СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

DOI 10.15593/2409-5125/2018.01.06

УДК 697.952 : 692.492

Т.С. Крашенинникова¹, А.В. Гришкова²

¹ООО НПФ «Металлимпресс»

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОТЫ АТРИУМА НА МИКРОКЛИМАТ ЗДАНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При проектировании и строительстве зданий с атриумами не полностью используется экологический и энергетический потенциал таких зданий. Проблема связана с недостаточным количеством данных, позволяющих максимально использовать естественную вентиляцию. Учеными разных стран предложен ряд методик по предварительной оценке эффективности работы естественной вентиляции при разработке проектов зданий с атриумами. Однако предложенные модели и методики не являются универсальными и при разработке проектов зданий требуются дополнительные исследования, на основании которых можно получить наиболее энергоэффективное техническое решение.

В статье рассматривается влияние высоты атриума на микроклимат здания. Приводится анализ результатов математического моделирования работы естественной вентиляции для здания с атриумом, имеющим наклонное и вертикальное остекление. В качестве инструмента для CFD моделирования использован коммерческий программный продукт FLUENT. Рассмотрено три варианта для офисного здания с атриумом: верх атриума расположен соответственно на 6; 4,5 и 3 м выше уровня крыши. Для расчета выбран летний период года, температура наружного воздуха 23,4 °С. Приведены результаты определения количества приточного и вытяжного воздуха, а также скорости воздуха в приточных и вытяжном отверстиях для каждого случая. На основе полученных результатов был сделан вывод об оптимальной высоте атриума для рассматриваемого здания. Полученные результаты могут иметь практическое применение при проектировании зданий с атриумами.

Ключевые слова: естественная вентиляция, вентиляция зданий с атриумом, программный продукт ANSYS FLUENT, высота атриума, численное моделирование естественной вентиляции.

Крашенинникова Т.С., Гришкова А.В. Исследование влияния высоты атриума на микроклимат здания с помощью математического моделирования // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2018. – № 1. – С. 86–99. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.01.06

Krashenninnikova T.S., Grishkova A.V. A study of the atrium height influence on the building microclimate using mathematical modeling. PNRPU. Applied ecology. Urban development. 2018. No. 1. Pp. 86-99. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.01.06

Введение. В настоящее время при проектировании новых или при реконструкции существующих и исторических зданий часто применяются атриумы с возможностью естественной вентиляции, что является признаком так называемого «пассивного дизайна» [1]. «Пассивный дизайн» подразумевает использование ориентации зданий, систем естественной вентиляции, тепловой инерции наружных ограждающих конструкций, внутренних теплопоступлений и солнечной энергии и т.д. для малозатратного отопления или охлаждения зданий. Атриумы, наряду с обеспечением связи между этажами, применяются как «буферные зоны» или «солнечные коллекторы». Они действуют как фильтр нежелательного воздействия окружающей среды, такого как дождь, снег, ветер и т.д., и сохраняют полезное воздействие таких факторов, как солнечный свет, свежий воздух и вид окружающих ландшафтов [2]. В то же время теплопоступления от солнечной радиации в атриумные пространства могут способствовать усилению гравитационного напора и обеспечить необходимую производительность естественной вентиляции в здании.

Несмотря на преимущества атриумов, существуют также и некоторые недостатки, которые вызывают высокое энергопотребление здания. Это слишком большие теплопоступления от солнечной радиации летом, теплопотери от больших остекленных поверхностей зимой и также стратификация воздуха, что негативно влияет на комфорт и работу атриума [3].

На сегодняшний день энергетический и экологический потенциал зданий с атриумами не исследован в полной мере. Часто наличие атриума в здании является роскошью с точки зрения его энергоэффективности, так как при проектировании атриум не рассматривается как элемент пассивного дизайна, и для обеспечения теплового комфорта в его пространстве требуется кондиционирование.

Хотя в последние десятилетия было проведено много исследований по естественной вентиляции в атриумах [3], но касающихся параметров проектирования атриумов по-прежнему мало. Из-за своей сложности и отсутствия точных измерительных инструментов прогнозирование тепловых характеристик в атриуме затруднено [4]. Поэтому всесторонние исследования различных конструкций зданий с атриумами способствует облегчению поиска эффективного применения естественной вентиляции для широкого диапазона зданий с целью повышения их энергоэффективности.

Как показано на рис. 1, а, естественная вентиляция в пространстве атриума базируется на эффекте тяги, которая возникает, когда температура внутреннего воздуха выше наружной температуры [5]. Для возникновения вентиляционной тяги необходимы три основных фактора: приточ-

ное отверстие, расположенное на более низком уровне, вытяжное отверстие, расположенное на более высоком уровне и источники тепла, создающие разницу температур между внутренней и наружной окружающей средой [3], при этом влияние ветра во внимание не принимается.

Рис. 1. Диаграмма, показывающая схему естественной вентиляции через атриум (а), распределение давлений в пространстве атриума (б) [6]

Как показано на рис. 1, б, из-за нагревания воздуха внутри здания, его плотность ниже, чем плотность воздуха снаружи. Следовательно, давление наружного воздуха выше, чем давление воздуха в помещении, что является условием для того, чтобы наружный воздух поступал в здание до тех пор, пока давление внутри и снаружи не выровняется, после чего наружный воздух начинает поступать на более низкий уровень, и воздух помещения начинает выходить из здания на более высоком уровне [6]. В связи с этим исследователи [7] считают, что увеличение температуры слоя теплого воздуха может способствовать усилению тяги за счет увеличения глубины слоя теплого воздуха, который аккумулируется в верхних зонах пространства. Однако последнее может быть вредным, поскольку увеличивается давление воздуха в верхней зоне и подогретый воздух начинает поступать в смежные пространства на верхних этажах, перегревая эти зоны [3].

Таким образом, при проектировании естественно вентилируемого атриума на его тепловые характеристики и на эффективность работы вентиляции оказывают влияние различные параметры. Поиск оптимальных геометрических характеристик атриума на стадии проектирования при заданных климатических условиях является одним из основных средств обеспечения его эффективной работы. Оценка характеристик атриума может быть произведена посредством физических измерений и математическим или численным моделированием.

На сегодняшний день проведено ряд исследований, посвященных поиску оптимальной геометрии атриума для различных условий [8, 9]. При помощи программного пакета DOE-2.1 смоделировано энергопотребление

атриумов разных форм в зависимости от разных климатических условий и типов остекления, а также при различных соотношениях длины и ширины [10]. Результаты показали, что энергопотребление узкого вытянутого атриума или прямоугольного атриума с большим отношением длины к ширине значительно больше, чем у атриума квадратной формы. В другом исследовании [11] применялись методы вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD) и тест на уменьшенной модели для разработки надежной схемы подбора размеров элементов естественной вентиляции в зданиях с атриумом на стадии предварительного проектирования. Было выявлено, что температура наружного воздуха оказывает более значительное воздействие на изменение температур в пространстве атриума, чем внутренние бытовые теплопоступления. Также отмечено, что расположение вытяжных отверстий, которые создают прямой вентиляционный поток, могут улучшить внутренний микроклимат. Размер вытяжных отверстий также влияет на распределение температур в атриумном пространстве.

Данные результаты имеют практическое применение при проектировании естественно вентилируемых атриумов. Например, важно при выборе стратегии вентиляции вновь проектируемого атриумного здания прежде всего проанализировать способность вентиляции обеспечивать комфортный микроклимат в здании естественным образом в зависимости от продолжительности периода с приемлемым с точки зрения теплового комфорта диапазоном наружных температур. Следующий шаг – это анализ конфигурации здания и максимизация эффективности работы вентиляции путем проектирования оптимальных геометрических характеристик. Наряду с формой атриума, размерами и расположением вентиляционных отверстий имеет значение высота здания.

Следует отметить, что согласно имеющимся исследованиям в высотных зданиях с увеличением высоты атриума эффективность работы естественной вентиляции не обязательно улучшается. Подобные выводы представлены в исследовании влияния размера атриума на работу естественной вентиляции девятиэтажного жилого здания с применением методик CFD [12]. Было выявлено, что с увеличением размера атриума в рассматриваемом высотном жилом здании повышалась и улучшалась производительность и эффективность работы естественной вентиляции. Но когда размер атриума достигал определенной величины, эффективность работы вентиляции переставала изменяться. В помещениях на нижнем уровне вентиляция улучшалась за счет эффекта тяги, в то время как помещения на более высоких уровнях страдали от отсутствия данного эффекта или от его слабого влияния. Данные выводы могут быть дополнены результатами другого исследования [13], в котором

при помощи методики CFD были смоделированы различные размеры атриумов прямоугольного сечения для высотных жилых зданий одной высоты. Выявлено, что при добавлении 1 м к высоте здания для обеспечения требуемого внутреннего теплового комфорта требуется увеличение размера атриума прямоугольного сечения на $0,043 \text{ м}^2$.

Помимо прочих геометрических параметров атриума, важное значение для обеспечения теплового комфорта имеет конструкция его крыши и то, насколько она выше кровли самого здания, наличие или отсутствие на ней остекления, а также остекление вертикальных конструкций атриума. Теплопоступления через остекленные стены и/или крышу могут оказывать существенное влияние на модель распределения воздушных потоков и температурных полей в атриумном пространстве. Солнечная радиация играет основную роль в создании градиента температур в атриумах, главным образом влияя на температуру крыши [14]. Также крыша атриума удерживает нагретый воздух перед тем, как он будет выброшен наружу, что может сказываться негативно на тепловом комфорте не только атриумного пространства, но и прилегающих помещений. Исследование [15] по оценке различных конструктивных решений крыши здания с атриумом показало, что оптимальная высота пространства между стеной здания и крышей атриума может значительно улучшить тепловые характеристики здания, в частности в рабочих зонах.

Как можно видеть, при проектировании зданий с атриумами степень влияния проектных переменных на микроклимат помещений разная для зданий и их элементов разных конфигураций, и на сегодняшний день не существует единого подхода к подбору геометрических параметров вентиляции в зданиях с атриумом, применимого ко всем типам их конфигураций. Несмотря на то, что целью многих исследований была попытка разработки некой единой методики, применимой для любого здания с атриумом, до сих пор не хватает информации о том, как различные параметры конструкции атриума влияют на тепловой режим и параметры микроклимата в конкретных случаях. Подобные данные все чаще востребованы и на практике, в условиях повышающихся требований к уровню теплового комфорта в современных зданиях.

В работе рассматривается моделирование с помощью CFD воздушного потока, индуцируемого тягой в трехэтажном офисном здании с атриумом, и степень влияния высоты атриума на микроклимат помещений здания.

Методология. Авторами уже проводилось исследование параметров микроклимата для офисного здания с естественно вентилируемым атриумом [16]. Для математического моделирования стационарного воздушного

потока и распределения температур был применен коммерческий программный пакет CFD FLUENT [17]. Для проведения настоящего исследования было взято здание с атриумом схожей с описанным в работе [16] структурой. Здание имеет открытые офисные пространства, на каждом из трех этажей объединенные в атриум с вертикальным и крышным остеклением. Атриумное пространство проектируется как «буферная зона» между микроклиматом офисной части и наружной окружающей средой, предполагается, что люди не пребывают здесь постоянно. При этом требования к тепловому комфорту в атриуме предполагаются менее жесткими, чем для офисных помещений, в которых находятся рабочие зоны. Рассматривались три случая расположения верха атриума по отношению к кровле здания:

1. Верх атриума расположен на 6 м выше кровли здания.
2. Верх атриума расположен на 4,5 м выше кровли здания.
3. Верх атриума расположен на 3 м выше кровли здания.

Перекрытия здания толщиной 0,3 м, остекление – 0,1 м. Для обеспечения более равномерного эффекта тяги на всех этажах здания вертикальный размер оконных проемов в наружной стене увеличивается с первого до третьего этажа и составляет соответственно 0,3; 0,4 и 0,5 м. Вертикальный размер отверстий во внутренних перегородках 0,5 м. Для решения задачи в двухмерной модели предполагается, что ширина здания достаточно большая. Температура наружного воздуха была принята 23,4 °С; теплопоступления от солнечной радиации на вертикальную поверхность остекления – 44 Вт/м², на наклонную – 40 Вт/м². Данные климатические параметры могут соответствовать как летнему, так и переходному периоду для различных районов России. Эквивалентные внутренние теплопоступления с площади пола офисов, рассматривающиеся в качестве унифицированного источника тепла на этажах здания, были приняты 43 Вт/м². Для упрощения задачи в расчет бралась только конвективная составляющая теплообмена, как наиболее влиятельная. Моделирование воздушного потока в здании производилось без учета влияния ветрового напора ввиду кратковременности и непостоянства данного фактора. Предполагалось, что проектируемое здание находится в городском районе с плотной застройкой, когда оно окружено высокими зданиями, и сила воздействия ветра не столь существенна.

В большинстве численных исследований гравитационной естественной вентиляции пространств или зданий главными объектами рассмотрения являются воздушный поток и качество результирующего микроклимата. В качестве расчетного домена при математическом моделировании рассматривается все внутреннее пространство здания [18].

В предыдущих исследованиях [11, 18] доказывалось, что гравитационный воздушный поток в помещениях здания с атриумом, как правило, ламинарный, но в нагреваемом солнцем атриумном пространстве может приобрести характеристики турбулентного. Для моделирования стационарного воздушного потока в данном исследовании применялась турбулентная модель RNG k-ε [19]. Ее сходимость при математическом моделировании не полностью турбулентных потоков была подтверждена различными исследованиями [18, 20].

Результаты и обсуждение. Результаты исследования параметров микроклимата при расположении атриума на 6 м выше кровли были приняты из [20]. Далее задача решалась для условий, когда верх атриума находится на 4,5 м и на 3 м выше кровли здания (рис. 2).

Рис. 2. Размеры исследуемого здания: *а* – верх атриума расположен на 6 м выше кровли здания; *б* – верх атриума расположен на 4,5 м выше кровли здания; *в* – верх атриума расположен на 3 м выше кровли здания

На рис. 3 представлено графическое распределение скоростей воздуха в здании, когда верх атриума расположен на 6,0; 4,5 и 3,0 м выше кровли. Общая модель поведения воздушных потоков в здании осталась схожей.

Рис. 3. Графическое распределение векторов скоростей: *а* – верх атриума расположен на 6 м выше кровли здания; *б* – верх атриума расположен на 4,5 м выше кровли здания; *в* – верх атриума расположен на 3 м выше кровли здания

Приточный воздух поступает непосредственно в рабочую зону (предполагается, что люди в офисном здании работают сидя), замещая собой загрязненный воздух. На каждом этаже скорость движения воздуха выше

в районе пола до верха приточных отверстий и составляет после прохождения приточного отверстия на первом этаже в случае рис. 3, *а* около 5 м/с, рис. 3, *б* – около 0,8 м/с, рис. 3, *в* – около 0,3–0,4 м/с, в то время как в остальном пространстве помещений средняя скорость движения воздуха около 0,1 м/с. Для приточного отверстия на нижнем этаже скорость приблизительно в два раза выше аналогичной скорости для верхнего этажа, что подтверждает выводы других исследователей [13] о степени распределения эффекта тяги на разных этажах здания. Сравнивая значения скоростей для разных вариантов расположения атриума относительно кровли, можно отметить, что с уменьшением высоты атриума значения скоростей заметно не изменяются, но в целом воздушный поток ослабляется при понижении высоты. К тому же поток воздуха с верхнего этажа немного изменяет свою траекторию в зоне атриума, что не является критичным, так как по условиям задачи не требуется обеспечения высокого уровня теплового комфорта в зоне, где нет постоянного пребывания людей.

Что касается микроклимата в рабочих зонах, то следует отметить, что интенсивное движение воздуха в рабочей зоне (скорость потока более 0,25 м/с) производит охлаждающий эффект, это желательно в летний период. Во избежание возможных сквозняков в рабочей зоне для такого случая предпочтительно располагать приточное отверстие на нижнем этаже ближе к потолку, либо, если применяется экстренная замещающая стратегия вентиляции, располагать ниже, практически в рабочей зоне. Полученные численные результаты исследования для вентиляционных отверстий приведены в таблице.

Вентиляционное отверстие	Высота атриума (от уровня кровли)					
	6 м		4,5 м		3 м	
	Массовый расход, кг/с	Средняя скорость, м/с	Массовый расход, кг/с	Средняя скорость, м/с	Массовый расход, кг/с	Средняя скорость, м/с
Приточное 1-го этажа	0,285	0,726	0,269	0,753	0,259	0,726
Приточное 2-го этажа	0,258	0,485	0,259	0,545	0,230	0,485
Приточное 3-го этажа	0,201	0,259	0,188	0,318	0,152	0,259
Вытяжное	–0,745	0,641	–0,716	0,692	–0,642	0,642
Невязка	–0,00215	0,451	–1,72e-05	0,502	–4,84e-05	0,451

По представленным результатам видно, что массовый расход воздуха, поступающего в здание, соответствует массовому расходу воздуха,

покидающего здание, и разница в значениях расходов незначительная, что объясняется достигнутой сходимостью полученных результатов.

Очевидно, что скорость воздуха в приточном отверстии 3-го этажа не обеспечивает требуемый воздухообмен на верхнем этаже. Это явление связано с наличием «тепловой подушки» в верхней зоне атриума. Таким образом, установка локальной механической системы вентиляции на верхнем этаже может быть возможным решением для улучшения микроклимата в этой зоне.

Для более наглядной оценки степени влияния понижения высоты атриума на изменение параметров воздуха в вентиляционных отверстиях результаты представлены графически на рис. 4.

Рис. 4. Изменение параметров воздуха в вентиляционных отверстиях:
а – массовый расход воздуха, кг/с; б – средняя скорость воздуха, м/с

Как можно видеть, при понижении высоты атриума до 4,5 м над уровнем кровли скорости во всех приточных отверстиях незначительно возрастают, но при дальнейшем понижении до 3 м снова снижаются. В то же время массовый расход воздуха через приточные отверстия понижается с уменьшением высоты атриума. Однако при высоте 4,5 м массовые расходы воздуха в приточных отверстиях на 1-м и 2-м этажах практически одинаковы. Следовательно, наблюдается позитивное влияние теплопоступлений от солнечной радиации на эффект тяги. При оптимальной высоте атриума 4,5 м выше кровли наблюдается наиболее сбалансированная вентиляция в большинстве зон здания с обеспечением требуемого воздухообмена в рабочих зонах, за исключением верхнего этажа.

На рис. 5 представлено распределение изотерм для рассматриваемого здания при различных значениях высоты атриума.

Рис. 5. Распределение температуры в здании с атриумом, расположенным на 6; 4,5 и 3 м выше кровли (соответственно *а*, *б*, *в*)

Как видно на рис. 5, после снижения высоты атриума общее распределение температур воздуха в здании изменилось незначительно. Однако по сравнению со случаем *а* в вариантах *б* и *в* площадь зон с более низкими температурами на верхнем этаже значительно уменьшилась. В случае *в* распределение более низких температур на 1-м и 2-м этажах стало более устойчивым по сравнению с предыдущими вариантами. Наиболее высокие значения температур все еще располагаются в зоне атриума, хотя средняя температура в этой зоне более близка к температуре на верхнем этаже, но пространство атриума в районе нижнего этажа перегрето во всех случаях. По условиям задачи атриум является «буферной зоной» и в нем не требуется обеспечение того же уровня теплового комфорта, как в рабочих зонах. Тем не менее для более эффективной вентиляции нижней зоны атриума там может быть рекомендовано еще одно приточное отверстие. Самые высокие температуры возникают в воздушном потоке около вытяжного отверстия из-за его близкого расположения к кровле атриума, которая воспринимает теплопоступления от солнечной радиации. Таким образом, естественное давление действует удовлетворительно для 1-го и 2-го этажей при высоте атриума 6; 4,5 и 3 м выше кровли (при высоте 3 м распределение температуры на нижних этажах даже лучше, чем при высоте 6 м), в то время как микроклимат на верхнем этаже стал еще более некомфортным после снижения высоты атриума. Несмотря на то, что воздух движется вдоль этажа, его температура повышается и качество воздуха рабочей зоны снижается по мере его распространения по помещению.

Таким образом, по результатам исследования можно сделать вывод о том, что понижение высоты атриума способствует ухудшению и без того неудовлетворительного микроклимата в помещениях верхних этажей здания. Однако при высоте атриума на 4,5 м выше кровли наблюдается наиболее сбалансированный уровень общего теплового комфорта в здании, за счет оптимального влияния теплопоступлений от солнечной радиации через крышу атриума на эффект тяги.

Заключение. Анализ микроклимата здания был выполнен с использованием методики CFD (программный пакет ANSYS FLUENT). Результаты моделирования позволили получить выводы об удовлетворительной работе системы естественной вентиляции в здании с атриумом, а также определить скорости воздуха в приточных отверстиях с целью оптимизации их положения при проектировании здания.

Исследование влияния высоты атриума на микроклимат было проведено для трех вариантов расположения атриума относительно кровли здания. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что требуемый микроклимат во всех зонах здания обеспечивается значительной разницей отметок в расположении приточных и вытяжных отверстий.

При расположении атриума на 6 м выше кровли распределение скоростей движения воздуха и температур удовлетворительны на всех этажах здания, кроме верхнего. Однако также наблюдается ощутимый перегрев воздуха в нижней зоне атриумного пространства.

Для случая, когда атриум расположен на 4,5 м выше крыши здания, наблюдается наиболее сбалансированный уровень общего теплового комфорта в здании, так как при данной высоте возникает оптимальное усиление эффекта тяги за счет теплопоступлений от солнечной радиации через остекление атриума. Это подтверждается возрастанием скоростей в приточных отверстиях на всех этажах. В данном случае также наблюдается наименее значительный перегрев нижней зоны атриума.

Дальнейшее снижение высоты атриума до уровня кровли здания все еще обеспечивает увеличение разности давлений внутреннего и наружного воздуха для 1-го и 2-го этажей. В случае, когда атриум на 3 м выше кровли здания, распределение температуры на обоих этажах даже лучше, чем когда атриум выше кровли на 6 м. Тем не менее атриумное пространство остается значительно перегретым и тепловой комфорт на верхнем этаже наихудший из рассматриваемых вариантов.

В целом полученные результаты могут иметь практическое применение при проектировании зданий с атриумами. Для дальнейших исследований можно рекомендовать моделирование воздушных потоков в рассматриваемом атриумном здании при расположении дополнительного приточного отверстия в нижней части атриума. В случае, если высота атриума недостаточна, для обеспечения оптимальных параметров микроклимата во всем объеме здания можно рекомендовать установку локальной механической системы вытяжной вентиляции на верхнем этаже.

Библиографический список

1. Saxon R. Atrium Buildings Development and Design. – 2nd ed. – London, The Architectural Press, 1986. – 182 p.
2. Rong Li, Adrian Pitts. School of Architecture. University of Sheffield, Sheffield S10 2TN, UK. PLEA2006 // The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture. – Geneva, Switzerland, 2006.
3. Thermal performance of atria: An overview of natural ventilation effective designs. Leila Moosavin, Norhayati Mahyuddin, Norafida Ab Ghafar, Muhammad Azzam Ismail / Urban Conservation and Tropical Architecture (UCTA) / Faculty of Built Environment, University Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia// Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – No. 34. – P. 654–670.
4. Laouadi A., Atif M.R. Comparison between computed and field measured thermal parameters in an atrium building // Build Environ. – 1998. – No. 34. – P. 129–138.
5. Khan N., Su Y., Riffat S.B. A review on wind driven ventilation techniques // Energy Build. – 2008. – No. 40. – P. 1586–604.
6. ASHRAE Handbook – Fundamentals. – Atlanta: GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers(ASHRAE), 2001. – 859 p.
7. Holford J.M., Hunt G.R. Fundamental atrium design for natural ventilation // Build Environ. – 2003. – No. 38. – P. 409–426.
8. Acred A., Hunt G.R. Stack ventilation in multi-stores atrium buildings: a dimensionless design approach // Build Environ. – 2014. – No. 72. – P. 44–52.
9. Role of atrium geometry in building energy consumption: The case of a fully air-conditioned enclosed atrium in cold climates, China / L. Wang, Q. Huang, Q. Zhang, H. Xu, K.K.Y. Richard // Energy Build. – 2017. – No. 151. – P. 228–241.
10. Aldawoud A. The Influence of the Atrium Geometry on the Building Energy Performance // Energy Build. – 2012. – No. 57. – P. 1–5.
11. Evaluation of buoyancy-driven ventilation in atrium buildings using computational fluid dynamics and reduced-scale air model / Liu P.-C., Lin H.-T., Chou J.-H. // Build Environ. – 2009. – No. 44. – P. 1970–1979.
12. Effect of atrium size on thermal buoyancy-driven ventilation of high-rise residential buildings: a CFD study / Zhang Minhui, Li Nianping, Zhang Enxiang, [et al.] // Proceedings of the 6th international symposium on heating, ventilating and air conditioning. – Nanjing, Peoples R. China, 2009. – P. 1240–1247.
13. Effect of atrium configuration characteristic on buoyancy-driven ventilation of high-rise residential buildings / Li Nianping, Zhang Minhui, Hou Sujuan, He Dongyue, Li Jing // J. Guangzhou Univ. (Nat Sci Ed). – 2010. No. 3. – P. 15.
14. The temperature stratification measurement and simulation in atrium of Wuhan Station / C. Li, J. Zhang, Z. Zhang, Q. Ji // Proceedings of the 2011 IEEE international conference on multimedia technology (ICMT). – Hangzhou, China, 2011. – P. 4240–4243.
15. Abdullah A.H., Wang F. Design and low energy ventilation solutions for atria in the tropics // Sustain Cities Soc. – 2012. – No. 2. – P. 8–28.
16. Крашенинникова Т.С., Гришкова А.В. Анализ параметров микроклимата в здании с атриумом в заданных климатических условиях с использованием программы ANSYS FLUENT // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2016. – № 4 (24). – С. 46–61.
17. FLUENT User's Guide. – Fluent Inc, New Hampshire, USA, 2005.
18. CFD modelling of natural displacement ventilation in an enclosure connected to an atrium / Y. Ji, M. Cook, V. Hanby // Building and Environment. – 2007. – No. 42 (3). – P. 1158–1172.
19. Yakhot V., Orszag S.A. Renormalization group analysis of turbulence: I. basic theory // Journal of Scientific Computing. – 1986. – Vol. 1, no. 1. – P. 1–51.
20. Etheridge D., Sandberg M. Building ventilation: theory and measurement. – England: John Wiley & Sons Ltd., 1996. – 754 p.

References

1. Saxon R. Atrium Buildings Development and Design. – 2nd ed. – London, The Architectural Press, – 1986. – 182 p.
2. Rong Li, Adrian Pitts. School of Architecture. University of Sheffield, Sheffield S10 2TN, UK. PLEA2006 // The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture. – Geneva, Switzerland, 2006.

3. Thermal performance of atria: An overview of natural ventilation effective designs. Leila Moosavin, Norhayati Mahyuddin, Norafida Ab Ghafar, Muhammad Azzam Ismail / Urban Conservation and Tropical Architecture (UCTA) / Faculty of Built Environment, University Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – No. 34. – P. 654–670.
4. Laouadi A., Atif M.R. Comparison between computed and field measured thermal parameters in an atrium building // *Build Environ*. – 1998. – No. 34. – P. 129–138.
5. Khan N., Su Y., Riffat S.B. A review on wind driven ventilation techniques // *Energy Build*. – 2008. – No. 40. – P. 1586–604.
6. ASHRAE Handbook – Fundamentals. – Atlanta: GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 2001. – 859 p.
7. Holford J.M., Hunt G.R. Fundamental atrium design for natural ventilation // *Build Environ*. – 2003. – No. 38. – P. 409–426.
8. Acred A., Hunt G.R. Stack ventilation in multi-stores atrium buildings: a dimensionless design approach // *Build Environ*. – 2014. – No. 72. – P. 44–52.
9. Role of atrium geometry in building energy consumption: The case of a fully air-conditioned enclosed atrium in cold climates, China / L. Wang, Q. Huang, Q. Zhang, H. Xu, K.K.Y. Richard // *Energy Build*. – 2017. – No. 151. – P. 228–241.
10. Aldawoud A. The Influence of the Atrium Geometry on the Building Energy Performance // *Energy Build*. – 2012. – No. 57. – P. 1–5.
11. Evaluation of buoyancy-driven ventilation in atrium buildings using computational fluid dynamics and reduced-scale air model / Liu P.-C., Lin H.-T., Chou J.-H. // *Build Environ*. – 2009. – No. 44. – P. 1970–1979.
12. Effect of atrium size on thermal buoyancy-driven ventilation of high-rise residential buildings: a CFD study / Zhang Minhui, Li Nianping, Zhang Enxiang, [et al.] // *Proceedings of the 6th international symposium on heating, ventilating and air conditioning*. – Nanjing, Peoples R. China, 2009. – P. 1240–1247.
13. Effect of atrium configuration characteristic on buoyancy-driven ventilation of high-rise residential buildings / Li Nianping, Zhang Minhui, Hou Sujuan, He Dongyue, Li Jing // *J. Guangzhou Univ. (Nat Sci Ed)*. – 2010. No. 3. – P. 15.
14. The temperature stratification measurement and simulation in atrium of Wuhan Station / C. Li, J. Zhang, Z. Zhang, Q. Ji // *Proceedings of the 2011 IEEE international conference on multimedia technology (ICMT)*. – Hangzhou, China; 2011. – P. 4240–4243.
15. Abdullah A.H., Wang F. Design and low energy ventilation solutions for atria in the tropics // *Sustain Cities Soc*. – 2012. No. 2. – P. 8–28.
16. Krashennnikova T.S., Grishkova A.V. Analiz parametrov mikroklimata v zdanii s atriumom v zadannyh klimaticheskikh usloviyakh s ispol'zovaniem programmy ANSYS FLUENT [Analysis of thermal environment in the atrium building under given conditions using the ansys fluent software]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya jekologiya. Urbanistika*, 2016, no. 4 (24), pp. 46–61.
17. FLUENT User's Guide. – Fluent Inc, New Hampshire, USA, 2005.
18. CFD modelling of natural displacement ventilation in an enclosure connected to an atrium / Y. Ji, M. Cook, V. Hanby // *Building and Environment*. – 2007. – No. 42 (3). – P. 1158–1172.
19. Yakhot V., Orszag S.A. Renormalization group analysis of turbulence: I. basic theory // *Journal of Scientific Computing*. – 1986. – Vol. 1, no. 1. – P. 1–51.
20. Etheridge D, Sandberg M. Building ventilation: theory and measurement. – England: John Wiley & Sons Ltd., 1996. – 754 p.

Получено 17.10.2017

T. Krasheninnikova, A. Grishkova

A STUDY OF THE ATRIUM HEIGHT INFLUENCE ON THE BUILDING MICROCLIMATE USING MATHEMATICAL MODELING

Buildings incorporated with atria are often designed and built without sufficient consideration of their sustainability potential. There is a lack of data about proper implementation of natural ventilation in different cases. A number of methods for preliminary assessment of the efficiency of natural ventilation in atrium buildings design have been developed by different researchers. However, it is still hard to predict thermal performance in atria, and additional studies are required for different atria buildings in order to get the most energy efficient design solution.

In this paper the effect of the atrium height on building microclimate is investigated. The analysis of numerical modeling results of natural ventilation's operation in buildings with sloped and vertical glazing atrium is represented. FLUENT commercial CFD software was used for simulation. Three cases have been considered for an office atrium building with the top of the atrium located 6m, 4.5m and 3m above the roof. The calculations have been provided for the summer period with an external air temperature of 23.4 °C. The results for mass flow rate of fresh and exhaust air along with inlets and outlet air velocity are presented for each case. An optimum atrium height is determined based on the analysis results. It is also highlighted that the obtained findings can be applicable in atrium buildings' design.

Keywords: natural ventilation, ventilation of buildings incorporated with atria, ANSYS FLUENT, atrium height, numerical modeling of natural ventilation.

Крашенинникова Татьяна Сергеевна (Краснодар, Россия) – инженер ООО НПФ «Металлимпресс» (350037, г. Краснодар, ул. Ленина, 45, e-mail: simastf@rambler.ru).

Гришкова Алла Викторовна (Пермь, Россия) – канд. техн. наук, доцент кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и водоснабжения, водоотведения, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: alla-grishkova@yandex.ru).

Krasheninnikova Tatiana (Krasnodar, Russian Federation) – Engineer of research and production firm "Metallimpress" (350037, Krasnodar, Lenina str., 45, e-mail: simastf@rambler.ru).

Grishkova Alla (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of Department of heat and gas supply, ventilation, water supply and sewerage (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: alla-grishkova@yandex.ru).