

УДК 536.2
PACS 02.60.Сь; 44.25.+f

Лабораторное моделирование в задачах городской климатологии

А. В. Евграфова, А. Н. Сухановский

Институт механики сплошных сред УрО РАН
614013, Пермь, ул. Ак. Королева, 1
email: eav@icmm.ru

В работе представлен новый подход к задачам городской климатологии, который основан на лабораторном моделировании процессов теплообмена в условиях городского ландшафта. В качестве экспериментальной модели был использован трехмерный макет центральной части г. Пермь, который учитывает сложный рельеф местности, расположение и высоту зданий на площади в пять квадратных километров. В качестве идеализированной, модельной ситуации рассматривается остывание мегаполиса в ночной период времени. Исследован процесс остывания поверхности модели города после продолжительного нагревания инфракрасным излучением. Ключевым вопросом является зависимость теплообмена от типа городской застройки. Проведено исследование влияния плотности застройки на процесс остывания поверхности макета. Было проведено сравнение для двух областей с процентным содержанием открытой местности в 70 и 90 %. Показано, что увеличение количества зданий влияет на процесс остывания, что, вероятно, связано с изменением конвективной циркуляции и ухудшением вентиляции массива. При этом для обоих случаев обнаружены застойные зоны с высокими значениями температуры в области плотной застройки.

Ключевые слова: естественная конвекция; теплообмен

Поступила в редакцию 06.10.2020; принята к опубликованию 29.10.2020

Laboratory modeling in urban climatology

A. V. Evgrafova, A. N. Sukhanovskii

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Academician Korolev Street, 1, 614013, Perm
email: eav@icmm.ru

The paper presents a new approach to the problems of urban climatology, which is based on a laboratory modeling of heat transfer processes in the urban landscape conditions. As an experimental model, we used a three-dimensional layout of the central part of Perm, which takes into account the complex terrain, location and height of buildings on an area of five square kilometers. As an idealized model configuration we considered the nocturnal cooling process of megapolis. The process of cooling of the city model surface after prolonged heating by infrared radiation was studied. The key issue is dependence of the heat transfer on the type of urban structure. The influence of the building density on the cooling process of the layout surface was studied. The comparison was made for two areas with 70 and 90 percent of open area. It was shown that an increase in the number of buildings has influence on the cooling process, which is probably connected with variation of convective circulation and decreasing of the ventilation efficiency. However, stagnant zones with high temperatures in areas of high building density were found for both cases.

Keywords: natural convection; heat exchange

Received 06.10.2020; accepted 29.10.2020

doi: 10.17072/1994-3598-2020-4-37-42

1. Введение

Городская климатология – это раздел климатологии, который изучает особенности климата в пределах мегаполисов. В связи со стремительным процессом урбанизации вопрос о создании комфортных для жизни условий внутри городского пространства стоит очень остро.

Известно, что температура в пределах города может существенно отличаться от близлежащих областей. Связано это в основном с изменением окружающей среды в городских условиях (увеличение тепловой емкости наряду со снижением средней скорости ветра и влажности). При этом в городе распределение температуры оказывается неоднородным – оно зависит от геометрии застройки, особенностей рельефа и термодинамических свойств самой поверхности. Неоднородность нагрева поверхности города приводит к возникновению конвективных течений и естественной терморегуляции городского массива. При этом течения в таких условиях являются принципиально трехмерными.

На сегодняшний день проведено большое количество натурных измерений, которые показывают, как влажность, скорость и направление ветра влияют на формирование течений внутри городского квартала [1–9]. Однако возможности натурных измерений сильно ограничены, поэтому обобщить результаты на масштаб хотя бы нескольких кварталов и выделить фундаментальные особенности морфологии города оказывается очень трудно.

Среди численного моделирования можно выделить работы [10, 11], в которых рассмотрена трехмерная модель района г. Вашингтон. Размер исследуемой области 2.0×3.6 км с масштабируемой сеткой, высота по вертикали всего 2.5 м. Авторы пишут, что использование детальной геометрии имеет несомненные преимущества. С другой стороны, подобные расчеты требуют больших вычислительных затрат, сложной постобработки и анализа. Поэтому авторы предлагают использовать данный подход только для улучшения параметризации существующих метеорологических моделей.

В лабораторных условиях течения, возникающие в районе нескольких зданий, исследуют в аэродинамических трубах [12–15]. В качестве объектов исследования используют кубические или прямоугольные блоки, расположение блоков может быть упорядочено или соответствовать типичным городским застройкам. В [16–17] в качестве экспериментальных моделей используют макеты реальных городов. В первом случае – это центральная часть г. Нант на западе Франции 400 м в диаметре (масштаб макета 1:200), во втором случае – это макет части Оклахома-Сити, США, площадью около 1 км^2 (масштаб макета 1:300). В обоих случаях авторы указывают на необходимость рассмотрения реальной геометрии для получения

реалистичных результатов. Температурные измерения ни в одном исследовании не проводились.

В данной работе проведено экспериментальное исследование процессов теплообмена в условиях городской застройки. В качестве модели был использован макет части г. Пермь, который воспроизводит особенности рельефа местности, в том числе искусственного происхождения, на территории площадью 5 км^2 .

2. Экспериментальная установка

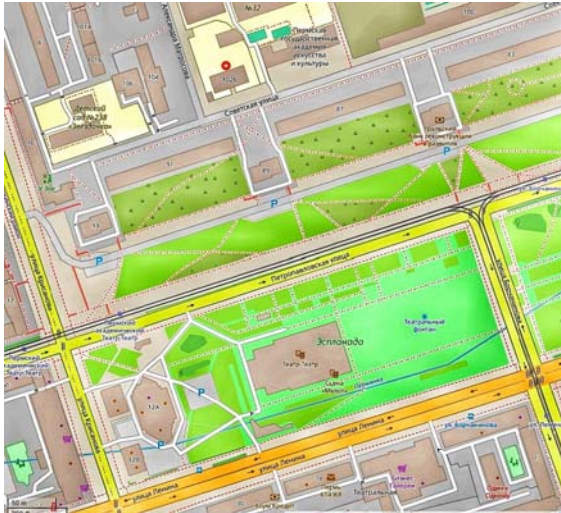
В качестве объекта исследований использована модель центрального района города Пермь. Модель создана из ABS пластика на 3D принтере Picaso. Модель качественно воспроизводит особенности рельефа местности, расположение и высоту зданий на территории 5 км^2 (масштаб печати 1:4000). Масштаб выбран с учетом характерных значений коэффициентов турбулентной вязкости в приземном атмосферном слое ($1\text{--}5 \text{ м}^2/\text{с}$) для того, чтобы управляющие параметры в лабораторном эксперименте и эффективные управляющие параметры в реальных условиях были сравнимы. В качестве основы были использованы данные из некоммерческого веб-картографического проекта OpenStreetMap. Модель покрыта матовой серой термоустойчивой грунтовкой. На рис. 1 представлены изображения части макета, повторяющего местность размером 500×500 м.

Модель расположена в теплоизолированном боксе, размер которого 85×75 см. Стенки бокса выполнены из органического стекла, толщиной 5 мм и высотой 20 см, дном бокса является текстолитовая пластина толщиной 20 мм.

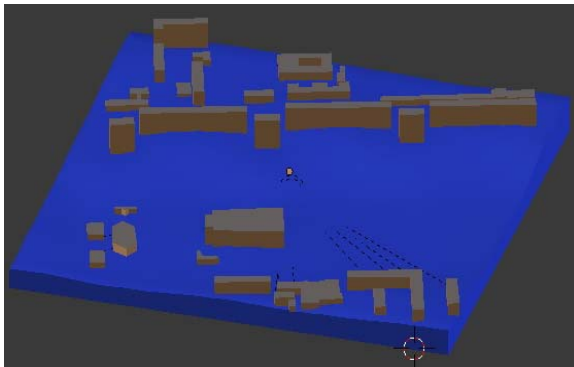
Первые эксперименты были направлены на моделирование процесса остывания поверхности города после продолжительного нагрева солнечным излучением. Нагрев поверхности города реализован при помощи инфракрасного обогревателя (BALLU BIH-S2-0.3, мощность излучения 300 Вт). Размер обогревателя 59×59 см. Лампа расположена на высоте 20 см от поверхности стола и смонтирована заподлицо с крышкой теплоизолирующего бокса. В результате поверхность модели прогревается практически однородно до температуры $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Числа Рэля при этом достигают порядка $6 \cdot 10^3$, в реальных условиях для летнего времени эффективные числа Рэля (рассчитанные при помощи турбулентных коэффициентов) составляют от $1 \cdot 10^3$ до $9 \cdot 10^3$ (характерный размер выбран 50 м, перепад температуры – несколько градусов).

В качестве рабочей среды использован воздух. Для точечных измерений температуры использованы дифференциальные термодары. Кроме термодарных измерений проведены полевые измерения температуры при помощи инфракрасной камеры FLIR SC5000. ИК-камера имеет следующие характеристики: спектральный диапазон 3–5 мкм, максимальный размер кадра 320×256 точек,

пространственная чувствительность составляет 10^{-4} м, минимальная погрешность измерения температуры 25 мК. Частота съемки 10 Гц. На рис. 2 показаны расположение термопар (желтые маркеры) и область измерения ИК камеры (белая рамка) относительно центра модели (черный маркер). Внешней красной рамкой отмечено расположение инфракрасного обогревателя.



(a)



(б)



(в)

Рис. 1. Изображение части макета: а – OpenStreetMap; б – трехмерная модель для печати; в – готовая модель из ABS пластика

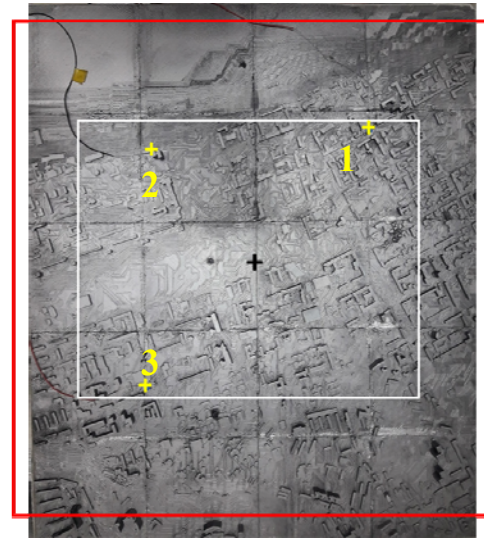


Рис. 2. Расположение термопар, области измерения ИК камеры и инфракрасного обогревателя относительно центра модели

3. Результаты

На рис. 3 представлена зависимость температуры от времени для термопар 1, 2, 3. Начало отсчета соответствует включению инфракрасного обогревателя. Термопары 1 и 2 расположены в похожих по высоте и частоте застройки точках, в отличие от них термомпара 3 территориально находится в густо заселенном районе, поэтому температура в точке 3 более высокая. Как видно из рисунка, примерно через 1.5 ч в боксе наступает квазиравновесие. Для исследования процесса остывания поверхности города после достижения квазиравновесия необходимо открыть крышку бокса и выключить обогреватель. С этого момента начинаются измерения ИК камеры.

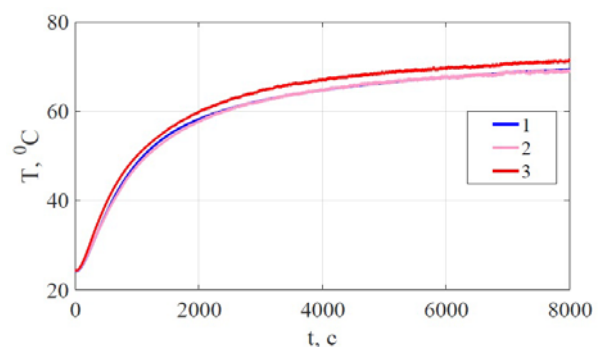


Рис. 3. Выход на квазистационарный режим

На рис. 4 представлены зависимости средней и максимальной по всей площади макета температуры от времени (данные получены ИК камерой). Остывание поверхности макета происходит быстро, в первые 500 с температура уменьшается в два раза, затем идет процесс медленного выравнивания температуры. В первые несколько минут зна-

чительную роль в теплообмене играет конвекция, которая возникает за счет разницы температур между поверхностью города и окружающим воздухом. Таким образом, есть несколько стадий эволюции так называемого «теплового острова» (в зарубежной литературе «urban heat island»). С течением времени интенсивность конвективных движений снижается, а значит, и интенсивность теплообмена уменьшается. Однако даже спустя час, разница между максимальной и средней температурой составляет около 4 °С.

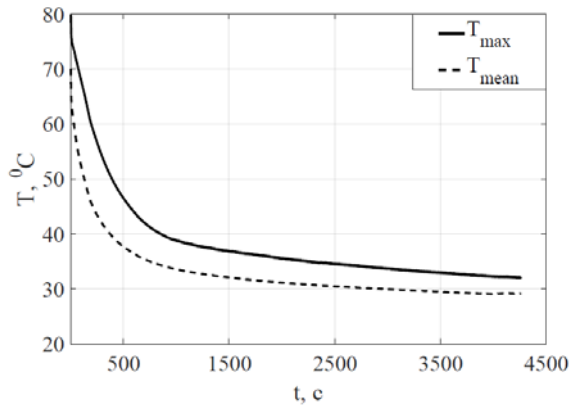


Рис. 4. Зависимость средней и максимальной температуры по всей поверхности макета от времени

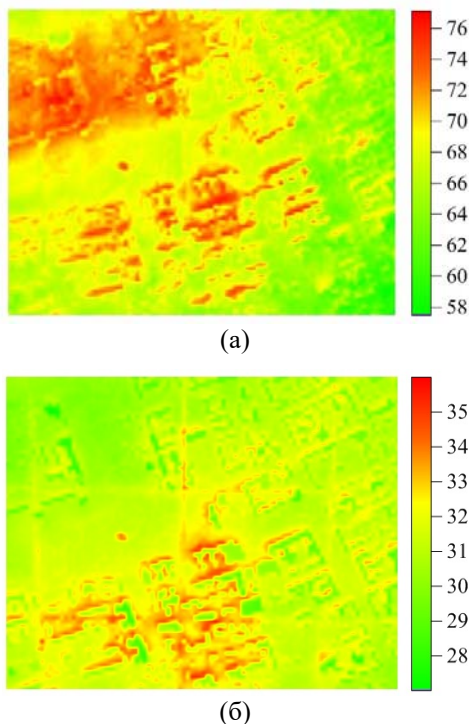


Рис. 5. Термограммы поверхности макета после продолжительного нагревания ИК излучением. Разница между снимками около получаса

На рис. 5 представлены примеры термограмм поверхности города. Первая термограмма сделана

на начальном этапе, в ходе быстрой фазы остывания, а вторая термограмма получена спустя тридцать минут. Необходимо отметить, что топология поверхности и морфология застройки приводят к тому, что поверхность макета прогревается неоднородно. Остывание поверхности также происходит неоднородно. Открытая местность остывает быстрее, при этом здания, напротив, аккумулируют тепло (вблизи домов температура остается выше средней даже спустя продолжительное время).



Рис. 6. Области макета размером 500×500 м: а – $A = 0.9$; б – $A = 0.7$. Белым цветом показана открытая местность, здания обозначены черным

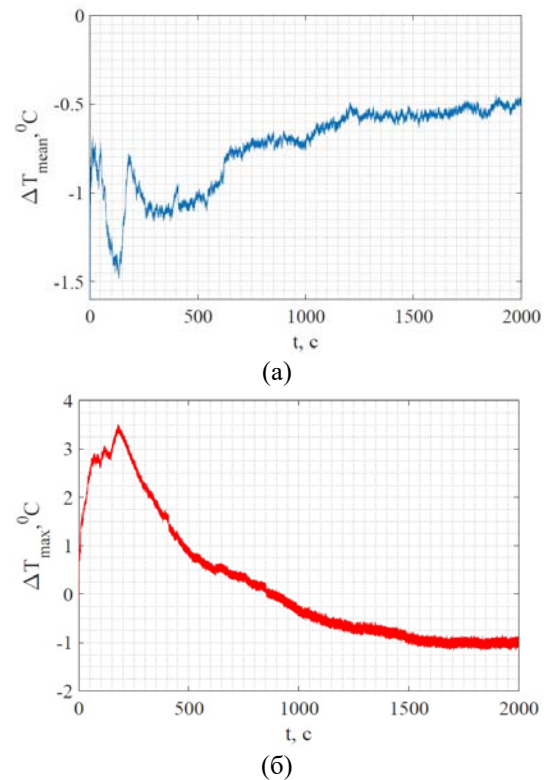


Рис. 7. Зависимость разницы температур от времени для областей $A = 0.9$ и $A = 0.7$: а – средних; б – максимальных

Рассмотрим две области макета, одинаковой площади, но различной плотности застройки (рис. 6). Размер областей 500×500 м. Введем переменную A , которая показывает отношение площади открытой поверхности к общей площади выбранных областей:

$$A = \frac{S_w}{S},$$

$$\Delta T = T|_{A=0.9} - T|_{A=0.7}$$

Для первой области такое отношение будет равно 0.9, для второй 0.7. Разница средних и максимальных температур для этих областей в зависимости от времени представлена на рис. 7.

В среднем, область $A = 0.7$ прогревается сильнее. Более высокая плотность застройки способствует накоплению тепла вблизи зданий, поэтому разница температур остается отрицательной все время наблюдения. При этом локально температура для области $A = 0.9$ может быть выше (рис. 7 б). Это значит, что существуют застойные зоны, где температура может сохранять высокие значения, в то время как остальная часть территории существенно остыла. Области максимальных температур в момент времени $t = 250$ с отмечены на рис. 6 красным цветом. Таким образом, наличие застойных зон связано в первую очередь с геометрией зданий и их расположением. Вопрос об оптимальной геометрии города, плотной и разреженной застройке остается актуальным и требует дополнительных исследований.

4. Заключение

Реализован новый экспериментальный подход к изучению процессов теплообмена внутри городского пространства. В качестве объекта исследования использован макет центральной части города Пермь с подробной детализацией рельефа местности, высоты и расположения зданий. Макет напечатан на 3D принтере в масштабе 1:4000, площадь исследуемой поверхности 5 км².

Проведена серия экспериментов по исследованию процесса остывания поверхности города после продолжительного нагревания инфракрасным излучением. Показано, что разница между средней по площади измерения и максимальной температурой остается значительной на протяжении всего времени наблюдения. При этом максимальная температура поверхности наблюдается вблизи зданий. Сравнение областей поверхности с различной частотой застройки показало, что наличие зданий способствует накоплению тепла, а в области плотной застройки существуют застойные зоны с высокими значениями температуры.

Предложенный подход лабораторного моделирования реальной физической системы открывает большие возможности для решения широкого класса задач. В частности, распространение примеси от промышленных объектов и транспорта, прогнозирование последствий чрезвычайных ситуаций, изменение термодинамических характеристик города с целью улучшения микроклимата и др. Таким образом, представлен эффективный инструмент для комплексного решения основных задач городской климатологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края (Программа поддержки научных школ Пермского края, грант № С-26/788)

Список литературы

1. *Arnfield A. J., Mills M. G.* An Analysis of the circulation characteristics and energy budget of dry, asymmetric, east-west urban canyon. I. Circulation characteristics // *International Journal of Climatology*. 1994. Vol. 14. P. 119–134.
2. *Arnfield A. J., Mills M. G.* An Analysis of the circulation characteristics and energy budget of dry, asymmetric, east-west urban canyon. II. Energy budget // *International Journal of Climatology*. 1994. Vol. 14. P. 239–261.
3. *Kruger E. L., Minella F. O., Rasia F.* Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil // *Building and Environment*. 2011. Vol. 46. P. 621–634.
4. *Nunez M., Oke T. R.* The energy balance of an urban canyon // *Journal of Applied Meteorology*. 1977. Vol. 16 (1). P. 11–19.
5. *Zajic D., Fernando H. J. S., Calhoun R., Princevac M., Brown M. J., Pardyjak E. R.* Flow and Turbulence in an Urban Canyon // *American Meteorological Society*. 2011. Vol. 50 (1). P. 203–223.
6. *Johansson E.* Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco // *Building and environment*. 2006. Vol. 51. P. 119–133.
7. *Xi T., Li Q., Mochida A., Meng Q.* Study on the outdoor thermal environment and thermal comfort around campus clusters in subtropical urban areas // *Building and Environment*. 2012. Vol. 52. P. 162–170.
8. *Yoshida A., Tominaga K., Watatani S.* Field measurements on energy balance of an urban canyon in the summer season // *Energy and Buildings*. 1991. Vol. 16. P. 417–423.
9. *Johnson G. T., Watson J. D.* The determination of view-factors in urban canyons // *Journal of Climate and Applied Meteorology*. 1984. Vol. 23. P. 329–335.
10. *Cybyk B. et al.* Simulation of fluid dynamics around complex urban geometries // *Proc. of 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. 2001. P. 803.
11. *Boris J.* The threat of chemical and biological terrorism: preparing a response // *Computing in Science and Engineering*. 2002. Vol. 4 (2). P. 22–32.
12. *Addepalli B., Pardyjak E. R.* A study of flow fields in step-down street canyons // *Environmental Fluid Mechanics*. 2015. Vol. 15 (2). P. 439–481.
13. *Perret L., Savory E.* Large-scale structures over a single street canyon immersed in an urban-type boundary layer // *Boundary-Layer Meteorology*. 2013. Vol. 148 (1). P. 111–131.

14. Rafailidis S. Influence of building areal density and roof shape on the wind characteristics above a town // *Boundary-Layer Meteorology*. 1997. Vol. 85 (2). P. 255–271.
15. Carpentieri M., Robins A. G. Influence of urban morphology on air flow over building arrays // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2015. Vol. 145. P. 61–74.
16. Kastner-Klein P., Rotach M. W. Mean flow and turbulence characteristics in an urban roughness sublayer // *Boundary-Layer Meteorology*. 2004. Vol. 111 (1). P. 55–84.
17. Klein P., Leitl B., Schatzmann M. Driving physical mechanisms of flow and dispersion in urban canopies // *International Journal of Climatology*. 2007. Vol. 27 (14). P. 1887–1907.
7. Xi T., Li Q., Mochida A., Meng Q. Study on the outdoor thermal environment and thermal comfort around campus clusters in subtropical urban areas. *Building and Environment*, 2012, vol. 52, pp. 162–170.
8. Yoshida A., Tominaga K., Watatani S. Field measurements on energy balance of an urban canyon in the summer season. *Energy and Buildings*, 1991, vol. 16, pp. 417–423.
9. Johnson G. T., Watson J. D. The determination of view-factors in urban canyons. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, vol. 23, pp. 329–335.
10. Cybyk B. et al. Simulation of fluid dynamics around complex urban geometries. *Proc. of 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2001, p. 803.

References

1. Arnfield A. J., Mills M. G. An Analysis of the circulation characteristics and energy budget of dry, asymmetric, east-west urban canyon. I. Circulation characteristics. *International Journal of Climatology*, 1994, vol. 14, pp. 119–134.
2. Arnfield A. J., Mills M. G. An Analysis of the circulation characteristics and energy budget of dry, asymmetric, east-west urban canyon. II. Energy budget. *International Journal of Climatology*, 1994, vol. 14, pp. 239–261.
3. Kruger E. L., Minella F. O., Rasia F. Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil. *Building and Environment*, 2011, vol. 46, pp. 621–634.
4. Nunez M., Oke T. R. The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied Meteorology*, 1977, vol. 16 (1), pp. 11–19.
5. Zajic D., Fernando H. J. S., Calhoun R., Princevac M., Brown M. J., Pardyjak E. R. Flow and turbulence in an urban canyon. *American Meteorological Society*, 2011, vol. 50 (1), pp. 203–223.
6. Johansson E. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, 2006, vol. 51, pp. 119–133.
11. Boris J. The threat of chemical and biological terrorism: preparing a response. *Computing in Science and Engineering*, 2002, vol. 4 (2), pp. 22–32.
12. Addepalli B., Pardyjak E. R. A study of flow fields in step-down street canyons. *Environmental Fluid Mechanics*, 2015, vol. 15 (2), pp. 439–481.
13. Perret L., Savory E. Large-scale structures over a single street canyon immersed in an urban-type boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 2013, vol. 148 (1), pp. 111–131.
14. Rafailidis S. Influence of building areal density and roof shape on the wind characteristics above a town. *Boundary-Layer Meteorology*, 1997, vol. 85 (2), pp. 255–271.
15. Carpentieri M., Robins A. G. Influence of urban morphology on air flow over building arrays. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, vol. 145, pp. 61–74.
16. Kastner-Klein P., Rotach M. W. Mean flow and turbulence characteristics in an urban roughness sublayer. *Boundary-Layer Meteorology*, 2004, vol. 111 (1), pp. 55–84.
17. Klein P., Leitl B., Schatzmann M. Driving physical mechanisms of flow and dispersion in urban canopies. *International Journal of Climatology*, 2007, vol. 27 (14), pp. 1887–1907.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Евграфова А. В., Сухановский А. Н. Лабораторное моделирование в задачах городской климатологии // Вестник Пермского университета. Физика. 2020. № 4. С. 37–42. doi: 10.17072/1994-3598-2020-4-37-42

Please cite this article in English as:

Evgrafova A. V., Sukhanovskii A. N. Laboratory modeling in urban climatology. Bulletin of Perm University. Physics. 2020, No. 4, pp. 37–42. doi: 10.17072/1994-3598-2020-4-37-42