec{U} = 0$ ), а давление в зависимости от направления потока:  $p = p_0$  для выходящего потока и  $p = p_0 - \frac{1}{2} \rho |\vec{U}|^2$  для входящего потока, где  $p_0 = 101325$  Па – начальное давление в расчетной области.

Продолжительность численного эксперимента составила 60 с. Временной шаг корректировался в процессе решения для обеспечения максимального значения числа Куранта  $Cr_{max} = 1$  и составлял порядка 0.002–0.003 с. Численное моделирование проводилось на платформе OpenFOAM с использованием генератора сеток из платформы Salome и средства визуализации результатов ParaView.

Расчетные сетки создавались по единому алгоритму (NETGEN) с локальным трехкратным измельчением на поверхностях отопительного прибора. Помимо измельчения, на этих поверхностях было добавлено девять призматических слоев с коэффициентом роста 1.2–1.3 в зависимости от разрешения сетки. Слои подбирались таким образом, чтобы обеспечить значение безразмерного расстояния  $y^+ \approx 1$ .

На начальном этапе моделирования была проведена верификация разработанной численной модели путем оценки итерационной и сеточной сходимостей. Для оценки сеточной сходимости был использован массив расчетных сеток с базовым (максимальным) размером ячеек ( $\Delta x$ ) 3, 4.5, 6, 9 и 12 мм. Емкость сеток составила 287.6, 132.1, 74.8, 36.7 и 21.6 тыс.

На начальном этапе моделирования была проведена верификация разработанной численной модели путем оценки итерационной и сеточной сходимостей. Для оценки сеточной сходимости был использован массив расчетных сеток с базовым (максимальным) размером ячеек ( $\Delta x$ ) 3, 4.5, 6, 9 и 12 мм. Емкость сеток составила 287.6, 132.1, 74.8, 36.7 и 21.6 тыс.

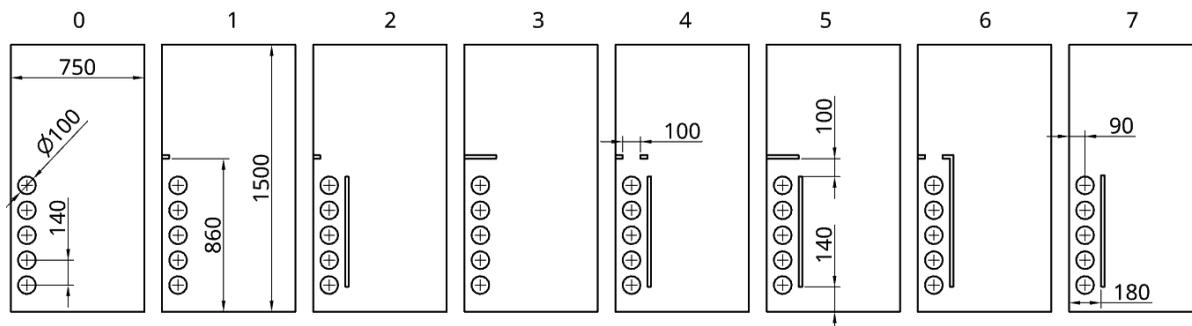


Рис. 1. Варианты установки отопительного прибора

ячеек соответственно. Исследования показали достоверность результатов (возможность применения экстраполяции Ричардсона [11]), полученных на сетках с базовым размером ячейки не более 6 мм (рис. 2). В дальнейших расчетах была использована сетка с базовым размером ячеек 4.5 мм. Ожидаемое отклонение контролируемого параметра (коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ ) на данной сетке от точного (при  $\Delta x = 0$  мм) составило 4.2 %.

Контролируемый параметр (коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ ) определялся на основании заданной температуры поверхности и расчетного значения теплового потока:

$$\alpha = \frac{|q|}{T - 293},$$

где  $|q|$  – усредненный по поверхности отопительного прибора удельный тепловой поток, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $T = 50(70)^\circ\text{C}$  – температура поверхности теплообмена.

Значения коэффициента теплоотдачи усреднялись за последние 20 с численного эксперимента. Для оценки доверительных интервалов усредненных значений использовались диапазоны предельных значений. Для лучшего восприятия в некоторых случаях использовались относительные значения коэффициента теплоотдачи:  $\alpha^* = \frac{\alpha}{\alpha_0}$ , где  $\alpha_0$  – коэффициент теплоотдачи для открытой установки отопительного прибора (вариант 0).

### Результаты исследования

В результате численного моделирования были получены значения коэффициентов теплоотдачи для различных способов установки отопительного прибора. На рис. 3 приведены относительные значения коэффициентов теплоотдачи.

Для оценки адекватности полученных результатов на диаграмме также показаны опыт-

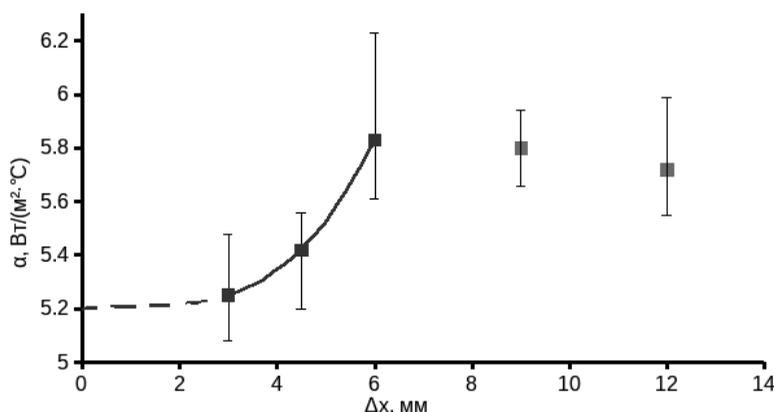


Рис. 2. Анализ сеточной сходимости решения

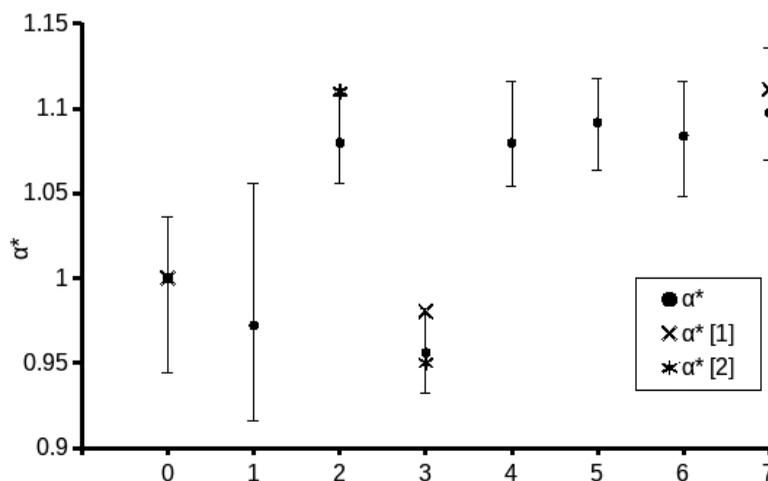


Рис. 3. Эффективность работы отопительного прибора для различных способов установки

ные данные [4, 9]. При этом коэффициенты, заимствованные с инфографики [9], интерпретировались как понижающие. Интенсивность теплоотдачи при открытой установке была принята за базовое значение, поэтому имеет место полное совпадение для нулевого варианта. Очевидно, что результаты моделирования для второго, третьего и седьмого вариантов с достаточной точностью воспроизводят опытные данные.

Результаты моделирования показали снижение эффективности теплообмена при установке отопительного прибора под подоконником (варианты 1 и 3) на 3–4 %. При этом глубина подоконника не оказывает существенного влияния. Наличие декоративного экрана во всех случаях (в т. ч. при наличии подоконника) обеспечивает увеличение эффективности

отопительного прибора на 8–10 % при условии организации выхода для нагретого воздуха. При этом прирост эффективности для всех рассмотренных вариантов с экраном примерно одинаков.

Отдельно было проанализировано влияние температуры теплоносителя на относительную эффективность рассмотренных вариантов установки отопительного прибора. Полученные результаты (рис. 4) свидетельствуют о значительном снижении интенсивности теплоотдачи (на 13–18 %), которое обусловлено снижением скорости воздушного потока вблизи поверхности теплообмена. Следует отметить, что наибольшее влияние на интенсивность теплоотдачи при снижении температуры теплоносителя было выявлено для варианта установки отопительного прибора под подоконником (вариант 3).

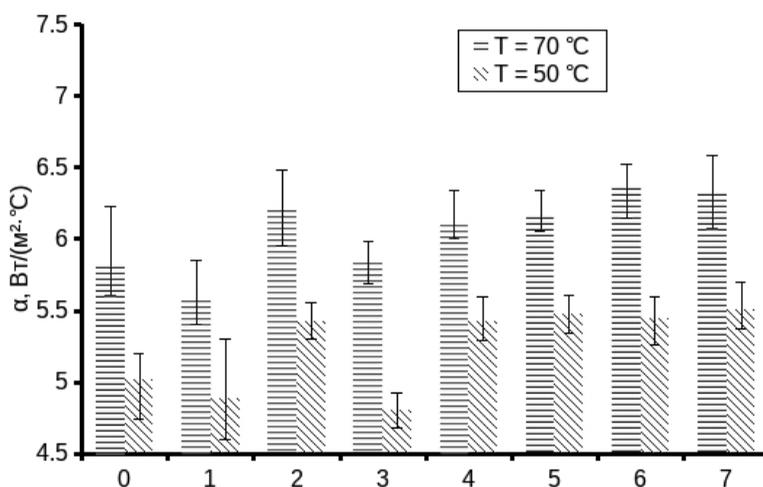


Рис. 4. Эффективность работы отопительного прибора для различных температур теплоносителя

**Выводы.** Эффективность отопительных приборов определяется целым рядом факторов, в т. ч. способом их установки. Очевидно, что использование ограждений в виде подоконника или декоративного экрана оказывает влияние на характер и в некоторых случаях направление движения воздушного потока, омывающего поверхность теплообмена. В настоящее время в тепловом расчете отопительных приборов широко используются эмпирические данные, однако они не универсальны и не применимы в ряде случаев.

В настоящей работе приведены результаты численного исследования поверхностного теплообмена, которые показали возможность получения достоверных результатов по интенсивности теплоотдачи для различных способов установки отопительного прибора. Было пока-

зано повышение эффективности при установке декоративного экрана вне зависимости от наличия подоконника. Также была рассмотрена зависимость интенсивности теплоотдачи от температуры теплоносителя, которая показала в целом равномерное снижение теплоотдачи при меньшей температуре. При этом наибольший эффект был отмечен для варианта установки под подоконником.

Полученные результаты показали высокую чувствительность интенсивности теплоотдачи к положению и размерам ограждений, а также их элементов. Это свидетельствует о значимости индивидуального расчета интенсивности теплоотдачи для каждого отдельного случая, который в настоящее время может быть реализован только методами численного моделирования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Басалаев А.А., Шнайдер Д.А.* Метод оптимизации температуры подаваемого теплоносителя в системе централизованного теплоснабжения зданий на основе имитационного моделирования // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2017. № 1(17). С. 15–22. DOI: 10.14529/ctcr170102.
2. *Усиков С.М.* Диапазон регулирования теплоотдачи отопительных приборов при количественном автоматическом регулировании // Наукосведение. 2017. № 3(9). С. 1–9.
3. *Осокин Е.В., Оленников А.А., Кирилов П.П., Николенко В.В., Гуца Е.А.* Одна из причин недогрева жилых помещений в отопительный период года // Вестник Сиб. гос. индустр. ун-та. 2015. № 14(4). С. 41–45.
4. *Богословский В.Н.* Внутренние санитарно-технические устройства. Отопление. М.: Стройиздат, 1990. 344 с.
5. *Мукашев А.М., Пуговкин А.В., Абрамчук С.И.* Моделирование эффективности теплоотдачи отопительных приборов // Вестник ТГАСУ. 2017. № 5. С. 169–175.
6. *Панферов С.В., Панферов В.И.* Динамическая модель отопительных приборов и систем // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2015. № 2(15). С. 75–82. DOI: 10.14529/ctcr150208.
7. *Панферов С.В., Панферов В.И.* К решению задачи моделирования отопительных приборов и систем // Управление инвестициями и инновациями. 2018. № 1. С. 99–105. DOI: 10.14529/iimj180115.
8. *Цветков Н.А., Жуков А.В., Кривошеин Ю.О., Иванчин М.Г., Токмаков А.В.* Совершенствование методики измерения тепловой мощности отопительных приборов в реальных условиях эксплуатации // Вестник ТГАСУ. 2015. № 6. С. 141–148.
9. Установка радиаторов отопления в частном доме. URL: <http://gopb.ru/radiator/ustanovka-batarej-otopleniya-v-chastnom-dome-svoimi-rukami-video> (дата обращения: 10.02.2019).
10. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with the primitive equations // Monthly Weather Review, 1963, Vol. 91, No. 3, pp. 99–164. DOI: 10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2.
11. *Richardson L.F.* The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam // The Transactions of the Royal Society A., 1911, Vol. 210, No. 495–470, pp. 307–357. DOI: 10.1098/rsta.1911.0009.

Об авторе:

### НИКИТИН Максим Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194 E-mail: max@nikitin-pro.ru

### NIKITIN Maxim N.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194 E-mail: max@nikitin-pro.ru

Для цитирования: *Никитин М.Н.* Исследование интенсивности теплоотдачи отопительного прибора в зависимости от способа установки // Градостроительство и архитектура. 2019. Т.9, №1. С. 33–37. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.01.6.

For citation: *Nikitin M.N.* Study of Heat Transfer of a Heater for Various Installation Methods // Urban Construction and Architecture. 2019. V.9, 1. Pp. 33–37. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.01.6.