УДК 536.33, 532.5, 51-73

Влияние излучения на формирование ветрового и температурного режимов в городской среде^{*}

К.Ю. Литвинцев¹, А.А. Дектерев¹, В.Д. Мешкова², С.А. Филимонов¹

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск ²Сибирский федеральный университет, Красноярск

E-mail: sttupick@yandex.ru

В работе проводится расчетное исследование влияния солнечного и теплового излучений на формирование ветрового и температурного режимов в городской среде на примере района г. Красноярска зимой. Для расчетов использовалась разработанная микромасштабная математическая модель городской атмосферы. Результаты расчетов показали, что наличие излучения в дневное время приводит к росту температуры и средней скорости, а также к формированию нестационарного ветрового режима в городской среде.

Ключевые слова: городская среда, излучение, теплообмен, ветровой режим.

Введение

Наблюдающийся в мире процесс урбанизации закономерно привел к появлению исследований с применением как физического, так и численного моделирования процессов тепломассопереноса, протекающих в городской среде [1-9], основная цель которых заключается в повышении безопасности и комфортности проживания людей в данных условиях. В рамках указанных исследований изучаются следующие аспекты: формирование городского острова тепла [8, 9], ветровое обтекание как городских кварталов, так и отдельных зданий [2, 6], распространение загрязняющих веществ [5], влияние городской застройки на условия формирования пешеходного уровня комфорта [1], процессы тепломассопереноса в отдельных кварталах [4, 5, 7]. Для этих целей используется специализированное программное обеспечение [4, 7] или адаптируются универсальные коммерические программные комплексы [6, 8].

В настоящей работе рассматривается влияние солнечного и теплового излучения в зимнее время на формирование ветрового и теплового режимов на примере района города Красноярск, в котором расположены здания разной этажности — от 10 до 25 и одно самое высокое в 30 этажей (120 м). Исследование влияния излучения в зимнее время связано с несколькими факторами: во-первых, изменение аэрационного режима

^{*} Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-61-00098, https://rscf.ru/project/22-61-00098/.

[©] Литвинцев К.Ю., Дектерев А.А., Мешкова В.Д., Филимонов С.А., 2023

при низких температурах наиболее сильно влияет на уровень пешеходного комфорта; во-вторых, из-за низкого расположения солнца над горизонтом городская застройка эффективнее поглощает солнечное излучение; в-третьих, в это время года здания также являются источниками тепла и влияют на тепломассообменные процессы.

Моделирование процессов, происходящих в атмосфере города, проводилось на основе микромасштабной модели городской атмосферы, которая разрабатывалась в рамках специализированного программного обеспечения, созданного на базе программного комплекса SigmaFlow [10]. Для описания переноса солнечного и теплового излучений использовался адаптированный метод конечного объема [11] с граничными условиями, созданными на основе моделей, представленных в работах [1, 12–14].

Микромасштабная математическая модель городской атмосферы

Микромасштабная математическая модель городской атмосферы основывается на осредненных по Рейнольдсу нестационарных уравнениях Навье – Стокса (URANS) для несжимаемых течений в неупругом приближении [15, 16]. Система уравнений для осредненных метеорологических величин включает:

— уравнение неразрывности:

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

— уравнение движения:

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

— уравнение сохранения энергии, которое записывается через потенциальную температуру θ , K:

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

где d/dt — субстанциональная производная; V — вектор скорости, м/с; ρ_z — гидростатическая плотность, кг/м³; 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; **g** — ускорение свободного падения, м/с²; Pr_t — турбулентное число Прандтля.

Связь потенциальной температуры, температуры и статического давления на высоте *z* описывается как:

$$\theta_z = T \left(P_0 / P_z \right)^{\kappa},$$

где $k = R_M/C_p$; R_M — газовая постоянная для воздуха, Дж/(кг·K); P_0 — атмосферное давление, равное 101 кПа. Гидростатическую плотность ρ_z можно записать через потенциальную температуру, используя уравнения состояния идеального газа $P = \rho R_M T$:

$$\rho_z = \frac{P_z^k \cdot P_0^{1-k}}{R_M \cdot \theta_z}.$$

Далее распределение ρ_z рассчитывается на основе решения уравнения гидростатики — $dP_z = -\rho_z \cdot g \cdot dz$.

Для описания турбулентных характеристик применяется двухпараметрическая URANS *k*-*ω* SST модель [17]. Для учета влияния объемной силы (плавучести) на генерацию/диссипацию турбулентной кинетической энергии в уравнения переноса кинетической энергии турбулентных пульсаций и ее скорости диссипации добавляются модельные слагаемые, пропорциональные градиенту потенциальной температуры.

В рассматриваемой задаче для расчетов переноса солнечного и теплового излучений решается стационарное уравнение переноса излучения (УПИ) в приближении серой среды и без учета рассеяния:

$$\frac{\partial I(\mathbf{r},\mathbf{s})}{\partial s} = -a(\mathbf{r})I(\mathbf{r},\mathbf{s}) + a(\mathbf{r})I_{\rm b}(\mathbf{r},\mathbf{s}),$$

где I — интенсивность излучения, Вт/(м²·cp); I_b — интенсивность излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·cp); a — коэффициент поглощения, м⁻¹; **r** — радиус-вектор, **s** — единичный вектор углового направления.

Решение УПИ основано на методе конечных объемов [11, 18]. В рамках метеорологической модели поле излучения разделяется на коротковолновое солнечное излучение и длинноволновое излучение атмосферы и поверхности земли, для каждого из которых отдельно решается свое УПИ [4].

Начальное и граничное распределения потенциальной температуры описывают устойчивую атмосферу ($d\theta_z/dz > 0,0$). В настоящей работе изменение потенциальной температуры по высоте задается в виде линейной функции:

$$\theta_z = G_\theta \cdot z + \theta_{z0}$$

где G_{θ} — коэффициент приращения потенциальной температуры, К/м; θ_{z0} — потенциальная температура вблизи поверхности. Такое распределение с $G_{\theta} = 0,01$ позволяет получить практически постоянное значение температуры по высоте.

В качестве граничных условий на входе также задаются распределение скорости и турбулентные характеристики для устойчивой атмосферы [5-7]:

$$u(z) = \frac{u_*}{K} \left(\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + 4, 7 \cdot \xi \right),$$
$$\varepsilon(z) = \frac{u_*^3}{K \cdot z} (1 + 4 \cdot \xi),$$
$$k(z) = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \sqrt{\frac{1 + 5 \cdot \xi}{1 + 4 \cdot \xi}},$$

где $c_{\mu} = 0,09$; К = 0,4 — константа Кармана; $\xi = z/L$; z_0 — шероховатость, м; L — масштаб Обухова, м.

Суммарный поток излучения на поверхность можно описать следующим образом:

$$S_{\rm rad} = S_{\rm Si} - S_{\rm So} + S_{\rm Li} - S_{\rm Lo},$$

где S_{Si} и S_{So} — падающее и отраженное коротковолновые излучения, а S_{Li} и S_{Lo} — падающее и исходящее длинноволновые излучения с поверхности, Вт/м².

Солнечное падающее излучение разделяется на прямое S_{Si}^{Dir} и рассеянное S_{Si}^{Dif} , которые задаются на открытых границах расчетной области:

$$\begin{split} S_{\mathrm{Si}} &= S_{\mathrm{Si}}^{\mathrm{Dir}} + S_{\mathrm{Si}}^{\mathrm{Dir}}, \\ S_{\mathrm{Si}}^{\mathrm{Dir}} &= C \cdot S_0 \cdot \tau_{\mathrm{r}} \cdot \tau_{\mathrm{asc}} \cdot \prod_i \tau_i, \\ S_{\mathrm{Si}}^{\mathrm{Dif}} &= S_{\mathrm{Si}}^{\mathrm{Dr}} + S_{\mathrm{Si}}^{\mathrm{Da}}, \\ S_{\mathrm{Si}}^{\mathrm{Dr}} &= 0, 79 \cdot S_0 \cdot \cos Z \cdot \tau_{\mathrm{asc}} \cdot \prod_i \tau_{ii} \left(1 - \tau_{\mathrm{r}}\right) \frac{0, 5}{1 - M + M^{1,02}}, \\ S_{\mathrm{Si}}^{\mathrm{Da}} &= 0, 79 \cdot S_0 \cdot \cos Z \cdot \tau_{\mathrm{r}} \cdot \prod_i \tau_i \left(1 - \tau_{\mathrm{asc}}\right) \frac{F_{\mathrm{c}}}{1 - M + M^{1,02}}, \end{split}$$

где τ_i , τ_r , τ_{asc} — коэффициенты пропускания атмосферы при поглощении излучения различными газами и аэрозолями, при ослаблении излучения за счет рэлеевского рассеяния и рассеяния на аэрозолях соответственно [12, 13]; S_0 — поток солнечного излучения, доходящего до атмосферы Земли, BT/M^2 ; S_{Si}^{Dr} , S_{Si}^{Da} — поток рассеянного солнечного излучения за счет рэлеевского рассеяния и рассеяния на аэрозолях, BT/M^2 ; F_c — доля излучения, рассеянного вперед.

Поле длинноволнового излучения определяется степенью черноты атмосферы ε_{atm} и степенью черноты поверхности земли ε_{sfc} . Поток падающего теплового излучения безоблачной атмосферы задается на верхней открытой границе расчетной области в виде

$$S_{\rm Li} = \varepsilon_{\rm atm} \cdot \sigma \cdot T_{\rm amb}^4$$

В рассматриваемой задаче $\varepsilon_{\text{atm}} = 0,7$ для условий ясного неба и приземной нулевой влажности [14], T_{amb} — температура окружающей среды, измеряемая, в частности, на наземных метеостанциях.

На боковых открытых границах ставится условие полного зеркального отражения. Поток исходящего с поверхности теплового излучения определяется следующим образом:

$$S_{\rm Lo} = \varepsilon_{\rm sfc} \cdot \sigma \cdot T_{\rm sfc}^4 + (1 - \varepsilon_{\rm sfc}) \cdot S_{\rm Li},$$

где $T_{\rm sfc}$ — температура поверхности, которая рассчитывается при решении задачи сопряженного теплообмена. Для расчета температуры на поверхности реализована модель сопряженного теплообмена, включающая в себя одномерное нестационарное уравнение теплопроводности для зданий со стенами и крышами, но без учета остекленения и «земли».

Результаты тестирования реализованных в программе SigmaFlow математических моделей представлены в публикациях [19, 20]. В работе [19] приведены результаты моделирования канонической задачи отрывного течения в расширяющемся канале, которые показали хорошее согласование с данными эксперимента; радиационного теплопереноса в замкнутой области, наполненной парами воды, которые продемонстрировали полное совпадение с результатами расчетов других авторов; сопряженного теплообмена в прозрачной для излучения газовой среде в геометрически сложной расчетной области, которые показали отличие по распределению температуры от результатов расчетов, проведенных в программе ANSYS Fluent, не более 1 %. В работе [20] выполнено сравнение результатов численного моделирования и данных экспериментов по обтеканию как одиночного модельного здания, так и модельного квартала. Для случая обтекания одиночного модельного здания получено хорошее согласование результатов расчетов и данных экспериментов по распределению скоростей. Результаты моделирования обтекания воздушным потоком модельного квартала показали в целом удовлетворительное согласование с данными эксперимента, продемонстрировав при этом лучшее совпадение по сравнению с собственными расчетами авторов тестовой задачи.

Постановка задачи

Исследуемый район города расположен вблизи крупного торгово-развлекательного центра (рис. 1), он обтекается слабым сухим воздушным потоком в ясную погоду, расположение солнца на небосклоне соответствует 30 января. Скорость ветра на высоте 10 м составляте 2,5 м/с, а на высоте 2 м — 1,7 м/с. Термическое сопротивление для стен и крыш зданий задавалось равным 1 м²К/Вт. Температура вблизи поверхности составляла – 20 °С (253 K), коэффициент приращения потенциальной температуры по высоте — 0,01 К/м, что обеспечивало постоянное значение температуры по высоте, равное 253 К. $T_{\rm amb}$ также принималась равной 253 К. Данные характеристики примерно соответствуют границе комфортности тепловых условий для человека. Поверхность земли, кроме дорог, считается покрытой снегом. Альбедо снега составляет 0,5, дороги — 0,18, а зданий — 0,25–0,35.

Расчетная область разбивалась на 5 млн ячеек с горизонтальным шагом дискретизации от 2 м вблизи зданий до 4 м на удалении от них. Минимальная высота ячейки составляла 0,4 м вблизи поверхности земли и 16 м на верхней границе расчетной области (около 500 м). Угловое пространство, используемое при расчете радиационного переноса, разделено на 24 контрольных угла с переменным дискретным шагом в соответствии с FTn-модификацией метода конечного объема [11]. Шаг по времени составлял 5 секунд, при этом величина локального числа Куранта не превышала 10.

Район разбит на четыре области, разделенные дорогой. Интерес к изучению выбранного района заключается в том, что он включает в себя разнородные современные микрорайоны, для которых характерна комбинация зданий разной геометрии и высотности, также в нем находится один из наиболее крупных торгово-развлекательных центров города, в котором наблюдается активный уровень жизнедеятельности населения.

Для оценки изменения ветрового и температурного режимов на высоте 2 м, на которой рассчитывается уровень пешеходной комфортности, были расставлены точки мониторинга (рис. 1). Задача рассчитывалась в двух постановках: в первой рассматривалось





обтекание района города воздушным потоком без теплообмена с городской средой, а во второй — с учетом переноса излучения и прогрева зданий и земли.

Результаты численного моделирования

При адиабатическом обтекании городской застройки происходит значительное снижение скорости по сравнению с набегающим ветровым потоком (рис. 2a). Практически по всей территории городской застройки на уровне высоты зданий образуются вихревые течения, что хорошо видно по изоповерхности нулевого значения горизонтальной компоненты скорости (рис. 2b), которая отображает границы возвратных вихревых течений. По результатам расчета в исследуемом районе города можно выделить четыре группы застройки, различающиеся по характеру формирования аэрационного режима. В первой области сосредоточены относительно низкие 10-этажные и протяженные здания, поэтому распределение скорости здесь наиболее равномерное, за исключением пространства между двумя первыми зданиями. Во второй группе присутствует доминирующее высотное здание (120 м) и более низкие постройки близкой высотности (10–16 этажей), имеющие разную протяженность. Последнее приводит к тому, что вблизи односекционных многоэтажных зданий («свечек») при их обтекании ветровым потоком наблюдается его ускорение. Однако ускорение потока отсутствует вблизи тех «свечек», которые относи-





Рис. 2. Формирование ветрового режима при отсутствии процессов теплообмена.

а — поле магнитуды скорости (м/с), цифрами обозначено,
к какой группе зданий относится область жилой застройки;
b — изоповерхность нулевой горизонтальной
компоненты скорости (м/с).

тельно ветра расположены за протяженными многосекционными зданиями. Третья группа застройки имеет неоднородную плотность и состоит из нескольких подгрупп зданий разных типов и высотности (10-25 этажей), между которыми располагаются соизмеримые свободные области. Аэрационный режим носит здесь сильно неоднородный характер, и подгруппы фактически отделены друг от друга зонами с повышенными скоростями. Четвертая группа застройки характеризуется наиболее низкой плотностью и состоит из малого числа зданий, в результате чего большая часть дворовой территории подвержена непосредственно ветровому воздействию набегающего воздушного потока.

При учете радиационного переноса появляется источник внешней энергии в виде солнечного излучения и механизм перераспределения энергии в системе за счет теплового излучения. 30 января на широте Красноярска солнце располагается достаточно низко над горизонтом, из-за этого в ясную погоду основной поток излучения приходится на стены зданий и тени от высотных зданий могут полностью накрывать более низкие жилые постройки даже в дневное время (рис. 3). Таким образом, городская застройка способствует неравномерному распределению солнечной энергии.

В рассматриваемой постановке, когда в приземной атмосфере отсутствует влага, наблюдаются достаточно высокие тепловые потери со стороны поверхностей зданий и земли за счет теплового излучения, особенно ночью (рис. 4). В таблице приведены величины теплового и солнечного излучений в точках на поверхностях зданий (рис. 3), находящихся под воздействием прямого солнечного излучения на крыше (точка 1) и стенах (точки 2 и 4), а также расположенных на теневых стенах (точки 3, 5). Из приведенных рисунков и данных таблицы видно, что тепловое излучение является существенно отрицательным. Максимальные тепловые потери излучением наблюдаются днем на крышах зданий (порядка 100 Вт), минимальные — на стенах зданий, что определяется отношением долей излучения, падающего со стороны атмосферы и со стороны других поверхностей городской застройки. В дневное время распределение потока теплового излучения с поверхности также определяется наличием солнечного излучения. Исходящее тепловое излучение от поверхностей, находящихся под прямым солнечным излучением, выше, чем в теневых областях. Кроме того, из-за роста разности температур между набегающим воздушным потоком и прогретыми поверхностями усиливается роль конвективного охлаждения последних. Вследствие этого наиболее сильно снижается



Рис. 3. Распределение потока падающего прямого солнечного излучения на поверхности (Вт/м²).

День, 13.00 ч местного времени, цифры — точки мониторинга: 1-3, 5 расположены на видимых поверхностях, 4 — на скрытой (задней) стене высотного здания.



Рис. 4. Распределение потока теплового излучения на поверхности (Вт/м²). *а* — день, 13:00 ч местного времени, *b* — ночь, 01:00 ч местного времени.

температура в областях, где формируется локальное ускорение ветрового потока при обтекании зданий. Соответственно это приводит к снижению исходящего от них теплового излучения. В ночное время из-за отсутствия солнечного излучения происходит общее снижения тепловых потерь излучением и их выравнивание на стенах зданий. При этом влияние переизлучения сохраняется, из-за чего минимальные потери все также наблюдаются в точке 5, как и в дневное время (см. таблицу).

Солнечное излучение приводит к росту температуры на поверхностях зданий, что, в свою очередь, приводит к нагреву воздушного потока и формированию восходящих конвективных течений (рис. 5*a*). Верхняя «шапка» изоповерхности потенциальной температуры, видимая на рис. 5, показывает, какой высоте в окружающей атмосфере

таспределение потоков излучения на поверхностих здании в точках, указанных на рис. 5					
Падающее прямое солнечное излучение, Вт/м ²					
Точки, указанные на рис. 3 Время, ч	1 (крыша)	2 (стена)	3 (стена)	4 (стена)	5 (стена)
13.00	145	305	0	370	0
Суммарный тепловой поток излучения, 13.00 ч, Вт/м ²					
Точки, указанные на рис. 4 Время, ч	1 (крыша)	2 (стена)	3 (стена)	4 (стена)	5 (стена)
13.00	-100	-55	-40	-55	-30
01.00	-70	-40	-40	-40	-25

Таблица Распределение потоков излучения на поверхностях зданий в точках, указанных на рис. 3



Рис. 5. Изоповерхность потенциальной температуры 256 K (-17 °C).*а* — день, 13:00 ч местного времени, *b* — ночь, 01:00 ч местного времени.

соответствует заданная температура. В ночное время нагрев воздуха от зданий практически отсутствует, так как из-за высоких потерь тепловым излучением только небольшая часть городской застройки имеет температуру стен выше температуры потока (рис. 5*b*).

Солнечное излучение обеспечивает нагрев освещаемых поверхностей зданий и земли, что приводит к повышению средней скорости воздушного потока в городской застройке. Неравномерность этого нагрева формирует свободно конвективные течения, которые усиливают неоднородность поля скорости (рис. 6*a*), и различия между выделенными при адиабатическом обтекании группами городской застройки (рис. 2*a*) уменьшаются. В ночное время теплообменные процессы оказывают на течение не столь значительное влияние. Средняя скорость снижается, и поле становится более однородным, а течение — подобным варианту с адиабатическим обтеканием (рис. 6*b*).

Если наложить на изоповерхность горизонтальной компоненты скорости поле температуры, которое в окружающей атмосфере практически не меняется с высотой, то восходящие потоки можно разделить на две основные группы (рис. 7). Первая группа связана с обтеканием высотных зданий. Она главным образом наблюдается на первой линии зданий относительно набегающего ветрового потока и локализуется в области вблизи них в форме «холмов». Вторая группа возникает вследствие нагрева воздуха при протекании через городскую застройку. Восходящий нагретый воздух собирается в виде набора вытянутых ленточных структур. Кроме этого, можно выделить третью группу (рис. 7), где восходящий поток формируется как вследствие обтекания более высоких относительно первой группы зданий, так и из-за нагрева воздуха.



Рис. 6. Поле скорости в варианте расчета с учетом переноса излучения (м/с). *а* — день, 13:00 ч местного времени, *b* — ночь, 01:00 ч местного времени.



Рис. 7. Изоповерхность вертикальной компоненты скорости 0,3 (м/с) с полем температуры на ней (К). Направление ветра показано стрелкой; день, 13:00 ч местного времени.

Для анализа аэрационного режима в области пешеходной комфортности рассмотрим динамику скорости на высоте двух метров в точках мониторинга (рис. 8a, 8b). Здесь следует отметить, что днем наличие солнечного излучения делает течение нестационарным. В вечернее/ночное время течение можно рассматривать как квазистационарное. Из всех точек мониторинга только для 1 и 7 наблюдается устойчивое снижение дневной скорости течения по сравнению с ночной. Это связано с деформацией вихревых структур в результате дневного нагрева воздуха, которые образуются при обтекании первой группы зданий (точка 1) и самого высокого здания (точка 7), а также со смещением точек мониторинга в более медленные вихревые области (рис. 6). Отсутствие скачков величины скорости в точке 7 связано с тем, что она расположена перед зданиями с наветренной стороны. Наиболее интересно поведение скорости в точке 4, которая расположена



Рис. 8. Графики динамики теплофизических величин в точках мониторинга, отмеченных на рис. 1. а, b — скорость (м/с), c — энергия турбулентных пульсаций (ТКЕ) (м²/с²), d — температура (К), точка мониторинга 0 расположена за 200 м до первой линии зданий с наветренной стороны.

внутри почти закрытого зданиями дворового пространства (рис. 8b). В ночное время скорость течения близка к нулю, однако благодаря энергии солнечного излучения возникает свободно конвективное движение и скорость значительно возрастает: от 0,07 до 1,3 м/с максимум. Кроме этого, существенно возрастают скорости перед торговоразвлекательным центром (точка 6) и за самым высоким зданием (точка 5). Течение за этим зданием интересно еще и тем, что за ним не возникает типичная аэродинамическая тень, характерная для обтекания одиночных зданий-«свечек», с низкими скоростями с подветренной стороны. Из-за близкого расположения с подветренной стороны более протяженного здания часть ускоренного потока, возникающего вследствие обтекания здания-«свечки», разворачивается и проникает в область за ним (рис. 6).

Уровень турбулентных пульсаций днем по сравнению с вечером/ночью в целом выше даже в тех временных интервалах, где имеет место падение скорости (рис. 8*c*). Наиболее сильный относительный рост турбулентной энергии наблюдается как раз в закрытом двором пространстве (точка 4). Изменение температуры носит здесь более плавный характер (рис. 8*d*), максимальные колебания наблюдаются в точке 4. Эти колебания связаны с влиянием динамики затенения открытого пространства, в котором расположена точка 4. В целом температура относительно входящего потока в точках мониторинга может повышаться на величину до 1 К. Более интересно, что из-за ночного охлаждения поверхностей зданий и земли происходит выхолаживание воздуха и в рассматриваемых точках наблюдается снижение температуры до 0,7 К.

Обсуждение полученных результатов

При рассмотрении аэрационного режима как для отдельных зданий, так и для целых городских районов, как правило, рассматривается адиабатическое течение без учета теплообмена, включая радиационный. Моделирование в данной постановке близко к ночному режиму обтекания зданий ветровым потоком (рис. 2, 6b). В этом случае городскую среду упрощенно можно рассматривать как пористую, в которой в целом снижается средняя скорость ветра, и чем выше плотность застройки, тем однороднее поле скорости. Локальные ускорения воздушного потока в основном наблюдаются при обтекании высотных зданий-«свечек». Следует отметить, что использование результатов численного моделирования адиабатического аэрационного режима в контексте пешеходной комфортности ограничено условиями, соответствующими, в первую очередь, пониженной интенсивности падающего солнечного излучения. И если, например, данный режим рассматривать как имитацию ночи, то с точки зрения оценки пешеходной комфортности он мало интересен, так как это время наименьшей активности людей.

Учет солнечного (коротковолнового) и теплового (длинноволнового) излучений существенно меняет картину течения. Солнечное излучение осуществляет неравномерный подвод тепла в условиях городской застройки, особенно зимой, когда солнце расположено низко над горизонтом. Это приводит к возникновению нестационарных свободно-конвективных течений и снижению однородности поля скорости внутри городских кварталов. Особенно заметны изменения в закрытых дворовых пространствах, в которых в ночное время в приземной области реализуются околонулевые скорости, а в дневное время они могут достигать величин, сравнимых со скоростью набегающего ветра (рис. 8). В целом солнечная энергия интенсифицирует движение ветрового потока в приземной области, снижая протяженность аэродинамической тени от зданий и увеличивая подъемную компоненту скорости. При этом восходящие теплые потоки группируются в виде набора объемных лент (рис. 7). В отличие от них, восходящие воздушные потоки, связанные

с обтеканием высотных зданий, локализуются вблизи этих зданий. На характер теплообмена посредством длинноволнового излучения в первую очередь влияет состояние атмосферы: облачность и влажность. В рассматриваемом случае в условиях отсутствия обоих факторов эффективное излучение имеет положительный баланс, и в ночное время, когда отсутствует солнечное излучение, происходит выхолаживание приземной области (рис. 4). Наибольшие потери за счет длинноволнового излучения наблюдаются на крышах зданий. В данном случае это свидетельствует о том, что тепловое излучение является важным механизмом отвода тепла из городской среды.

На примере рассмотренного реального городского района, который состоит из разнородных кварталов, видно, что неоднородность городской среды приводит к формированию собственных аэрационных режимов внутри каждого квартала. Кроме этого, в городской среде имеет место не только аэродинамическая тень, создаваемая одиночными зданиями, но и аэродинамические тени городских кварталов.

Заключение

Динамика солнечного и теплового излучений в значительной мере определяет процессы тепломассопереноса и, соответственно, условия комфортности для людей в городской среде. В частности, неоднородный прогрев городской среды солнечным излучением приводит к возникновению свободно-конвективных течений и увеличению средней скорости потоков в приземном слое. Это необходимо учитывать при исследовании экологических проблем города и проектировании городской застройки, обеспечивающей комфортные условия проживания.

Список литературы

- 1. Robinson D. Computer modelling for sustainable urban design-physical principles, methods and applications. L.: Earthscan, 2011. 320 p.
- 2. 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. Art. 108389.
- **3. Franke J., Hellsten A., Schlunzen K.H., Carissimo B.** The COST 732 best practice guideline for CFD simulation of flows in the urban environment: a summary // Intern J. of Environment and Pollution. 2011. Vol. 44, No. 1–4. P. 419–427.
- 4. 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 // J. of Wind Engng and Industrial Aerodynamics. 2012. Vol. 104–106. P. 474–483.
- 5. Gao Z., Bresson R., Qu Y., Milliez M., de Munck C., Carissimo 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.
- 6. Поддаева О.И., Дубинский С.И., Федосова А.Н. Численное моделирование ветровой аэродинамики высотного здания // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 9. С. 23–27.
- 7. Toarlar Y., Blocken B., Vos P., van Heijst G.J.F., Janssen W.D., van Hooff T., Montazeri H., Timmermans H.J.P. CFD simulation and validation of urban microclimate: a case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam // Building and Environment. 2015. Vol. 83. P. 79–90.
- Wang X., Li Y. Predicting urban heat island circulation using CFD // Building and Environment. 2016. Vol. 99. P. 82–97.
- 9. Quej V.H., Almorox J., Ibrakhimov M., Saito L. Empirical models for estimating daily global solar radiation in Yucatán Peninsula, Mexico // Energy Conversion and Management. 2016. Vol. 110. P. 448–456.
- 10. Мешкова В.Д., Дектерев А.А., Литвинцев К.Ю., Филимонов С.А., Гаврилов А.А. Роль городской застройки в формировании «острова тепла» // Вычислительные технологии. 2021. Т. 26, № 5. С. 4–14.
- 11. Litvintsev K.Yu., Sentyabov A.V. Application of the finite volume method for calculating radiation heat transfer in applied problems // Bulletin SUSU MMCS. 2021. Vol. 14, No. 3. P. 77–91.

- 12. Bird R.E. A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces // SERI/TR-642-761. Seri: Solar Energy Research Institute. 1981.
- Psiloglou B.E., Santamouris M., Asimakopoulos D.N. Atmospheric broadband model for computation of solar radiation at the earth's surface. Application to mediterranean climate // Pure Appl. Geophys. 2000. Vol. 157. P. 829–860.
- Prata A.J. A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface // Q. J. R. Meteorol. Soc. 1996. Vol. 122. P. 1127–1151.
- 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.
- Milliez M., Carissimo B. Numerical simulations of pollutant dispersion in an idealized urban area, for different meteorological conditions // Bound.-Layer Meteor. 2007. Vol. 122. P. 321–342.
- Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. 1994. Vol. 32, No. 8. P. 1598–1605.
- Chai J.C., Patankar S.V. Finite-volume method for radiation heat transfer // Advances in Numerical Heat Transfer. 2000. Vol. 2. P. 109–138.
- Dekteryev A.A., Litvintsev K.Yu., Gavrilov A.A., Kharlamov E.B., Filimonov S.A. The development of free engineering software package for numerical simulation of hydrodynamics, heat transfer, and chemical reaction processes // Bulletin SUSU MMCS. 2017. Vol. 10, No. 4. P. 105–112.
- 20. Мешкова В.Д., Дектерев А.А., Филимонов С.А., Литвинцев К.Ю. SigmaFlow как инструмент исследования ветрового комфорта в условиях городской среды // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2022. Т. 15, № 4. С. 490–504.

Статья поступила в редакцию 6 апреля 2023 г., после доработки — 30 мая 2023 г., принята к публикации 16 июня 2023 г.