УДК. 533.6.011

Анализ влияния масштабного фактора на результаты моделирования обтекания зданий^{*}

Д.А. Дектерев^{1,2}, А.С. Лобасов, В.Д. Мешкова¹, К.Ю. Литвинцев², Ар.А. Дектерев^{1,2}, А.А. Дектерев^{1,2}

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: dekterev_da@mail.ru

В работе проведен анализ картин течения при обтекании модели здания кубической формы. Сопоставлены расчетные и экспериментальные данные для задач различного масштаба. Геометрические размеры моделей варьируются от 0,025 до 6 м, при этом диапазон чисел Рейнольдса в анализируемых данных составляет от 10⁴ до 10⁶. Показана масштабируемость задачи, что дает основание для проведения лабораторных трубных экспериментов.

Ключевые слова: аэродинамика, обтекание куба, вихревые зоны, масштабируемость, моделирование.

Введение

Изучение аэродинамики отдельных зданий или их групп является весьма важным направлением науки, которое позволяет дать ответы на вопросы, связанные с архитектурно-строительными нюансами, такими как ветровые нагрузки на элементы здания, а также с экологическими и социальными проблемами. Распространение вредных выбросов от автотранспорта, формирование зон запыленности или снежных заносов и пешеходная комфортность, зависящая от ветровых нагрузок, — все это напрямую связано с аэродинамикой обтекания зданий [1–3].

Натурное исследование застройки затруднительно в силу необходимости набора большого количества статистических данных в условиях непостоянности ветровых параметров и влияния множества вторичных факторов. Кроме того, большой интерес представляет предварительный анализ аэродинамики на стадии проектирования зданий или микрорайонов. В связи с этим применяются два традиционных подхода: лабораторный эксперимент с применением аэродинамических труб и численное моделирование.

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

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

Несмотря на то, что многими научными коллективами по всему миру проводятся трубные аэродинамические эксперименты, результаты зачастую поддаются критической оценке. В первую очередь это связано с масштабированием геометрических и физических параметров. Числа Рейнольдса в реальности составляют порядка $\text{Re} = 10^6 - 10^7$, в то время как в лабораторном эксперименте значения Re достигают $10^4 - 10^5$. Также важную роль играют профиль скорости набегающего потока и уровень турбулентных пульсаций. При численном моделировании вопрос масштаба практически отпадает, тем не менее остается вопрос задания параметров набегающего потока и, что наиболее важно, выбор математических моделей, позволяющих корректно описывать поставленную задачу. Влияние выбора расчетных моделей наглядно показано в работе [4]. Кроме того, чтобы признать результат численного моделирования верным, необходимо его сопоставление с экспериментальными данными. Отсюда и возникает необходимость оценки влияния масштабного фактора на результаты моделирования обтекания зданий.

В настоящей работе приводится сопоставление полученных авторами статьи экспериментальных и расчетных результатов с литературными данными для обтекания простейшей модели здания в форме куба [4–12].

Методика эксперимента и расчета

В ходе работы было проведено два эксперимента на различных аэродинамических установках. Первый эксперимент заключался в обдувании куба высотой H = 0,5 м посредством аэродинамической стены, выполненной в виде массива из 4×4 промышленных вентиляторов ВО-6-300 № 4 0,75кВт/3000об/мин. Схема установки приведена на рис. 1. Площадь аэродинамической стены *I* составляет 2×2 м, однако для возможности увеличения скорости и выравнивания потока стена оснащена конфузором 2 с выходным сечением $1,5 \times 1,5$ м. На уровне нижней части конфузора установлена рабочая поверхность *3* размером 3×4 м, на которой размещена исследуемая модель куба *4*.

С помощью анемометра «ТестЭйр АМ-70» в области размещения исследуемой модели были измерены скорости и построен профиль набегающего потока (см. 1 на рис. 2). В данном эксперименте средняя скорость потока на высоте *H* составляла 6,8 м/с, характерное число Рейнольдса Re, рассчитываемое по высоте *H*, — 2,25·10⁵. Профиль потока оказался близок к ударному.

Также с помощью анемометра проводились измерения продольной компоненты скорости в вертикальном и горизонтальном сечениях. Горизонтальное сечение находилось на высоте 0,5*H*. В каждом сечении было построено 15 профилей скорости по 20 точкам



Рис. 2. Профили скорости набегающего потока,
полученные с помощью анемометра (1) , системы PIV (2)
и численного расчета [9] (3).
H = 0.5 (1), 0.05 (2), 6 (3) M.

и на их основе восстановлены однокомпонентные поля скорости (рис. 3*a*). Поля представлены в безразмерном виде: координаты нормировались по высоте куба *H*, а скорость — по скорости потока на высоте *H*.

Второй эксперимент представлял собой исследование куба высотой H = 0,05 м в замкнутой аэродинамической трубе Сибирского федерального университета (Красноярск). Аэродинамическая труба замкнутого типа длиной 2,5 м имеет рабочую камеру сечением $0,8 \times 0,8$ м. Стенки трубы выполнены из прозрачного литого поликарбоната, что дает возможность использовать оптические методы исследования аэродинамики. Скорость потока может составлять



от 0 до 25 м/с. Количественная диагностика осуществлялась с использованием PIV-системы (Particle Image Velocimetry). Поток засеивался твердыми частицами-трассерами, представленными техническим тальком в виде порошка. Для освещения трассеров в потоке использовался двухканальный скоростной импульсный Nd:YLF-лазер Pegasus, New Wave Research (до 10 мДж в импульсе на длине волны 527 нм при частоте следования импульсов 2000 Гц). Формирование лазерного ножа осуществлялось специальным оптическим объективом, состоящим из набора сферических и цилиндрических линз. Регистрация трассерных изображений выполнялась с помощью скоростной цифровой камеры PCO 1200HS, которая была оснащена объективом SIGMA 35 mm и установлена на штативную головку Manfrotto 410 с механизмом точного позиционирования по трем направлениям. Для синхронизации скоростного лазера со скоростной камерой использовался высокоточный генератор импульсов.

Для увеличения соотношения сигнал/шум из зарегистрированных распределений трассеров вычитался фоновый сигнал, рассчитываемый путем осреднения яркости в каждом пикселе по всей серии изображений. Поля скорости вычислялись с использованием итерационного кросскорреляционного алгоритма с нецелым смещением и деформацией окон опроса между итерациями. Конечный размер окна опроса составил 16×16 пикселей. Алгоритм имеет возможность задавать уровень перекрытия между соседними окнами опроса. В рассматриваемом случае он был установлен на значение 50 %. Алгоритм также учитывает количество частиц в окне опроса: если их число не превышает пяти, то в данной области вектор скорости не рассчитывается.

Скорость набегающего потока в эксперименте была равна 5,5 м/с, при этом характерное число Рейнольдса Re составляло 1,8·10⁴. Профиль скорости набегающего потока представлен на рис. 2 кривой 2. Видно, что профиль близок к логарифмическому, т.к. масштабы модели сопоставимы с приземным пограничным слоем. Уровень турбулентных пульсаций продольной компоненты скорости набегающего потока в среднем составлял около 15 %. В ходе эксперимента были получены двухмерные поля скорости при обтекании куба в центральных продольном и поперечном сечениях. Для получения средних полей скорости использовались 500 мгновенных изображений. Для сопоставления экспериментальных результатов с высокорейнольдсовыми данными были взяты результаты численных работ [6] и [8]. Основным преимуществом этих данных является использование в качестве начальных условий профиля скорости (рис. 2, кривая 3) и турбулентных пульсаций, полученных в ходе экспериментального исследования 6-метрового куба в городе Силсо [9, 10]. В работах [9, 10] в основном изучалось распределение давления на поверхности куба, но при этом большое внимание уделялось определению характеристик набегающего потока. В работе [8] расчет проводился с помощью метода ID DES (Improved Delayed Detached Eddy Simulation). Число Рейнольдса в этой работе соответствуют приблизительно Re = $4 \cdot 10^6$. В исследовании [6] моделирование было выполнено с применением LES-метода (Large Eddy Simulation), который, согласно выводам [4, 12], в наибольшей степени применим к данной задаче, число Рейнольдса здесь также составляло Re = $4 \cdot 10^6$.

Кроме экспериментального исследования, в настоящей работе проводилось численное моделирование обтекания куба. Для расчетов использовался программный комплекс Ansys Fluent. Постановка задачи соответствовала эксперименту с кубом H = 0,5 м. Число Рейнольдса $Re = 2,25 \cdot 10^5$, профиль набегающего потока — ударный. Расчетная область составляла в длину 12*H* (3*H* до куба и 8*H* после него), в ширину — 7*H*, в высоту — 4*H*. На верхней и боковых поверхностях расчетной области задавалось условие скольжения, на нижней поверхности и гранях куба — условие прилипания. Расчеты проводились в трехмерной нестационарной постановке на неструктурированной расчетной сетке с локальными сгущениями, содержащей 5 млн расчетных ячеек. Для начального распределения выполнялся стационарный RANS-расчет с моделью турбулентности k- ω SST. Далее применялся метод крупных вихрей LES с моделью WALE (Wall Adapting Local Eddy-viscosity). Связь полей скорости и давления устанавливалась посредством процедуры SIMPLEC. Аппроксимация уравнений по пространству осуществлялась схемами второго порядка точности, по времени — неявной схемой второго порядка точности. Шаг по времени составлял 10⁻³ с. После достижения квазистационарного режима расчеты выполнялись для набора статистики необходимых параметров потока, общее время осреднения составляло 10 с. Так как турбулентные характеристики потока в эксперименте с кубом H = 0.5 м не были известны, то в расчетах было задано четыре вари-

анта интенсивности пульсации скорости:
$$I = 1, 5, 10$$
 и 20 %, где $I = \left(\frac{V'}{V_{\text{avg}}}\right) \cdot 100$ %, V_{avg}

— среднерасходная скорость, V' — пульсация скорости, равная $V' = \sqrt{\frac{2}{3}k}, k$ — кинети-

ческая энергия турбулентных пульсаций.

Для генерации пульсаций скорости на входе использовался синтетический генератор турбулентности [13]. В результате была выявлена значительная зависимость картин течения от этого параметра, заключающаяся в изменении размеров сформированных вихревых зон.

Результаты

На рис. 3 приведено сопоставление картин течения для обтекания куба H = 0,5 м (эксперимент с анемометром) и куба H = 0,05 м (PIV-эксперимент).



Рис. 3. Сопоставление продольной компоненты скорости для эксперимента с моделями H = 0,5 м (*a*) и H = 0,05 м (*b*).

В качестве сопоставляемых параметров рассматриваются границы формирования вихревых зон, которых, согласно [4, 6, 7], выделяют три: вихрь перед кубом X_f , отрывной вихрь на поверхности куба X_t , и зона аэродинамической тени за кубом X_r (рис. 4). Размеры зон определяются по границам возникновения отрицательных продольных скоростей. Отрицательные скорости для зоны X_f находятся в тонком приземном слое, плохо разрешимом при выполнении проводимых экспериментов, поэтому экспериментальные значения границы X_f в статье не приводятся.

На рис. 5 приведено сравнение линий тока, полученных по результатам PIV-эксперимента при Re = $1,8\cdot10^4$ (рис. 5a), LES-расчета при Re = $2,25\cdot10^5$ для интенсивностей турбулентных пульсаций I = 5 % (рис. 5b) и I = 20 % (рис. 5c), а также LES-расчета куба при Re = $4\cdot10^6$ (Силсо) из работы [6] (рис. 5d). Как было отмечено ранее, с уменьшением уровня турбулентных пульсаций происходит увеличение вихревых зон. Оно наблюдается как по длине, так и по высоте. На примере линий тока для случая I = 5 % увеличение вихревых зон приводит к смыканию областей X_t и X_r в районе задней грани поверхности куба.

В таблице представлены результаты, полученные в настоящей работе, а также приведенные в литературе. Видно, что вихревые зоны в PIV-эксперименте меньше, чем в эксперименте с анемометром и работе [7]. С одной стороны, это может быть обусловлено

использованием достаточно тяжелых частиц талька для визуализации, которые под действием силы тяжести приобретают дополнительную вертикальную составляющую скорости. С другой стороны,

Рис. 4. Определение границ вихревых зон.





Рис. 5. Линии тока для моделей различного масштаба. Результаты, полученные экспериментально методом PIV при Re = $1,8\cdot10^4$ (*a*) и с помощью расчета методом LES при Re = $2,25\cdot10^5$, I = 5 % (*b*), при Re = $2,25\cdot10^5$, I = 20 % (*c*) и при Re = $4\cdot10^6$ [6] (*d*).

Таблица

газмеры вихревых зон						
Источник		Re	$X_{\rm f}$	X _t	X _r	
PIV-эксперимент		$1,8 \cdot 10^4$		0,8	1,38	
LES-paсчет [4]		$4 \cdot 10^4$	1,00		1,43	
Эксперимент [7]		10 ⁵	1,04		1,61	
Эксперимент с анемометром		$2,25 \cdot 10^5$		0,9	1,6	
LES- paсчет	I = 1 %	2,25·10 ⁵	0,79	0,88	2,22	
	<i>I</i> = 5 %		0,78	0,94	1,78	
	<i>I</i> = 10 %		0,75	0,95	1,44	
	<i>I</i> = 20 %		0,64	0,68	1,35	
IDDES-расчет [8]		$4 \cdot 10^{6}$		0,94	1,31	
LES-pacчет [6]		$4 \cdot 10^{6}$	0,79	0,56	1,56	

остается неопределенным уровень турбулентных пульсаций в экспериментах с анемометром и работе [7], который, согласно данным LES-моделирования, является принципиально важным параметром. Традиционно для лабораторного эксперимента величина I < 10 %, и в этом случае расчетные и экспериментальные данные неплохо согласуются. При проведении PIV-эксперимента уровень турбулентных пульсаций был довольно большой (около 15 %), и для таких значений границы зон хорошо согласуются с результатами численного моделирования. Учитывая, что работы [6, 8] базируются на основе данных [9, 10], средний уровень пульсаций в них составляет 15–20 %. В результате расчетно-экспериментального исследования, а также сопоставления данных для моделей размерами от H = 0,025 м до H = 6 м и диапазонов чисел Рейнольдса от Re = $1,8 \cdot 10^4$ до Re = $4 \cdot 10^6$ можно отметить достаточно близкие значения размеров вихревых зон, при этом заметно выделяются только данные для LES-расчета при минимальных турбулентных пульсациях потока. Также следует отметить, что геометрические масштабы и скоростные характеристики потоков незначительно влияют на картину течения, и можно говорить об автомодельности задачи в рассмотренном диапазоне параметров. При моделировании наиболее важно соблюдать уровень интенсивности турбулентных пульсаций, который для ветра в условиях естественной среды обычно принимает значение I > 10 %.

Рассмотренные подходы позволяют проводить в достаточной мере качественное и количественное моделирование аэродинамики обтекания модельных зданий. Это, в свою очередь, предопределяет возможность моделирования подобных задач в условиях мелкого масштаба на аэродинамических лабораторных установках.

В дальнейших экспериментальных работах планируется использование в качестве трассеров аэрозолей или пустотелых микрочастиц SiO₂ в сочетании с камерами ImperX с разрешением 4 мегапикселя и более мощным лазером с энергией импульса до 200 мДж. Это должно позволить получить лучшее пространственное разрешение и уменьшить вклад гравитационной составляющей скорости частиц в погрешность эксперимента. С помощью сажемасляной визуализации планируется получение картин обтекания с целью определения границ вихревых зон на поверхности [7, 11], что в силу особенностей оптического метода PIV было невозможно сделать в представленной работе. Также предполагается уделить повышенное внимание изучению турбулентных пульсаций потока на входе.

Список литературы

- Гныря А.И., Коробков С.В., Кошин А.А., Терехов В.И. Моделирование ветровых нагрузок при обтекании воздушным потоком системы моделей зданий при вариации их расположения // Вестн. ТГАСУ. 2018. Т. 20, № 4. С. 65–73.
- 2. Гувернюк С.В., Егорычев О.О., Исаев С.А., Корнев Н.В., Поддаева О.И. Численное и физическое моделирование ветрового воздействия на группу высотных зданий // Вестн. МГСУ. 2011. № 3–1. С. 185–191.
- 3. Дорошенко С.А., Дорошенко А.В., Орехов Г.В. Определение ветровой нагрузки на трехмерные конструкции с помощью моделирования в аэродинамической трубе // Вестн. МГСУ. 2012. № 7. С. 69–74.
- **4. Rodi W.** Comparison of LES and RANS calculations of the flow around bluff bodies // J. Wind Engng Industrial Aerodynamics. 1997. Vol. 69. P. 55–75.
- Castro I., Robins A. The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams // J. Fluid Mech. 1977. Vol. 79. P. 307–335.
- Pavlidis C.L., Palampigik A.V., Vasilopoulos K., Lekakis I.C., Sarris I.E. Air flow study around isolated cubical building in the city of athens under various climate conditions // Appl. Sci. 2022. Vol. 12, Iss. 7. P. 3410-1– 3410-27.
- 7. Martinuzzi R., Tropea C. The flow around surface-mounted, prismatic obstacles placed in a fully developed channel flow (data bank contribution) // J. Fluids Engng. 1993. Vol. 115, Iss. 1. P. 85–92.
- 8. Hu J., Xuan H.B., Kwok K.C.S., Zhang Y., Yu Y. Study of wind flow over a 6 m cube using improved delayed detached eddy simulation // J. Wind Engng Industrial Aerodynamics. 2018. Vol. 179. P. 463–474.
- Richards P.J., Hoxey R.P., Short L.J. Wind pressures on a 6m cube // J. Wind Engng Industrial Aerodynamics. 2001. Vol. 89. P. 1553–1564.
- Richards P.J., Hoxey R.P., Connell B.D., Lander D.P. Wind-tunnel modelling of the Silsoe Cube // J. Wind Engng Industrial Aerodynamics. 2007. Vol. 95. P. 1384–1399.

- Терехов В.И., Гныря А.И., Коробков С.В. Вихревая картина турбулентного обтекания и теплообмен одиночного куба на плоской поверхности при различных углах атаки // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 4. С. 521–533.
- 12. Акназарова С., Калеева А., Калмурзаева А.Т. Моделирование турбулентного обтекания куба методом крупных вихрей // Изв. Ошского технологического ун-та. 2018. № 1–1. С. 102–108.
- Smirnov A., Shi S., Celik I. Random flow generation technique for large eddy simulations and particle-dynamics modeling // J. Fluids Engng. 2001. Vol. 123, No. 2. P. 359–371.

Статья поступила в редакцию 1 июля 2023 г., после доработки — 6 июля 2023 г., принята к публикации 17 августа 2023 г.