

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА УЧЕБНОГО ПОМЕЩЕНИЯ. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

А. Н. Белоус¹, М. В. Оверченко², Д. В. Выборнов²

¹ ООО «Северо-западное управление проектами и инновационными решениями»

² ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

Аннотация. Выполнен обзор методов моделирования температурного режима помещений. Описаны подходы к моделированию процессов теплообмена в помещениях с нестационарным режимом работы. Определены особенности создания геометрической модели помещения и способы назначения граничных условий при моделировании процессов теплообмена. Отмечены проблемные моменты, связанные с созданием модели учебного помещения ввиду непостоянного пребывания в нем людей в течение дня. Указаны особенности моделирования отдельных элементов конструкций и деталей с учетом их геометрических размеров и распределения температурных полей. Обозначены основные проблемы при создании расчетных моделей с нестационарным тепловым режимом. А также выявлены перспективы для решения сложных теплофизических задач, учитывающие совместное влияния между ограждающими конструкциями с учетом нестационарного теплоступления от бытовых источников, теплоемкостью конструкций, элементов заполнения помещения и одновременного нестационарного теплового режима наружной окружающей среды.

Ключевые слова: температурный режим, теплоступления, микроклимат, моделирование, энергосбережение.



Белоус
Алексей Николаевич



Оверченко
Мира Викторовна



Выборнов
Дмитрий Владимирович

В настоящее время в мировой практике строительства особое внимание уделяется энергосбережению. Системы теплоснабжения в общественных зданиях обладают потенциалом по регулированию потребления энергетических ресурсов для обеспечения необходимых условий внутренней среды в каждом отдельно взятом помещении, что влияет на показатели энергопотребления здания в целом. Одним из показателей, влияющих на энергопотребление, является температурный режим здания.

Температурный режим является одним из наиболее важных факторов, формирующих микроклимат помещений. Согласно [1], температура воздуха в помещениях, относящихся ко 2-й категории (помещения, в которых люди заняты умственным трудом, учебной), в холодный период года должна находиться в диапазоне 18–23°C. При этом на формирование температурного режима помещения оказывает значительное влияние состояние наружных ограждений, наличие теплопроводных включений, площадь остекления, инфильтрация и эксфильтрация.

Несоблюдение требований по обеспечению необходимых параметров микроклимата в помещении, особенно в холодный период года, оказывает негативное влияние на организм человека, поэтому необходимо достичь эффективной работы системы отопления в здании с учетом количества людей и времени их пребывания в помещении.

Основы моделирования процессов теплообмена были заложены еще в середине XX века [2,3] до появления быстродействующих ЭВМ. За это время многостороннее развитие получили различные методы расчетов [4], однако многие из них ограничены случаями срав-

нительно простых по геометрии расчетных областей. Проблемы сложной геометрии при моделировании течений были определенным образом решены в методе конечных объемов, согласно которому расчетная область разбивается на небольшие соприкасающиеся объемы, внутри каждого из которых находится только одна точка привязки искомого решения. Данный метод, как наиболее технологичный способ дискретизации задач теплообмена и гидрогазодинамики [4], лег в основу различных программных комплексов, среди которых находится система SOLIDWORKS.

Проблемам поддержания параметров микроклимата помещений и моделированию процессов теплообмена посвящено большое количество работ, среди которых и труды зарубежных ученых [5-9]. Исследование теплоступлений в зданиях, а также необходимость поддержания правильно заданного температурного режима в служебных помещениях описаны в [8]. Автором подтверждено влияние прироста технологического и бытового тепла на выбор тепловой защиты и энергопотребление систем поддержания внутреннего микроклимата помещений. В работе [9] представлена математическая модель теплопередачи в помещении, включающая теплопередачу между помещением и окружающей средой, воздухообмен в пределах естественной вентиляции и инфильтрации, теплопоступления от людей и солнечную энергию.

В работе [10] произведен обзор методов расчета параметров микроклимата, рассмотрена математическая модель процессов теплообмена для помещения с долговременным пребыванием людей. Авторами выполнена проверка математической модели сравнением результатов расчета параметров внутренней среды в программном комплексе ANSYS Fluent с экспериментальными данными. Отличие расчетных и экспериментальных данных составило не более 9,5 %.

Численное моделирование влияния теплопоступлений от системы отопления на уровень комфорта человека в помещении выполнено в работе [11]. Моделирование производилось с использованием комплекса CAD/CFD программного обеспечения SOLIDWORKS Flow simulation. Установлено, что в рассматриваемом помещении приточная вентиляция организована недостаточно энергоэффективно, требуется корректировка режимов работы систем отопления, вентиляции и кондиционирования.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта расчетно-аналитических исследований были выбраны помещения образовательных организаций. В таких зданиях, ввиду их режима эксплуатации, теплопоступления не постоянны во времени, а носят циклический характер. Между тем, создание комфортных условий в помещениях таких зданий является важной инженерной задачей, так как от этого напрямую зависит комфорт и здоровье учащихся. Для аналитических исследований и расчетов температурного режима и теплового баланса таких зданий в целом целесообразно использовать программные комплексы, позволяющие создать 3D-модель помещения, с учетом не только конструктивных элементов, но и оборудования, и людей, находящихся в помещении,

и систем естественной или механической вентиляции. Для выполнения такого вида исследований необходимо учесть следующие параметры: точность прорисовки геометрии и граничные условия, которые определяют режим работы конструкции, их теплотехнические свойства, способы передачи энергии.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОМЕЩЕНИЯ

Для получения высокой точности и сходимости результатов натурных и теоретических исследований, элементы геометрической модели помещения необходимо задавать максимально приближенно к реальному объекту исследования. При выборе геометрических параметров линейных и угловых размеров необходимо оценивать влияние расчетного значения на суммарную величину. Рассмотрим некоторые особенности моделирования отдельных частей и элементов на примере учебного помещения здания образовательной организации в программном комплексе SOLIDWORKS, представленного на (рис. 1).

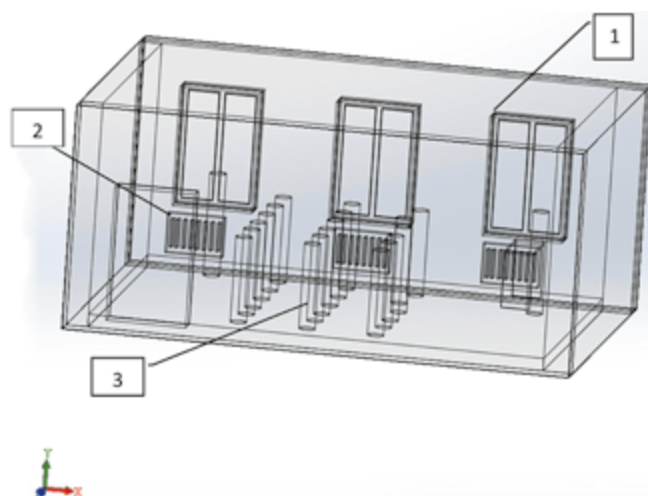


Рис. 1. Геометрическая модель исследуемого учебного помещения: 1 – оконный откос, 2 – модель радиатора, 3 – модель человека

На примере моделирования температурного поля узла сопряжения оконного проема (рис.1, поз.1) возможно оценить влияние выступающей части наружного откоса на температурное поле стены при расчете теплового баланса помещения. Опираясь на данные [12], на примере выступающей части из цементно-песчаного откоса размерами 40 x 40 мм, установлено, что такой элемент не оказывает влияния на изменение температурного поля конструкции стены, а в то же время элемент таких же размеров, но выполненный из базальтовой ваты, учитывать необходимо, так как он повлечет за собой изменение температурного поля в околооконной зоне. Таким образом, учет компонентов из различных по своим теплотехническим свойствам материалов, даже при их незначительных размерах, является обязательным.

При создании модели тепловых потоков радиатора (рис. 1, поз. 2), помимо моделирования секций, возникает вопрос о необходимости выделения в исследуемой модели элементов запорной арматуры.

Учитывая, что общая модель помещения имеет размеры в сотни раз превышающие размеры элементов запорной арматуры радиатора, размеры ячейки стандартной сетки не смогут учесть такие элементы, поэтому необходимо вручную производить локальное сгущение сетки, что негативно отразится на скорости расчета и точности. Следовательно, для упрощения расчетной модели такими элементами можно пренебречь.

Способ представления тела человека является неоднозначным. Сложная геометрическая форма тела кратно увеличивает время расчета, а при количестве человек в учебном помещении, равном 25, время расчета при прорисовке сложной геометрии (рис. 1, поз. 3; рис. 2) приводит к продолжительности расчета более 20 часов. Согласно работе [13], для расчетов рекомендуется заменить модель человека эквивалентным по площади цилиндром. Для взрослого человека размеры цилиндра принимают равными 1,8 м по высоте и 0,28 м в диаметре. Отдельным вопросом стоит материал представления тела человека. Если абстрагироваться от деталей и подробностей, таких как наличие одежды, дыхание, испарение пота и других процессов, происходящих в организме, можно принять, что человек состоит из материала со свойствами воды. По результатам исследований [14] при моделировании теплообменных процессов человека в помещении с интенсивностью трудовой деятельности, относящейся к легкой категории тяжести работ, он может быть представлен геометрическим телом с выделением тепла мощностью 110 Вт – взрослый человек, 70 Вт – ребенок.

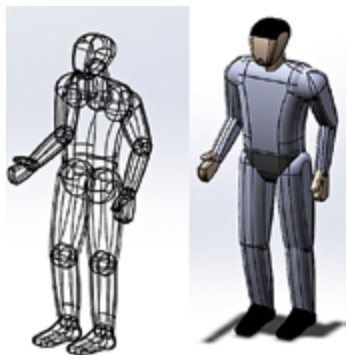


Рис. 2. Пример сложной геометрии тела человека при моделировании в SOLIDWORKS

ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Определение параметров микроклимата в помещении является внутренней задачей, так как необходимо исследовать потоки тепла сквозь элементы модели. При этом выполнение подобного типа расчетов возможно лишь при назначении тепловых характеристик конструкций с учетом теплопроводности в твердых телах. Теплопроводность материалов задается посредством присвоения материала каждому элементу модели вручную либо из имеющейся базы данных программы. Тепло генерируется несколькими электронными компонентами, так как мы хотим пронаблюдать, как тепло распределяется по радиатору и другим твердым телам, а затем переходит в текучую среду. Необ-

ходимым условием является исключение полостей из условий течения, что позволит игнорировать области, несущественные для анализа, а следовательно, позволит программе не тратить память и ресурсы процессора для их обработки.

Для анализа естественной конвекции газов задается гравитация, что позволяет автоматически моделировать движение нагретых воздушных масс вверх и циркуляцию воздуха в помещении при заданной силе тяжести в вертикальном направлении.

Текучей средой в исследуемом объеме выступает его заполнение, и в качестве текучей среды могут выступать не только жидкости, но и различные газы. В случае исследования процессов теплообмена в помещении текучей средой является воздух (рис. 3). Для анализа можно выбрать до десяти типов жидкостей или газов. Flow Simulation может просчитывать проект с любым типом потока: только турбулентный, только ламинарный, ламинарный и турбулентный.

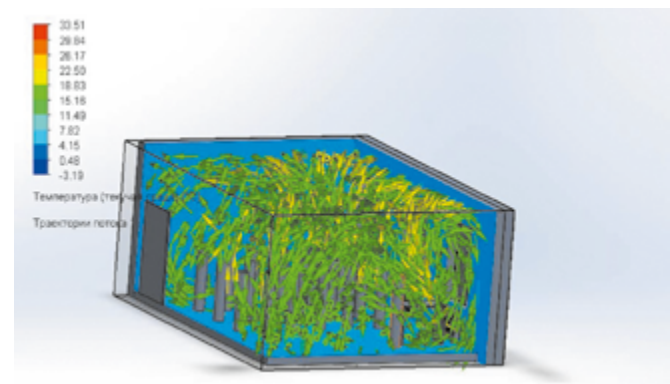


Рис. 3. Траектории воздушного потока в исследуемом помещении

В программных комплексах под термином «граничные условия» подразумевается задание параметров на границе распределения сред в исследуемой модели. Задание граничных условий выполняется при создании проекта в дополнении SOLIDWORKS Flow Simulation. Граничные условия задаются в местах, где поток входит в систему или покидает её. При выборе следующих граничных условий задаются следующие параметры: «Внешняя стенка» - позволяет учесть температуру и коэффициент теплоотдачи наружной части ограждения, «Реальная стенка» - температуру, коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности, а также ее шероховатость, «Идеальная стенка» - при моделировании адиабатического процесса между помещениями.

Снаружи помещения задается коэффициент теплоотдачи наружной поверхности α_n , [Вт/м²·К], а для внутренних поверхностей помещения необходимо задать коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности – α_v , [Вт/м²·К], которые определяются как сумма коэффициентов передачи тепла излучением α_l и конвекцией α_k . Передача тепла излучением к внутренней поверхности ограждения происходит от таких поверхностей внутренних конструкций, температура которых выше температуры внутренней поверхности наружной стены. С наружной поверхности ограждения тепло излучением передается в окружающую среду. Передача тепла конвекцией различна для внутренней и наруж-

ной поверхностей. У внутренней поверхности – это естественная конвекция, у наружной – вынужденная, вызванная действием ветра. У внутренней поверхности наружной стены задается толщина динамического пограничного слоя δ , образующегося при движении струи воздуха вертикально вдоль холодного ограждения, температура которого ниже температуры окружающего воздуха.

Объемные источники тепла – в данной задаче это радиаторы и люди, находящиеся в помещении, позволяют устанавливать интенсивность теплообразования (в Ваттах) или объемную интенсивность теплообразования (в Ваттах на единицу объема), или постоянную температуру в качестве граничного условия для выбранного объема. Так же можно установить поверхностные источники тепла, для которых устанавливается интенсивность теплообразования (в Ваттах) или тепловой поток (в Ваттах на единицу поверхности). Цикличность теплоступлений от людей в помещении описывается таблично заданной функцией $F(\text{время})$, что позволяет учитывать теплоступления от таких источников в строго определенные промежутки времени, соответствующие реальному времени пребывания учащихся в учебном помещении (рис. 4).

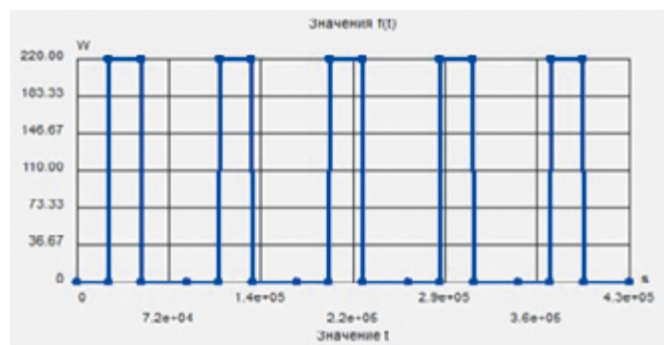


Рис. 4. Таблично заданная функция F (время)

Глобальная сетка отображается для контрольных областей. Настройки сетки можно выполнять вручную и автоматически. Размеры сетки необходимо задавать таким образом, чтобы при разбивке на конечные объемные элементы была произведена разбивка всех слоев и отдельных элементов конструкций. В программных комплексах возможно задавать ячейки разных размеров для различных элементов, что существенно облегчит решение задач. В некоторых случаях необходимо использовать сгущение сетки на отдельных участках при большой разнице в габаритных размерах исследуемых элементов или сложных геометрических сопряжениях. Более крупная сетка дает большую погрешность по результатам расчета, а выбор более мелкой ячейки в разы увеличивает время расчета.

В процессе расчета проекта, который производится способом последовательных итераций, возможно выводить на экран графики сходимости для контроля результатов расчета, приостанавливать или завершать расчет, смотреть текущие результаты.

После окончания расчета был выполнен анализ полученных результатов при помощи различного доступного инструментария в дополнении Flow Simulation для данного типа задач, а также получены графики распределения температур по времени в

любой точке помещения и на поверхности объекта. На рис. 5а представлены температура текучей среды в помещении, полученная в ходе моделирования, и распределение температурных полей на наружной поверхности стен (рис. 5б).

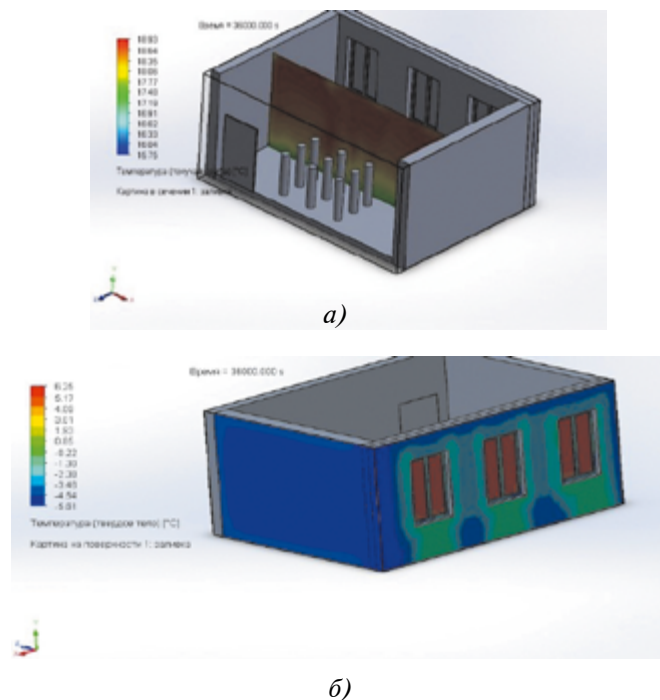


Рис. 5. Результаты моделирования температурного режима учебного помещения:
а) температура текучей среды в помещении,
б) температурные поля на наружной поверхности стен

Однако, в данном программном комплексе отсутствует возможность решения задач о точной и эффективной оценке взаимного влияния между ограждающими конструкциями с учетом нестационарного теплоступления от бытовых источников, теплоемкостью конструкций, элементов заполнения помещения и одновременного нестационарного теплового режима наружной окружающей среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в рамках рассмотренных традиционных подходов к моделированию теплового режима помещений получены важные результаты, облегчающие проведение расчетов и проектирования системы отопления и вентиляции с учетом теплофизических процессов, протекающих в ограждающих конструкциях. В то же время, очевидно, что на сегодняшний день существуют проблемы, которые остаются нерешенными и требуют дополнительных исследований.

Несмотря на то, что численные методы, предусматривающие использование метода конечных разностей или метода конечных объемов, достаточно точно учитывают все основные физические процессы, они малоприменимы для практических расчетов. Большинство работ по численному моделированию работы систем теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования выполнено с использованием коммерческого программного обеспечения, такого как

SOLIDWORKS, Ansys, Transys, Cosmos/m и т. д. Однако очень трудно добиться широкого применения коммерческого программного обеспечения при разработке конкретных проектов или регулировании работы уже смонтированных инженерных систем. Для проектировщиков и инженеров также затруднительно использовать вычислительное программное обеспечение, требующее высокой квалификации в области сложных процессов теплопереноса и конвективного теплообмена. Поэтому большинство исследователей в результате численного или натурального моделирования стремятся получить обобщенные аналитические зависимости, пригодные к использованию в рекомендациях по проектированию. Такие результаты получены, но их применение ограничено теми географическими и климатическими условиями, в которых проводились численные, натурные или лабораторные эксперименты. В частности, для районов Донбасса не разработаны достаточно полные методики проектирования систем отопления, учитывающие нестационарные теплопоступления, и нет соответствующего инженерного программного обеспечения. Отсутствуют отечественные исследования по совместной работе системы отопления, вентиляции и нестационарных бытовых теплопоступлений.

Все рассмотренные подходы к моделированию теплового режима помещения моделируют короткие временные интервалы, при этом учитывают стационарный тепловой режим вне помещения и нестационарный режим внутри помещения, или наоборот. Полноценный годовой режим работы помещения с учетом нестационарного режима как внутри, так и с наружи помещения, а также изменение во времени теплофизических параметров ограждающих конструкций не представляется возможным смоделировать на обычных персональных компьютерах в связи с ограниченностью их ресурсов. Таким образом, необходимо проведение дальнейших исследований по моделированию процессов теплообмена в учебных помещениях при их многолетней эксплуатации.

Список литературы

- ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях = Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 июля 2012 г. № 191-ст: взамен ГОСТ 30494-96: дата введения 01.01.2013 г. / разработан ОАО «СантехНИИпроект», ОАО «ЦНИИПромзданий». – Москва : Стандартинформ, 2013. 15 с. – Текст: непосредственный.
- Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К. Ф. Фокин, издание 4-е перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1973. – 287 с.
- Богословский, В. Н. Отопление и вентиляция / В. Н. Богословский, В. П. Щеглов. – Москва : Издательство литературы по строительству, 1970. – 303 с.
- Смирнов, Е. М. Метод конечных элементов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии / Е. М. Смирнов, Д. К. Зайцев. – Текст: электронный // Научно-технические ведомости. – 2004. – № 2.
- Hyojin, Kim. Characterizing Variations in the Indoor Temperature and Humidity of Guest Rooms with an Occupancy-Based Climate Control Technology / Hyojin Kim, Emily Oldham. – Текст: электронный // Energies 2020, 13, 1575.
- Gauvrit, Jordan. Uncertainty Propagation of Internal Heat Gains for Building Thermal Behaviour Assessment: Influence of Spatial Distribution / Jordan Gauvrit, Antoine Caucheteux, Stéphane Lecoecueche. – Текст: электронный // Proceedings of the 16th IBPSA Conference Rome, Italy, Sept. 2-4, 2019. 4706-4713 pp.
- Orlik-Kozdon, Bozena. Microclimate Conditions in Rooms: Their Impact on Mold Development in Buildings / Bozena Orlik-Kozdon. – Текст: электронный // Energies 2020, 13, 4492; doi:10.3390/en13174492
- Frolova, A. Determination of the amount of internal heat input in the office space / A. Frolova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 7, Tashkent, 11–14 ноября 2020 года. – Tashkent, 2021. – P. 012061. – DOI 10.1088/1757-899X/1030/1/012061.
- Krawczyk, D. A. Experimental verification of the CO2 and temperature model / Krawczyk D. A., Pukowski M. – Текст: электронный // International Journal of Ventilation, 19 (2), (2020) pp. 127-140.
- Бухмиров, В. В. Математическое моделирование микроклимата в помещении общественного здания / В. В. Бухмиров, М. В. Пророкова // Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности : сборник докладов II Международной 90-летию Заслуженного деятеля науки и техники РФ Юрия Гавриловича Ярошенко, Екатеринбург, 18–21 сентября 2017 года / Министерство образования и науки Российской Федерации; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий, Кафедра «Теплофизика и информатика в металлургии». – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2018. – С. 33-37. – EDN YVHIKC.
- Dzelzitis, E. Analysis of influence of nonstationary power of heating radiator on human comfort level / E. Dzelzitis, S. Sidenko // Engineering for Rural Development : 19, Jelgava, 20–22 мая 2020 года. – Jelgava, 2020. – P. 952-961. – DOI 10.22616/ERDev.2020.19.TF228. – EDN XLMUMF.
- Белоус, А. Н. Конструктивные принципы обеспечения энергоэффективности светопрозрачных ограждающих конструкций / А. Н. Белоус, Е. С. Колесник // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2011. – Т. 7. – № 4. – С. 243-250. – EDN NEOSJW.
- Богословский, В. Н. Тепловой режим здания / В. Н. Богословский, г. Москва: Стройиздат, 1979. – 248 с., ил.
- Белоус, А. Н. Сравнительный анализ методик определения теплопоступлений от учащихся в зданиях образовательных организаций / А. Н. Белоус, М. В. Оверченко // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – Т. 24. – № 4. – С. 153-164. – DOI 10.31675/1607-1859-2022-24-4-153-164. – EDN GCRIBJ.