

Опыт расчетных исследований и решения задач строительной аэродинамики

Специалисты ЗАО НИЦ СтаДиО и НОЦ КМ НИУ МГСУ обладают многолетним опытом расчетно-теоретических исследований и решения сложных, в том числе рекордных по размерности (до 200 миллионов неизвестных) трехмерных стационарных и нестационарных задач **строительной аэродинамики**, в результате которого выработана, верифицирована и апробирована на целом ряде практических задач методика численного моделирования ветровых нагрузок и воздействий на уникальные здания, сооружения и комплексы. Как правило, в результате комплексного решения задач строительной аэродинамики выдаются следующие результаты:

1) Результаты анализа ветровых режимов района строительства, сложившейся застройки и конструктивно-архитектурных особенностей исследуемого объекта, особенности расчетов ветрового нагружения высотных зданий и комплексов в отечественных и зарубежных нормативных документах.

2) Описание методики аэродинамических расчетов ветровых воздействий с использованием специализированного программного комплекса ANSYS CFD (CFX), реализованной в форме библиотеки макросов и подпрограмм. В обоснование методики численного моделирования для нескольких сходных по сложности комплексов зданий приводится сравнение результатов расчетов с данными испытаний в аэродинамической трубе и натурными замерами.

3) Разработанные и верифицированные расчетные трехмерные аэродинамические модели (CFD-модели), включающие рассматриваемый объект и существующую (либо перспективную) окружающую застройку в радиусе ~1 км.

4) Результаты расчетов:

✓ **аэродинамических нагрузок на несущие конструкции** при 24-х направлениях ветра (через 15°) в трехмерной постановке для *рассматриваемого объекта "в чистом поле"* (без учета окружающей застройки) и *рассматриваемого объекта в окружающей застройке* (с учетом окружающей застройки и локального рельефа местности):

- средние значения *суммарных* расчетных ветровых нагрузок на несущие конструкции здания в строительных осях объекта, векторная сумма нагрузки и крутящий момент относительно вертикальной оси для 24-х направлений (шаг по углу 15°) в табличном виде и в форме графиков;
- значения расчетной средней составляющей *поэтажных* сил в строительных осях объекта на несущие конструкции здания для 24-х направлений ветра в табличном виде;
- средняя, динамическая (амплитуда или полуразмах) составляющие *погонной* силы в строительных осях объекта, коэффициент "динамичности" и расчетное значение *погонной* силы для соответствующего

щей компоненты (поверхность сбора аэродинамической нагрузки в уровне перекрытия) каждого этажа здания в табличном виде.

✓ **пиковых (минимальных и максимальных) давлений на фасадные конструкции** для 24-х направлений ветра (через 15°) в трехмерной постановке для *рассматриваемого объекта "в чистом поле"* (без учета окружающей застройки) и *рассматриваемого объекта в окружающей застройке* (с учетом окружающей застройки и локального рельефа местности):

- огибающие максимального и минимального значений давления на фасады здания для всех направлений ветра;
- огибающие вычисленных поэтажно максимальных и минимальных значений ветрового давления на фасадные конструкции; изополя верхней огибающей максимальных значений ветрового давления, нижней огибающей минимальных значений ветрового давления и соответствующих углов атаки ветра, при которых реализуются эти огибающие, представляются в графическом виде.

✓ **ветровых воздействий в пешеходных зонах (оценка пешеходной комфортности):**

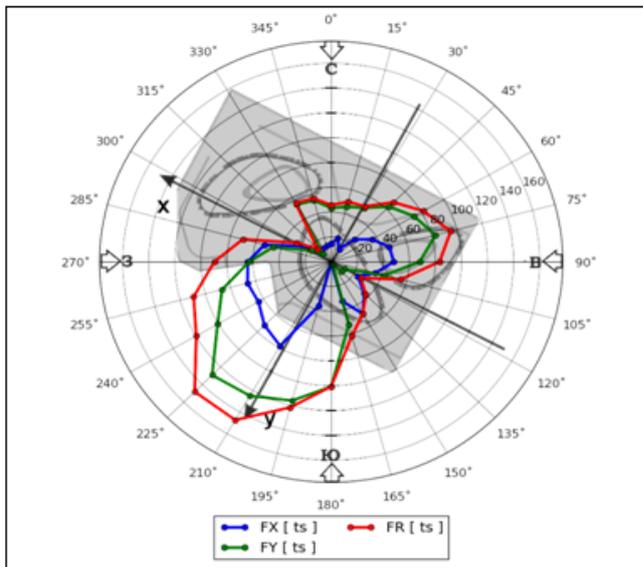
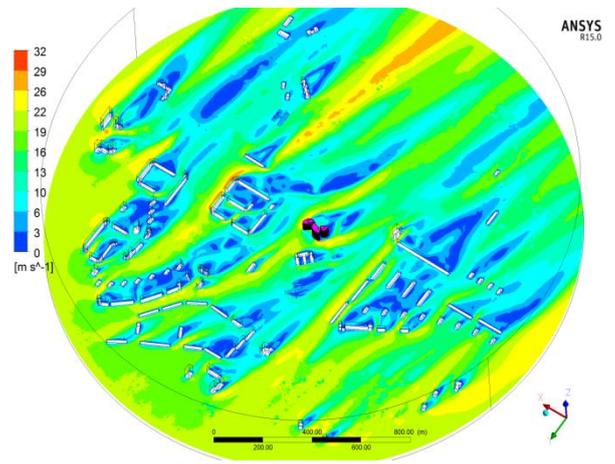
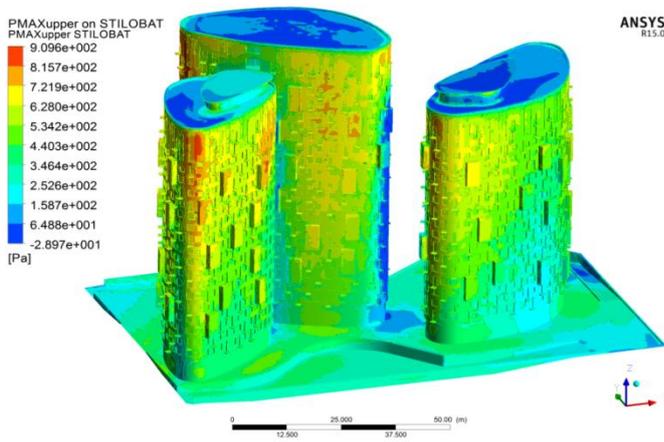
- расчетные поля коэффициентов усиления скоростей ветра;
- вычисленные уровни пешеходной комфортности (повторяемость средней скорости ветра) по 3-м нормативно регламентированным критериям.

✓ – **основные результаты расчетов для наиболее неблагоприятных и характерных направлений ветра** с точки зрения реализации максимальных значений средних нагрузок на несущие и фасадные конструкции и максимальной энергии турбулентных пульсаций на поверхностях:

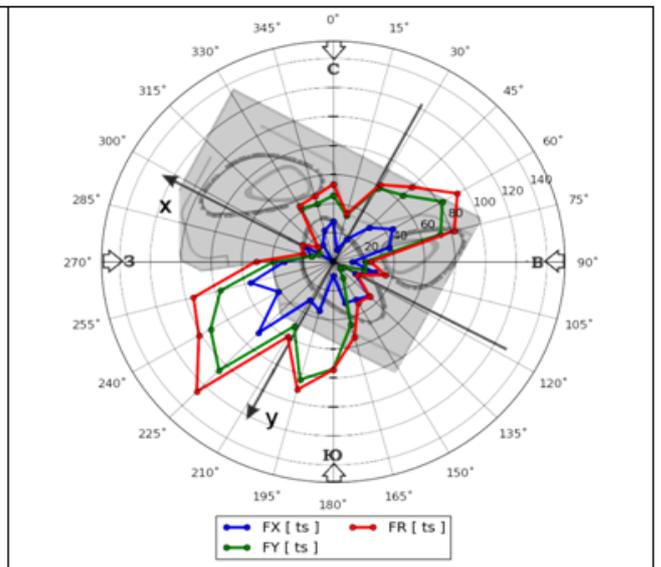
- полные картины распределения среднего, динамического, максимального и минимального давления и аэродинамического коэффициента давления.

Разработанная комплексная методика решения задач строительной аэродинамики с применением современных математических моделей и численных методов с целью определения средних и пульсационных составляющих ветровых нагрузок на *несущие конструкции*, ветровых нагрузок на *фасадные/ограждающие конструкции* и *пешеходной комфортности* зданий, сооружений и комплексов апробирована на представительном ряде **уникальных объектов** (см. табл. 1, рис. 1-13), успешно прошедших экспертизу в ФАУ «Главгосэкспертиза России» и в территориальных экспертизах с предоставлением выработанных рекомендаций по назначению аэродинамических нагрузок в результате проведенных расчетных исследований:

• **высотные здания, сооружения и комплексы** (в том числе ММДЦ «Москва-Сити», Останкинская телебашня, «Газойл-Сити», «Дирижабль», «Зодиак», «Ленинградская», «Нахимовский», НИУ МГСУ, «Обручева», «Поклонная», «Профсоюзная», «Пушкино», «Рублевские огни», «Сетунь», «Скай-форт», и (все в Москве), «Аквармарин» во Владивостоке, а также другие объекты, расположенные в Астане, Киеве, Санкт-Петербурге и др.);

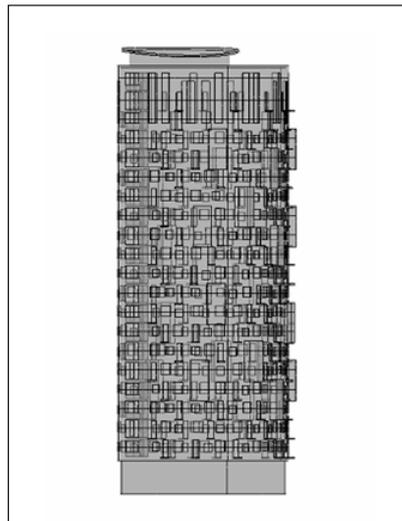


а) ЖК в "чистом поле"

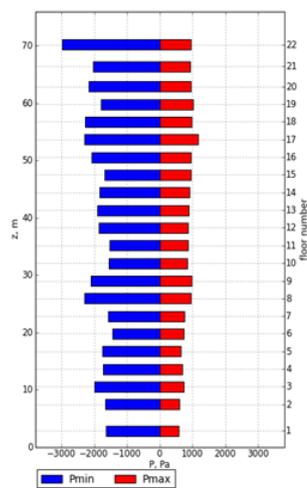


б) ЖК в окружающей застройке

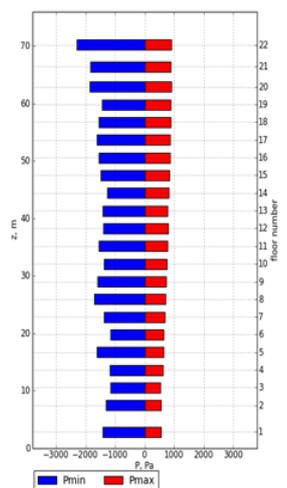
Средние суммарные ветровые нагрузки на корпус 2 ЖК в зависимости от направления ветра, тс.
FR – равнодействующая сила, FX, FY – проекции FR на оси координат.
(значения приведены по модулю)



а) Вид сбоку



б) ЖК в "чистом поле"



в) ЖК в окружающей застройке

Позатяжные обтекающие минимального (Pmin) и максимального (Pmax) значений давления (Па)
на фасадные конструкции корпуса 1 ЖК с учетом всех направлений ветра

Рис.1 Высотный ЖК «Нахимовский» (г. Москва)

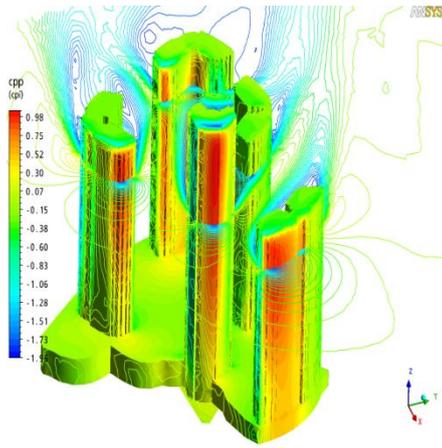


Рис.2 ЖК «Аквамарин» (г. Владивосток)

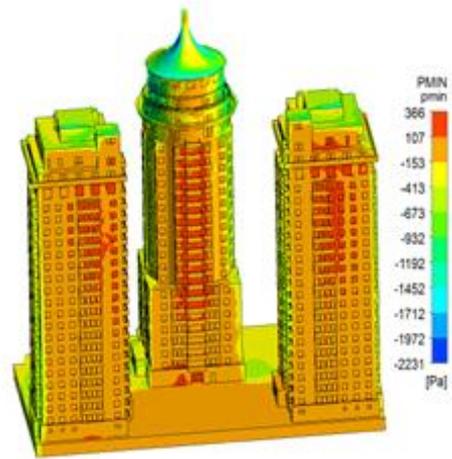


Рис.3 МЖК (г. Пушкино)

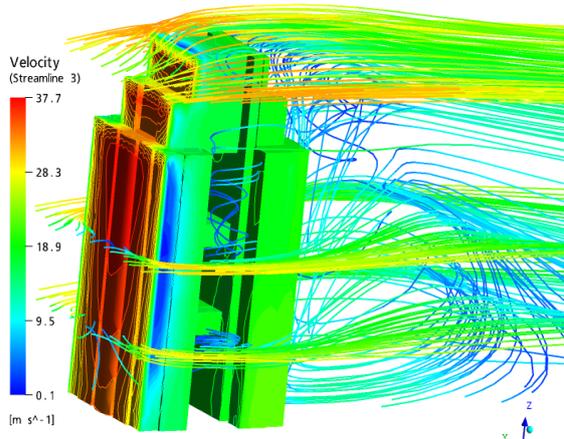


Рис.4 Биржа (г. Москва)

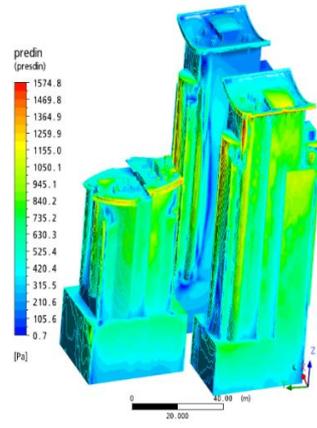


Рис.5 «Триумф-Палас» (г. Киев)

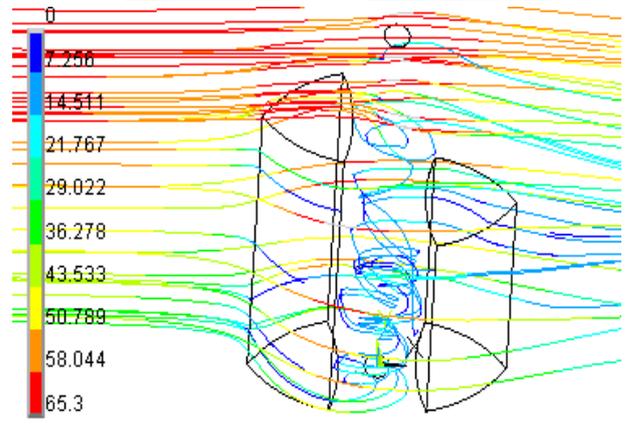
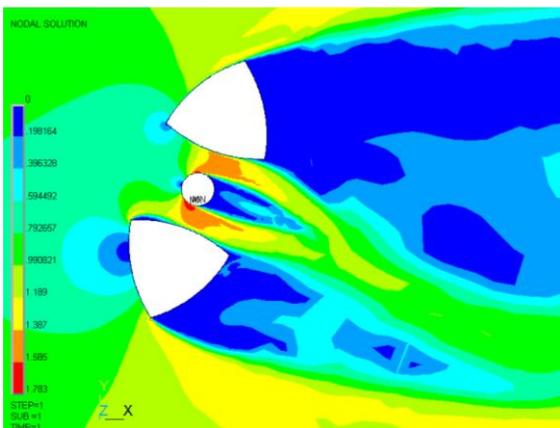
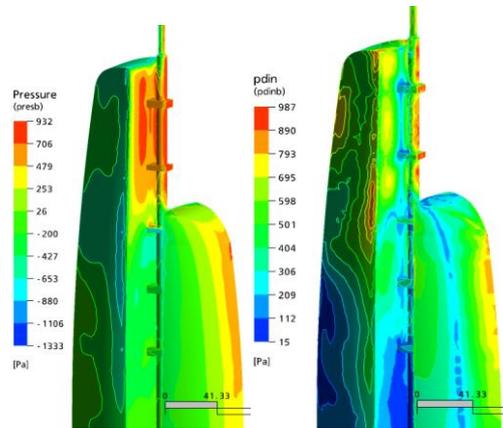
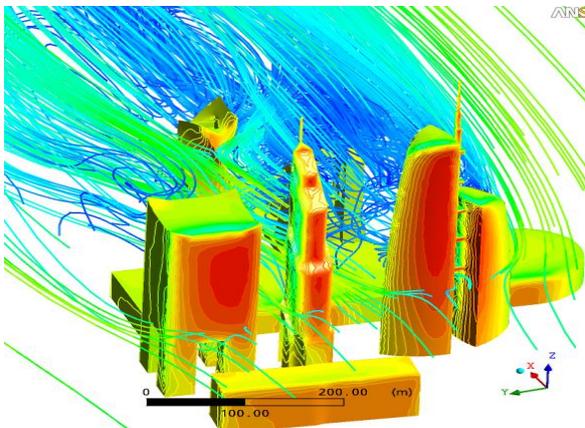


Рис.6 ММДЦ «Москва-Сити» (г. Москва)

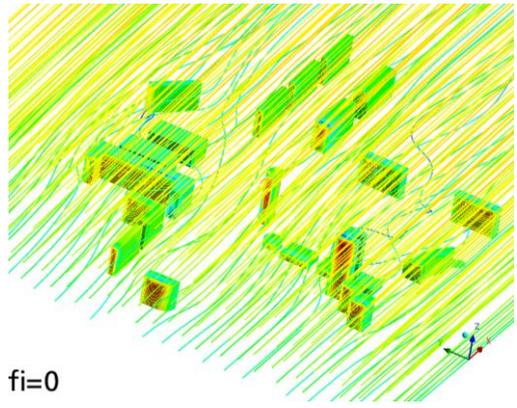
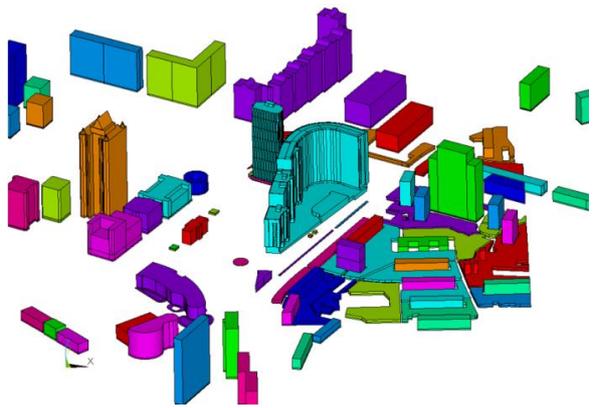


Рис.7 ЖК «Газойл-Сити» корпус 1,2 (г. Москва)

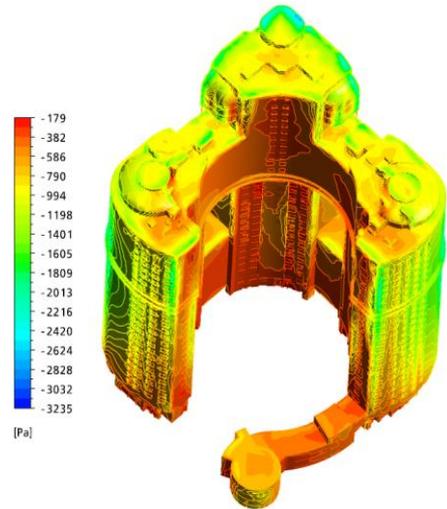
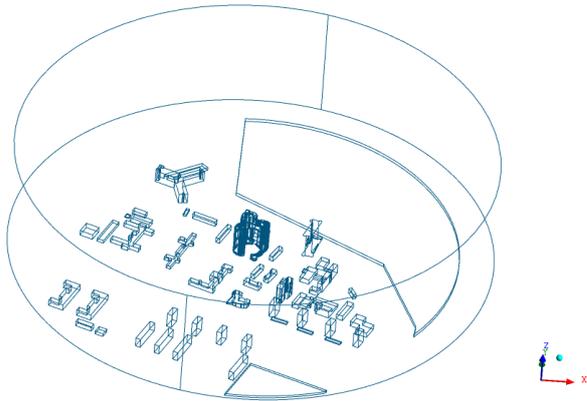


Рис.8 ЖК «Зодиак» (г. Москва)

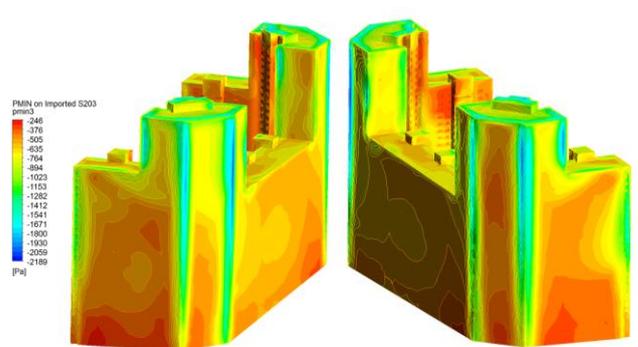
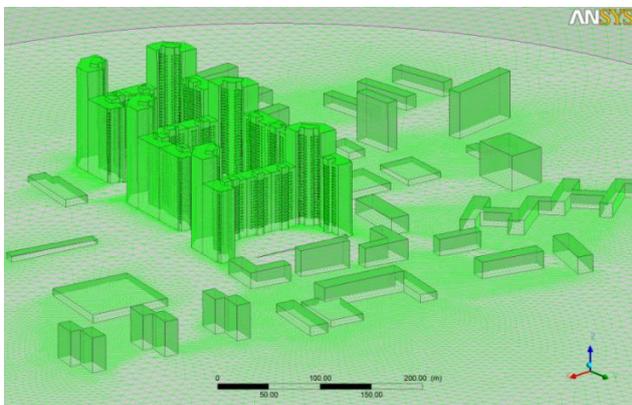


Рис.9 ЖК «Скай форт» (г. Москва)

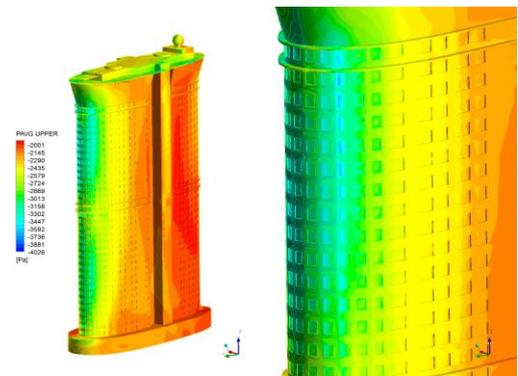
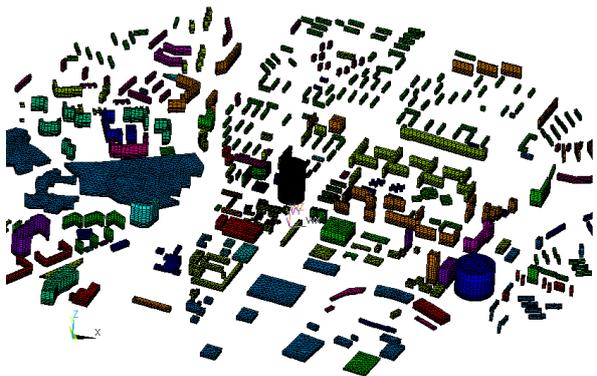


Рис.10 МФК «Дирижбль» (г. Москва)

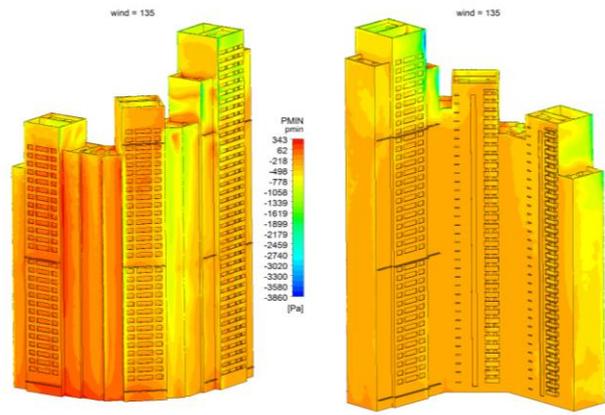
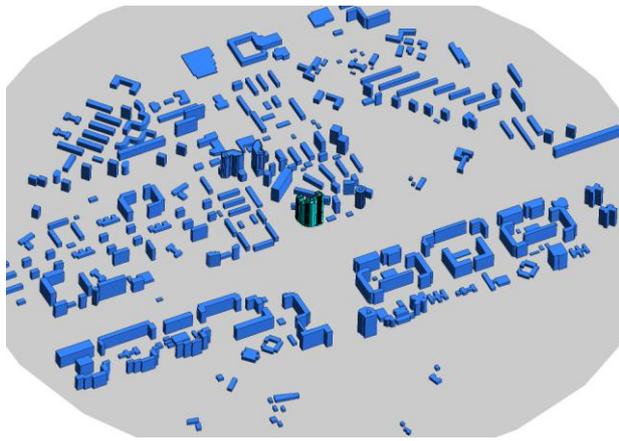


Рис.11 ЖК «Рублевские огни» (г. Москва)

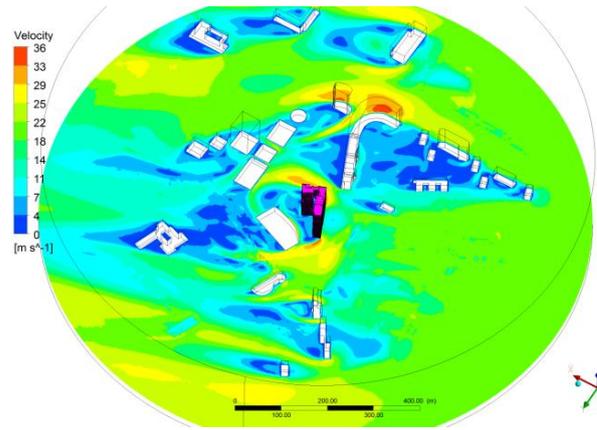
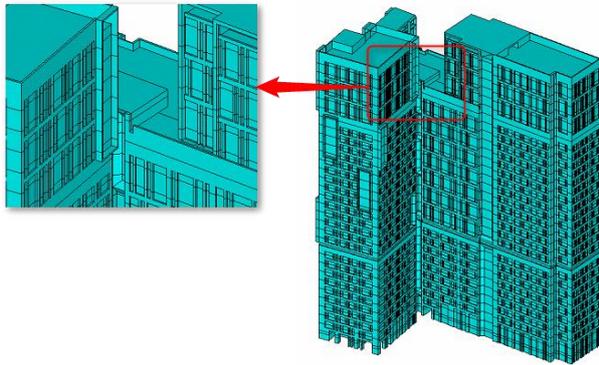


Рис.12 ЖК «Газойл-Сити» корпус 7 (г. Москва)

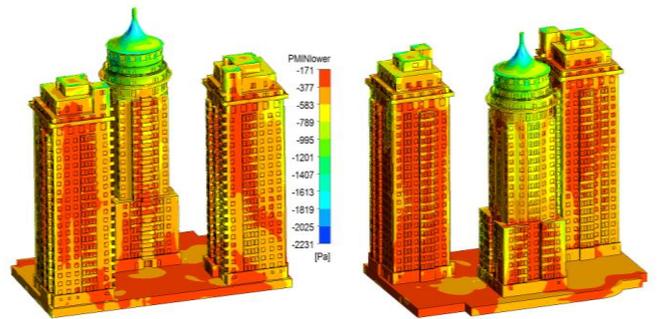
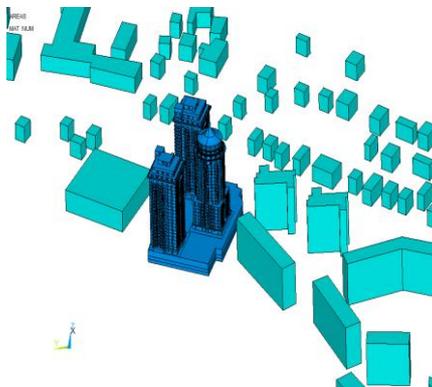


Рис.13 МЖК «Пушкино» (г. Пушкино)

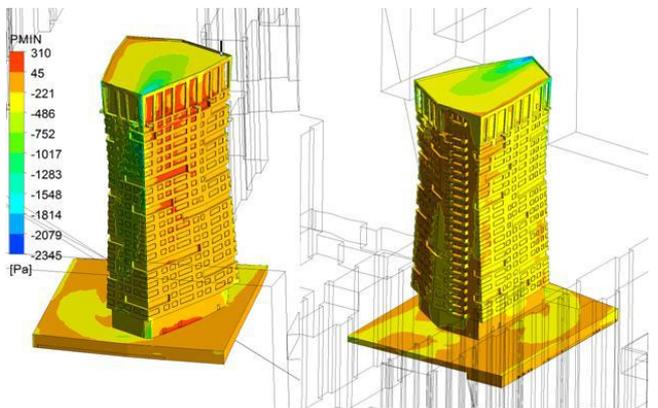
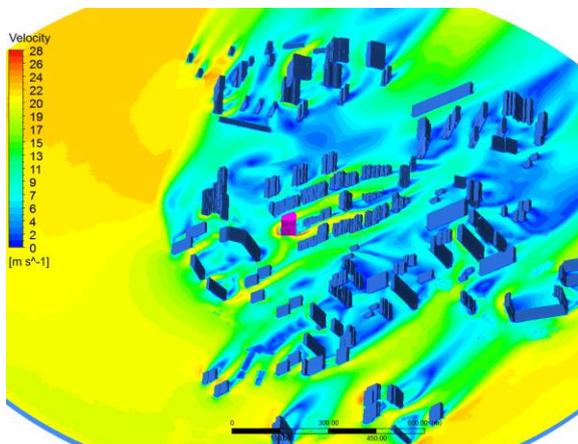


Рис.14 ЖК «Обручева» (г. Москва)

- **большепролетные здания и сооружения** (в том числе стадионы «Москвич» в Москве и «Зенит-Арена» в Санкт-Петербурге, железнодорожный вокзал в Адлере, трамплинный комплекс «Горки», построенный к зимним Олимпийским играм 2014 года в Сочи);

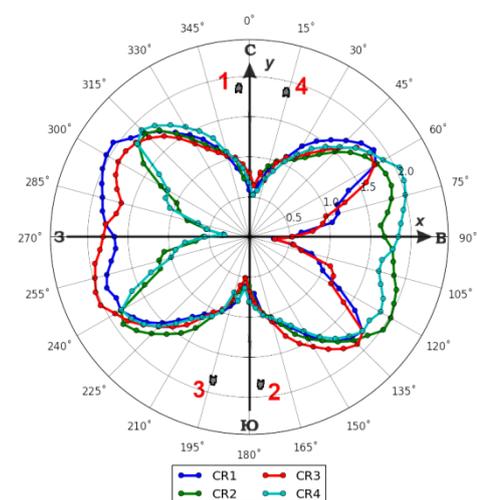
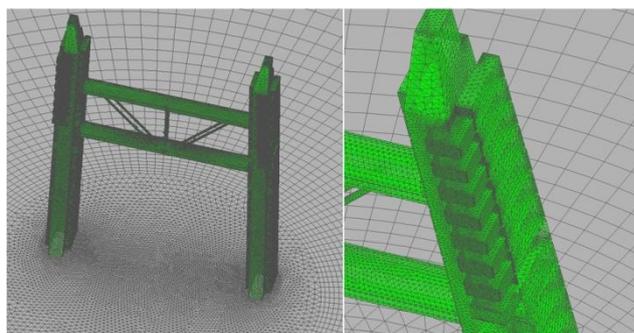
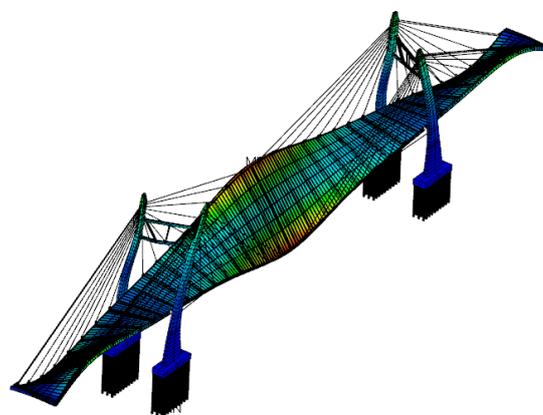
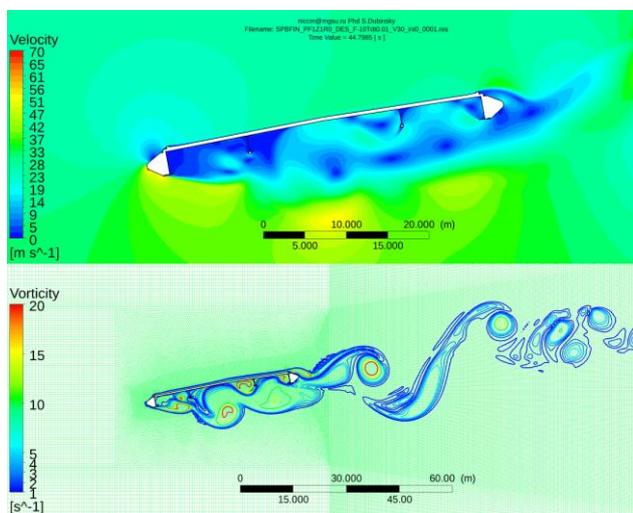


Рис.15 Мост через корабельный фарватер (ЗСД, г. Санкт-Петербург)

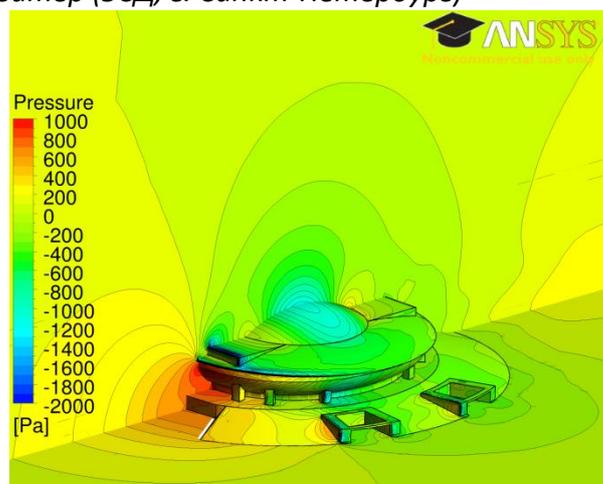
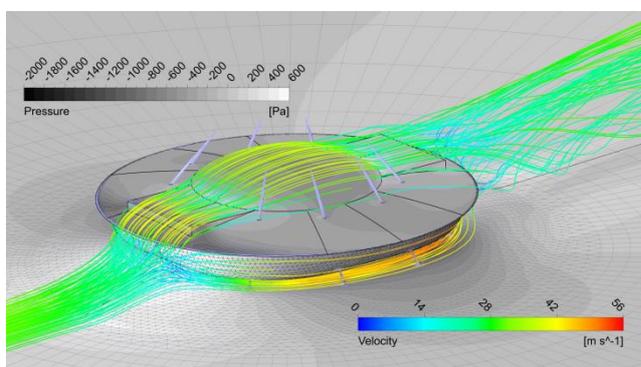


Рис.16 Футбольный стадион «Зенит» (г. Санкт-Петербург, Крестовский остров)

- комплекс основных сооружений АЭС с ВВЭР (в том числе реакторные отделения, машинные залы, испарительные градирни и др.) при ураганном ветре, смерче (торнадо) и цунами); для основных сооружений АЭС различного типа решены задачи уточненного численного моделирования снеговых нагрузок, взрывных ударных волн и падения самолета.

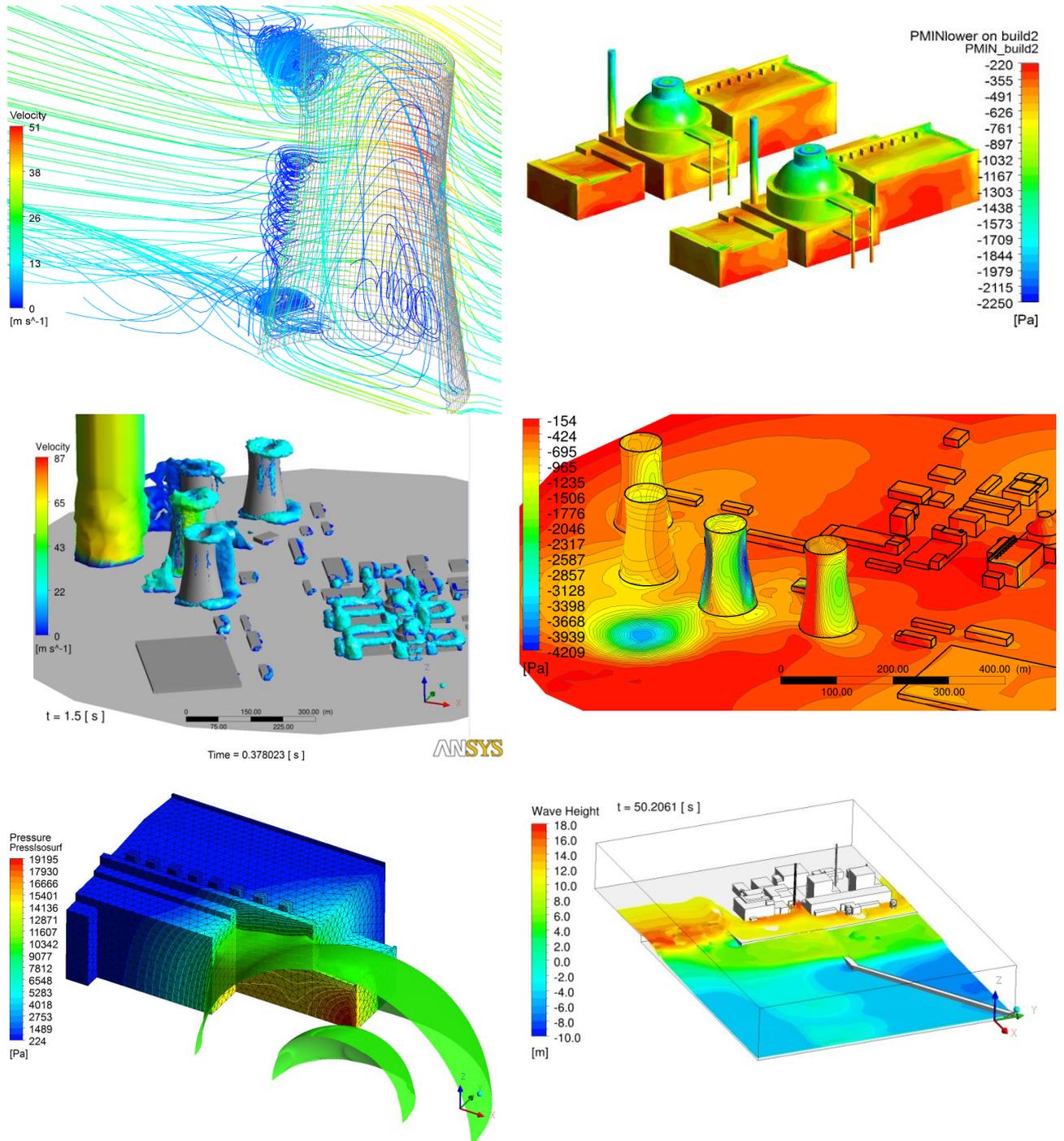


Рис.17 Комплекс основных сооружений АЭС с ВВЭР

Отдельный важный класс составляют задачи гидродинамики и аэрогидроупругости (например, расчет резервуаров с жидкостью, в т.ч. с нефтью, расположенных в сейсмически активных районах и др.).

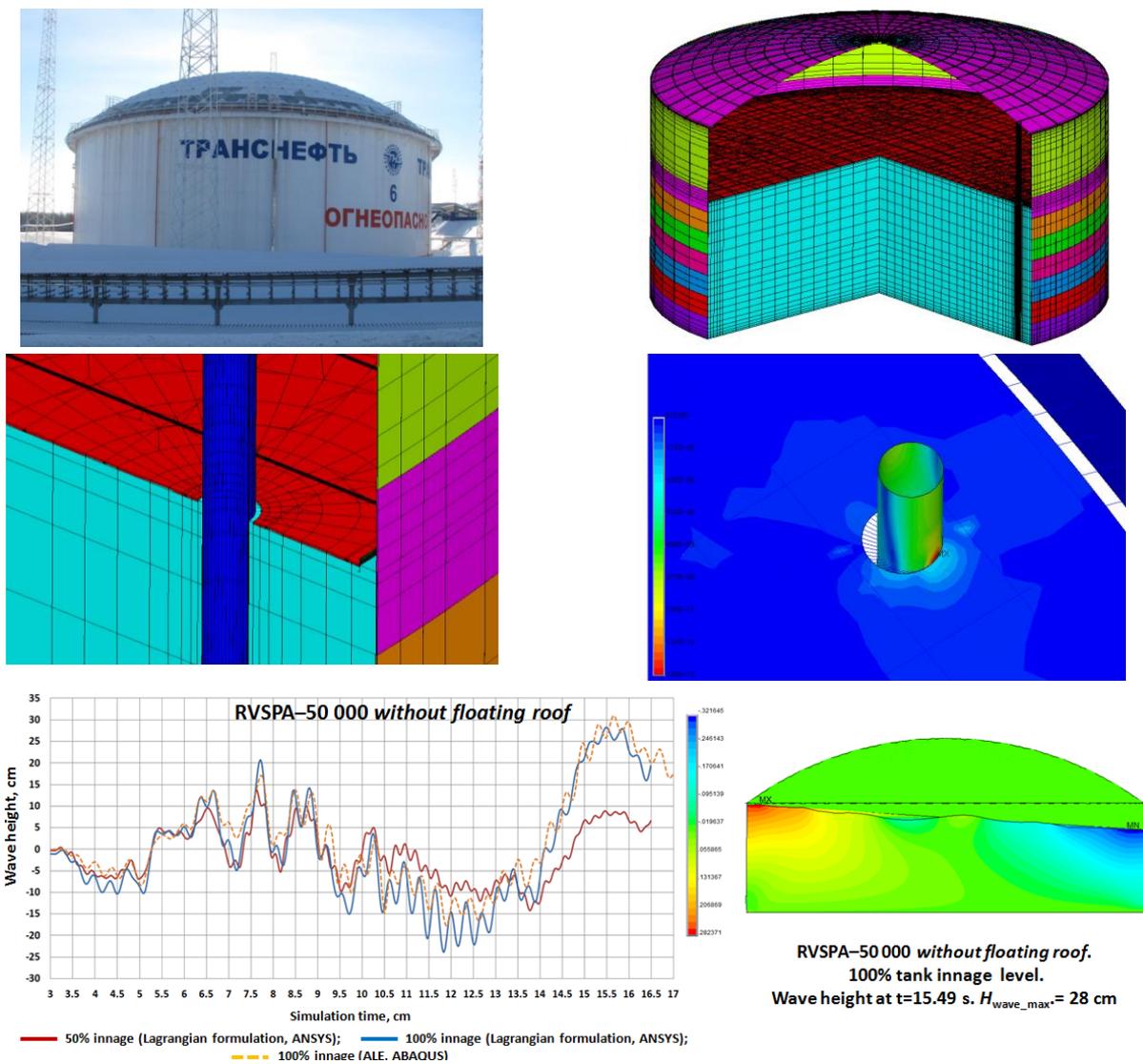


Рис.18 Резервуар РВСПА-50000 с нефтью и его конструкции

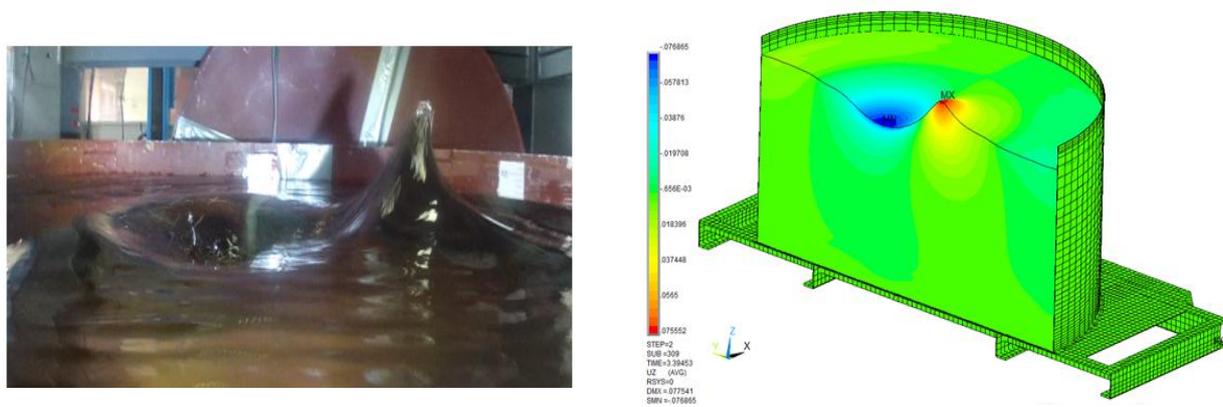


Рис.19 Резервуар РВСП-30000 с водой (экспериментальная модель)

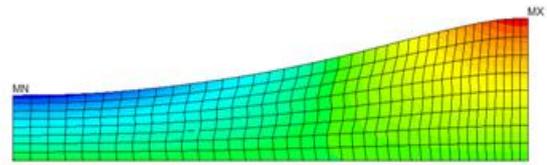


$h/a = 0.4$ (time = 11.72 Sec)

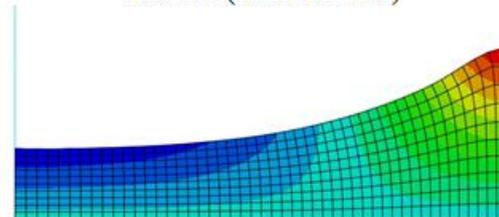
Эталон



подход Эйлера (ANSYS CFX):
 $h/a=0.4$ (time=12.23 c)



подход Лагранжа (ANSYS Mechanical):
 $h/a=0.4$ (time=11.82 c)



подход ALE (ABAQUS Explicit):
 $h/a=0.4$ (time=12.35 c)

Рис.20 Резервуар с жесткими стенками, заполненный водой при гармоническом динамическом воздействии

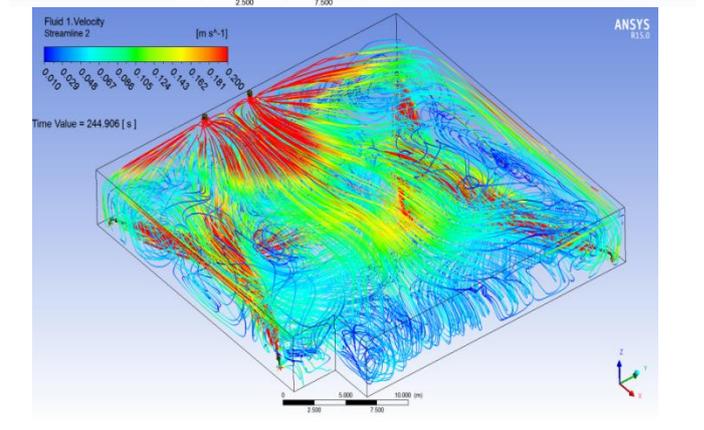
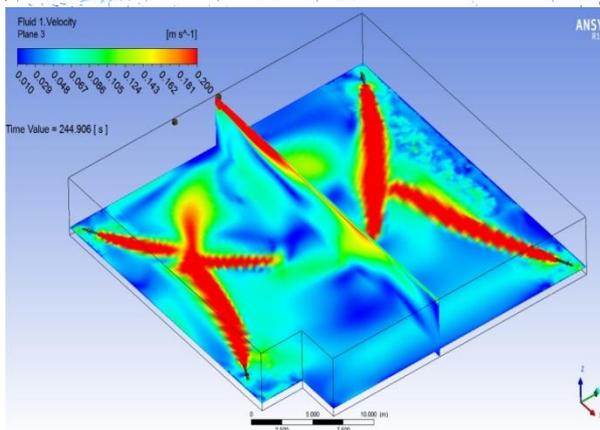
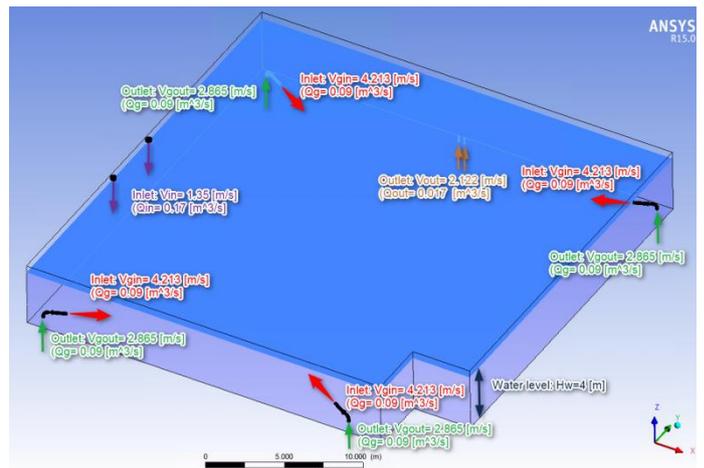
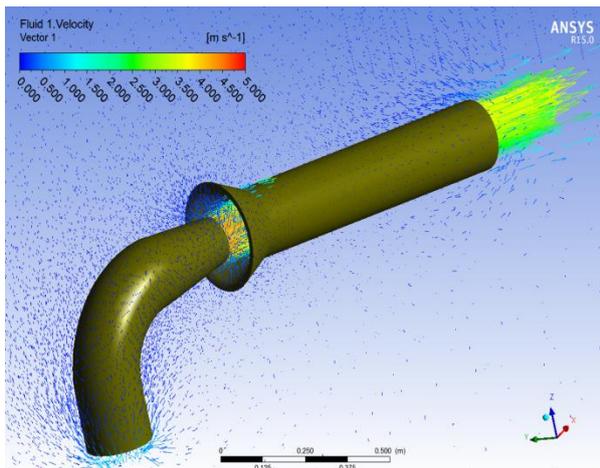


Рис.21 Резервуар-отстойник с установленным оборудованием (гидроэжектеры, отвод и подвод сточных вод)

Таблица 1. Опыт расчетных исследований и решения задач строительной аэрогидродинамики и аэрогидроупругости (2009 - 2017 гг.)

№	Сроки исполнения	Заказчики	Наименование НИР
1	2	3	4
1.	15.09.2016 – 10.02.2017	ООО «Стройпроект» (г. Москва)	Расчетное определение ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции остановочного пункта «Кутузово» (Северный и Южный вестибюли) Малого кольца Московской железной дороги на основе трехмерного численного моделирования ветровой аэродинамики.
2.	12.07.2016 – 03.10.2016	ЗАО «МСМ-Инвест»	Расчетное определение ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции и пешеходной комфортности жилого здания многофункционального комплекса (по адресу: г. Москва, ЮЗАО, ул. Наметкина пересечение с ул. Херсонская, корпус 7) на основе трехмерного численного моделирования ветровой аэродинамики. (рис.12)
3.	24.05.2016 – 29.04.2016	ООО «Биокомпакт»	Численное моделирование гидравлических потоков для аккумулирующего резервуара-отстойника с применением программного комплекса ANSYS. (рис.21)
4.	20.10.2015 — 30.10.2015	АО «Институт Гидропроект» (структура АО «РусГидро»)	Разработка рекомендаций по определению аэродинамических коэффициентов для сооружений повышенного уровня ответственности – здание КРУЭ 500кВ на Волжской ГЭС.
5.	30.06.2015 — 30.08.2015	ООО «ФЛЭТ и Ко»	Расчетное определение ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции многоэтажного комплекса с апарт-отелем (г. Москва, ЮЗАО, Нахимовский пр-т, вл. 31) на основе трехмерного численного моделирования ветровой аэродинамики. (рис.1)
6.	01.04.2015 — 15.11.2015	ООО «НИИ Транснефть»	Выполнение исследования, компьютерного моделирования и расчетов воздействия понтона(плавающей крыши) на стенку резервуаров вертикальных стальных при сейсмическом воздействии с учетом свойств хранимого в резервуаре продукта. (рис.18)
7.	30.03.2015 — 15.05.2015	ЗАО «РЕМСТРОЙТРЕСТ»	Расчетное определение ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции жилого дома со встроенными нежилыми помещениями (универсам) и подземной автостоянкой (г. Москва, ЮЗАО, квартал 38А, район Обручевский, корп. 9а) на основе трехмерного численного моделирования ветровой аэродинамики – с учетом требований ГОСТ Р 54257-2010 (редакция от 01.07.2014 г.) о проведении независимого контроля качества проектирования для уникальных зданий класса КС-3 с повышенным уровнем ответственности. (рис.14)
8.	29.05.2014 — 20.08.2014	ООО «ТНН», ОАО«Транснефть»	Разработка программы, методики и проведение экспериментального и аналитического подтверждения принятых решений по технологии регистрации событий оборудованием САОЗ после сейсмического воздействия (разработка, верификация и апробация численных методик расчета резервуаров (с водой и нефтью, с понтонами и без) при сейсмическом воздействии). (рис.18, 19, 20)

Таблица 1. Опыт расчетных исследований и решения задач строительной аэрогидродинамики и аэрогидроупругости (2009 - 2017 гг.)

№	Сроки исполнения	Заказчики	Наименование НИР
1	2	3	4
9.	19.02.2013 — 11.11.2013	ОАО «Стройпроект» (г. Санкт-Петербург)	Обоснование аэродинамической устойчивости моста через корабельный фарватер в Санкт-Петербурге. (рис.15)
10.	20.02.2013 — 20.04.2013	ООО «ПРОФИНВЕСТ»	Расчетное определение ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции и пешеходной комфортности многоэтажных зданий жилого комплекса на основе трехмерного численного моделирования ветровой аэродинамики в зоне комплекса по объекту: «Многоэтажный жилой комплекс с нежилыми помещениями и паркингом по адресу: Московская область, г. Пушкино, ст. Ярославское шоссе, вблизи дома №141.(рис.3, 13)
11.	01.10.2012 — 15.02.2013	ООО «ПВП Дизайн»	Расчетные исследования ветровых потоков и колебаний блока колонн К-2/1, К-2/2 (г. Омск, завод «ПОЛИОМ») на основе трехмерного численного моделирования ветровой аэродинамики и динамики конструкций.
12.	01.06.2012 — 09.07.2012	ООО «АИКОМ»	Оценка ветровой комфортности пешеходных зон и определение пиковых ветровых нагрузок на ограждающие конструкции проектируемого комплекса «Outlet village Pulkovo» / «Пулково аутлет» (г. Санкт-Петербург, Пушкинский район, поселок Шушары, участки 422 и 500) на основе численного моделирования трехмерных задач аэродинамики.
13.	20.10.2012 — 20.03.2013	ОАО «Атомэнергопроект»	Уточненные расчетные исследования ветровых нагрузок, напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости проектного башенных испарительных градирен Нововоронежской АЭС-2.
14.	08.11.2011 — 16.12.2011	АО «Концерн Росэнэргоатом»	Разработка, программно-алгоритмическая реализация, верификация и апробация на объектах отрасли (проект ВВЭР-ТОИ) методик уточненного численного моделирования основных, особых и аварийных нагрузок и воздействий (ветровые и снеговые нагрузки, удар самолета, воздействия ударной волны, сейсмические воздействия, цунами, торнадо) на основные сооружения АЭС. (рис.17)
15.	01.11.2011 — 20.12.2011	ООО «Евро-Окно Инжиниринг»	Определение ветровых нагрузок на светопрозрачные ограждающие конструкции Комплекса трамплинов К-125, К-95, расположенного по адресу: РФ, Краснодарский край, г. Сочи, Адлерский район, Краснополянский пос. округ, с. Эсто-Садок на основе численного моделирования задач аэродинамики.
16.	28.05.2011 — 30.07.2011	ООО «Алфрэймс»	Расчетное определение ветровых нагрузок на фасадные конструкции высотного жилого дома по адресу: г. Москва, Рублевское шоссе, вл. 107 (корп. 18, квартал 7) на основе трехмерного численного моделирования ветровой аэродинамики. (рис.11)
17.	03.05.2011 — 30.07.2011	ООО «НПО Мостовик» (г. Омск)	Определение расчетных и пиковых ветровых нагрузок на конструкции проектируемого здания ж/д вокзала в г. Адлере на основе численного моделирования трехмерных задач аэродинамики.

Таблица 1. Опыт расчетных исследований и решения задач строительной аэрогидродинамики и аэрогидроупругости (2009 - 2017 гг.)

№	Сроки исполнения	Заказчики	Наименование НИР
1	2	3	4
18.	28.03.2011 — 13.05.2011	ООО «Трест МСМ»	Расчетное определение ветровых нагрузок на фасадные конструкции строящегося многоэтажного здания (корп.2) в составе застройки многофункционального жилого комплекса (г. Москва, пересечение ул. Наметкина и ул.Херсонской) на основе трехмерного численного моделирования ветровой аэродинамики. (рис.7)
19.	28.03.2011 — 13.05.2011	ООО «Трест МСМ»	Расчетное определение ветровых нагрузок на фасадные конструкции проектируемого многоэтажного здания (корп.1) в составе застройки многофункционального жилого комплекса (г. Москва, пересечение ул. Наметкина и ул.Херсонской) на основе трехмерного численного моделирования ветровой аэродинамики. (рис.7)
20.	01.02.2011 — 30.05.2011	МНИИП «Моспроект-4»	Уточненные расчетные исследования ветровых и снеговых нагрузок, напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости несущих железобетонных и металлических конструкций проектируемого футбольного стадиона «Зенит» (г. Санкт-Петербург, Крестовский остров) при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий. (рис.16)
21.	15.10.2010 — 15.12.2010	ООО «ТаширКонстракшн»	Определение расчетных ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции многофункционального жилого комплекса «Дирижабль»(г.Москва, ул. Профсоюзная, вл. 64-66) на основе трехмерного численного моделирования ветровой аэродинамики. (рис.10)
22.	20.06.2010 — 15.08.2010	ООО «Жилкапстрой»	Расчетное определение ветровых нагрузок на фасадные конструкции многоэтажных зданий жилого комплекса «Скай форт» (г. Москва, 1-й Нагатинский проезд, вл. 11) на основе трехмерного численного моделирования ветровой аэродинамики в зоне комплекса. (рис. 9)
23.	20.03.2010 — 15.05.2010	ООО «Трест МСМ»	Расчетное определение ветровых нагрузок на несущие конструкции проектируемого многоэтажного здания (корп.2) в составе застройки многофункционального жилого комплекса (г. Москва, пересечение ул. Наметкина и ул.Херсонской) и оценка пешеходной комфортности на основе трехмерного численного моделирования ветровой аэродинамики. (рис.7)
24.	01.11.2009 — 15.01.2010	ООО «Лидер Девелопмент»	Трехмерное численное моделирование ветровой аэродинамики в зоне жилого комплекса «Зодиак» по адресу г. Москва, Волоколамское шоссе, вл. 80 (корпуса 1, 2, 3) с определением нагрузок на фасадные конструкции. (рис. 10)
25.	15.09.2009 — 30.10.2009	ООО «Трест МСМ»	Расчетное определение ветровых нагрузок на несущие конструкции проектируемого многоэтажного здания в составе застройки многофункционального жилого комплекса (г. Москва, пересечение ул. Наметкина и ул.Херсонской) на основе трехмерного численного моделирования ветровой аэродинамики. (рис.7)

Таблица 1. Опыт расчетных исследований и решения задач строительной аэрогидродинамики и аэрогидроупругости (2009 - 2017 гг.)

№	Сроки исполнения	Заказчики	Наименование НИР
1	2	3	4
26.	01.02.2009 — 15.03.2009	ООО «Строительный и Финансовый Инжиниринг»	Расчетные исследования ветровой аэродинамики, напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости строящихся минаретов с куполом и сулемой Московской Соборной мечети (Выползов пер.,7)
27.	05.01.2009 — 30.03.2009	МНИИП «Моспроект-4»	Расчетные исследования ветровой аэродинамики, напряженно-деформированного состояния и прочности сооружений экспериментальной школы высшего спортивного мастерства «Москвич» (г.Москва, Волгоградский проспект, вл. 46/15) — всего 4 уникальных сооружения.

Руководство



Белостоцкий Александр Михайлович

Генеральный директор НИЦ СтаДиО,
научный руководитель НОЦ КМ НИУМГСУ,
член-корреспондент РААСН,
профессор, доктор технических наук



Акимов Павел Алексеевич

Заместитель генерального директора
НИЦ СтаДиО по науке,
член-корреспондент РААСН,
профессор, доктор технических наук



Кайтуков Таймураз Батразович

Заместитель директора НОЦ КМ,
советник РААСН,
доцент, кандидат технических наук



Афанасьева Ирина Николаевна

Директор НОЦ КМ,
кандидат технических наук