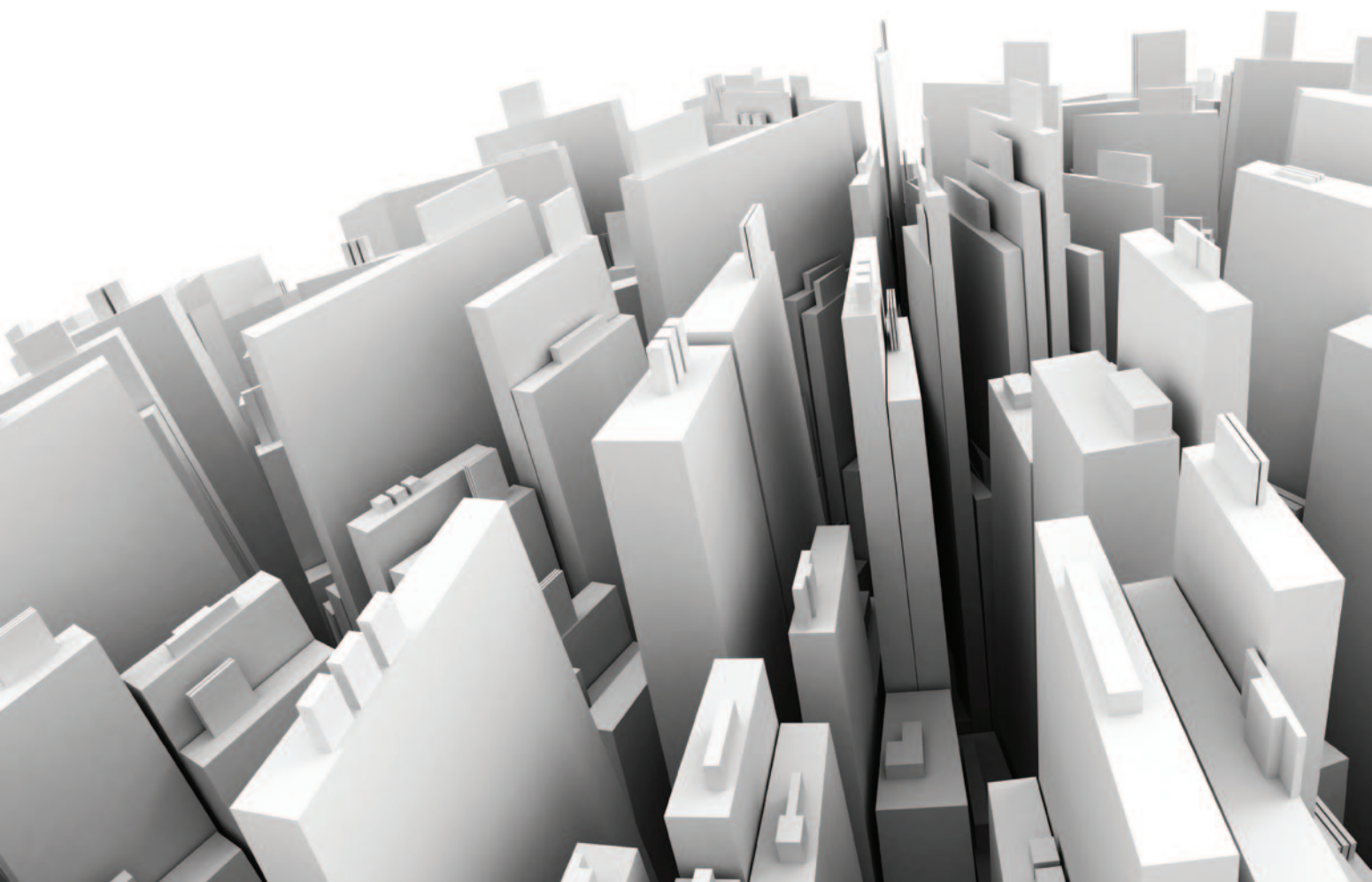


ФЕНОМЕН ГОРОДСКОГО ОСТРОВА ТЕПЛА

YASIN TOPARLAR, BERT BLOKEN, ADELYA KHAYRULLINA



Люди проводят большую часть своего времени в помещениях, где механические и электрические устройства интенсивно работают, чтобы обеспечить определённый уровень комфорта для пользователей. По сути, все эти системы работают в зависимости от микроклиматических условий снаружи, вне зданий. Если мы сможем успешно проектировать эти системы для достижения оптимальных условий, можем ли мы также разработать эффективный микроклимат на улице?

По оценкам Организации Объединённых Наций, к 2050 году доля населения, проживающего в городских районах будет расти, и достигнет приблизительно 70 % от всего населения мира (54 % в 2014 году) (Рис. 1). Этот рост будет вызван несколькими причинами:

- миграция населения из сельской местности в города в связи с растущими возможностями в городских районах;
- рост числа городов с улучшенной инфраструктурой в развивающихся странах;
- развитие ряда сельских районов до городских районов.

Неизбежные изменения в доле общего населения городской и сельской местностей вызывают давление на политиков и градостроителей. Городские районы столкнутся с множеством проблем и разработка этих новых сред обитания человека должна быть более тщательно спланирована. С энергетической точки зрения, так как здания потребляют около 50 % всей вырабатываемой энергии, это увеличение городского населения приведёт к значительному увели-

чению энергопотребления в городах. Поэтому основное внимание в будущем будет уделяться на проектирование и строительство энергоэффективных зданий, без ущерба уровню комфорта для их пользователей.

Известно, что здания сами по себе не потребляют энергию, люди являются главными пользователями. Тем не менее, количество необходимой для пользователей энергии, зависит от трёх основных аспектов (от мелкого масштаба к крупному):

- климатического оборудования здания;
- оболочки здания;
- городского микроклимата (Рис. 2).

Климатическое оборудование можно рассматривать как полный набор систем, внедрённых в здание, таких как системы отопления и охлаждения, вентиляции, осветительных приборов, систем управления и т. д. Их влияние на общее энергопотребление здания оценивается в основном в масштабе нескольких этажей/блоков и редко в масштабе всего здания. После того как одна из этих систем, используемых при первоначальном строительстве, меняется, к примеру,

ОСТРОВ ТЕПЛА

Остров тепла (Heat-Island Effect) – зона повышенных температур над городами и промышленными районами, образующаяся в результате повышенного выброса тепловой энергии, в результате чего образуются тепловые отходы. Как правило, наблюдается в крупных городах, где температура воздуха в течение всего года на несколько градусов выше, чем на прилегающих территориях. Городской остров тепла – площадь во внутренней части большого города, характеризующаяся повышенными, по сравнению с периферией, температурами воздуха. Центр городского острова тепла обычно сдвинут от центра города в ту сторону, куда направлены преобладающие ветры. Эффект «теплого острова», относящийся к повышенной температуре воздуха в городах-миллионниках был известен ещё в восемнадцатом веке, но приобрёл особую остроту лишь в последние десятилетия.

на более энергоэффективное решение, выгоды энергопотребления непосредственно видны на этажах, где используется эта система. Следующим аспектом является оболочка здания. Этот аспект связан главным образом с формой, ориентацией и типом материалов, используемых для строительства. Эти факторы влияют на всё здание в целом. Например, если здание имеет ориентацию север-юг, южный фасад требует меньше мощности освещения от приборов, но больше нагрузки для системы охлаждения. После того, как ориентация здания меняется, общее энергопотребление здания также не останется прежним.

Третьим аспектом является городской микроклимат, являющийся темой этой статьи. Городской микроклимат включает в себя все климатические факторы (температуру воздуха, относительную влажность, солнечную радиацию), которые влияют на некоторое число зданий в определённой окрестности. В город-

РИС. 1. НАСЕЛЕНИЕ МИРА В ГОРОДСКИХ И СЕЛЬСКИХ РАЙОНАХ

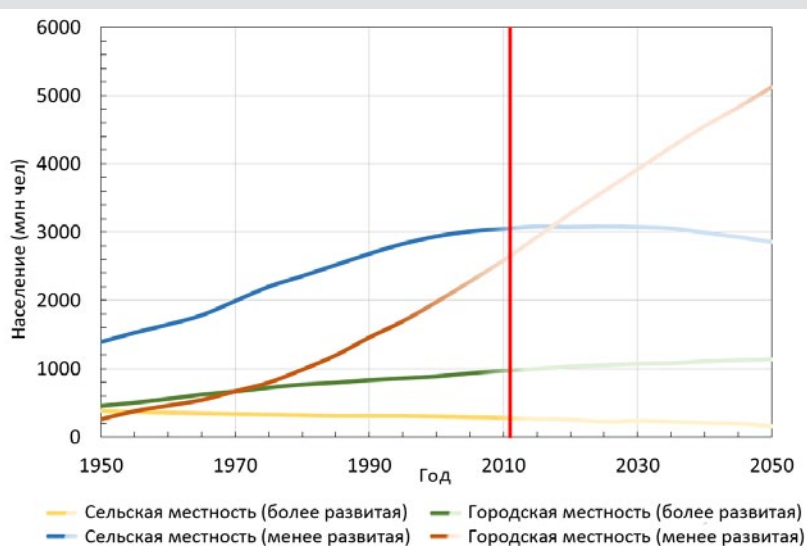


РИС. 2. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ ЗДАНИЯ В ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКЕ



ской среде микроклимат может быть различным для каждой окрестности. К примеру, после того как городской микроклимат изменяется, например, с благоустройством территории – возведением городского парка, то энергопотребление зданий в районе парка будет отличаться от среднего энергопотребления зданий целого города.

Но почему климат в городах характеризуется различными показателями, чем указывают климатические карты для определённых географических областей? Если два города, расположенные рядом могут иметь различные климатические условия, какие факторы влияют на эту разницу? Для того чтобы ответить на эти вопросы, мы рассмотрим научное развитие в области климатологии городов. О разнице температуры воздуха на городской территории по сравнению с сельской местностью первоначально упомянуто в знаменитом исследовании Люка Ховарда в 1820 году [2]. В своей книге под названием *The Climate of London*, Говард сообщил о измерениях температуры воздуха в центре Лондона и в районе Тоттенхэм Грин, являющимся в 1820-е годы сельской местностью на севере от Лондона. Его измерения, которые были проведены в течение

нескольких месяцев показали, что температура в Лондоне была заметно выше, чем температура в Тоттенхэм Грин, особенно в ночное время. Он очень просто отметил разницу между температурами воздуха по уравнению:

$$\Delta T_{(\text{город-село})} = T_{\text{город}} - T_{\text{село}}$$

Это хотя и очень простое уравнение вызвало большой интерес со стороны других учёных. В период до 1960-х проводились аналогичные измерения в других городах, и так называемый эффект городского острова тепла был зафиксирован в различных городских районах. Этот период исследований, основанный на измерении разницы температур между городской и окружающей её сельской местностью, называют «наблюдательной эпохой» городской климатологии.

После 1960-х годов, учёные пытались описать и оценить разницу температур, инициируя, что называется «описательную климатологию». Один из примеров исследований, проведённых в течение этого периода, является работа Оке [3], где он пытался связать разницу температур между городской и сельской местностью лишь на основе численности населения города (P):

$$\Delta T_{(\text{город-село})} = 2,96 \log P - 6,41$$

(для населённого пункта в Северной Америке [3]).

$$\Delta T_{(\text{город-село})} = 2,01 \log P - 4,06$$

(для населённого пункта в Европе [3]).

Однако, данных эмпирических уравнений было недостаточно, чтобы описать всю сложность зависимости температур между городской и сельской местностью. Лоури [4] был первым учёным, рассматривающим проблему эмпирических уравнений, и призвавшим к изучению физических процессов в городской климатологии, инициируя развитие так называемой «физической климатологии». В эту эпоху, которая началась во время 1980-х годов, учёные пытались описать реальные причины эффекта городского острова тепла, и проанализировать факторы, влияющие на городской климат. Основываясь на исследовании Оке [5], мы можем определить семь причин, как наиболее значимых факторов, влияющих на городской микроклимат (Рис. 3) [5]:

1. Усиленное коротковолновое излучение (многократные отражения от фасадов зданий или от поверхности земли).
2. Усиленное длинноволновое излучение (в основном вызвано загрязнением воздуха).
3. Снижение потерь тепла длинноволнового излучения (геометрия «городского каньона» или аналогичных городских элементов, препятствующих высвобождению длинноволнового излучения).
4. Антропогенные источники тепла (например, тепла, выделяемого автомобилями, промышленностью и т. д.).
5. Увеличение запаса тепла (использование строительных материалов, тротуарных материалов и т. д.).
6. Снижение испарения (уменьшение числа водных объектов, растительности).
7. Снижение турбулентного переноса тепла (низкая скорость ветра в городских районах, низкий уровень городской вентиляции).

Безусловно, эти факторы, которые влияют на городской климат, создают различные условия для зданий с точки зрения их энергопотребления. Вообще говоря, нагрузка на отопление/охлаждение зданий напрямую зависит от климатических условий. Учитывая тот факт, что с эффектом городского острова тепла температура в городских районах в течение года выше по сравнению с сельской местностью, это может быть выгодно для нагрузок на отопление в зимний период. С другой стороны, если рассматривать эту ситуацию в тёплой стране, где нагрузка на охлаждение в летний период является более значительной, чем нагрузка на отопление на весь год, эффект городского острова тепла увеличит нагрузку на охлаждение. В этом случае, этот эффект не может рассматриваться как положительное явление.

После того, как нами определены факторы, влияющие на городской микроклимат, мы можем предложить меры, которые могут его

улучшить. Есть различные примеры, которые можно рассматривать в качестве мер адаптации, к примеру, увеличение растительности, устройство водоёмов, вентиляционных отверстий и другое. Вообще, все эти предлагаемые меры по адаптации стараются повлиять на один из семи факторов, влияющих на городской микроклимат.

Одной из таких мер адаптации может быть улучшение ориентации улиц зданий в пределах городской территории. Голани [6] показывает, что уличная система, которая состоит из улиц-блоков, препятствует увеличению скорости ветра и сохраняет большее количество тепла в пределах городской территории (что усиливает эффект острова тепла), тогда как улицы, параллельные друг другу, позволяют усилить скорость ветра, что приводит к уменьшению эффекта острова тепла (Рис. 4). Эта методика рассматривает один из факторов, влияющих на городской микроклимат (турбулентный перенос тепла)

и предлагает архитектурное решение изменить климат в соответствии с потребностями какого-либо конкретного населённого пункта [6].

Другой широко применяемой мерой адаптации является использование растительности. Растительность в городских районах может отличаться от типа (трава, деревья, сады и т. д.) или от размера (одиночно-стоящее дерево, зелёная кровля, городской парк и т. д.). В работе, проведённой Са и др. [7], было исследовано влияние городского парка на температуру воздуха и нагрузку на охлаждение в здании. Исследование оценило микроклимат вокруг города Тама в Японии. В основном, ветровой поток дул с юга и, таким образом, охлаждающий эффект парка был более ощутим в подветренной области (около северной части центрального парка Тама). В летнее время, когда проводились измерения, коммерческая зона и жилая зона 1 показали значительно более низкие температуры воздуха, чем в жилых районах,

РИС. 3. СЕМЬ ПРИЧИН ГОРОДСКОГО ОСТРОВА ТЕПЛА (ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЛЮБОЙ ГОРОДСКОЙ МИКРОКЛИМАТ)

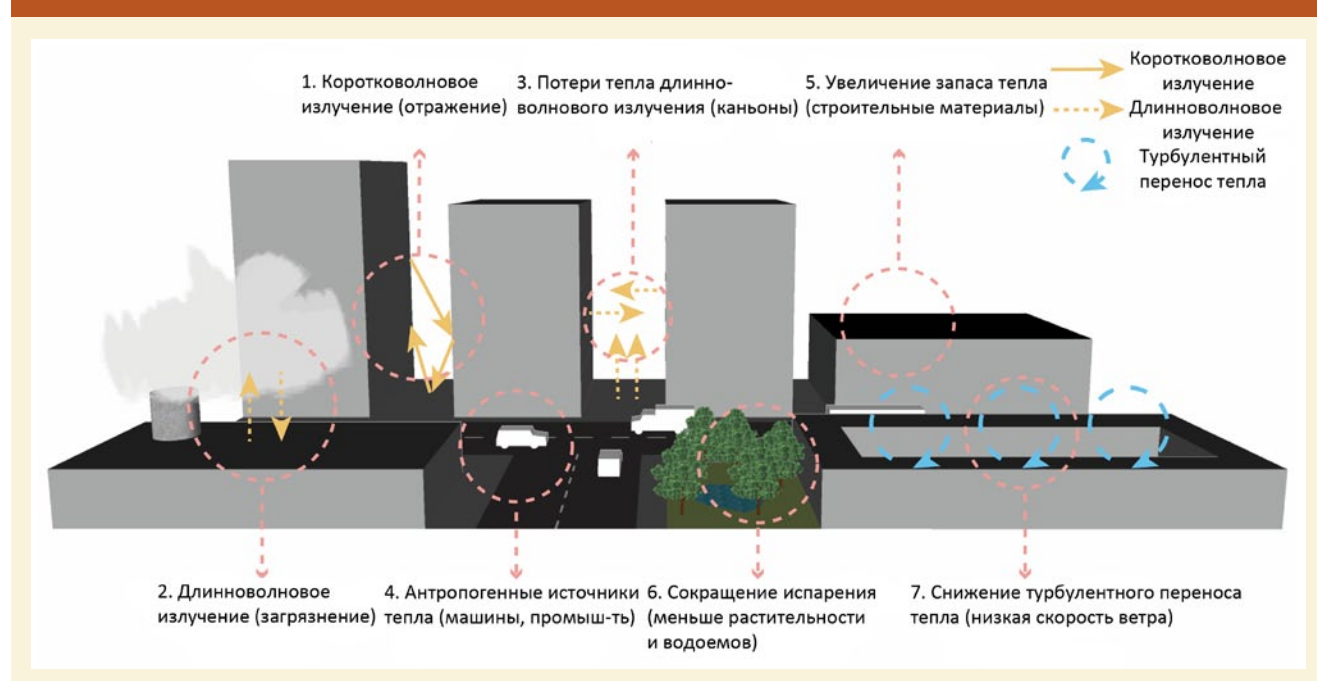
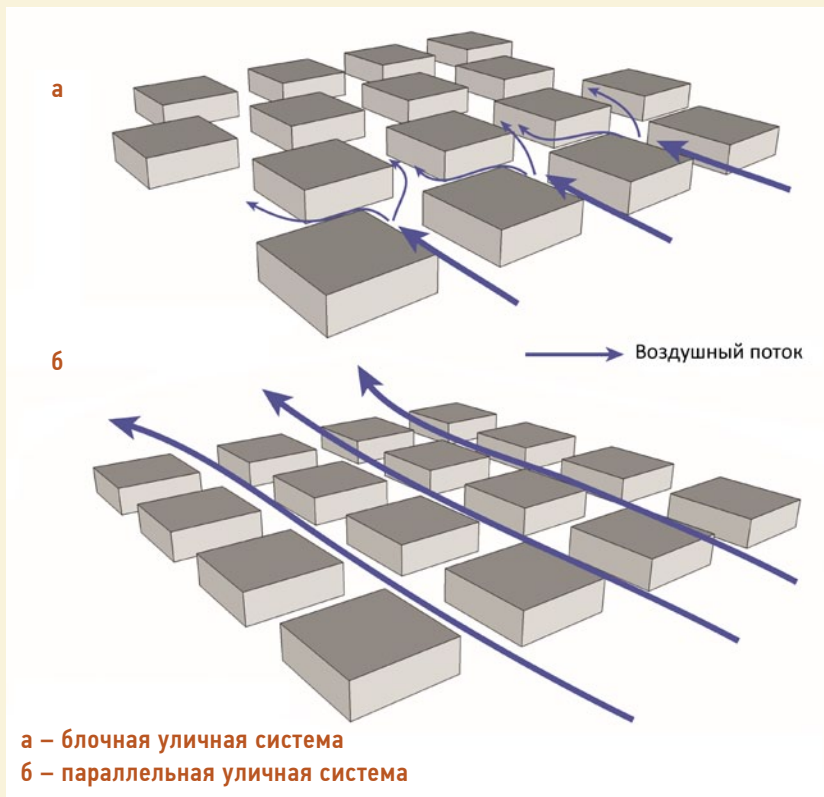


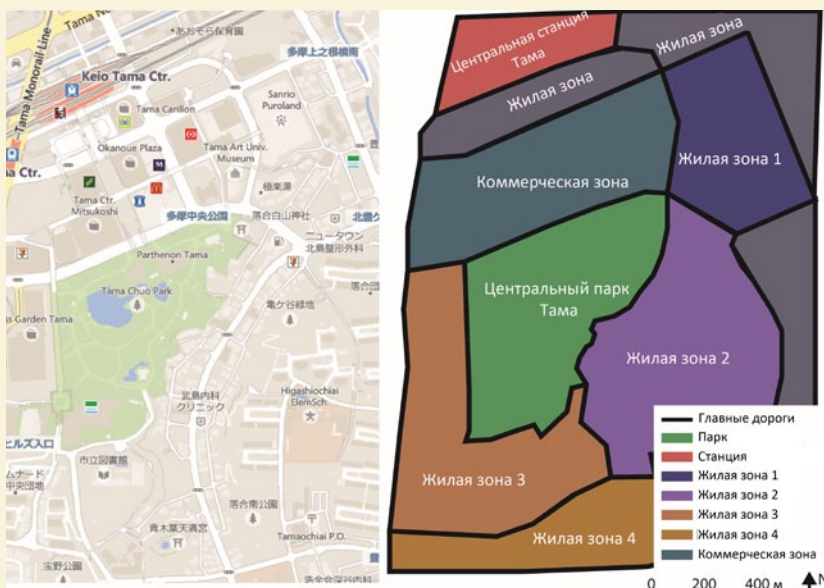
РИС. 4. ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ УЛИЦ НА ПОТОК ВОЗДУХА



расположенных на юге. Температура воздуха была на 2 °C ниже в парке и на 1,2 °C ниже в подветренной области на территории 0,6 км². С точки зрения энергопотребления, парк позволил сэкономить 15 % энергии в течение дня, что приравнивается к 4000 кВт•ч (650 долл США для Японии) сбережений, только в течение 1 часа [7].

Меры по адаптации к изменению климата могут быть важным инструментом для достижения высоких уровней энергоэффективности зданий. Помимо естественной вентиляции и растительности, существует множество других способов, таких как использование водных объектов (рек, каналов и т. д.), испарительного охлаждения (спреи, городские водоёмы и т. д.) использование светоотражающих материалов и т. д. Тем не менее, очень трудно определить эффект от каждой из этих мер. Полевые измерения могут быть проведены только после реализации определённой меры. В измерениях с использованием масштабных моделей-макетов, возможно, потребуются упрощать некоторые сложные физические механизмы, происходящие в городской местности. Информация о городской климатологии может быть необходимой для архитекторов и проектировщиков. Один из хорошо известных городских климатологов современной эпохи, Джеральд Миллс, отметил, что «одна из основных проблем заключается в передаче знаний о городском климате в повседневную практику городского планирования и проектирования» [8]. Для того, чтобы иметь возможность принять верные проектные решения для планирования городской застройки до фактической стадии строительства, необходимо оценивать эффект определённых мер по адаптации городского микроклимата с помощью численных методов и с определёнными уровнями точности.

РИС. 5. РАСПОЛОЖЕНИЕ ГОРОДСКОГО ПАРКА В ЦЕНТРАЛЬНОМ РАЙОНЕ ГОРОДА ТАМА



Жилая зона 1 показала значительно более низкие температуры воздуха, чем в жилых районах, расположенных на юге

В настоящее время, вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics, CFD) предлагает способ оценки микроклимата благодаря способности оценки распределения температуры и воздушных потоков с помощью моделирования. Одно из исследований, проведённых кафедрой строительной физики в Технологическом университете Эйндховена демонстрирует способность CFD моделирования прогнозировать городской микроклимат [9]. В сотрудничестве с голландским консорциумом под названием «Климатоустойчивые города» (Climate Proof Cities, CPC), ответственным за исследования адаптации к изменению климата в городских районах, произведена оценка района Bergpolder Zuid в Роттердаме. В этом районе планируется реконструкция зданий и консорциум CPC оценивает ряд потенциальных мер по адаптации к изменению климата в этом районе. Bergpolder Zuid состоит из жилых и офисных зданий с узкими улочками и окружающими широкими проспектами (Рис. 6а). По данным предыдущих исследований [10], район показывает основные признаки эффекта городского острова тепла с температурами, как правило, выше, чем в окружающих сельских районах.

На основе городских чертежей района Bergpolder, создана расчётная мо-



дель с высоким разрешением расчётной сетки (Рис. 6б и 6в). Наружный вычислительный домен имеет шестиугольную форму с длиной сторон 2,4 километра и высотой 400 метров. Внутри шестиугольного домена здания размещены внутри дополнительного кругового домена (Рис. 6). В общей сложности, расчётная сетка состоит из 6 610 456 шестигранных

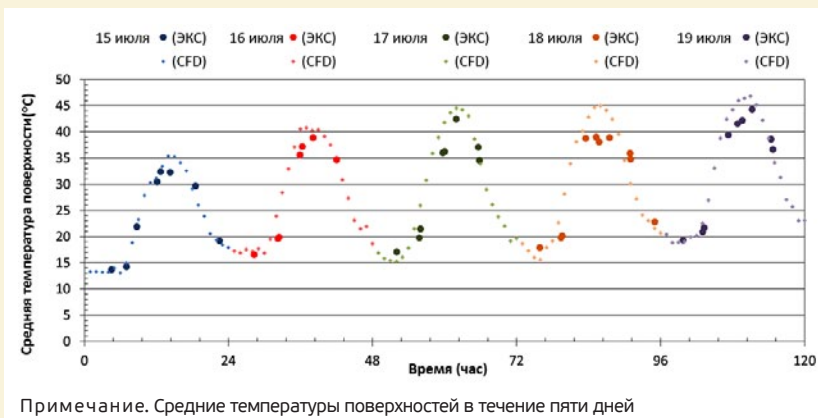
ячеек. Моделирование выполняется с помощью трёхмерных нестационарных усреднённых уравнений Навье-Стокса (3D unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes, URANS) в сочетании с моделью турбулентности Realizable k-ε. Несколько физических явлений, влияющих на городской микроклимат, такие как поток ветра и теплообмен (теплопроводность, конвекция

ТАБЛ. 1. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ НАСТРОЙКИ И ПАРАМЕТРЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ИССЛЕДОВАНИИ TOPARLAR И ДР. [9]

| Расчётный домен и сетка | | Граничные условия | |
|-------------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Форма | Шестиугольная | Вход | |
| Длина стороны x Высота | 2 400 x 400 м | Распределение скорости ветра | Логарифмическая зависимость |
| Число ячеек | 6 610 456 | Температура | Климатические данные |
| Вычислительная модель | | Выход | |
| Модель турбулентности | Realizable k-ε [11] | Тип | Нулевое давление |
| Модель излучения | P-1 [12] | Поверхности | |
| Вычисление вблизи поверхностей/стен | Standard Wall Functions [13] | Моделирование | Eq. sand grain roughness [14] |

Примечание. Для получения более подробной информации, пожалуйста, обратитесь к соответствующей статье

РИС. 7. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ (CFD) И ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ



наша расчётная модель предсказала температуры поверхностей со средним отклонением 7,9 % по сравнению с данными спутниковой съёмки (Рис. 7).

Результаты моделирования показывают, что CFD имеет потенциал точного прогнозирования городского микроклимата. Результаты CFD моделирования, следовательно, могут быть использованы для выявления проблемных областей, а также для оценки влияния мер по адаптации, таких как озеленения городов и испарительного охлаждения. На рисунке 8 представлены контуры скорости ветра и температуры поверхностей земли и зданий. Видно, что, будучи одной из причин усиления эффекта городского острова тепла, замедление ветра приводит к увеличению температуры поверхности. Особенно внутри дворов, где скорость ветра очень слабая, температура поверхности (и, следовательно, температура воздуха) имеют тенденцию быть выше, создавая более тёплые зоны.

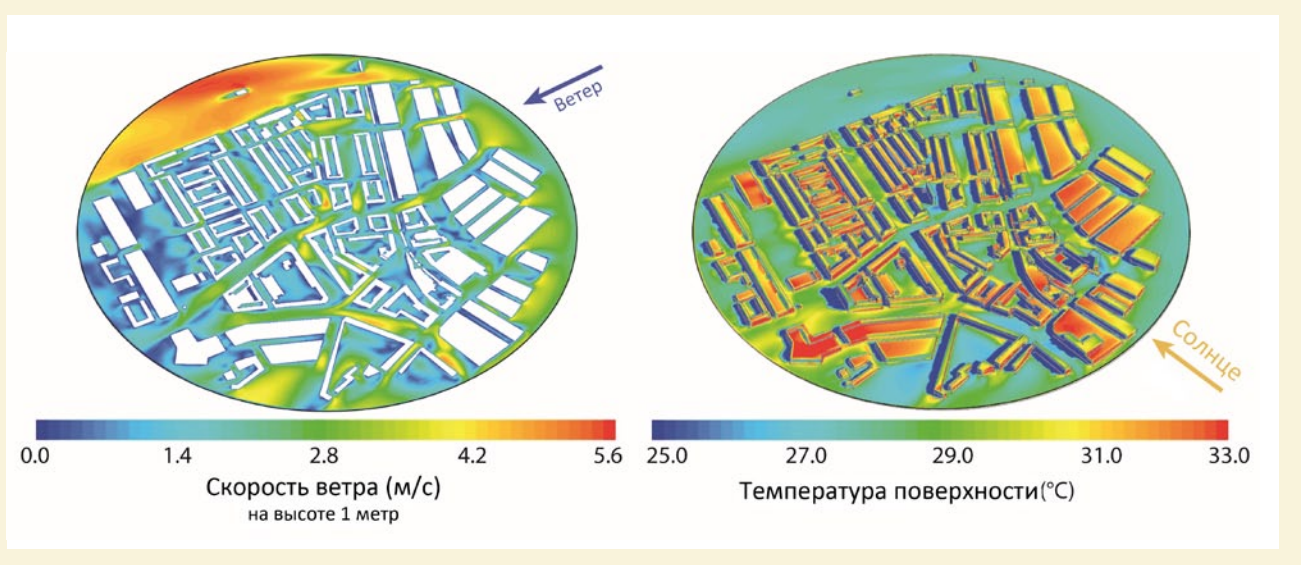
Дальнейшие исследования по этой теме будут посвящены использованию информации, полученной в ходе

и излучение) также рассматриваются в данном моделировании. Более подробная информация о вычислительных настройках и параметрах приведена в таблице 1.

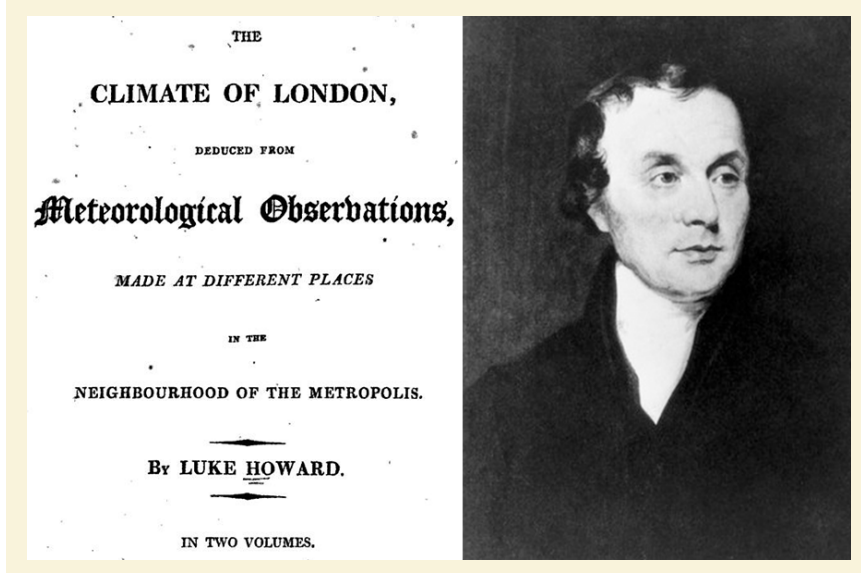
Метеорологические данные, используемые в этом исследовании, получены из среднечасовых показателей Метеорологического института Королевства Нидерланды (KNMI) для метеостанции Роттердам, расположенной недалеко от аэропор-

та Роттердама, в 4 км северо-западу от Bergpolder Zuid. Результаты моделирования для температур поверхностей земли и зданий сверяются с данными спутниковой съёмки, описанных Клок и др. [10]. Так как данные спутниковых снимков предоставлены на период с 15 по 19 июля 2006 года, вычисления с CFD также выполняются с учётом метеорологических данных этого периода. По результатам проведённого моделирования,

РИС. 8. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ СКОРОСТИ ВЕТРА НА ВЫСОТЕ 1 М И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ 15 ИЮЛЯ 2006 ГОДА



ОБЛОЖКА КНИГИ «КЛИМАТ ЛОНДОНА» И ПОРТРЕТ ЛЮКА ХОВАРДА, КОТОРЫЙ СЧИТАЕТСЯ ОТЦОМ ГОРОДСКОЙ КЛИМАТОЛОГИИ



аналогичных исследований с CFD в проектировании городского пространства. Городской микроклимат является одним из ключевых факторов, влияющих на энергопотребление зданий и тепловой комфорт для пользователей. Если здания должны достичь высокого уровня энергетической эффективности, то планирование должно начинаться с предоставления лучших граничных условий для их строительства. Инновационные исследования в области проектирования энергоэффективных зданий и их систем активно ведутся в настоящее время. Ожидается, что в будущем городское планирование с учётом микроклимата будет ключевым элементом для достижения энергоэффективного развития городских регионов.

Литература

1. United Nations. World Urbanization Prospects: The 2011 Revision. New York, 2012.
2. Howard L. The climate of London. London, 1820.
3. Oke TR. City size and the urban

heat island. Atmos Environ 1973; Pp. 769–779.

4. Lowry W. Empirical estimation of urban effects on climate: A problem analysis. J Appl Meteorol 1977, Pp. 129–135.
5. Oke TR. The energetic basis of the urban heat island. Q J R Meteorol Soc 1982; Pp. 1–24.
6. Golany G. Urban design morphology and thermal performance. Atmos Environ, 1996; P. 30.
7. Ca V, Asaeda T, Abu E. Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park. Energy Build, 1998, Pp. 83–92.
8. Mills G. Urban climatology: History, status and prospects. Urban Clim 2014. doi:10.1016/j.uclim.2014.06.004.
9. Toparlar Y, Blocken B, Vos P, Heijst G-J van, Janssen WD, van Hooff T, et al. CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam. Build Environ 2015, Pp. 79–90.
10. Klok L, Zwart S, Verhagen H, Mauri E. The surface heat island of Rotterdam and its relationship

with urban surface characteristics. Resour Conserv Recycl, 2012, Pp. 23–29. doi:10.1016/j.resconrec.2012.01.009.

11. Shih T-H, Liou WW, Shabbir A, Yang Z, Zhu J. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. Comput Fluids, 1995, Pp. 227–238.
12. ANSYS Inc. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide 2009.
13. Launder BE, Spalding DB. The numerical computation of turbulent flows. Comput Methods Appl Mech Eng, 1974, Pp. 269–289. doi:10.1016/0045-7825(74)90029-2.
14. Cebeci T, Bradshaw P. Momentum Transfer in Boundary Layers. New York: Hemisphere Publishing Corporation; 1977.

Перевод и техническое редактирование выполнено Аделей Хайруллиной ●

ОБ АВТОРАХ

Yasin Toparlar (Ясин Топарлар) – PhD студент кафедры строительной физики и инженерного оборудования зданий Технического университета Эйндховена (Нидерланды) и отдела моделирования окружающей среды в научно-исследовательском институте VITO (Бельгия).

Bert Blocken (Берт Блокэн) – профессор кафедры строительной физики и инженерного оборудования зданий Технического университета Эйндховена (Нидерланды), также профессор кафедры строительства Левенского католического университета (Бельгия).

Adelya Khayrullina (Аделя Хайруллина) – магистр Уфимского государственного нефтяного технического университета (УГНТУ, Башкортостан), инженер-строитель по специальности «промышленное и гражданское строительство». С октября 2012 года студентка Технического университета Эйндховена, Нидерланды, кафедра строительной физики и инженерного оборудования зданий.