

Метеорология

Литвинцев К.Ю., Мешкова В.Д., Филимонов С.А.

Научная статья

УДК 551.586+004.942

DOI: 10.17072/2079-7877-2025-4-105-118

EDN: UCFUJP

**ВЛИЯНИЕ МЕТЕОУСЛОВИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПЕШЕХОДНОЙ КОМФОРТНОСТИ
НА ПРИМЕРЕ ГОРОДСКОГО КВАРТАЛА КРАСНОЯРСКА****Кирилл Юрьевич Литвинцев¹, Виктория Дмитриевна Мешкова², Сергей Анатольевич Филимонов³**^{1,3} Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия^{1,2} Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия¹ sttupick@yandex.ru² redel-vd@yandex.ru³ bdk@inbox.ru

Аннотация. Одним из важных требований в современных подходах к организации городского пространства является обеспечение требуемого уровня пешеходного комфорта, который обусловлен как внешними метеоусловиями, так и протекающими локальными процессами тепломассопереноса в городской среде. Цель работы – численное исследование условий пешеходной комфортности на примере городского квартала г. Красноярск с привлечением методов вычислительной гидродинамики. Численное моделирование процессов теплообмена и аэродинамики проводилось на основе разработанной микромасштабной математической модели городской атмосферы, основанной на неупругом приближении. Оценка пешеходной комфортности осуществлялась с использованием биоклиматических показателей, рассчитанных на основе полей метеовеличин. Результаты численного моделирования городского района г. Красноярск показывают, что температурный и аэрационный режимы в городской застройке носят нестационарный характер, зависящий от суточной динамики солнечного излучения, которая определяется временем года и облачностью. С точки зрения биоклиматических показателей, наличие солнечного излучения, с одной стороны, повышает температуру, а с другой стороны, приводит к росту скоростей. Как следствие, возникают конкурирующие разнонаправленные тренды теплового воздействия на человека. Наличие высотных зданий вносит вклад в формирование устойчивых локальных зон повышенных скоростей, которые могут способствовать повышению пешеходного комфорта в жаркую летнюю погоду, но зимой только снижают уровень комфорта. Полученные результаты численного моделирования демонстрируют влияние на пешеходную комфортность не только внутренней геометрии городского квартала, но и динамики солнечного излучения.

Ключевые слова: численное моделирование, пешеходная комфортность, городская среда, тепломассобмен

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-61-00098), <https://rscf.ru/project/22-61-00098/>.

Для цитирования: Литвинцев К.Ю., Мешкова В.Д., Филимонов С.А. Влияние метеоусловий на формирование пешеходной комфортности на примере городского квартала Красноярск // Географический вестник = Geographical bulletin. 2025. № 4(75). С. 105–118. DOI 10.17072/2079-7877-2025-4-105-118 EDN UCFUJP

Original article

DOI: 10.17072/2079-7877-2025-4-105-118

EDN: UCFUJP

**WEATHER EFFECTS ON HUMAN COMFORT:
THE CASE OF AN URBAN BLOCK IN KRASNOYARSK****Kirill Yu. Litvintsev¹, Victoriya D. Meshkova², Sergey A. Filimonov³**^{1,3} Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia^{1,2} Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia¹ sttupick@yandex.ru² redel-vd@yandex.ru³ bdk@inbox.ru

Abstract. Ensuring the necessary level of human comfort is an important requirement for the modern organization of urban space. Human comfort is determined by both external weather conditions and the local processes of heat and



© 2025 Литвинцев К.Ю., Мешкова В.Д., Филимонов С.А. Лицензия CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, перейдите по ссылке <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Метеорология

Литвинцев К.Ю., Мешкова В.Д., Филимонов С.А.

mass transfer occurring in the urban environment. Our research aims to analyze the formation of human comfort conditions for an urban block in the city of Krasnoyarsk by means of computational fluid dynamics methods. Numerical modeling of heat transfer and aerodynamic processes was carried out based on the microscale mathematical model of urban atmosphere using the inelastic approximation. Human comfort was assessed on the basis of bioclimatic indices calculated from the fields of physical variables. Results of numerical modeling of the urban environment show that the temperature and wind regimes in a built-up area are unsteady and depend on solar radiation dynamics, specific to the season and cloudiness conditions. Bioclimatic indices are affected not only by temperature rise but also by an increase in the air velocity, both induced by solar radiation. This creates competing multidirectional trends of thermal impacts on humans. High-rise buildings form stable local areas of high wind velocity. These areas can contribute to human comfort in hot summer weather, but reduce the comfort level in the winter. The obtained numerical simulation results demonstrate that solar radiation dynamics affect local human comfort along with the urban block geometry.

Keywords: numerical simulation, human comfort, urban microclimate, heat and mass transfer

Funding: the study was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 22-61-00098), <https://rscf.ru/project/22-61-00098/>.

For citation: Litvintsev, K.Yu., Meshkova, V.D., Filimonov, S.A. (2025). Weather effects on human comfort: the case of an urban block in Krasnoyarsk. *Geographical Bulletin*. No. 4(75). Pp. 105–118. DOI: 10.17072/2079-7877-2025-4-105-118 EDN: UCFUJP

Введение

Активная урбанизация современного общества показала, что используемые подходы по организации внутригородского пространства привели к формированию экологически неблагоприятных условий окружающей среды, тем самым снижая уровень комфорта жизни людей. Развитие методов численного моделирования закономерно вызвало появление численных исследований, с помощью которых стало возможно изучать протекающие процессы в атмосфере города. Например, работы [17, 32] посвящены анализу формирования городского острова тепла, в [10, 30] исследовался аэрационный режим, а процесс рассеивания и переноса загрязняющих примесей рассматривается в [15, 16, 18, 27]. Параллельно изучаются условия формирования ветрового и теплового пешеходного комфорта в городской среде [17, 24, 29]. Изучение отдельных факторов, воздействующих на комфортное пребывание человека в городской среде, привело к пониманию необходимости оценки комплексного воздействия климатических параметров. Получить эти оценки можно с помощью микромасштабных численных моделей городской атмосферы [31].

На текущий момент в мировой практике существует более 30 биоклиматических критериев, которые делятся на температурные, температурно-ветровые и температурно-влажностно-ветровые, также может добавляться радиационная составляющая [1, 3, 14]. Российская практика показывает, что оценка биоклиматического уровня комфорта через биоклиматические критерии, как правило, выполнялась только для определенных регионов с помощью ГИС-систем [4, 5, 9] или городов [8]. В данной работе рассматривается влияние процессов тепломассопереноса, включая солнечное и тепловое излучение, на формирование аэрационного режима и условий пешеходной комфортности на примере изолированного городского квартала г. Красноярска в зимнее и летнее время.

Планирование территории селитебной зоны городов должно обеспечивать рациональное размещение жилой застройки. В последнее время прослеживается тенденция активного развития высотного строительства. Помимо оптимизации землепользования за счет увеличения этажности, данный подход позволяет создавать многофункциональные комплексы, ориентированные не только на получение дополнительной жилой площади, но также на создание мест для офисных центров и различного рода бизнеса. Одним из видов высотной застройки является точечная застройка высотными одноподъездными зданиями («свечки»). Особенности подобной застройки являются наличие зон повышенных скоростей в приземной области вследствие бокового обтекания подобных зданий ветровым потоком и формирование значительных теневых областей. Данный вид застройки реализуется во многих современных городах. В связи с этим в качестве объекта исследования был принят жилой микрорайон г. Красноярска, который состоит преимущественно из высотных зданий. Так как формирование условий пешеходного комфорта зависит от температурного и ветрового фактора, соответственно, при численном исследовании необходимо учитывать не только аэродинамику, но и процессы теплообмена с оценкой влияния солнечного и теплового излучения.

Численное моделирование процессов тепломассобмена в рассматриваемом городском квартале проводилось на основе микромасштабной модели городской атмосферы, созданной в программном комплексе SigmaEco [19], в рамках которого был реализован блок расчета биоклиматических критериев для оценки пешеходной комфортности на основе рассчитанных полей метеовеличин [23].

Метод решения

Микромасштабная математическая модель городской атмосферы основывается на нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса для несжимаемых течений в неупругом приближении [19, 26]. Система уравнений для осредненных метеорологических величин включает:

уравнение неразрывности

$$\nabla \mathbf{V} = 0, \quad (1)$$

Метеорология

Литвинцев К.Ю., Мешкова В.Д., Филимонов С.А.

уравнение движения,

$$\frac{d(\rho_z \mathbf{V})}{dt} = -\nabla p + \mathbf{g} \rho_z \frac{(\theta_z - \theta)}{\theta_z} + \nabla \left[(\mu + \mu_t) (\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T) \right], \quad (2)$$

уравнение сохранения энергии, которое записывается через потенциальную температуру θ

$$\rho_z C_p \frac{d\theta}{dt} = \nabla \cdot \left[\left(\lambda + \frac{\mu_t C_p}{Pr_t} \right) \nabla \theta \right] + S_\theta, \quad (3)$$

где \mathbf{V} – вектор скорости, м/с; ρ_z – гидростатическая плотность, кг/м³; θ – потенциальная температура, К; θ_z – распределение фоновой потенциальной температуры по высоте, К; p – осредненное давление, Па; μ – динамическая вязкость, кг/(м·с); C_p – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); λ – теплопроводность, Вт/(м·К); S_θ – дополнительный тепловой источник; μ_t – турбулентная вязкость; \mathbf{g} – ускорение свободного падения; Pr_t – турбулентное число Прандтля.

Для описания турбулентных характеристик используется двухпараметрическая RANS k - ω SST-модель [22] с дополнительными слагаемыми для учета влияния силы плавучести на генерацию/диссипацию турбулентной кинетической энергии.

Начальное и граничное распределение потенциальной температуры описывает нейтральную ($\theta_z = \text{const}$) атмосферу. Соответственно, в качестве граничных условий на входе задаются следующие распределения скорости, турбулентных характеристик по высоте z [21]:

$$u(z) = \frac{u_*}{K} \left(\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right), \quad (4)$$

$$k(z) = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}}, \quad (5)$$

$$\omega(z) = \frac{u_*}{K \cdot z \cdot \sqrt{C_\mu}}, \quad (6)$$

где константа $C_\mu = 0,09$; z_0 – шероховатость поверхности, $K=0,42$ – константа Кармана; u_* – динамическая скорость, м/с; ω – удельная скорость диссипации, 1/с; k – кинетическая энергия турбулентности, м²/с².

Для описания профиля скорости с шероховатостью вблизи стенки применяются пристеночные функции на основе модели аэродинамической шероховатости, предложенной в работе [28].

Для описания распространения излучения в городской среде используется уравнение переноса излучения (УПИ) в приближении «серых» газов, которое решается на основе метода конечных объемов (МКО) [13, 20]:

$$\frac{\partial I(\mathbf{r}, \mathbf{s})}{\partial s} = -a(\mathbf{r}) I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) + a(\mathbf{r}) I_b(\mathbf{r}, \mathbf{s}), \quad (7)$$

где I – интенсивность излучения, Вт/(м²·ср); I_b – интенсивность излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·ср); a – коэффициент поглощения, м⁻¹; \mathbf{r} – радиус-вектор; \mathbf{s} – единичный вектор углового направления.

В рамках метеорологической модели поле излучения разделяется на коротковолновое солнечное излучение и длинноволновое тепловое излучение атмосферы и поверхности земли, для каждого из которых отдельно решается свое УПИ. Модель расчета переноса солнечного прямого и рассеянного излучения и теплового излучения атмосферы описана в работе [19]. Реализованная модель суточной динамики падающего потока солнечного излучения показала хорошее согласование с данными натурных наблюдений [7] при ясном небе и при средних условиях облачности.

При расчете переноса солнечного излучения среда принимается прозрачной. Для расчета прямого падающего солнечного излучения используется модификация МКО, в которой введен дополнительный малый контрольный телесный угол. Граничные условия в виде диффузионного излучения применялись для моделирования испускания рассеянного атмосферой и отраженного поверхностями солнечного излучения.

При расчете переноса теплового излучения среда принимается поглощающей. В качестве поглощающего и излучающего газа выступают пары воды. Для расчета коэффициента поглощения газовой смесью в УПИ используется модель, предложенная в работе [12] на основе banded WSGG-подхода [25]. Для теплового излучения в качестве граничных условий использовалось как диффузионное излучение, так и зеркальное отражение для боковых открытых границ расчетной области.

Метеорология

Литвинцев К.Ю., Мешкова В.Д., Филимонов С.А.

$$\begin{aligned} \text{ЭЭТ} = T[1 - 0.003(100 - f)] - 0.38V^{0.59}[(36.6 - t) + 0.622(V - 1)] + \\ + [(0.0015V + 0.008)(36.6 - T) - 0.0167](100 - f) \end{aligned} \quad (8)$$

$$P\text{ЭЭТ} = 1251g[1 + 0.02T + 0.001(T - 8)(f - 60) - 0.045(33 - T)\sqrt{V} + 0.185q_{\text{rad}}(1 - \alpha)] \quad (9)$$

где T – температура воздуха, °C; f – относительная влажность, %; V – магнитуа скорости ветра, м/с; q_{rad} – поток солнечной радиации, кВт/м²; α – альбеда кожи человека.

Для оценки погодных условий, которые формируются в зимний период времени, был использован сезонный показатель – индекс жесткости погоды С. Бодману (S) [4]:

$$S = (1 - 0.04T)(1 + 0.272V) \quad (10)$$

Индексы имеют свои интервалы значений, которым соответствуют определенные уровни комфорта. Всем интервалам внутри индексов были присвоены номера, по которым проводится зонирование по уровню комфорта (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Зонирование по уровню комфорта для биоклиматических показателей ЭЭТ, РЭЭТ и S
Comfort level zoning for bioclimatic indices EET, REET and S

Номер зоны	Уровень комфорта		
	ЭЭТ	РЭЭТ	S
1	Начинается угроза обморожения	Очень холодно	крайне суровая
2	Очень холодно	Холодно	жестко суровая
3	Холодно	Умерено холодно	очень суровая
4	Умеренно холодно	Очень прохладно	суровая
5	Очень прохладно	Умеренно прохладно	умеренно-суровая
6	Умеренно прохладно	Прохладно	мало-суровая
7	Прохладно	Комфортно (умеренно тепло)	несуровая, мягкая
8	Комфорт (умеренно тепло)	Комфортно-тепло	–
9	Комфортно – тепло	Тепловая нагрузка умеренная	–
10	Тепловая нагрузка умеренная	Тепловая нагрузка сильная	–
11	Тепловая нагрузка сильная	–	–

Постановка задачи

Численно исследуется суточная динамика процессов тепломассопереноса и уровней пешеходного комфорта для жилого микрорайона г. Красноярска, который состоит преимущественно из высотных зданий, высота которых составляет около 75 м. Вокруг высоток располагаются мало- и среднеэтажные здания, высота которых варьируется в пределах 3–20 м (рис. 1). Расположение высотных зданий не имеет строго упорядоченной структуры, ближе всего ее описывает строчная застройка [6].

Для более комплексного изучения формирования аэрационного режима в реальном микрорайоне необходимо рассматривать не только адиабатическое обтекание ветровым потоком, но и учитывать теплообменные процессы, которые существенно влияют на структуру течения. Теплообменные процессы, в свою очередь, обусловлены метеоусловиями и теплофизическими свойствами элементов городской среды. Время года и облачность в первую очередь определяют характер и величину падающего солнечного излучения. Кроме этого, облачность влияет на величину теплового излучения атмосферы на земную поверхность. Влажность определяет перенос теплового излучения в приземном слое.

На основе данных, приведенных в [11], были определены исследуемые метеоусловия. В качестве приземной температуры набегающего ветрового потока использовались средняя максимальная (июнь) и минимальная (февраль) температуры воздуха наиболее теплого и холодного месяцев соответственно. Инсоляция рассчитывалась для центрального дня месяца (15 июня и 15 февраля). Сценарии расчетных вариантов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Варианты расчетов
Calculation variants

Вариант	Месяц	Облачность (балл облаков)	Приземная температура набегающего ветра, °C	Скорость ветра на высоте 10 м, м/с	Относительная влажность, %
1	июнь	ясно	25	2,5	70
2	июнь	облачно	25		
3	февраль	ясно	–23		
4	февраль	облачно	–23		

Теплообмен атмосферы с городской средой учитывался посредством модели сопряженного теплообмена, включающей в себя одномерное уравнение теплопроводности для стен и наземной поверхности. Для стен в расчетах задавался усредненный коэффициент термического сопротивления, равный 3 м²/(К·Вт), для крыш –

Метеорология

Литвинцев К.Ю., Мешкова В.Д., Филимонов С.А.

$4 \text{ м}^2/(\text{К} \cdot \text{Вт})$. Температура внутри зданий принималась равной 25°C для всех вариантов. Альбедо для кирпичных стен зданий было принято равным 0,25, крыш – 0,1, наземной поверхности – 0,15 [2]. Степень черноты для всех поверхностей была принята равной 1,0, шероховатость наземной поверхности – 0,05 м.

Расчетная область ориентирована по направлению ветра и имеет следующие размеры: длина 1000 м, ширина 850 м, высота 450 м (рис. 1). Географические координаты – 56,03 с.ш. 92,91 в.д., высота места над уровнем моря – 180 м. Дискретизация расчетной области для исследуемого района представляет собой неструктурированную ортогональную сетку с дополнительной детализацией в области зданий, в которой размер ячейки достигает 1 м (рис. 2). Минимальный вертикальный размер ячейки в приземной области составляет 0,35 м. Число ячеек расчетной сетки составляет $\sim 4,9 \times 10^6$. Время суток в расчетах соответствует истинному солнечному времени.

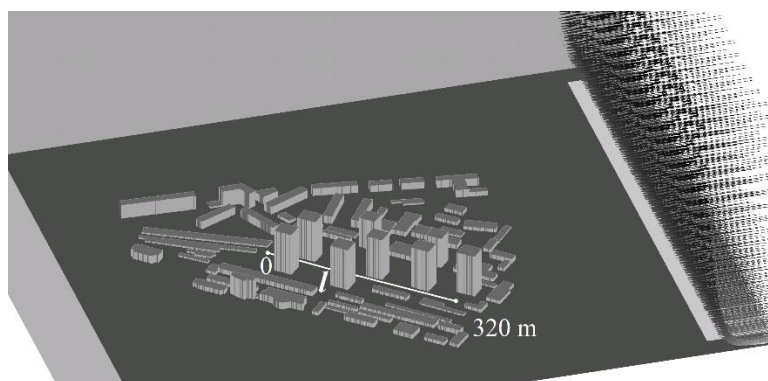


Рис. 1. Геометрия расчетной области. Линия мониторинга данных *I* и вертикальный профиль скорости ветра
Fig. 1. Geometry of the computational domain. The monitoring line *I* and vertical profile of the wind velocity

Результаты и обсуждение

Солнечное излучение, являющееся главным источником тепловой энергии, определяет не только внешние метеоусловия, но локальные конвективные потоки и теплообмен в городских районах. Особенностью высотной городской застройки с точки зрения взаимодействия с солнечным излучением является наличие больших областей затемнения (рис. 2).

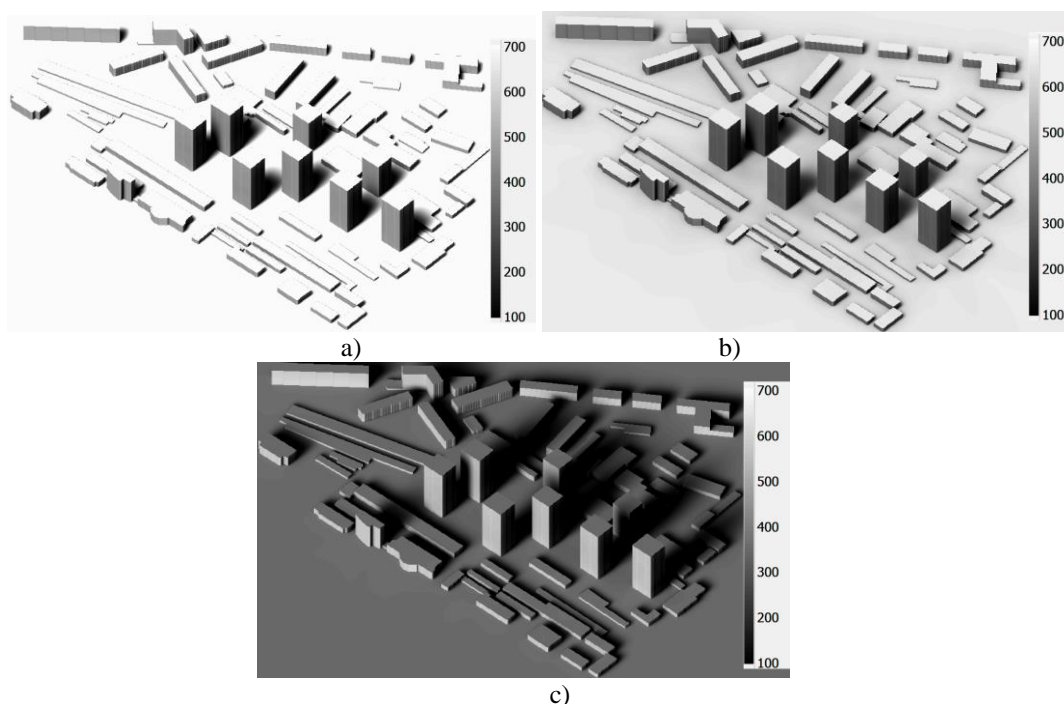


Рис. 2. Поток падающего солнечного излучения $\text{Вт}/\text{м}^2$, 12 ч: а) вариант 1; б) вариант 2; в) вариант 3
Fig. 2. The incident solar radiation flux W/m^2 , 12 p.m.: а) variant 1; б) variant 2; в) variant 3

Для Красноярска данный эффект усиливается географическим положением, поскольку город расположен на значительном удалении от экватора. Таким образом, даже в летний полдень наблюдается существенное затемнение от высотных зданий (рис. 2а).

Метеорология

Литвинцев К.Ю., Мешкова В.Д., Филимонов С.А.

В июне солнце располагается максимально высоко относительно горизонта, вследствие чего основной поток излучения приходится на горизонтальные поверхности (с 10 до 14 ч свыше 800 Вт/м^2). В утренние и вечерние часы области затенения могут покрывать значительную часть городского района. Наличие облачности снижает как общий уровень падающего солнечного излучения, так и градиент между затененными участками и участками, находящимися под прямым солнечным излучением, за счет увеличения доли рассеянного излучения. Зимой в феврале из-за низкой высоты солнца над линией горизонта в полдень (21°) уменьшается поток солнечной радиации на горизонтальную поверхность, с другой стороны, поступление солнечной радиации на вертикальную поверхность увеличивается. Максимальная интенсивность излучения на горизонтальную поверхность падает примерно в два раза по сравнению с июнем (рис. 2).

Рассмотрим изменение ветрового режима в городском квартале в зависимости от времени суток и года, а также условий облачности (рис. 3, 4).

В ночное время поля скоростей для всех вариантов получаются достаточно близкие (рис. 3а, б). Наблюдаемая разница связана с различиями в радиационном теплообмене с атмосферой, а в зимнее время – с наличием теплового потока от зданий. Ночью в городском районе в среднем происходит торможение воздушного потока из-за зданий, но в локальных областях наблюдается ускорение потока в основном при обтекании первого ряда высотных зданий по отношению к ветру. Высотные здания, расположенные позади них, не формируют зон с локальным ускорением потока при попадании в область возвратных течений, созданных первыми высотными зданиями.

В дневное время наиболее значительная трансформация воздушного потока по отношению к ночному наблюдается в июне в ясный день, когда поток солнечного излучения максимальный. Вследствие нагрева наземной поверхности происходит ускорение потока в приземной области как внутри городской застройки, так и вне нее (рис. 3с, 8). В городской застройке вследствие интенсификации течения растет неоднородность поля скорости. Области ускорения потока вблизи высотных зданий увеличиваются как по величине скорости, так и по площади, а также появляются новые. Растет интенсивность и число крупных вихревых зон, возникающих при обтекании средне- и малоэтажных зданий. Появление облачности приводит к небольшому снижению скоростей и повышению однородности поля течения из-за снижения потока солнечного излучения и увеличения доли рассеянного излучения (рис. 3д).

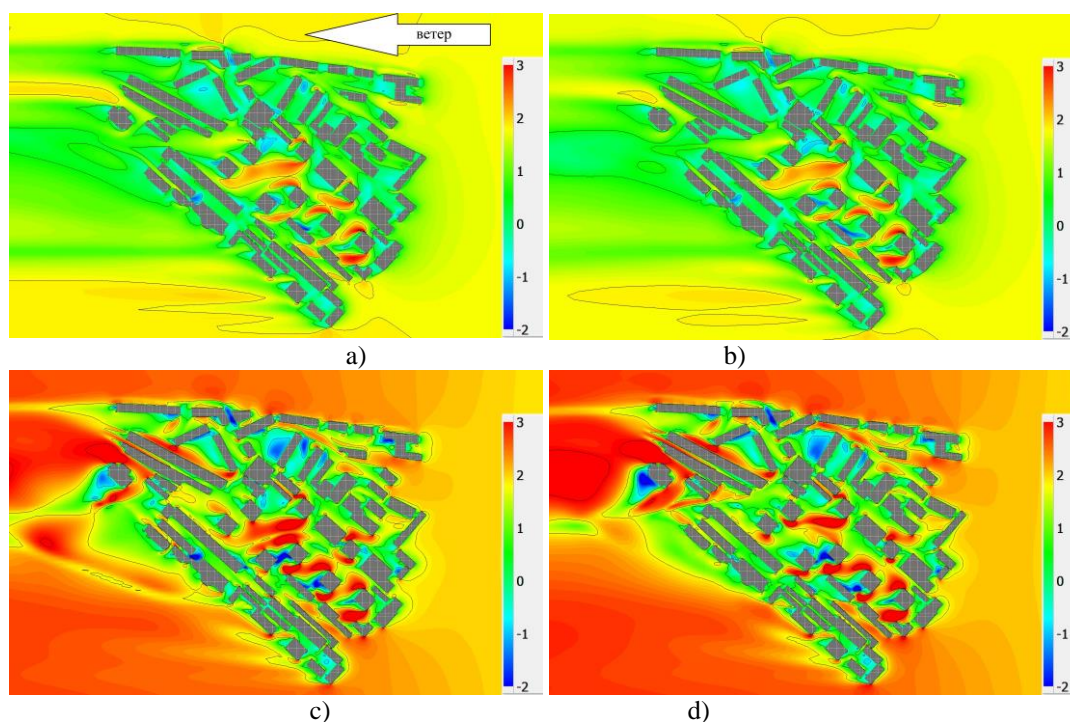


Рис. 3. Поле продольной компоненты скорости V_x (вдоль направления ветра) на высоте 2 м, м/с:
а) 1 ч, Вариант 1; б) 1 ч, Вариант 3; в) 12 ч, Вариант 1; д) 12 ч, Вариант 2. Нанести направление ветра
Fig. 3. Fields of the velocity component V_x (along the wind direction) at a height of 2 m, m/s:
а) 1 a.m., Variant 1; б) 1 a.m., Variant 3; в) 12 p.m., Variant 1; д) 12 p.m., Variant 2

В центральной части городского квартала между высотными зданиями формируется устойчивая область повышенных скоростей, которая сохраняется во всех вариантах. На нее оказывает влияние динамика солнечного излучения, изменяя ее размер и скорость потока, но не разрушая ее полностью. Таким образом, можно предположить, что эта область является зоной пониженного ветрового комфорта для людей.

Метеорология

Литвинцев К.Ю., Мешкова В.Д., Филимонов С.А.

Нагрев приземной области солнечным теплом приводит к формированию восходящих потоков, наблюдаемых как летом, так и зимой. Основная область их формирования – высотные здания, которые обеспечивают нагрев атмосферы по всей высоте здания (рис. 4). Отличие зимы от лета, помимо интенсивности падающего солнечного излучения, связано с тем, что летом в полдень сильнее прогреваются крыши домов, а зимой – стены (рис. 3). Таким образом, если летом атмосфера вокруг высотных зданий нагревается от стен и крыши, то зимой – в первую очередь от стен. Над малоэтажными зданиями тоже формируются восходящие потоки, но их интенсивность и высота подъема заметно меньше. Восходящие потоки, связанные только с обтеканием зданий, можно наблюдать в летнюю ночь, которые в основном формируются вблизи высотных зданий.

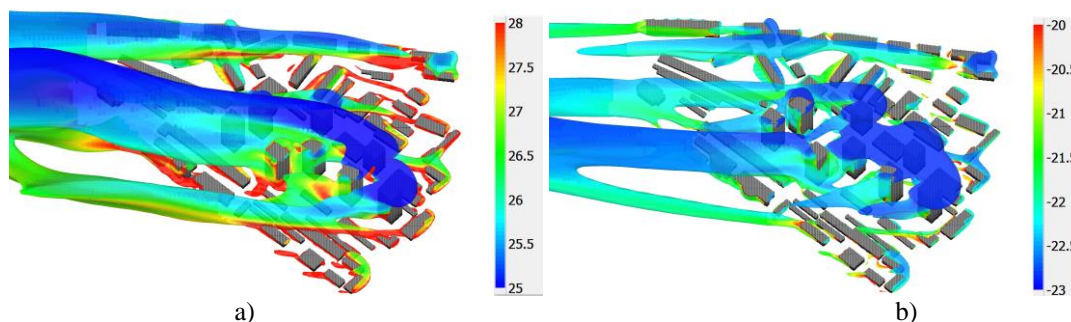


Рис. 4. Изоповерхность компоненты скорости $V_z = 0,3$ м/с с наложенной на нее потенциальной температурой, 13 ч.: а) Вариант 1; б) Вариант 4

Fig. 4. Isosurface of the velocity component $V_z = 0,3$ m/s with the potential temperature overlaid on it, 1 p.m.: a) Variant 1; b) Variant 4.

С восходом солнца начинается прогрев не только зданий, но и земной поверхности, который приводит к росту температуры в приземной области по сравнению с входящим потоком (рис. 5, 7). В июне локальный перегрев на высоте 2 м может достигать 10°C и выше. В феврале величина перегрева значительно меньше (до $\sim 4^\circ\text{C}$), как и время его существования. Это приводит к появлению тепловых шлейфов – вытянутых областей с повышенной температурой (рис. 5). Их образование связано с возникновением свободно конвективных течений от нагретых под действием солнечного излучения поверхностей. Горячий воздух в приземной области не поднимается равномерно со всей поверхности, а собирается в более устойчивые структуры, локализованные в виде шлейфов (рис. 4).

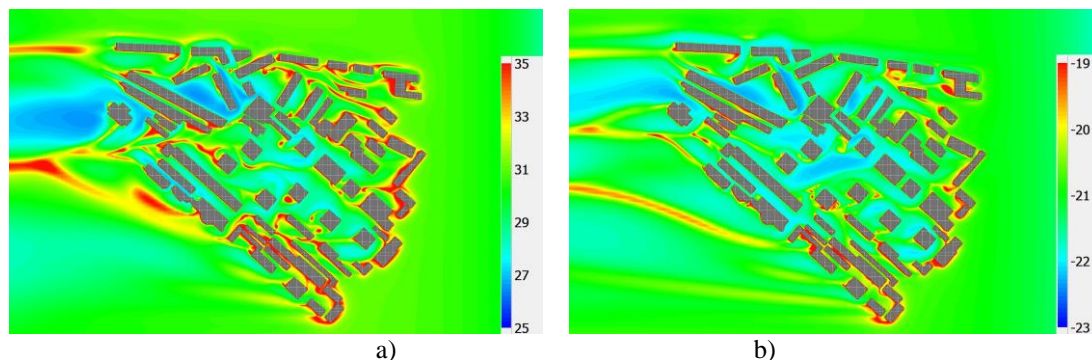


Рис. 5. Поле температуры на высоте 2 м, $^\circ\text{C}$: а) 12 ч, Вариант 1; б) 13 ч, Вариант 3

Fig. 5. Temperature field at a height of 2 m, $^\circ\text{C}$: a) 12 p.m., Variant 1; b) 1 p.m., Variant 3

В зимнее время кроме солнечного излучения увеличивается роль тепла, поступающего в атмосферу от зданий. В данном исследовании не рассматриваются тепловые источники, связанные кондиционированием, вентиляцией и потреблением электрической мощности, а только связанные с перепадом температур между внутренними помещениями зданий и окружающей средой. Когда солнечное излучение еще присутствует, даже в условиях заходящего солнца осуществляется прогрев освещенных стен, в то же время на затененных поверхностях зданий уже наблюдаются тепловые потери (рис. 6а). После заката тепло теряется со всех поверхностей зданий, при этом на крыше потери меньше как вследствие большего термического сопротивления, так и из-за большего потока теплового излучения от атмосферы. Падающее на крыши тепловое излучение атмосферы поступает с полусферы, а на стены только с четверти, также здания могут затенять друг друга. В итоге здания становятся источником прогрева приземной атмосферы, наблюдаемый рост температуры воздуха не превышает $0,5^\circ\text{C}$ (рис. 6б).

Метеорология

Литвинцев К.Ю., Мешкова В.Д., Филимонов С.А.

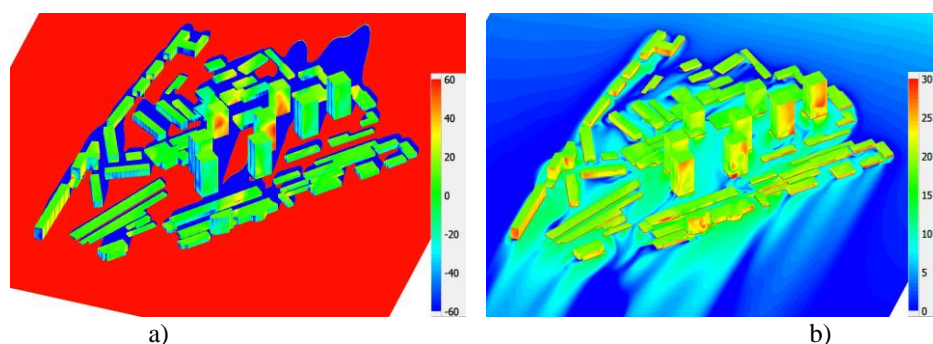


Рис. 6. Поле теплового потока на поверхности зданий, Вт/м². Вариант 3: а) 15 ч, тень от зданий на земле; б) 0 ч, дополнительное горизонтальное сечение поля температур (шкала $-23...-22,7^{\circ}\text{C}$)

Fig. 6. Heat flux field on the surface of the buildings, W/m². Variant 3: a) 3 p.m., the buildings' shadow on the ground; b) 12 a.m., additional horizontal section of the temperature field (scale $-23...-22,7^{\circ}\text{C}$)

Распределение температуры и скорости в области высотных зданий носит не однородный и нестационарный характер, что наглядно отражает динамика распределения температур и скорости вдоль линии l . Наиболее сильные перепады температур наблюдаются для летних вариантов 1 и 2.

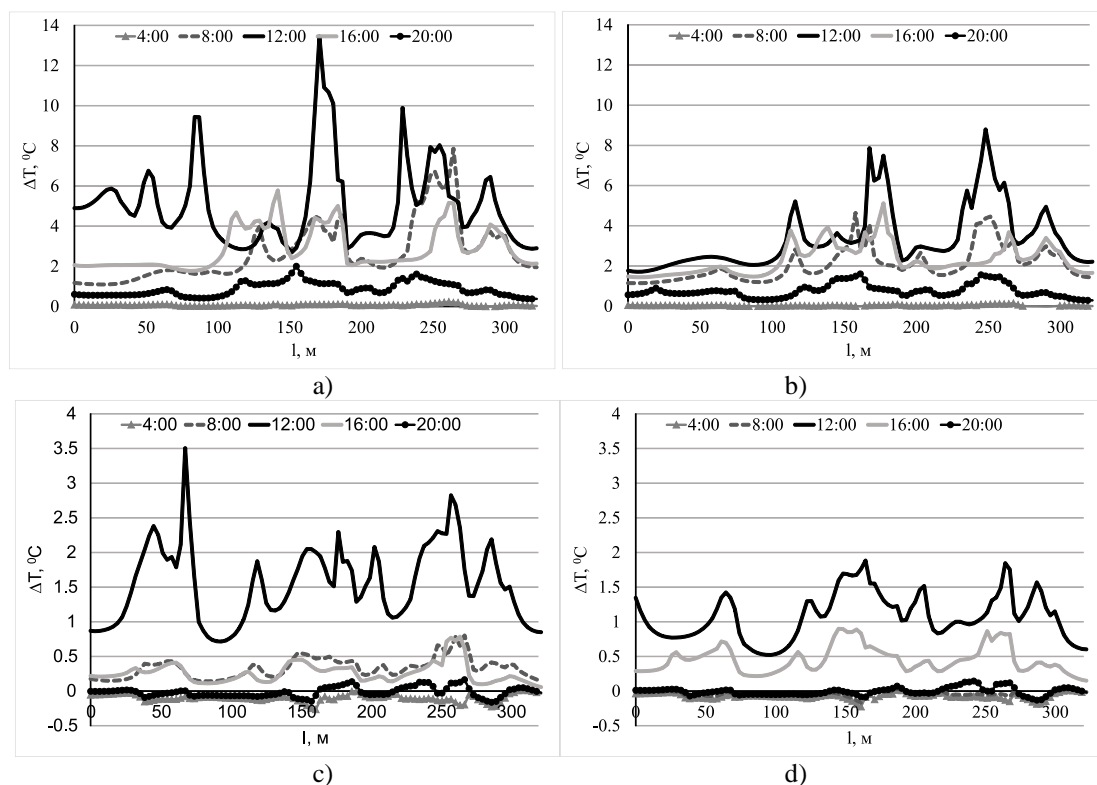


Рис. 7. Распределение отклонения от температуры входящего потока вдоль линии l (рис. 1), $^{\circ}\text{C}$.

а) Вариант 1; б) Вариант 2; в) Вариант 3; д) Вариант 4

Fig. 7. Deviation from the incoming flow temperature along the monitoring line l (Fig. 1), $^{\circ}\text{C}$.

а) Variant 1; б) Variant 2; в) Variant 3; д) Variant 4

Для обоих вариантов в областях $l=170$ и 250 м наблюдаются пики температур (рис. 7а, б). Этим пикам соответствуют сильные возвратные течения (рис. 8а, б) и дополнительный нагрев от стен зданий тепловым и отраженным солнечным излучением (рис. 2). В зимних вариантах распределение температур имеет более равномерную структуру, в полдень перепад температур не превышает 3°C , а в облачную погоду – $1,5^{\circ}\text{C}$ (рис. 7с, д). Области рециркуляции остаются, но их интенсивность падает (рис. 8с, д). Кроме этого, зимой из-за снижения содержания паров воды в ночное время наблюдается выхолаживание приземной атмосферы (рис. 7с, д), которое более заметно в ясную погоду.

В целом распределение температур меняется в значительно большей степени, чем скорость. В ходе суточной динамики распределение температур не только заметно меняет свою величину, но и структуру, особенно при

Метеорология

Литвинцев К.Ю., Мешкова В.Д., Филимонов С.А.

сравнении дневного и ночного режима. Распределение скорости в меньшей степени зависит от суточной динамики солнечного излучения. Распределение скорости вдоль линии l сохраняет подобие как в дневное, так и в ночное время. Наибольшие изменения наблюдаются для варианта 1, в котором действие солнечного излучения максимально, в частности в ночное время почти полностью исчезает возвратное течение в областях $l=170$ и 250 м. Наименьшие изменения наблюдаются для варианта 4, в котором действие солнечного излучения минимально (рис. 7).

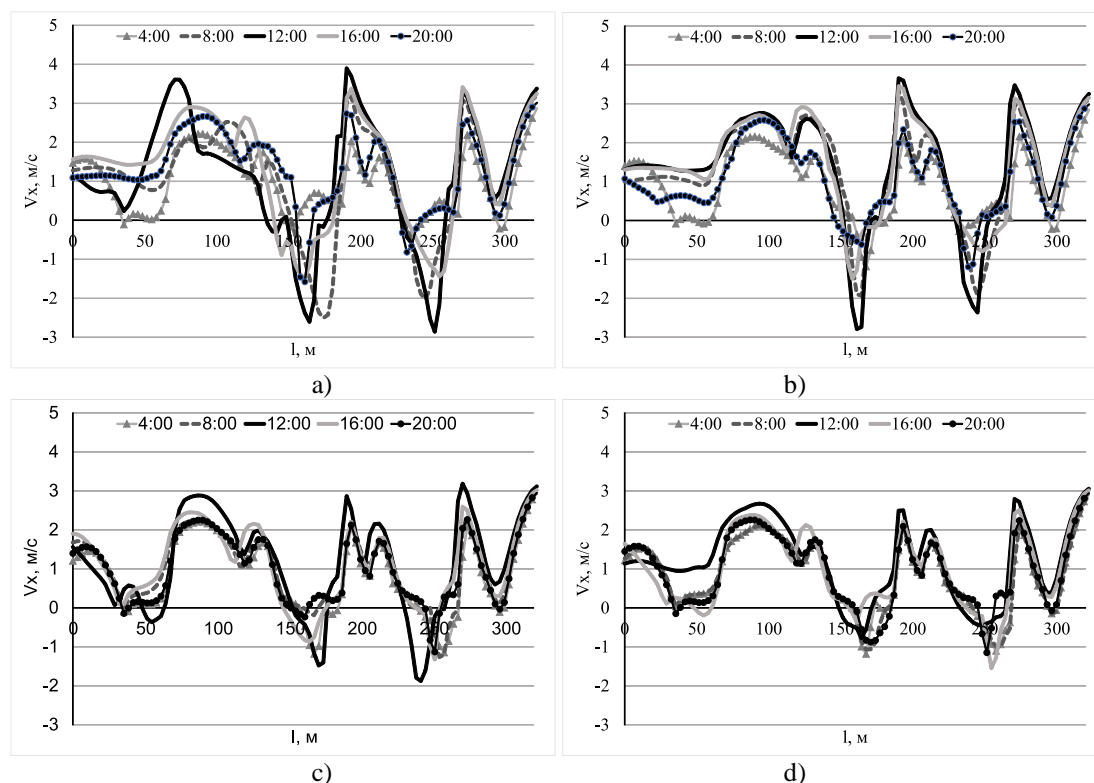


Рис. 8. Распределение компоненты скорости V_x вдоль линии l (рис. 1), м/с. а)

Вариант 1; б) Вариант 2; в) Вариант 3; д) Вариант 4

Fig. 8. The velocity component V_x along monitoring line l (Fig. 1), m/s.

а) Variant 1; б) Variant 2; в) Variant 3; д) Variant 4

Неравномерное и нестационарное распределение полей скорости, температур и излучения приводит к динамически меняющимся зонам пешеходной комфортности. Для Вариантов 1 и 2 для зонирования по уровням пешеходной комфортности используются «летние» критерии ЭЭТ и РЭЭТ (рис. 9а, б), а для Вариантов 3 и 4 – «зимний» критерий суровости S (рис. 9с).

В случае ЭЭТ в Вариантах 1 и 2 к кварталу подходит поток, который формирует однородную зону умеренной тепловой нагрузки «10» в 12 ч, уровень которой снижается к 17 ч до комфортного (тепло) «9». Непосредственно в городском квартале в 12 и 17 ч наличествуют 4 зоны: комфортная (умеренно тепло) – «8», комфортная (тепло) – «9», умеренная тепловая нагрузка – «10», сильная тепловая нагрузка – «11». Зона «8» занимает незначительную область на задней границе квартала по отношению к ветру, где сформировались условия высокой скорости и низкой температуры. Для 12 ч в ясный день в основном вблизи высотных и протяженных зданий преимущественно за счет увеличения скорости и снижения температуры потока формируются более холодные зоны «9». С другой стороны, из-за локальных перегревов воздуха, связанных с нагревом зданий солнечным излучением и формированием тепловых шлейфов, а также в областях с низкими скоростями, образовались более горячие зоны «11», характеризующиеся высоким уровнем дискомфорта. В условиях облачности наблюдается снижение температур, и условия пешеходной комфортности повышаются – преобладающими в квартале становятся зоны «9». Наличие городского квартала в рассматриваемом случае также приводит к тому, что, согласно ЭЭТ, за ним формируются более комфортные условия, чем перед ним. К вечеру, в 17 ч, уровень пешеходной комфортности в среднем возрастает, и доминирующей становится зона «9» (рис. 9с, д). Более теплые зоны «10» в основном сосредоточены вблизи малоэтажной застройки. Самые горячие зоны «11» практически исчезли. Площадь зон «8» увеличилась, но незначительно.

Метеорология

Литвинцев К.Ю., Мешикова В.Д., Филимонов С.А.

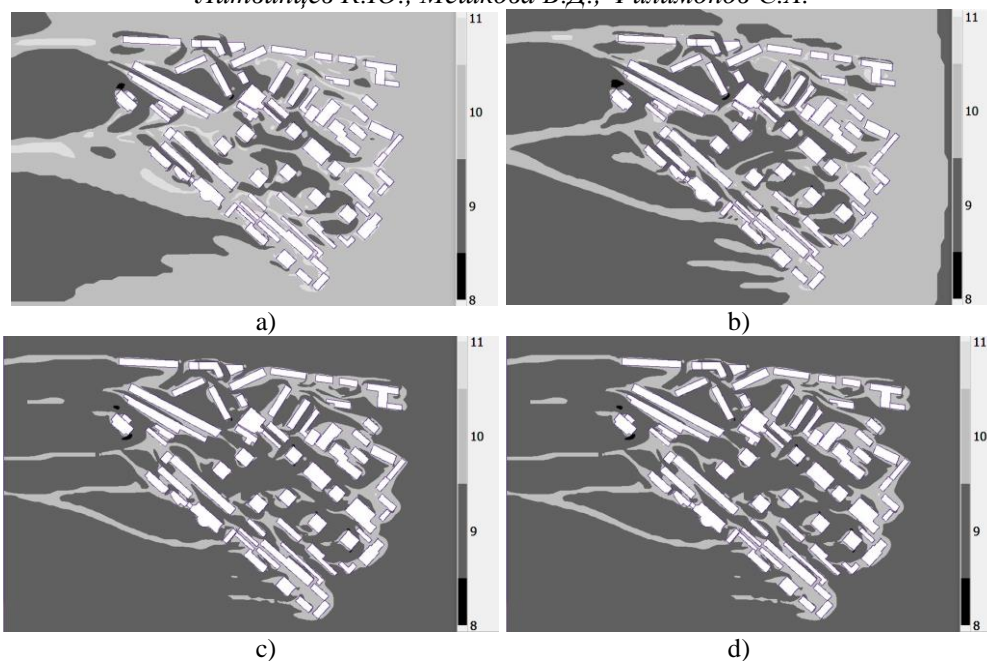


Рис. 9. Поле пешеходной комфортности на основе ЭЭТ:

а) Варианта 1, 12 ч; б) Варианта 2, 12 ч; в) Варианта 1, 17 ч; д) Варианта 2, 17 ч

Fig. 9. Human comfort field based on EET: a) Variant 1, 12 p.m.; b) Variant 2, 12 p.m.;

c) Variant 1, 5 p.m.; d) Variant 2, 5 p.m.

Согласно РЭЭТ, в летний полдень перед городским кварталом устанавливаются комфортно-теплые условия «9» в ясную погоду (Вариант 1) и комфортно-умеренно-теплые условия «8» при наличии облачности (Вариант 2), что напрямую обусловлено падением потока солнечного излучения (рис. 10а, б).

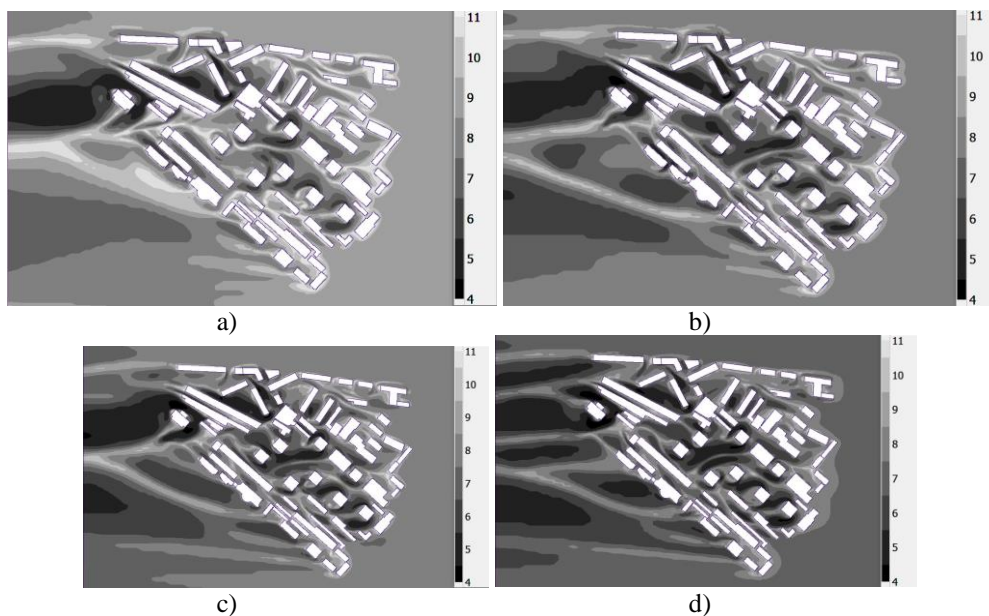


Рис. 10. Поле пешеходной комфортности на основе РЭЭТ:

а) Варианта 1, 12 ч; б) Варианта 2, 12 ч; в) Варианта 1, 17 ч; д) Варианта 2, 17 ч

Fig. 10 Human comfort field based on REET:

a) Variant 1, 12 p.m.; b) Variant 2, 12 p.m.; c) Variant 1, 5 p.m.; d) Variant 2, 5 p.m.

По сравнению с ЭЭТ критерием, для РЭЭТ количество сформировавшихся видов зон уровней комфорта в два раза больше. При этом внутри квартала самые холодные зоны комфорта РЭЭТ – очень прохладные «5» и умеренно прохладные «6» – также расположены вблизи высотных и протяженных зданий, только в отличие от ЭЭТ эти зоны не являются комфортными. Самая холодная зона комфорта – умеренно холодная «4» – расположена за кварталом по отношению к ветру в ясную погоду. Данная область характеризуется наиболее низкими

Метеорология

Литвинцев К.Ю., Мешкова В.Д., Филимонов С.А.

температурами (рис. 5а) и высокими скоростями ветра (рис. 3б). Такие условия обусловлены ее расположением между двумя основными восходящими потоками (рис. 4а), между которыми формируется нисходящее течение, за счет чего происходит охлаждение приземной области, так как в среднем на большей высоте температура воздуха ниже. В условиях облачности, несмотря на общее снижение температуры, уровень комфорта в данной области повышается из-за снижения интенсивности восходящих потоков, то есть можно говорить о формировании обратной связи, когда общее повышение температуры в приземной области приводит ее к локальному снижению. В ясную погоду в полдень зоны с умеренной «10» и сильной тепловой «11» нагрузкой занимают достаточно большие области и не только вблизи зданий, но и в тепловых шлейфах за кварталом (рис. 10а). Снижение интенсивности солнечного излучения за счет облачности и особенно в вечернее время приводит к существенному сокращению зон «11» вплоть до их фактического исчезновения (рис. 10д). В вечернее время зонами климатического комфорта остаются кварталы с малоэтажными зданиями, вблизи высотных домов образуются зоны относительно прохладные, особенно в центре городского квартала в устойчивой области повышенных скоростей (рис. 10с, д, рис. 3).

Стоит отметить, что в РЭЭТ хотя и присутствует учет воздействия солнечного излучения на человека, его вклад при расчете уровня комфортности минимален, что хорошо видно по отсутствию влияния теневых зон на поле пешеходной комфортности (рис. 10а, б).

Для зимнего времени зоны климатического комфорта строились согласно балльной системе Бодмана (S). Перед кварталом формируются условия, соответствующие очень суровым «5». Внутри квартала происходит понижение уровня комфорта до жестко суровых условий «4» вблизи высотных зданий, более теплых суровых зон «6» немного. В данном случае видно, что влияние облачности на климатический комфорт менее заметно, чем летом для ЭЭТ и РЭЭТ. Тем не менее в ясную погоду в среднем погода ощущается как более холодная, чем в облачную, из-за более высоких скоростей ветра (рис. 11а, б). В вечернее время в квартале снижаются как температуры (рис. 7с, д), так и скорость (рис. 8с, д), но в итоге падение скорости оказывает более сильное положительное воздействие, что приводит к заметному уменьшению зон «4».

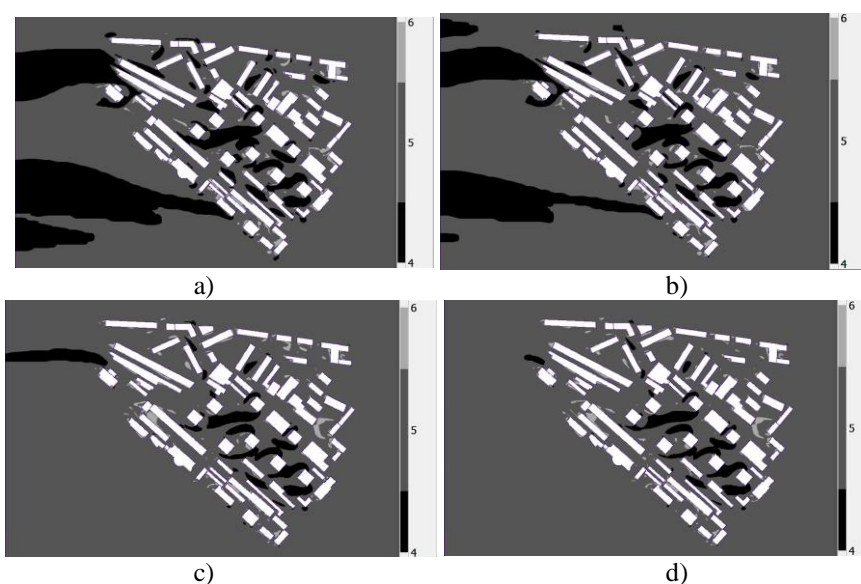


Рис. 11. Поле пешеходной комфортности на основе S:

а) Варианта 3, 12 ч; б) Варианта 4, 12 ч; в) Варианта 3, 17 ч; д) Варианта 4, 17 ч
 Fig. 11. Human comfort field based on S: a) Variant 1, 12 p.m.; b) Variant 2, 12 p.m.;
 c) Variant 1, 5 p.m.; d) Variant 2, 5 p.m.

Заключение

С использованием микромасштабной модели городской атмосферы, реализованной в программном комплексе SigmaEco, было проведено численное исследование суточной динамики процессов тепломассобмена в жилом квартале г. Красноярска в летний и зимний период времени, а также выполнена оценка влияния метеорологических условий на формирование пешеходной комфортности в условиях изменяющейся суточной инсоляции.

Приведенные результаты численного моделирования тепломассобменных процессов в условиях ясного и облачного неба показывают, что аэрационный режим в городской застройке носит нестационарный характер и зависит в первую очередь от суточной динамики солнечного излучения, которая определяется временем года и облачностью. Наличие облачности приводит к снижению интенсивности излучения и уменьшению его неоднородности из-за увеличения доли рассеянного излучения. Зимнее время характеризуется снижением мощности солнечного излучения и изменением нагрева поверхностей из-за более низкого расположения солнца, которое приводит к увеличению затененных областей. Тепловое излучение, особенно в летнее время, днем выступает в

Метеорология

Литвинцев К.Ю., Мешкова В.Д., Филимонов С.А.

качестве одного из механизмов отвода солнечного тепла, позволяя уменьшать нагрев поверхностей. В зимнее время посредством теплового излучения происходит выхолаживание наземных поверхностей и, соответственно, остывание приземной атмосферы, что приводит к дополнительному снижению скоростей на низких высотах.

Характер застройки также в значительной мере влияет на процессы тепломассопереноса, как минимум снижая среднюю скорость набегающего потока и перераспределяя тепло от солнечного излучения. При постоянных характеристиках ветра наиболее близким к адиабатическому обтеканию зданий является летний ночной режим, когда солнечное излучение отсутствует, наличие паров воды препятствует остыванию поверхностей и уменьшает воздействие антропогенных источников тепла. Особенностью данного района является наличие доминантных сооружений – высотных одноподъездных зданий. В отличие от малоэтажных зданий в приземной области для них возможно только боковое обтекание ветровым потоком, что способствует формированию локальных зон повышенных скоростей. Если высотные здания попадают в аэродинамическую тень от первых по отношению к ветру высотных зданий, то в этом случае области повышенных скоростей могут отсутствовать. Также они формируют большие области затенения, снижая прогрев земной поверхности и обеспечивая нагрев атмосферы на больших высотах. В рассматриваемом случае высотные здания образуют в центральной части квартала коридор, который при заданном направлении ветра формирует значительную по размерам и устойчивую область повышенных скоростей.

С точки зрения биоклиматических показателей, суточная динамика метеовеличин обуславливает непостоянство уровня пешеходной комфортности в городской среде, а наличие облачности приводит к изменению теплового воздействия. В целом солнечное излучение, с одной стороны, повышает температуру, а с другой стороны, приводит к росту скоростей, что провоцирует возникновение конкурирующих разнонаправленных трендов теплового воздействия на человека, вследствие чего, например, снижение величины солнечного излучения зимой может вызвать увеличение теплового комфорта. Если сравнивать уровень пешеходной комфортности по двум летним показателям, то ЭЭТ показывает более комфортные условия и меньшее число зон, чем РЭЭТ. Таким образом, вопрос выбора биоклиматических показателей требует дополнительного анализа их применимости для оценки уровня пешеходного комфорта к конкретным условиям. Кроме того, в рассматриваемых биоклиматических показателях отсутствует радиационная составляющая (ЭЭТ и S) или ее влияние минимально (РЭЭТ), что имеет особенно существенное значение в летнее время, когда нахождение в тени или под прямым солнечным излучением значительно влияет на ощущение комфортности.

В итоге полученные результаты численного моделирования демонстрируют влияние на пешеходную комфортность не только внутренней геометрии городского квартала и характеристик ветрового потока, но и суточной динамики метеовеличин, определяемой изменением потока солнечного излучения.

Библиографический список

1. Андреев С.С. Биоклиматические показатели (индексы) // Известия ВУЗов. Северо-кавказский регион. 2007. № 4. С. 109–110. EDN: KZQOYZ
2. Богатырев Д.С., Медведев Ю.Ф., Юденич Е.В., Яцковская И.Ю., Болинаков Р.П., Коркина Е.В. Расчеты теплопоступлений в здание от проникающей солнечной радиации за отопительный период: методическое пособие. М., 2017. С. 117.
3. Головина Е.Г., Трубина М.А. Методика расчетов биометеорологических параметров (индексов). СПб, 1997. 110 с.
4. Добрынина И.В., Акимов Л.М., Куролан С.А. Медико-географическая оценка климатической комфортности территории Воронежской области // Вестник ВГУ. 2013. № 1. С. 120–128. EDN: QYPDFV
5. Кузякина М.В., Гура Д.А. Оценка комфортности биоклиматических условий Краснодарского края с применением ГИС-технологий // Юг России: экология, развитие. 2020. Т. 15. 3. С. 66–76. DOI: 10.18470/1992-1098-2020-3-66-76 EDN: EETFRM
6. Мешкова В.Д., Шульженко П.Д., Дектерев А.А., Литвинцев К.Ю., Мешков К.Н. Численное исследование формирования аэрационного режима и условий ветрового комфорта в разных морфотипах городской застройки // Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем: материалы и доклады. 2023. С. 251–254. DOI: 10.25743/SSTS.2023.80.52.061 EDN: FXOSRF
7. Красноярский край, Тувинская АССР // Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Л.: Гидрометеиздат, 1990. Вып. 21, Кн. 1. С. 623.
8. Парфенова Е.Е., Переведенцев Ю.П. Особенности биоклимата г. Ульяновска в начале XXI века // Географический вестник. 2022. № 2 (61). С. 61–72. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-2-61-72 EDN: ERSATR
9. Переведенцев Ю.П., Шумихина А.В. Динамика биоклиматических показателей комфортности природной среды в Удмуртской республике // Ученые записки казанского университета. Серия Естественные науки. 2016. Т. 158, Кн. 4. С. 531–547. EDN: XWRPVV
10. Поддаева О.И., Дубинский С.И., Федосова А.Н. Численное моделирование ветровой аэродинамики высотного здания // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 9. С. 23–27. EDN: SNJBVH
11. Свод правил. Строительная климатология СНиП 23-01-99. 2021.
12. Cassol F., Brittes R., França F., Ezekoye O. Application of the weighted-sum-of-gray-gases model for media composed of arbitrary concentrations of H₂O, CO₂ and soot // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 79. P. 796–806. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.032 EDN: UUUUUTL
13. Chai J. C., Lee H.S., Patankar S.V. Finite-Volume Method for Radiation Heat Transfer // Journal of thermophysics and heat transfer. 1994. No. 8 (3). P. 419–425. DOI: 10.2514/3.559 DOI: 10.2514/3.559.
14. Coccolo S., Kämpf J., Scartezzi J.-L., Pearlmutter D. Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards // Urban Climate. 2016. Vol. 18. P. 33–57. DOI: 10.1016/j.uclim.2016.08.004 EDN: YWDTPL
15. Gao Z., Bressona R., Y. Qua Y., Maya M., Munck C., Carissimova B. High resolution unsteady RANS simulation of wind, thermal effects and pollution dispersion for studying urban renewal scenarios in a neighborhood of Toulouse // Urban Climate. 2018. Vol. 23. P. 114–130. DOI: 10.1016/j.uclim.2016.11.002
16. Huo H., Chen F., Geng X., Tao J., Liu Z., Zhang W., Leng P. Simulation of the Urban Space Thermal Environment Based on Computational Fluid Dynamics: A Comprehensive Review // Sensors. 2021. 21. 6898. DOI: 10.3390/s21206898 EDN: SXRHIF
17. Kalogeropoulos G., Dimoudi A., Touboulidis P., Zoras S. Urban Heat Island and Thermal Comfort Assessment in a Medium-Sized Mediterranean City // Atmosphere. 2022. 13. 1102. DOI: 10.3390/atmos13071102 EDN: AMNSVR

Метеорология

Литвинцев К.Ю., Мешкова В.Д., Филимонов С.А.

18. Korniyenko S.V. The influence of the sky radiative temperature on the building energy performance // Magazine of Civil Engineering. 2022. 114 (6). Article No. 11412. DOI: 10.34910/MCE.114.12 EDN: URYDBV
19. Litvintsev K.Yu., Dekterev A.A., Meshkova V.D., Filimonov S.A. Influence of radiation on the formation of wind and temperature regimes in urban environment // Thermophysics and Aeromechanics. 2023. 30, 4. P. 683–694. DOI: 10.1134/s086986432304008x EDN: GUDWZR
20. Litvintsev K.Yu., Sentyabov A.V. Application of the finite volume method for calculating radiation heat transfer in applied problems // Bulletin of the south ural state university series-mathematical modelling programming & computer software. 2021. 14 (3). P. 77–91. DOI: 10.14529/mmp210306 EDN: DYDWLX
21. Louis J.F. A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere // Boundary-Layer Meteor. 1979. Vol. 17. 2. P. 187–202. DOI: 10.1007/BF00117978 EDN: XBVDSU
22. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications// AIAA Journal. 1994. 32. 8. P. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149
23. Meshkova V., Filimonov S., Dekterev A., Vetrov A., Shulzhenko P. Numerical prediction of bioclimatic comfort level of urban development in street spaces // E3S Web of Conferences. 2024. 592. 02012. EMMFT-2024 DOI: 10.1051/e3sconf/2024592020122 EDN: TTKYRH
24. Mochida A., Lun Y.F. Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area // J Wind Eng Ind Aerodyn. 2008. 96 (10). P. 1498–1527. DOI: 10.1016/j.jweia.2008.02.033
25. Modest M.F. The Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model for Arbitrary Solution Methods in Radiative Transfer // ASME Journal of Heat Transfer. 1991. Vol. 113 (3). P. 650–656.
26. Ogura Y., Charney J.G. A numerical model of thermal convection in the atmosphere. // Proc. Int. Symp. on Numerical Weather Prediction, Tokyo, Japan, Meteorological Society of Japan. 1962. P. 431–451.
27. Qu Y., Milliez M., Musson-Genon L., Carissimo B. Numerical study of the thermal effects of buildings on low-speed airflow taking into account 3D atmospheric radiation in urban canopy // Journal of wind engineering and industrial aerodynamics. 2012. Vol. 104–106. P. 474–483. DOI: 10.1016/j.jweia.2012.03.008
28. Richards P., Hoxey R. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-ε turbulence model // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1993. Vol. 46–47. P. 145–153. DOI: 10.1016/0167-6105(93)90124-7
29. Robinson D. Computer modelling for sustainable urban design-physical principles, methods and applications. L.: Earthscan, 2011.
30. Tominaga Y., Shirzadi M. Wind tunnel measurement of three-dimensional turbulent flow structures around a building group: Impact of high-rise buildings on pedestrian wind environment // Building and Environment. 2021. Vol. 206. P. 108389. DOI: 10.1016/j.buide.2021.107504 EDN: FOUQII
31. Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies. Palme M., Salvati A. (Eds.). Springer Nature Switzerland. 2021. P. 560. DOI: 10.1007/978-3-030-65421-4
32. Vieira Zezzo L., Pereira Coltri P., Dubreuil V. Microscale models and urban heat island studies: a systematic review // Environmental Monitoring and Assessment. 2023. 195. 1284. DOI: 10.1007/s10661-023-11906-2 EDN: MQHCUD

References

1. Andreev S. S. (2007) Bioclimatic indicators (indices). News of higher education institutions. North Caucasian region. 4. pp. 109–110
2. Bogatyrev D.S., Medvedev Y.F., Yudenich E. V., Yatskovskaya I.Y., Bolynakovak R.P., Korkina E.V. (2017) Methodical manual. Calculations of heat input to the building from incident solar radiation during the heating period. Moscow.
3. Golovina E.G., Trubina M.A. (1997) Methodology for calculating biometeorological parameters (indices). St. Petersburg.
4. Dobrynina I.V., Akimov L.M., Kurolap S.A. (2013) Medical and geographical assessment of climatic comfort in Voronezh oblast, Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology, 1, pp. 120–128.
5. Kuzyakina M.V., Gura D.A. (2020) Assessment of bioclimatic comfort of the Krasnodar territory, Russia through the application of GIS-technologies. South of Russia: ecology, development, Vol 15, 3, pp. 66–76. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2020-3-66-76>
6. Meshkova V.D., Shulzhenko P.D., Dekterev A.A., Litvintsev K. Yu., Meshkov K.N. (2023) Numerical study of the formation of the aeration regime and wind comfort conditions in different morphotypes of urban development, Safety and monitoring of technogenic and natural Systems. Materials and reports. P. 251–254. <https://doi.org/10.25743/SSTS.2023.80.52.061>
7. Scientific and applied handbook on the climate of the USSR, Krasnoyarsk Territory, Tuvan ASSR, no 21. vol 1. 1990. L.: Gidrometeoizdat.
8. Parfenova E. E., Perevedentsev Y. P. (2022) The bioclimate of Ulyanovsk at the beginning of the 21st century. Geographical Bulletin, 2(61), pp. 61–72. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2022-2-61-72>
9. Perevedentsev Yu. P., Shumikhina A. V. (2016) Dynamics of bioclimatic indicators of comfort of the natural environment in the Udmurt Republic. Scientific notes of Kazan University. Series of Natural Sciences. 158. 4. pp. 531–547.
10. Poddaeva O.I., Dubinsky S.I., Fedosova A.N. (2014) Numerical simulation of wind aerodynamics of a high-rise building. Industrial And Civil Engineering. 2014. 9. pp. 23–27.
11. Set of rules. Building climatology. SNiP 23-01-99. (2021).
12. Cassol F., Brittes R., França F., Ezekoye O. (2014) Application of the weighted-sum-of-gray-gases model for media composed of arbitrary concentrations of H₂O, CO₂ and soot, International Journal of Heat and Mass Transfer, 79, pp. 796–806 <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.032>.
13. Chai, J. C., Lee H.S. (1994) Patankar, S. V. Finite-Volume Method for Radiation Heat Transfer, Journal of thermophysics and heat transfer, 8(3), pp. 419 – 425. <https://doi.org/10.2514/3.559>.
14. Cocolo S., Kämpf J., Scartezzini J.-L., Pearlmutter D. (2016) Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. Urban Climate. Vol. 18, pp. 33–57. doi: 10.1016/j.uclim.2016.08.004.
15. Gao Z., Bressona R., Y. Qu Y., M. Maya, Munckb C., Carissimoo B. (2018) High resolution unsteady RANS simulation of wind, thermal effects and pollution dispersion for studying urban renewal scenarios in a neighborhood of Toulouse. Urban Climate. Vol. 23, pp. 114–130. doi: 10.1016/j.uclim.2016.11.002
16. Huo H., Chen F., Geng X., Tao J., Liu Z., Zhang W., Leng P. (2021) Simulation of the Urban Space Thermal Environment Based on Computational Fluid Dynamics: A Comprehensive Review. Sensors. 21. 6898. doi: 10.3390/s21206898.
17. Kalogeropoulos G., Dimoudi A., Touboulidis P., Zoras S. (2022) Urban Heat Island and Thermal Comfort Assessment in a Medium-Sized Mediterranean City. Atmosphere. 13. 1102. doi: 10.3390/atmos13071102
18. Korniyenko, S.V. (2022) The influence of the sky radiative temperature on the building energy performance. Magazine of Civil Engineering. 114(6). Article No. 11412. doi:10.34910/MCE.114.12
19. Litvintsev K.Yu., Dekterev A.A., Meshkova V. D., Filimonov S.A. (2023) Influence of radiation on the formation of wind and temperature regimes in urban environment, Thermophysics and Aeromechanics, 30(4), pp. 683–694. <https://doi.org/10.1134/s086986432304008x>
20. Litvintsev K. Yu., Sentyabov A. V. (2021) Application of the finite volume method for calculating radiation heat transfer in applied problems, Bulletin of the south ural state university series-mathematical modelling programming & computer software, 14 (3), pp. 77–91. <https://doi.org/10.14529/mmp210306>.

Метеорология

Литвинцев К.Ю., Мешкова В.Д., Филимонов С.А.

21. Louis J.F. (1979) A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, *Boundary-Layer Meteorol.* 17(2), pp. 187–202. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00117978>.
22. Menter, F.R. (1994) Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, *AIAA Journal*, 32, 8, pp. 1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>.
23. Meshkova V., Filimonov S., Dekterev A., Vetrov A., Shulzhenko P. (2024) Numerical prediction of bioclimatic comfort level of urban development in street spaces, *E3S Web of Conferences* 592, 02012. EMMFT-2024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202459202012>
24. Mochida A. and Lun Y.F. (2008) Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area. *J Wind Eng Ind Aerodyn.* 96 (10). pp. 1498–1527. doi:10.1016/j.jweia.2008.02.033
25. Modest M.F. (1991) The Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model for Arbitrary Solution Methods in Radiative Transfer, *ASME Journal of Heat Transfer*, 113 (3), pp. 650–656.
26. Ogura, Y., Charney J. G. (1962) A numerical model of thermal convection in the atmosphere, *Proc. Int. Symp. on Numerical Weather Prediction*, Tokyo, Japan, Meteorological Society of Japan, pp. 431–451.
27. Qu Y., Milliez M., Musson-Genon L., Carissimo (2012) B. Numerical study of the thermal effects of buildings on low-speed airflow taking into account 3D atmospheric radiation in urban canopy. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*. Vol. 104–106. pp. 474–483. doi: 10.1016/j.jweia.2012.03.008
28. Richards P., Hoxey R. (1993) Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-ε turbulence model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 46–47, pp. 145–153. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(93\)90124-7](https://doi.org/10.1016/0167-6105(93)90124-7).
29. Robinson D. (2011) *Computer modelling for sustainable urban design-physical principles, methods and applications*. L.: Earthscan.
30. Tominaga Y., Shirzadi M. (2021) Wind tunnel measurement of three-dimensional turbulent flow structures around a building group: Impact of high-rise buildings on pedestrian wind environment. *Building and Environment*. Vol. 206. 108389. doi: 10.1016/j.bld.2021.107504
31. Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies. (2021) Palme M., Salvati A. (Eds.). Springer Nature Switzerland. doi: 10.1007/978-3-030-65421-4
32. Vieira Zezzo L., Pereira Coltri P., Dubreuil V. (2023) Microscale models and urban heat island studies: a systematic review. *Environmental Monitoring and Assessment*. 195. 1284. doi: 10.1007/s10661-023-11906-2

Статья поступила в редакцию: 28.04.25, одобрена после рецензирования: 03.06.25, принята к опубликованию: 12.12.25.

The article was submitted: 28 April 2025; approved after review: 3 June 2025; accepted for publication: 12 December 2025.

Информация об авторах

Кирилл Юрьевич Литвинцев

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт теплофизики Сибирского отделения Российской академии наук; 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1

e-mail: sttupick@yandex.ru

Виктория Дмитриевна Мешкова

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Сибирский Федеральный Университет; 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

e-mail: redel-vd@yandex.ru

Сергей Анатольевич Филимонов

кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт теплофизики Сибирского отделения Российской академии наук; 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1

e-mail: bdk@inbox.ru

Information about the authors

Kirill Yu. Litvintsev

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Institute of Thermal Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, prospekt Akdeimika Lavrentieva, Novosibirsk, 630090, Russia

Victoriya D. Meshkova

Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Siberian Federal University; 79, Svobodny prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russia

Sergey A. Filimonov

Candidate of Engineering Sciences, Researcher, Institute of Thermal Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 1, prospekt Akdeimika Lavrentieva, Novosibirsk, 630090, Russia

Вклад авторов

Литвинцев К.Ю. – численное моделирование, интерпретация результатов исследования, написание текста статьи.

Мешкова В.Д. – сбор материала, подготовка обзора литературы по данному исследованию, написание текста статьи.

Филимонов С.А. – создание расчетной области и сетки, научное редактирование текста.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Kirill Yu. Litvintsev – numerical simulation, interpretation of the results of the study, writing the text of the article.

Victoriya D. Meshkova – collection and generalization of the database, writing the text of the article.

Sergey A. Filimonov – creating computational domain and grid, scientific editing of the text.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.