

Математическое моделирование геофизических процессов: прямые и обратные задачи”. НИВЦ МГУ им. М.В.Ломоносова 10.февр.2011

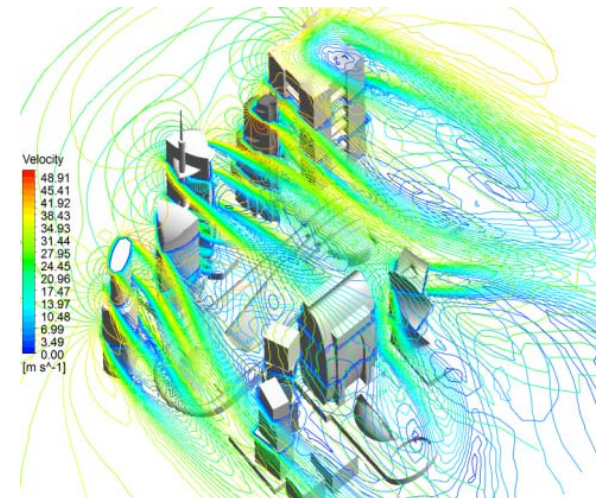
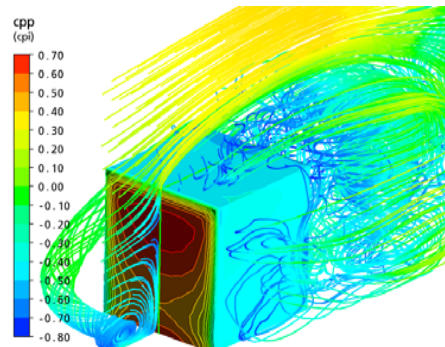
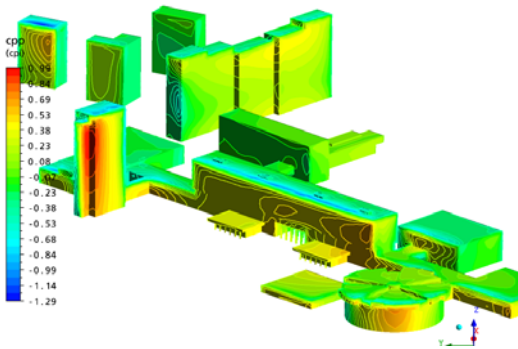
Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы

Сергей Иванович Дубинский

*Научно-образовательный центр компьютерного моделирования
Московского Государственного Строительного Университета*

С.Н.С., К.Т.Н.

ООО “ГК-Техстрой”, гл.спец.



Аннотация

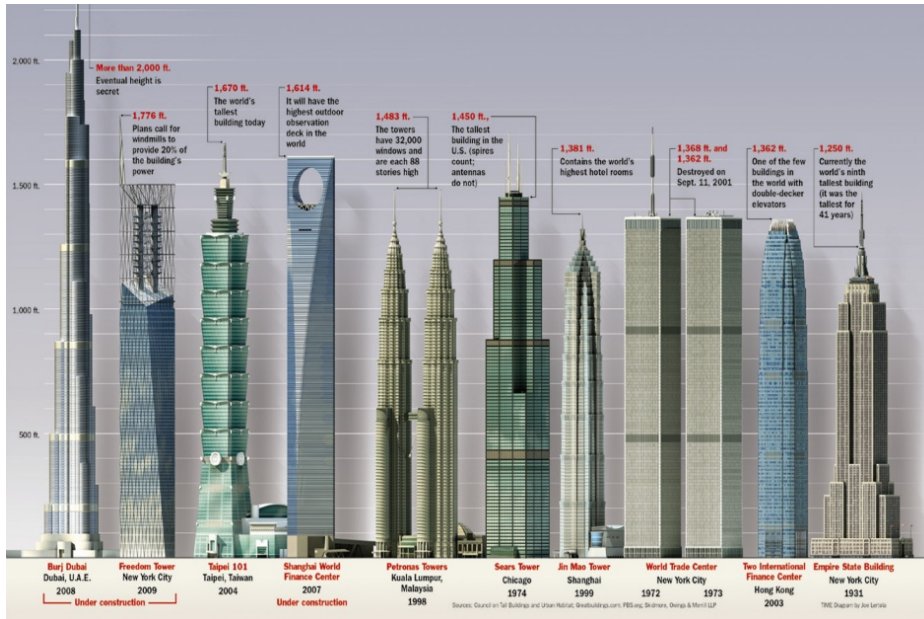
- Поскольку существующие нормативные документы и методики не в полной мере отражают специфику ветровых воздействий на высотные здания и их комплексы (прежде всего, в условиях их компактного расположения и интерференции) разработана методика расчета нормативных параметров ветровых воздействий (средней и пульсационной составляющих нагрузок на несущие конструкции, пиковых давлений на ограждающие конструкции, уровня пешеходной комфортности) на высотные здания и их комплексы на базе численного решения стационарных и нестационарных трехмерных уравнений гидрогазодинамики (Навье-Стокса в приближении Рейнольдса, модели турбулентности RANS, URANS и DES) с дискретизацией методом конечных объемов, позволяющая адекватно учитывать важные факторы – направления и профиль ветровых потоков, рельеф местности, окружающую застройку и последовательность возведения комплексов.
- Разработанная методика реализована в форме специализированного программного модуля WINDLOAD/CFX к выбранному, в качестве базового, универсальному программному комплексу ANSYS – ANSYS CFX. Для решения большемерных задач используются эффективные параллельные вычисления кластерной организации.
- Проведена верификация разработанной методики и ее программной реализации на основе сравнения с результатами испытаний моделей в аэродинамических трубах (тестовые модели, комплекс “Федерация” и МФК “Сити-Палас” в ММДЦ “Москва-Сити” и др.) и с данными натурных замеров для группы высотных зданий в реальной застройке (микрорайон Синдзюку, Токио, Япония). Установлена приемлемая для практики точность результатов расчета средней составляющей ветровых нагрузок для зданий сложных форм (расхождение с имеющимися экспериментальными данными не более 15-20%).
- Разработанная методика использована для трехмерных стационарных и нестационарных расчетов ветровых нагрузок на несущие и ограждающие конструкции и оценки пешеходной комфортности ряда проектируемых и строящихся высотных комплексов (сооружения ММДЦ “Москва-Сити”, МФК “Газойл-Сити”, ЖК “Дирижабль”, ЖК “Зодиак”, ЖК “Скайфорт”, ЖК “Аквамарин”), а также комплекса зданий МГСУ. Выявлен и проанализирован ряд реальных аэродинамических эффектов (включая интерференцию), которые не определяются при применении действующих нормативных методик. Предложена и реализуется структура системы мониторинга высотных зданий/комплексов с учетом одновременного замера характеристик ветра и перемещений/ускорений, базирующаяся на разработанной методике.
- Рассмотрено применение методики к анализу динамики и прочности высотных, транспортных и большепролетных сооружений при ветровом воздействии.

Основные темы

- **Высотные здания и их аэродинамика**
- **Разработка методики численного моделирования ветровых воздействий на высотные здания и комплексы**
- **Программная реализация методики**
- **Верификация**
- **Практические расчеты**
- **Приложения и перспективы развития методики**

- **Если останется время...**
- **Современные направления развития НОЦ КМ МГСУ**
- **Численное моделирование моста в г. Волгограде**

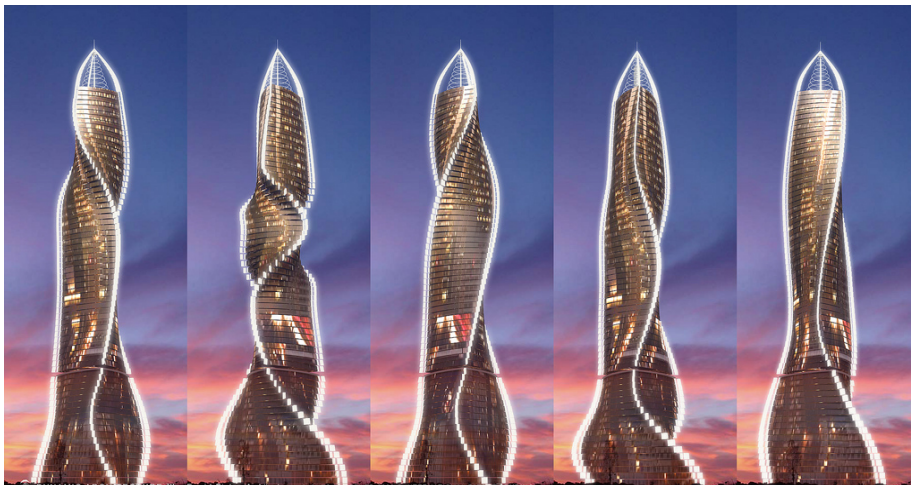
Высотные здания и их комплексы



Высочайшие здания мира



ММДЦ "Москва-Сити" (вариант проекта)



“Динамическая архитектура”
Изменение формы под действием ветра



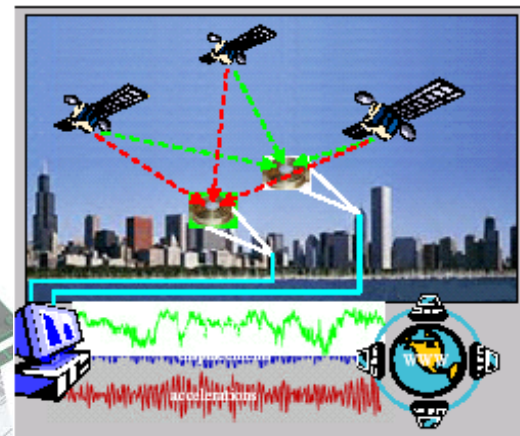
МФК "Аквамарин" (г. Владивосток)

Способы определения ветровых воздействий на высотные здания и комплексы

Нормативные подходы



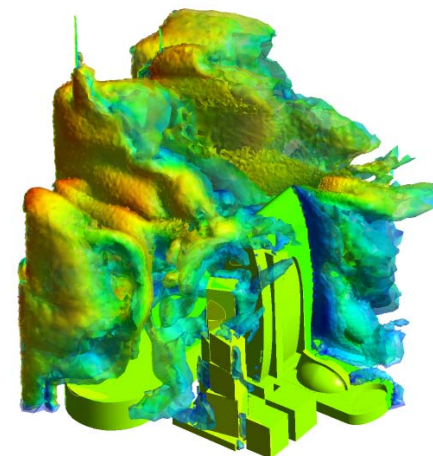
Мониторинг и натурные замеры



Испытания в АДТ

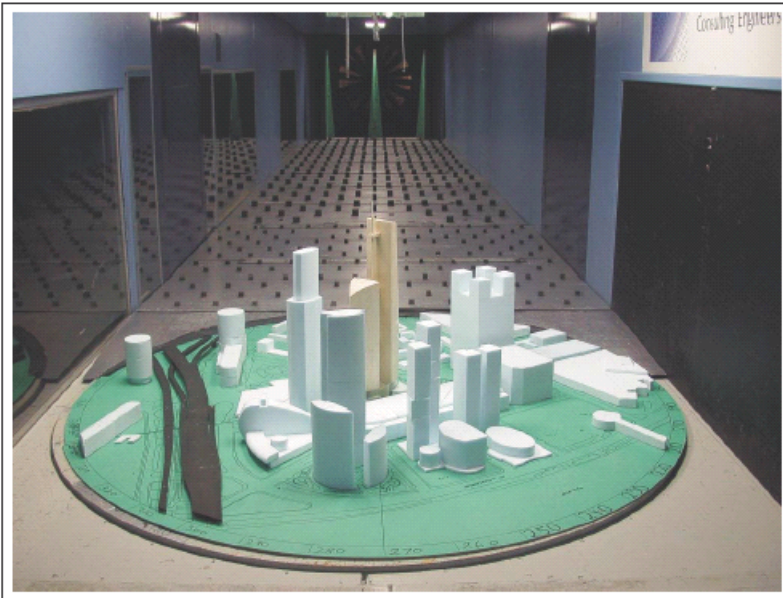


Численное моделирование



Цель работы: разработка, программная реализация и верификация методики расчета ветровых воздействий на высотные здания и комплексы на основе численного решения задач гидрогазодинамики

Постановка задачи



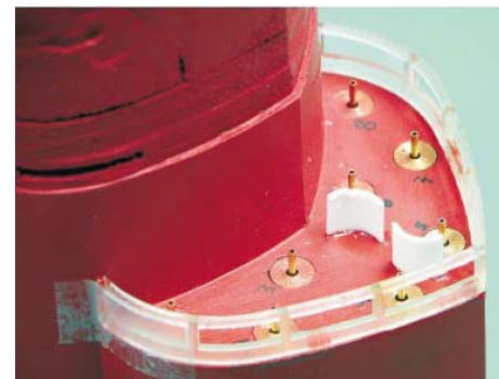
Моделирование всего комплекса Москва-Сити требует аэродинамической трубы больших размеров для учета интерференции зданий. Поскольку поля давлений могут заметно меняться в процессе строительства и монтажа, необходимо создание составной модели и т.д.

Трудоемкость и стоимость экспериментов непрерывно возрастает!

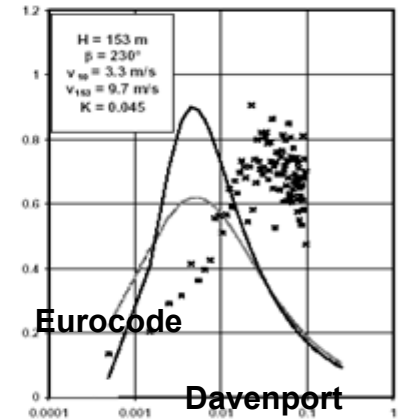
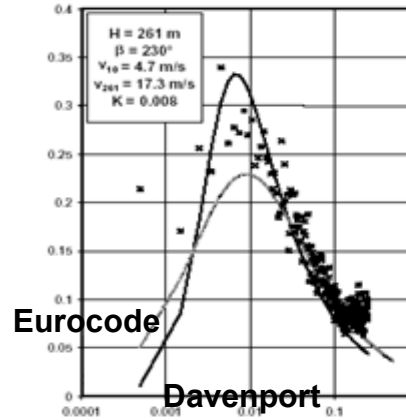
Разумеется, расчет не заменяет ни экспериментов, ни теоретических исследований.

НО...

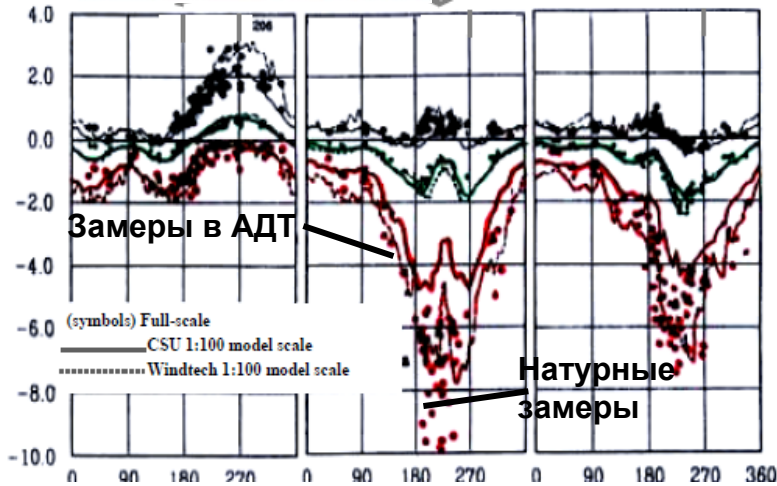
- **обобщив множество реализаций параметров, можно получить аналитические и эмпирические зависимости**
- **Можно намного повысить эффективность экспериментальной отработки и уменьшить ее объем и трудоемкость.**
- **Скорректированные вычислительные модели и алгоритмы позволяют оперативно анализировать возможные модификации сооружения, моделировать изменение аэродинамики в процессе монтажа**



Точность некоторых замеров сомнительна



Нормированные спектральные плотности мощности ветра в зависимости от частоты (Гц) во время шторма Лилли в октябре 1996 г. в окрестности Коммерцбанка (Франкфурт) для высот 261м (слева) и 153 м (справа) и нормативные данные

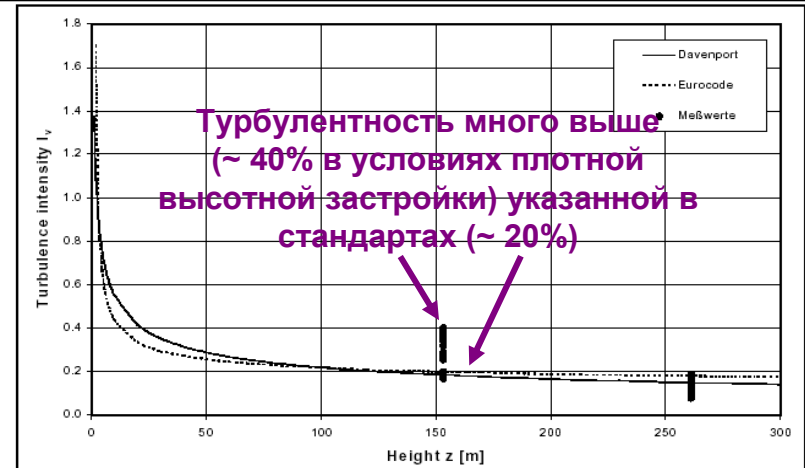


Ср от угла атаки ветра для полномасштабного покрытия

Спектр по Давенпорту

$$n \cdot S(n) = 4 \cdot K \cdot v_{10}^2 \cdot \frac{x^2}{(1 + x^2)^{4/3}}; \quad x = \frac{1200 \cdot n}{v_{10}}$$

v_{10} – скорость на высоте 10 м, $K=0.4$ – константа Кармана, n – частота в Гц

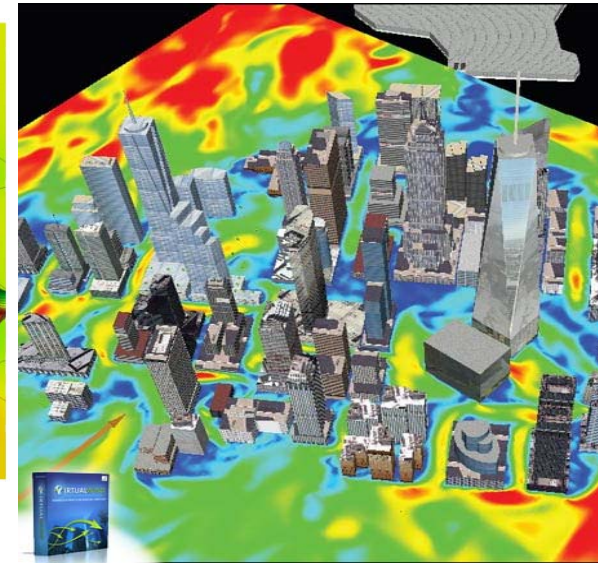
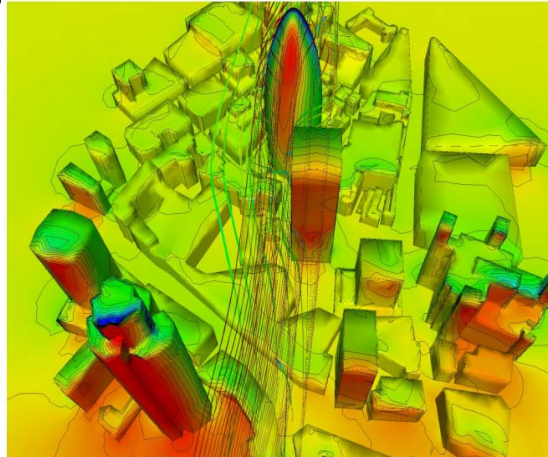


Профиль интенсивности турбулентности по высоте

Численное моделирование задач гидрогазодинамики (CFD) и ветровых воздействий (CWE)

Универсальные коммерческие ПК:

- ANSYS CFX
- ANSYS Fluent
- ANSYS FLOTTRAN
- STAR-CD
- Phoenics
- Flow 3d
- ESI/CFDRC
- SCRYU
- FlowVision
- Cosmos Flow Works
- CFDdesign



Универсальные некоммерческие ПК:

- FDS
- OpenFoam

Банк Swiss Re (Лондон).
Расчеты для Н.Фостера

Специализированные ПК:

- WindSim (на базе Phoenics)
- Virtual Wind/RWDI

Совмещение экспериментов и расчетов.
Virtual Wind/RWDI (Канада)

Исследовательские ПК:

- Miscom
- VP2/3

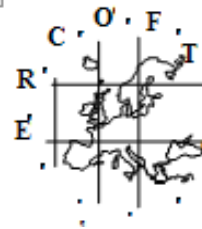
AIJ Architectural
Institute of Japan

Собственные программы

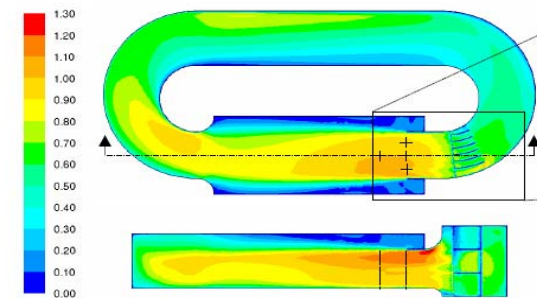
ПК для аэроупругих расчетов:

- ANSYS
- ABAQUS
- MSC NASTRAN

CEDVAL-LES at Hamburg Univer:
Compilation of Experimental Data for Validation of Microscale Dispersion Mo
provided by the Environmental Wind Tunnel Laboratory (EWTL) of the Meteorological Insti



Базы данных экспериментов и расчетов



Моделирование испытаний в
АДТ. Бельгия

Задачи исследования

1. Разработка методики расчета ветровых воздействий на высотные здания-комплексы, основанной на численном моделировании уравнений гидрогазодинамики и обеспечивающей решение регламентируемых нормами задач: *определение средней и пульсационной составляющих ветровых нагрузок на несущие конструкции, пиковых давлений на ограждающие конструкции и уровня комфортности в пешеходных зонах комплексов.*
2. Выбор наилучших (по соотношению “ресурсы-точность”) моделей турбулентности, методологий построения расчетных сеток, характеристик вычислительных алгоритмов применительно к данному классу задач и выбранному базовому программному комплексу (ПК).
3. Разработка "инженерной" методики оценки пульсационной составляющей давления и пиковых нагрузок на фасадные конструкции по результатам стационарных расчетов.
4. Реализация вышеупомянутых методик в форме единого программного модуля – надстройки над базовым ПК.
5. Верификация методики и программного обеспечения на основе сравнения результатов расчетов с данными испытаний в аэродинамических трубах и натурных замеров на представительном наборе примеров.
6. Применение разработанной методики и программного обеспечения для определения ветровых воздействий на реальные проектируемые и строящиеся высотные комплексы.
7. Обучение студентов и аспирантов теоретическим основам и практическому применению разработанной методики .

Раздел 2.

Разработка методики численного моделирования ветровых воздействий на высотные здания и комплексы

Математическая формулировка задачи гидрогазодинамики

Для упрощения моделирования ветровые потоки предполагаются несжимаемыми и изотермическими, массовые силы не учитываются.

Уравнения Навье-Стокса:

$$\underbrace{\rho \frac{\partial u_i}{\partial t}}_{\text{Нестационарность}} + \underbrace{\frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j}}_{\text{Конвекция}} = - \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x_i}}_{\text{Градиент давлений}} + \underbrace{\mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}}_{\text{Диффузия}} \quad - \text{уравнение переноса}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad - \text{уравнение непрерывности}$$

$$\rho = \text{const} \quad - \text{уравнение состояния}$$

Необходимо также определить граничные и начальные условия

u_i – компоненты вектора скорости (по осям x, y, z);

$i, j = 1, 2, 3$ – оси x, y, z соответственно;

p – давление;

t – время;

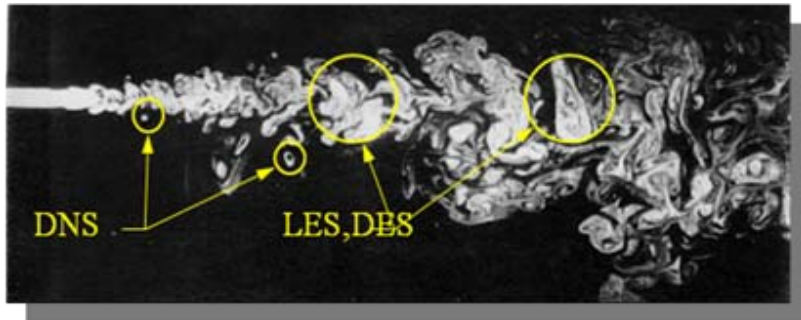
ρ – плотность (для воздуха 1.18-1.40 кг/м³)

$\mu = \text{const}$ – динамический коэффициент вязкости (для воздуха $1.83 \cdot 10^{-5}$ м²/с)

Модели турбулентности

Потоки турбулентны при числах Рейнольдса $Re=VL\rho/\mu >2000$

Например: для задач ветрового обтекания для размера $L=30\text{м}$ и скорости $V=20\text{ м/с}$, $Re=4\times 10^7$



DNS (Direct Numerical Simulation):

- “Решение без упрощений”
- Число ячеек $\sim Re^{9/4}$, время счета $\sim Re^3$
- Только для малых скоростей и как эталон верификации

LES (Large Eddy Simulation):

- Моделирование больших вихрей
- Фильтрация по размеру сетки

DES (Detached Eddy Simulation):

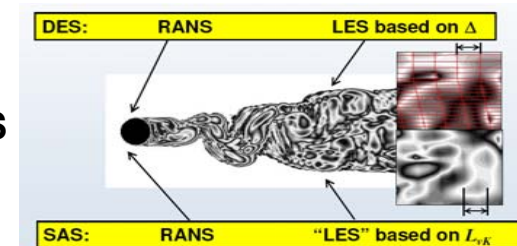
моделирование “отсоединенных” вихрей +RANS

SAS-DES :

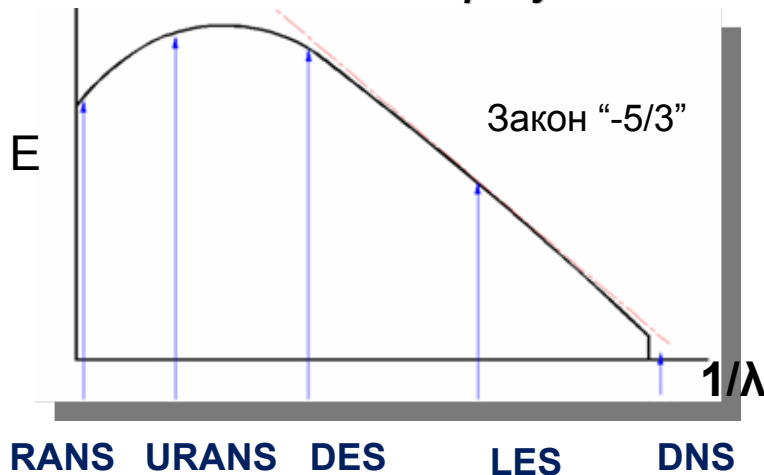
симбиоз DES и RANS

RANS:

вихри моделируются осредненно, эквивалентной вязкостью



Энергетический спектр пульсаций
по А.Н. Колмогорову



Вихри с длинами волн λ , меньшими некоторого порога, моделируются интегрально

Модели турбулентности RANS

Переход к решению «осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса» (RANS):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i \cdot \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right]$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad \frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_i} = 0,$$

В современной расчетной практике доминирует полуэмпирический подход:

$$u = \bar{u} + u'(t)$$

$$u(t) = \bar{u}(t) + u'(t)$$

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = -\mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

- аппроксимация «рейнольдсовских» напряжений по гипотезе Буссинеска

где:

\bar{p} – средние давления
 индексы $i=1,2,3$ и $j=1,2,3$ соответствуют координатам x,y,z
 μ_t – дополнительная вязкость, вызванная пульсациями;
 k – осредненная кинетическая энергия турбулентных пульсаций (TKE)

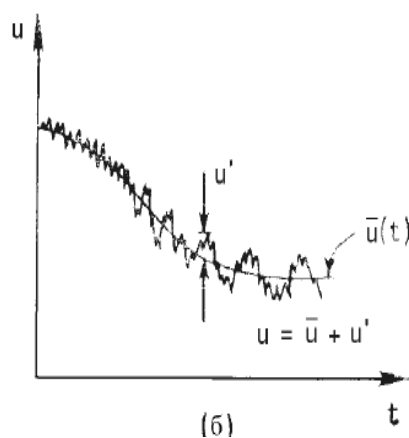
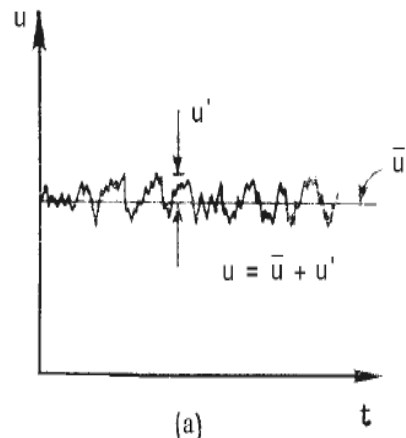


Схема осреднения
 (а – стационарное обтекание,
 б – нестационарное обтекание)

**Система является незамкнутой
 и требует дополнительных соглашений
 ("моделей турбулентности")**

Модели турбулентности RANS

«Классические модели»

$k - \varepsilon$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + v_i \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{s1} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho C_{s2} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

ε – энергия
диссипации

$k - \omega$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + v_i \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho k \omega$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \alpha \frac{\omega}{k} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \beta \rho \omega^2$$

ω – удельная
энергия
диссипации

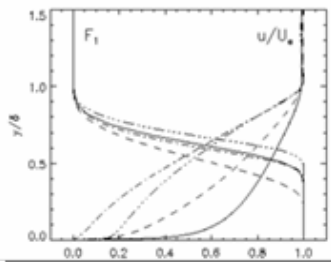
Гибридная модель

**SST
(F. Menter)**

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \tilde{\alpha} \frac{\omega}{k} P_k - \tilde{\beta} \omega^2 + (1 - F_1) \frac{2}{\sigma_\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]$$

Неуказанные
параметры –
эмпирические
коэффициенты



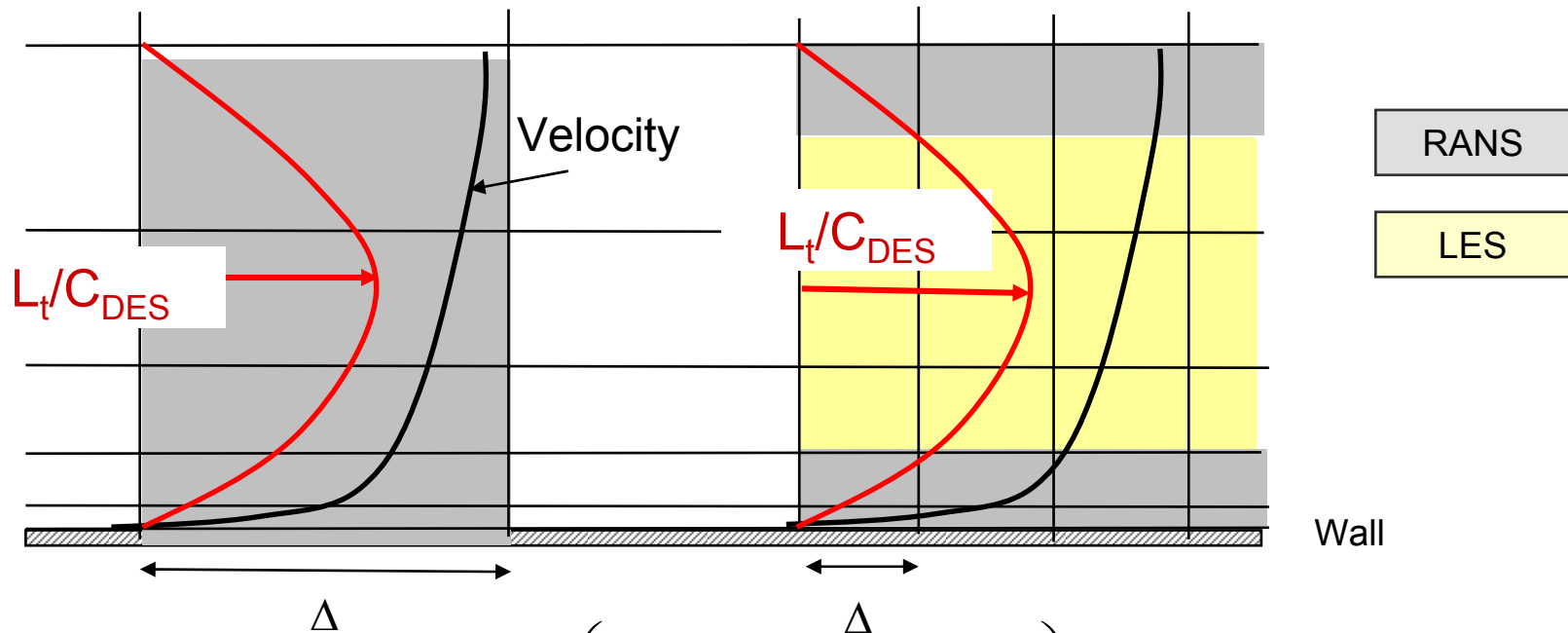
F_1 – переходный коэффициент

- Использование преимуществ моделей $k-\varepsilon$ и $k-\omega$
- В пристеночной области – модель $k-\omega$
- На удалении от стенок – $k-\varepsilon$

DES

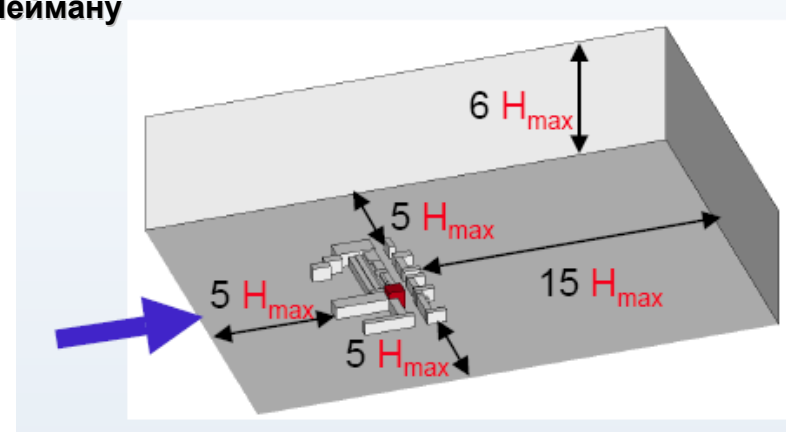
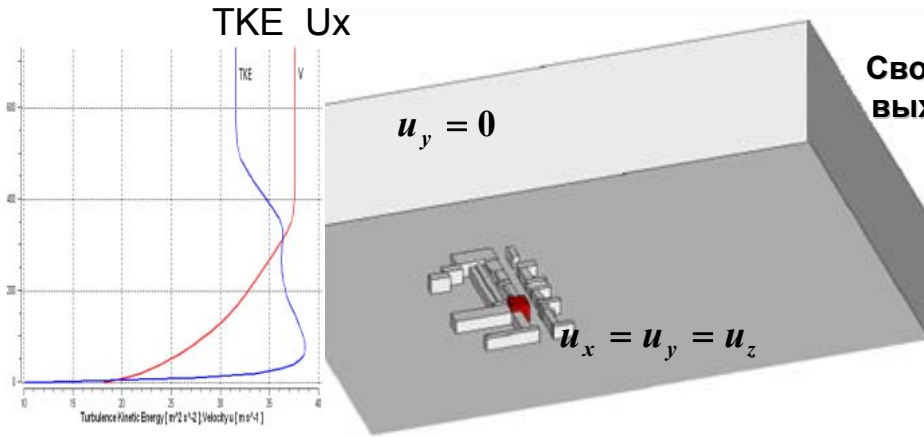
- RANS + LES**

$$\tilde{L}_t = \min(L_t; C_{DES}\Delta)$$

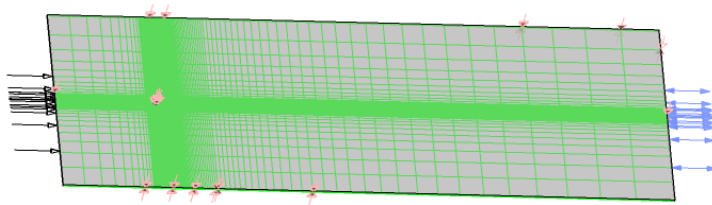


$$F_{DES-CFX} = \max\left(\frac{L_t}{C_{DES}\Delta} \cdot (1 - F_{SST}), 1\right); \quad F_{SST} = 0, F_1 \text{ or } F_2$$

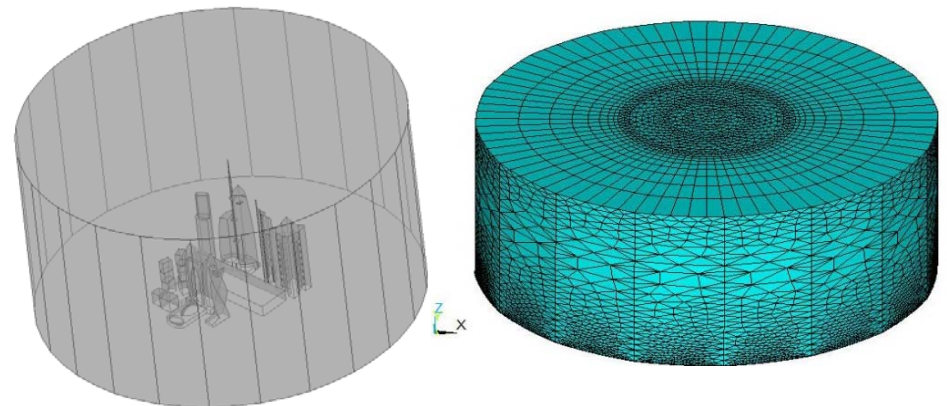
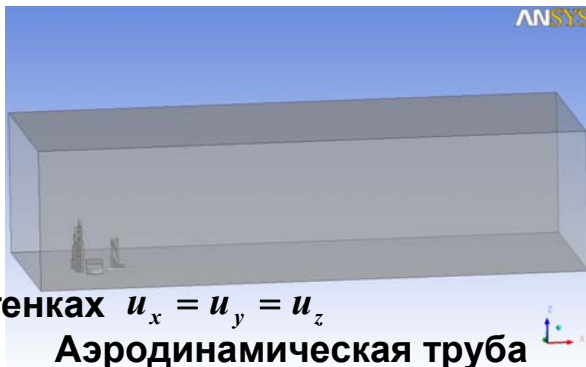
Требования к расчетным моделям. Граничные и начальные условия



Минимальные размеры расчетной области при H_{max} – максимальной высоте застройки



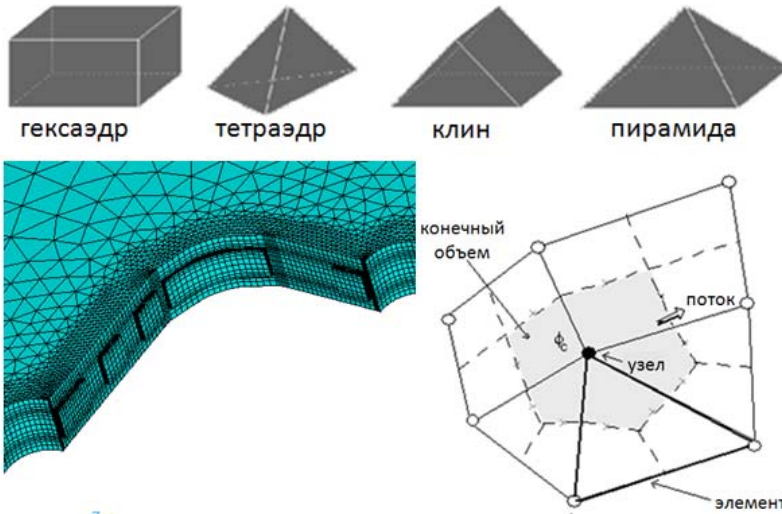
Двумерная задача – симметрия $u_z = 0$ на плоскостях отсечения



Расчетная область для вариантов расчетов при различных направлениях ветра $R > 10H_{max}$

Пространственно-временная дискретизация

Метод конечных объемов (МКО)



Ребра конечных объемов определяются
срединными плоскостями КЭ сетки
(Finite Volume based Finite Element Method)

$$\left(\frac{\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^n}{\Delta t} \right) + \frac{\partial}{\partial x} f(\mathbf{u}^{n+1}) = \mathbf{0}$$

Уравнения RANS для конечного объема:

$$\rho V \left(\frac{\varphi - \varphi^\circ}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} m_{ip} u_{ip} = \sum_{ip} \left(\Gamma_{eff} \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{S}_\varphi V$$

$$\rho V \left(\frac{u_i - u_i^\circ}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} m_{ip} (u_i)_{ip} = \sum_{ip} (P \Delta n_i)_{ip} + \sum_{ip} \left(\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{S}_{u_i} V$$

где $m_{ip} = (\rho u_j \Delta n_j)_{ip}^0$ - массовый поток через поверхность контрольного объема, верхний индекс $^\circ$ обозначает предыдущий шаг;

V - контрольный объем;

индекс ip обозначает точку интегрирования,

Δn_j - дифференциал вектора нормали;

Δt - шаг по времени;

P - статическое давление; μ_{eff} - эффективная вязкость;

Γ_{eff} - эффективная кинетическая энергия;

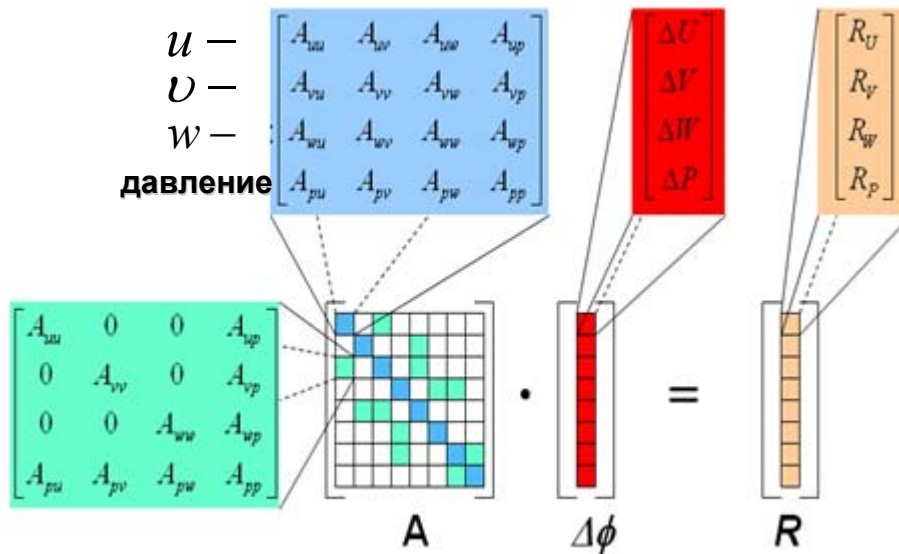
φ - дополнительная переменная (давление, параметры турбулентности),

S - поверхностные функции

Временная дискретизация по неявной схеме

Численное решение стационарных задач

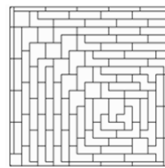
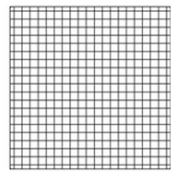
Схемы формирования и решения СЛАУ:



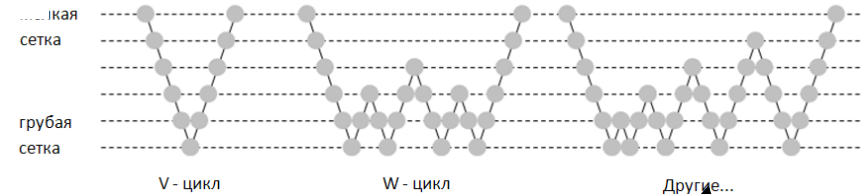
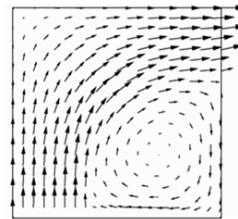
$$\sum_{i=1}^{nb} A_{i,nb} \Delta\phi_{nb} = R_i$$

Φ – искоемые переменные, R – правая часть, A – коэффициенты уравнения, i – индекс узла, nb -окружающие узлы

конвекция в замкнутой полости

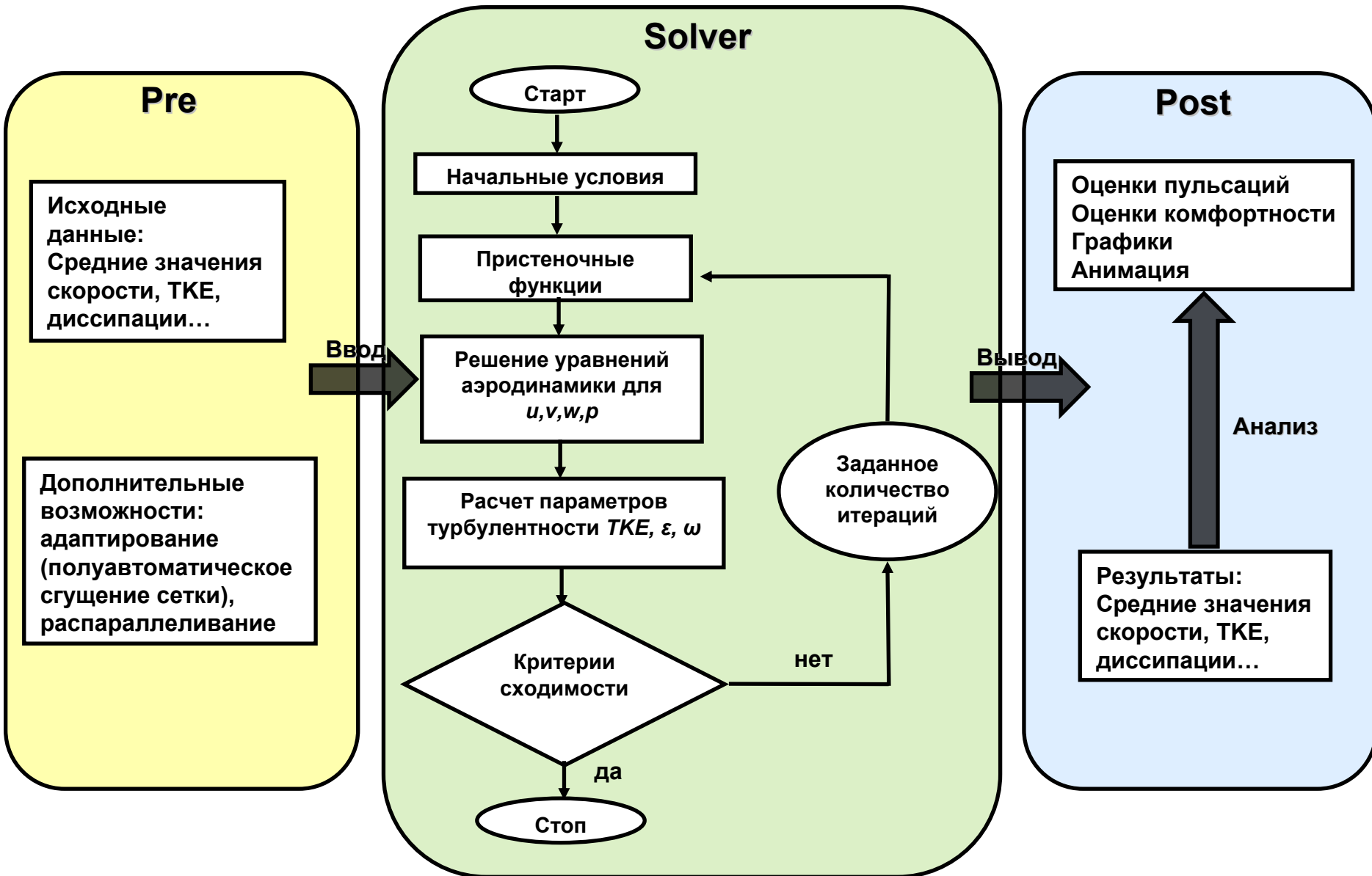


иерархия Multigrid-решений

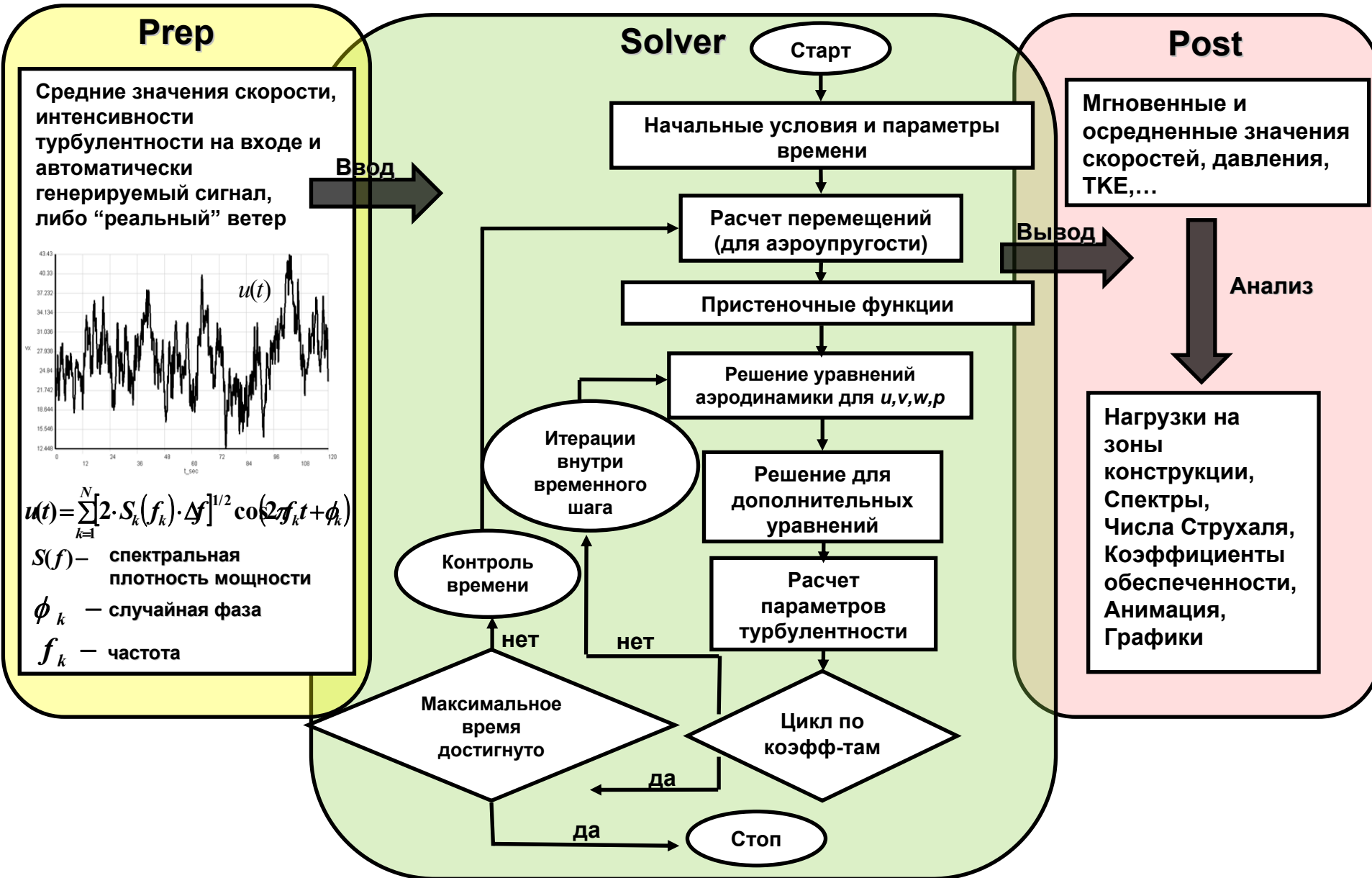


AMG/ACM – многосеточный метод с переменной глубиной итераций

**Блок-схема решения уравнений Навье-Стокса
в стационарной постановке:**



Блок-схема решения уравнений Навье-Стокса в нестационарной постановке:



Разрушение фасадных конструкций при ураганах.



(a)



(b)



(c)

Figure 2. a) Allied Bank and InterFirst Tower b) Flagship Hotel c) Lobby of the American National Insurance Building

Инженерная методика оценки пиковых значений давлений

Разработана практическая методика оценки пиковых расчетных нагрузок на фасадные конструкции (P^*_{max} и P^*_{min}) по результатам стационарных расчетов средних давлений P , энергии турбулентных пульсаций TKE и с учетом осредненных коэффициентов обеспеченности θ_{max} и θ_{min} :

На предварительном этапе принимаем $\theta_{max}=3.5$, $\theta_{min}=7$

$$TKE = 3/2 (I \cdot V)^2$$

$$TKE = 3 \cdot P / \rho \cdot I^2$$

$$I = (\rho \cdot TKE / abs(P)/3)^{1/2}$$

$$\sigma_p = (I^2 + 2 \cdot I) \cdot abs(P)$$

$$P^*_{max} = P + \sigma_p \cdot \theta_{max}$$

$$P^*_{min} = P - \sigma_p \cdot \theta_{min}$$

$P = \rho V^2 / 2$, где V - "локальная" скорость, соответствующая давлению P на поверхности

$\rho/2 V^2 (1+I)^2 = P + \sigma_p$
 σ_p - стандарт давлений

• Уточнение значений выполняется по результатам аналогичных нестационарных расчетов по соотношениям:

- $\vartheta_{max} = (P_{max} - P) / \sigma_p$
- $\vartheta_{min} = (P - P_{min}) / \sigma_p$,

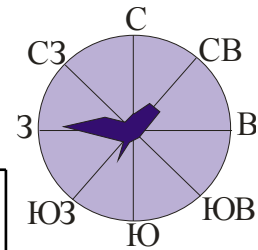
• где P_{max} , P_{min} и P – вычисленные значения максимумов, минимумов и среднего давлений в точке поверхности.

Методика оценки уровня пешеходной комфортности

Направление	Скорость ветра, м/с									
	1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19
С	86.16	184.13	117.50	37.12	6.57	1.16	0.11	0.00	0.11	
С-СВ	148.01	210.65	76.00	15.09	2.09	0.60	0.00	0.00	0.00	
СВ	60.92	114.73	53.78	11.62	0.49	0.22	0.11	0.00	0.00	
СВ-В	152.83	203.81	71.37	19.27	3.96	0.41	0.22	0.00	0.00	
В	74.17	147.94	76.49	22.93	4.41	0.45	0.30	0.26	0.00	
В-ЮВ	105.10	219.94	155.86	46.46	11.73	2.43	1.20	0.56	0.00	
ЮВ	50.27	154.66	149.47	61.51	13.45	2.61	0.78	0.22	0.11	
ЮВ-Ю	137.26	275.63	163.59	46.83	12.59	3.85	1.01	0.07	0.00	
Ю	88.67	270.96	186.82	50.64	9.08	1.64	0.78	0.11	0.00	
Ю-ЮЗ	191.49	407.47	238.13	54.49	10.72	1.68	0.26	0.04	0.00	
ЮЗ	100.62	297.44	176.92	41.98	5.15	1.31	0.19	0.00	0.00	
ЮЗ-З	195.18	389.47	184.20	34.44	5.27	1.01	0.00	0.07	0.00	
З	92.59	292.81	162.17	41.49	8.89	1.79	0.22	0.07	0.00	
З-СЗ	169.49	339.39	204.33	53.48	11.95	1.76	0.45	0.75	0.11	
СЗ	64.39	197.35	155.29	65.32	16.47	5.23	1.90	0.34	0.00	
СЗ-С	95.05	161.79	101.36	30.78	10.79	1.46	0.93	0.15	0.22	

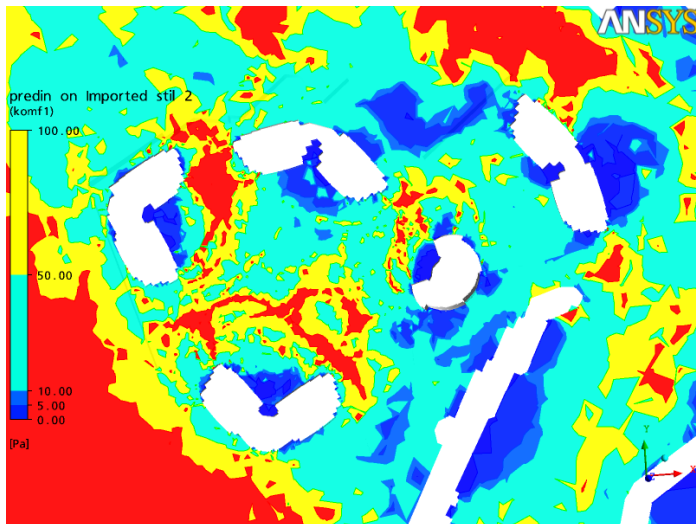
Согласно МДС 10-1.2006 в порывах на уровне 1.5м

Уровень комфортности	I	II	III
V_{cr} , м/с	6	12	20
T_{lim} , ч/год не более	1000	50	5



Роза ветров для Москвы

← Время реализации (ч за год) скоростей ветра различной интенсивности и направления



Длительность превышения (час) за год скоростью ветра величины 20 м/с.

Третий критерий комфортности (не более 5 ч) не нарушается только в зонах, показанных темно-синим

- После проведения численного моделирования для “всех” направлений ветра (как правило, $j=1, \dots, 24$) “время дискомфорта l -го уровня” K_{crl} ($l=1, 2, 3$) для представительного набора точек пешеходных зон определяется соотношениями:
- $V_{ij} = V_i / V_{10} V_j (1 + \vartheta \cdot l)$,
- $K_{crl} = \sum S_{ij} T_{ij}$
- где: $V_i=1, 2, 3, \dots, V_{imax}$ – скорости в таблице метеоданных (“розе ветров”); T_{ij} - продолжительность (по метеоданным, часов в год) ветрового воздействия направления j и средней скорости V_i ;
- V_j – средняя скорость ветра в данной точке согласно расчету для направления j при скорости V_{10} на высоте 10 м; V_{ij} – максимальная скорость в точке в порывах при скорости ветра V_i ;
- ϑ – коэффициент обеспеченности по заданию на расчет (как правило, в диапазоне от 1 до 3);
- S_{ij} – признак (0 или 1) превышения локальной скоростью ветра в точке V_{ij} критического значения V_{crl} для данного уровня комфорта l .

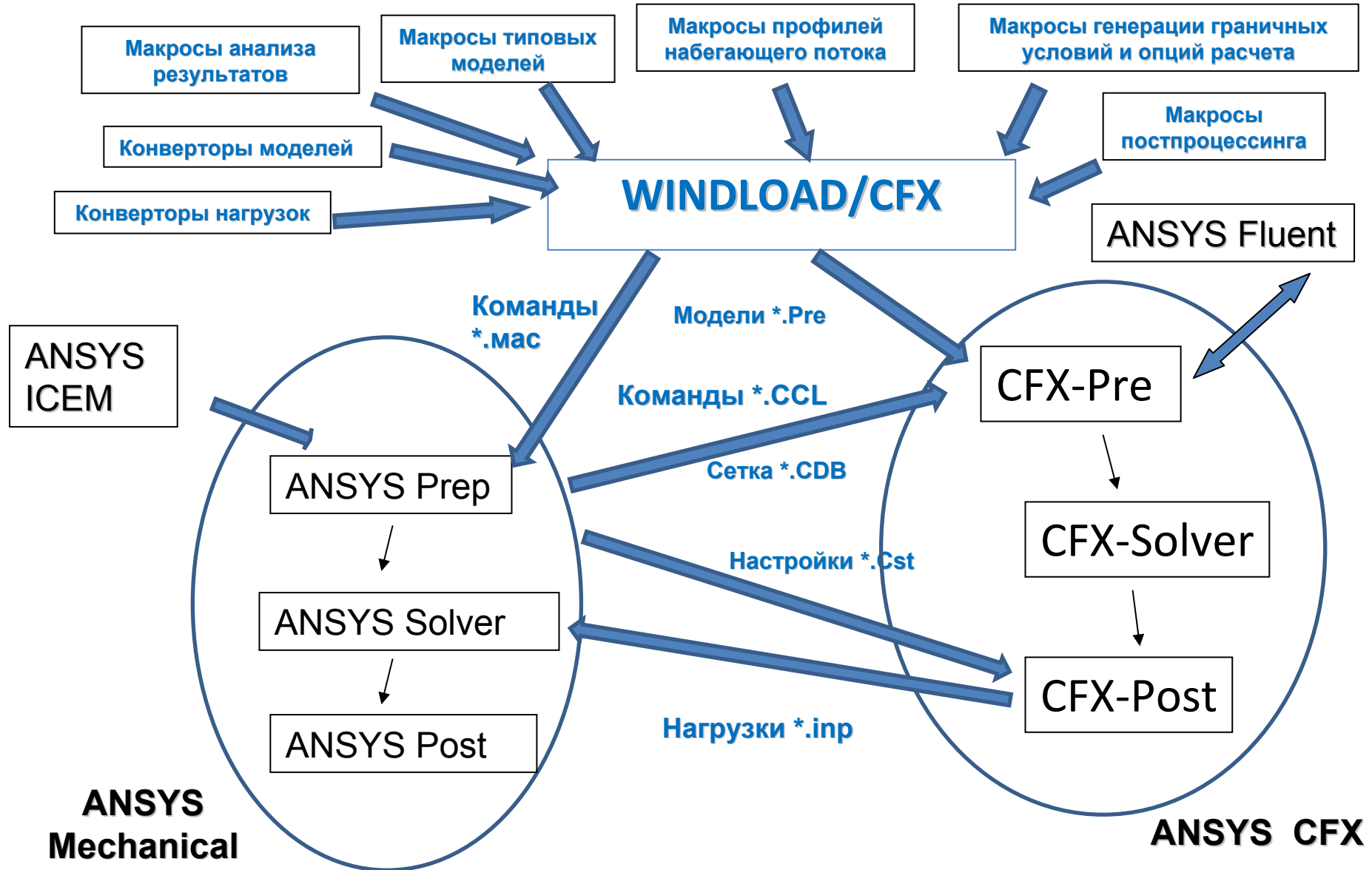
Итоговая схема расчетов ветровых воздействий

1. Выполнение стационарных расчетов для характерных направлений ветра (16-32 румба);
2. Оценка пульсационной составляющей нагрузок и пиковых локальных давлений на ограждающие конструкции на основе анализа максимальной энергии турбулентных пульсаций на поверхностях, предварительная оценка скоростей ветра в порывах для пешеходных зон;
3. По результатам пп. 1-2 (максимальным значениям средних и пульсационных нагрузок) – определение наиболее неблагоприятных направлений ветра;
4. Для этих направлений выполняется уточненный стационарный расчет при сгущенной сетке и/или с применением схем автоматической адаптации, позволяющий оценить точность результатов и возможную необходимость повторных расчетов для иных направлений;
5. Для этих же направлений выполняется нестационарный расчет; при существенном отличии средних значений ветровых нагрузок может оказаться необходимым выполнить нестационарные расчеты для многих или "всех" направлений ветра. Нестационарные расчеты также следует выполнять для направлений, при которых стационарный расчет указывает на возникновение "стоячей волны" (один из признаков – зацикливание итерационного процесса);
6. Определяются направления с максимальными пульсациями и анализируются спектры нестационарных нагрузок;
7. Определяются направления с максимальными суммарными нагрузками;
8. По итогам анализа пп.1-7 назначаются расчетные *средняя и пульсационная составляющие ветровых нагрузок на несущие конструкции*;
9. Определяются расчетные *пиковые минимальные и максимальные локальные ветровые давления на ограждающие (фасадные) конструкции с использованием огибающих по всем направлениям ветра*;
10. Определяются коэффициенты усиления скорости ветра в пешеходных зонах для всех направлений и выполняется *нормативно-регламентированная оценка пешеходной комфортности*.

Раздел 3.

Программная реализация методики

Назначение и структура разработанного программного модуля WINDLOAD/CFX



Пример использования WINDLOAD/CFX

```

FINI
/CLEAR,START
/prep7
!      чтение геометрии в формате IGES
cpread,solid,tsagi2,cdb
b=40!      характерный размер
!      запрос размера разбивки на контуре
*ask,es1,esiz_m,1
lesiz,all,es1
!      запрос макс размера разбивки ближней зоны
*ask,esi,esiz_m,10
!      начальный угол ветра
*ask,fi0,nach_SHAG,0
!      количество углов ветра
*ask,kfi,kolich shagov,12
!      приращение угла
*ask,Dfi,SHAG_ugol wetra w gradusah__,30
!      шаг между домами
*ask,DDD,SHAG_MEZDU DOMAMI,300

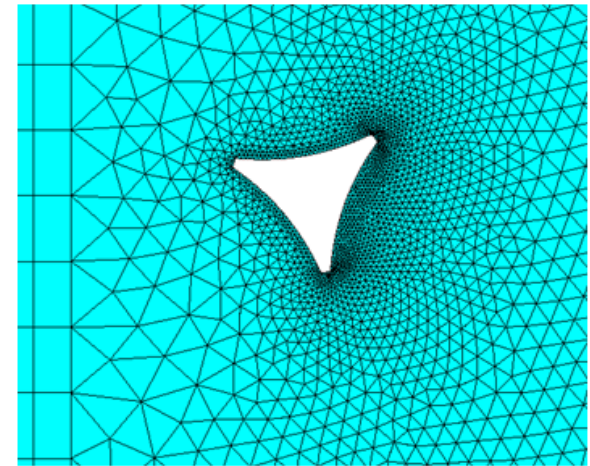
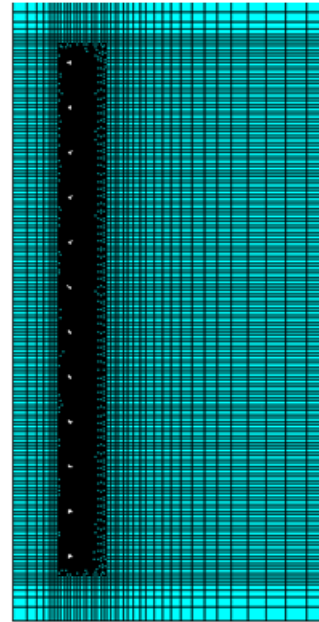
!      вызов основного макроса генерации сетки
CFX_DOM2ALLFI,b,2*b,1,esi,0,200,8,12,FI0,KFI,DFI,DDD,'d:\workcfx\nam2G',1,1

V0=30
FRE=V0*0.25/B!      МАКС ЧАСТОТА ОТКЛИКА (ST=0.25)
DT=1/FRE/40!      ПО СТРУХАЛЮ!      РЕКОМ ШАГ
DTC=ES1/V0/2!      ПО КУРАНТУ

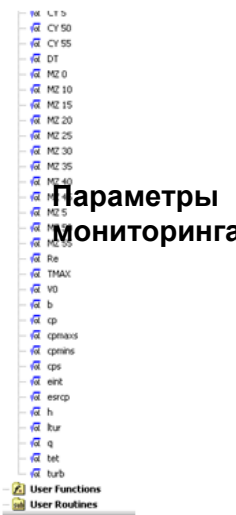
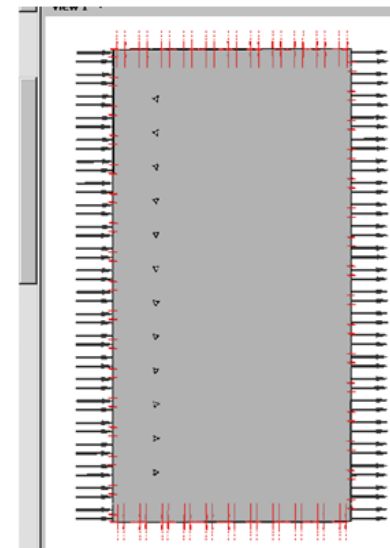
*ask,DT,SHAG_MILLISECOND,%NINT(1000*(DT<DTC))%
|DT=DT/1000
|LTURB=100
|INTE=0.15

!      вызов макроса генерации командного файла
CFX_CCL2ALL,'d:\workcfx\NAM2TG',V0,B,LTURB,INTE,DDD,DT,100,15.0/DT,-20
/SYS,NOTEPAD d:\workcfx\NAM2TG.CCL
/EOF

```

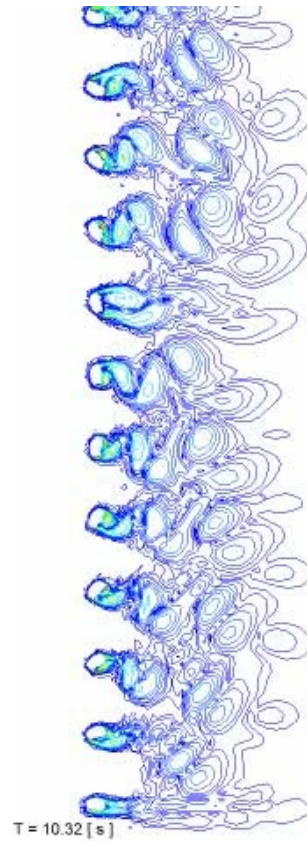
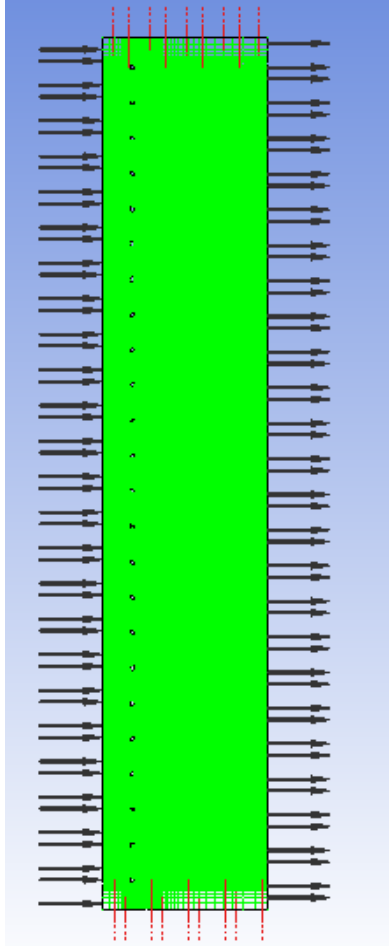
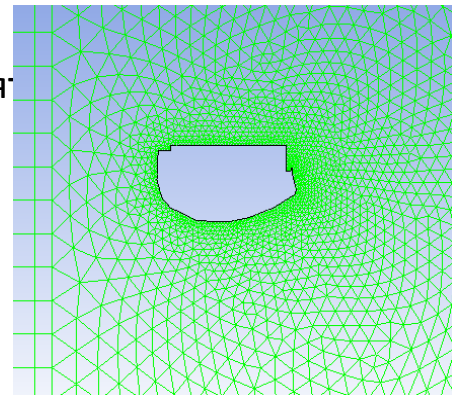


Сгенерированная КО-модель.
12 моделей при различных
направлениях ветра (шаг 30°)

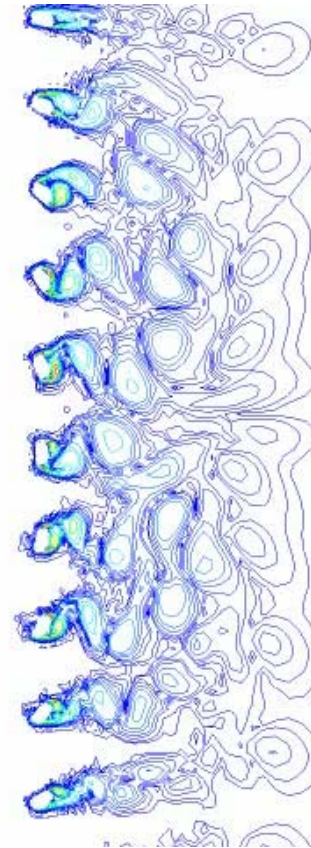


Параметры
мониторинга

Тестовые двумерные расчеты для оценки неблагоприятных



ANSYS



ANSYS

Раздел 4.

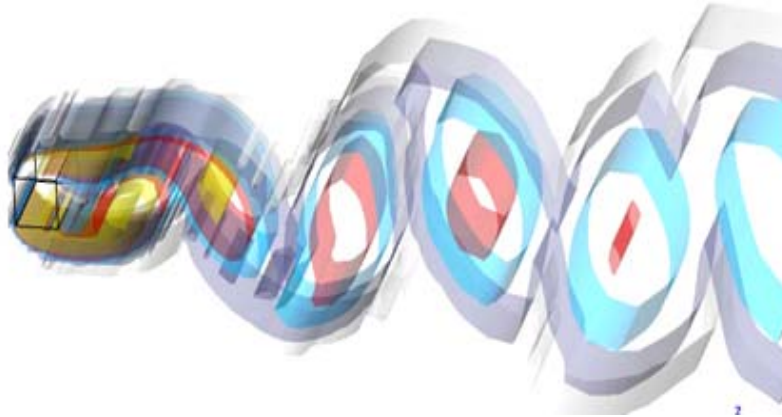
Верификация разработанной методики.

«Матрица верификации»

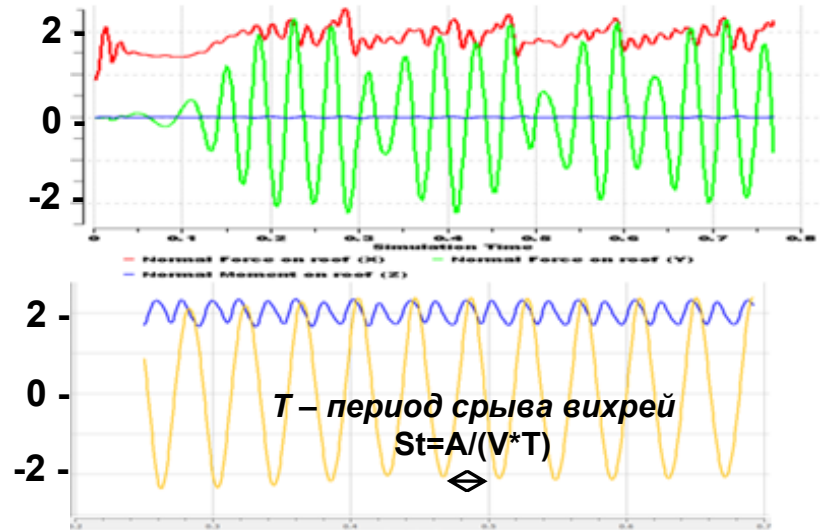
Описание задачи аэродинамики	"Эталоны"	Метод, модель турб.	Модели, тыс. ячеек	Контролируемые параметры	Время счета, час	Расхождение, %
Призма квадратная, двумерная постановка	Экспер. Lyn	DES	20	<i>Средние $C_x, C_y, C_p, St, V_x, V_y$</i>	10	5-20%
Интерференция двух квадратных призм, двумерная постановка	Экспер. С.Г.Кузнецов	DES	50	<i>Средние C_x и пульсации C_y</i>	20	5% средние 15% пульсационные
Цилиндр, двумерная постановка ($Re=3900$)	Расчеты Liaw Экспер. Norberg	DES	40	<i>Средние $C_x, C_y, C_p, St, V_x, V_y,$</i>	20	5-10% (для C_p 5-20%)
Призма 2:1:1	Экспер. Tamura	SST	220	$V_{нешех}, TKE, C_p$	0.5	3-5% (для V) 10-30% (для TKE)
Куб	Натур. замеры Silsoe Экспер. Castro	DES	120	C_p	40...80	10-30% (замеры) 10-20% (экспер.)
Высотное здание в малоэтажной застройке	Экспер. AIJ	SST	200 450	$V_{нешех}$ зон (средние и пиковые)	1 2	5-10%, средние 10-20%, пиковые
Застройка района Синдзюку, г. Токио	Натур. замеры Экспер. AIJ	SST	19 700	$V_{нешех}$ зон (пиковые)	15	10-50% (натурные) 10-30% (экспер.)
МФК "Сити-Палас" ММДЦ "Москва-Сити"	Экспер. BMT	SST DES	3 200	C_p (средние), C_x, C_y (средние и пиковые)	6 - SST 200 - DES	5-10% средние 10-30% пульсац.
МФК "Федерация" ММДЦ "Москва-Сити"	Экспер. RWDI	SST DES	2 400	C_p (средние и станд. пульсаций)	4 - SST 160- DES	5-10% средние 10-30% пульсац.

SST – стационарные расчеты, DES – нестационарные

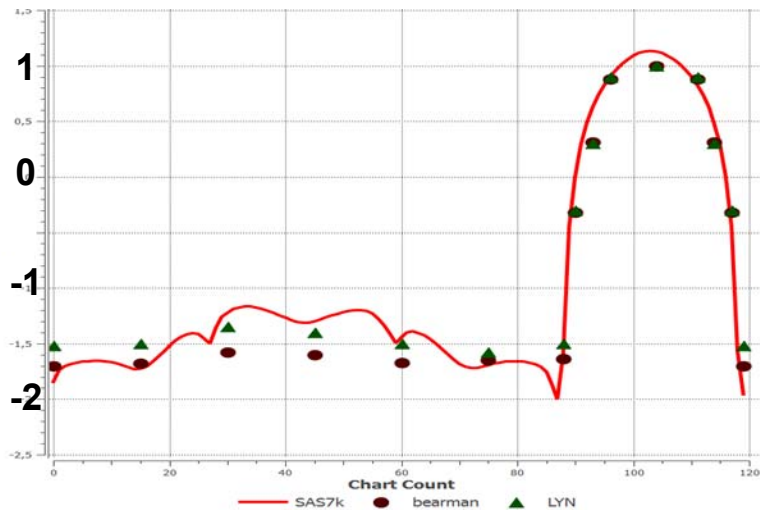
Двумерное обтекание квадратной призмы



Изоповерхности завихренности.



$C_x(t)$ и $C_y(t)$. SAS (сверху) и SST (снизу)

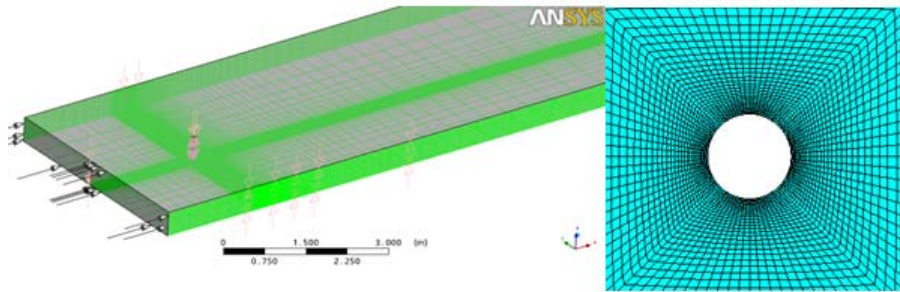


Средние C_p вдоль контура
 Расчет и эксперимент

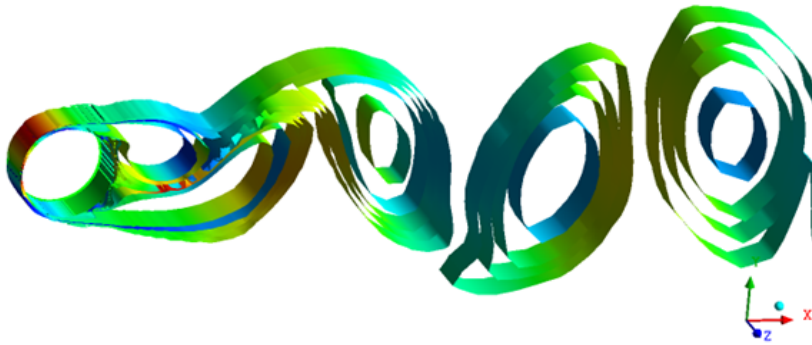
Источник	St (число Струхалия)	C_x	C_y
Эксперимент [Norberg, 1993]	0.132	$2.11 \pm (\text{н/д})$	-
(LES, Kai Fan Liaw, 2004)	0.130	$2.07 \pm (\text{н/д})$	± 1.6
URANS SST	0.128	1.82 ± 0.23	± 1.95
SAS	0.131	2.07 ± 0.43	± 1.9
DES	0.126	2.00 ± 0.38	± 1.78

Квадратная призма. Эталон и расчеты

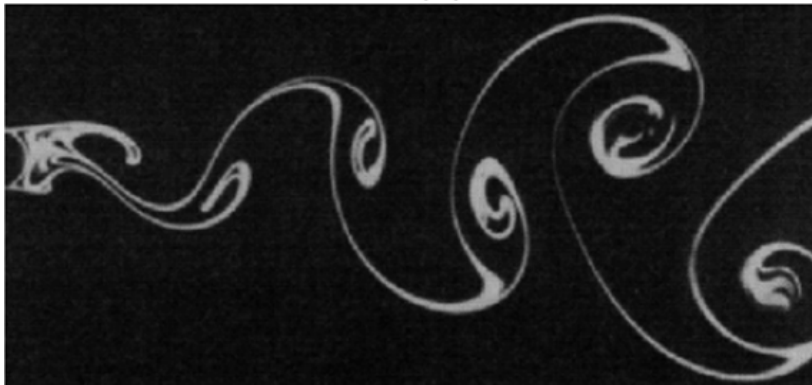
Цилиндр, двумерная постановка ($Re=3900$)



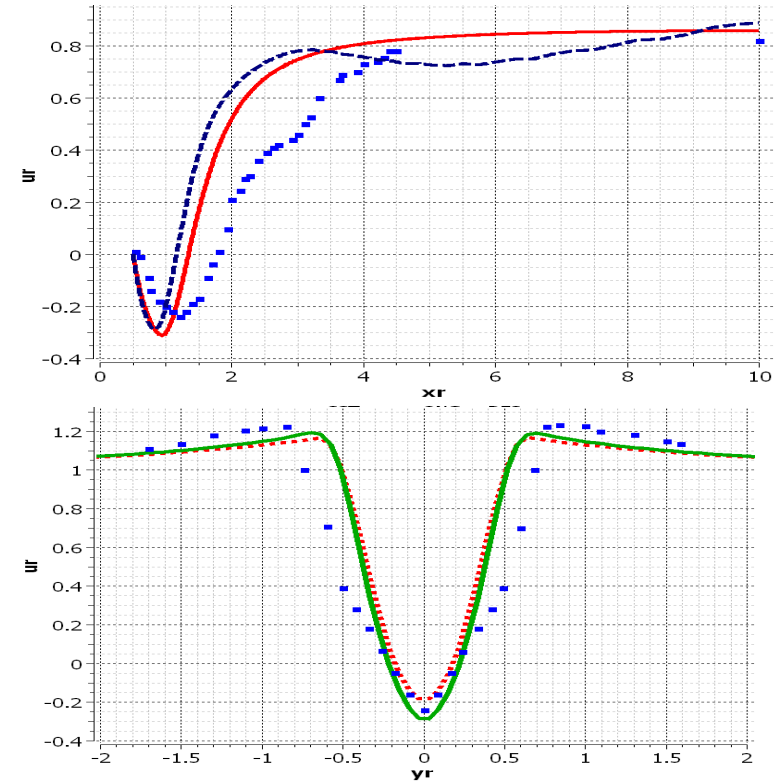
КО-модель (ANSYS CFX)



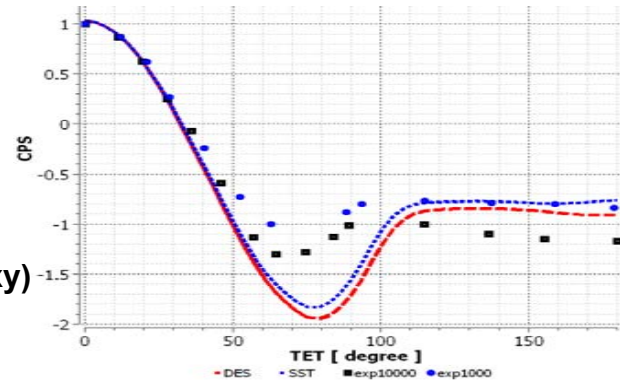
T = 20.7095 [s]



Изоповерхности завихренности URANS-SST (сверху)
Эксперимент (снизу)

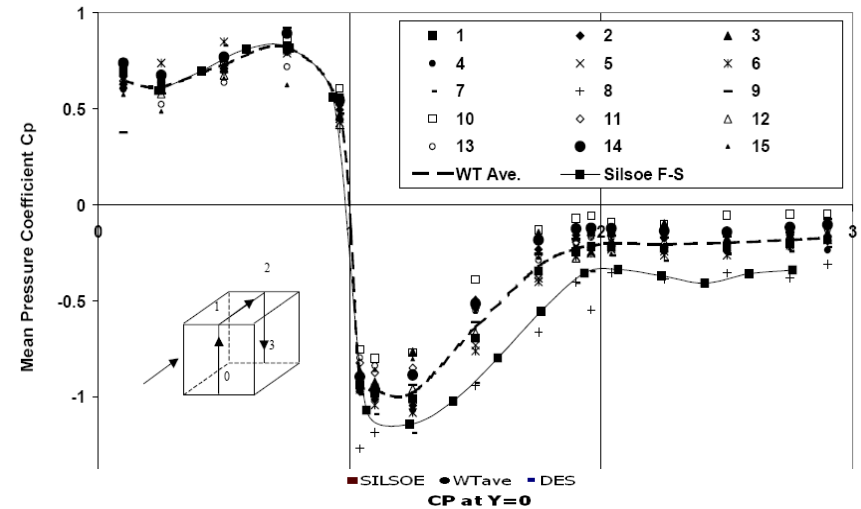
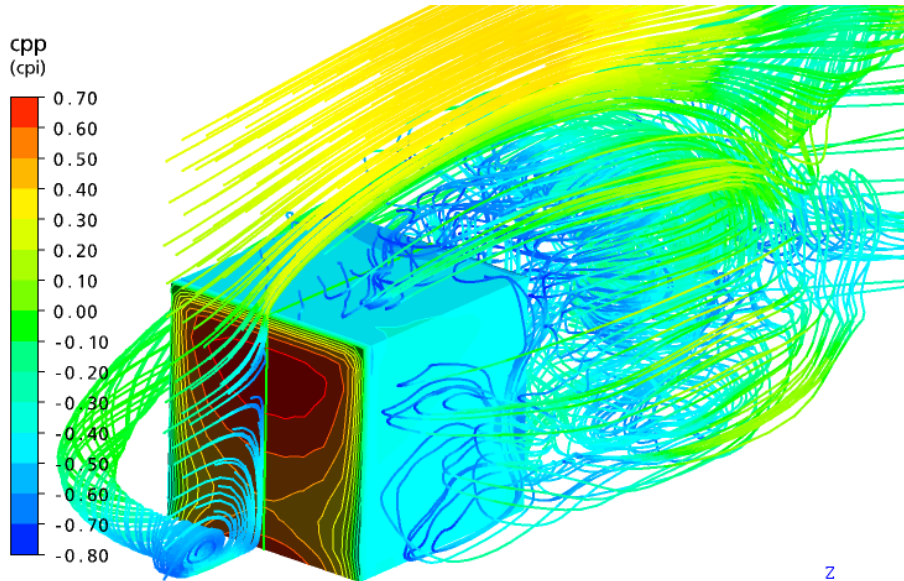


Приведенные скорости U_x/V_0 (сверху) и U_y/V_0 (снизу) на центральной линии цилиндра при $Re=3900$. Эксперименты Ong, расчеты диссертанта URANS-SST, DES

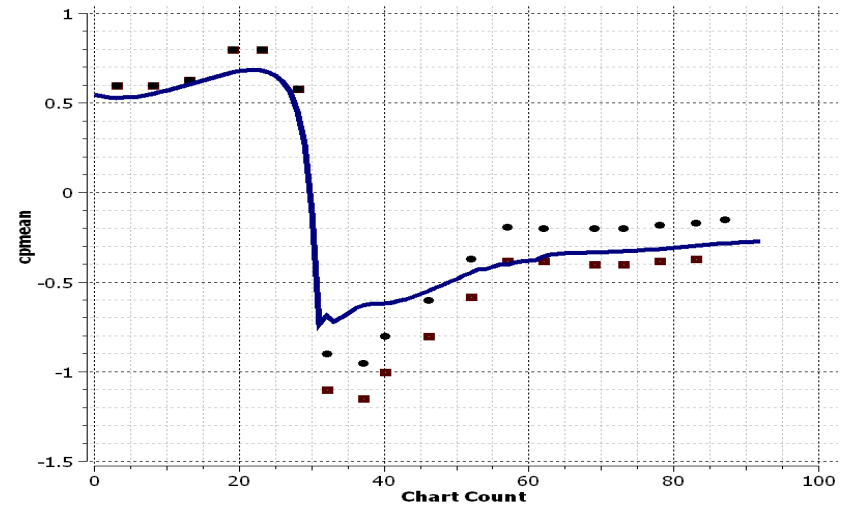
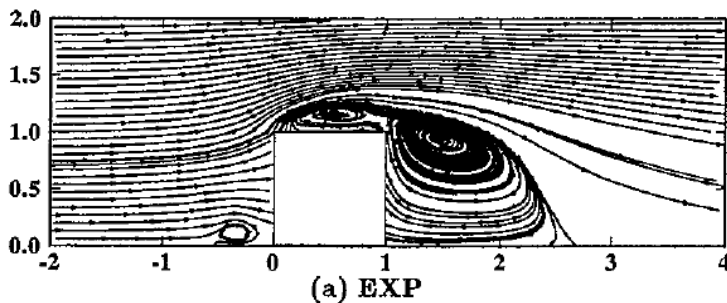
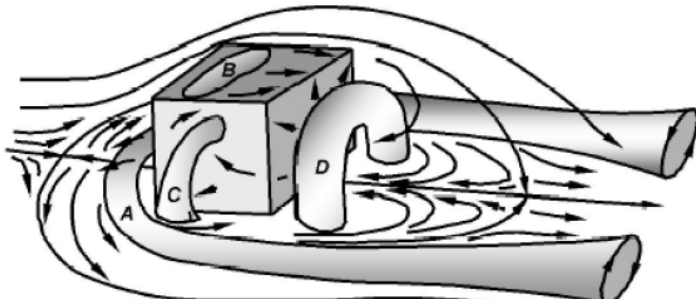


Коэффициент C_p по полупериметру цилиндра при $Re=3900$. Расчеты URANS-SST (мелкий пунктир), DES. Для справки приведены эксперименты при $Re=1000$ и $Re=10000$

Обтекание куба

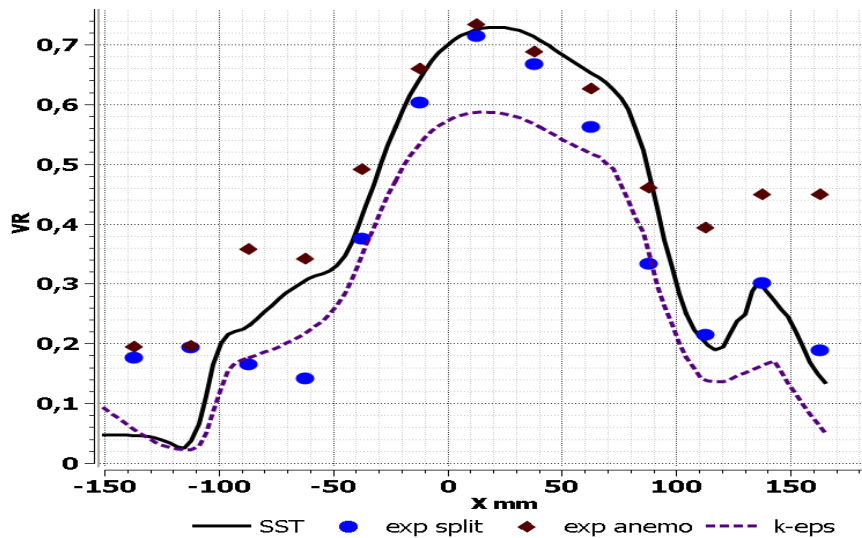
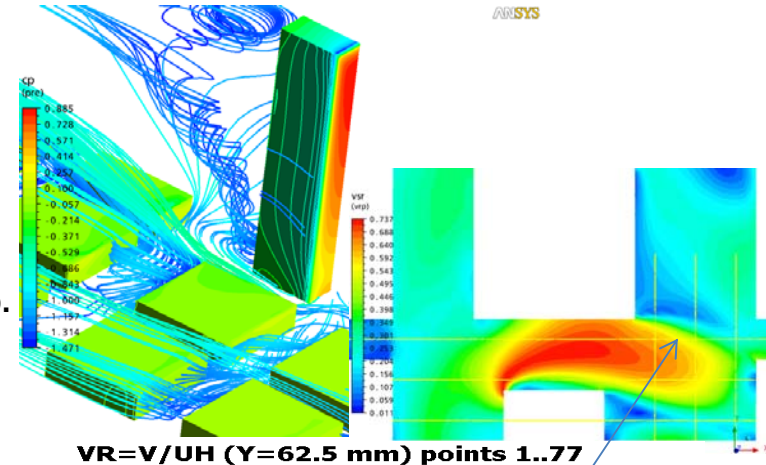
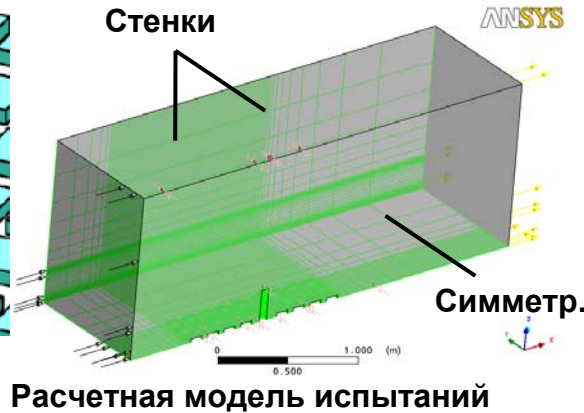
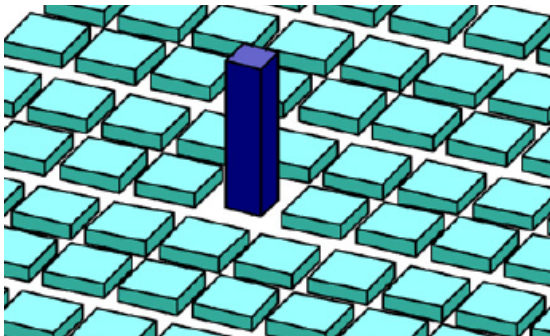


Z

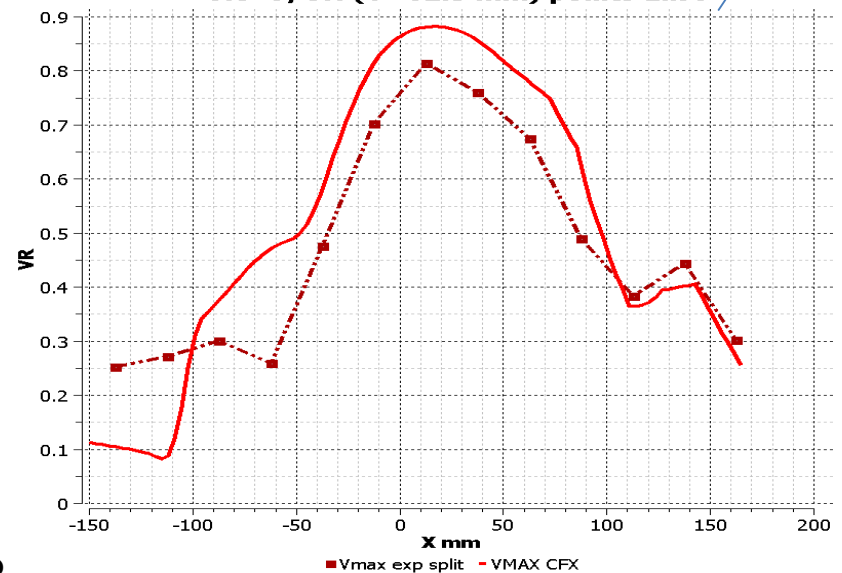


Осредненное C_p вдоль срединного сечения по данным различных экспериментов в аэродинамических трубах (1-15, осредненное значение WT ave) и по натурным замерам (Silsoe F-S), расчеты DES (нижний рисунок, сплошная линия)

Ветровые потоки в пешеходных зонах около высотного здания



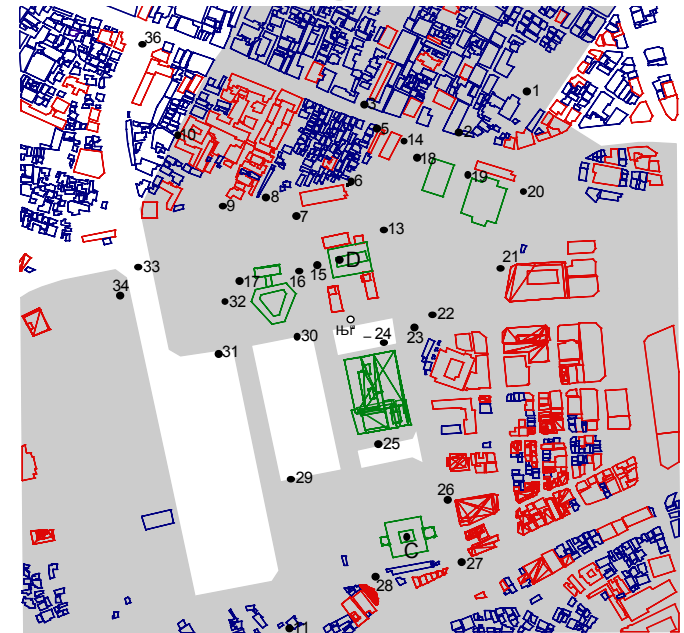
Коэффициенты усиления скоростей ветра (относительно набегающего потока) вдоль линии в пешеходной зоне. Расчеты SST (сплошная линия) и "к-ε" (штрих-пунктир), эксперим. данные при замерах различными методами (точки и ромбы)



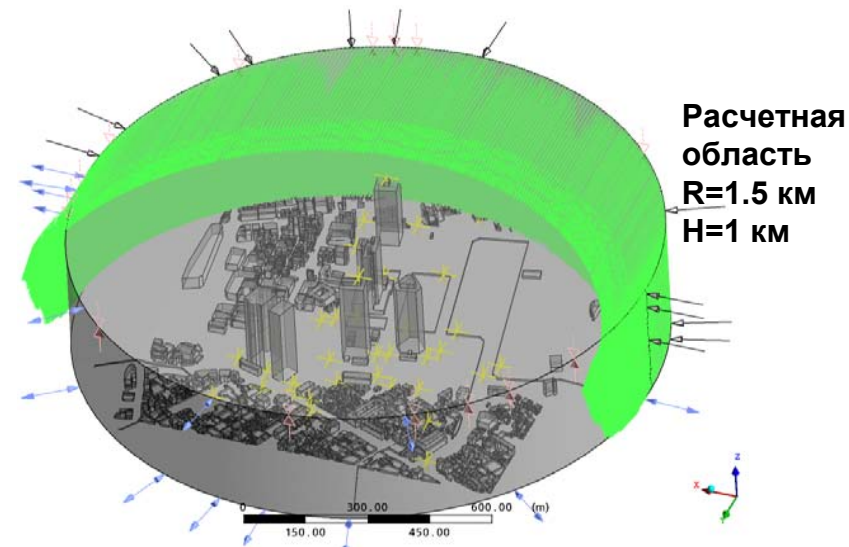
Графики безразмерных скоростей с учетом порывов "вдоль улицы" по расчетам (сплошная линия) и эксперименту

Скорости в пешеходных зонах района Синдзюку, г. Токио

Существующая застройка



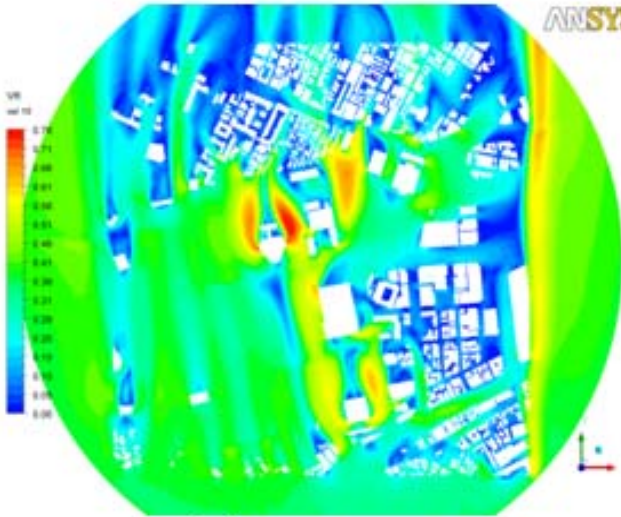
Расположение датчиков



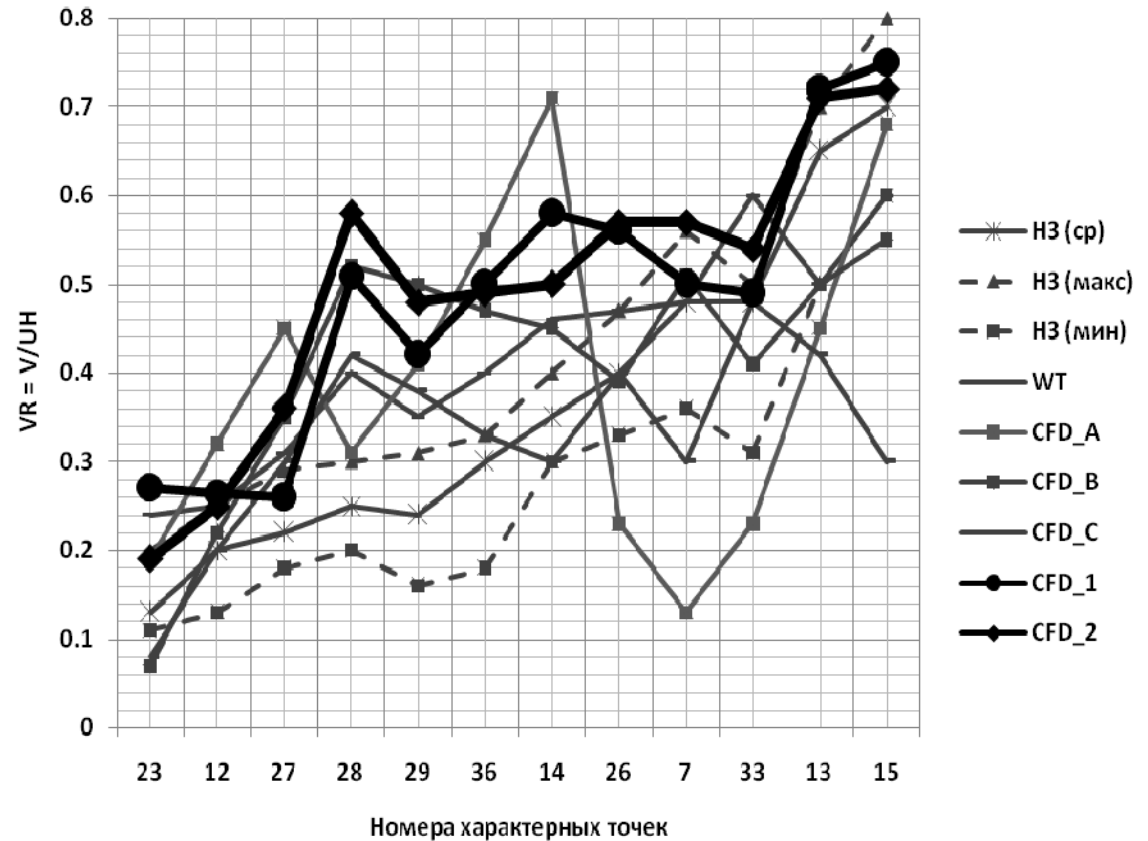
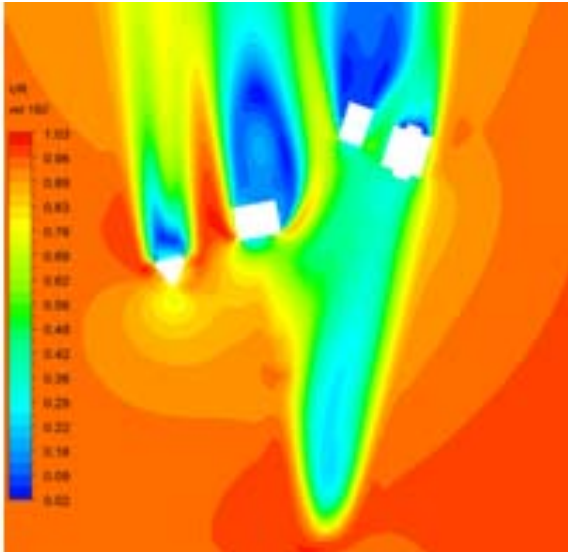
КО-модель (около 11 млн. ячеек) застройка по состоянию на время натурных замеров (1977 г.)

Скорости в пешеходных зонах района Синдзюку, г. Токио

Высота 10м



Высота 100м



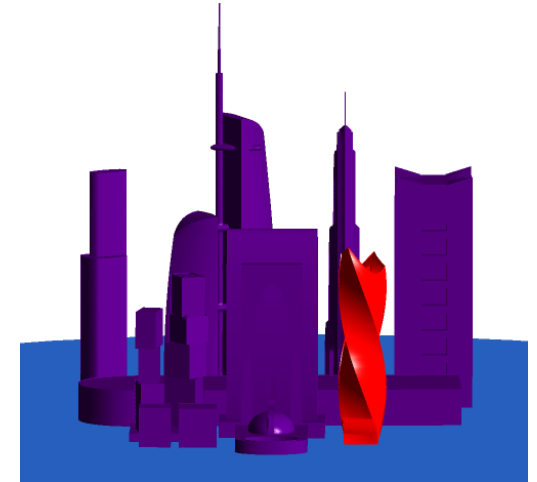
Коэффициенты усиления скорости ветра в окрестности группы высотных зданий (Токио) при южном ветре. На графиках – данные эксперимента (WT), натурные замеры (НЗ) с учетом разброса, расчеты японских ученых различными ПК (CFD_A, B, C), расчеты автора (CFD_1 предварительный, CFD_2 – уточненный).

Относительные скорости в горизонтальных сечениях

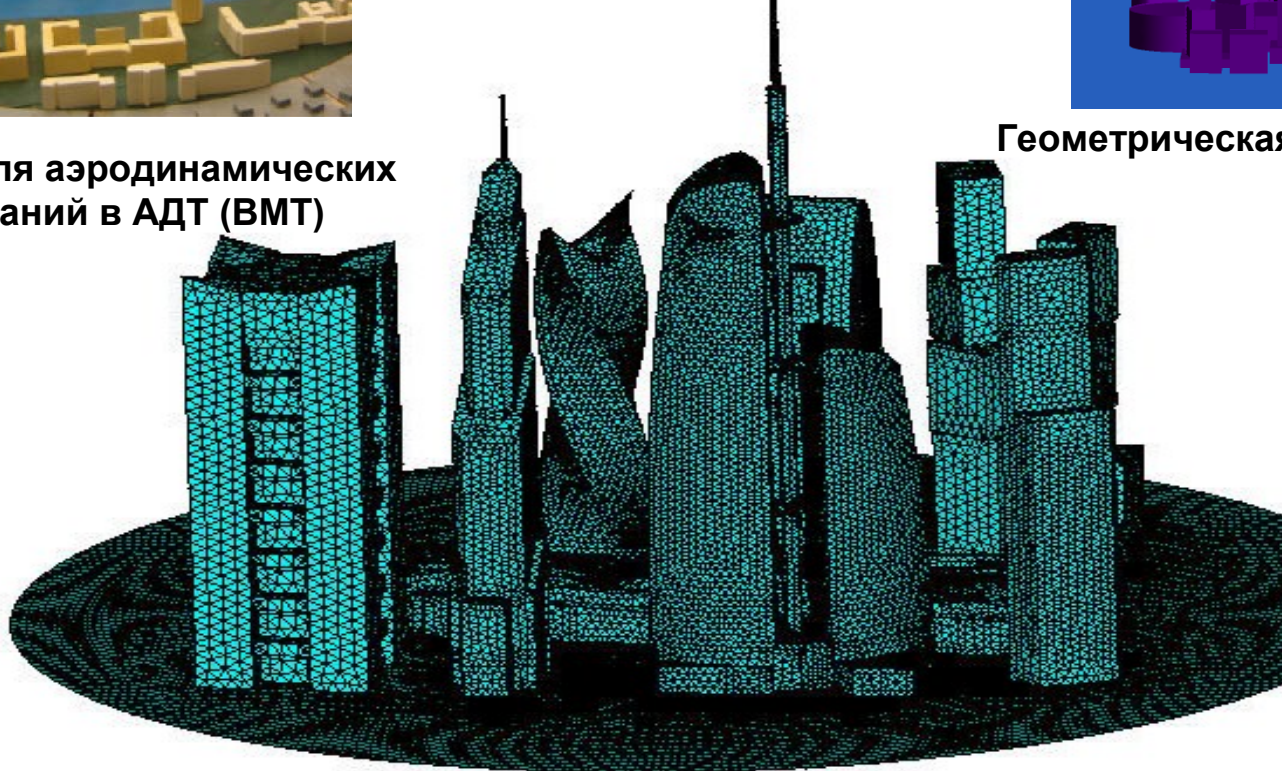
МФК "Сити-Палас" ММДЦ "Москва-Сити"



Модель для аэродинамических испытаний в АДТ (ВМТ)



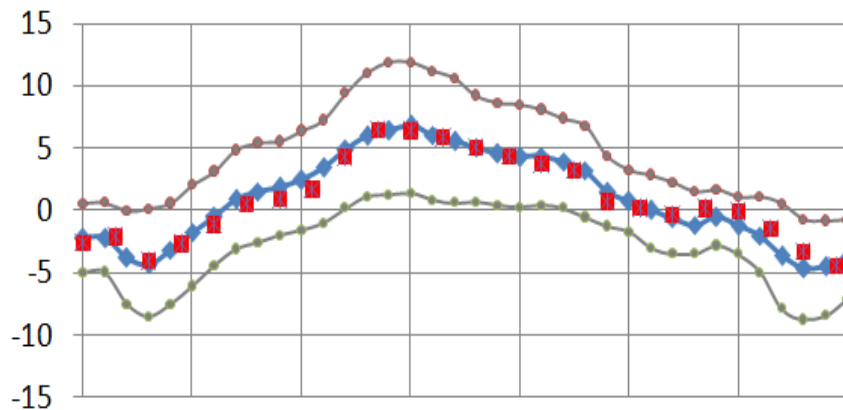
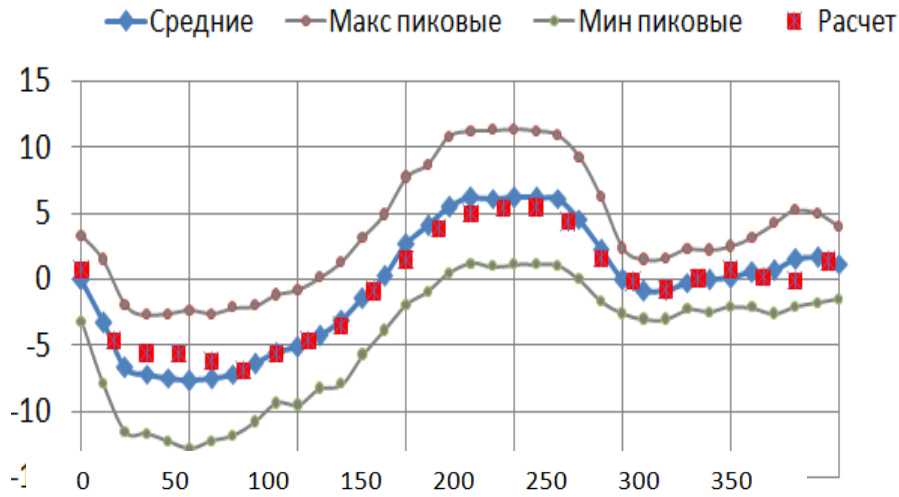
Геометрическая модель (ANSYS)



Поверхностная сетка расчетной модели (ANSYS)

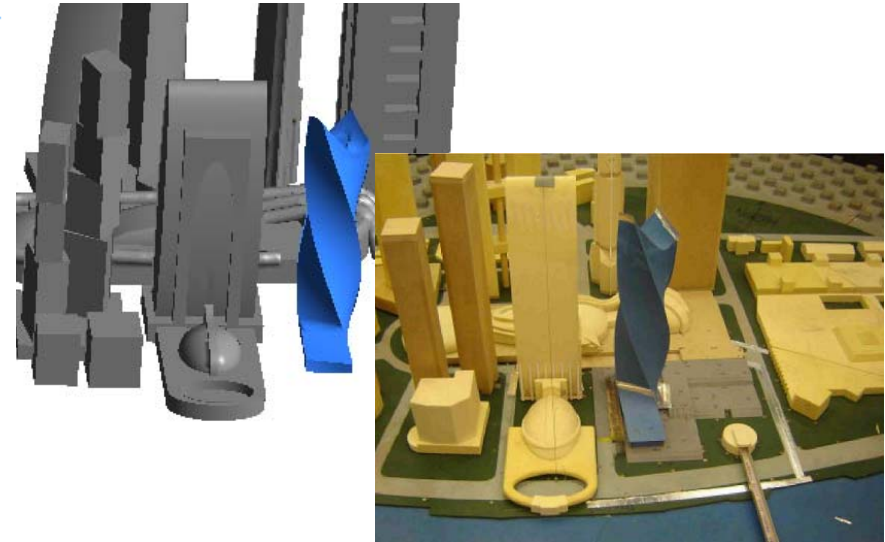


МФК "Сити-Палас" ММДЦ "Москва-Сити"

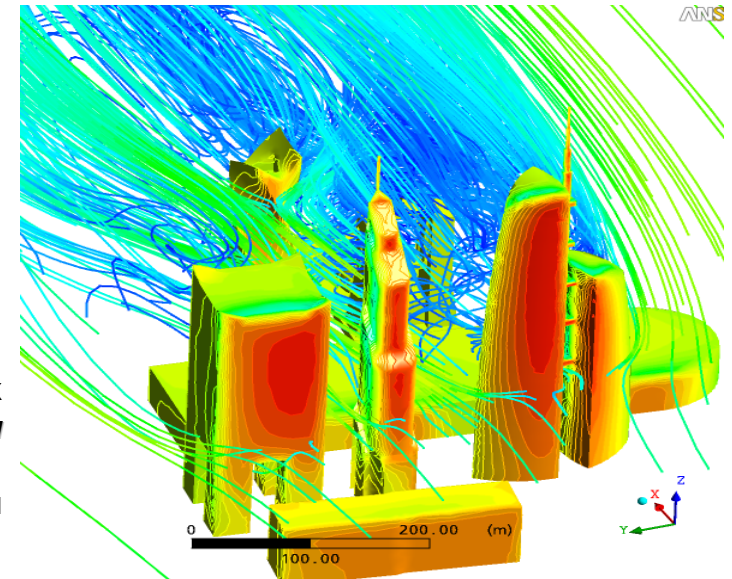


Средние нагрузки F_X , F_Y (МН) при различных направлениях ветра. Эксперимент ВМТ (сплошные линии) и расчеты диссертанта (точки).

Верхняя и нижняя огибающие полных нагрузок (с учетом пульсаций) по рекомендациям ЦНИИСК им. Кучеренко (\blacktriangle , \blacklozenge).

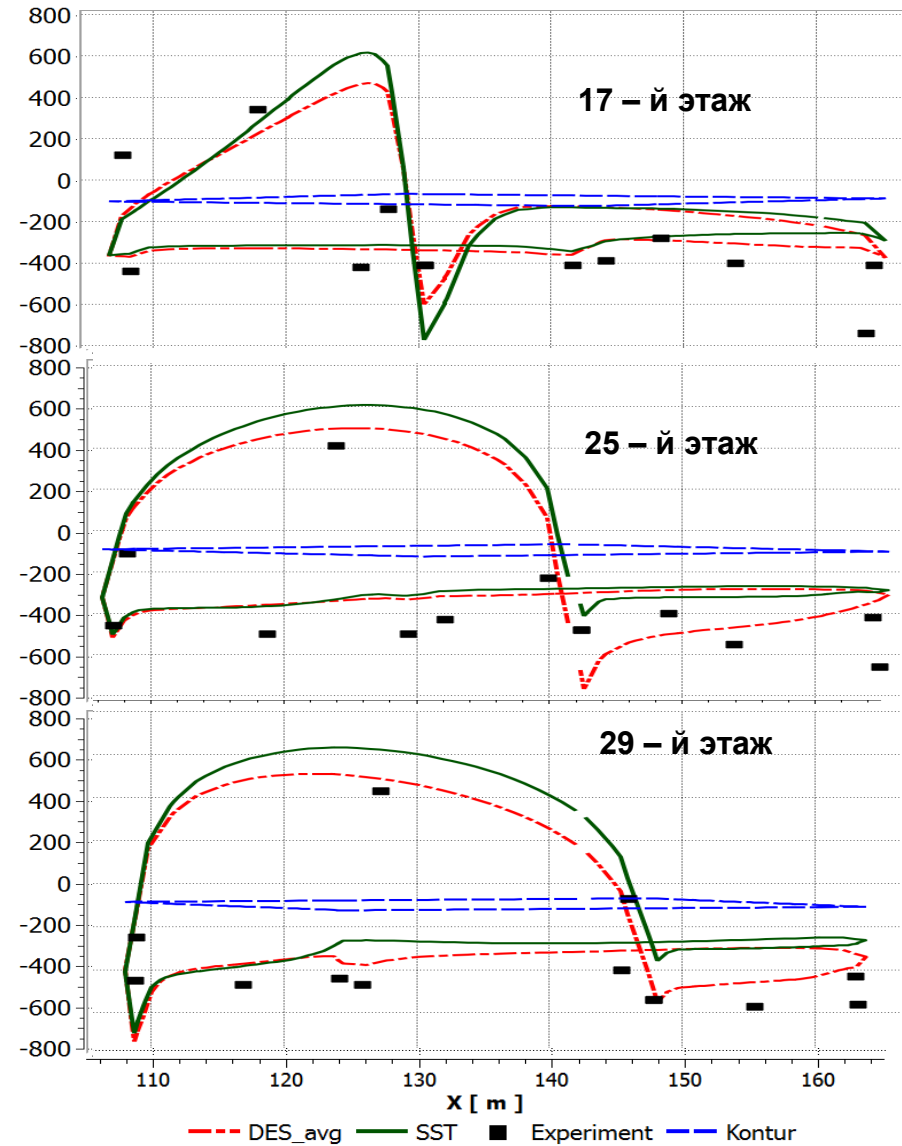
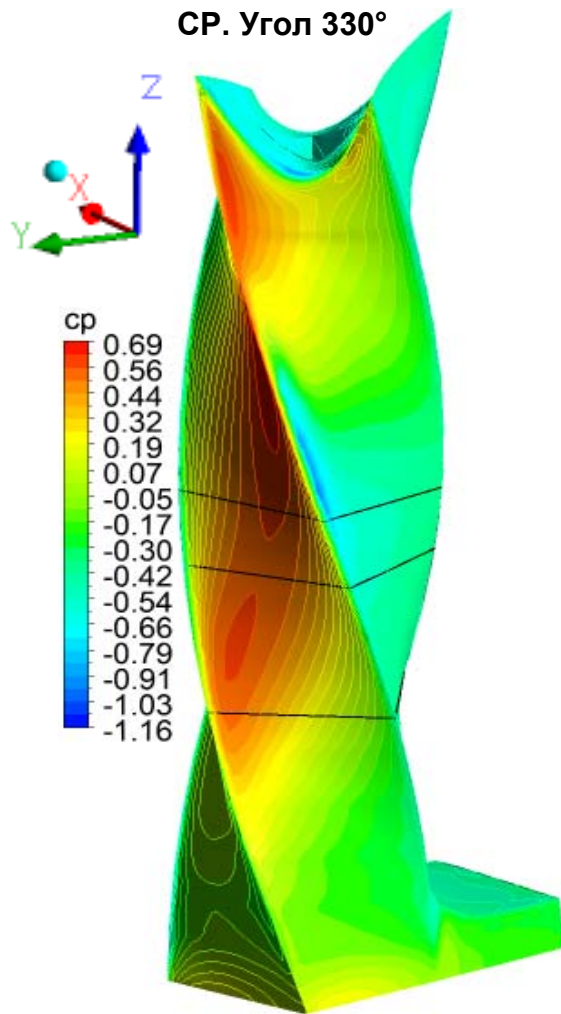


Эксперимент проводился фирмой ВМТ



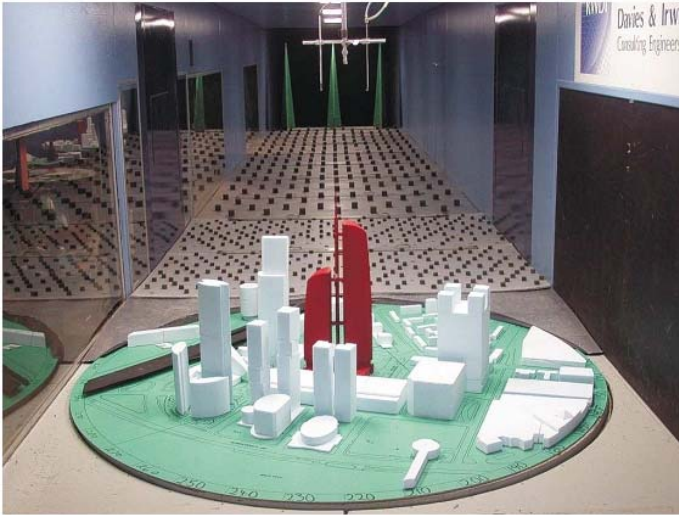
Линии тока и средние давления для угла 330°

Сравнения результатов с экспериментом для МФК «Сити-Палас»



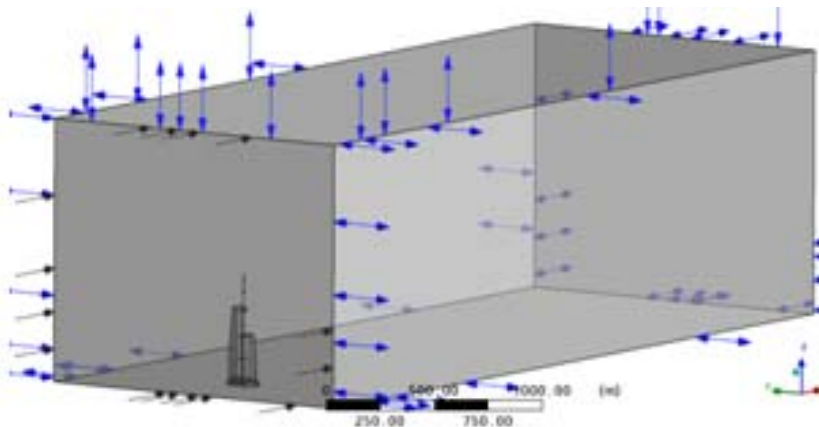
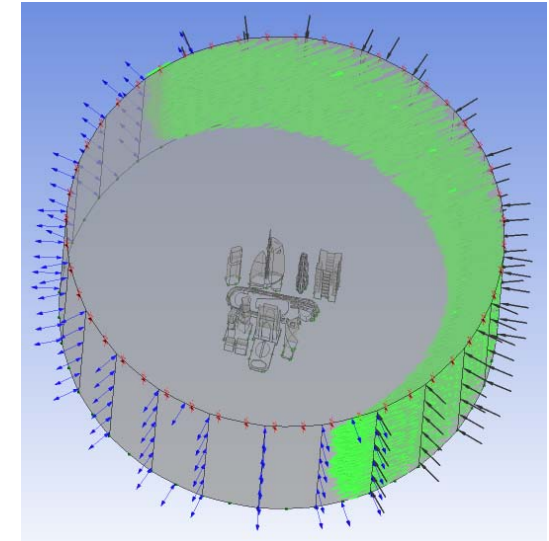
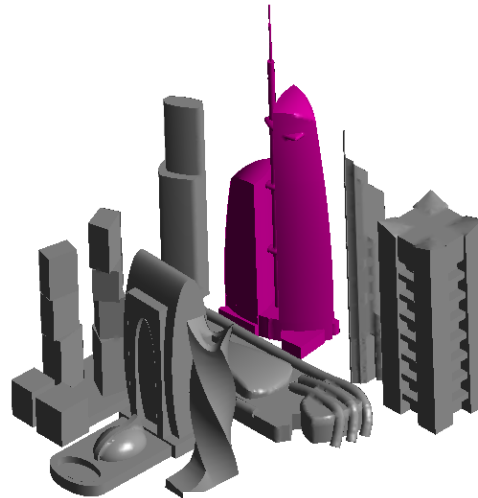
Средние давления [Па] по данным стационарных SST (сплошная) и нестационарных расчетов DES (штрих-пунктир) и эксперименту – точки

Комплекс “Федерация” ММДЦ “Москва-Сити”



Модель для аэродинамических испытаний в АДТ (RWDI)

Вариант расчетной модели

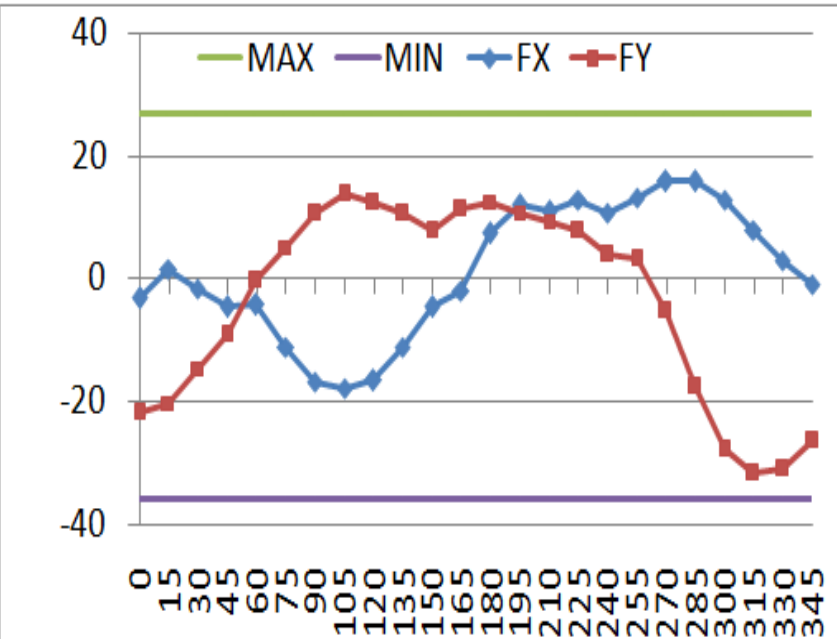


Расчетная область с указанными граничными условиями (ANSYS CFX)



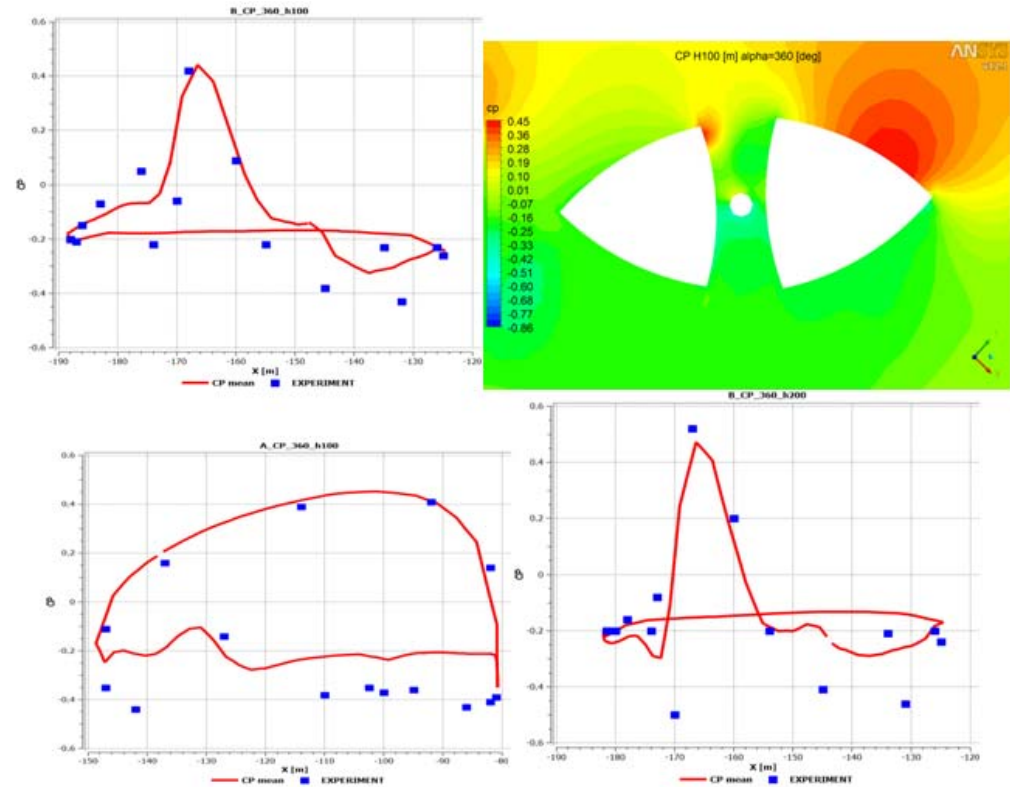
Поверхностная сетка

Комплекс “Федерация” ММДЦ “Москва-Сити”



Средние нагрузки FX и FY (MN) в зависимости от направления ветра, SST-модель

Расчетные огибающие, рекомендованные ЦНИИСК (горизонтальные линии)



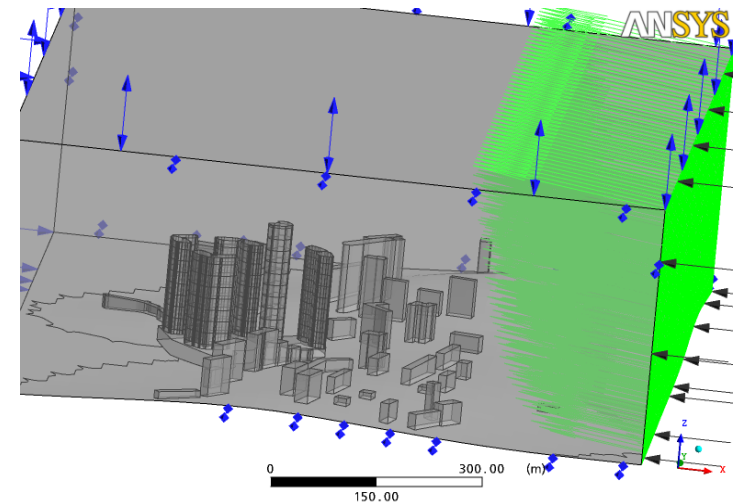
Давления (Па) по контуру зданий “Восток” и “Запад”. Эксперимент и расчет. Высоты 100, 200 и 300 м. Северное направление ветра

Раздел 5.

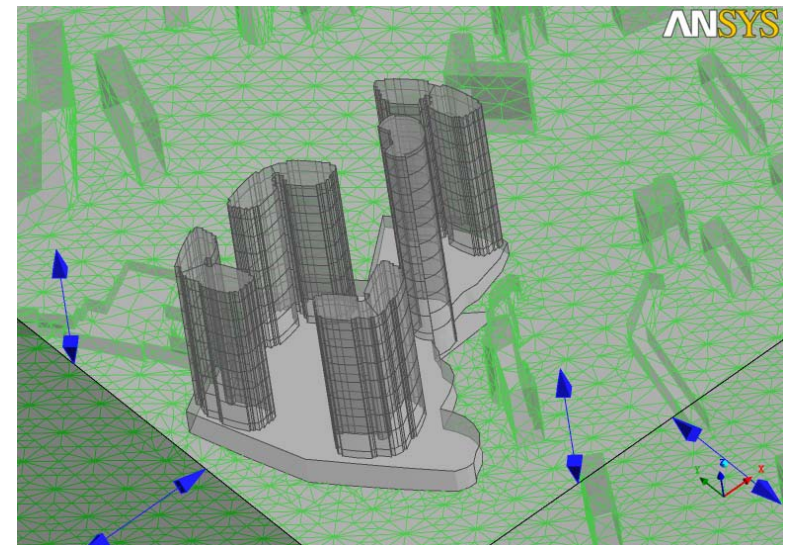
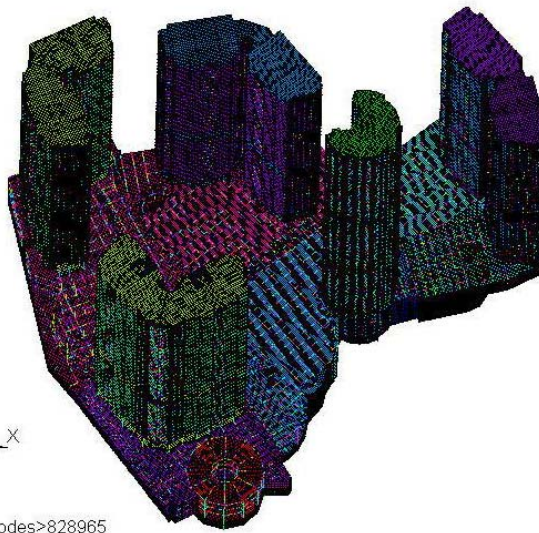
Практическое применение разработанной методики

- ЖК “Аквамарин” (г.Владивосток). Комплексный расчет**
- ЖК «Зодиак» (г. Москва). Нагрузки на фасадные конструкции**
- МФК "Газойл-Сити" (г. Москва). Нагрузки на несущие конструкции**
- ММДЦ “Москва-Сити”. Многопроцессорные комплексные расчеты**
- Комплекс зданий МГСУ. Предложения по системе мониторинга**

ЖК “Аквамарин” (г.Владивосток). Комплексный расчет

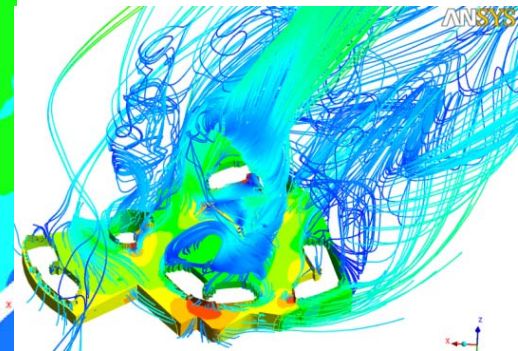
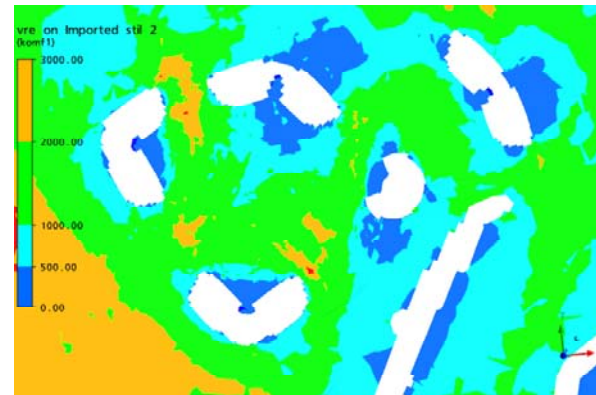
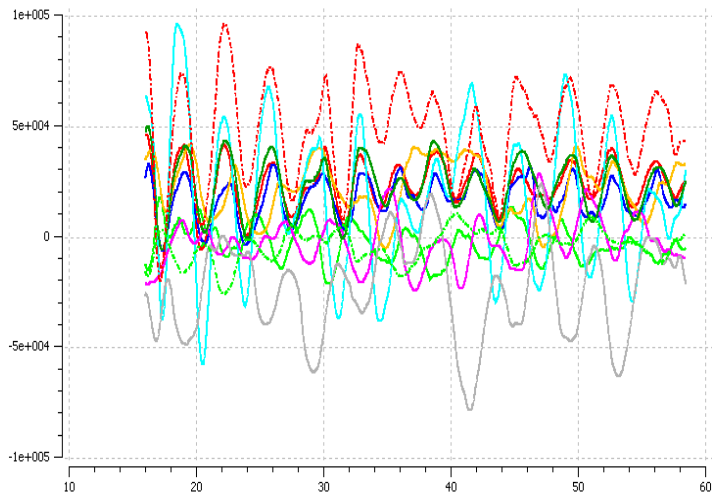
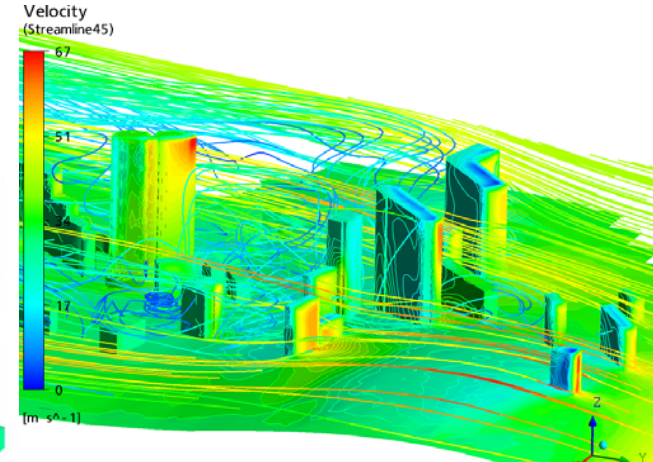
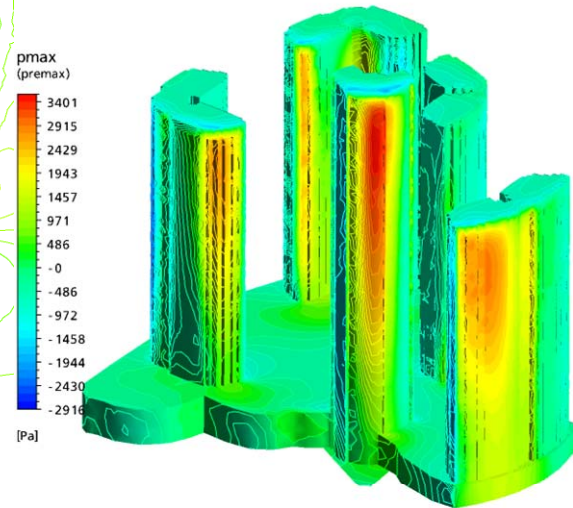
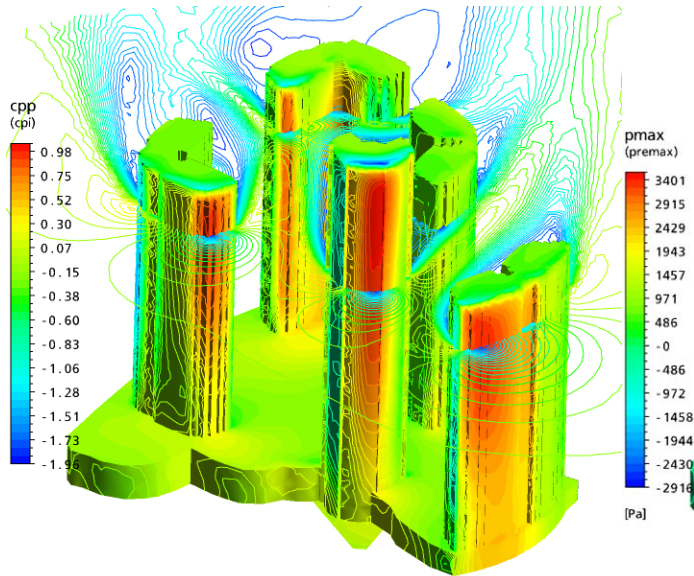


Расчетная область

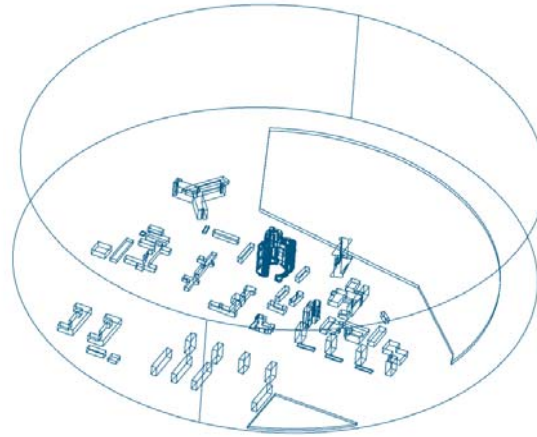


Конечноэлементные модели высотных зданий МФК “Аквамарин” после преобразования из SCAD в ANSYS

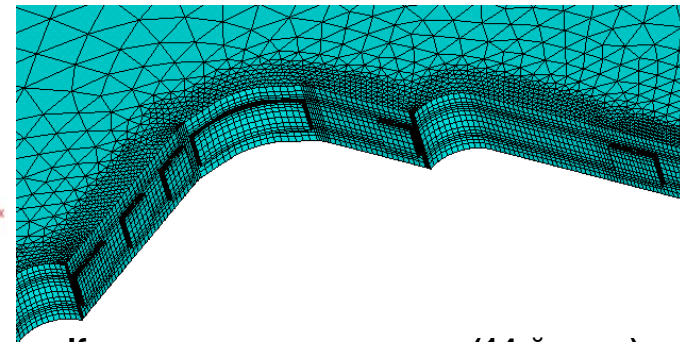
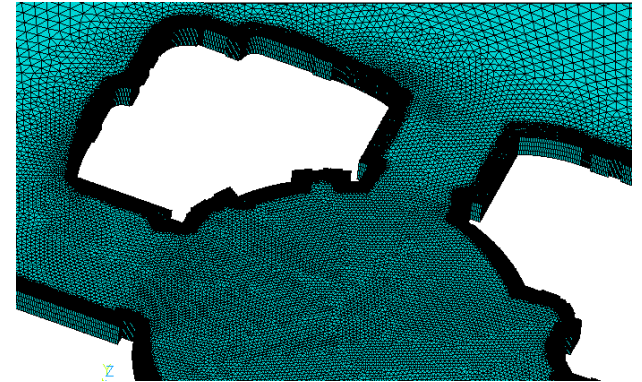
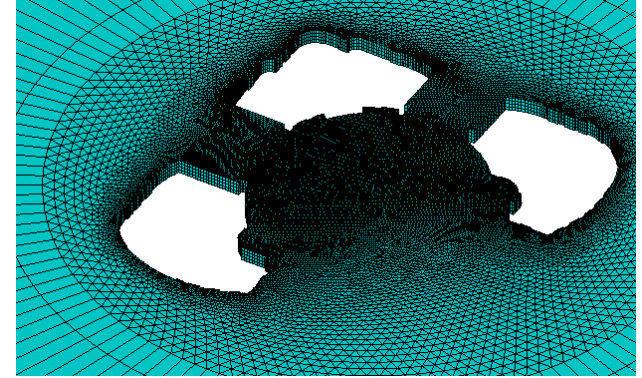
ЖК “Аквамарин” (г. Владивосток). Комплексный расчет



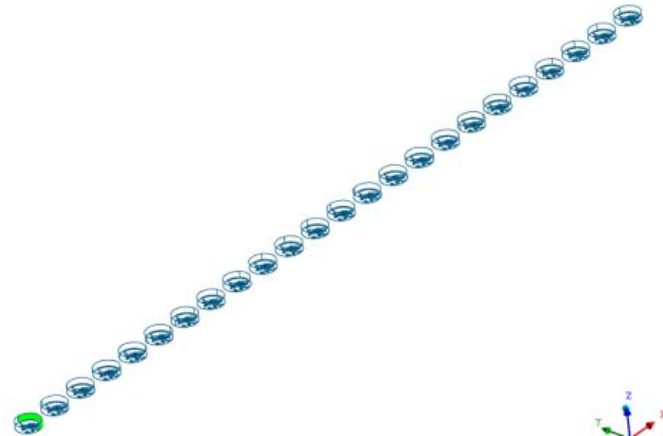
ЖК «Зодиак» (г. Москва). Нагрузки на фасадные конструкции



Расчетный домен. (~3.5 млн ячеек)
Одно направление ветра



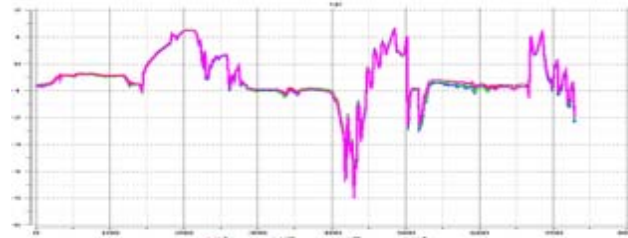
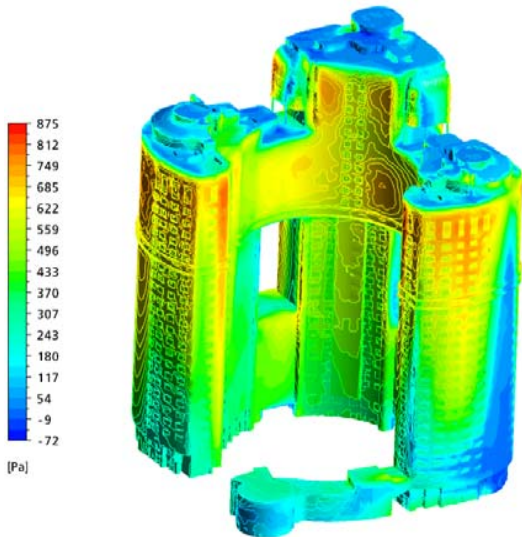
Квазидвумерные задачи (14-й этаж)
при разной степени детализации зон
оконных проемов



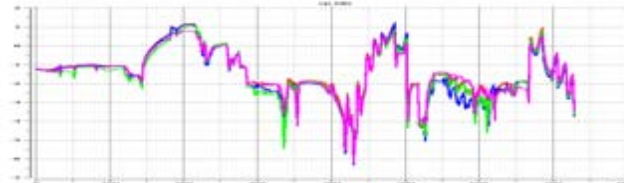
Полная модель (24 домена при
различных направлениях ветра),
Всего 83 млн. ячеек
Многопроцессорный расчет

Общий вид ЖК «Зодиак».
Сверху – проект по завершении
строительства, снизу –
состояние на февраль 2010 г.

ЖК «Зодиак» (г. Москва). Нагрузки на фасадные конструкции



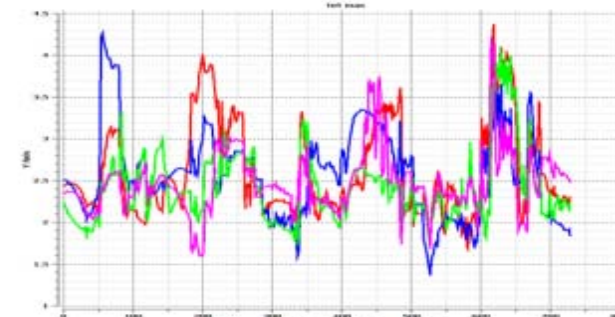
Средние значения S_p



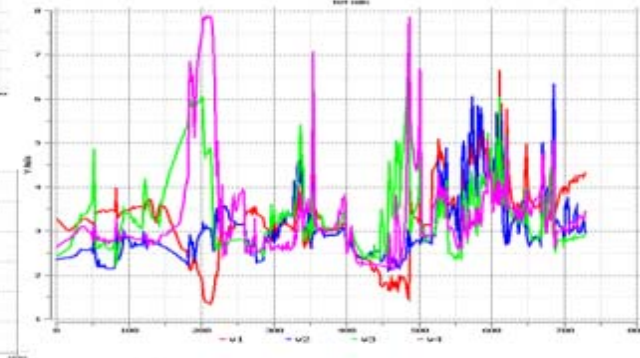
Максимальные значения S_p



Минимальные значения S_p



Коэффициент обеспеченности Θ для положительных давлений

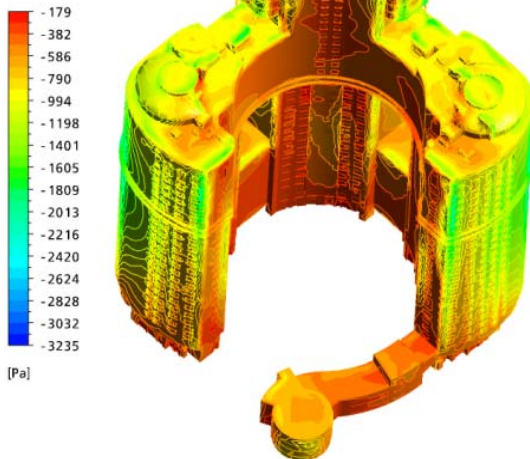


Θ для отрицательных давлений

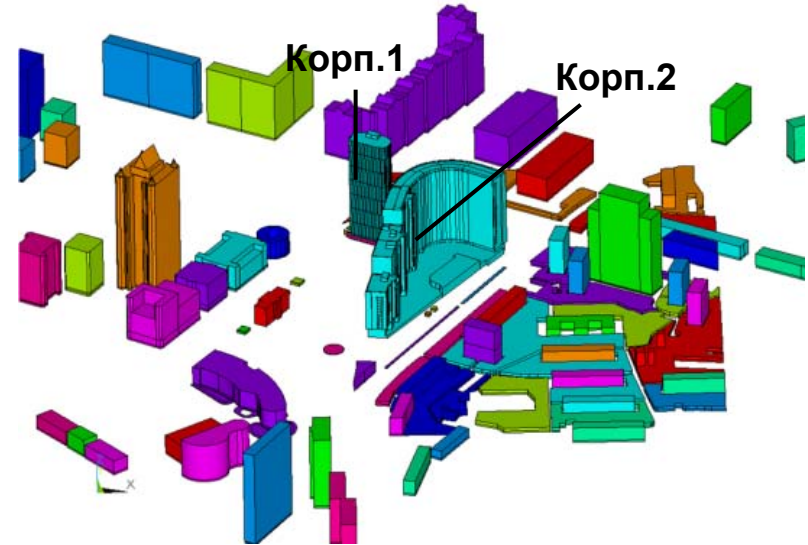
Обеспеченности вдоль контура по результатам двумерных нестационарных расчетов при различных начальных условиях. Для положительных давлений достигает 4, для отрицательных – до 8

Равн, (Па)	Стац. расчет	Нестационарный расчет				
		Вар.1	Вар.2	Вар.3	Вар.4	Вар.5
Max	689.5	684.0	702.3	685.8	685.4	681.6
Min	-2295.0	-2714.0	-2582.4	-2612.7	-2619.5	-2978.2

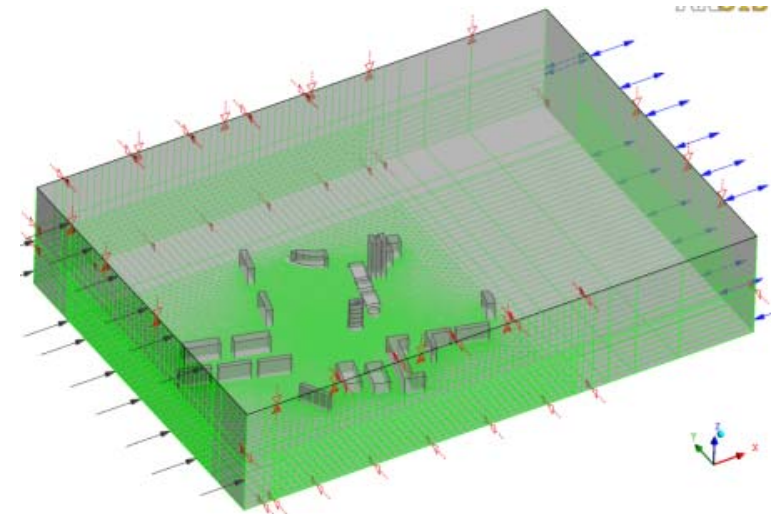
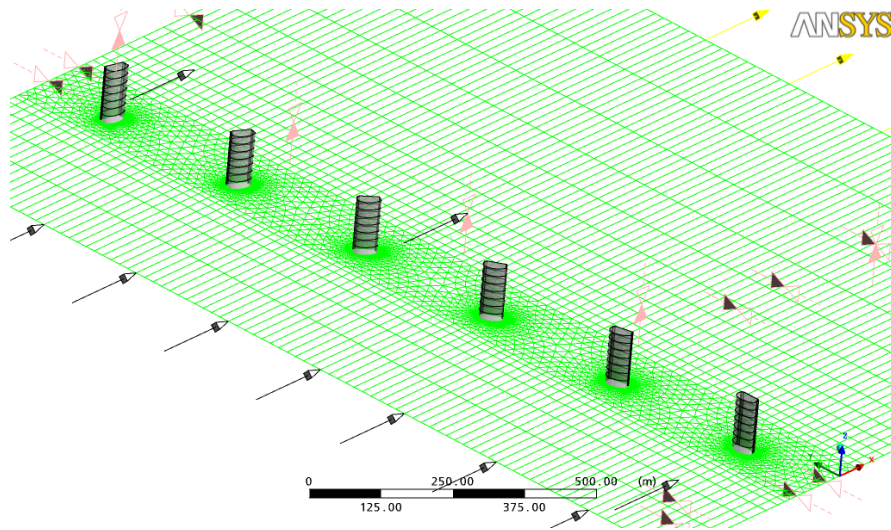
Расчетные ветровые нагрузки на фасадные конструкции. Верхняя огибающая максимальных (до 880 Па) и нижняя огибающая минимальных (до -3230 Па) давлений



МФК "Газойл-Сити" (г. Москва). Нагрузки на несущие конструкции



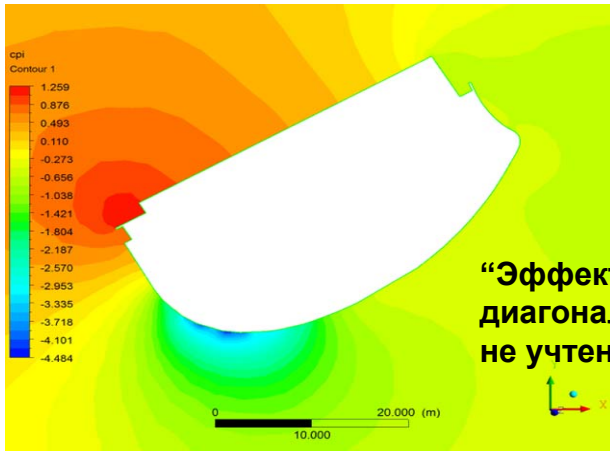
Геометрическая модель (ANSYS)



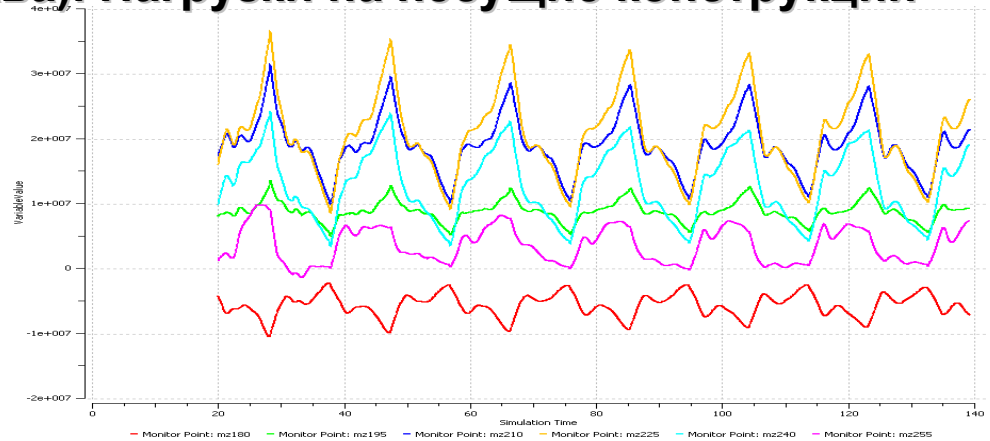
Расчетная КО-модель (ANSYS CFX) и граничные условия (частичная застройка). Около 5 млн. ячеек.

Расчетная модель и граничные условия (изолированное здание при различных направлениях ветра), сгенерированные модулем WINDLOAD/CFX

МФК "Газойл-Сити" (г. Москва). Нагрузки на несущие конструкции



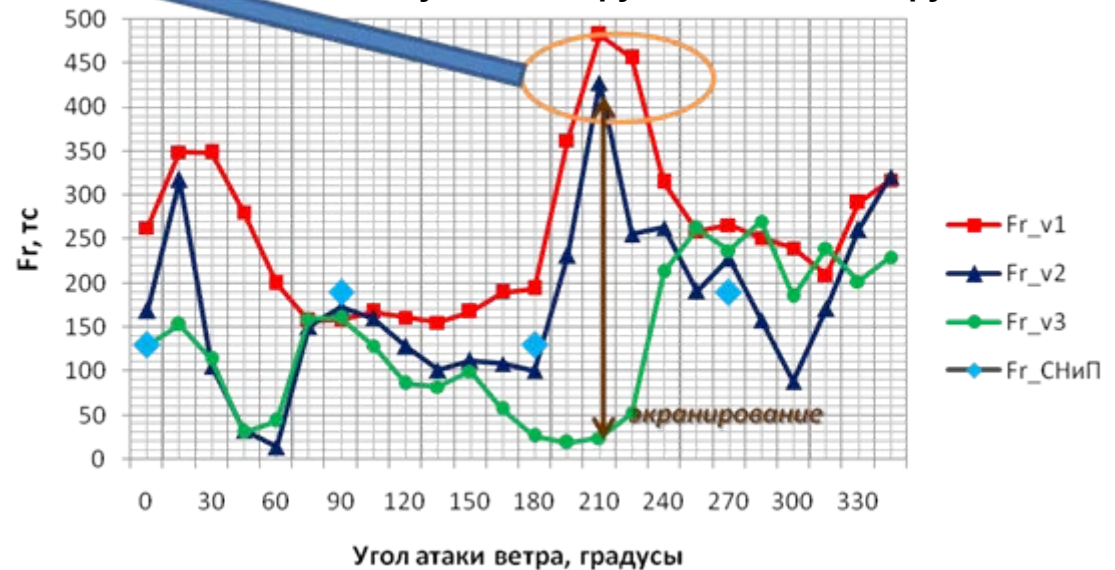
“Эффект крыла” при диагональном ветре не учтен нормами



Нестационарный расчет. Результирующие нагрузки на несущие конструкции для зон сооружения.

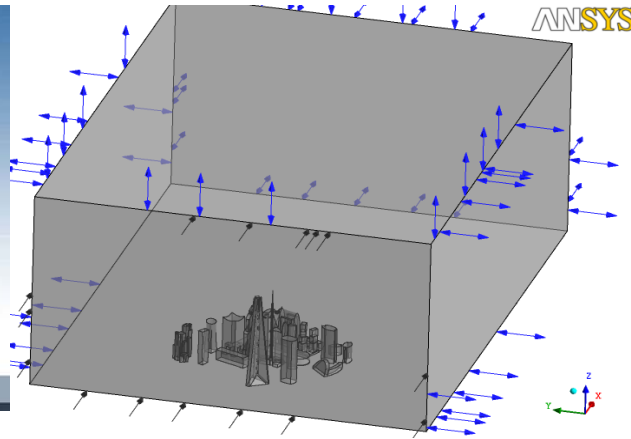
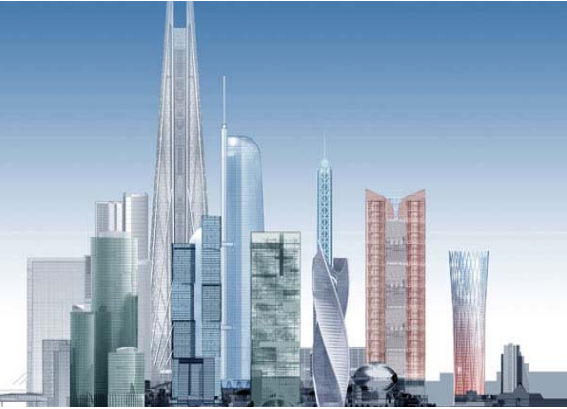


Результаты расчетов C_p для изолированного здания в двумерной (2D, красная линия) и трехмерной (3D, синяя линия) постановках. Угол 210°

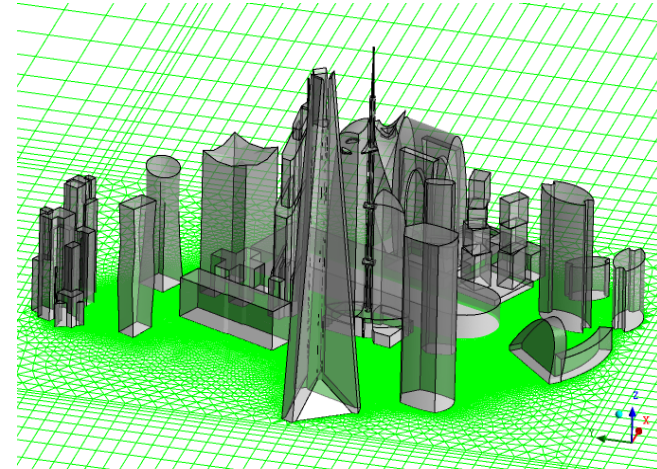


Равнодействующая средних нагрузок Fr (тс) на корпус 1 в зависимости от направления ветра. ■ – изолированный корпус 1, ▲ – частичная застройка, после возведения корпуса 1, ● – в полной застройке, ◆ – результаты по СНиП (для изолированного прямоугольного профиля)

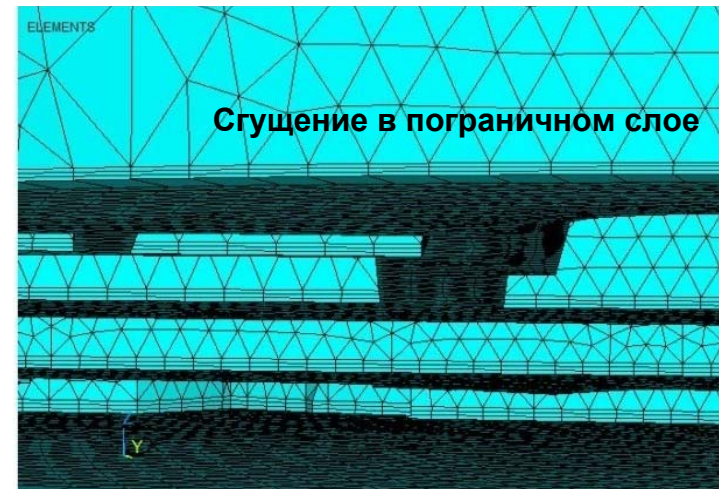
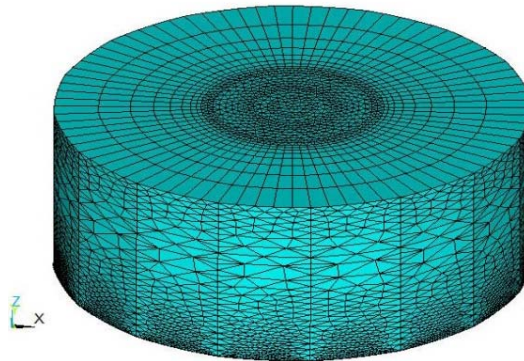
ММДЦ “Москва-Сити”. Комплексный расчет



Расчетная область и
граничные условия

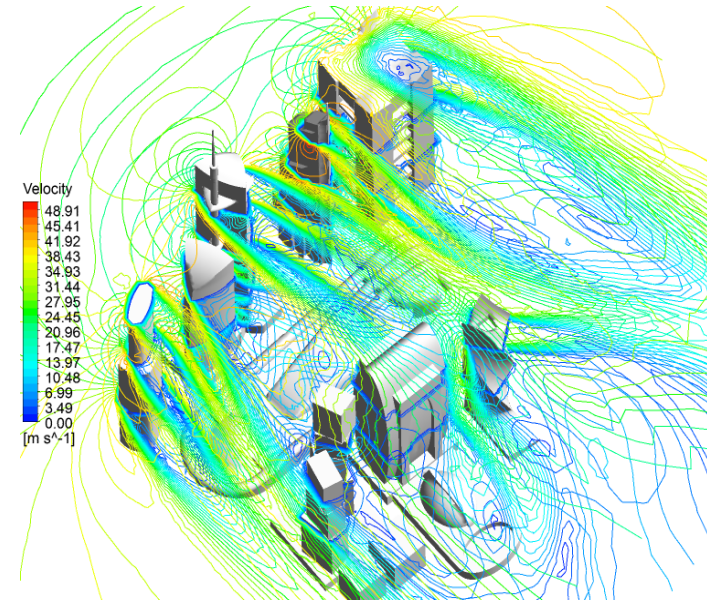
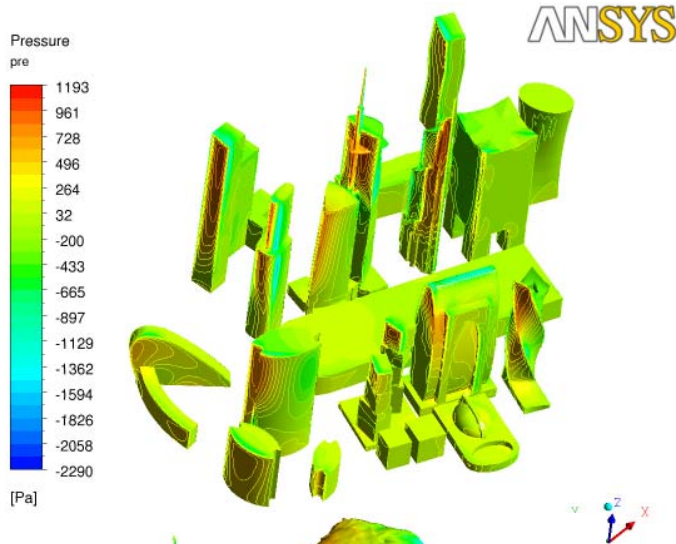


КО-модель. Вариант с башней
“Россия” (27 млн. ячеек)

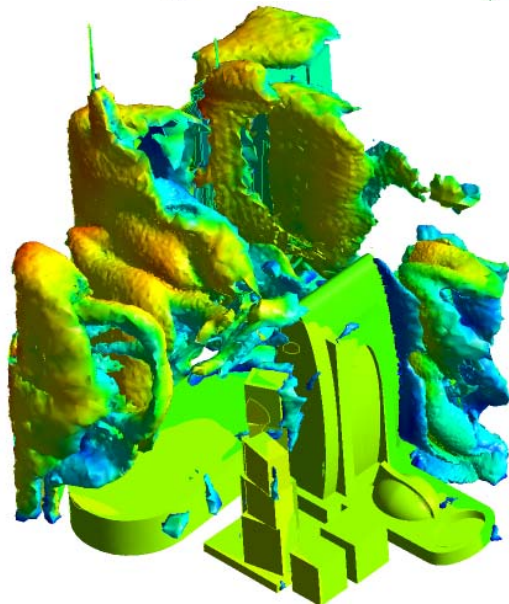


Поверхностная сетка расчетной модели и расчетная область (ANSYS)

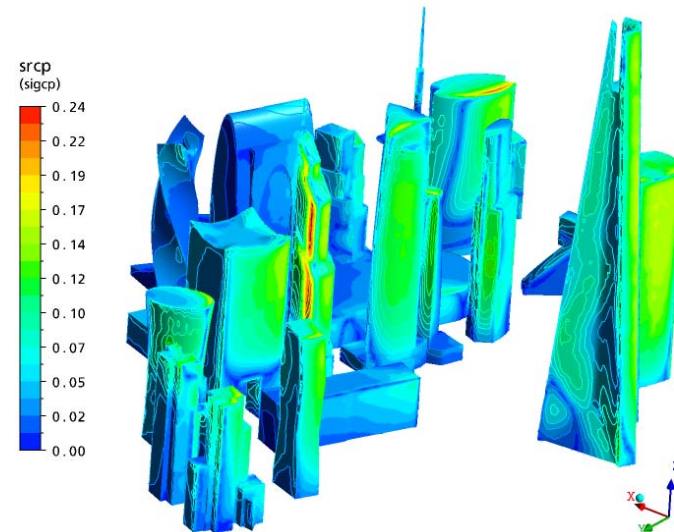
ММДЦ "Москва-Сити". Комплексный расчет



Линии тока и скорости

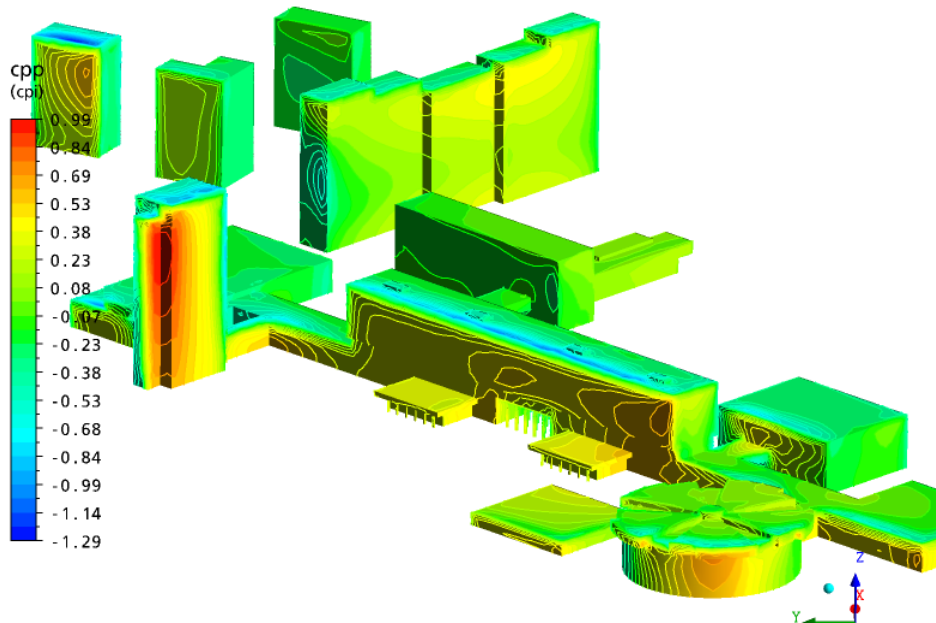
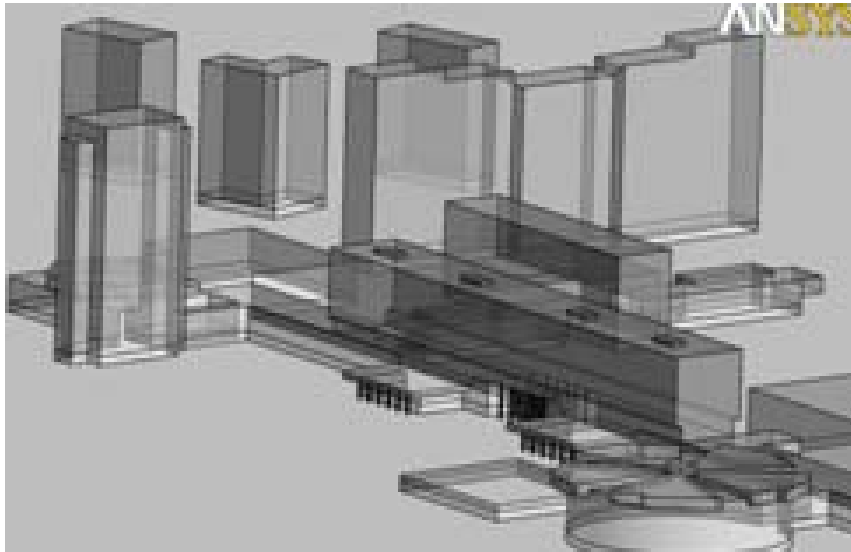


Актуальный вариант. Средние давления (Па),
изоповерхности завихренности (угловых скоростей
вращения потока). Угол 330° (северо-запад)

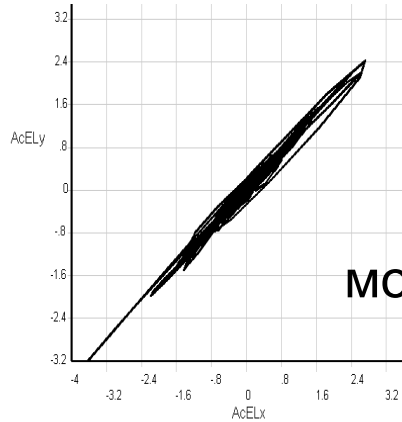
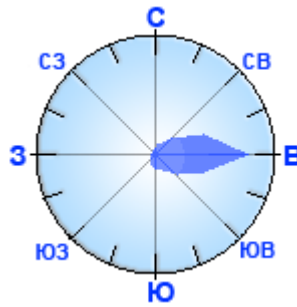
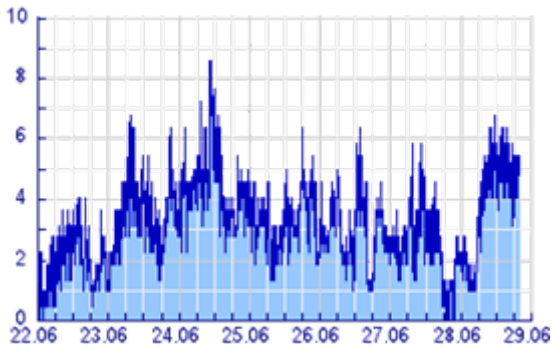


Вариант с башней "Россия".
Стандарт пульсаций Sr

Комплекс зданий МГСУ. Предложения по системе мониторинга

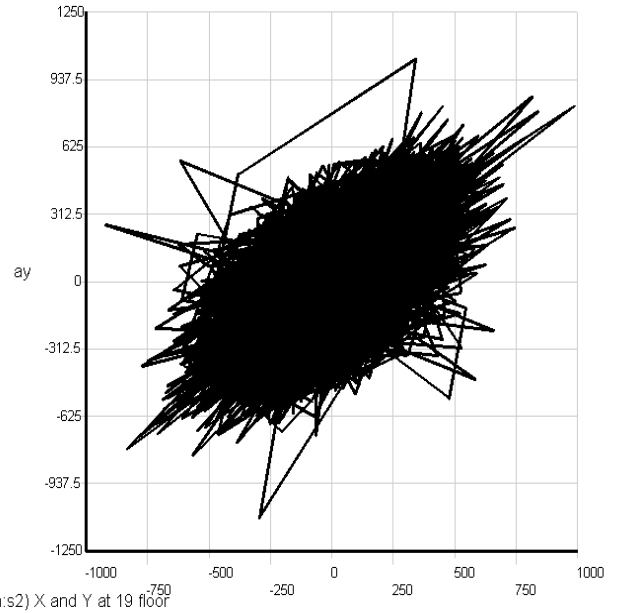


- Замеры скоростей (средних значений и пульсаций) и направлений ветра на близкорасположенных зданиях;
- Мониторинг давлений в точках на фасадах для верификации аэродинамической модели;
- Назначение точек мониторинга динамических характеристик и напряженно-деформированного состояния;
- Верификация (идентификация) массово-прочностной компьютерной модели МГСУ;
- Создание базы данных ускорений (максимумы и спектры) при различных направлениях ветра по данным как натуральных замеров, так и численного моделирования;
- Мониторинг, предусматривающий сравнение замеряемых характеристик с “эталонными”.



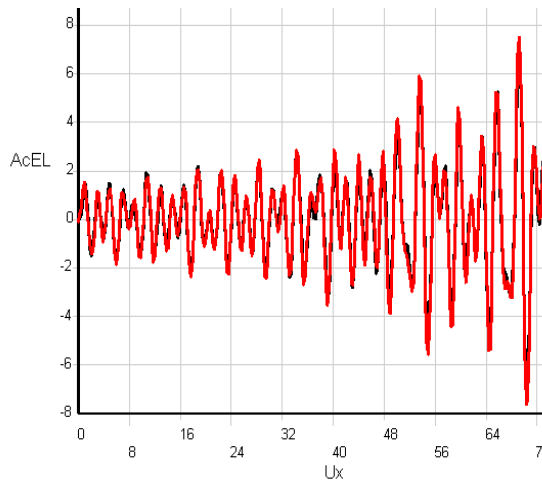
Численное моделирование

COL 2

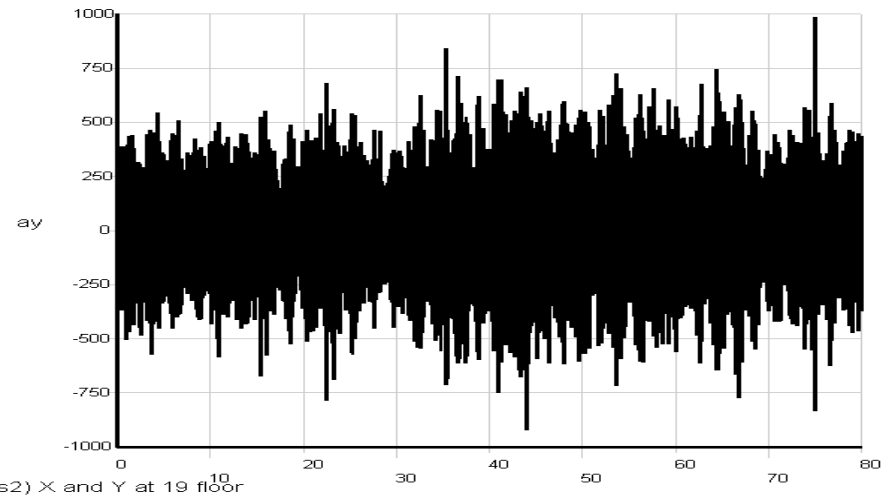


Данные реального Мониторинга ускорений на 19 этаже адм. Корпуса МГСУ

acol_top_mmm:s2 AT WIND=5M:S



COL 1



acol_top_mmm:s2 AT WIND=%VEL%M:S

1. Как показал анализ современных отечественных и зарубежных теоретических и экспериментальных исследований, существующие нормативные документы и методики не в полной мере отражают специфику ветровых воздействий на высотные здания и их комплексы, прежде всего, в условиях их компактного расположения и интерференции и, поэтому, нуждаются в уточнении и развитии.

2. Разработана методика расчета нормативных параметров ветровых воздействий (*средней и пульсационной составляющих нагрузок на несущие конструкции, пиковых давлений на ограждающие конструкции, уровня пешеходной комфортности*) на высотные здания и их комплексы на базе численного решения стационарных и нестационарных трехмерных уравнений гидрогазодинамики (Навье-Стокса в приближении Рейнольдса, модели турбулентности **RANS**, **URANS** и **DES**) с дискретизацией методом конечных объемов, позволяющая адекватно учитывать важные факторы – направления и профиль ветровых потоков, рельеф местности, окружающую застройку и последовательность возведения комплексов.

3. Разработанная методика реализована в форме специализированного программного модуля **WINDLOAD/CFX** к выбранному, в качестве базового, универсальному программному комплексу **ANSYS – ANSYS CFX**. Для решения большеразмерных задач (до 100 млн. вычислительных ячеек - конечных объемов, до 150 млн. неизвестных) используются эффективные параллельные вычисления кластерной организации.

4. Проведена верификация разработанной методики и ее программной реализации на основе сравнения с результатами испытаний моделей в аэродинамических трубах (тестовые модели, комплекс “Федерация” и МФК “Сити-Палас” в ММДЦ “Москва-Сити” и др.) и с данными натурных замеров для группы высотных зданий в реальной застройке (микрорайон Синдзюку, Токио, Япония).

Основные результаты и выводы

5. Установлена приемлемая для практики точность результатов расчета средней составляющей ветровых нагрузок для зданий сложных форм (расхождение с имеющимися экспериментальными данными не более **15-20%**) не только при нестационарных, но и при стационарных расчетах с использованием модели турбулентности **SST**, предложенной схемы дискретизации и при адаптивной схеме расчетов с последовательным сгущением сетки.

6. Для "уточненного" определения пульсационной составляющей ветровой нагрузки рекомендуется выполнять нестационарный расчет с использованием моделей турбулентности **DES** или **URANS**. Для сложных реальных застроек наблюдается рассогласование результатов по отрицательным давлениям (**20-50%**) с данными испытаний в аэродинамических трубах. Для дополнительной верификации предлагается проводить выборочные натурные замеры параметров реальных ветровых воздействий.

7. Для оценки пульсационной составляющей нагрузок допустимо использование предложенного и верифицированного "инженерного" подхода, основанного на оценке турбулентной энергии пульсаций (по результатам стационарного расчета), максимальных коэффициентов обеспеченности и нормативных параметров корреляции нагрузок. Этот подход применим и при определении ветровых нагрузок на фасадные конструкции. Возможно определение локальных зон пиковых давлений, которые не могут быть надежно идентифицированы в практике испытаний в аэродинамических трубах.

8. Особенно эффективна разработанная численная методика, как показали результаты решения верификационных задач, при оценке пешеходной комфортности. При этом исключается масштабный эффект, снижающий при испытаниях точность замеров потоков вблизи поверхности.

Основные результаты и выводы

9. Разработанная методика использована для трехмерных стационарных и нестационарных расчетов ветровых нагрузок на несущие и ограждающие конструкции и оценки пешеходной комфортности ряда проектируемых и строящихся высотных комплексов (ММДЦ "Москва-Сити", МФК "Газойл-Сити" и ЖК "Зодиак", ЖК "Аквамарин"), а также комплекса зданий МГСУ. Выявлен и проанализирован ряд реальных аэродинамических эффектов (включая интерференцию), которые не определяются при применении действующих нормативных методик.

10. Применительно к объектам исследования конкретизирована и обеспечена выполненными разработками современная концепция определения ветровых воздействий: а) "предварительное" численное моделирование с определением наиболее опасных/характерных направлений ветра, оценка необходимости испытаний в аэродинамической трубе (б); б) испытания в аэродинамической трубе (углы ветра, расположения и количества датчиков по рекомендациям а); в) уточненное многопараметрическое и многофакторное численное моделирование с сопоставлением характерных параметров с результатами испытаний.

11. Предложена структура системы мониторинга высотных зданий/комплексов с учетом одновременного замера характеристик ветра и перемещений/ускорений, базирующаяся на разработанной методике.

12. Разработанная методика успешно используется в практике обучения студентов и аспирантов профильных специальностей МГСУ по дисциплине "Вычислительная аэрогидромеханика".

- Вышеуказанная методика оформлена как диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 - **Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ**
- **Защищена в июне 2010 г.**
- **Научный руководитель – д.т.н., проф. Белостоцкий А.М.**
Научный консультант – д.т.н., проф. Варапаев В.Н.
- **Оппонент – академик РААСН, д.т.н., проф. Травуш В.И.**
- **Оппонент – вед.н.с., к.т.н. Попов Н.А.**
- **Ведущая организация – НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова**

- Спасибо за внимание! Вопросы?
- Перспективы дальнейшего развития методики в отдельной презентации

- **Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы**

Сергей Иванович Дубинский

*Научно-образовательный центр компьютерного моделирования
Московского Государственного Строительного Университета*

с.н.с., к.т.н.

ООО "ГК-Техстрой", гл. спец

- niccm@mgsu.ru
- Sergdubpodlipki@mail.ru