

Моделирование тепло-ветрового режима городской улицы в г. Ханое

Ле Минь Туан, И.С. Шукуров

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из основных задач архитектуры и градостроительства является создание максимально оптимальных, комфортных и безопасных условий для жизни, работы и отдыха людей. Эта задача не может быть решена без учета тепло-ветровых факторов городской среды, ответственных за ветровую нагрузку, аэрационный и тепловой режимы города. Качество тепловой среды в районах с высокой плотностью застройки зависит от местного климата и характеристик городского дизайна. Особенность городского климата часто связана с явлением городского острова тепла (ГОТ), которое характеризуется более высокой температурой в городской местности по сравнению с сельскими территориями. Моделирование городского тепло-ветрового режима проводилось для оценки температуры и скорости воздуха городских улиц г. Ханоя.

Материалы и методы. Вычислительная гидродинамика (CFD) использует численные методы для решения уравнений управления механикой жидкости с помощью компьютера для прогнозирования поля потока. Применена версия ANSYS 19.1 программного комплекса FLUENT для моделирования анализа городских уличных тепловых сред. Проведен ряд экспериментов на городских улицах, размещенных в городской местности Чунг Хоа-Нхан Чинь в районе Тхань Суан (г. Ханой).

Результаты. Наиболее высокие температуры наблюдались на юго-восточной стороне зданий. Таким образом, снижение плотности застройки и сохранение расстояния между зданиями будет способствовать движению ветра и охлаждению городских улиц.

Выводы. Наибольший вклад в работу вносит использование микрометеостанции. Анализ оценки окружающих зданий, озеленение и проектирование теневых зон можно рекомендовать в качестве мероприятий по улучшению теплового комфорта улиц.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микроклимат, городской остров тепла, городской ветер, озеленение, городское планирование, тепловой комфорт, городская тепловая среда

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ле Минь Туан, Шукуров И.С. Моделирование тепло-ветрового режима городской улицы в г. Ханое // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 3. С. 368–379. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.368-379

Computational fluid dynamics analysis for thermal-wind environment simulation of urban street in Hanoi city

Le Minh Tuan, Ikhomzhon S. Shukurov

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. One of the most important tasks in architecture and urban planning is to create the most optimal, comfortable and safe environment for human's live, work and leisure. This issue cannot be solved without taking into account the environment factor such as temperature and wind in a city. Modeling of the urban thermal-wind regime has been carried out to assess the temperature and air speed of the city streets of Hanoi.

Materials and methods. Computational Fluid Dynamics (CFD) uses numerical methods to solve fluid mechanics equations by using a computer model to predict flow fields. In this study, author has used ANSYS 19.1 of the FLUENT software package to conduct the model analysis of urban street thermal environments. The study conducted a series of experimental procedures in urban street alleys that were oriented towards placement in the urban area of Trung Hoa Nhan Chinh in the Thanh Xuan district, Hanoi cit.

Results. The highest temperatures were observed around the southeast side of the buildings in the urban area of Trung Hoa Nhan Chinh. Thus, a decrease in building density and maintaining the distance between buildings will contribute to the movement of the wind to cool city streets.

Conclusions. The greatest contribution to the work has been created by using a micro-weather station. Analysis of the assessment of the surrounding buildings, landscaping, shade and human activities can recommend measurable improvement the thermal comfort of the streets.

KEYWORDS: microclimate, urban heat island, urban wind, landscape, urban planning, thermal comfort, urban thermal environment

FOR CITATION: Le Minh Tuan, Shukurov I.S. Computational fluid dynamics analysis for thermal-wind environment simulation of urban street in Hanoi city. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(3): 368-379. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.368-379 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Ханой урбанизируется с каждым годом все быстрее. Общая численность населения значительно возросла с 2685 тыс. (1999 г.) до 7328 тыс. человек (2016 г.), увеличившись на 4643 тыс. человек за 17 лет, при этом темпы роста составили в среднем 273 тыс. человек в год. Процесс урбанизации связан с экономическим развитием Ханоя. В результате интенсивного освоения территории и активного использования энергетических ресурсов городская температура в Ханое повышается. Наблюдения за эффектом островов городского тепла показали, что высокие температуры в городах значительно влияют на жизнь людей.

В настоящее время в мире популярен метод исследования эффекта теплового острова, включающий фиксированные данные метеостанции [1], с использованием мобильных методов наблюдения [1, 2] и метода анализа изображений дистанционного зондирования в качестве основного инструмента для измерения [3]. Эти исследования направлены на изучение изменений температуры в городе и не рассматривают комфортные условия для человека.

Вычислительный гидродинамический анализ (Computational Fluid Dynamics — CFD) позволяет проводить сравнительный анализ эффектов городского острова тепла (ГОТ) на основе различных сценариев. Многие исследователи широко использовали вычислительный гидродинамический анализ для изучения ветровых течений [4] и влияния естественного проветривания [5, 6].

На развитие ГОТ влияют несколько факторов: искусственная температура, влажность; загрязняющие вещества и непроницаемые поверхности, снижающие испарение и альбедо, что определяет поглощение и отражение солнечного излучения поверхностями; а также тепловое излучение в зданиях [7]. Высокие проценты альбедо поверхности асфальта и фасадов зданий приводят к высоким дневным температурам поверхности [8]. Проанализирована взаимосвязь между эффектом теплового острова и основой городской планировки. Изучены показатели, обеспечивающие тепловой комфорт наряду с технологией уменьшения температуры [9, 10]. Отражающая способность здания и структуры го-

родского покрытия представляет собой важную энергетическую особенность, позволяющую сократить эффект ГОТ в летнее время [11–13].

Исследования городской тепловой среды направлены на изучение взаимосвязи между эффектом ГОТ и факторами города в виде неба [14]. Исследования подтвердили, что растительность является формой покрывающего материала, который можно использовать для снижения температуры [15]. Растительность считается стратегическим ресурсом городского климат-контроля в субтропических городах [16].

Чтобы проанализировать взаимосвязь между геометрией улиц и тепловой средой в городах, нами исследованы и собраны данные, полученные с использованием портативных термометров и инструментов вычислительной гидродинамики (CFD).

Номенклатура

C_p — удельная теплоемкость воздуха при 300 (Дж/кг·К);

Fr — число Фруда;

I_g — солнечное излучение (Вт/м²);

H — высота уличного каньона (м);

H/B — соотношение сторон (высоты и ширины) улиц;

k — турбулентная кинетическая энергия (м²/с²);

K — константа фон Кармана;

q^* — чистый поток всех волн (Вт/м²);

q_F — антропогенный тепловой поток (Вт/м²);

q_H — турбулентные потоки осязаемого тепла (Вт/м²);

q_E — турбулентные потоки скрытого тепла (Вт/м²);

T — температура воздуха, °С;

U — интенсивность скорости воздуха (м/с);

U^* — скорость трения (м/с);

z — высота от земли (м);

Z_0 — шкала длины неровностей притока (м);

α — поглощение солнечного излучения;

δ — глубина пограничного слоя атмосферы (м);

ε — скорость рассеяния турбулентности (м²/с²);

Δq_s — чистое поглощение или выделение энергии при осязаемых тепловых изменениях (Вт/м²);

Δq_A — чистый горизонтальный адвентивный тепловой поток (Вт/м²);

ΔT_{u-r} — разница температур между городом и загородным, °С;

μ — динамическая вязкость (кг/м·с);
 Ψ_0 — фактор тени;
 Ψ_s — фактор обзора неба;
 Ψ_m — интегрированная функция устойчивости для импульса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Форма городской улицы

Форма городской улицы обычно описывается соотношением H/B , где H — высота, а B — ширина улицы. Улицы можно классифицировать как регулярные, когда отношение $H/B = 1,0$; бульварными при отношении $H/B = 0,5$ и ниже; репрезентативными, если $H/B = 2,0$ и выше. Длина улицы L представляет собой расстояние между двумя главными перекрестками. Данное соотношение можно классифицировать как короткие — при $L/H < 3$; средние — при $L/H < 7$ и длинные — при $L/H > 7$.

В случае перпендикулярного потока воздушный поток улицы характеризуется ростом одного или нескольких вихрей. Отношение H/B в диапазоне от 0,65 до 1,6 создает один вихрь, в то время как более высокое H/B отношение вызывает развитие множества вихрей [17, 18].

Режим воздушного потока в улице определяется плавающим эффектом для скоростей ветра ниже 2,0 и 3,0 м/с [19]. Надежным параметром, часто используемым для описания баланса между силой инерции и плавающей силой, является число Фруда (Fr). Число Фруда близко к единице, которая указывает на преобразование между двухстрочными режимами, поскольку оно зависит как от температуры фасада стены, так и от скорости ветра [19]. Городская форма в основном влияет на режим воздушного потока в улицах, а не на климат пограничного слоя [20].

Городской остров тепла

Развитие городского теплового острова связано с энергетическим балансом урбанизированной территории. В частности, наиболее релевантными являются размер и расстояние зданий, городская геометрия, расчет излучения городских материалов, солнечная радиация, а также тепловое излучение. Городской энергетический баланс определяется [21]:

$$q^* + q_F = q_H + q_E + \Delta q_s + \Delta q_A, \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \quad (1)$$

где q^* — общее излучение; q_F — общее количество искусственного тепла от тепла, выделяемого при сгорании топлива; q_H и q_E — хаотический и скрытый тепловой поток соответственно; Δq_s — поглощение или выделение энергии при разумном изменении тепла в вероятности попадания воздуха на городскую поверхность почвы; Δq_A — общее прямое излучение тепла.

Экспериментальные исследования показали, что температура поверхности городских улиц в дневное время достигает отметки в 20 °С, что сравнивается с температурой поверхности на высоте строительной площадки [22, 23].

Ночью воздух в городских центрах обычно теплее, чем воздух в сельских районах, поэтому остров тепла города определяет разницу температур между городом и загородными территориями (ΔT_{u-r}), которая появляется за счет разницы в энергетическом балансе.

В книге климата пограничного слоя (Т.Р. Оке) были упомянуты две эмпирические зависимости между интенсивностью ГОТ и отношением высоты здания и расстояния H/B или функцией элемента неба [21]:

$$\Delta T_{u-r} = 7,54 + 3,97 \cdot \ln\left(\frac{H}{B}\right); \quad (2)$$

$$\Delta T_{u-r} = 15,27 - 13,88 \cdot \Psi_s; \quad (3)$$

$$\Psi_s = \cos\left(a \tan\left(\frac{2H}{B}\right)\right). \quad (4)$$

Описание метода вычислительного гидродинамического анализа CFD

Вычислительная гидродинамика CFD является сферой, которая стремительно развивалась с 1960-х годов и добилась значительных результатов за последние 50 лет. CFD использует численные методы для решения уравнений управления механикой жидкости с помощью компьютера для прогнозирования поля потока. В этом исследовании была применена версия ANSYS 19.1 программного комплекса FLUENT для моделирования анализа городских уличных тепловых сред, а также данных теплового комфорта с использованием измеренных экологических данных для сравнения. С помощью моделирования вычислительного гидродинамического анализа CFD, как ожидается, будет определен предлагаемый план по улучшению уличной среды и потенциальные выгоды.

Текущий поток внутри городской аллеи был рассчитан путем решения двумерных уравнений стационарного состояния Рейнольдса усредненного Навье — Стокса (RANS) с помощью FLUENT-кода. В стационарной модели RANS свойства тока разделяются на их среднюю и осциллирующую составляющие путем разделения Рейнольдса.

Исходный код FLUENT предоставляет несколько диаграмм турбулентности, включая модель $k-\omega$ и множество ее вариантов, а также модель возмущений напряжения Рейнольдса [24]. В области течения и теплового слоя изучается картина турбулентности $k-\epsilon$. Согласно модели возмущений, напряжение Рейнольдса изотропно и поэтому доста-

точно учесть два дополнительных уравнения: одно для кинетической энергии и одно для скорости диссипации ϵ .

Исходный код FLUENT позволяет при расчете чистого излучения установить солнечную модель на основе положения на поверхности земли (широте и долготе), направлении модели (северном), времени дня, сезоне и условиях, установленных для ясной или облачной погоды. Чтобы решить эту проблему, давление основано на простом алгоритме, который представляет собой соотношение между скоростью и коррекцией давления для обеспечения сохранения объема и получения используемых областей давления. Однако в изученной аллее и термическом слое стандартной моделью возмущений $k-\epsilon$ является часто используемая модель.

В исследовании от 19 октября 2018 г. для сбора данных о температуре и ветре городской местности Чунг Хоа-Нхан Чинь применялось мобильное климатическое измерительное устройство с использованием данных моделирования вычислительного гидродинамического анализа CFD для анализа улиц и данных измерения температуры окружающей среды, можно предложить эффективный подход к уменьшению явлений ГОТ.

Тепловой комфорт — это форма субъективной оценки температуры окружающей среды, влажности, скорости ветра, средней радиационной температуры, деятельности человека, одежды и других факторов. В целом в этом исследовании фактические данные измерений включали много разных категорий. Индекс теплового комфорта, подлежащий оценке, был окончательно проанализирован по факторам окружающей среды городских улиц, чтобы уточнить состав городских улиц и тепловой комфорт.

Территория исследования

Город Ханой (21 0278 ° с. ш., 105 8342 ° в. д.) — один из крупнейших городов Вьетнама, расположенный на сложной местности, спускающейся с севера на юг и с запада на восток, из которой на дельту приходится 75 % города. На природной территории средняя высота Ханоя составляет 5–20 м над уровнем моря, поэтому климатические условия характеризуются жарким, влажным летом и холодной зимой. Среднегодовая температура составляет 24,5–25,3 °С, годовое количество осадков около 263,7 мм. В этом исследовании был проведен ряд экспериментальных процедур в городских переулках, которые были ориентированы на размещение в городской местности Чунг Хоа-Нхан Чинь в районе Тхань Суан, г. Ханой. Центр города состоит из асфальтированных улиц, а фасад здания выполнен из бетона, обычно покрытого штукатуркой или кирпичом.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Настройка модели

В данном исследовании используется гидродинамика, рассчитанная с помощью программного комплекса Fluent Fluid Flow от ANSYS 19.1. В ANSYS 19.1 вычислительная гидродинамика выполняется в конечных полях, соответствующие параметры задаются в эталонном наборе, и результаты моделирования легче ориентировать на стационарное состояние. Поэтому процесс работы программного обеспечения должен сначала создать 3D-модель опорного поля в области моделирования. Для поддержания эффективности модельных расчетов разработанная для данного исследования модель упрощает модель зданий с одинаковым количеством этажей.

Сетка настроек

Моделирование вычислительного гидродинамического анализа CFD основано на теории «сетки». При заполнении модели улицы очень важен метод настройки сетки. Он включает форму, размер, плотность и тонкость сетки, а также ряд других параметров. Сетка может быть смоделирована разными способами в соответствии с реальной ситуацией [25]. В целом использование шестигранных блоков в качестве узлов зацепления может быть достигнуто с помощью моделирования вычислительного гидродинамического анализа CFD для моделирования во многих случаях. Для получения наиболее точных результатов моделирования, поскольку производительность процессора и данные могут сходиться в устойчивом состоянии, тетраэдрическое зацепление является наиболее эффективным методом для этого исследования (рис. 1).

Установка условий

Для определения взаимосвязи между уличным теплом и комфортом в работе используются данные, связанные с факторами окружающей среды, и с помощью мобильного климатического счетчика измеряется степень благоприятности. В настоящем исследовании метеорологические данные, полученные 19 октября 2012 г., были использованы в качестве базового условия для моделирования вычислительного гидродинамического анализа CFD.

Ветровой режим

В ходе исследования данные о суточном направлении ветра были взяты за основу поля ветра. Они показывают, что преобладающее направление ветра юго-восточное.

Антропогенное тепло

Было проведено несколько имитаций моделирования вычислительного гидродинамического анализа CFD для оценки теплопередачи, в которой расчетная модель имеет следующие параметры: от-

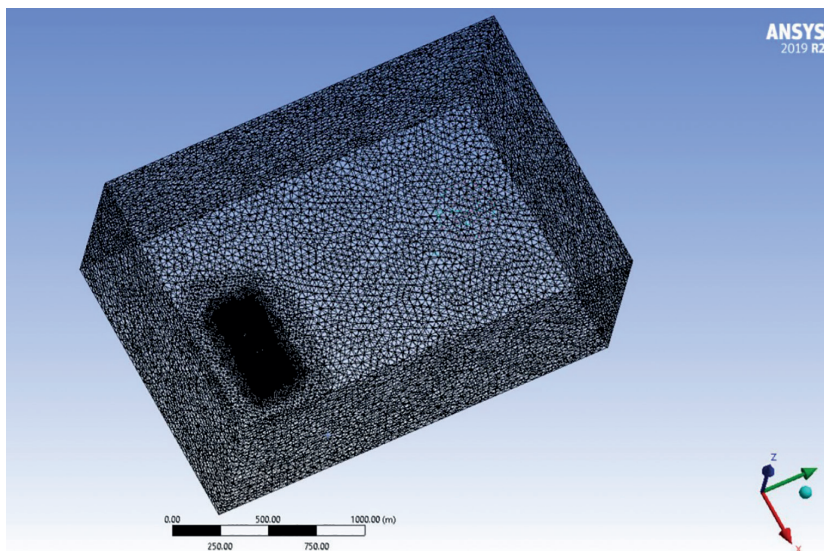


Рис. 1. Имитационная вычислительная сетка

Fig. 1. Imitative computational mesh

ношение $H/B = 7$ и $L/B = 33$; ширина и высота самого большого здания — 62 м; ширина улицы — 15 м; а длина улицы — 492 м (рис. 2). На земле была смоделирована установка следующих параметров: плотность — 1000 кг/м^3 ; удельная теплоемкость — $1000 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$; теплопроводность — $2 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; коэффициент излучения — $0,9$; поглощение солнечного излучения (прямое видимое и инфракрасное) — $0,8$. Стены здания имеют: удельная теплоемкость — $1000 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$; теплопроводность — $0,15 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; толщина — $0,30 \text{ м}$; коэффициент излучения — $0,9$; поглощение солнечного излучения (прямое видимое и инфракрасное) — $0,8$.

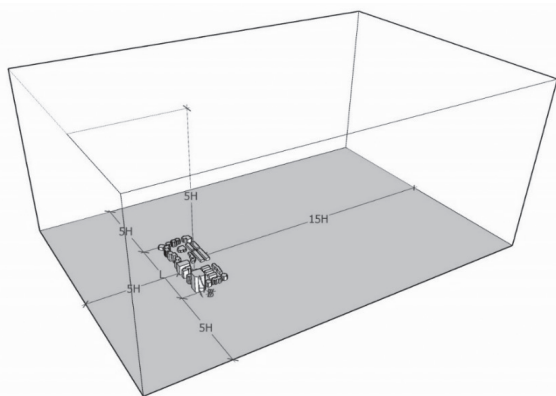


Рис. 2. Домен расчета

Fig. 2. Computational domain

Режим расчета

Моделирование вычислительного гидродинамического анализа CFD классифицируется на три категории на основе следующих режимов расчета:

- прямое численное моделирование (Direct Numerical Simulation — DNS);

- моделирование больших вихрей (Large eddy Simulation — LES);
- Рейнольдс усредненное моделирование Навье — Стокса (RANS).

Теоретически метод DNS может правильно имитировать поле потока, но требуются все вихревые токи. Метод LES может вычислять большой и маленький вихри, но не может работать на одной маленькой платформе. Поэтому мы использовали метод RANS для расчета глобального среднего значения с помощью широко используемой модели турбулентности $k-\epsilon$.

Из-за его почти бесконечного вихревого движения и нелинейной математики турбулентное движение очень затруднено. В результате при создании связанной модели микрокосмическая модель, которая учитывает вихревую вязкость и напряжение Рейнольдса, устанавливается в трехмерном пространстве на основе среднего свойства. Модель можно разделить по количеству дифференциальных уравнений: ноль, одно уравнение, два уравнения и модель с несколькими уравнениями. Модель турбулентности $k-\epsilon$, предложенная Launder и Spalding в 1972 г., получена из большого числа экспериментальных выводов типичных двух уравнений, что означает, что модель состоит из двух основных переменных уравнений (турбулентной кинетической энергии и скорости потребления энергии) с широким диапазоном применения.

Fluent code позволяет рассчитать чистую радиационную настройку солнечной модели, которая основана на положении на поверхности Земли (широта и долгота), ориентации модели по отношению к северу, времени суток, времени года и установленных условиях для ясной или облачной погоды.

Табл. 1. Данные климата настройки в территории исследования

Table 1. Climate data valid for the area of research

Время / Time of day	Средняя температура, °C / Average temperature, °C	Средняя температура, K / Average temperature, K	Средняя скорость ветра, м/с / Average wind velocity, м/s	Солнечная радиация, W/m ² / Solar radiation, W/m ²
5–6	26,31	299,46	2,118	1,2
10–11	27,73	300,88	1,104	37,35
12–13	28,03	301,03	1,392	50,89

В качестве решателя использован алгоритм на основе давления «Простой», который использует связь между скоростью и коррекцией давления для обеспечения сохранения массы и получения поля давления.

Однако в исследованиях улицы и термической стратификации наиболее часто используется стандартная модель турбулентности $k-\epsilon$.

При моделировании вычислительного гидродинамического анализа CFD были установлены различные настройки параметров для уточнения корреляции между уличной средой и тепловым комфортом. В этом исследовании начальная температура эталонного поля взята из средних температур, собранных на четырех станциях теплового комфорта в течение дня, а начальная скорость ветра измерена станцией теплового комфорта в течение четырех периодов (табл. 1).

Из лабораторных и метеорологических исследований известно, что в нижней части турбулентного пограничного слоя напряжение трения мало отличается от приземного трения [26, 27]. Это приводит к логарифмическому закону изменения скорости ветра с высотой:

$$U_*(z) = U_1 / \ln(Z_1 / Z_*), \tag{5}$$

где $Z_* < Z < 0,3 \delta$; U_1 — скорость ветрового потока на высоте Z_1 , м/с; Z_* — параметр, служащий характеристикой размера вихрей вблизи поверхности земли, в пригородах со сплошной невысокой застройкой $Z_* = 0,8-1,2$ м, в крупных городах $Z_* = 2-3$ м [26].

Более известен исторически первый степенной закон изменения средней скорости ветра по всей толщине $0 < Z < \delta$ атмосферного пограничного слоя. Многочисленные разновидности этого закона [26, 28–30]:

$$U_*(Z) = (Z / Z_0)^\alpha, \tag{6}$$

где U_0 — средняя скорость ветрового потока на высоте Z_0 , м/с, а показатель степени α зависит от типа местности и может изменяться в диапазоне 0,14–0,4 (в работах [26, 29] рекомендуется $\alpha = 0,22-0,28$ для пригородов; $\alpha = 0,33-0,4$ — для крупных городов).

В дополнение к профилю скорости на граничных поверхностях входа были определены профили турбулентной кинетической энергии k и скорости

диссипации турбулентности ϵ , чтобы начать итеративные вычисления:

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \left(1 - \frac{z}{\delta} \right); \tag{7}$$

$$\epsilon = \frac{u_*^3}{k(z + z_0)} \left(1 - \frac{z}{\delta} \right). \tag{8}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Состояние уличной термальной среды в разные периоды времени

Нами проведено моделирование вычислительного гидродинамического анализа CFD городской уличной термальной среды для трех разных периодов времени (рис. 3–5). Основные переменные зависят от температуры фона и скорости ветра.

Результаты моделирования показывают, что высокие температуры в основном сосредоточены на юго-востоке области исследования. Основная причина для юго-восточной части исследуемой территории состоит в том, что условия рассеивания тепла в большой локальной зоне здания и вентиляционные охлаждения плохие. Кроме того, в средней части исследуемой площади здания относительно редки (тепловыделение в зданиях ниже), а эффект охлаждения вентиляцией выше, что приводит к низкой температуре.

Результаты моделирования в три различные периоды времени показывают, что, хотя фоновая температура в 10 и 13 часов выше, чем в 6 часов утра, скорость ветра в эти два периода ниже, чем в 6 утра (табл. 2). Таким образом, результаты моделирования показывают, что некоторые районы имеют высокие температурные условия. В моделировании вычислительного гидродинамического анализа CFD условие скорости фонового ветра является важным фактором, который определяет результаты моделирования тепловой среды.

Табл. 2. Данные температуры на территории моделирования

Table 2. Temperature data for the simulation area

6:00		10:00		13:00	
$T_{min}, ^\circ C$	$T_{max}, ^\circ C$	$T_{min}, ^\circ C$	$T_{max}, ^\circ C$	$T_{min}, ^\circ C$	$T_{max}, ^\circ C$
20,87	26,29	21,74	28,42	22,17	29,33

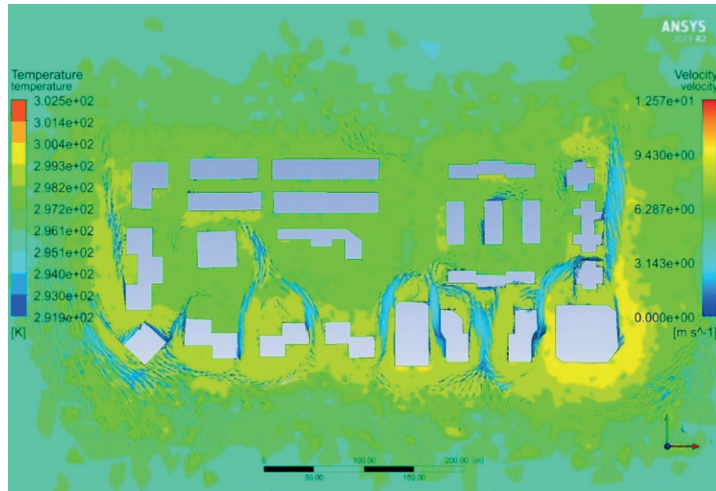


Рис. 3. Результат моделирования температуры поверхности в 5:00–6:00

Fig. 3. Surface temperature simulation at 5:00–6:00 a.m.

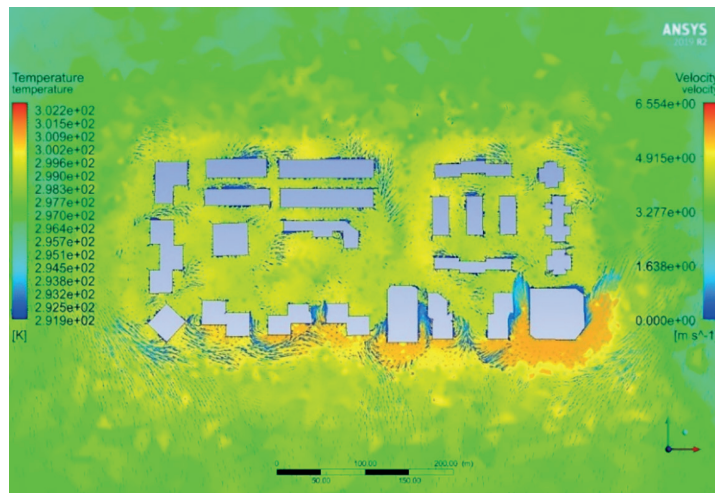


Рис. 4. Результат моделирования температуры поверхности в 10:00–11:00

Fig. 4. Surface temperature simulation at 10:00–11:00 a.m.

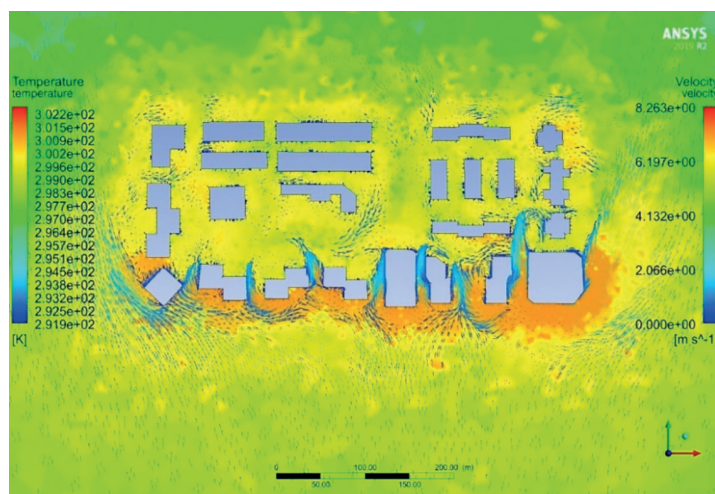


Рис. 5. Результат моделирования температуры поверхности в 12:00–13:00

Fig. 5. Surface temperature simulation at 12:00 p.m.–1:00 p.m.

Моделирование различного тепловыделения здания

Различные результаты моделирования тепловыделения здания (рис. 6–8) показывают, что по мере увеличения тепловыделения здания общая температура исследуемой области также постепенно увеличивается и, соответственно, увеличивается диапазон разности температур всей области.

Когда теплоотдача здания увеличилась, общая разность температур в исследуемой области увеличилась, что указывает на то, что, хотя температура в области низких температур также увеличилась лишь незначительно, область высокой температуры накапливалась из-за тепла, что приводило к разнице температур в других областях. Это изменение серьезно ухудшит тепловую среду городских улиц и тепловой комфорт, и его влияние нельзя недооценивать.

Результаты моделирования показывают, что, если здание может эффективно контролировать рассеивание тепла в здании, оно может потенциально поддерживать тепловую среду городских улиц в определенном состоянии теплового комфорта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Во Вьетнаме большинство людей живет в городах, поэтому городская уличная тепловая среда и тепловой комфорт оказывают значительное влияние на качество их жизни. Кондиционирование воздуха, потребление энергии и мероприятия на свежем воздухе составляют важную часть этого качества. Чтобы пронаблюдать взаимосвязь между городской уличной средой и тепловым комфортом в г. Ханое, это исследование было основано на мобильной

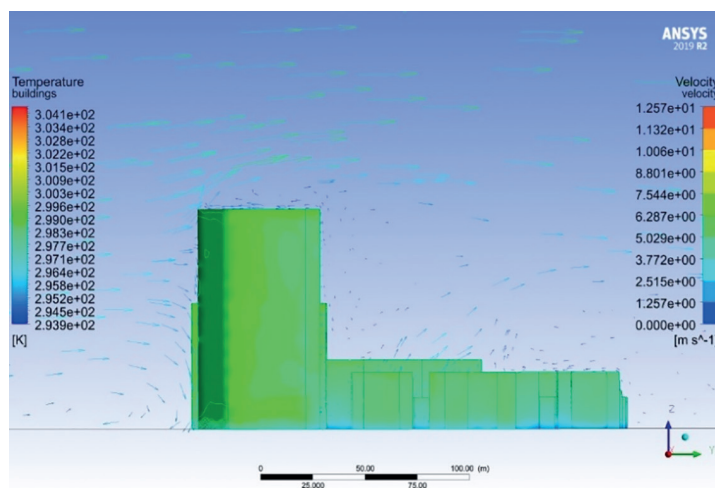


Рис. 6. Результат моделирования здания искусственным теплом в 5:00–6:00

Fig. 6. Building simulation using artificial heat at 5:00 a.m.–6:00 a.m.

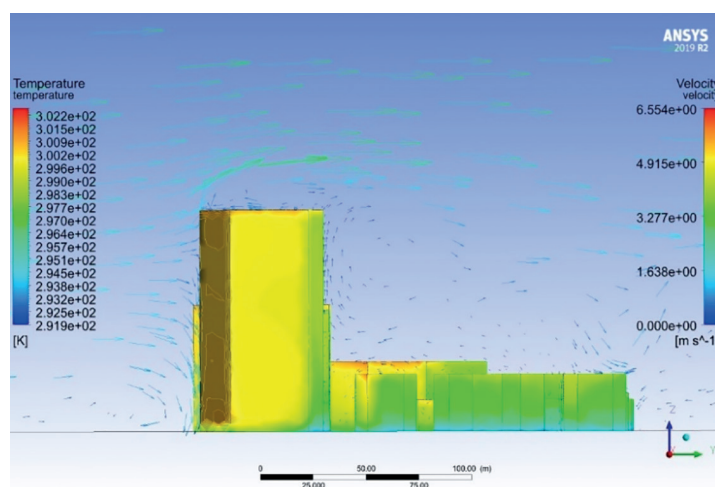


Рис. 7. Результат моделирования здания искусственным теплом в 10:00–11:00

Fig. 7. Building simulation using artificial heat at 10:00 a.m.–11:00 a.m.

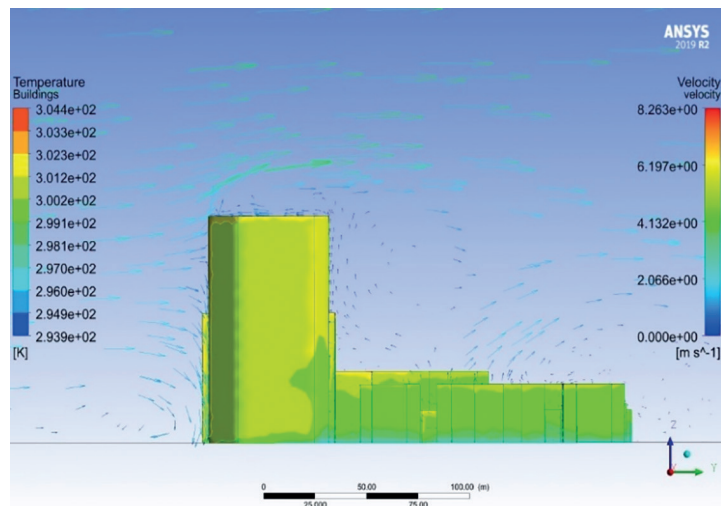


Рис. 8. Результат моделирования здания искусственным теплом в 12:00–13:00

Fig. 8. Building simulation using artificial heat at 12:00 p.m.–13:00 p.m.

станции мониторинга окружающей среды. Для определения изменения микроклиматических данных и моделирования тепловой среды городских улиц использовался вычислительный гидродинамический анализ CFD. Городская уличная среда и сфера деятельности людей могут улучшить тепловой комфорт.

- наиболее высокие температуры наблюдались вокруг юго-восточной стороны зданий. Таким образом, снижение плотности застройки и сохранение расстояния между зданиями будет способствовать движению ветра и охлаждению городских улиц;
- следует различать следующие периоды времени: 5:00–6:00, 10:00–11:00 и 12:00–13:00. Тенденция заключается в том, что «фоновая температура ниже,

а результаты моделирования прохладнее». Показано, что фоновая температура по-прежнему является наиболее важным фактором, влияющим на результаты моделирования CFD, поэтому управление тепловыделением городских зданий, чтобы избежать выхода тепла из здания на улицы для поддержания высокотемпературного состояния, может улучшить комфорт городской уличной тепловой среды как стратегическое направление для улучшения;

- наибольший вклад в работу вносит использование микрометеостанции. Для улучшения теплового комфорта улиц можно рекомендовать анализ оценки окружающих зданий, озеленение и теневые участки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sun C.-Y. A street thermal environment study in summer by the mobile transect technique // *Theoretical and Applied Climatology*. 2011. Vol. 106. Issue 3–4. Pp. 433–442. DOI: 10.1007/s00704-011-0444-6
2. Sun C.-Y., Brazel A.J., Chow W.T., Hedquist B.C., Prasad L. Desert heat island study in winter by mobile transect and remote sensing techniques // *Theoretical and Applied Climatology*. 2009. Vol. 98. Issue 3–4. Pp. 323–335. DOI: 10.1007/s00704-009-0120-2
3. Yuan F., Bauer M.E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in landsat imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2007. Vol. 106. Issue 3. Pp. 375–386. DOI: 10.1016/j.rse.2006.09.003
4. Gagliano A., Patania F., Capizzi A., Nocera F., Galesi A. A proposed methodology for estimating the performance of small wind turbines in urban areas // *Sustainability in Energy and Buildings*. 2012. Pp. 539–548. DOI: 10.1007/978-3-642-27509-8_45
5. Blocken B., Stathopoulos T., Carmeliet J., Hensen J. Application of computational fluid dynamics in building performance simulation for the outdoor environment: an overview // *Journal of Building Performance Simulation*. 2011. Vol. 4. Issue 2. Pp. 157–184. DOI: 10.1080/19401493.2010.513740
6. Ramponi R., Blocken B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters // *Building and Environment*. 2012. Vol. 53. Pp. 34–48. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.01.004

7. *Алексашина В.В., Ле Минь Туан.* Влияние эффекта острова тепла на экологию мегаполиса // Проблемы региональной экологии. 2018. № 5. С. 36–40. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-15036
8. *Gagliano A., Detommaso M., Nocera F., Patania F., Aneli S.* The Retrofit of Existing Buildings Through the Exploitation of the Green Roofs — A Simulation Study // Energy Procedia. 2014. Vol. 62. Pp. 52–61. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.12.366
9. *Minh Tuan Le, Nguyen Anh Quan Tran.* Features of the formation of urban heat islands effects in tropical climates and their impact on the ecology of the city // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 91. P. 05005. DOI: 10.1051/e3sconf/20199105005
10. *Mochida A., Lun I.Y.F.* Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2008. Vol. 96. Issue 10–11. P. 1498–1527. DOI: 10.1016/j.jweia.2008.02.033
11. *Ле Минь Туан.* Влияние планировки города на возникновение островов тепла в мегаполисах с тропическим климатом (г. Ханой) // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 2 (125). С. 148–157. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.148-157
12. *Santamouris M., Synnefa A., Karlessi T.* Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions // Solar Energy. 2011. Vol. 85. Issue 12. Pp. 3085–3102. DOI: 10.1016/j.solener.2010.12.023
13. *Yuan J., Emura K., Sakai H.* Evaluation of the solar reflectance of highly reflective roofing sheets installed on building roofs // Journal of Building Physics. 2013. Vol. 37. Issue 2. Pp. 170–184. DOI: 10.1177/1744259112459263
14. *Yamashita S., Sekine K., Shoda M., Yamashita K., Hara Y.* On relationships between heat island and sky view factor in the cities of tama river basin, Japan // Atmospheric Environment (1967). 1986. Vol. 20. Issue 4. Pp. 681–686. DOI: 10.1016/0004-6981(86)90182-4
15. *Minh Tuan Le, Thi Anh Tuyet Cao, Nguyen Anh Quan Tran.* The role of green space in the urbanization of Hanoi city // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 01013. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701013
16. *Jonsson P.* Vegetation as an Urban Climate Control in the Subtropical City of Gaborone, Botswana // International Journal of Climatology. 2004. Vol. 24. Issue 10. Pp. 1307–1322. DOI: 10.1002/joc.1064
17. *Oliveira Panoa M.J.N., Goncalves H.J., Ferrao P.M.C.* Numerical analysis of the street canyon thermal conductance to improve urban design and climate // Building and Environment; 2009. Vol. 44. Issue 1. Pp. 177–187. DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.02.004
18. *Sini J.F., Anquetini S., Mestayer P.* Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons // Atmospheric Environment. 1996. Vol. 30. Issue 15. Pp. 2659–2677. DOI: 10.1016/1352-2310(95)00321-5
19. *Offerle B., Eliasson I., Grimmond C.S.B., Holmer B.* Surface heating in relation to air temperature, wind and turbulence in an urban street canyon // Boundary-Layer Meteorology. 2007. Vol. 122. Issue 2. Pp. 273–292. DOI: 10.1007/s10546-006-9099-8
20. *Xie X., Huang Z., Wang J., Xie Z.* Thermal effects on vehicle emission dispersion in an urban street canyon // Transportation Research Part D. 2005. Vol. 10. Issue 3. Pp. 197–212. DOI: 10.1016/j.trd.2005.01.002
21. *Oke T.R.* Boundary Layer Climates. London and New York : Routledge, 1987.
22. *Nakamura Y., Oke T.R.* Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon // Atmospheric Environment (1967). 1988. Vol. 22. Issue 12. Pp. 2691–2700. DOI: 10.1016/0004-6981(88)90437-4
23. *Santamouris M., Papanikolaou N., Koronakis I., Livada I., Assimakopoulos D.* Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions // Atmospheric Environment. 1999. Vol. 33. Issue 27. Pp. 4503–4521. DOI: 10.1016/s1352-2310(99)00187-9
24. 23. ANSYS Fluent Theory, Guide. URL: https://uiuc-cse.github.io/me498cm_fa15/lessons/fluent/refs/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide.pdf
25. 24. *Bakker A., Oshinowo L.* Modelling of Turbulence in Stirred Vessels Using Large Eddy Simulation // Chemical Engineering Research and Design. 2004. Vol. 82. Issue 9. Pp. 1169–1178. DOI: 10.1205/cerd.82.9.1169.44153
26. *Симиу Э., Сканлан Р.* Воздействие ветра на здания и сооружения. М. : Стройиздат, 1984. 358 с.
27. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М. : Наука, 1974.
28. *Табунщиков Ю.А., Шилкин Н.В.* Аэродинамика высотных зданий // АВОК. 2004. № 8.
29. *Старков А.Н., Безруких П.П., Ландберг Л., Борисенко М.М.* Атлас ветров России. Изд-во Можайск-Терра, 2000.
30. *Magee N., Curtis J., Wendler G.* The Urban Heat Island Effect at Fairbanks, Alaska // Theoretical and Applied Climatology. 1999. Vol. 64. Issue 1. Pp. 39–47. DOI: 10.1007/s007040050109

Поступила в редакцию 18 октября 2019 г.

Принята в доработанном виде 8 ноября 2019 г.

Одобрена для публикации 27 февраля 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Ле Минь Туан — аспирант кафедры архитектуры; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; grado@mgsu.ru;

Илхомжон Садриевич Шукуров — доктор технических наук, профессор кафедры градостроительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; grado@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Sun C.-Y. A Street Thermal Environment Study in Summer by the Mobile Transect Technique. *Theoretical and Applied Climatology*. 2011; 106(3-4):433-442. DOI: 10.1007/s00704-011-0444-6
2. Sun C.-Y., Brazel A.J., Chow W.T., Hedquist B. C., Prasad L. Desert Heat Island Study in Winter by Mobile Transect and Remote Sensing Techniques. *Theoretical and Applied Climatology*. 2009; 98(3-4):323-335. DOI: 10.1007/s00704-009-0120-2
3. Yuan F., Bauer M.E. Comparison of Impervious Surface Area and Normalized Difference Vegetation Index as Indicators of Surface Urban Heat Island Effects in Landsat Imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2007; 106(3):375-386. DOI: 10.1016/j.rse.2006.09.003
4. Gagliano A., Patania F., Capizzi A., Nocera F., Galesi A. A proposed methodology for estimating the performance of small wind turbines in urban areas. *Sustainability in Energy and Buildings*, 2012; 539-548. DOI: 10.1007/978-3-642-27509-8_45
5. Blocken B., Stathopoulos T., Carmeliet J., Hensen J. Application of computational fluid dynamics in building performance simulation for the outdoor environment: an overview. *Journal of Building Performance Simulation*. 2011; 4(2):157-184. DOI: 10.1080/19401493.2010.513740
6. Ramponi R., Blocken B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters. *Building and Environment*. 2012; 53:34-48. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.01.004
7. Aleksashina V.V., Le Minh Tuan. Influence of the urban heat island effects on the ecology of the megacity. *Regional Environmental Issues*. 2018; 5:36-40. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-15036 (rus.).
8. Gagliano A., Detommaso M., Nocera F., Patania F., Aneli S. The Retrofit of Existing Buildings Through the Exploitation of the Green Roofs – A Simulation Study. *Energy Procedia*. 2014; 62:52-61. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.12.366
9. Minh Tuan Le, Nguyen Anh Quan Tran. Features of the formation of urban heat islands effects in tropical climates and their impact on the ecology of the city. *E3S Web of Conferences*. 2019; 91:05005. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199105005
10. Mochida A., Lun I.Y.F. Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2008; 96:10-11:1498-1527. DOI: 10.1016/j.jweia.2008.02.033
11. Le Minh Tuan. The influence of city planning on the emergence of heat islands in megacities with a tropical climate (Hanoi). *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2019; 14(2)(125):148-157. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.148-157 (rus.).
12. Santamouris M., Synnefa A., Karlessi T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*. 2011; 85(12):3085-3102. DOI: 10.1016/j.solener.2010.12.023
13. Yuan J., Emura K., Sakai H. Evaluation of the solar reflectance of highly reflective roofing sheets installed on building roofs. *Journal of Building Physics*. 2013; 37(2):170-184. DOI: 10.1177/1744259112459263
14. Yamashita S., Sekine K., Shoda M., Yamashita K., Hara Y. On Relationships between Heat Island and Sky View Factor in the Cities of Tama River Basin, Japan. *Atmospheric Environment* (1967). 1986; 20(4):681-686. DOI: 10.1016/0004-6981(86)90182-4
15. Minh Tuan Le, Thi Anh Tuyet Cao, Nguyen Anh Quan Tran. The role of green space in the urbanization of Hanoi city. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:01013. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701013
16. Jonsson P. Vegetation as an Urban Climate Control in the Subtropical City of Gaborone, Botswana. *International Journal of Climatology*. 2004; 24(10):1307-1322. DOI: 10.1002/joc.1064
17. Oliveira Panoa M.J.N., Goncalves H.J., Ferrao P.M.C. Numerical analysis of the street canyon thermal conductance to improve urban design and climate. *Building and Environment*. 2009; 44(1):177-187. DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.02.004
18. Sini J.F., Anquetini S., Mestayer P. Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. *Atmospheric Environment*. 1996; 30(15):2659-2677. DOI: 10.1016/1352-2310(95)00321-5
19. Offerle B., Eliasson I., Grimmond C.S.B., Holmer B. Surface heating in relation to air temperature, wind and turbulence in an urban street canyon. *Boundary-Layer Meteorology*. 2007; 122(2):273-292. DOI: 10.1007/s10546-006-9099-8
20. Xie X., Huang Z., Wang J., Xie Z. Thermal effects on vehicle emission dispersion in an urban

street canyon. *Transportation Research Part D*. 2005; 10(3):197-212. DOI: 10.1016/j.trd.2005.01.002

21. Oke T.R. *Boundary Layer Climates*. London and New York, Routledge, 1987.

22. Nakamura Y., Oke T.R. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment* (1967). 1988; 22(12):2691-2700. DOI: 10.1016/0004-6981(88)90437-4

23. Santamouris M., Papanikolaou N., Koronakis I., Livada I., Assimakopoulos D. Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions. *Atmospheric Environment*. 1999; 33(27):4503-4521. DOI: 10.1016/s1352-2310(99)00187-9

24. *ANSYS Fluent Theory, Guide*. URL: https://uiuc-cse.github.io/me498cm_fa15/lessons/fluent/refs/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide.pdf

25. Bakker A., Oshinowo L. Modelling of Turbulence in Stirred Vessels Using Large Eddy Simulation. *Chemical Engineering Research and Design*. 2004; 82(9):1169-1178. DOI: 10.1205/cerd.82.9.1169.44153

26. Simiu E., Skanlan R. *The impact of wind on buildings and structures*. Moscow, Stroyizdat, 1984; 358. (rus.).

27. Shlikhting G. *Boundary layer theory*. Moscow, Nauka, 1974. (rus.).

28. Tabunshchikov Yu.A., Shilkin N.V. Aerodynamics of high-rise buildings. *AVOK*. 2004; 8. (rus.).

29. Starkov A.N., Bezrukikh P.P., Landberg L., Borisenko M.M. *Atlas of winds of Russia*. Izdvo Mozhaysk-Terra, 2000. (rus.).

30. Magee N., Curtis J., Wendler G. The Urban Heat Island Effect at Fairbanks, Alaska. *Theoretical and Applied Climatology*. 1999; 64(1):39-47. DOI: 10.1007/s007040050109

Received October 18, 2019.

Adopted in a revised form on November 8, 2019.

Approved for publication February 27, 2020.

BIONOTES: **Le Minh Tuan** — postgraduate student of Department of Architecture; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; grado@mgsu.ru;

Ilkhomzhon S. Shukurov — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Urban planning, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; grado@mgsu.ru.