

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 533.6.011, 53.072.001.57; 53.072.086.48.

**МЕТОДИКА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРИЗЕМНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР
В ЗАДАЧАХ АРХИТЕКТУРНО-ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ
АЭРОДИНАМИКИ**

©2025 г. Д. А. Дектерев^{a,b}, В. Д. Мешкова^{a,b,*}, П. Д. Шульженко^a,

А. А. Дектерев^{a,b}, П. А. Необъявляющий^b

^aСибирский федеральный университет

Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

^bИнститут теплофизики им. С.С. Кутателадзе

Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1

*e-mail: Redel-vd@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.12.2024 г.

После доработки 24.04.2025 г.

Принята к публикации 12.05.2025 г.

Изучение аэрационного режима в условиях городской застройки является важной и актуальной задачей. Основными исследовательскими подходами в ее решении являются численное моделирование и эксперименты в аэродинамических трубах. Экспериментальные данные важны как для качественной оценки структуры потока, так для верификации математических моделей. В настоящей работе представлены результаты исследований приземных вихревых структур методом сажемасляной визуализации для моделей различных типов городской застройки, проводимых на аэродинамических установках. Описана методика проведения эксперимента как на канонических моделях в форме куба, так и для более сложных макетов застройки. Сопоставление результатов сажемасляной визуализации с расчетными векторными полями напряжения на поверхности показало их качественное соответствие.

1. ВВЕДЕНИЕ

Регулирование ветрового режима является важнейшей архитектурно-планировочной задачей, которую необходимо решать на градостроительном уровне. Корректное планирование застраиваемой территории способствует созданию благоприятных условий для рассеивания загрязняющих веществ в условиях города и позволяет сформировать комфортные ветровые условия в уличных пространствах [1]. Оценка текущего состояния экологической обстановки в современных городах говорит о том, что в них зачастую складываются

неблагоприятные условия. Определяющим фактором, влияющим на уровень экологической обстановки, является ветровой режим. Используемые подходы планирования жилых микрорайонов направлены в основном на социальную функциональность [2] и практически не оцениваются с точки зрения аэрации территории и условий ветровой комфортности. В связи с этим возникает интерес к изучению аэрационного режима типичных видов современных жилых микрорайонов с оценкой формирования в них условий пешеходного комфорта.

Для исследования аэродинамики городских микрорайонов применяются как расчетные методы, так и физическое моделирование в аэродинамических трубах [3]. Для получения количественных данных в современном эксперименте применяется метод исследования полей скорости потока (particle image velocimetry, PIV) [4]. Однако при рассмотрении задач пешеходной комфортности интерес представляет область, максимально приближенная к земной поверхности. При использовании экспериментальных аэродинамических моделей небольшого масштаба эта область располагается буквально в миллиметрах от поверхности, и PIV теряет часть информации, так как снимки засвечиваются лазерным излучением, отраженным от поверхности.

До появления современных оптических методов использовались разнообразные подходы, позволяющие визуализировать структуру течения при обтекании тел. Так, в работах [5, 6] исследовались структуры потоков при обтекании круглого цилиндра, шара и куба. Визуализация осуществлялась с помощью краски, локально вносимой в поток воды, что позволяло наблюдателям анализировать сложные вихревые структуры. Другой способ визуализации заключался в добавлении в поток алюминиевого порошка, который при осаждении позволяет получить картины линий тока на поверхности [7].

Еще одним традиционным методом визуализации структуры течения у поверхности является сажемасляная визуализация. Данный метод основан на получении картин вследствие течения неоднородно подкрашенных слоев масла по поверхности вдоль линий действия касательных напряжений, которые соответствуют идущим вблизи поверхности линиям тока. В результате эксперимента получается картина распространения масляного следа, усредненного за довольно длительный период. Зачастую в роли жидкости используется керосин с добавлением контрастного вещества, в случае больших скоростей для уменьшения текучести (повышения вязкости) в керосин можно добавить моторное масло. В качестве контрастного вещества используется пигмент — мелкодисперсные порошки-красители. Данный метод удобен тем, что его можно применять в аэродинамических трубах.

2. АПРОБАЦИЯ МЕТОДА САЖЕМАСЛЯНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Апробация метода сажемасляной визуализации, анализ его особенностей и границ применимости для задач аэродинамики городской застройки проводились в аэродинамической трубе замкнутого типа на примере обтекания моделей кубической формы. Использовались кубы высотами $H_1 = 0.05$ м и $H_2 = 0.1$ м. Сечение рабочего участка составляет 0.8×0.8 м².

Необходимо понимать, что результат визуализации зависит от многих параметров: скорости потока, температуры окружающей среды (влияющей на вязкость керосина), шероховатости поверхности, концентрации добавленного пигмента. Таким образом, под конкретную задачу и конкретные условия приходится подбирать параметры эксперимента. В данной работе внешняя температура составляла 20–25 °С, в качестве поверхности использовалось гладкое листовое оргстекло. Скорости для получения картин течения составляли 7.8 и 15.6 м/с (характерные числа Рейнольдса $Re = 25000, 50000$ для модели $H_1 = 0.05$ м и $Re = 50000, 100000$ для модели $H_2 = 0.1$ м). При более высоких скоростях происходил практически полный унос рабочей жидкости и требовалось добавление в керосин моторного масла, при более низких керосин переставал двигаться под действием потока.

В силу разных скоростей набегающего потока в эксперименте режимы течения керосина также изменялись (рис. 1), в случаях большей скорости за моделями формировались зоны сильного пониженного давления, где происходило скопление керосина с пигментом и после высыхания наблюдались яркие пятна от красителя. В случае меньших скоростей скопление керосина было меньшим. На рисунке также видно, что наблюдается визуальная разница в картине следа в других областях. На конечный результат визуализации влияет не только скорость потока, но и относительное количество добавленных красителей к объему керосина и равномерность нанесения раствора на поверхность рабочего участка. Тем не менее, несмотря на визуальную разницу, качественно картины обтекания были идентичны, границы формирования вихревых зон с большой точностью соответствуют друг другу для всех рассмотренных вариантов скоростей потока и размеров моделей (рис. 1).

Рис. 1. Сажемасляная визуализация обтекания куба:

Результаты эксперимента с сажемасляной визуализацией сравнивались с литературными данными [7, 8] и анализировались совместно с данными собственного PIV-эксперимента и CFD-моделирования авторов [9]. Сделаны выводы, что метод сажемасляной визуализации позволяет корректно предсказывать характерные границы приземных вихревых структур при обтекании модельных зданий, при этом он легко реализуем для изучения моделей различных типов городской застройки.

3. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА С МАКЕТАМИ ЗАСТРОЙКИ

В силу того, что размеры ряда изучаемых моделей городской застройки были сопоставимы или даже превышали ширину рабочего участка аэродинамической трубы, сажемасляная визуализация обтекания моделей городской застройки проводилась на аэродинамическом стенде с большим открытым рабочим участком, не ограниченным боковыми стенками. Принципиальная схема стенда представлена на рис. 2. Основными конструктивными элементами установки являются аэродинамическая стена 1, конфузор 2, рабочий участок 3, объект исследования 4, где в качестве примера тела обтекания приведен куб высотой $H = 0.5$ м. Ширина рабочего участка составляет 1.5 м, длина рабочего участка 4 м.

Рис. 2. Принципиальная схема стенда с аэродинамической стеной

Аэродинамическая стена 1 выполнена в виде массива из 16 промышленных вентиляторов ВО-6-300 №4 0.75кВт, 3000 об/мин (рис. 2). Диаметр вентилятора составляет 0.4 м, таким образом, с учетом монтажных элементов при сборке массива выходное сечение аэродинамической стены равняется 3.7 м^2 ($1.92 \times 1.92 \text{ м}^2$). Каждый горизонтальный ряд (4 вентилятора) управляется частотным преобразователем ЕКФ 4-5.5 кВт, 3×400 ВЕКТОР-100, что позволяет изменять профиль выходного потока по вертикали или создавать пульсации скорости. Суммарная потребляемая мощность оценивается в 12 кВт, при этом скорость формируемого потока достигает 10 м/с. При использовании конфузора 2, уменьшающего выходное сечение до $1.5 \times 1.5 \text{ м}^2$, скорость потока достигает 15 м/с [10].

В отличие от замкнутой аэродинамической трубы, скоростные и пульсационные характеристики потока в которой изучены с применением PIV-методики, параметры потока на стенде с аэродинамической стеной изучены менее детально. Применение PIV-метода затруднительно в силу необходимости засева большого объема воздуха с последующим выбросом мелкодисперсных порошков в рабочее помещение, что приводит к загрязнению дорогостоящего оборудования и возможному вреду организму операторов.

Для подтверждения корректности результатов, получаемых на данном аэродинамическом стенде, предварительно были проведены аналогичные эксперименты с кубами, исследованными в аэродинамической трубе, подтверждающие идентичность получаемых картин сажемасляной визуализации.

Архитектурно-строительная типология зданий выделяет несколько исторически сложившихся видов жилой застройки – точечная, строчная, периметральная и смешанная [11]. В связи с тем, что смешанную застройку крайне сложно представить в виде единой типовой модели, в качестве исследуемых видов застроек были выбраны периметральная, строчная и точечная.

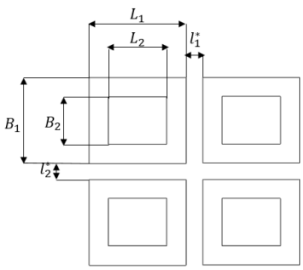
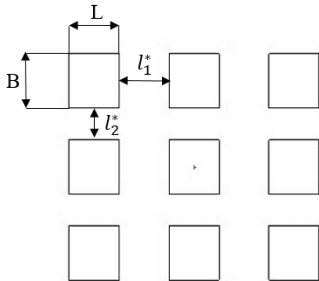
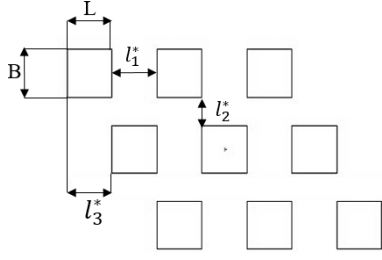
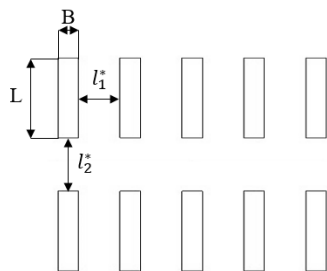
Для формирования моделей зданий со средней высотой в 5 этажей использовались элементы размерами $30 \times 30 \times 150 \text{ мм}^3$ и $30 \times 30 \times 75 \text{ мм}^3$, в сочетании позволяющие создавать строчные, Г-, П-образные и замкнутые формы. Для зданий со средней высотой в 10 этажей применялись аналогичные элементы, удвоенные по высоте. Для точечных зданий с высотой 10–30 этажей использовались комбинации элементов $60 \times 60 \times 60 \text{ мм}^3$ и $60 \times 60 \times 90 \text{ мм}^3$. Масштаб макетов по отношению к реальным строениям составлял порядка 1:500. Примеры элементов моделей зданий приведены на рис. 3.

Рис. 3. Элементы для создания 3D-моделей городской застройки

Эксперимент по обтеканию макетов городской застройки проводился при скорости набегающего потока 10 м/с, в качестве подстилающей поверхности, как и в аэродинамической трубе, использовалось гладкое листовое оргстекло. Параметры рабочего вещества при сажемасляной визуализации использовались аналогичные применявшимся в экспериментах в аэродинамической трубе.

В табл. 1 схематически представлены рассматриваемые виды макетов городской застройки с характерными размерами.

Таблица 1. Исследуемые модели городских застроек (размеры приведены в мм)

Вид/тип городской застройки		
Периметральная	Точечная	Строчная
 $L_1 = 150, L_2 = 90$ $B_1 = 90, B_2 = 75$ $l_1^* = 26, l_2^* = 26$ Высота моделей 30	 $L=60, B=60$ $l_1^* = 60, l_2^* = 35$ Высота моделей 180  $L=60, B=60$ $l_1^* = 60, l_2^* = 60, l_3^* = 30$ Высота моделей 180	 $L=150, B=30$ $l_1^* = 60, l_2^* = 100$ Высота моделей 30

4. САЖЕМАСЛЯНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРИЗЕМНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР ПРИ ОБТЕКАНИИ МОДЕЛЕЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

Для представленных выше видов городской застройки была проведена визуализация картин течения у поверхности земли. Полученные результаты (рис. 4) позволяют наглядно продемонстрировать границы различных ветровых зон, формируемых при обтекании макетов разных видов застройки.

Рис. 4. Картины обтекания макетов застройки...

Рассматривая периметральную застройку (рис. 4а), можно отметить, что во внутренней области зданий формируются зоны, где наблюдается интенсивное скопление вещества-индикатора, которое говорит о том, что в данных областях наблюдается низкий скоростной вихревой режим движения воздуха.

При обтекании потоком высотной точечной застройки в случае параллельного расположения моделей зданий относительно друг друга (рис. 4б) за каждым зданием образуются области, в которых происходит накопление вещества-индикатора, что говорит о формировании аэродинамической тени за зданиями, где происходят снижение скоростного режима потока и образование зон рециркуляции. Наличие разрывов между моделями зданий, совпадающих с направлением ветра, приводит к сквозному прохождению ветра сквозь застройку, т.е. можно считать, что застройка такого типа является аэродинамически прозрачной.

Для высотной застройки с диагональным расположением зданий (рис. 4в) такие устойчивые зоны уже не наблюдаются, что обусловлено отсутствием возможности беспрепятственного протекания воздушного потока между зданиями. Происходит резкое изменение траектории течения, что приводит к формированию сложных вихревых структур в пространстве между строениями. В целом такая застройка приводит к формированию за ней крупных вихрей, аналогичных наблюдаемым при обтекании единичного куба. В отличие от параллельного расположения моделей зданий, такая застройка не является аэродинамически прозрачной.

При поперечном обтекании строчной застройки (рис. 4г) между зданиями формируются крупномасштабные продольные вихри, приводящие к формированию вытянутого вдоль моделей зданий скопления красителя. По боковым стенкам здания образуются отрывные вихри, застойные зоны от которых наблюдаются в виде интенсивных пятен красителя. Видно, что наличие широкого пространства между двумя группами строений со строчной застройкой приводит к практическому отсутствию аэродинамического взаимодействия между ними.

Обтекание продольно расположенных строений при строчной застройке (рис. 4д) характеризуется набором идентичных картин обтекания для всех зданий, содержащих типовые зоны, аналогичных наблюдаемым при обтекании отдельного куба.

Результаты экспериментальных исследований сравнивались с данными численного CFD-моделирования. Расчеты выполнялись на авторском программном коде “SigmaFlow” [12], реализующем микромасштабную модель атмосферы городской среды, основанную на нестационарных усреднениях по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса с двухпараметрической $k-\omega$ -SST-моделью турбулентности [13]. При расчете строения рассматривались в реальном масштабе и характерные числа Рейнольдса при этом превышали $Re = 10^6$. В то же время числа Рейнольдса в проведенном эксперименте находятся в диапазоне $Re = 10^4$. Тем не менее, как показывают предварительные работы [9], даже при таких различающихся числах Рейнольдса наблюдается автомодельность течения. Для расчета задавались граничные условия, характерные для нейтральной атмосферы [14–16]. Результаты сажемасляной визуализации сравнивались с расчетными полями напряжения на подстилающей поверхности.

Наложение усредненных векторных полей напряжения, полученных в результате численного моделирования, на изображения структур, полученных при сажемасляной визуализации, показало, что наблюдается качественное соответствие картин с характерными зонами движения потока: области с локальным ускорением ветра, зоны рециркуляции и крупномасштабные вихревые структуры (рис. 5).

Рис. 5. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных для разных типов застройки

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для изучения аэродинамики при обтекании различных типов застройки использован метод сажемасляной визуализации. Сравнение экспериментальных данных с результатами CFD-моделирования задач обтекания городской застройки подтвердило, что, несмотря на простоту метода, он позволяет качественно описать формирование характерной приповерхностной структуры потока.

Автомодельность течений в широком диапазоне чисел Рейнольдса позволяет использовать в рассмотренных задачах модели достаточно небольших геометрических размеров, что позволяет выполнять стендовые исследования групп строений или целых микрорайонов.

Для периметральной застройки характерно низкоскоростное вихревое движение воздуха внутри застройки. Точечная высотная застройка с параллельным расположением моделей зданий относительно друг друга является аэродинамически прозрачной. В то же время диагональное расположение зданий характеризуется формированием сложных

вихревых структур в пространстве между строениями, обтекание всей совокупности зданий напоминает обтекание единичного куба. Наличие широкого пространства между двумя группами строений со строчной застройкой приводит к практическому отсутствию аэродинамического взаимодействия между ними.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Разработка и апробация экспериментальных методов выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (124062400029-2). Проведение экспериментальных и численных исследований, а также анализ и представление результатов реализовано при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-61-00098), <https://rscf.ru/project/22-61-00098/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hala Al Haddid, Karam M. Al-Obaidi* // *Energy Nexus*. 2022. V. 8. P. 100159.
<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100159>
2. *Antoniou N., Montazeri H., Blocken B., Neophytou M.* // *Build. Environ.* 2024. V. 60. P. 111690.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111690>
3. *Blocken B.* // *Build. Environ.* 2015. V. 91. P. 219.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.015>
4. *Зарунов Д.И., Мухеев Н.И., Душин Н.С., Аслаев А.К., Шакиров Р.Р.* // *Вычислительные технологии*. 2018. Т. 23. № 1. С. 33.
5. *Карпусова А.Ю.* // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2014. № 3. С. 22.
6. *Карпусова А.Ю.* // XIII Всероссийская школа-конференция с международным участием. Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики. 2014. С. 69.
http://www.itp.nsc.ru/conferences/avtfg14/files/theses_AVTFG_XIII.pdf
7. *Терехов В.И., Гныря А.И., Коробков С.В.* // *Теплофизика и аэромеханика*. 2010. Т. 17. № 4. С. 521.
8. *Martinuzzi R., Tropea C.* // *J. Fluids Eng.* 1993. V. 115. P. 85. <https://doi.org/10.1115/1.2910118>
9. *Dekterev D. A., Lobasov A. S., Meshkova V. D., Litvintsev K. Y., Dekterev Ar. A. Dekterev A. A.* // *Thermophys. Aeromech.* 2023. V. 30. P. 1131.
<https://doi.org/10.1134/S086986432306015X>
10. *Dekterev D., Dekterev A., Dekterev A., Vavilov D.* // *E3S Web of Conferences*. 2023. V. 459. P. 0700. <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202345907001>
11. *Vitor Oliveira.* *Urban Morphology. An Introduction to the Study of the Physical Form of Cities* Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
12. *Dekteryev A.A., Litvintsev K.Yu., Gavrilov A.A., Kharlamov E.B.* // *Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*. 2017. V. 10. № 4. P. 105. <https://doi.org/10.14529/mmp170410>
13. *Menter F.R.* // *23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference*. Orlando, USA. 1993. AIAA-93-2906. 2012. P. 21. <https://doi.org/10.2514/6.1993-2906>
14. *Louis J.F.* // *Boundary Layer Meteorology*. 1979. V. 17. P. 187.
<http://dx.doi.org/10.1007/BF00117978>
15. *Stull R. B.* *An introduction to boundary layer meteorology*. Netherlands, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8>
16. *Duynkerke P.G.* // *J. Atmos. Sci.* 1988. V. 45. P. 865.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1988\)045<0865:AOTTCM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1988)045<0865:AOTTCM>2.0.CO;2)

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Сажемасляная визуализация обтекания куба: слева – $Re = 50\,000$ (**а**), $Re = 25\,000$ (**б**); в середине – $Re = 100\,000$ (**а**), $Re = 50\,000$ (**б**); справа – $H=0.05$ (**а**) м, $H=0.1$ м (**б**).

Рис. 2. Принципиальная схема стенда с аэродинамической стеной.

Рис. 3. Элементы для создания 3D-моделей городской застройки.

Рис. 4. Картины обтекания макетов застройки: **а** – периметральная, **б** – параллельная точечная, **в** – диагональная точечная, **г** – строчная при поперечном расположении, **д** – строчная при продольном расположении.

Рис. 5. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных для разных типов застройки.

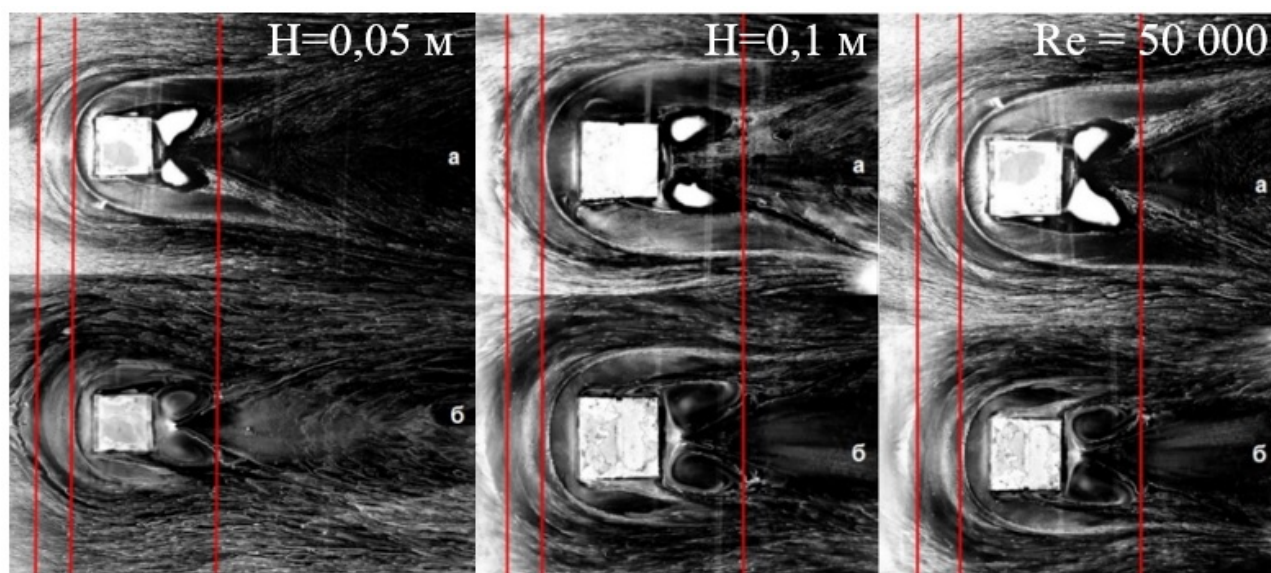


Рис. 1

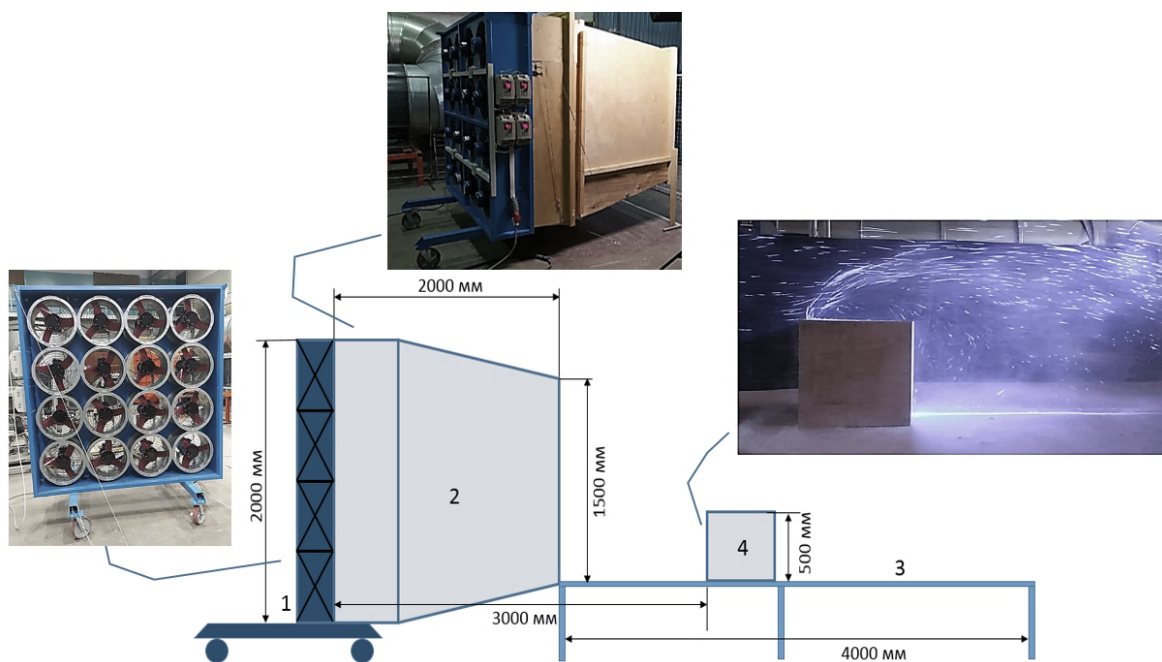


Рис. 2.

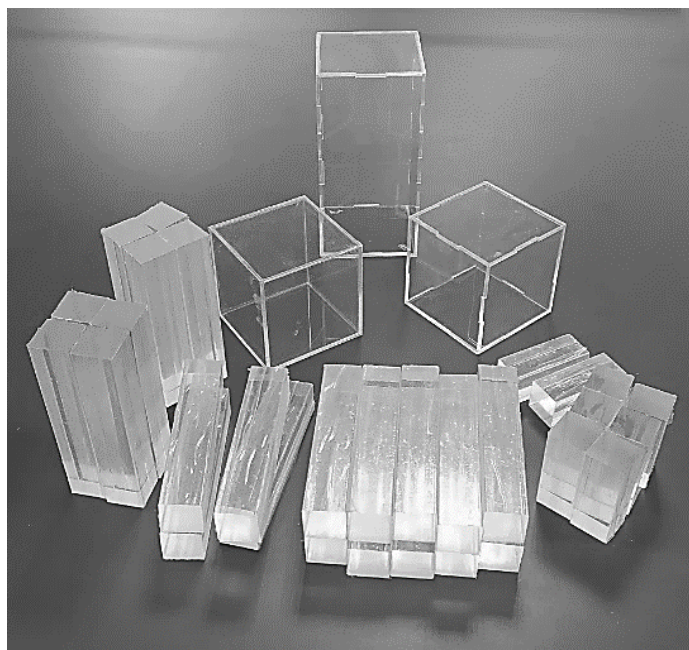
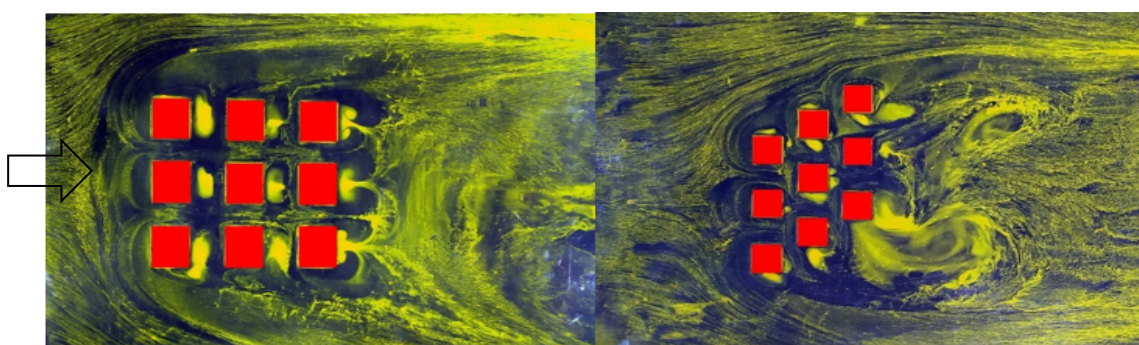


Рис. 3.

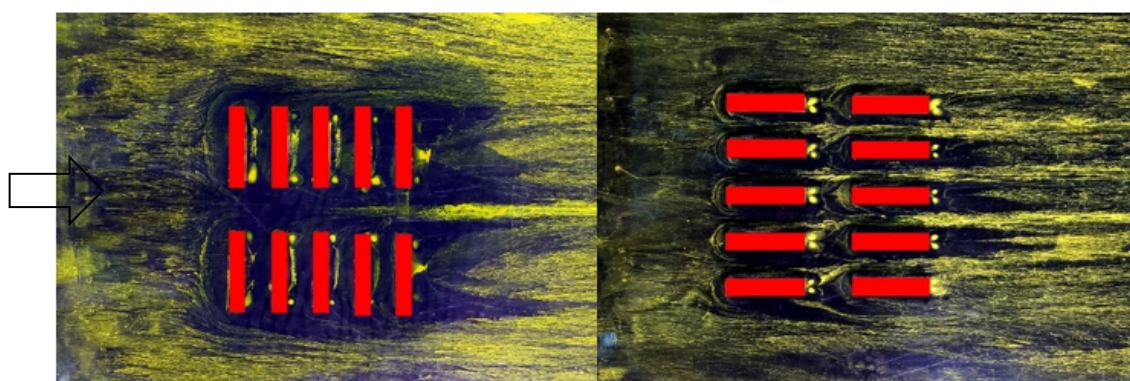


(a)



(б)

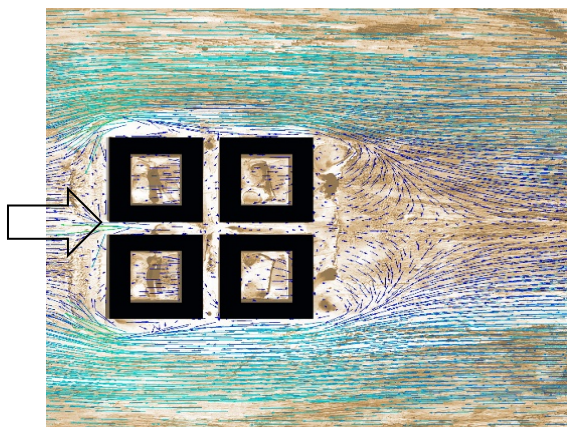
(в)



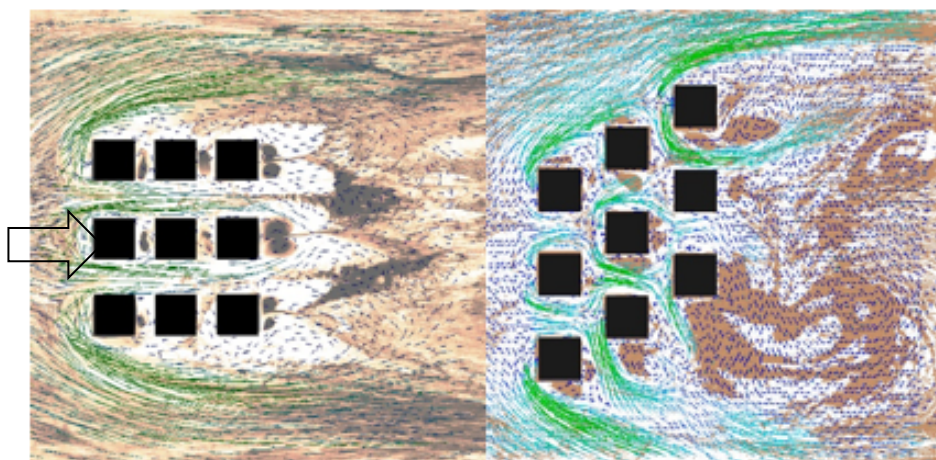
(г)

(д)

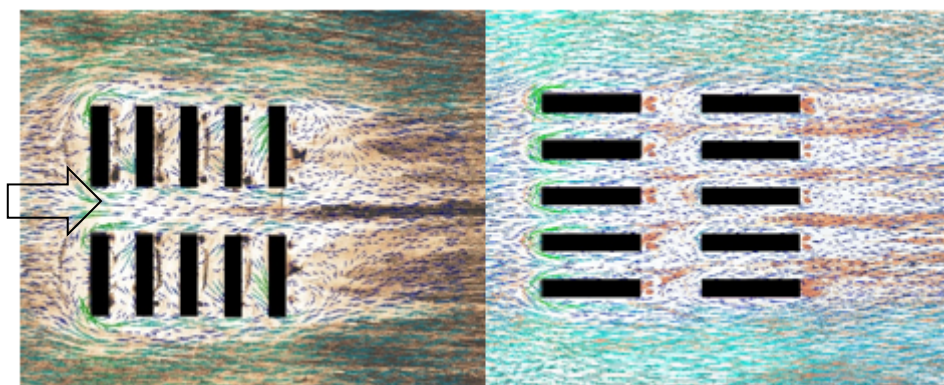
Рис. 4.



Периметральная



Точечная



Строчная

Рис. 5.