

Математическое и физическое моделирование в задачах строительной аэродинамики. Текущее состояние и перспективы («кто виноват?» и «что делать?»)

Доклад представляет
Белостоцкий Александр Михайлович,
академик РААСН, д.т.н., профессор

Генеральный директор *АО НИЦ СтаДиО,*
научный руководитель

Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий,
сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова (НОЦ КМ) *НИУ МГСУ*

и

Учебно-научно-производственной лаборатории аэродинамических и аэроакустических
испытаний строительных конструкций (УНПЛ ААИСК) *НИУ МГСУ*



Белостоцкий Александр Михайлович,
 академик РААСН, д.т.н., профессор,
 ген. директор НИЦ СтаДиО,
 науч. рук. НОЦ КМ им. А.Б. Золотова и УНПЛ ААИСК
 НИУ МГСУ



Афанасьева Ирина Николаевна,
 к.т.н., ведущий инженер-расчетчик НИЦ СтаДиО,
 University of Arkansas (USA, Fayetteville, AR)



Поддаева Ольга Игоревна,
 к.т.н., заведующая УНПЛ ААИСК (НИУ МГСУ)



Горячевский Олег Сергеевич,
 зам. директора НОЦ КМ им. А.Б. Золотова,
 ведущий инженер-расчетчик НИЦ СтаДиО



Бритиков Никита Александрович,
 инженер НОЦ КМ им. А.Б. Золотова,
 инженер-расчетчик НИЦ СтаДиО



Негрозова Ирина Юрьевна,
 м.н.с. НОЦ КМ им. А.Б. Золотова,
 инженер-расчетчик НИЦ СтаДиО



Чурин Павел Сергеевич,
 к.т.н., зам. зав. УНПЛ ААИСК
 (НИУ МГСУ)

1. История вопроса
2. Научная, образовательная и нормотворческая деятельность
3. Научные задачи строительной аэродинамики
4. Преимущества и недостатки математического и физического моделирования
5. Моделирование ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции
6. Моделирование аэроупругой неустойчивости
7. Моделирование параметров ветровой комфортности пешеходных зон
8. Моделирование снеговых нагрузок
9. Новое в международном нормативном поле (где же российские нормы?)
10. Прогнозы, выводы и предложения в резолюцию семинара

Направления научно-образовательно-практической деятельности НИЦ СтаДиО и НОЦ КМ (НИУ МГСУ) взаимосвязаны и дают синергетический эффект:

- разработка и развитие **математических моделей, численных и расчетно-экспериментальных методов** и реализующего программно-алгоритмического обеспечения для адекватного определения нагрузок и воздействий, напряженно-деформированного (и иного) состояния, прочности, устойчивости, надежности и безопасности ответственных объектов на значимых этапах их жизненного цикла (энергетика, гражданское и промышленное строительство, машиностроение, биотехнология и другие высокотехнологичные отрасли);
- развитие, верификация/аттестация и техническое сопровождение собственных конечноэлементных и суперэлементных **программных комплексов (СТАДИО, АСТРА-НОВА)**, освоение и верификация мировых брендов численного моделирования (**ANSYS, ABAQUS, DIANA** и др.) и отечественных специализированных программ расчета строительных конструкций (**SCAD, Лира** и др.);
- выполнение **расчетных и расчетно-экспериментальных исследований**, экспертиз и мониторинга наиболее сложных, ответственных и уникальных систем, конструкций, зданий, сооружений и комплексов (АЭС, ТЭС и ГЭС, «недоскребы», знаковые объекты Олимпиады 2014 и стадионы чемпионата мира по футболу 2018, многие другие) с выработкой заключений и рекомендаций по оптимизации;
- **научно-образовательная деятельность**, включающая организацию и насыщение смысловым содержанием научно-образовательных центров и лабораторий в ведущих российских ВУЗах, работу в Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), публикации статей и издание журналов и монографий, организацию и участие в международных и российских симпозиумах и конференциях, подготовку инженерных (бакалавров, магистров) и научных кадров (кандидатов и докторов наук).

Опыт расчетных исследований – более 400 объектов/задач *Web-site: www.stadyo.ru*

Опыт расчетных исследований и разработок (подробно с 2000 года)

Расчетно-теоретические исследования и разработки

Обследование, мониторинг и экспертиза

Научно-техническое сопровождение (НТС)

Разработка норм, методических пособий и рекомендаций



Скачать актуальный релиз 2020!11 версии АСТРА-НОВА 2021

Новости

27.08.2022
29-30 сентября 2022 года на базе НИУ МГСУ при поддержке РААСН, АО НИИ Стадио, РУТ (МИИТ), МАРО, ТАСУ состоялся уже X Международный научная конференция «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (Золотосские чтения). Подарочество - книги...

18.07.2022
15 июля, Леонард Амб в системе ДПО МГСУ «СайТУ» зарекал смысла на животрепещущую тему "Цифровые технологии в строительстве, из прошлого в будущее". Ну что, "граждане и слуги", завершил очередной учебный семестр во множестве ВУзов, в кои-то веки сподобился... (как-то так, если высокомерно). Небольшая полуграммовая передача - и ждущая элений молотья (балканари, мажорства, спонсирует, астероид) и народ посиделное (ДПО...) будут вновь осчастливлены названым лекцией, семинарами, заседаниями и т.п. глотками жилых знаний. Ждите и трепещите - мы идем к вам!

27.06.2022
Всем всем всем, кто работает с нами и/или следит за нами! Спиральность: 17 июня с.г. переименован "Инженерный парк" и правительство ЗАО НИИ Стадио отбросило свою лирику бумагу, официально переименовано в АО НИИ Стадио. Соответственно, новое полное название - Акционерное общество "Научно-исследовательский центр Стадио". Всем приятствам будет отведено параллельно письменное уведомление об этом самом.

Открыть архив новостей

Главная > Расчетные исследования, НТС > Опыт расчетных исследований и разработок (подробно с 2000 года)

| Сроки исполнения | Заказчики | Наименование НИР |
|-------------------------|---|---|
| | <i>На этом месте могут появиться вполне приемлемые для Вас сроки</i> | <i>На этом месте может появиться работа, которую Вы хотите поручить нам. Ну так не тормозите! Не пожелаете...</i> |
| 17.06.2022 — 05.08.2022 | ООО «ЮНИПРО» https://upgroup.ru | Определение расчетных ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции и параметров пешеходной комфортности multifunctional жилого комплекса, расположенного по адресу: г. Москва, Огородный проезд, вл.20 <i>Две стройные высотки (200 м и 100 м) на одном стилобате, требующие нашего некрашеного, десятилетиями наработанного мастерства. Пожамм его!</i> |
| 15.06.2022 — 05.11.2022 | | Научно-техническое сопровождение проектирования Мега-сайенс Объекта: «Сибирский кольцевой источник фотонов» (СКИФ) в г. Новосибирск. <i>НОЦ КИ им. А.Б. Золотова НИУ МГСУ. Мега-сайенс проекты пошли... (включая тяжеловесный коллабор NISA в Сибири)</i> |
| 10.06.2022 — 15.09.2023 | ООО «СБ Девелопмент» http://www.sbdevelopment.ru/ | Комплексное научно-техническое сопровождение на стадиях проектирования и строительства Объекта: «Технопарк ПАО Сбербанк» в инновационном центре «Сколково» <i>НОЦ КИ им. А.Б. Золотова НИУ МГСУ. Мечта расчетчика, «леборная пелена» признанного лидера современной архитектуры Захи Хадид</i> |
| 15.06.2022 — 05.09.2022 | ООО «Метрополис» https://www.metropolis-group.ru | Научно-техническое сопровождение проектирования, включая расчетные исследования сейсмостойкости и сопоставительный анализ результатов альтернативных расчетов, для Объекта – Гостиница «Приморская» (г. Сочи, ...). <i>«Ну, кто еще хочет погребовать комиссарского тона?», Очерковая битва на поле сейсмостойкости с превосходящими силами двоичников...</i> |
| 01.06.2022 — 25.08.2022 | ООО «Метрополис» https://www.metropolis-group.ru | Научно-техническое сопровождение проектирования, включая комплекс аэродинамические исследования, расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, динамика, прочности и устойчивости несущих конструкций при норматив регламентированных сочетанных основных и особых (аварийных) нагрузок и воздействий и сопоставительный анализ результатов альтернативных расчетов, для Объекта – «Серф парк Волна», расположенного по адресу: г. Москва, Мневниковская пойма, ... <i>Супер-пулуп уникальное сооружение, да еще и с технологическими прибамбасами... Справимся? А как же!</i> |
| 14.04.2022 — 24.06.2022 | ООО «Смарт Констракшн» https://www.smartc-sbrf.ru | Расчетно-экспериментальные исследования ветровых воздействий на несущие и фасадные конструкции Объекта: «Всесезонный курорт „Манжерок“, ресторанный комплекс» <i>НОЦ КИ им. А.Б. Золотова НИУ МГСУ Естественное развитие и дополнение ранее выполненной НИР (см. ниже), но на 800 м выше, на вершине горы</i> |
| 14.02.2022 — 24.03.2022 | ООО «Смарт Констракшн» https://www.smartc-sbrf.ru | Расчетно-экспериментальные исследования ветровых воздействий на несущие и фасадные конструкции Объекта: «Всесезонный курорт „Манжерок“, гостиничный комплекс» <i>НОЦ КИ им. А.Б. Золотова НИУ МГСУ Сверкая исследования — математическое (матричное) и физическое (экспериментальное в АДТ) моделирование аэродинамики, сложносочиненного* системного комплекса в одном флаконе, не на словах, а в деле...</i> |

Научно-исследовательский центр СтаДиО
Сайт: www.stadyo.ru
125080, Москва, ул. Яузская, 1, с. (499)764-8010, e-mail: info@stadyo.ru, info@stadyo.ru

Научно-технический отчет по договору № ЧЭ.113.04-2018 от 04.04.2018
«Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости несущих конструкций при основных и особых сочетанных нагрузках и воздействиях, сравнительный анализ результатов альтернативных расчетов объекта: «Строительство общественно-делового центра ... в Калининском районе г. Челябинска», Этап №3 «Общественно-деловой центр».

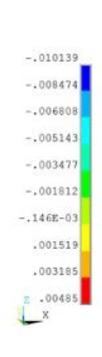
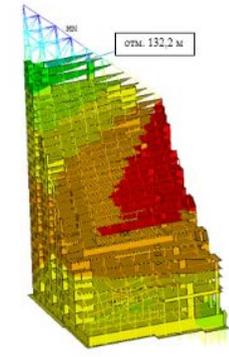
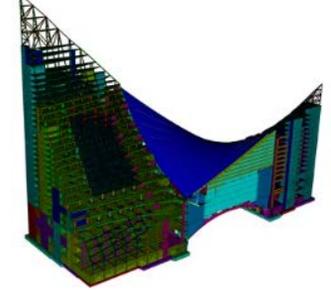


Рис. 4.1.1 Горизонтальные амплитуды перемещения Uy, мм от действия пул составляющей ветра с учетом понижающего коэффициента 0,7 (от нормативной

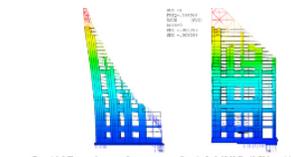


Рис. 4.1.2 Пул ветровых нагрузок на фасадной, (с=0,94) Гц (0,7) (мкс) С учетом понижающего коэффициента 0,7 (от нормативной) 0,9 SW, 0,8 DL, 0,5 L. Основные комбинации нагрузок

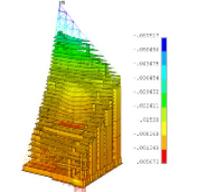


Рис. 4.2.2 Блок А (Блок горизонтальных перемещений Ux, мм. Основные сочетания нагрузок (сбалансированное воздействие по Y), Umax=0,12 мм

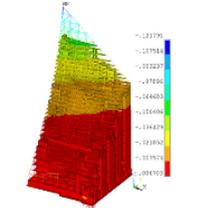
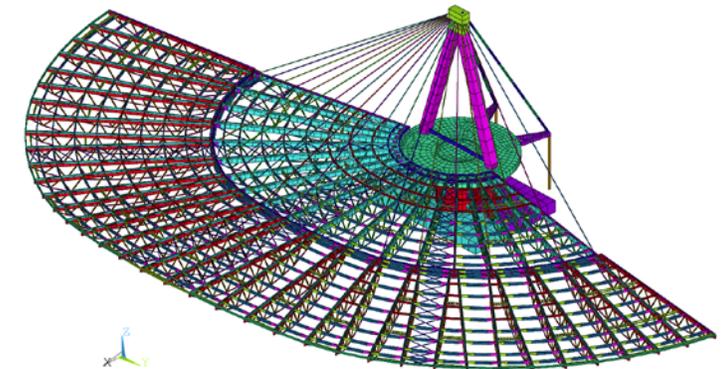
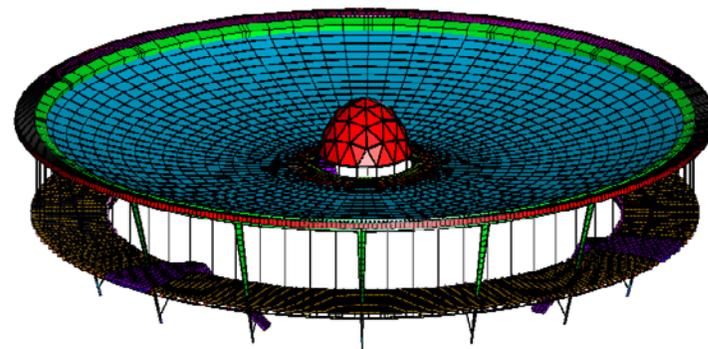
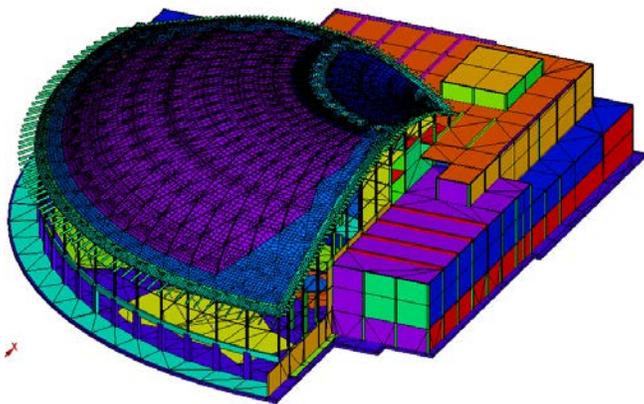


Рис. 4.2.3 Блок А (Блок горизонтальных перемещений Ux, мм. Основные сочетания нагрузок (сбалансированное воздействие по X), Umax=0,118 мм

- Заключение**
- В результате выполненных расчетных исследований напряженно-деформированного состояния, прочности, динамики и устойчивости несущих конструкций и оснований общественно-делового центра ... в Калининском районе г. Челябинска с учетом статических и ветровых нагрузок и исключительности локальных нарушений, а также научно-технического сопровождения проекта в части расчетных исследований объекта, можно сформулировать следующие выводы и рекомендации:
1. Разработанные и верифицированные расчетные статические и динамические пространственные обобщенно-сгруппированные конечноэлементные модели системы «основание-несущие конструкции» общественно-делового центра позволяют детально оценить основные параметры НИР при действии нормативных ветровых нагрузок и исключительности локальных нарушений.
 2. Анализ результатов расчетных исследований, выполненных по верифицированной программной модели ANSYS/Moskva3D, показал соответствие картины распределения перемещений и усилий (сил и моментов) в фундаменте и каркасе здания при вертикальных статических и ветровых нагрузках, значимых собственных частот и формы колебаний здания.
 3. Критические значения кинематических параметров несущих конструкций общественно-делового центра (прогибы, горизонтальные перемещения верха здания, угловые вращения, смещения) находятся в допустимых пределах расчетных нормативных значений.
 4. Выполненные расчетные исследования подтверждают минимальное локальное разрушение несущих конструкций установленного, что при соблюдении принятых параметров проекта (конструктив, свойства материалов и оснований), включая и сочетания нагрузок и исключительности конструкции здания установленные и нормативные требования.
 5. Планируемые результаты математического моделирования для здания общественно-делового центра статические и ветровые перемещения, включая формы колебаний, могут (и так далее) должны быть использованы при разработке программы и выполнении проведения мониторинга состояния оснований и несущих конструкций здания в процессе его строительства и эксплуатации.

Опыт (судебных) строительно-технических экспертиз

В рамках строительно-технических экспертиз выполнен анализ причин локальных разрушений и прогрессирующего обрушения конструкций покрытия ряда большепролетных зданий



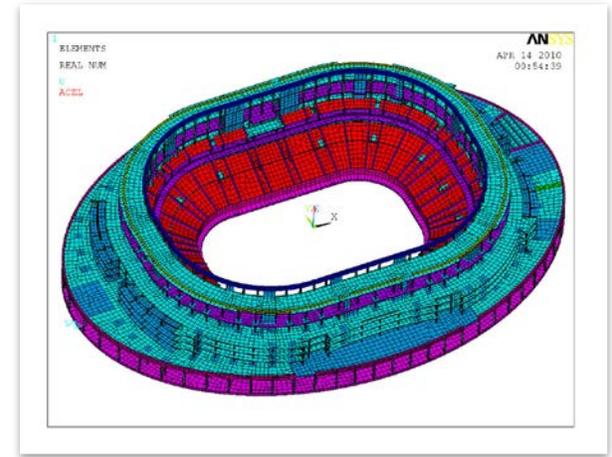
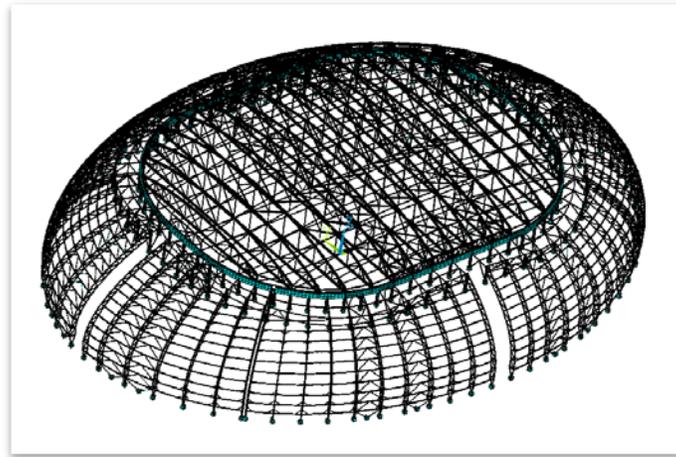
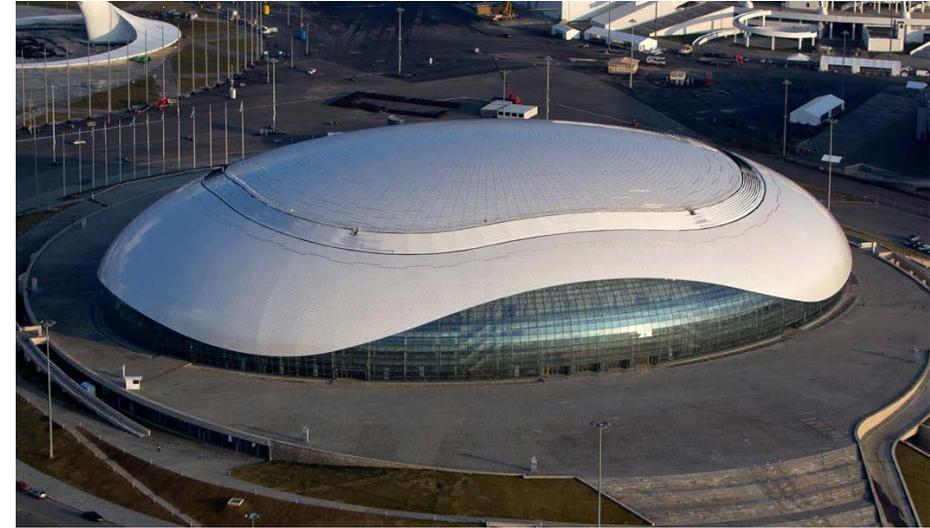
СОК «Трансвааль парк» (2004 г.)

Басманный рынок (2006 г.)

Крытый конькобежный центр «Крылатское»

Олимпийские объекты Сочи-2014. Прибрежный кластер

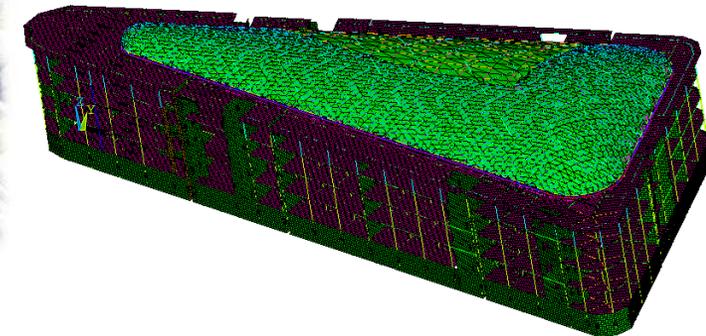
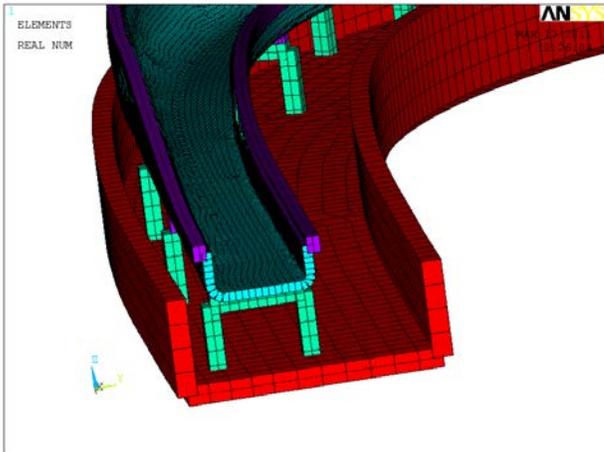
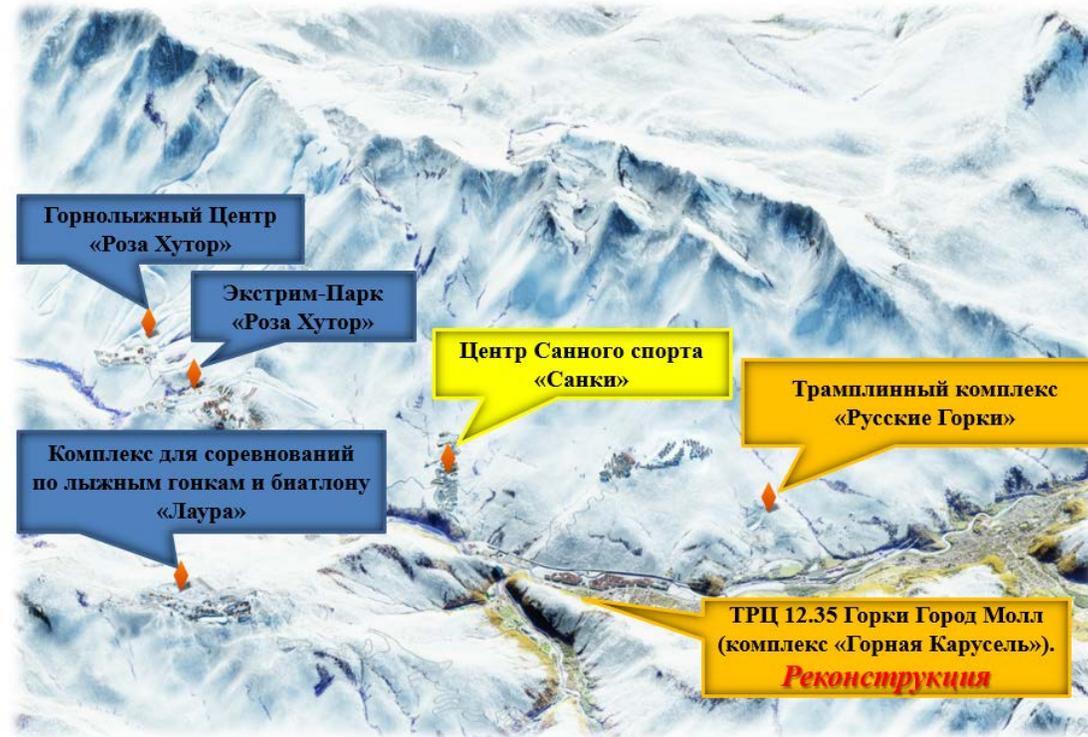
Расчетные исследования НДС, прочности и устойчивости несущих конструкций Большой Ледовой Арены (г. Сочи) с учетом статических, ветровых и сейсмических нагрузок



Олимпийские объекты Сочи-2014. Горный кластер

Исследования НДС и прочности несущих конструкций **санно-бобслейной трассы** (г. Сочи) с учетом статических, температурных и сейсмических нагрузок и инерционных воздействий движущегося спортивного снаряда

Расчетные исследования НДС, прочности и устойчивости несущих конструкций ТРЦ 12.35 (комплекс «Горная Карусель» Адлерский р-н, с. Эсто-Садок) при нормативно регламентированных основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий



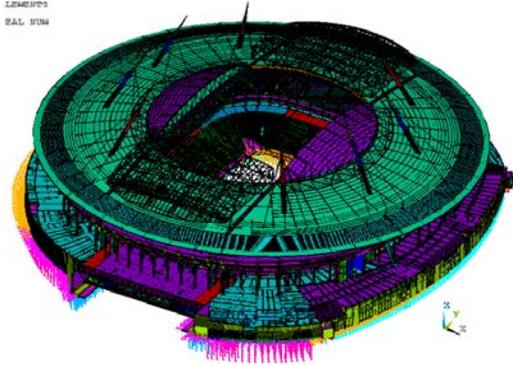
Обоснование механической безопасности 6-ти футбольных стадионов к ЧМ 2018

Авторский коллектив *НИЦ СтаДиО* награжден *Золотой медалью* РААСН по строительным наукам за цикл НИР по комплексному расчетному обоснованию механической безопасности [и комфортности]

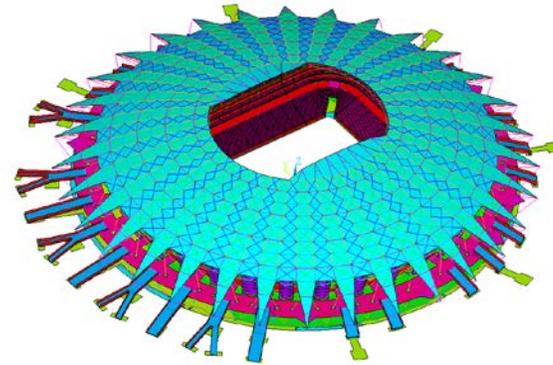


Обоснование механической безопасности 6-ти футбольных стадионов к ЧМ 2018

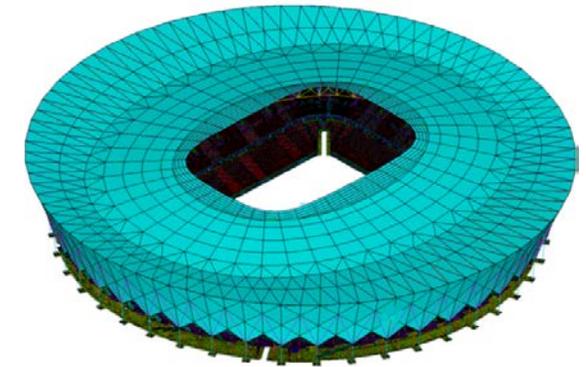
Цикл комплексного расчетного обоснования НДС, прочности и устойчивости системы "свайное основание – ж/б конструкции стилобата и трибун – металлоконструкции крыши" и наиболее ответственных узлов-элементов проектируемых стадионов к Чемпионату мира по футболу 2018 г. (гг. Санкт-Петербург, Самара, Волгоград, Нижний Новгород, Ростов-на-Дону и Екатеринбург) при основных и особых сочетаниях нагрузок (включая нелинейные динамические расчеты на прогрессирующее обрушение)



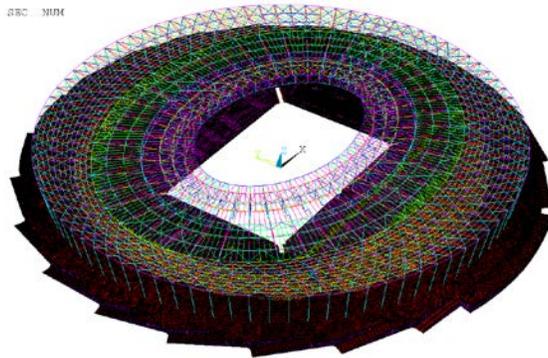
«Зенит» Санкт-Петербург
(540 761 узел, 583 783 элемента)



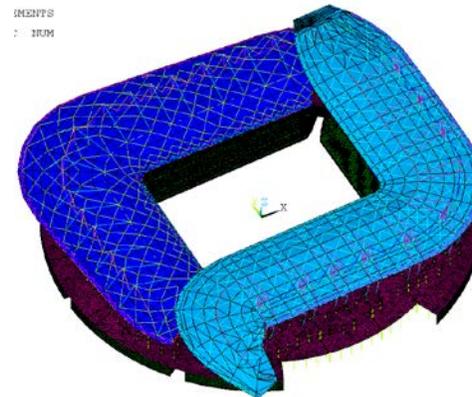
«Самара-Арена»
(2 013 832 узла, 2 424 114 элемента)



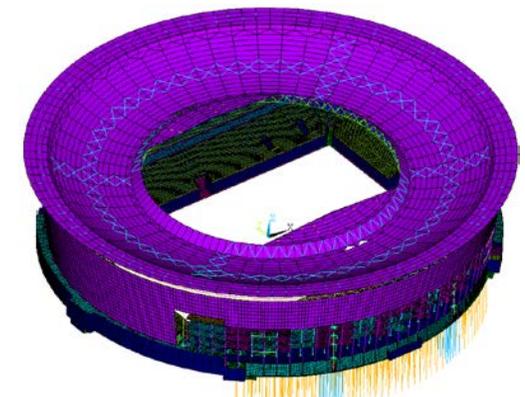
«Волгоград-Арена»
(540 761 узел, 583 783 элемента)



«Стадион Нижний Новгород»
(680 127 узлов, 811 522 элемента)



«Ростов-Арена» Ростов-на-Дону
(480 109 узлов, 704 013 элементов)



«Екатеринбург-Арена»
(312 636 узлов, 350 382 элемента)



Преподаваемые курсы для бакалавров, магистров, аспирантов:

- Математическое и компьютерное моделирование
- Метод конечных элементов
- Математические модели для расчета сооружений
- Безопасность зданий и сооружений
- Цифровые технологии в строительстве
- Пакеты прикладных программ
- Численное моделирование в наукоемких задачах строительства
- Особенности проектирования уникальных зданий и сооружений
- Теоретические основы методов компьютерного моделирования
- Теоретическая аэродинамика
- Вычислительная аэродинамика
- Прикладные задачи строительной аэродинамики

Научно-образовательный центр компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова (НОЦ КМ им. А.Б. Золотова)



Вычислительная техника:

- Учебные станции – 21 шт. (Intel i7-9700, 32 Gb ОЗУ)
- Рабочие станции – 5 шт. (Intel i9-10900K, 126 Gb ОЗУ)
- Мощная станция (AMD Ryzen Threadripper 3970X, 256 Gb ОЗУ)

Программное обеспечение:

- ANSYS CFD 2021R1
- ANSYS Mechanical 2021R1
- SIMULIA Abaqus
- SCAD Office 21, ЛИРА-САПР 2021, ПК ЛИРА 10.12

Большая исследовательская градиентная аэродинамическая труба НИУ МГСУ

БИГАТ НИУ МГСУ является аттестованной аэродинамической трубой архитектурно-строительного типа, предназначенной для комплексных аэродинамических испытаний строительных конструкций (высотных и уникальных зданий и сооружений, мостовых конструкций, объектов повышенного уровня ответственности и т.д.), в том числе в градиентных и турбулентных потоках

БИГАТ НИУ МГСУ имеет замкнутый циркуляционный контур и модульный вентиляторный блок из девяти установок при длине рабочей зоны 18,9 метров.

Основные технические характеристики:

- длина рабочей зоны аэродинамической трубы МГСУ (18,9 м) позволяет корректировать профиль эпюры скорости потока, имитирующую приземный слой атмосферы в разных условиях;
- диаметр рабочего поворотного стола – 3м;
- диапазон скоростей в рабочей зоне: от 0 до 32 м/с



Защищенные диссертации

Дубинский С.И., *Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы*, 2010 г.

Дорошенко А.В., *Методика численного моделирования скоростей ветра и пешеходной комфортности в зонах жилой застройки*, 2013 г.

Афанасьева И.Н., *Адаптивная методика численного моделирования трехмерных динамических задач строительной аэрогидроупругости*, 2014 г.

Подготовленные к защите диссертации

Негрозова И.Ю., *Методика численного моделирования аэроупругой неустойчивости строительных конструкций*, защита планируется 2022 г.

Горячевский О.С., *Расчет вантовых светопрозрачных фасадных конструкций с учетом ветровых нагрузок для зданий сложной формы в застройке*, защита планируется в 2023 г.

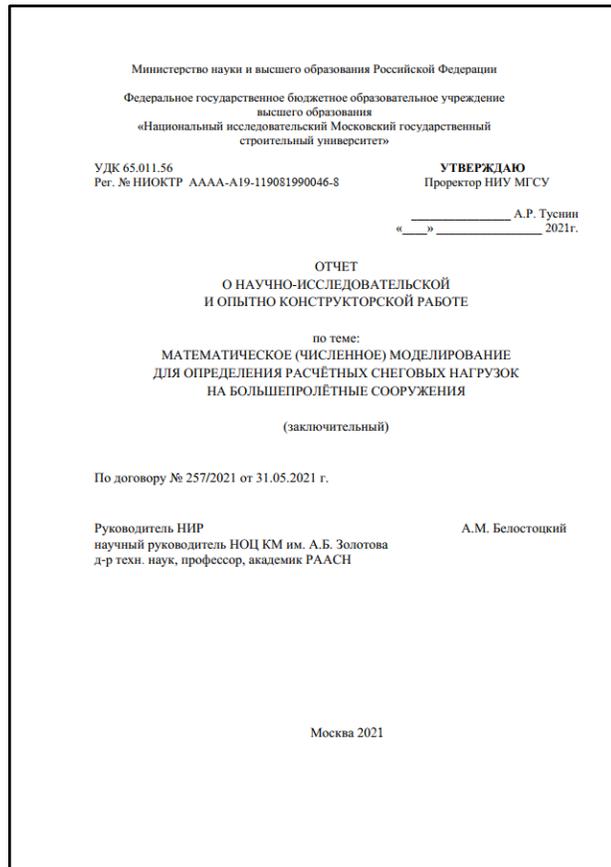
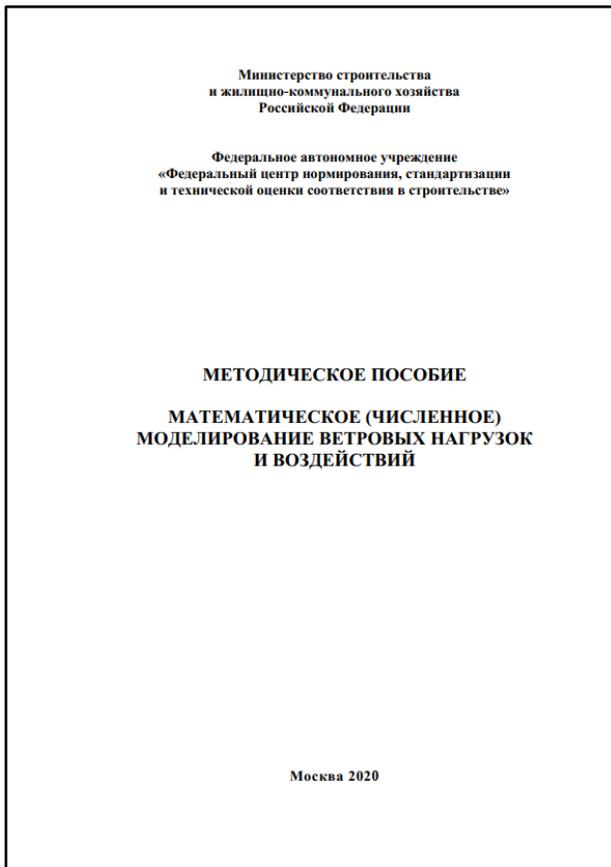
Бритиков Н.А., *Численное моделирование снеговых нагрузок на покрытия большепролётных зданий и сооружений*, защита планируется в 2023 г.



2017г.

2020г.

2021г.



Первая (и пока последняя) в России монография и учебное пособие по вычислительной аэродинамике в строительстве

Методическое пособие к СП 20.13330.2016 Математическое (численное) моделирование ветровых нагрузок и воздействий (по заказу ФАУ ФЦС)

НИР по теме Математическое (численное) моделирование для определения расчетных снеговых нагрузок на большепролетные сооружения (по заказу ФАУ ФЦС)

Моделирование ветровых нагрузок

- определение основных ветровых нагрузок на несущие конструкции
- определение пиковых ветровых давлений на ограждающие (фасадные) конструкции
- определение коэффициентов орографии для сложного рельефа

Моделирование аэродинамической и аэроупругой неустойчивости

- определение критических скоростей и интенсивности вихревого возбуждения
- определение критических скоростей галопирования, дивергенции, флаттера
- прямое моделирование аэроупругих эффектов в связанной постановке (аэродинамика + механика)

Моделирование снеговых нагрузок

- определение зон снегонакопления и снегопереноса
- определение коэффициента формы на основе синтеза математического и физического моделирования и строительных норм

Моделирование параметров пешеходной комфортности

- с учетом критериев МДС 20-1.2006
- с учетом коэффициентов усиления скоростей ветра, в т.ч. средневзвешенного

Преимущества математического моделирования

- возможность учета любых граничных и начальных условий
- относительная легкость подключения множества дополнительных моделей (мультифазность, пористые тела, обледенение, теплопроводность и многое другое), а значит, возможность учесть соответствующие факторы
- возможность проводить прямое аэроупругое моделирование со всеми широкими возможностями вычислительной механики деформируемых твердых тел
- широкие возможности для извлечения и визуализации результатов моделирования

Преимущества физического моделирования

- прямое моделирование газообразной среды (нет необходимости в моделях турбулентности и других предположениях)
- моделирование происходит в нестационарной постановке, что ближе к натуре
- быстрое получение результатов (при условии, что модель уже подготовлена)

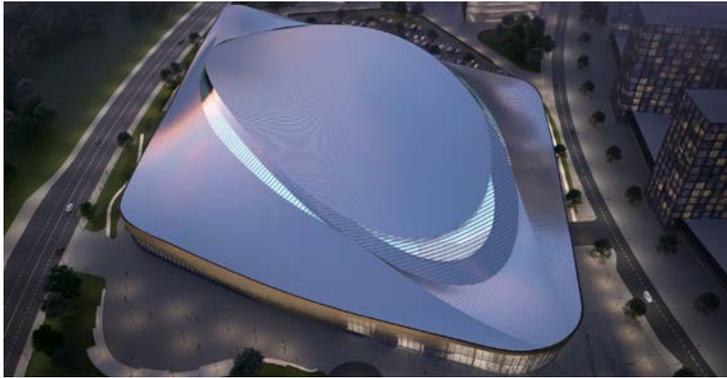
Недостатки математического моделирования

- высокие требования к вычислительной мощности при нестационарных расчетах, особенно «отягощенных» использованием более продвинутых моделей турбулентности и/или сложных дополнительных моделей (например, мультифазность среды), что затрудняет серийные расчеты для задач, где требуются более точные подходы
- необходимость в обозримом будущем использовать модели турбулентности и функции стенки при решении промышленных задач

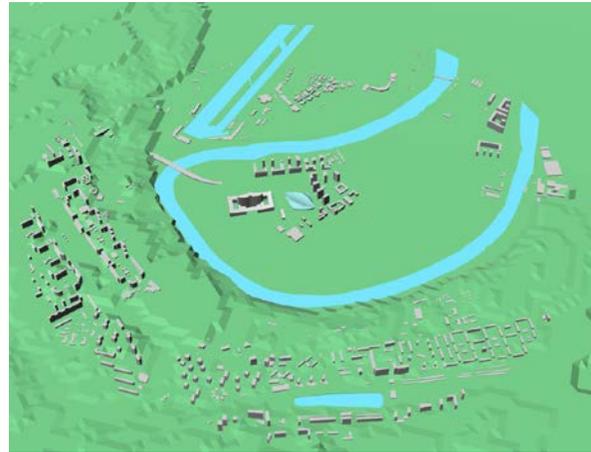
Недостатки физического моделирования

- проблема подобия (автомодельность можно доказать лишь в крайне узком диапазоне чисел Рейнольдса, не дотягивающем до реальных задач строительной аэродинамики 2-3 порядков)
- влияние стенок, креплений и др. на аэродинамический поток
- из испытаний извлекается крайне ограниченное количество информации (извлечение большего количества информации серьезно удорожает испытания)
- сложность и сомнительная корректность моделирования параметров пешеходной комфортности
- возможность решения только узкого класса аэроупругих задач при серьезных допущениях
- большое число допущений при моделировании снегоуноса (полученные результаты фактически носят лишь качественный характер)

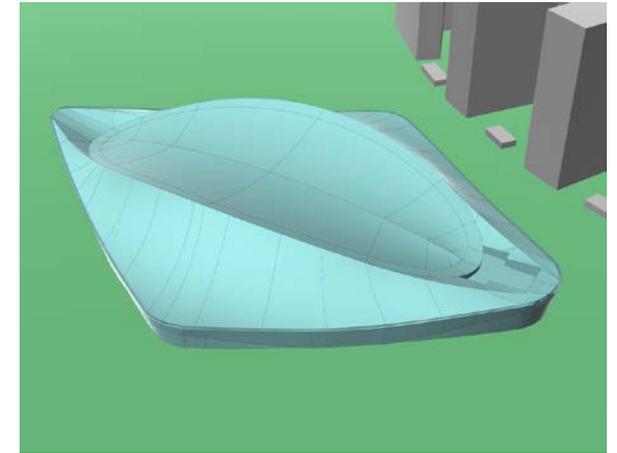
Серфинг-парк «Волна» (г. Москва)



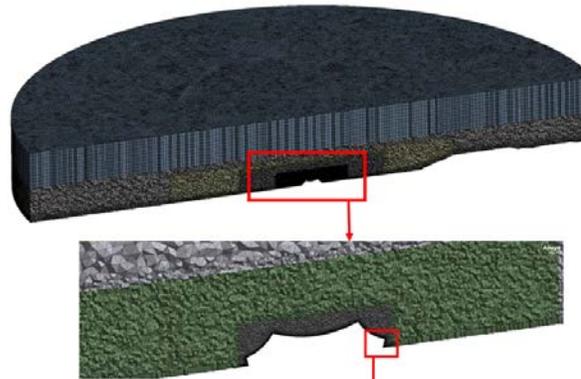
Рендеры объекта



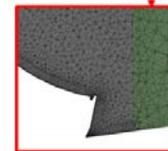
Геометрическая модель Объекта, рельефа и окружающей застройки



Геометрическая модель Объекта (масштаб 1:1)



Конечнообъемная модель Объекта (9.3 млн конечных объемов)



Макет Объекта в масштабе 1:250 в аэродинамической трубе (УНПЛ ААИСК МГСУ)

Серфинг-парк «Волна». Результаты моделирования

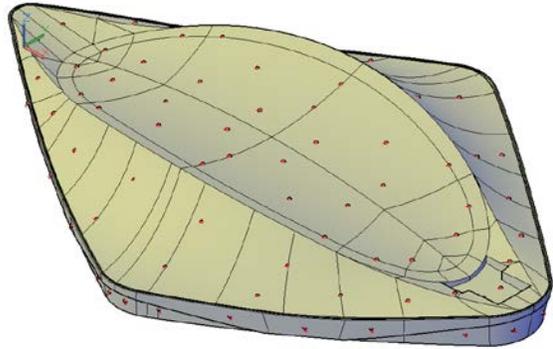
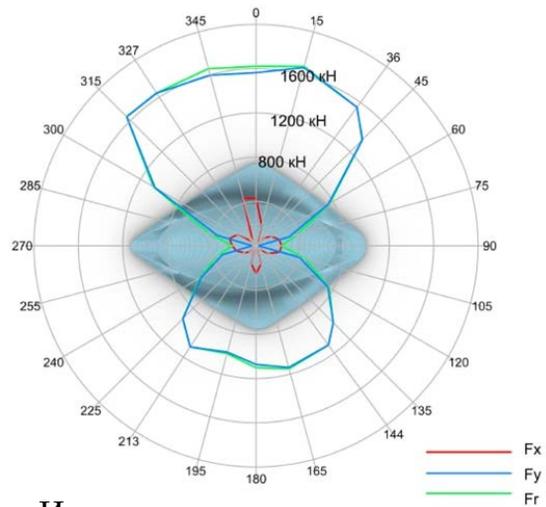
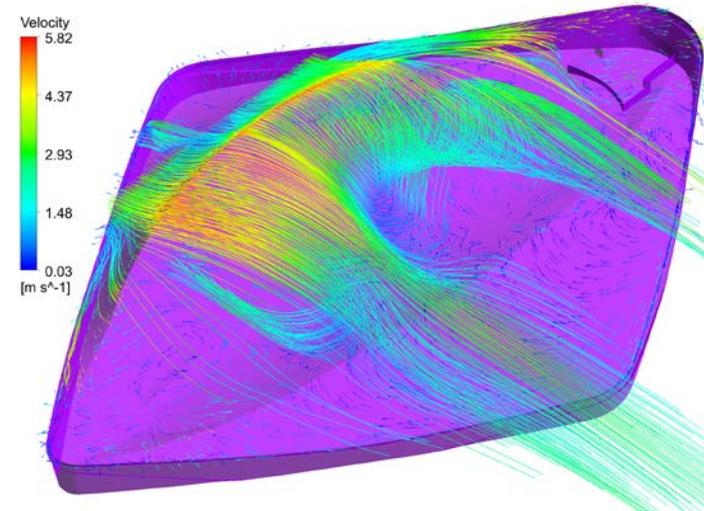


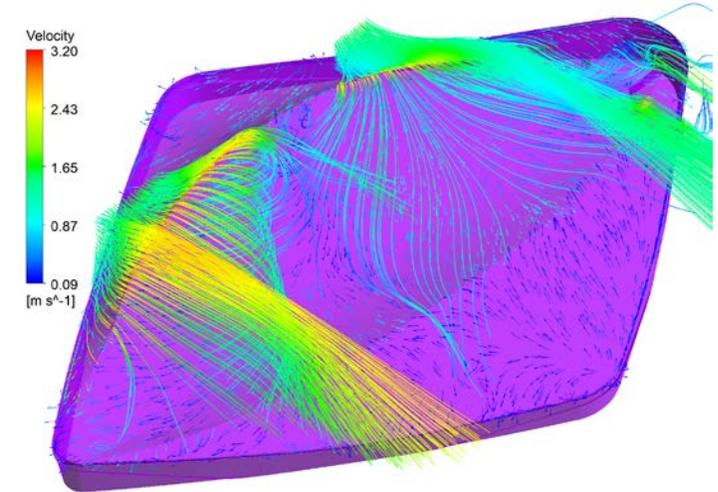
Схема расположения дренажных (контрольных точек) в испытаниях в АДТ



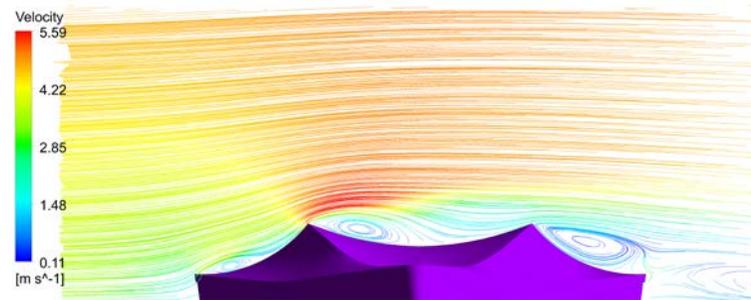
Интегральные расчетные ветровые нагрузки для исследуемых направлений ветра



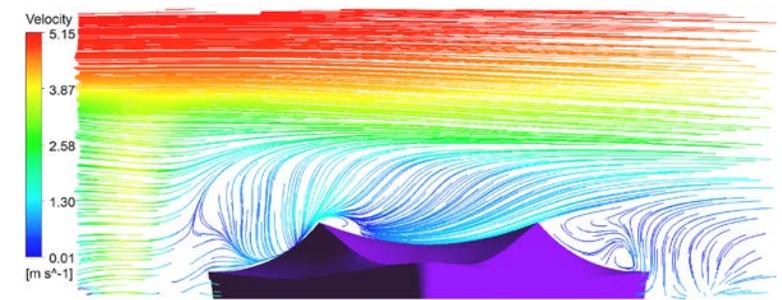
Визуализация линий тока ветра [м/с] и векторного поля напряжений сдвига
Случай без застройки



Визуализация линий тока ветра [м/с] и векторного поля напряжений сдвига
Случай с застройкой



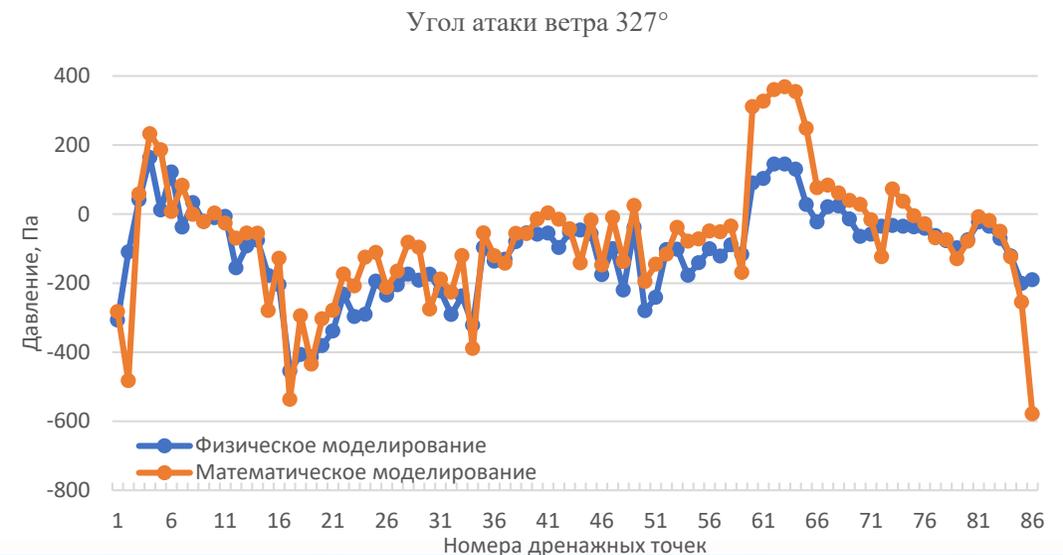
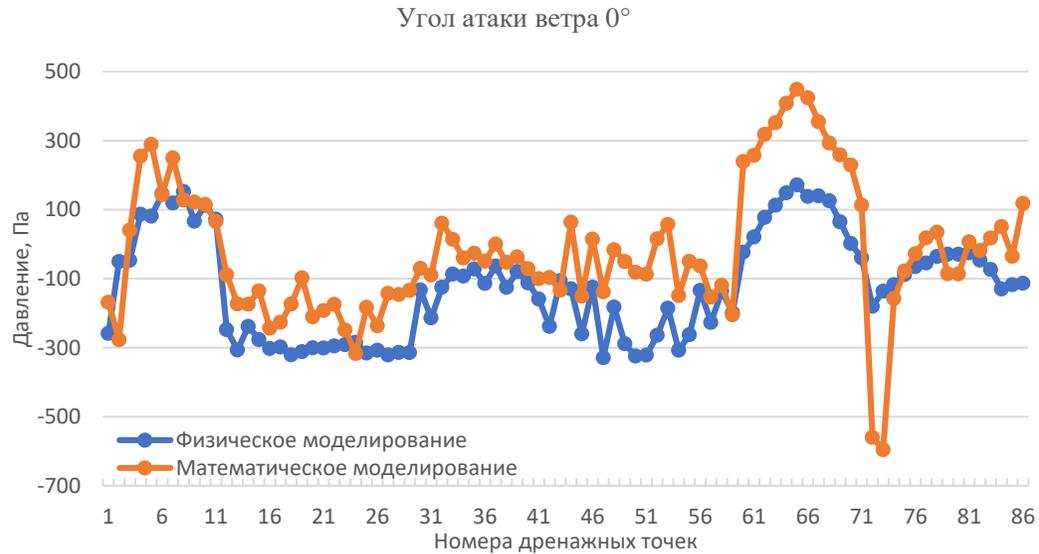
Визуализация линий тока ветра [м/с]
Случай без застройки



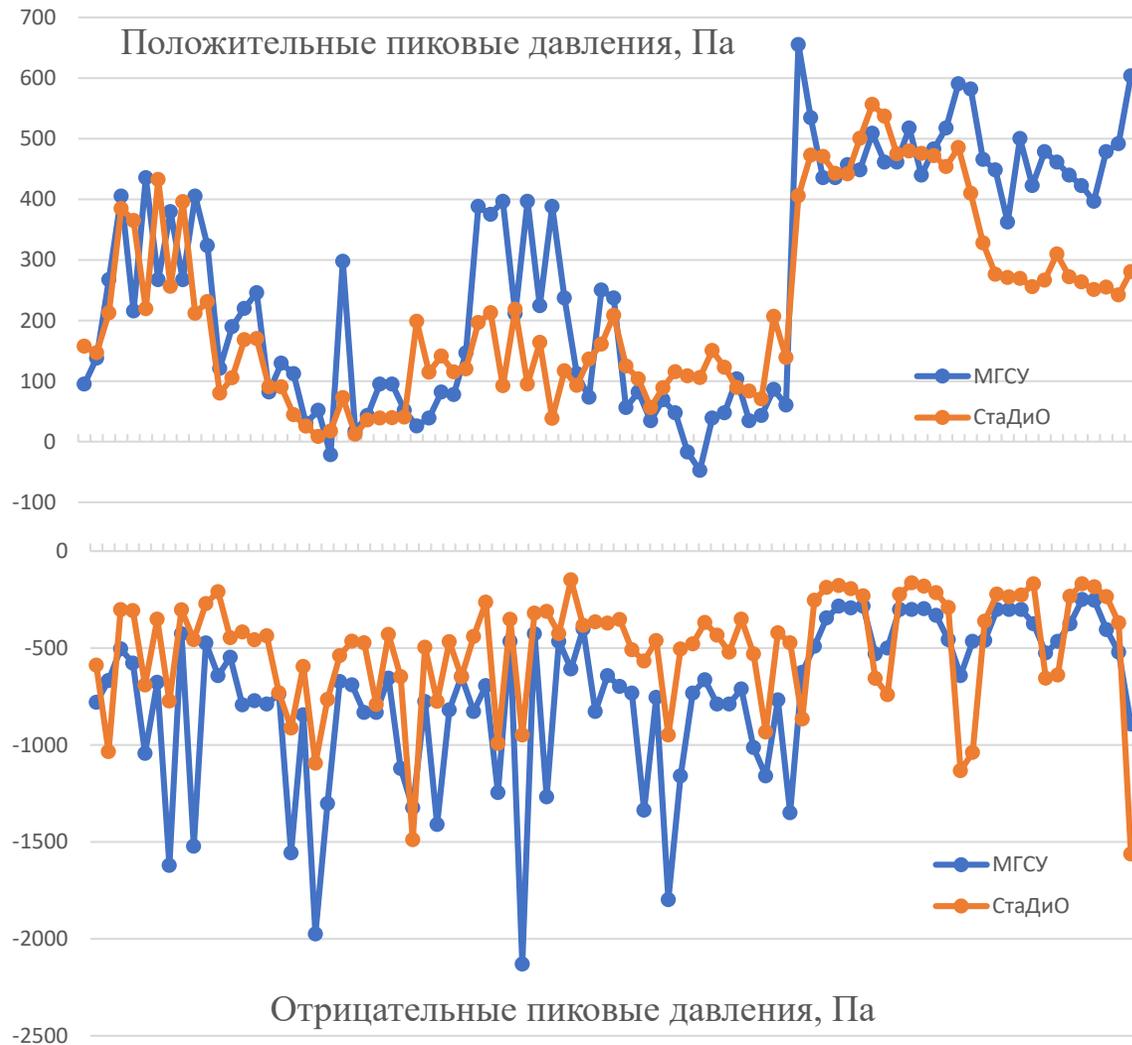
Визуализация линий тока ветра [м/с]
Случай с застройкой

Моделирование ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции

Серфинг-парк «Волна». Сопоставление средних ветровых давлений [Па], полученных методами физического и математического моделирования в контрольных точках без учета окружающей застройки



Серфинг-парк «Волна». Сопоставление пиковых ветровых давлений, полученных методами физического и математического моделирования в контрольных точках без учета окружающей застройки



По результатам моделирования ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции (основные нагрузки и пиковые давления) Объекта Серфинг-Парк «Волна» методами физического (экспериментального в АДТ) и математического (численного) моделирования было выявлено хорошее сходство результатов по средним давлениям и удовлетворительное – по пиковым.

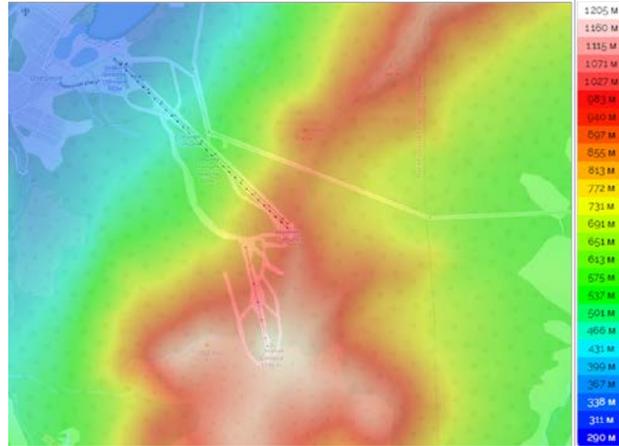
Точки с наибольшими отличиями находятся на торцах объекта, где наблюдаются срывы вихрей.

Наблюдается некоторое превышение положительных средних давлений, полученных по результатам математического моделирования, над результатами физического моделирования. Для отрицательных давлений наблюдается обратная ситуация. Результаты пиковых давлений отличаются существенней по причине принципиально разных подходов к определению этих величин.

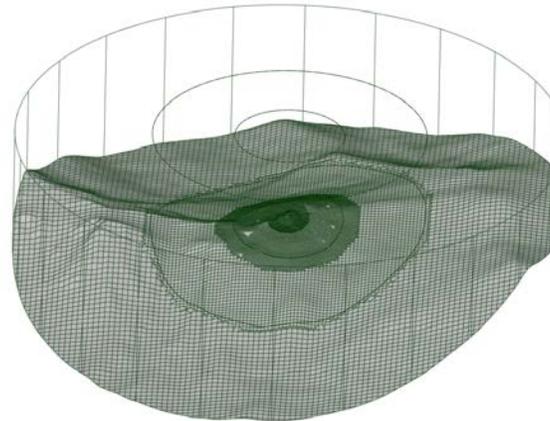
Всесезонный курорт Манжерок. Ресторан (респ. Алтай)



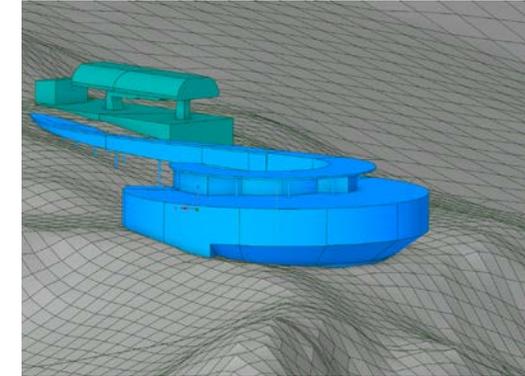
Рендер объекта



Карта высот местности
(расположение – на горе Синюха)



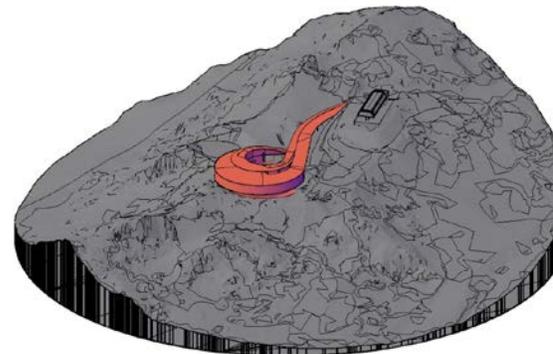
Геометрическая модель Объекта с
учетом рельефа в радиусе 1.5км



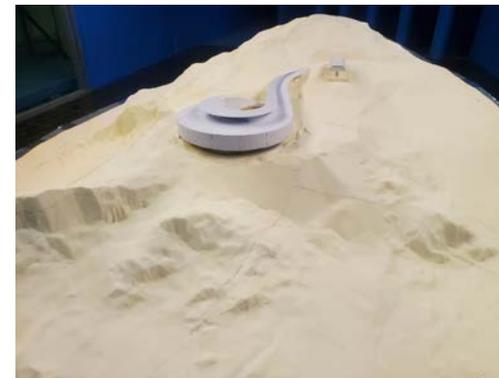
Геометрическая модель Объекта
(масштаб 1:1) (НОЦ КМ)



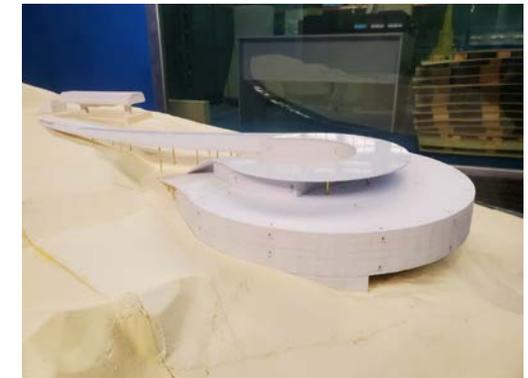
Фото площадки из космоса (вокруг
лес и просеки для лыжных трасс)



Геометрическая модель для
последующего макетирования
(радиус ~0.15 км)

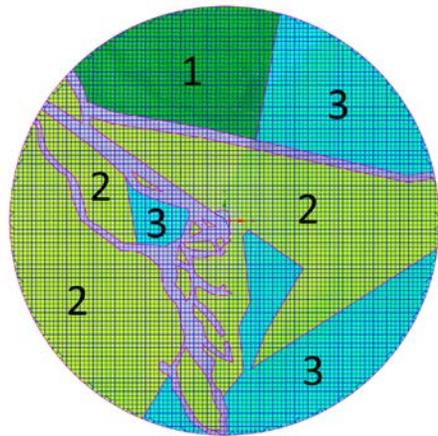


Макет (1:100) для испытаний в аэродинамической
трубе (УНПЛ ААИСК)

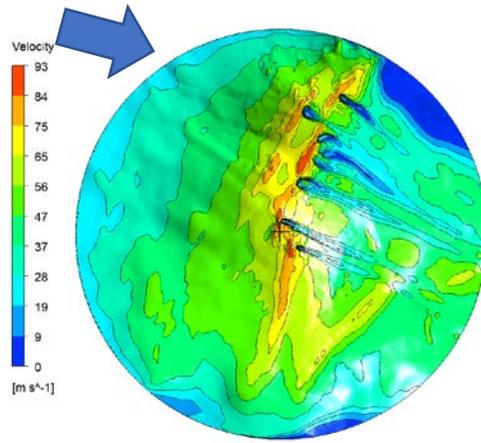


Всесезонный курорт Манжерок. Ресторан (респ. Алтай)

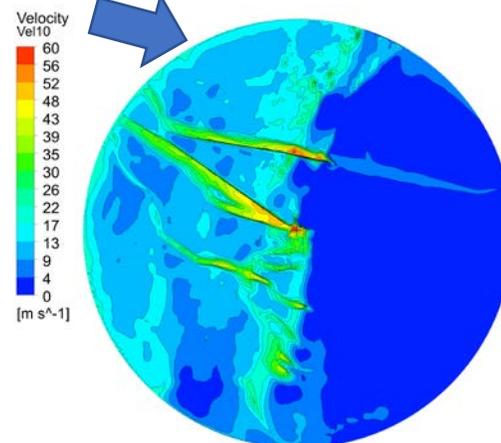
Определение коэффициента орографии с учетом лесных массивов



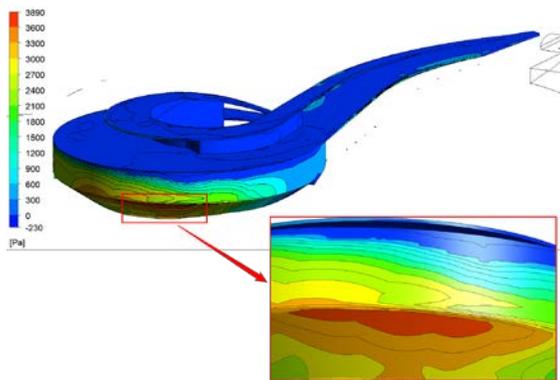
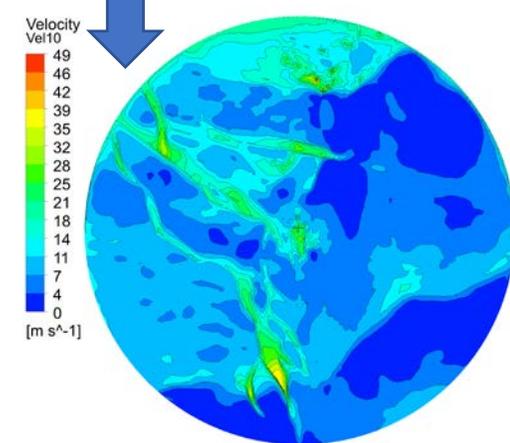
Условное разделение лесных массивов на три типа по плотности



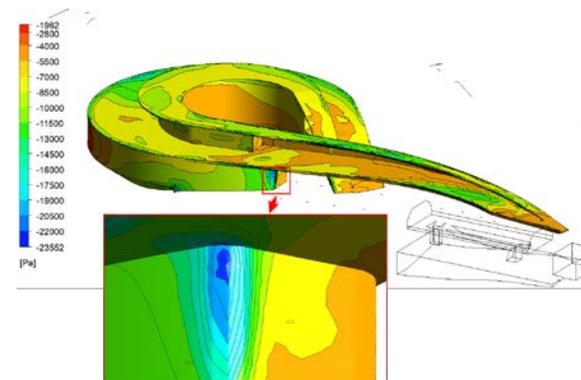
Изополя скорости на высоте 10 м над уровнем земли (без учета лесных массивов)



Изополя скорости на высоте 10 м над уровнем земли (с учетом лесных массивов)



Положительные пиковые давления, Па (без учета лесных массивов)



Отрицательные пиковые давления, Па (без учета лесных массивов)

Расчетные исследования аэродинамики Объекта были проведены методами физического и математического моделирования. Однако оказалось, что решающий вклад в значения ветровых нагрузок вносит сложный рельеф местности (ресторан расположен на хребте горы Синюха). Результаты моделирования ветровых нагрузок с учетом рельефа местности выявили нереалистично высокие скорости ветра в месте расположения объекта и, как следствие, пиковые ветровые давления. Для решения этой проблемы было принято решение об упрощенном учете лесных массивов с помощью модели проницаемого тела. В результате удалось существенно снизить скорости ветра и ветровые нагрузки (от 2 до 30 раз для пиковых давлений).

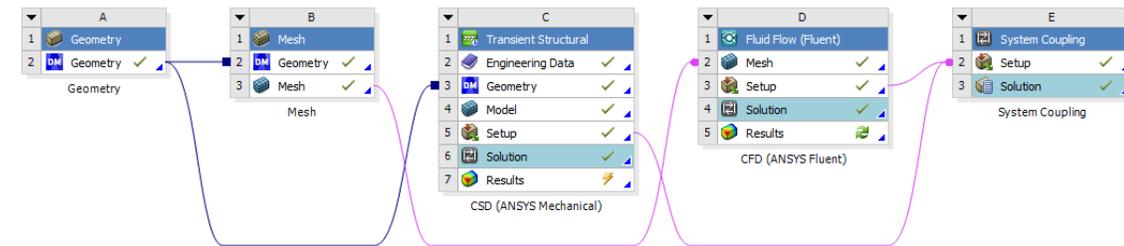
Структурная схема методики



Инженерный (нормативный) подход - определение начального приближения значений критических скоростей ветра, при которых возникает аэроупругая неустойчивость (вихревое возбуждение, галоирование, дивергенция). Формулы критических скоростей представлены:

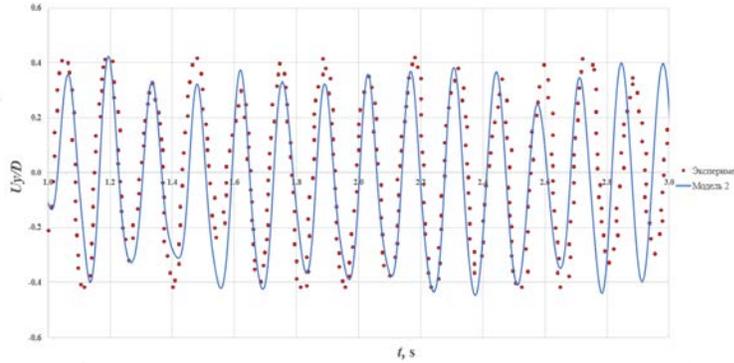
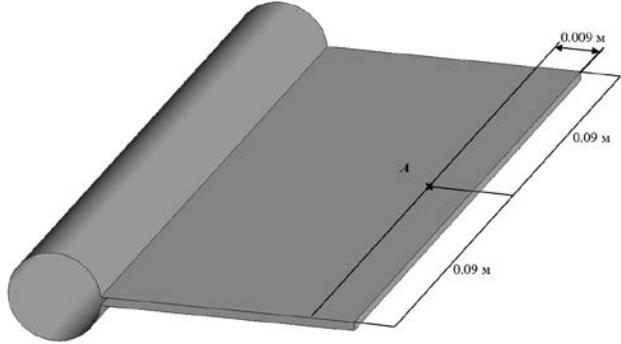
- СП 20.13330 (только вихревое возбуждение)
- СП 296.1325800
- Eurocode 1-4 Wind actions
- CNR-DT 207 R1/2018 (Италия)

Математическое (численное) моделирование задач в связанной постановке (Fluid Structure Interaction, FSI) – позволяет уточнить значения критической скорости ветра (полученные с помощью инженерного подхода), а также определить амплитуды колебаний.

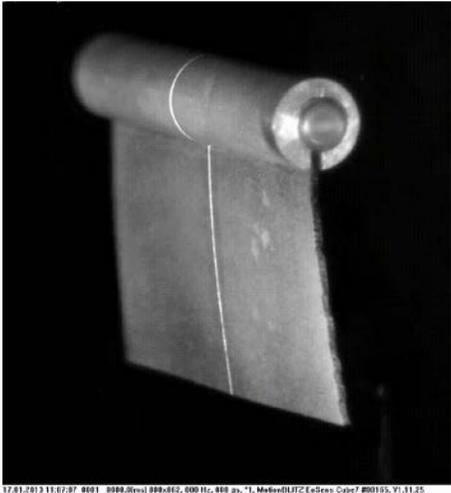


ПК ANSYS
Workbench: Mechanical ↔ CFX (Fluent)

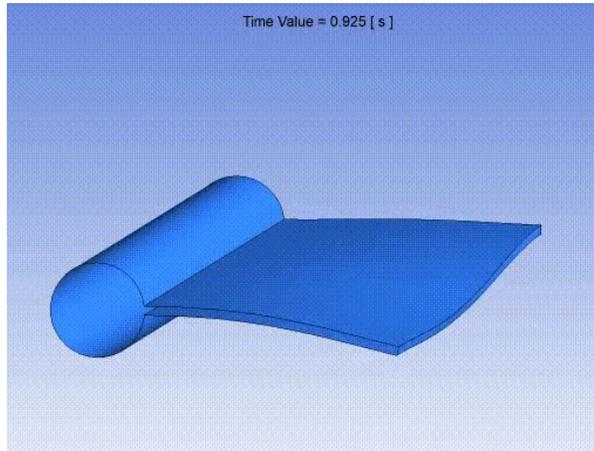
Тестовая задача 1 - обтекание жесткого цилиндра с гибкой тонкой пластиной



Сопоставление перемещения U_y^* точки A с результатом эксперимента



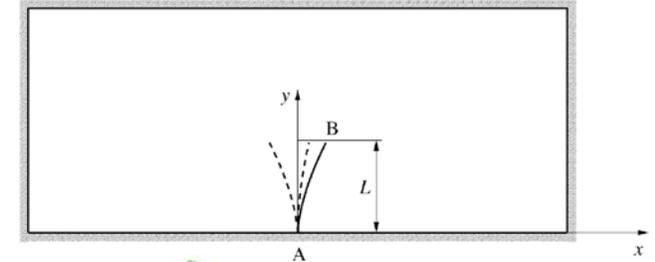
Эксперимент



Численное моделирование

Тестовая задача 1 – оттачивание умения решения связанных аэроупругих задач с помощью численного моделирования

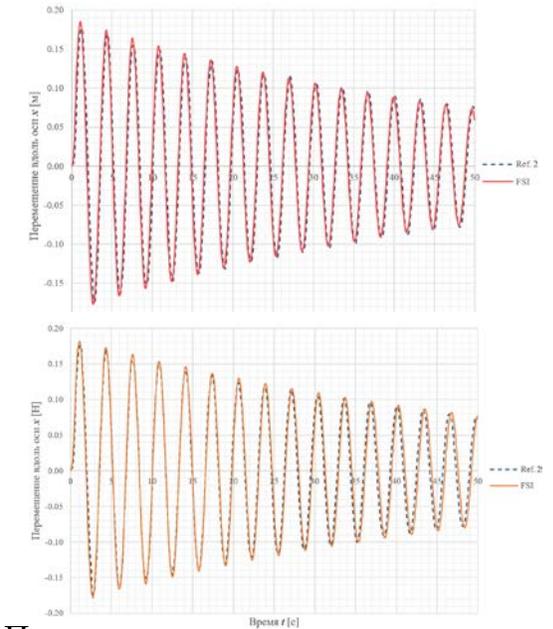
Тестовая задача 2 - свободные колебания гибкой пластины, помещенной в вязкую несжимаемую жидкость



1. Объемная модель (КЭ- Solid185)



2. Оболочечная модель с контактной поверхностью для сбора нагрузки (КЭ- Shell181)



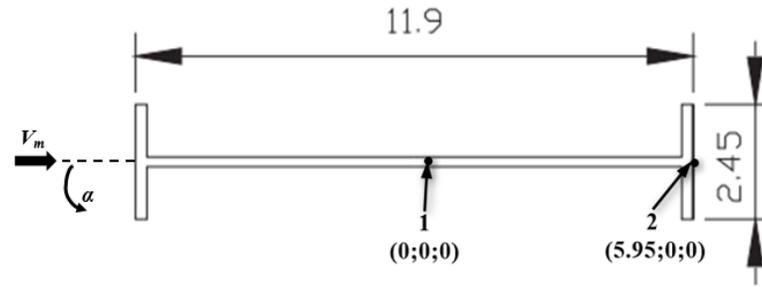
Перемещение пластины вдоль оси x , м

Тестовая задача 2 – усовершенствование метода численного решения связанных аэроупругих задач, а именно переход от объемной механической модели к оболочечной

Тестовая задача 3 – оценка аэроупругой неустойчивости на примере сечения моста



Мост Такома-Нэрроуз (Вашингтон, США)



Геометрические параметры задачи

Сравнение результатов, полученных в связанной постановке FSI с результатами авторов

| | V_{CRF} м/с |
|----------------------------|---------------|
| Эксперимент [Ref.] | 11.5 |
| FSI [Ref.] | 8 - 10 |
| FSI (URANS $k-\omega$ SST) | 12 - 15 |
| FSI (DES SST) | 8 - 10 |

Результаты инженерной оценки

Дивергенция

| Угол атаки α , ° | RANS SST | |
|-------------------------|----------|-----------------|
| | C_M | V_{DIV} , м/с |
| 0 | -0.004 | 17.18 |
| 2 | -0.021 | 16.5 |
| 4 | -0.041 | 18.58 |
| 6 | -0.05 | 22.28 |
| 8 | -0.062 | 58.67 |
| 10 | -0.053 | 47.77 |
| 12 | -0.057 | 297.36 |
| 14 | -0.054 | 23.42 |
| 16 | -0.039 | 19.03 |
| 18 | -0.026 | 19 |
| 20 | -0.011 | 31 |
| 25 | -0.044 | 12.1 |
| 30 | -0.183 | 18.22 |
| 35 | -0.12 | 13.92 |

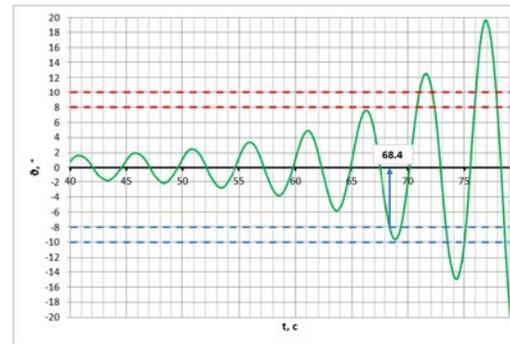
Галопирование

| Угол атаки α , ° | RANS SST | | |
|-------------------------|----------|-------|-------|
| | C_D | C_L | H |
| 0 | 0.3 | 0.03 | 11.23 |
| 2 | 0.31 | 0.41 | 10.42 |
| 4 | 0.37 | 0.74 | 8.35 |
| 6 | 0.44 | 0.97 | 9.24 |
| 8 | 0.56 | 1.35 | -0.6 |
| 10 | 0.56 | 0.89 | -0.63 |
| 12 | 0.69 | 1.27 | 10.75 |

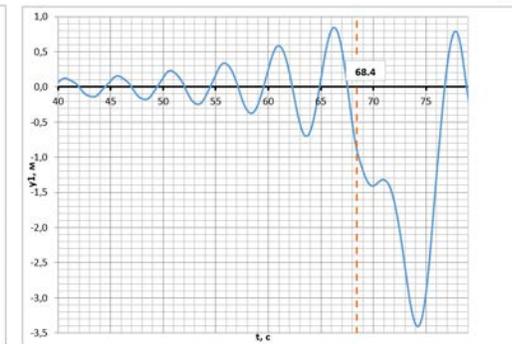


| Угол атаки α , ° | RANS SST | |
|-------------------------|----------|----------------|
| | H | V_{CG} , м/с |
| 8 | -0.60 | 5.76 |
| 10 | -0.63 | 5.54 |

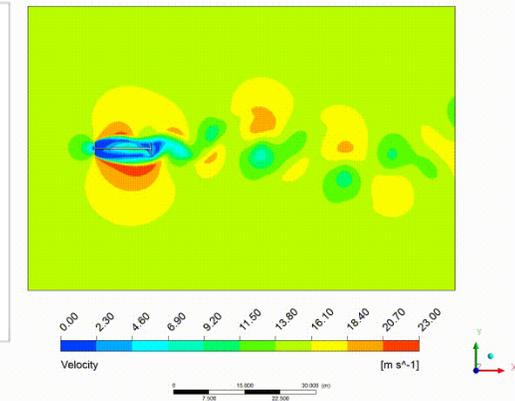
Результаты связанного аэроупругого расчета ($V_m = 15$ м/с, URANS $k-\omega$ SST)



Угол поворота



Вертикальные перемещения точки 1



Тестовая задача 3 – сопоставление инженерного подхода и численного моделирования

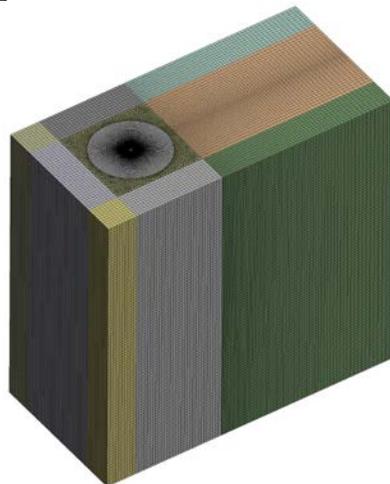
Флагштоки (175 м) в г. Санкт-Петербург Исследование ветровой нагрузки и вихревого возбуждения



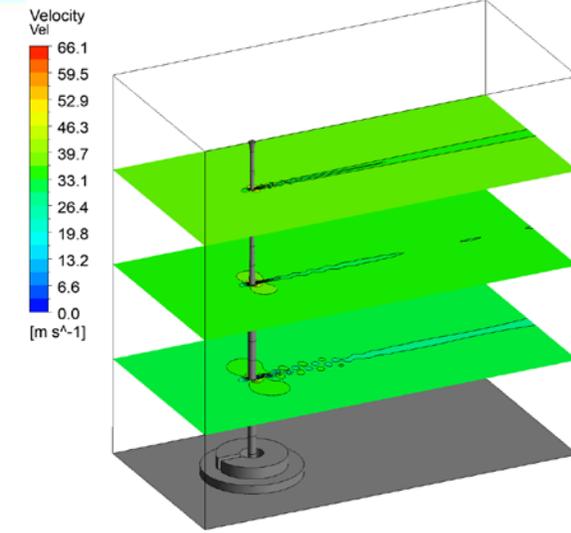
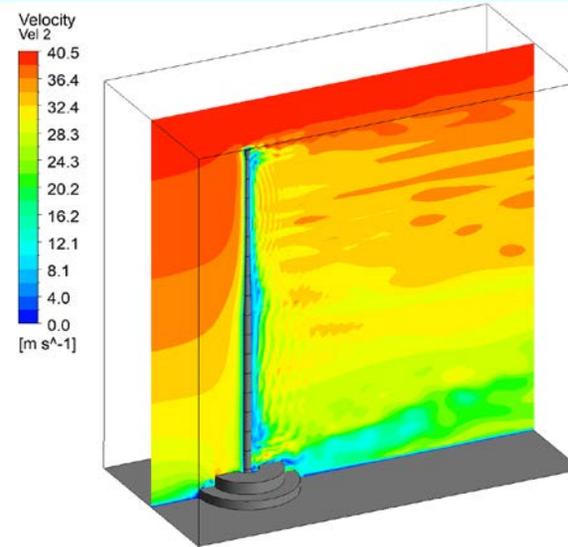
Рендер объекта



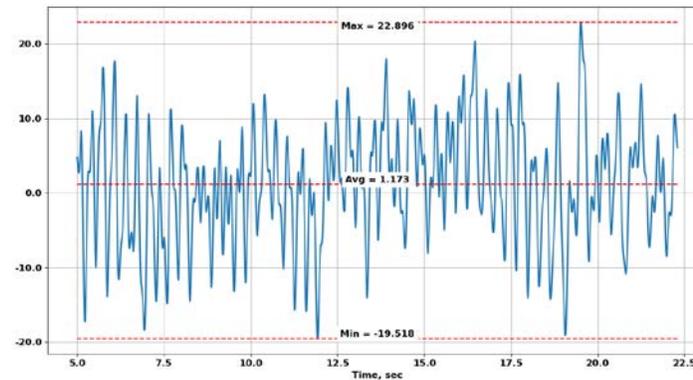
Геометрическая модель



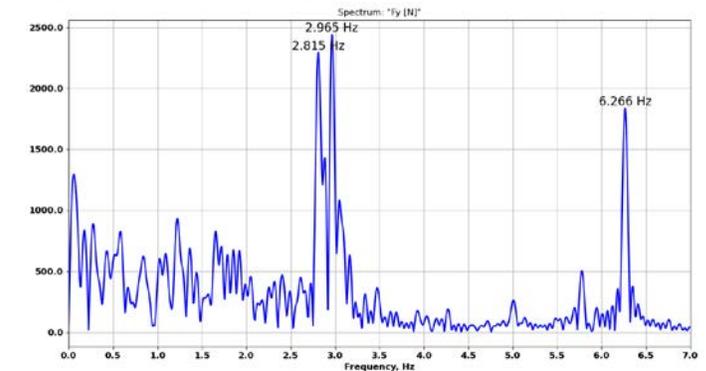
КО-модель
(6.4 млн. КО)



Изополя скоростей ветрового потока [м/с] в вертикальном и горизонтальных сечениях



Зависимость боковой силы [кН] от времени



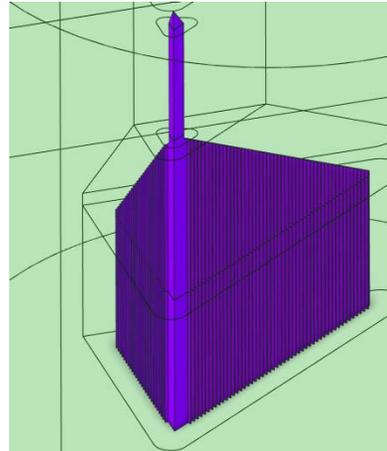
Спектральная плотность мощности боковой силы

На основе аэродинамических нестационарных расчетов определены диапазоны критических скоростей ветра вихревого возбуждения и соответствующие ветровые нагрузки для собственных частот и форм колебаний флагштоков

Национальный космический центр (г. Москва)



Рендер объекта



Геометрическая модель навершия и шпиля (1:1)

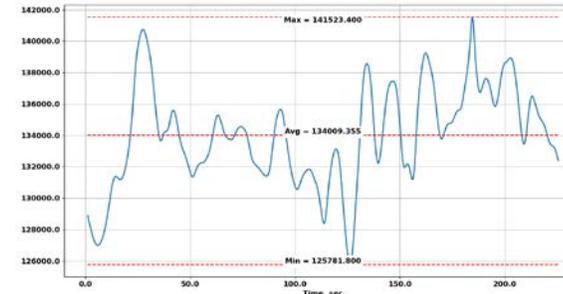


Рендеры объекта (навершие и шпиль)

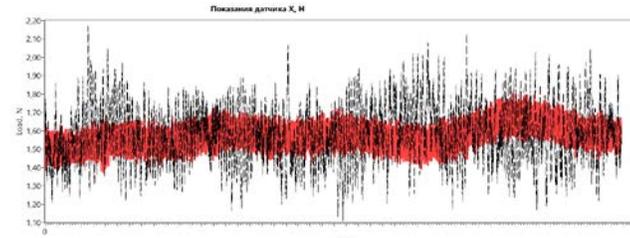


Масштабный макет навершия и шпиля (1:75)

Исследование вихревого возбуждения

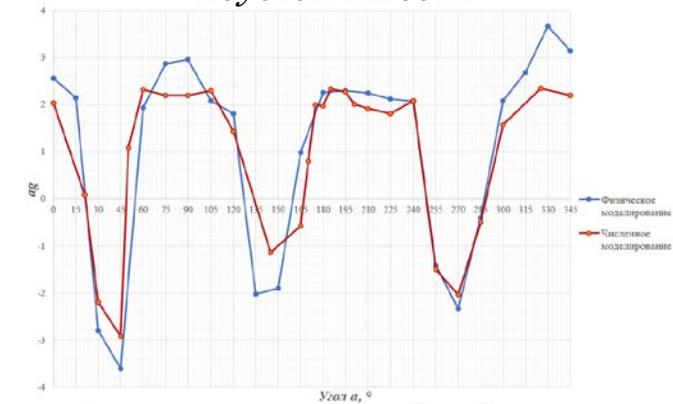


Зависимость силы лобового сопротивления от времени (результаты численного моделирования)



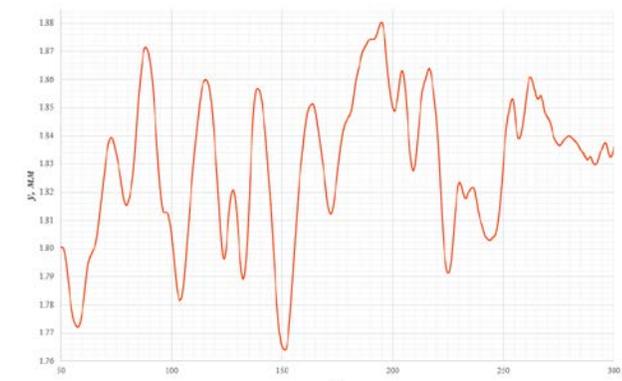
Показания тензодатчика с учетом фильтрации от собственных частот макета и установки

Оценка аэроупругой неустойчивости



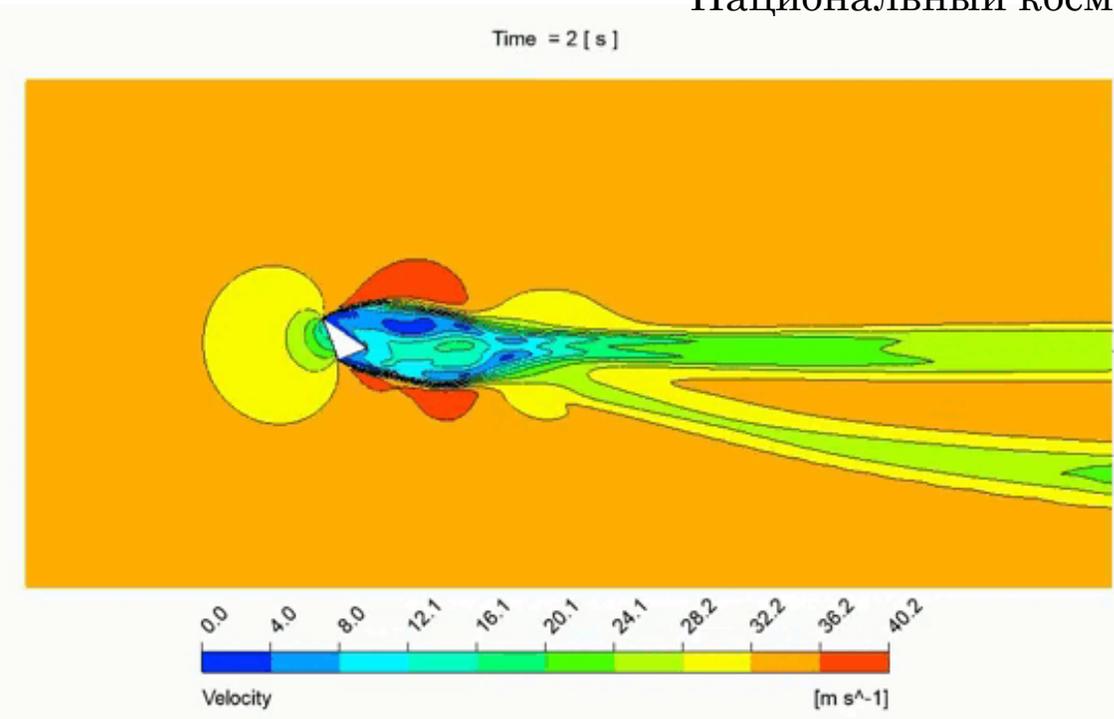
Сравнение критерия Ден-Гартога для мат. и физ. моделирования

$$a_g = C_d + \frac{dC_l}{d\alpha}$$

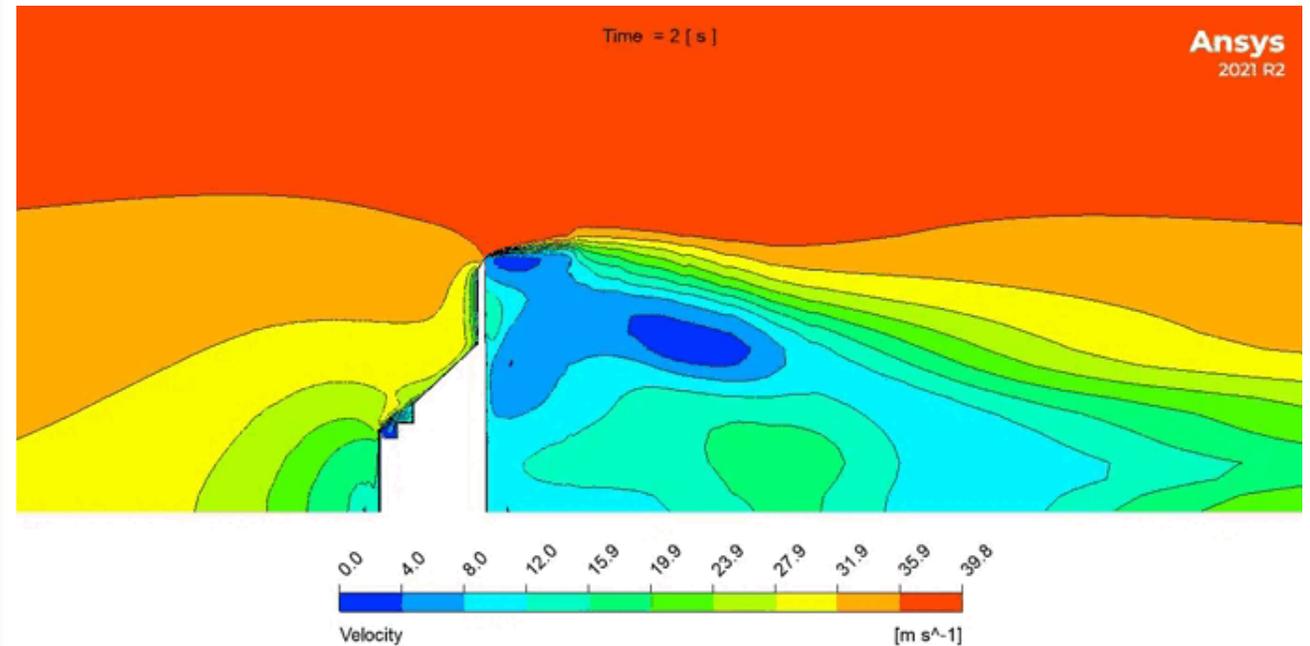


Зависимость перемещения вершины шпиля от времени (аэроупругий расчет в связанной постановке)

Национальный космический центр (г. Москва)



Изополя скоростей ветрового потока [м/с] в горизонтальном сечении шпилья



Изополя скоростей ветрового потока [м/с] в вертикальном сечении шпилья и навершия

По результатам математического (численного) и физического (экспериментально) моделирования было выявлено, что вихревое возбуждение выражено незначительно (амплитуды аэродинамических коэффициентов не более 0.08). Следовательно, в прочностных расчетах можно не проводить расчет на воздействие от вихревого возбуждения. Проведенная оценка по нормативной методике показала, что для исследуемого шпилья *невозможно* возникновение явления *галопирования* при скоростях ветра, наблюдаемых на площадке строительства. Двухсторонний связанный расчет аэроупругих колебаний *подтвердил* отсутствие явлений аэроупругой неустойчивости при максимально возможной скорости ветра для места строительства.

Численная методика оценки ветровой комфортности пешеходных зон

Структурная схема методики

Объект исследования

Анализ климатических характеристик места расположения объекта, составление таблицы повторяемости ветров по данным ближайших метеостанций, определение пешеходных зон

Разработка расчетной модели

Создание геометрической, конечно-объемной с измельчением сетку у земли и, затем, расчетной модели объекта с заданными граничными условиями и выбранной моделью турбулентности

Аэродинамические расчёты

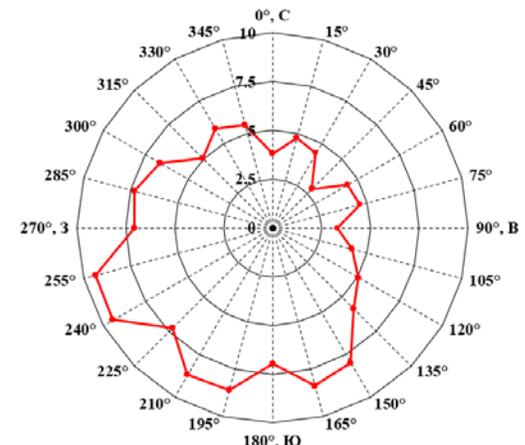
Стационарные расчеты для презентативного набора направлений ветра

Определение средних и максимальных скоростей ветра, а также коэффициентов усиления ветра на высоте 1.5 м

Масштабирование результатов для разных скоростей
Для сокращения объема вычислений

Определение времени дискомфорта с учетом розы ветров и сопоставление с критериями

Определение средневзвешенного (с учетом розы ветров) коэффициента усиления ветра



Роза ветров

$$V_{\max} = V_m (1 + \theta \cdot I) \quad V_r = \frac{V_m}{V_{1.5}}$$

$$V_{\max,i} = k_i \cdot V_{\max}$$

$$K_l = \sum_{i,j} \delta \cdot T_{ij}$$

$$\bar{V}_r = \sum_j \varphi_j V_{r,j}$$

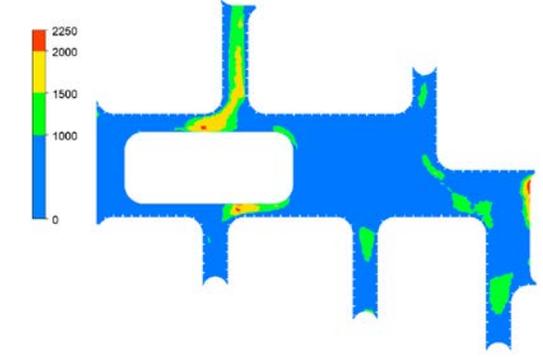
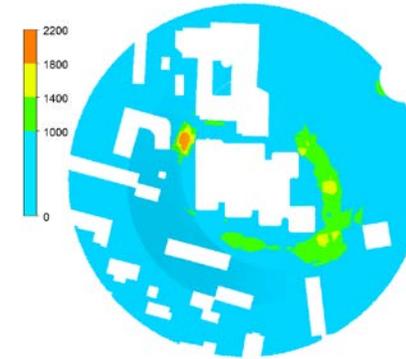
| Угол | % год | Скорости ветра, м/с | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|-------|---------------------|---------|---------|---------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|---|---|---|
| | | 0-1.5 | 1.5-3.5 | 3.5-5.5 | 5.5-7.5 | 7.5-9.5 | 9.5-11.5 | 11.5-13.5 | 13.5-15.5 | 15.5-17.5 | 17.5-19.5 | 19.5-21.5 | 21.5-23.5 | | | | |
| 0 | 2.58 | 0.0058 | 0.0115 | 0.006 | 0.0018 | 0.0003 | 4E-05 | 3E-05 | 2E-05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 3.23 | 0.0099 | 0.0144 | 0.0057 | 0.0016 | 0.0003 | 3E-05 | 2E-05 | 7E-06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 3.01 | 0.0093 | 0.0136 | 0.0051 | 0.0013 | 0.0002 | 3E-05 | 1E-05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 45 | 1.91 | 0.0047 | 0.0089 | 0.0042 | 0.0009 | 4E-05 | 2E-05 | 8E-06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 60 | 3.01 | 0.0093 | 0.0139 | 0.0053 | 0.0011 | 0.0001 | 4E-05 | 3E-06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 75 | 3.12 | 0.0099 | 0.0118 | 0.007 | 0.0017 | 0.0003 | 6E-05 | 3E-06 | 0 | 3E-06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 90 | 2.23 | 0.0067 | 0.0027 | 0.0092 | 0.0039 | 0.0055 | 3E-05 | 3E-06 | 0 | 3E-06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 105 | 2.84 | 0.0072 | 0.0093 | 0.0083 | 0.0026 | 0.0007 | 0.0001 | 5E-05 | 8E-06 | 1E-05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 120 | 3.45 | 0.0066 | 0.0135 | 0.0093 | 0.0013 | 0.001 | 0.0002 | 1E-04 | 2E-05 | 1E-05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 135 | 3.99 | 0.005 | 0.0154 | 0.0121 | 0.0031 | 0.0013 | 0.0004 | 0.0001 | 3E-05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 150 | 3.44 | 0.0103 | 0.0227 | 0.0146 | 0.0043 | 0.001 | 0.0002 | 7E-05 | 3E-05 | 8E-06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 165 | 3.69 | 0.0112 | 0.0233 | 0.0148 | 0.0039 | 0.0009 | 0.0001 | 3E-05 | 4E-05 | 8E-06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 180 | 4.73 | 0.0072 | 0.0228 | 0.0126 | 0.0032 | 0.0007 | 0.0001 | 2E-05 | 6E-06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 195 | 5.83 | 0.0123 | 0.0278 | 0.0138 | 0.0039 | 0.0007 | 1E-04 | 4E-06 | 6E-06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 210 | 3.89 | 0.0127 | 0.0239 | 0.0142 | 0.0029 | 0.0004 | 8E-05 | 3E-06 | 4E-06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 225 | 4.91 | 0.0078 | 0.0232 | 0.0138 | 0.0023 | 0.0004 | 0.0001 | 1E-05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 240 | 6.39 | 0.0126 | 0.0289 | 0.017 | 0.0039 | 0.0007 | 0.0001 | 2E-05 | 2E-06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 255 | 6.35 | 0.0123 | 0.0282 | 0.0172 | 0.0041 | 0.0008 | 0.0001 | 3E-05 | 5E-06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 270 | 4.80 | 0.0069 | 0.0211 | 0.0146 | 0.0039 | 0.0007 | 0.0001 | 6E-05 | 8E-06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 285 | 4.97 | 0.0094 | 0.0214 | 0.0134 | 0.0037 | 0.0009 | 0.0002 | 7E-05 | 7E-06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 300 | 4.31 | 0.0084 | 0.0183 | 0.0124 | 0.004 | 0.001 | 0.0003 | 7E-05 | 1E-05 | 3E-06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 315 | 3.41 | 0.0039 | 0.0123 | 0.0116 | 0.0048 | 0.001 | 0.0002 | 4E-05 | 2E-05 | 8E-06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 330 | 3.99 | 0.0068 | 0.0154 | 0.012 | 0.004 | 0.001 | 0.0002 | 8E-05 | 4E-05 | 3E-06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 345 | 3.71 | 0.0074 | 0.0153 | 0.0101 | 0.003 | 0.0007 | 0.0001 | 7E-05 | 4E-05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Таблица повторяемости ветров по направлениям и скоростям

Критерии МДС 20-1.2016

| Уровень комфортности | I | II | III |
|----------------------|------|----|-----|
| V_{cr} , м/с | 6 | 12 | 20 |
| T_{lim} , час/год | 1000 | 50 | 5 |

ЖК на Дружинниковской улице, г. Москва



Геометрическая модель объекта вблизи

1-ый уровень пешеходной комфортности превышение $V_{cr1} = 6$ м/с не чаще $K_{cr1} = 1000$ часов в год в пешеходных зонах

ЖК Акватория, г. Москва

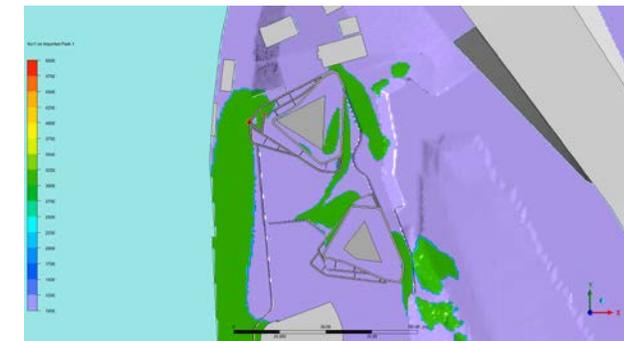
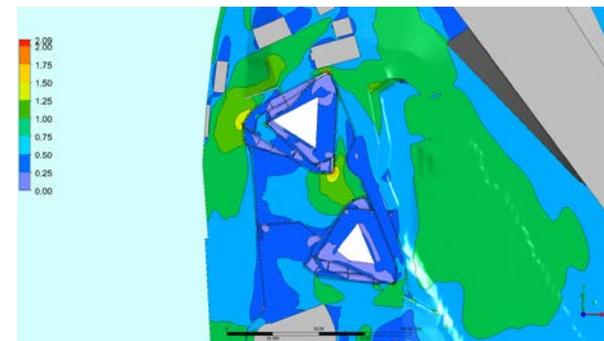


Схема расположения объекта (геометрическая модель)

Геометрическая модель объекта вблизи

Средневзвешенный коэффициент усиления средней скорости ветра

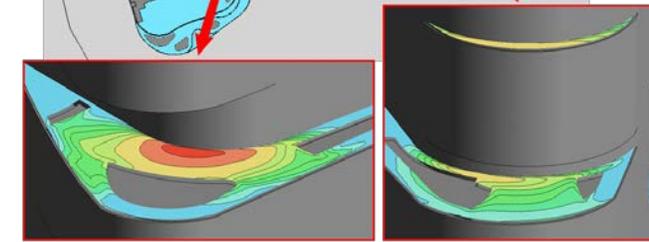
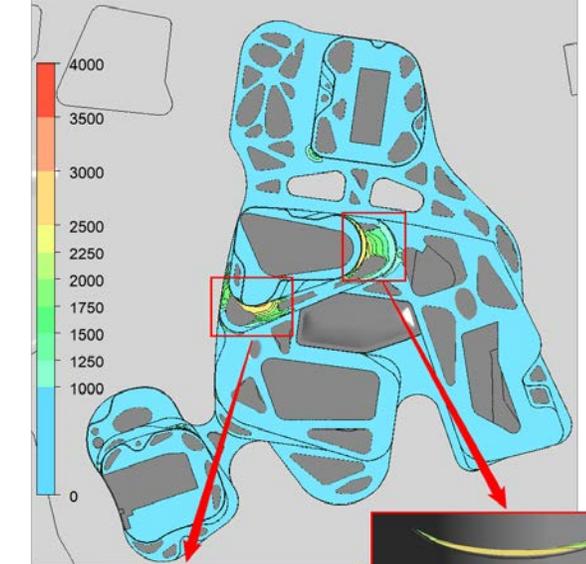
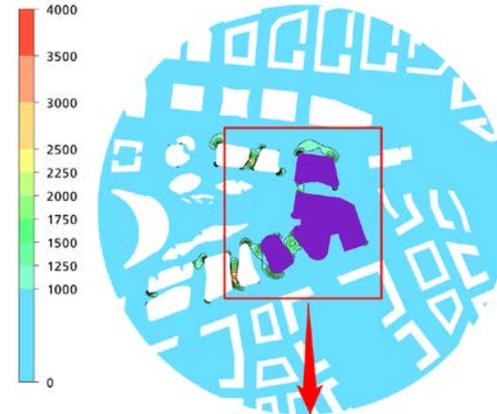
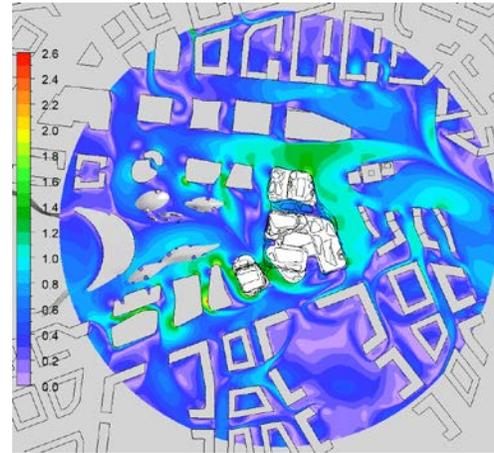
1-ый уровень пешеходной комфортности превышение $V_{cr1} = 6$ м/с не чаще $K_{cr1} = 1000$ часов в год в пешеходных зонах

Моделирование параметров ветровой комфортности пешеходных зон

Офисно-деловой центр по адресу г. Москва, ЗАО, р-н Кунцево, тер-я Рублево-Архангельское

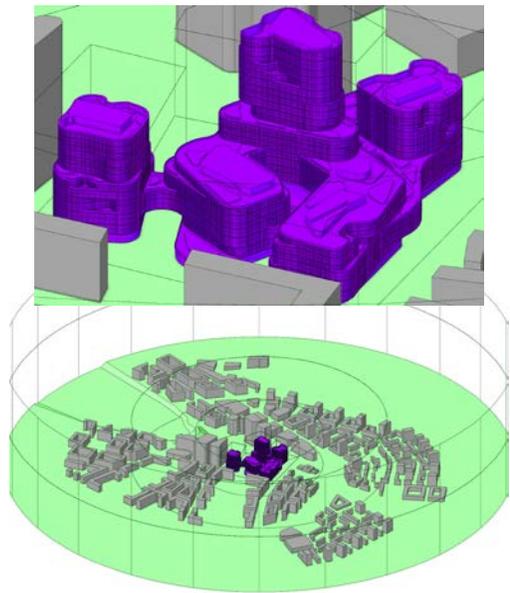


Рендер объекта

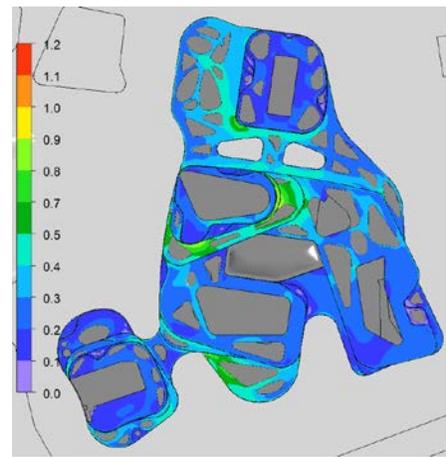


1-ый уровень пешеходной комфортности превышение $V_{cr1} = 6$ м/с не чаще $K_{cr1} = 1000$ часов в год в пешеходной зоне

В результате проводимых расчетных исследований ветровой комфортности определяются потенциально дискомфортные места для пешеходов. При необходимости даются рекомендации по улучшению ветрового комфорта с возможным расчетным подтверждением (учет зеленых насаждений, малых архитектурных и форм и др.)



Геометрическая модель



Средневзвешенный коэффициент усиления средней скорости ветра

Актуальность проблемы



Железнодорожный музей
Балтимор, США, 2003 г.



Трансвааль-парк
Москва, 2004 г.



Торговый центр
Катовице, Польша, 2006 г.



Басманный рынок
Москва, 2006 г.



Тепличный комплекс
Мокшан, Пензенская обл., 2010 г.
(ущерб – 150 млн. ₺)



Ледовый дворец «Пересвет»
Брянск, 2013 и 2021 г. (дважды!)



Театр «Аполло»
Лондон, Великобритания, 2013 г.



АО «Институт Гидропроект»
Москва, 2019 г.

В России с 2001 по 2021 г. произошло по меньшей мере **266 обрушений кровель**, вызванных экстремальной снеговой нагрузкой

Структурная схема методики

Объект исследования

Анализ климатических характеристик места расположения объекта, определение возможных зон снегонакопления и снегопереноса

Постановка задачи

Выбор направлений и скоростей обдува, задание характеристик потока для каждой фазы (концентрация снега, скорость трения и т.д.)

Выбор модели турбулентности

В том числе из соображений оптимизации вычислений

Задание параметров расчёта

Начальные и граничные условия, шаг по времени, решатели

Аэродинамический расчёт

Длительный, с использованием пользовательского кода для вычисления изменения высоты снежного покрова

Расчёт напряжённо-деформированного состояния

С учётом полученной снеговой нагрузки

Основная сложность в моделировании снеговых нагрузок – исключительно стохастический характер процесса снегонакопления

Ввиду наличия в снеговом потоке частиц различных масштабов и их сложного взаимодействия между собой, для формирования наиболее полной картины распределения снега на изучаемом покрытии необходимо варьировать и *направления обдува*, и *скорость обдува*, что обуславливает трудоёмкость моделирования

Снегоперенос разделяется на три подпроцесса:
ползучесть (диаметр частиц $> 500 \mu\text{m}$),
сальтацию (диаметр частиц $= 70 \div 500 \mu\text{m}$)
 и *образование взвесей* (диаметр частиц $< 70 \mu\text{m}$)

Сальтация вносит наибольший вклад в массоперенос снега – **50-75%!**
 Именно поэтому *в общем случае* при моделировании снегопереноса основное внимание необходимо уделить *сальтации*

Для моделирования сальтации в численной методике применяется **модель «уноса-отложения»** (Naaim et. al, 1998)

Полагается, что поток массопереноса снега (q_g) можно разделить на два отдельных потока – *уноса* (q_-) и *отложения* (q_+), которые разделяет *граничная скорости трения* (u_τ). Если скорость трения потока u_τ ниже граничной, происходит отложение снега, если выше – унос

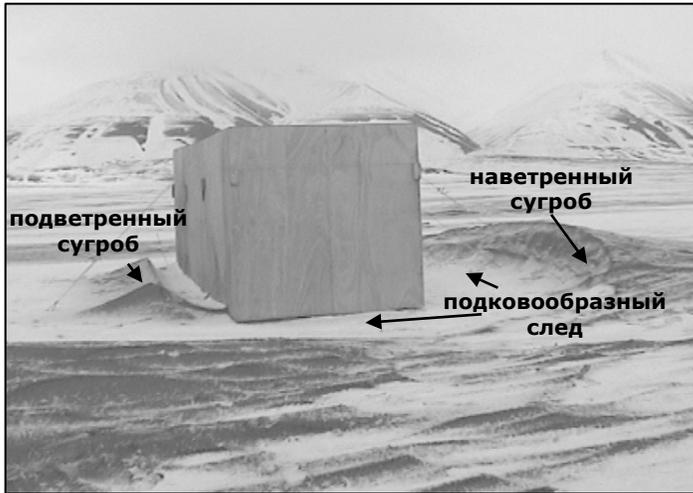
Изменение высоты снегового покрова:
$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{q_g}{\gamma}$$

 γ – насыпная плотность снега
 h – высота снегового покрова

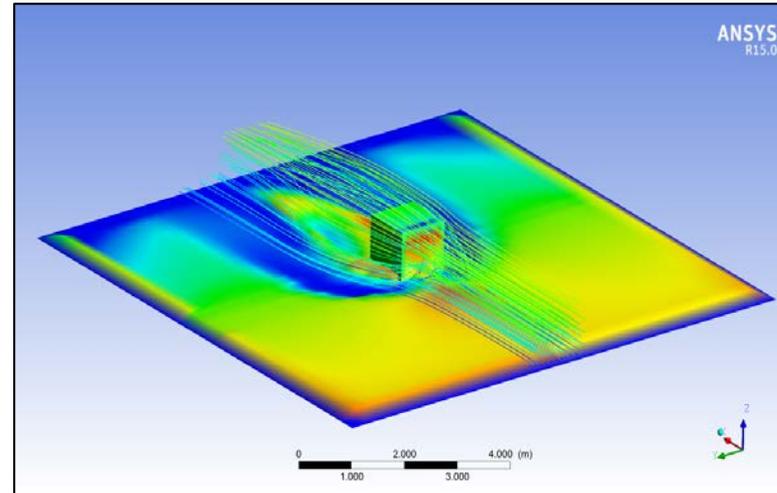
Модельная задача: обтекание отдельно стоящего куба

Цель: демонстрация классического обтекания кубического сооружения и образования а) наветренного и подветренного сугробов; б) «подковообразного» следа вокруг сооружения

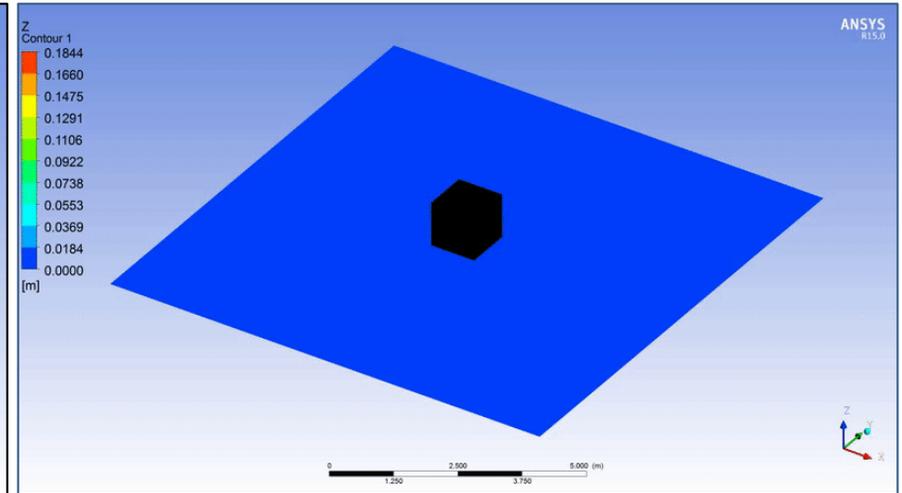
В данной задаче исследуется *качественный* характер снегонакопления



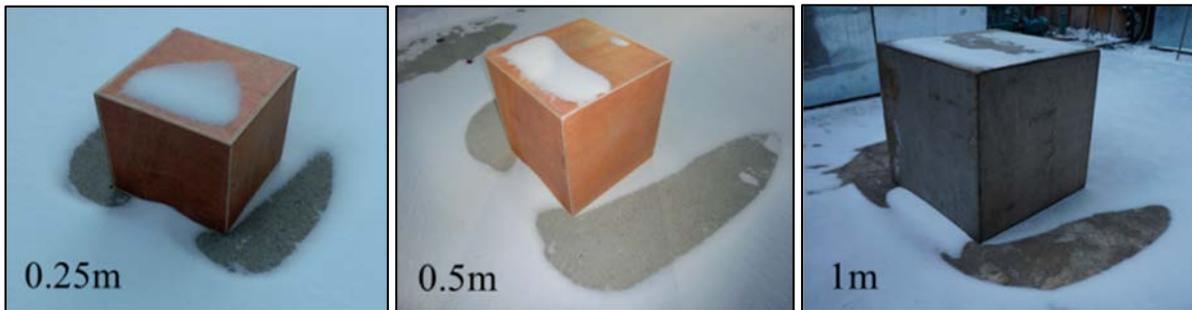
Пример натурального эксперимента (Thiis et al., 2003): обтекание параллелепипеда (о. Шпицберген, Норвегия)



Результаты численного моделирования ($T = 3600$ c)



Результаты численного моделирования



Пример физического моделирования (Liu et al., 2019): обтекание кубов различной высоты. Отчётливо визуализируется унос снега в зоне подковообразного следа

Выводы

- 1) Программная реализация нестационарной методики успешная;
- 2) Применение модели «уноса-отложения» для сальтации позволяет получать снеготложения характерных форм;
- 3) Продемонстрирована стохастичность процесса снегонакопления;
- 4) Продемонстрирована ресурсоёмкость моделирования – для сходимости задачи требуется *очень маленький шаг по времени*

Нормативная задача: накопление снега на двускатной крыше

Цель: получение нормативного неравномерного распределения снега на двускатной крыше
 В данной задаче исследуются *качественный* и *количественный* характеры снегонакопления

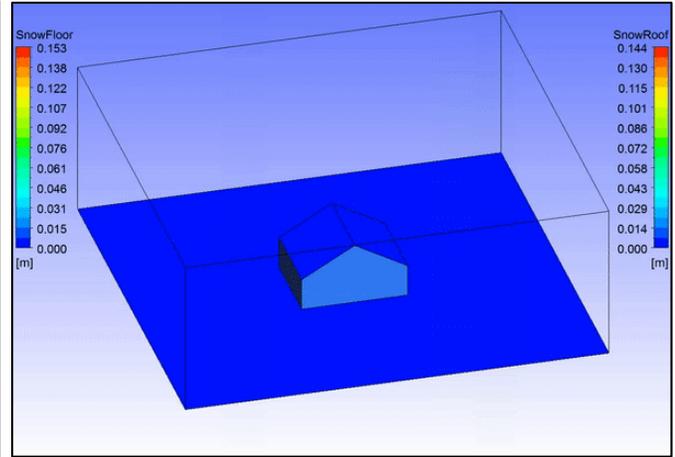
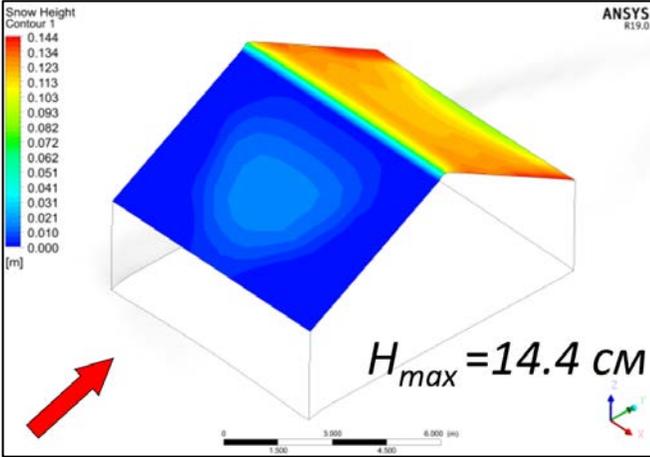
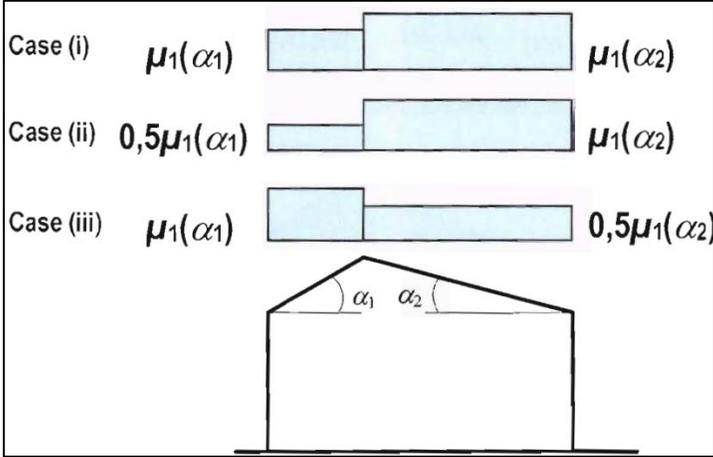
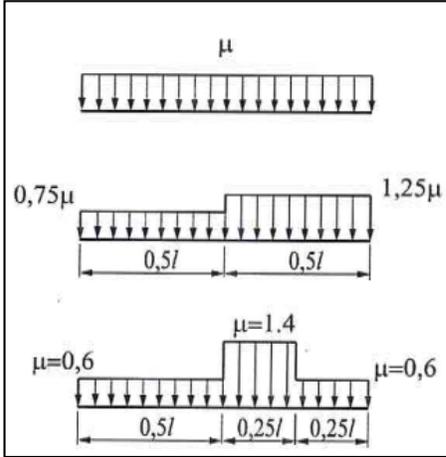


Рис. 5.3 из Еврокода 1991-1-3

Результаты численного моделирования (T = 3600 с)



Примеры естественного распределения снега на двускатных крышах
 (Thiis, T.K., O'Rourke, M.)

Выводы

Качественно получены унос снега на наветренной стороне крыши, отложение – на подветренной, и подковообразный след вокруг модели. Однако количественно результат не соотносится с нормами, поскольку унос снега практически *полный* (в отличие от ожидаемых 0.75μ).

Таким образом, продемонстрировано, что получение адекватного количественного результата требует *многократных* расчётов с *варьированием* начальных условий и анализом промежуточных результатов – *частными случаями* снегонакопления.

Численное моделирование снегоотложений и снеготранспорта на корпусе 104 Цеха строительства крупнотоннажных морских сооружений («Новатэк»)

Цель: апробировать методику на реальном строящемся объекте, для которого требуется исследовать снегонакопление на покрытии. Исследовать формы снегоотложений, получаемые варьированием начальных условий, и применимость методики



Площадка строительства
(с. Белокаменка, Мурманская обл.)



Физическое моделирование коэффициента μ
(«УНИКОН»)

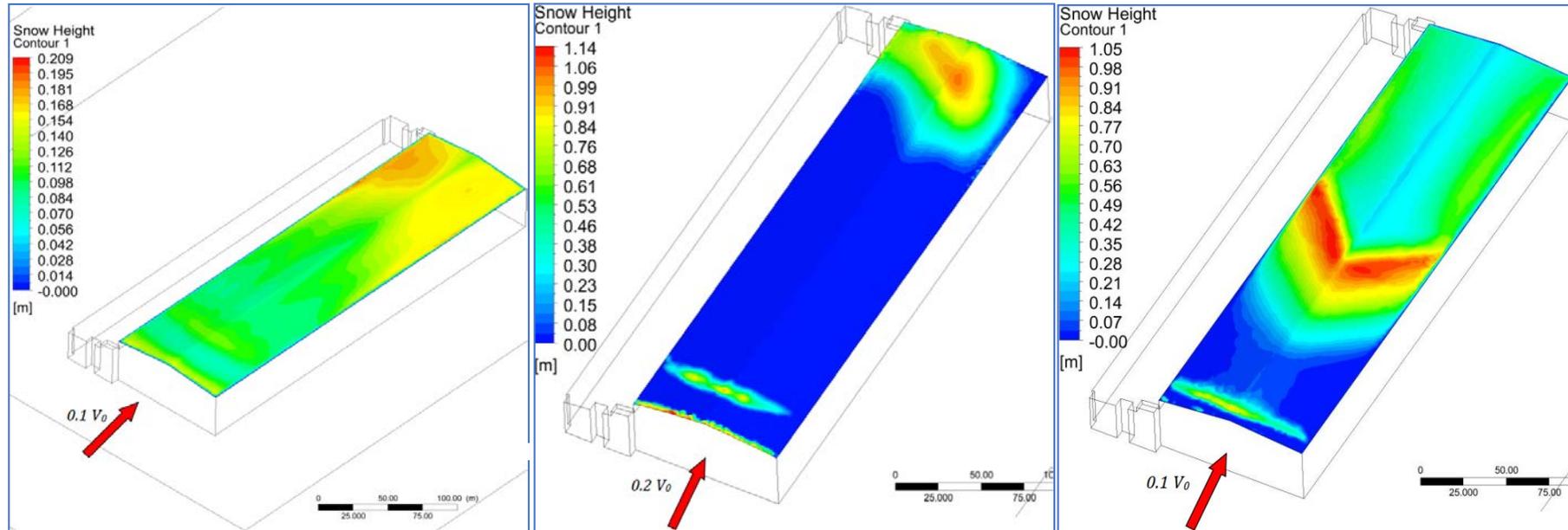


Модель
исследуемого
сооружения

Физическое моделирование
также демонстрирует
стохастичность
снегонакопления!

Физическое моделирование коэффициента μ
(Крыловский государственный научный центр)

Численное моделирование снеготложений и снеготеноса на корпусе 104 Цеха строительства крупнотоннажных морских сооружений («Новатэк»)



1) $V_{10M} = 0.84$ м/с; $H_{max} = 20.9$ см
Условия слабого снегопада

2) $V_{10M} = 1.69$ м/с; $H_{max} = 114$ см
Условия слабого снегопада

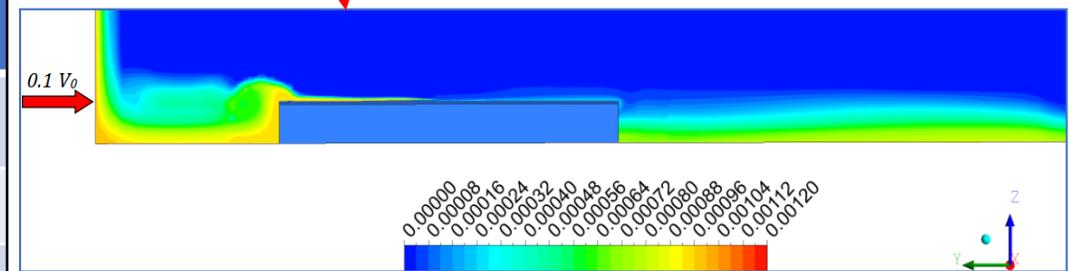
3) $V_{10M} = 0.84$ м/с; $H_{max} = 105$ см
Условия умеренного снегопада

Вывод:

Варьированием начальных условий получены три распределения снеготложений на покрытии Цеха. Несмотря на то, что *качественно* результаты позволяют определить направление снеготеноса, на основании полученных данных *нет возможности* сделать выводы о *количественном* значении коэффициента формы μ .

Таким образом, невозможно *напрямую* использовать данные о полученном с помощью методики распределении снега по покрытию для определения значений коэффициента формы μ .

| № случая | Моделируемый снегопад | $V_{к1}$ [м/с] | H_{max1} [см] | C_{max1} [%·10 ⁻³] | Характер снеготложений |
|----------|-----------------------|----------------|-----------------|----------------------------------|------------------------|
| 1 | Слабый | 1.09 | 20.9 | 0.19 | Близкий к равномерному |
| 2 | Слабый | 2.17 | 114 | 1.34 | Неравномерный |
| 3 | Умеренный | 1.09 | 105 | 1.2 | Неравномерный |



Концентрация снега в расчётной области (%)

Сводная таблица расчётных случаев

Описание методики

Структурная схема методики

Объект исследования

Анализ климатических характеристик места расположения объекта, определение возможных зон снегонакопления и снеготранспорта

Постановка задачи

Выбор направлений и скоростей обдува, размера расчётной области

Выбор модели турбулентности

В том числе из соображений оптимизации вычислений

Задание параметров расчёта

Начальные и граничные условия, число итераций, решатели

Аэродинамический расчёт

Стационарный, с использованием дополненной гипотезами модели уноса-отложения

Инженерный анализ полученных результатов

Получение расчётного коэффициента μ путём синтеза численного моделирования и строительных норм

В связи с выявленными при верификации и апробации *нестационарной* методики проблемами необходимо изменить подход и разработать *стационарную* методику, повысив ресурсоёмкость, но не потеряв в точности

В стационарной постановке модель «уноса-отложения» (Naaim et. al, 1998) дополняется двумя гипотезами:

Гипотеза 1. На покрытии изначально имеется некоторое количества снега $\mu_0 = const$

Гипотеза 2. Поток q_g и входящие в него параметры не изменяются во времени.

Тогда частную производную в уравнении изменения высоты снегового покрова можно заменить на полную:

$$\int_0^H dh = \frac{1}{\gamma} \int_0^T q_g dt \Rightarrow H = \frac{(\mu_m - \mu_0) S_n}{\gamma} = \frac{T}{\gamma} q_g \Rightarrow \mu_m = \mu_0 + \frac{T}{S_n} q_g$$

Варьируя начальное количество снега μ_0 , наблюдаемый период времени T и скорость ветра на входе расчётной модели V_0 , можно получать различные распределения снегового покрова H по поверхности покрытия с целью поиска наиболее неблагоприятных, которые определяются из соображений механической безопасности здания или сооружения

Получаемые распределения *моделируемого* коэффициента формы μ_m используются *качественно* в сочетании с нормативными рекомендациями

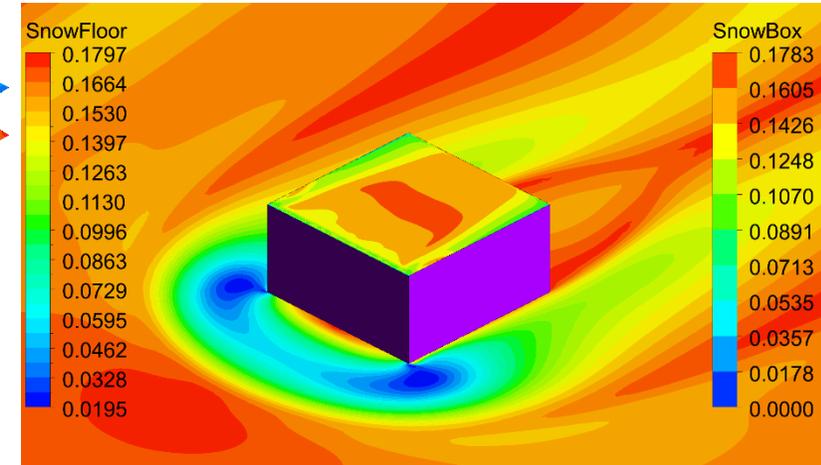
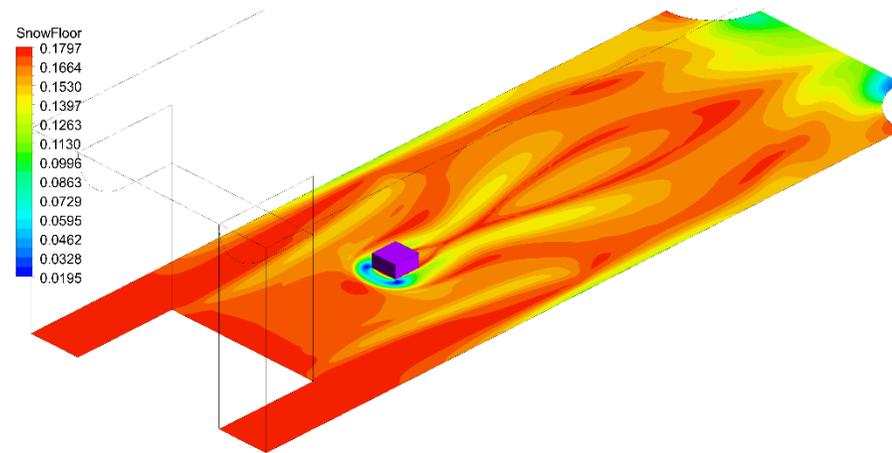
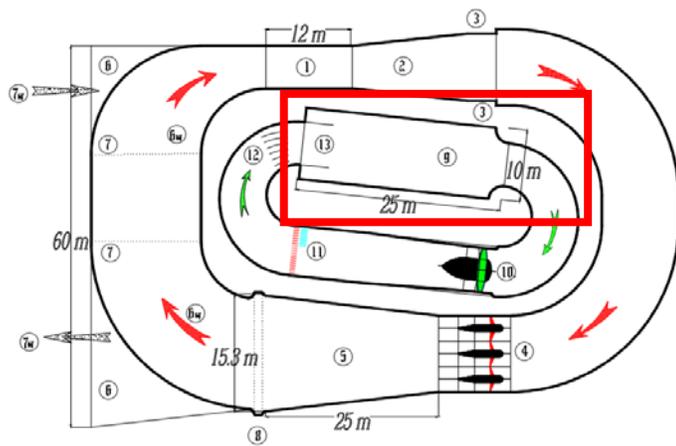
На основе синтеза этих подходов получается *расчётный* коэффициент формы μ

Верификация методики

Модельная задача: обтекание отдельно стоящего куба

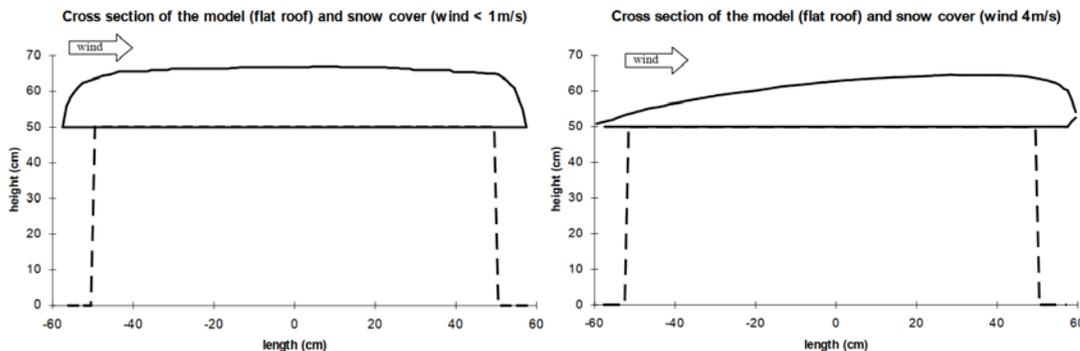
Цель: демонстрация классического обтекания кубического сооружения и образования а) наветренного и подветренного сугробов; б) «подковообразного» следа вокруг сооружения

В данной задаче исследуется *качественный* характер снегонакопления



Моделируемая секция внутреннего (климатического) контура аэродинамической трубы CSTB (Нант, Франция)

Результаты численного моделирования ($T = 3600$ с)



В трубе CSTB также были измерены снегоотложения на поверхности куба, однако в данной задаче их количество не рассматривается

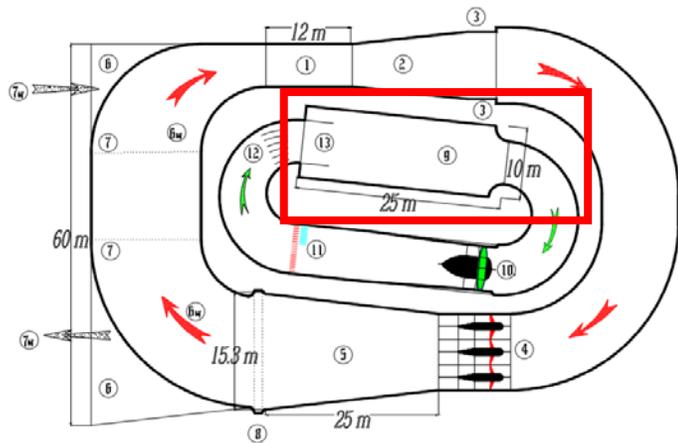
Выводы

- 1) Программная реализация *стационарной* методики успешная;
- 2) Применение модифицированной модели «уноса-отложения» для сальтации позволяет получать снегоотложения характерных форм;
- 3) Продемонстрирована возможность проводить моделирование снегонакопления в стационарной постановке и адекватность получаемых форм снегоотложений

Верификация методики

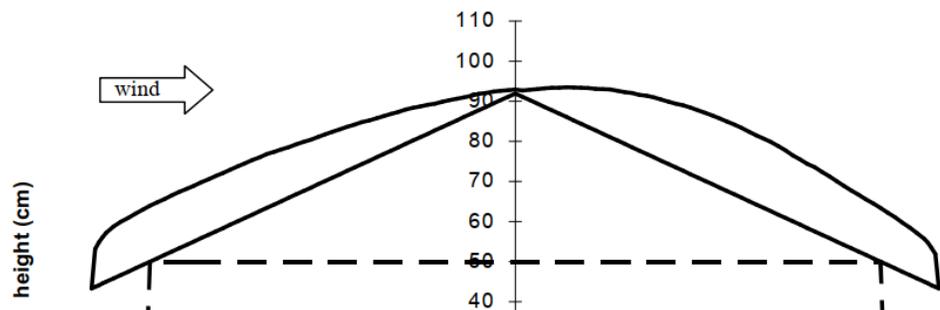
Нормативная задача: накопление снега на двускатной крыше

Цель: получение нормативного неравномерного распределения снега на двускатной крыше
 В данной задаче исследуются *качественный* и *количественный* характеры снегонакопления

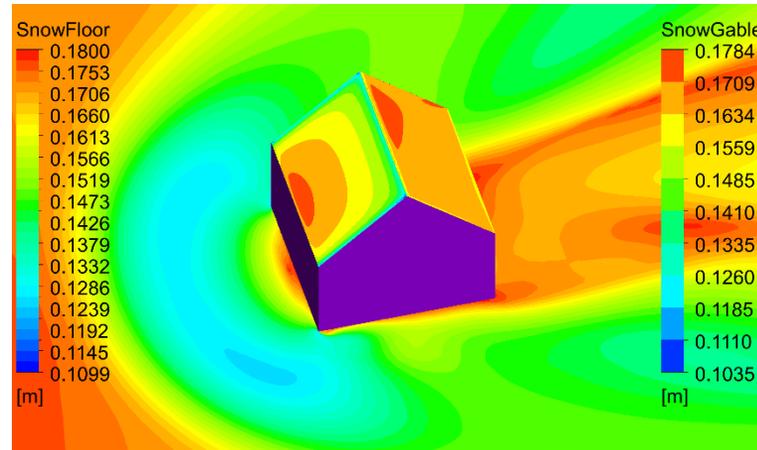


Моделируемая секция внутреннего (климатического) контура аэродинамической трубы CSTB (Нант, Франция)

Cross section of the model (roof 40°) and snow cover τ (wind 4m/s)



Измеренное в трубе CSTB неравномерное распределение снега



Результат численного моделирования ($T = 3600$ с)

| Моделирование | Наветренная сторона | Подветренная сторона |
|----------------|---------------------|----------------------|
| Физическое | 0.88 | 1.13 |
| Математическое | 0.96 | 1.03 |
| Разница | 9.1% | 8.8% |

Моделируемый коэффициент формы μ на сторонах кровли

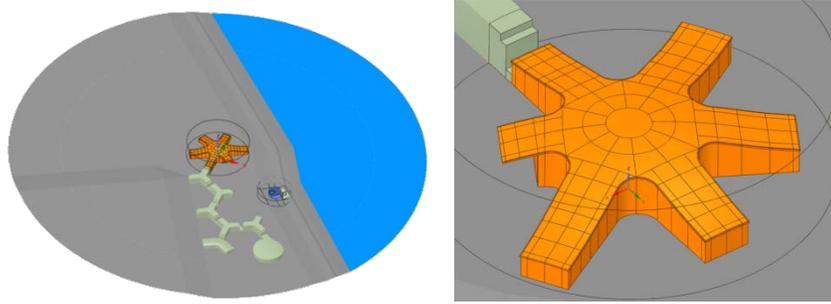
Выводы

Качественно получено неравномерное распределение снега на кровле и подковообразный след вокруг модели сооружения
Количественно результат близок к физическому моделированию, но недостаточно близок к нормативному распределению (расхождение ~22%)

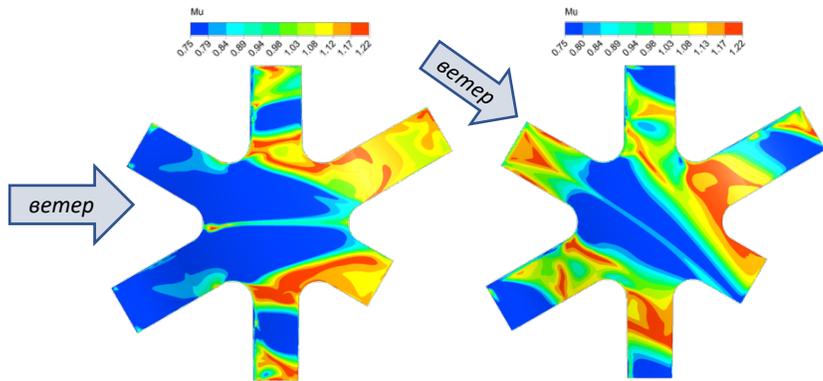
Таким образом, продемонстрировано *преимущество* стационарного подхода перед нестационарным, однако *напрямую* результаты моделирования использоваться всё ещё не могут

Апробация методики

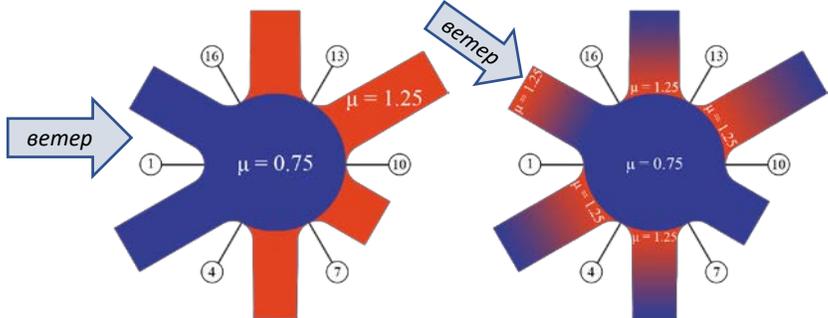
Подмосковный образовательный молодежный центр «Мастерская управления «Сенеж» (г. Солнечногорск)



Расчётная область и геометрическая модель

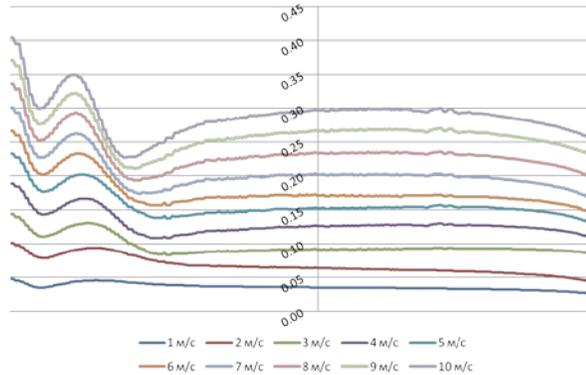


Расчетное распределение коэффициента μ

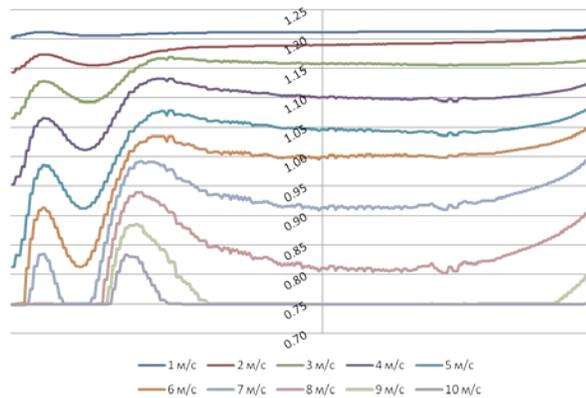


Рекомендуемые схемы коэффициента μ для прочностных расчетов

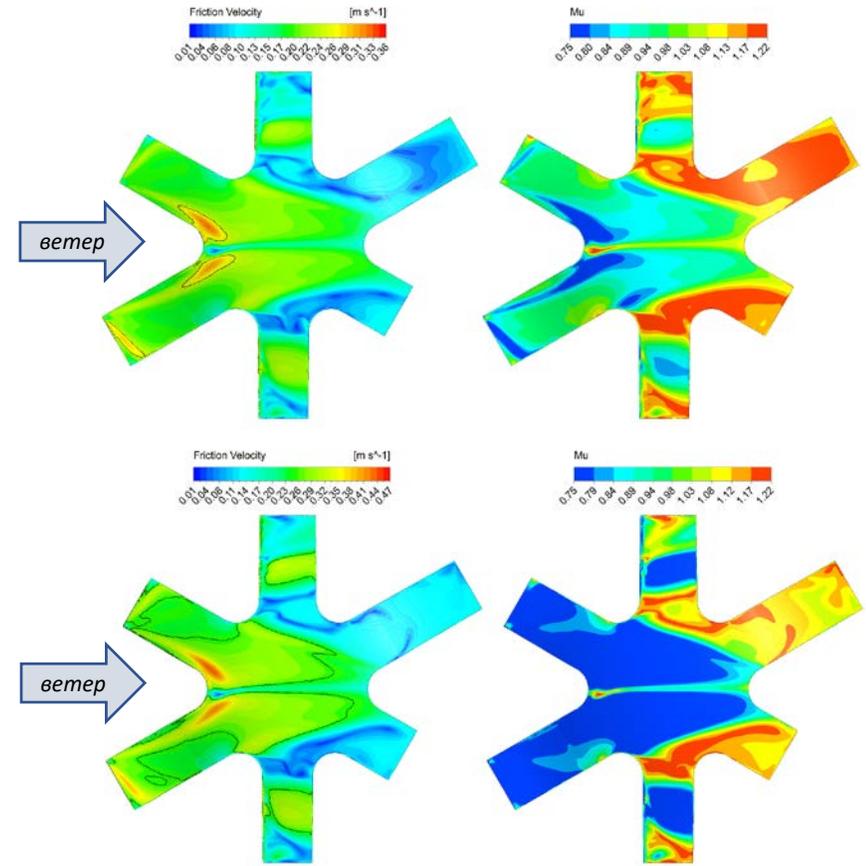
Методика была апробирована на реальном строящемся объекте, для которого синтез численного моделирования и нормативных рекомендаций позволил получить схемы расчётного коэффициента формы μ для прочностных расчётов



Скорость трения в центральном сечении вдоль направления обдува



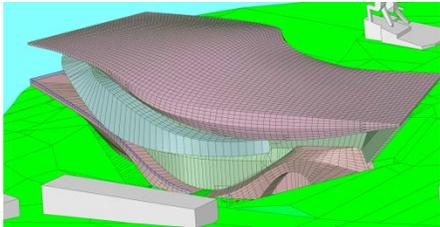
Расчётный коэффициент μ в центральном сечении вдоль направления обдува



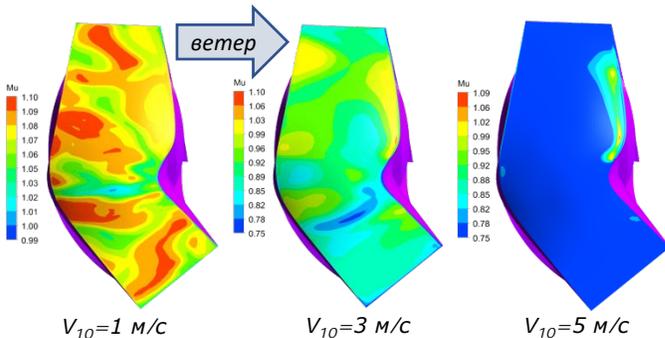
Изменение изополей скорости трения (слева) и расчётного коэффициента μ (справа) по мере увеличения скорости потока

Апробация методики

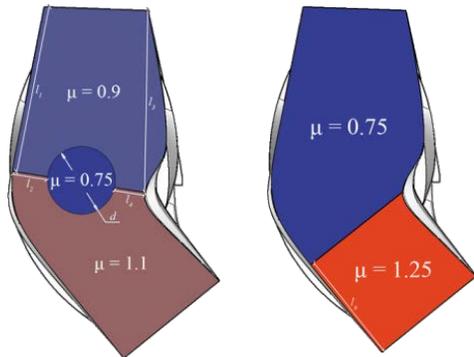
Театр оперы и балета (г. Севастополь)



Геометрическая модель

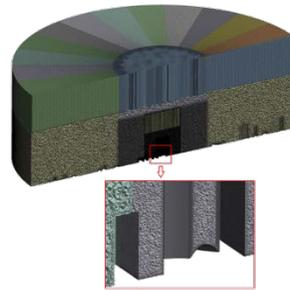
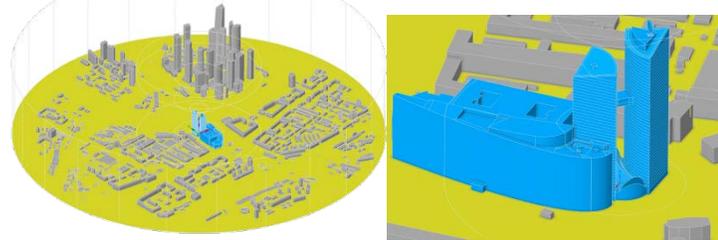


Расчетное распределение коэффициента μ

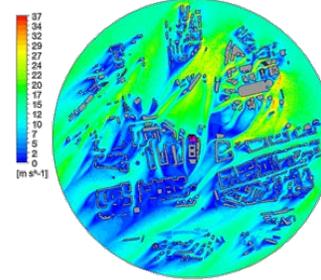


Рекомендуемые схемы коэффициента μ для прочностных расчетов

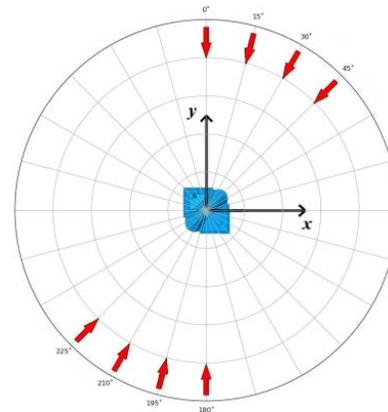
«Сбер-Сити» на пересечении ул. Кульнева и Кутузовского проспекта



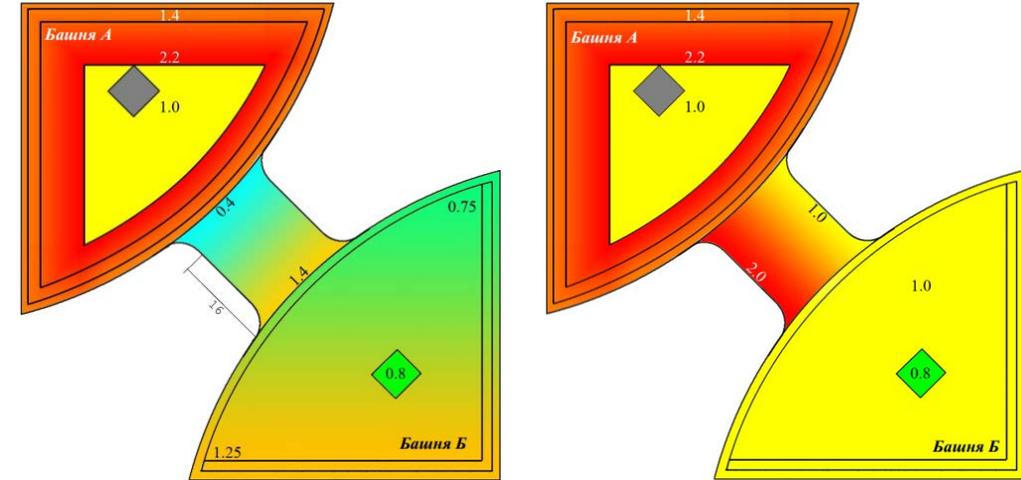
Расчетная модель (~13.8 млн. КО)



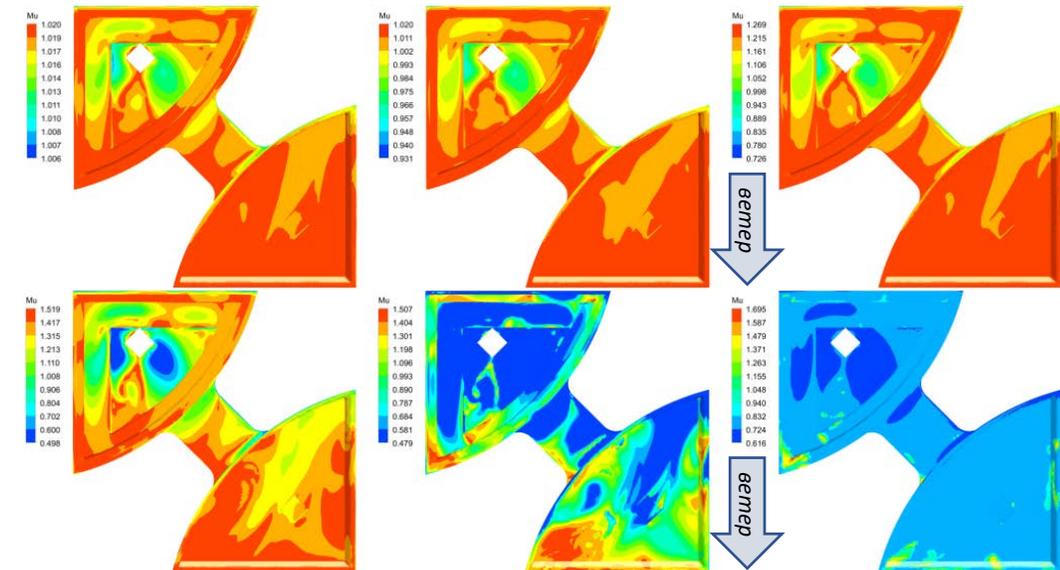
Средние скорости ветра, м/с



Направления обдува

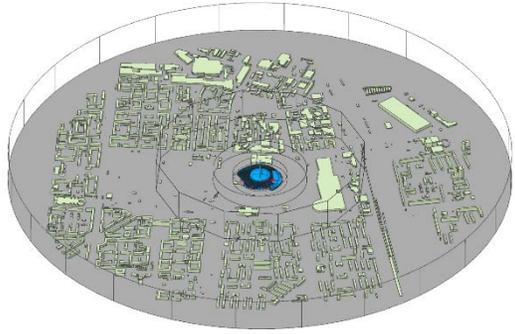


Рекомендуемые схемы коэффициента μ для прочностных расчетов

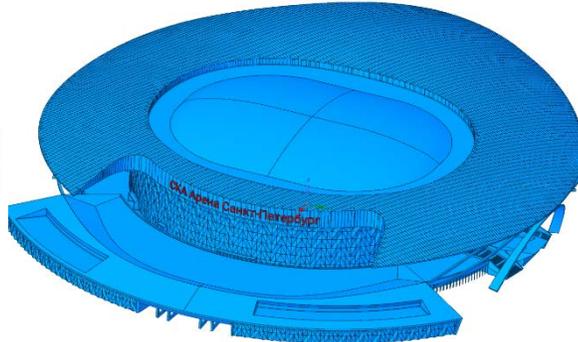


Изменение изополей расчётного μ по мере увеличения скорости потока

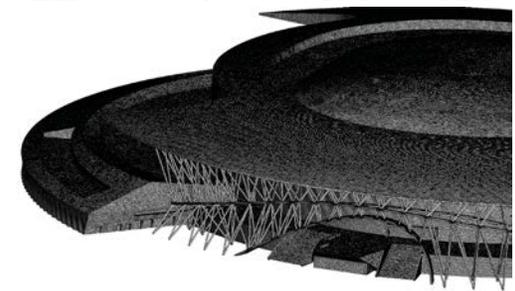
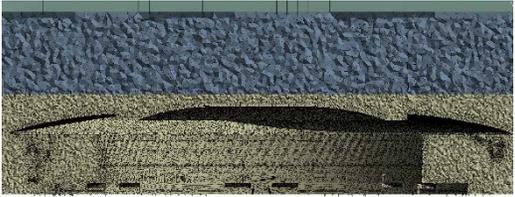
«СКА Арена» (г. Санкт-Петербург)



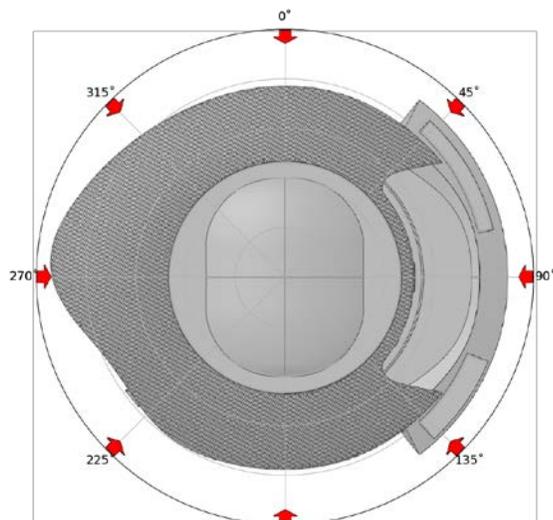
Расчётная область
(+ рельеф и окружающая застройка)



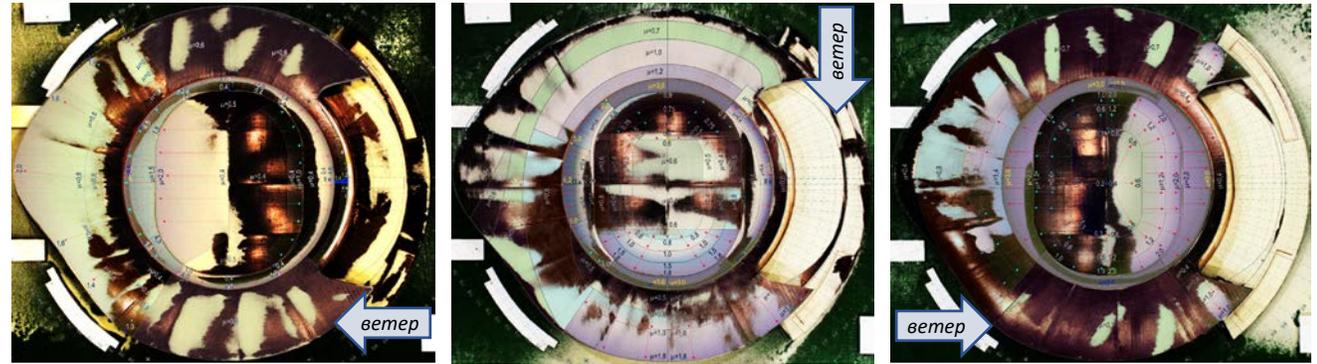
Геометрическая модель



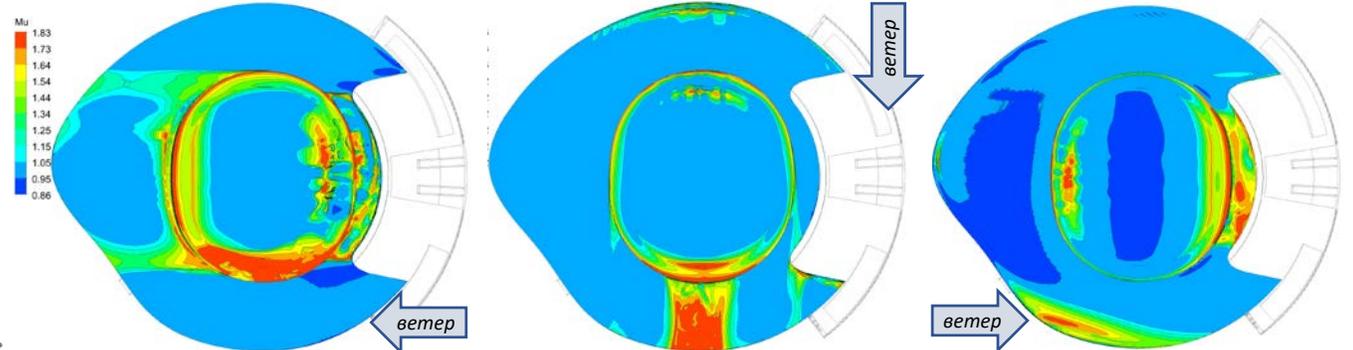
Конечнообъёмная сетка
(~ 12.38 млн. КО)



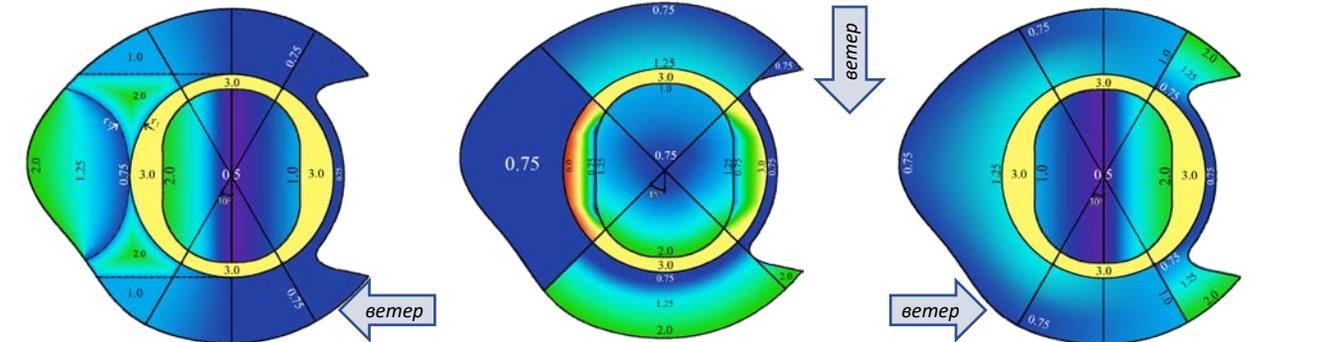
Расчётные направления
ветрового потока



Физическое моделирование коэффициента μ («УНИКОН»)



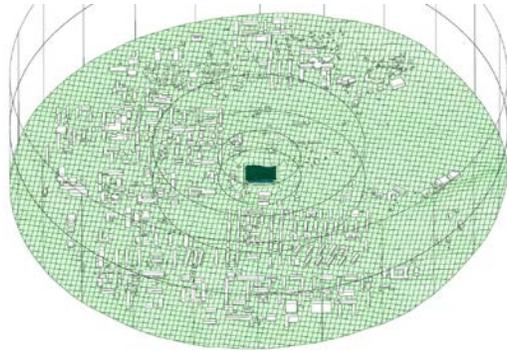
Численное моделирование коэффициента μ



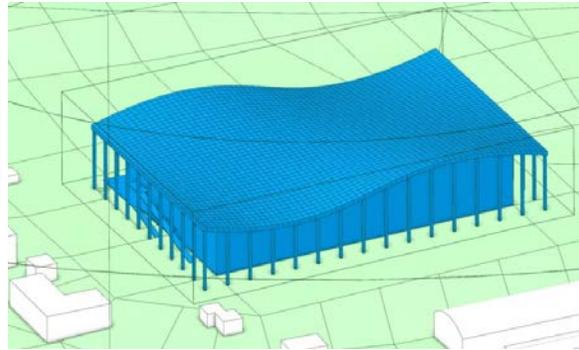
Рекомендуемая схема коэффициента μ для прочностных расчётов

Апробация методики

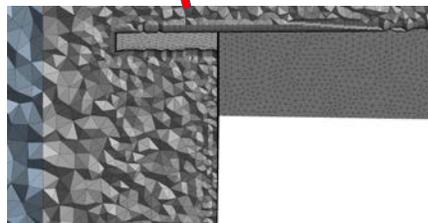
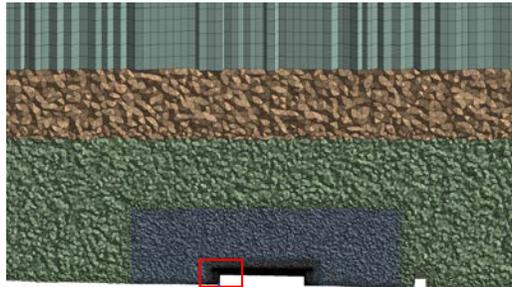
«Центр водных видов спорта» (г. Южно-Сахалинск)



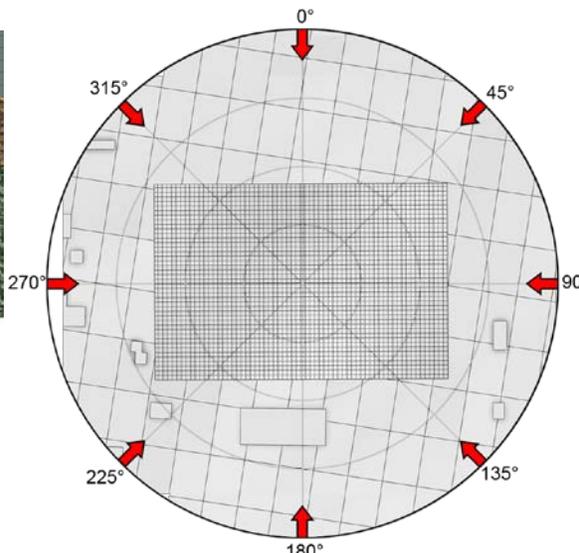
Расчётная область
(+ рельеф и окружающая застройка)



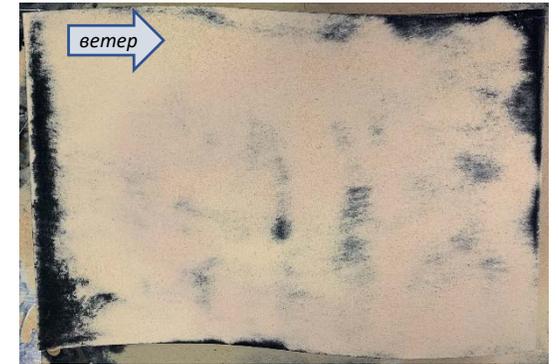
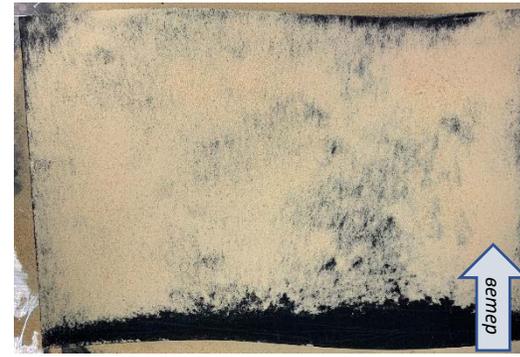
Геометрическая модель



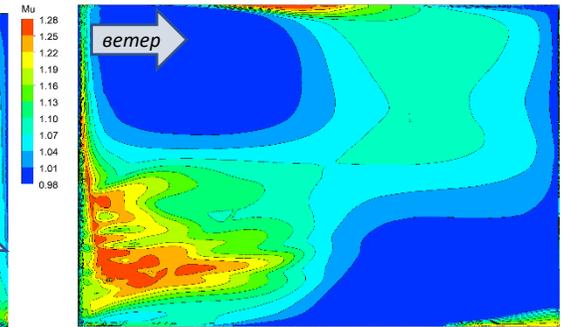
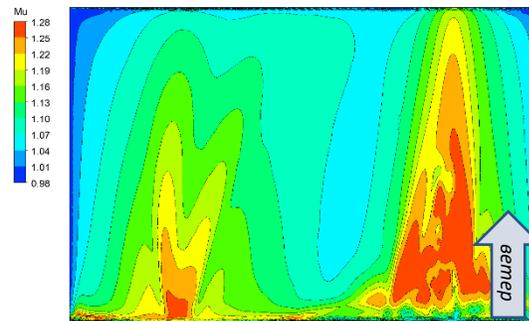
Конечнообъёмная сетка
(~ 7.97 млн. КО)



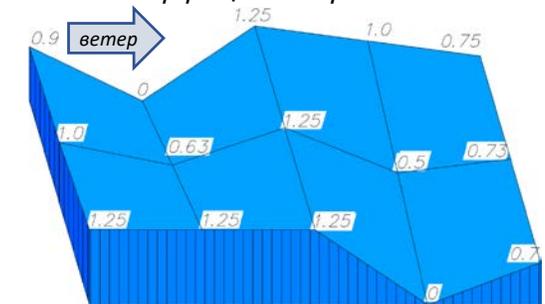
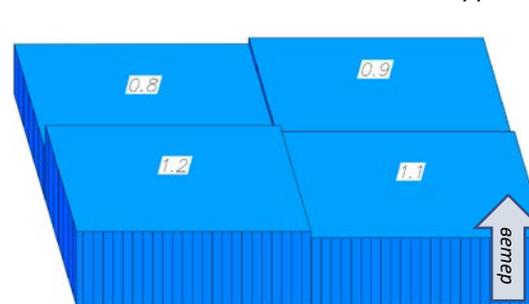
Расчётные направления
ветрового потока



Физическое моделирование коэффициента μ (НИУ МГСУ)

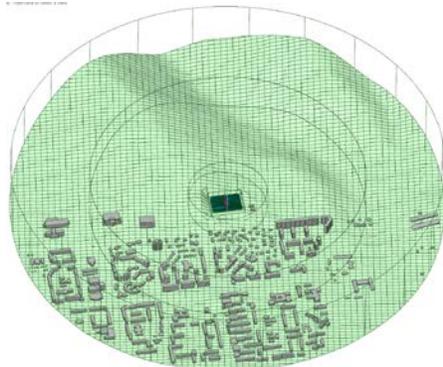


Численное моделирование коэффициента μ

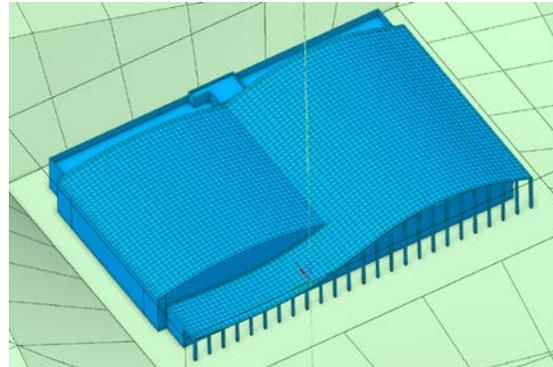


Рекомендуемая схема коэффициента μ для прочностных расчётов

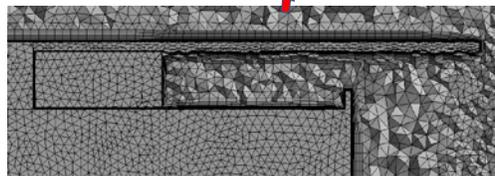
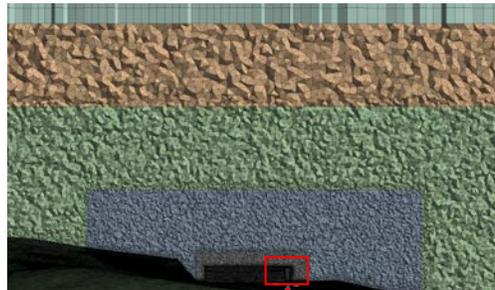
«Универсальный спортивный комплекс» (г. Южно-Сахалинск)



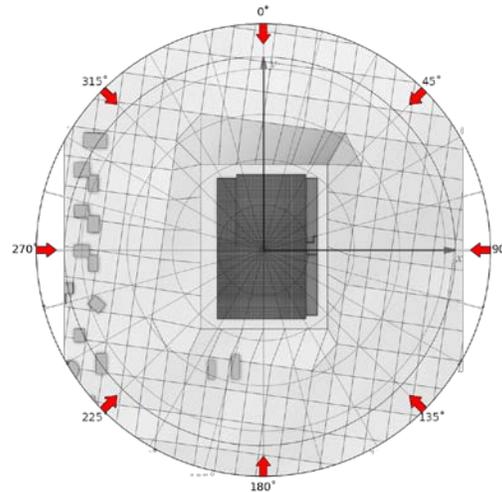
Расчётная область
(+ рельеф и окружающая застройка)



Геометрическая модель



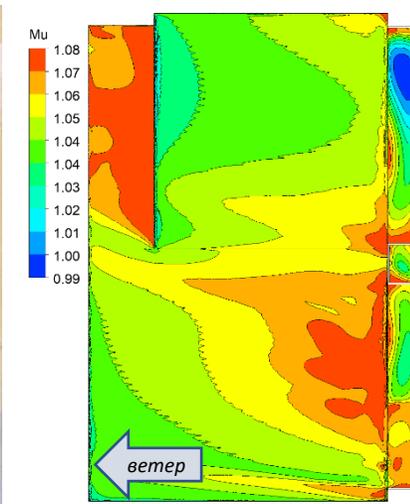
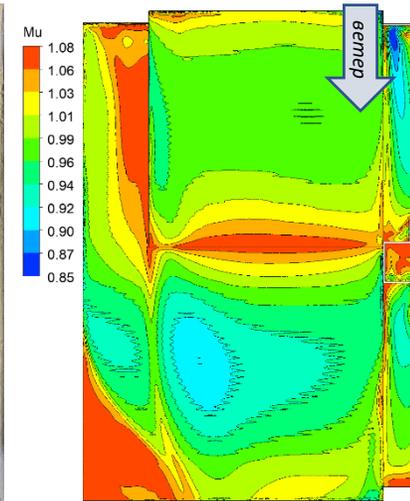
Конечнообъёмная сетка
(~ 11.43 млн. КО)



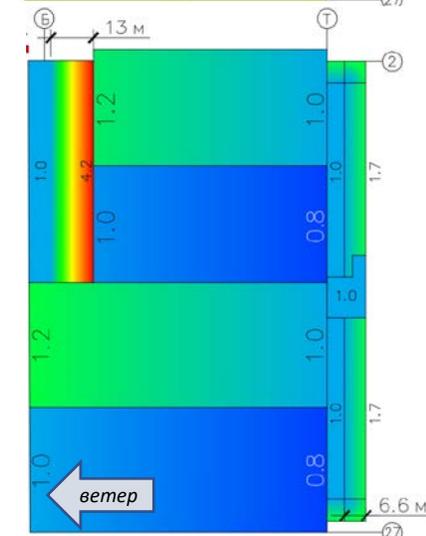
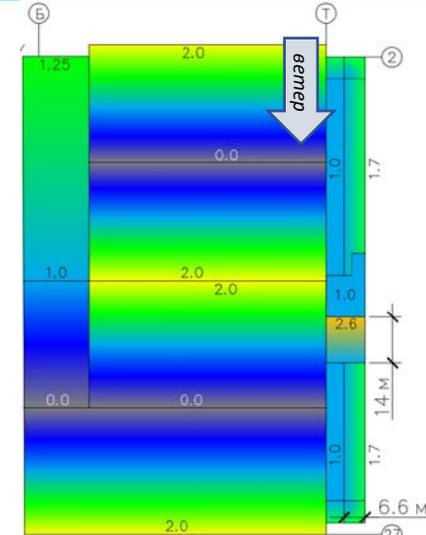
Расчётные направления
ветрового потока



Физическое
моделирование
коэффициента μ
(НИУ МГСУ)

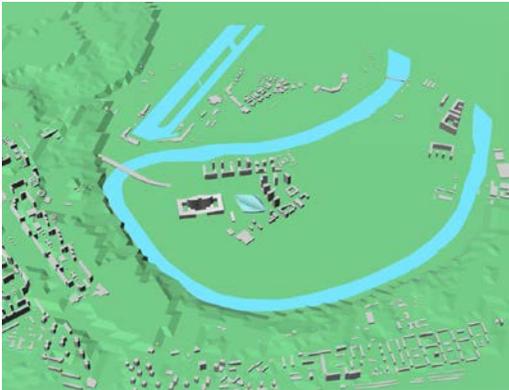


Численное
моделирование
коэффициента μ

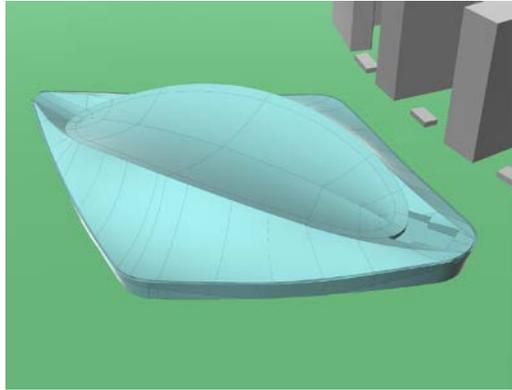


Рекомендуемая схема
коэффициента μ для
прочностных расчётов

Сёрфинг-центр «Волна» (г. Москва)



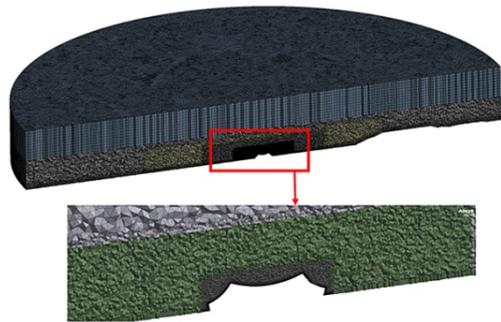
Расчётная область
(+ рельеф и окружающая застройка)



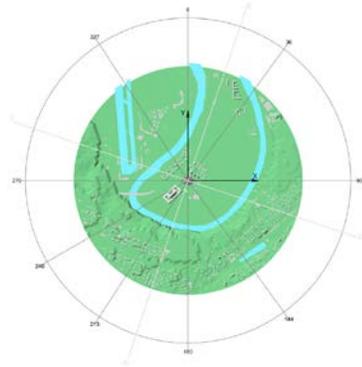
Геометрическая модель



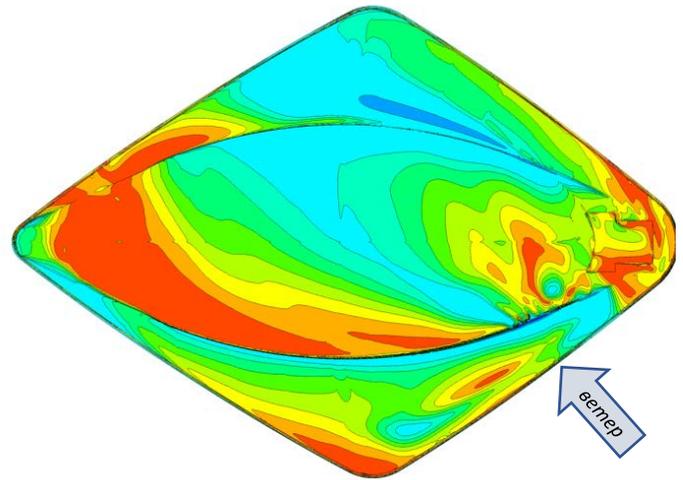
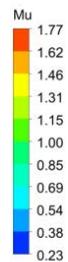
Физическое моделирование коэффициента μ (НИУ МГСУ)
(без учёта окружающей застройки)



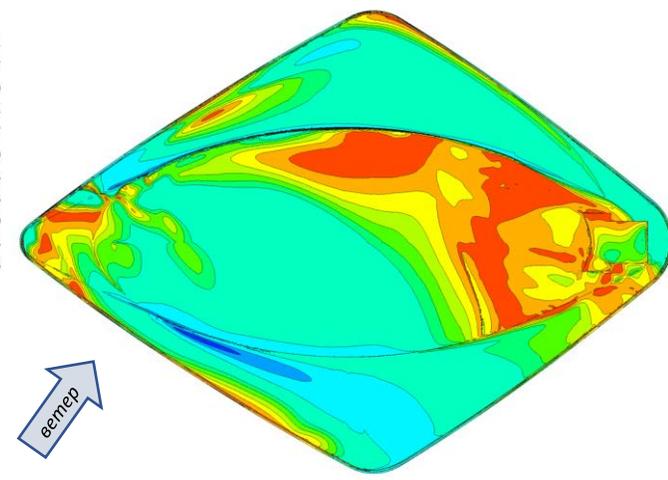
Конечнообъёмная сетка
(~9 млн. КО)



Расчётные направления
ветрового потока



Численное моделирование коэффициента μ
(без учёта окружающей застройки)



Апробация методики

Без учёта окружающей застройки



С учётом окружающей застройки



Без учёта окружающей застройки

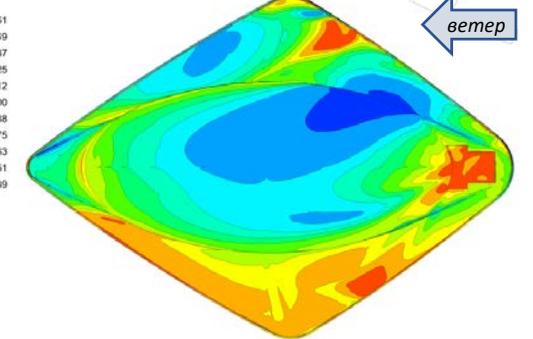
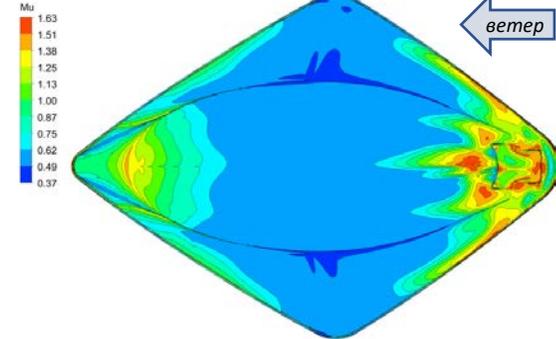
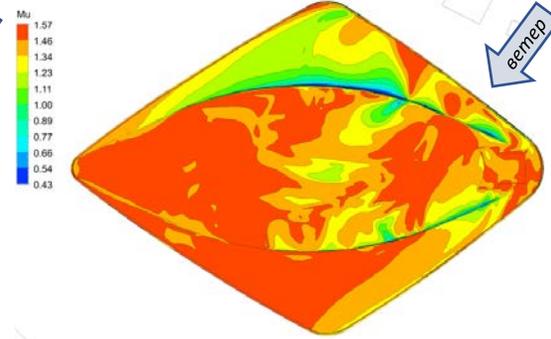
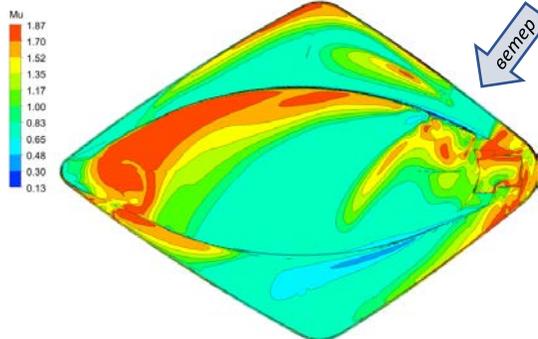


С учётом окружающей застройки



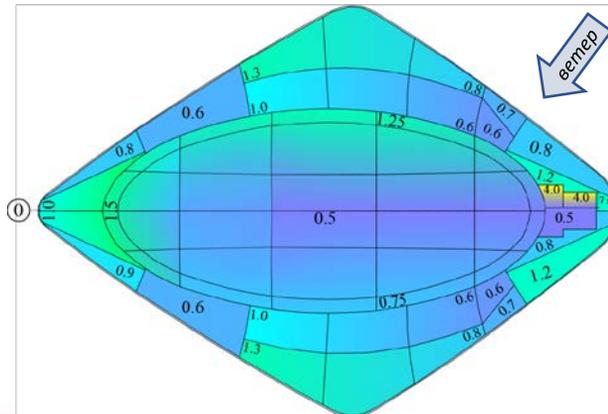
Физическое моделирование коэффициента μ (НИУ МГСУ)

Физическое моделирование коэффициента μ (НИУ МГСУ)

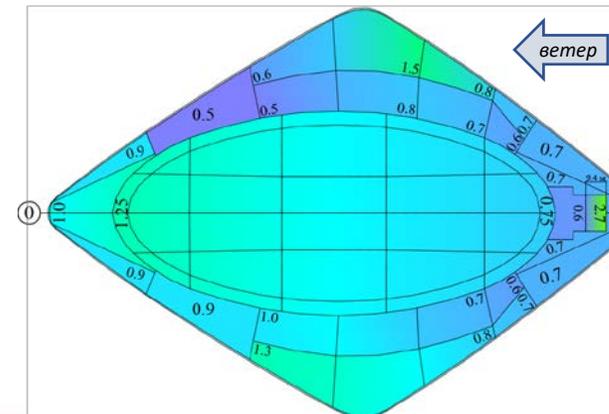


Численное моделирование коэффициента μ

Численное моделирование коэффициента μ



Рекомендуемая схема коэффициента μ для прочностных расчётов



Рекомендуемая схема коэффициента μ для прочностных расчётов

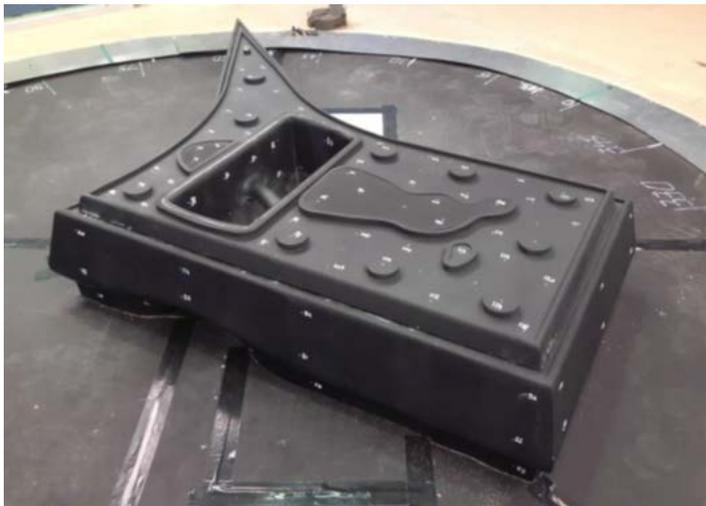
Технопарк Сбербанка в Сколково (г. Москва)



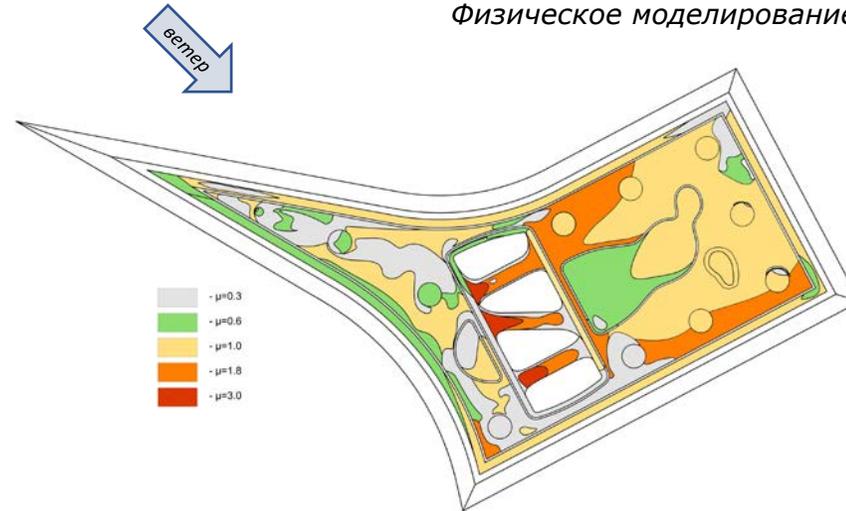
Рендер объекта



Физическое моделирование коэффициента μ (НИУ МГСУ)

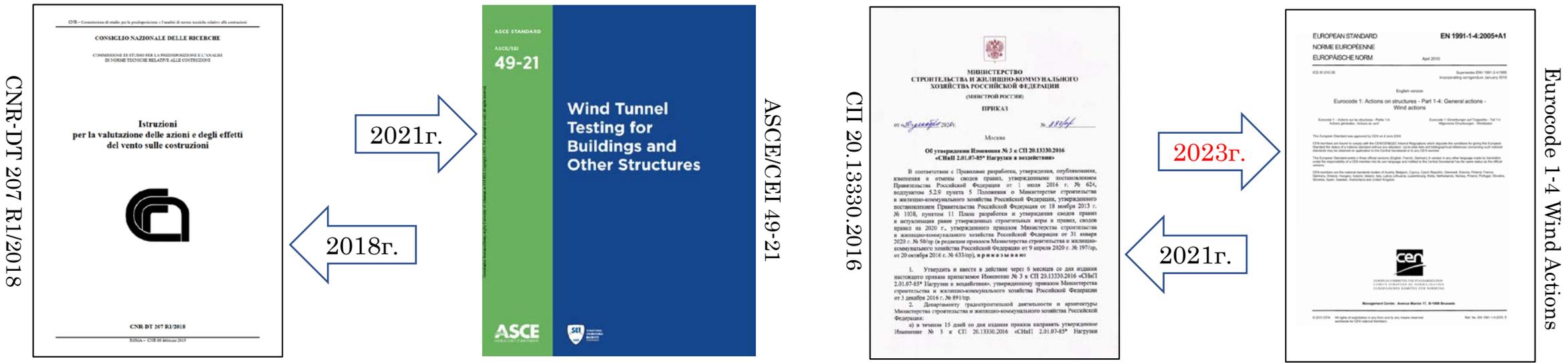


Модель в аэродинамической трубе



Схемы распределения снеготложений

Новое в международном нормативном поле (где же российские нормы?)



В итальянских нормах поясняется, что слабое отражение CFD подхода в различных нормативных документах – временное явление.

В последней редакции добавлено Приложение по использованию методов CFD, содержащее основные понятия, пределы применимости и общие требования.

Рекомендуется применять CFD для учета рельефа местности.

По тексту неоднократно упоминается, что моделированием должен заниматься специалист в области CFD, а не проектировщик строительных конструкций.

В нормах США рекомендуется использовать методы вычислительной аэродинамики для учета сложного рельефа местности.

Указывается, что CFD методы являются многообещающими в моделировании снеговых нагрузок. Предлагается использовать CFD методы в сочетании с физическим моделированием снегонакопления для получения более надежных количественных результатов.

В изм. №3 к СП 20.13330.2016 удалены пункты о возможности применения математического (численного) моделирования. *Идем в противоположную от технически развитых стран сторону (по направлению к пещере)!*

Исторически первые рекомендации по применению в строительстве CFD-моделирования были выполнены Европейской и Японской командами по заказу ответственных за нормирование органов и были опубликованы в виде научных статей в 2004 и 2008 г. Впрочем, ссылка на научные статьи в нормативных документах является обычной практикой во многих иностранных нормах.

Прогнозы

1. Бурное развитие вычислительной гидро-газодинамики (CFD), поддерживаемое запросом множества областей промышленности, продолжится. Будут разрабатываться новые и совершенствоваться старые модели физических и химических процессов в газообразных и жидких средах.
2. Вычислительные мощности и эффективность вычислительных алгоритмов будут расти, что позволит решать задачи со все большей размерностью, точностью и временным разрешением.
3. Строительные нормативные документы постепенно повсеместно легитимизируют применение CFD-методов, установив к ним разумные требования.
4. Экспериментальная аэродинамика на мировом уровне продолжит плавный рост по мере разработки новых средств измерения, новых материалов и специальных устройств (например, средств доставки снегоимитатора в воздушный поток).
5. Применение расчетно-экспериментального подхода к моделированию климатических нагрузок станет нормой (стандартом).
6. Прогресс в строительной экспериментальной аэродинамики в России остается под вопросом. Фактически, область находится в полной стагнации последние 50 лет, безнадежно отстав от мирового уровня. Судя по всему, причина стагнации кроется в глубоком неприятии честной (научной) конкуренции и привычке использовать административный ресурс для борьбы с конкурентами.

Выводы

1. В НИУ МГСУ на базе НОЦ КМ им. А.Б. Золотова и УНПЛ ААИСК налажено комплексное (расчетно-экспериментальное) моделирование ветровых и снеговых нагрузок и воздействий. Такой подход показал свою эффективность на ряде значимых объектах.
2. Каждый из подходов к моделированию ветровых и снеговых нагрузок (математическое или физическое) имеет свои преимущества и недостатки. Как следствие, применение каждого из них оказывается эффективней в определенных задачах. В ряде «отягощенных» задач наиболее надежный подход - комплексные (расчетно-экспериментальные) исследования.
3. Российская нормативная база не отражает прогресса и возможностей вычислительной гидрогазодинамики и не стимулирует к развитию экспериментальные подходы
4. Существующее мнение об «эталонности» того или другого подхода к моделированию ветровых и снеговых нагрузок и воздействий является ошибочным. Оба метода имеют свои допущения, позволяющие с некоторой точностью, варьирующейся от почти полного соответствия натуре до крайне приблизительного (качественного) характера результатов, решать задачи строительной аэродинамики. В силу вышесказанного, подход, при котором постулируется путь к полному соответствию результатов физического и математического моделирования, является ошибочным.

Предложения в резолюцию

1. Легитимизировать применение математического (численного) моделирования ветровых нагрузок путем внесения изменений в п. 11.1.7 и 11.2 СП 20.13330.
2. Легитимизировать использование математического (численного) моделирования вихревого возбуждения и аэроупругой неустойчивости конструкций путем внесения изменений в раздел 11 и п. 11.3 СП 20.13330 и в п. 6.6 СП 296.1325800.
3. Легитимизировать использование математического (численного) моделирования ветровой комфортности пешеходных зон, а также установить четкие критерии её оценки путем внесения соответствующего пункта в раздел 11 СП 20.13330.
4. Установить основные принципы и требования к процедуре математического (численного) моделирования ветровых нагрузок и воздействий путем разработки соответствующего Приложения к СП 20.13330.
5. Легитимизировать применение математического (численного) моделирования снеговых нагрузок путем внесения изменений в п. 10.4 СП 20.13330, установить основные принципы и требования к процедуре математического (численного) моделирования снеговых нагрузок путем разработки соответствующего Приложения к СП 20.13330.
6. С целью обеспечения механической безопасности объектов строительства установить требование о возможности проведения математического (численного) моделирования ветровых и снеговых нагрузок и воздействий только специализированной научной организацией, обладающей доказанным опытом в области вычислительной гидрогазодинамики путем внесения соответствующих пунктов в СП 20.13330.
7. С целью повышения механической безопасности и экономической эффективности рекомендовать для уникальных сооружений применение комплексного расчетно-экспериментального подхода к моделированию ветровых и снеговых нагрузок и воздействий.
8. Активизировать содержательную работу по линии ФАУ ФЦС Минстроя по совершенствованию СП 20.13330 с целью актуализации устаревших методик и положений.