

Научная статья / Original research article
УДК 69.051
DOI:10.31660/0445-0108-2025-6-117-133
EDN: THMTVI



Проектирование объектов нефтегазовой инфраструктуры с учетом данных аэродинамического моделирования

П. В. Чепур*, Н. С. Молокитина, Д. И. Староверов, В. И. Берг

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация
*chepur_p_v@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрен комплексный подход проектирования объектов нефтегазового комплекса, реализация которого позволит повысить надежность и срок эксплуатации объектов нефтегазовой инфраструктуры в суровых климатических условиях. Представлены данные аэродинамического моделирования, на основании которых выполнена оценка распределения ветровых потоков и определены потенциальные зоны накопления снега. Полученные данные крайне важны для прогнозирования изменения состояния многолетнемерзлых грунтов, и, как следствие, предотвращения деформации фундаментов и снижения эксплуатационных рисков. На основании методов гидродинамического моделирования (CFD, модуль CFX) и использования программ ANSYS и Solidworks произведены расчеты, позволившие определить распределение статического и динамического давлений ветра на поверхностях сооружений и идентифицировать участки турбулентности. В рамках моделирования были сформулированы гипотезы, характеризующие особенности снегонакопления вблизи объектов нефтегазовой инфраструктуры. Анализ подтвердил положительный эффект и необходимость интеграции аэродинамического моделирования в процесс проектирования нефтегазовой инфраструктуры с целью повышения эксплуатационной надежности сооружений. На основании результатов были выявлены ключевые закономерности перераспределения снеговых нагрузок и влияния ветровых потоков при изменении расположения объектов друг относительно друга и относительно преобладающих направлений ветра согласно розе ветров рассматриваемой территории. Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций по оптимизации расположения зданий и сооружений с целью снижения снегонакопления на примере рассматриваемых объектов. Предложены направления дальнейших исследований, которые необходимо провести с целью верификации данных, получаемых методом аэродинамического моделирования и фактического снегонакопления на объектах, с целью успешного внедрения рассматриваемых подходов в бизнес-процессы нефтегазодобывающей отрасли.

Ключевые слова: нефтегазовая инфраструктура, аэродинамическое моделирование, численные методы, CFD, снегоперенос, оптимизация расположения объектов

Для цитирования: Проектирование объектов нефтегазовой инфраструктуры с учетом данных аэродинамического моделирования / П. В. Чепур, Н. С. Молокитина, Д. И. Староверов, В. И. Берг. – DOI 10.31660/0445-0108-2025-6-117-133 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2025. – № 6. – С. 117–133. – EDN: THMTVI

Design of oil and gas infrastructure facilities taking into account aerodynamic modeling data

Petr V. Chepur*, Nadezhda S. Molokitina, Dmitry I. Staroverov, Vladimir I. Berg

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation
*chepur_p_v@mail.ru

Abstract. The authors of this article consider a comprehensive approach to designing oil and gas infrastructure that aims to enhance reliability and extend the service life of these structures in harsh climatic conditions. The article cites data from aerodynamic simulations, based on which the re-

searches assessed wind flow distribution and identified potential zones for snow accumulation. This information is essential for predicting changes in permafrost soil conditions, helping to prevent foundation deformations and reduce operational risks. Using computational fluid dynamics (CFD) methods and software programs such as ANSYS and SolidWorks, the authors performed calculations to determine the distribution of static and dynamic wind pressures on structural surfaces and to identify turbulence areas. Within the framework of the modeling process the researchers formulated hypotheses to characterize the identities of snow accumulation near oil and gas infrastructure. The analysis confirmed the positive effect and necessity of integrating aerodynamic simulation into the design process of oil and gas infrastructure to enhance the operational reliability of structures. The results highlighted key patterns in snow load redistribution and the effect of wind flows based on the relative positions of objects and the prevailing wind directions, as outlined in the wind rose for the studied region. The authors see practical significance of this study in formulating recommendations for optimizing the placement of buildings and structures. According to their plan, these recommendations allow to minimize snow accumulation, demonstrated through specific case studies. In conclusion, the researchers suggest further study directions to validate the aerodynamic modeling data against actual snow accumulation at the sites, to effectively integrate these insights into the business processes of the oil and gas extraction industry.

Keywords: oil and gas infrastructure, aerodynamic modeling, numerical methods, CFD, snow transport

For citation: Chepur, P. V., Molokitina, N. S., Staroverov, D. I., & Berg, V. I. (2025). Design of oil and gas infrastructure facilities taking into account aerodynamic modeling data // Oil and Gas Studies, (6), pp. 117-133. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2025-6-117-133

Введение

Объекты нефтегазовой инфраструктуры, особенно строящиеся и эксплуатирующиеся в Арктической зоне, подвергаются значительным климатическим воздействиям — низким температурам воздуха, интенсивному снегонакоплению и сильным ветровым нагрузкам [1]. Кроме того, срок надежной эксплуатации объектов в криолитозоне зависит от устойчивости грунтов оснований, которые находятся в мерзлом состоянии, но по различным причинам, связанным с рядом факторов, температурный режим мерзлых грунтов может нарушаться [2]. Стандартные подходы к проектированию объектов нефтегазовой инфраструктуры, строящейся в криолитозоне, не способны полноценно учесть сложные климатические и геофизиологические условия, а также спрогнозировать их изменения во время эксплуатации объектов [3–6]. В этой связи становится актуальным использование современных методов, таких как аэродинамическое моделирование, с тем чтобы в перспективе учитывать процесс снеготранспорта и снегонакопления на объекте еще на этапе проектирования [7–15].

В статье представлены этапы применения метода аэродинамического моделирования для оценки потенциально опасных зон повышенного снегонакопления на объектах нефтегазовой инфраструктуры на примере реального объекта. Сопоставлены данные аэродинамического моделирования с данными фактического снегонакопления, зафиксированными в рамках снегомерных работ на объекте. Аэродинамическое моделирование было выполнено с использованием метода высокопроизводительной вычислительной гидродинамики (CFD) с реализацией в конечно-

элементном программном комплексе ANSYS. Такой метод направлен на качественную оценку распределения ветровых потоков, выявление зоны с повышенным и пониженным давлением, а также установление закономерности формирования снежных отложений. Полученные данные служат основой для разработки рекомендаций по оптимизации планировки объектов, усилению конструктивных элементов, планированию ремонтных и восстановительных работ, что впоследствии может способствовать снижению эксплуатационных рисков^{1,2}.

С помощью численных методов, использованных при аэродинамическом моделировании с учетом геометрических характеристик зданий сооружений и их расположения, было получено предварительное качественное решение, позволяющее прогнозировать зоны повышенного снегонакопления. Благодаря этому в будущих проектных решениях появится возможность уточнять эксплуатационные характеристики объектов нефтегазовой инфраструктуры в условиях экстремального климата.

Объект и методы исследования

Обычно для изучения аэродинамических процессов применяются следующие ключевые методы:

1. *Аналитические.* Основаны на классических формулах и расчетных подходах, таких как: метод потенциала скоростей, теория пограничного слоя и методы расчета ветровых нагрузок по СНиП. Однако их применение ограничено, так как они не учитывают сложную геометрию объектов, нелинейные эффекты и разнообразие граничных условий, что приводит к значительным упрощениям и погрешностям в расчетах.

2. *Численные.* Включают метод конечных объемов (CFD), метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР) и метод конечных объемов (МКО). Для исследования применяются программные комплексы ANSYS CFX, Fluent, SigmaFlow CFD и FlowVision, которые дают возможность учитывать широкий спектр параметров: скорость и направление ветра, температурные характеристики окружающей среды (например, температура воздуха и поверхности объектов), рельеф местности, особенности геометрии сооружений, процессы турбулентности и вихреобразования.

3. *Экспериментальные.* Включают полевые измерения и лабораторные испытания. В условиях реального климата возможны испытания с использованием натурных стендов и аэродинамических труб, позволяющие изучать поведение снежных масс и распределение нагрузок. Однако

¹ГОСТ Р ИСО 4355-2016. Национальный стандарт Российской Федерации. Основы проектирования строительных конструкций. Определение снеговых нагрузок на покрытия. = Bases for design of structures. Determination of snow loads on roofs. Дата введения 2017-07-01

²СП 20.13330.2016. СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия. Приказ Минстроя России от 3 декабря 2016 г. № 891/пр.

такие методы требуют значительных временных и материальных затрат, что ограничивает их применение.

Известно, что аналитические и экспериментальные методы не всегда обеспечивают точность и полноту учета всех параметров, влияющих на распределение ветровых потоков и снегоперенос, из-за отсутствия достаточного количества исходной информации и из-за высоких трудовых и временных затрат на проведение исследований. В отличие от них, численное моделирование позволяет комплексно учитывать динамические эффекты воздушных потоков, влияние топографии и взаимодействие потоков с объектами инфраструктуры. В частности, учет параметров турбулентности, градиентов давления, теплообмена и снегопереноса позволяет значительно повысить точность прогнозирования снегонакопления и оптимизировать проектные решения.

При моделировании аэродинамических процессов для оптимизации геометрических параметров инфраструктурных объектов применяются программные комплексы ANSYS CFX, Fluent, SigmaFlow CFD и FlowVision. С их помощью учитываются следующие параметры, которые невозможно предусмотреть традиционными методами:

1. *Различные условия окружающей среды* — скорость и направление ветра, температурные условия (температура воздуха, поверхности сооружений, грунта), рельеф местности.

2. *Сложные физические процессы* — аэродинамические нагрузки, процессы турбулентности, вихреобразование, снегоперенос, конвективные и радиационные процессы теплообмена.

Таким образом, применяя численное моделирование, можно получить детализированную картину взаимодействия ветровых потоков с объектами нефтегазовой инфраструктуры, что критически важно для их безопасной эксплуатации в экстремальных климатических условиях Арктики.

К сожалению, на данный момент отсутствуют программные решения, способные одновременно учитывать процессы моделирования ветровых потоков и снегопереноса в полном объеме. В связи с этим в статье основной акцент сделан на методы аэродинамического моделирования, направленные на получение наиболее точных данных о распределении воздушных потоков и влиянии расположения объектов на формирование потенциально опасных зон снегонакопления.

Объект исследования — здания и сооружения инфраструктуры добычи нефти и газа в криолитозоне, такие как комплекс жилых и административных зданий и сооружений, построенных в условиях Арктики.

Методы исследования основаны на применении аэродинамического моделирования с использованием вычислительной гидродинамики (CFD) и метода конечных элементов.

Программа исследования состоит из трех основных этапов:

- 1) разработка виртуальных 3D-моделей объектов нефтегазовой инфраструктуры;

2) CFD-анализ для оценки распределения ветровых нагрузок при различных климатических условиях;

3) интерпретация данных, их применение и рекомендации для проектирования.

Для проведения численных экспериментов использовались следующие программные комплексы и оборудование:

- САПР SolidWorks 2023 — для построения 3D-модели площадки;
- программное обеспечение Ansys R19, модуль CFX — для аэродинамического моделирования;
- вычислительный расчетный комплекс на базе ПК, CPU Ryzen R5 8600G, 16 Gb ОЗУ.

Экспериментальная часть (численный эксперимент)

Экспериментальная часть исследования посвящена реализации этапов аэродинамического моделирования с применением программного комплекса ANSYS. На начальном этапе собирались и анализировались исходные данные, создавались детализированные 3D-модели объектов на базе данных о конструктивных особенностях и материалах. Особое внимание уделялось точности геометрических параметров для создания трехмерной модели.

В настоящей статье приведены результаты работы по аэродинамическому моделированию части площадки вахтового жилого комплекса Новопортовского месторождения, расположенной в Ямало-Ненецком автономном округе, в 30 км от побережья Обской губы.

Климатические данные приняты по данным метеостанции Новый порт.

Согласно этим данным среднегодовая температура воздуха — 6,1 °С, средняя годовая скорость ветра составляет 5,6 м/с. Снежный покров появляется в первой декаде октября, как правило, через 10 дней образуется устойчивый снежный покров. Снеготаяние начинается в первых числах июня. Сход снежного покрова происходит неравномерно. Дата схода приходится на первую декаду июня.

Подготовка геометрической модели

Масштаб построения объектов принят 1:1. На всех объектах используются сваи круглого сечения диаметром 0,25 м, высота свай над землей — 1,5 м. Размеры представлены в формате: длина x ширина x высота. 3D-модель площадки представлена на рисунке 1 и включает следующие объекты (рис. 1):

0 объект — площадка вахтового жилого комплекса, площадка отсыпана, высота отсыпки — 1,5 м, размер 240x115 м;

1 объект — отапливаемое жилое здание прямоугольной формы, размеры 64x20x17 м;

2 объект — отапливаемое административное здание прямоугольной формы, размеры 24,6x11,8x11,5 м;

3 объект — отапливаемое административное здание прямоугольной формы, размеры 30,5×11,7×11,5 м;

4 объект — ангар арочного типа, с вертикальными стенами, размеры 45×15×11,5 м;

5 объект — отапливаемое административное здание прямоугольной формы, размеры 15,2×11×8,3 м;

6 объект — склад прямоугольной формы, размеры 36,4×16×15,8 м;

7 объект — 2 вертикальных резервуара, на свайном фундаменте (размер площадки 15,5×15,5 м), размеры одного резервуара: $D = 13,4$ м; $h = 12$ м, $V = 10\,000\text{ м}^3$;

8 объект — 3 горизонтальных резервуара на свайном фундаменте (размер площадки 12×4 м), размеры одного резервуара: $L = 11,5$ м; $d = 2,5$ м; $V = 100\text{ м}^3$;

9 объект — отапливаемое административное здание прямоугольной формы, размеры 13×6,4×5,2 м;

10 объект — отапливаемое административное здание прямоугольной формы, размеры 8,2×6×5 м.

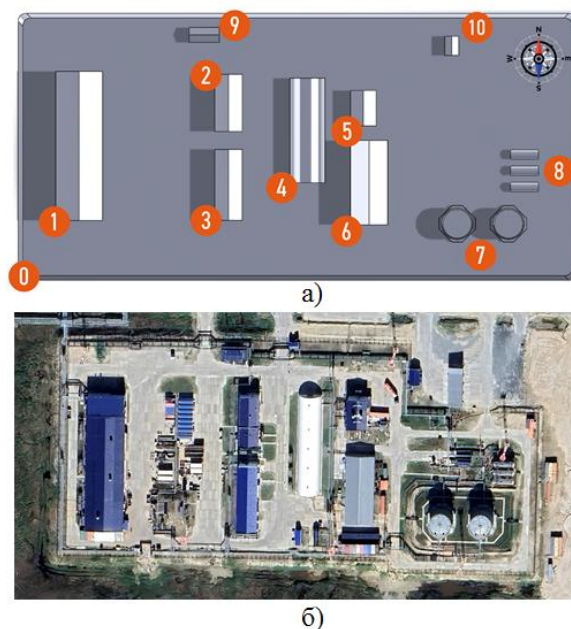


Рис. 1. Схема расположения объектов на площадке ВЖК 3D-модель (а);
схема расположения объектов на площадке ВЖК со спутника (б)

Формирование расчетной сетки

Наиболее эффективным в настоящее время признан метод конечных объемов (МКО), не требующий такого детального моделирования пограничного слоя, в отличие от метода конечных элементов (МКЭ), и более удобный при описании сложных расчетных областей реальных застроек,

чем метод конечных разностей. Перед проведением основных аэродинамических расчетов здания или сооружения с учетом окружающей застройки на модели здания или сооружения «в чистом поле» необходимо выполнить серию верификационных и валидационных расчетов (проверка сеточной сходимости — рис. 2) с целью выбора оптимальных параметров расчетной сетки непосредственно на поверхности и вблизи исследуемого объекта.

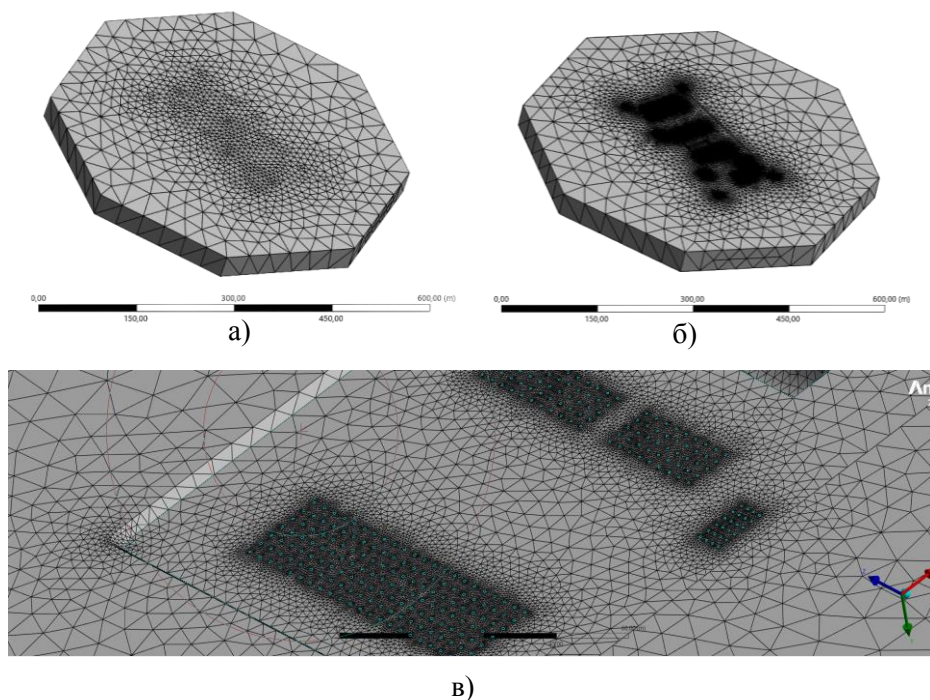


Рис. 2. **Расчетная сетка:** а) вид сверху; б) вид снизу;
в) вид снизу в приближении

В статье применена начальная величина поверхностной сетки на целевом объекте, что не превышало характерные размеры фасадных конструкций (~ 1 м). По имеющимся в литературе данным, такое задание сетки позволяет корректно учитывать геометрические особенности и сложные элементы объекта, а также обеспечивать точность моделирования аэродинамических процессов. Количество расчетных случаев с последовательным сгущением сетки должно быть не менее трех, что необходимо для проведения проверки сходимости и определения оптимального размера элементов для получения достоверных результатов.

Для геометрически сложных моделей зданий в расчетной области создается неструктурированная сетка из тетраэдров. Это связано с тем, что такие сетки более гибки и способны точно аппроксимировать сложные формы объектов. Назначение узловых компонентов в таких сетках облег-

чает последующее присвоение граничных условий и управление параметрами расчета.

Далее представлены параметры расчетных сеток для проведения основных аэродинамических расчетов (рис. 3), основанные на рекомендациях по дискретизации геометрии объектов и области течения.

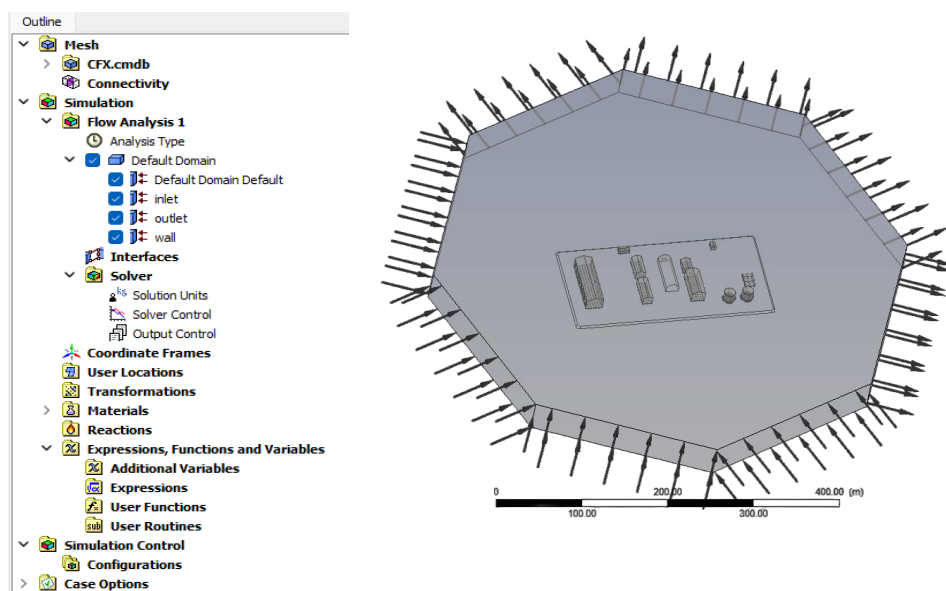


Рис. 3. Схема распределения ветровых потоков

Используемые параметры учитывают необходимость точного разрешения особенностей потока и обеспечения сходимости численного решения. Выбор параметров осуществляется с учетом специфики задачи и требований к точности моделирования. Размеры элементов сетки на поверхности целевого объекта принимаются 0,5 м. В ближней зоне целевого объекта (в радиусе ~0,5 км) размеры элементов на поверхностях соседних зданий или сооружений достигают 4 м. На достаточном удалении от здания размеры на поверхностях зданий или сооружений окружающей застройки составляют 10 м. На поверхности Земли и приземном воздушном слое (высотой ~ 4 м от земли) характерный размер элементов — 1,5 м, в случае оценки пешеходной комфортности приземный воздушный слой выбирается высотой (~ 2 м от земли) с характерным размером элементов — 0,3 м. Максимальный размер элемента в расчетной области достигает 16 м (в радиусе 500–1000 м, выше 150 м). Параметры сетки: формат — тетраэдр с ребрами различной длины; автоматическое изменение (поправка); шаг — от 50 м до 0,15 м.

Граничные условия

В работе использована восьмиугольная форма расчетной области. В аэродинамических задачах это обусловлено стремлением обеспечить равномерное распределение ячеек сетки и минимизировать отражение волн

на границах области. Такая конфигурация позволяет более точно моделировать обтекание объектов воздушными потоками, особенно при сложной геометрии сооружений. Восьмиугольная форма способствует снижению количества ошибок, возникающих на границах расчетной области, что повышает достоверность получаемых результатов (рис. 3). Боковая граница должна быть расположена на расстоянии не менее $5H$ от центра застройки (где H — размер самого высокого здания или сооружения). Задняя граница области («выход», расположена по потоку за моделируемой застройкой) — не менее $10H$, передняя граница области («вход», расположена по потоку перед моделируемой застройкой) — не менее $5H$, верхняя граница области (высота расчетной области) — не менее $5H$.

В аэродинамическом моделировании при задании граничных условий на «входе» (INLET) и «выходе» (OUTLET) расчетной области учитываются следующие параметры:

1. Масштаб турбулентности ($L = 300$ м): его характеризует размер крупных вихревых структур в атмосфере. Значение 300 м принято в соответствии с рекомендациями нормативных документов, таких как СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия».

2. Скорость входного потока ветра (5,6 м/с): она определяется на основе расчетных значений нагрузок с учетом коэффициента надежности по нагрузке 1,4 и соответствует заданным ветровым районам и типам местности [2].

3. Граничные условия на «выходе» (OUTLET): на «выходе» назначены «мягкие» граничные условия по Нейману (равенство нулю производных) с нулевыми дополнительными давлениями и такими же параметрами турбулентности, как и на «входе». Это позволяет минимизировать влияние отраженных волн и обеспечить стабильность численного решения [2].

На верхней границе области задается условие симметрии потока. Это означает, что нормальная составляющая скорости через границу равна нулю. Таким образом, отражено отсутствие обмена массы и энергии через рассматриваемую поверхность. Нижняя граница области и поверхности всех зданий или сооружений: применяется условие «стенки с прилипанием» (No-Slip Wall) [2], при котором компоненты скорости вблизи поверхности принимаются равными нулю ($U = V = W = 0$ м/с). Это условие отражает физическое явление вязкости, при котором скорость жидкости или газа на твердой поверхности равна скорости этой поверхности, то есть нулю для неподвижных стенок. Начальные условия: во всей расчетной области задаются нулевые значения скоростей ($U = V = W = 0$ м/с). Характеристики турбулентности устанавливаются в соответствии с параметрами потока на «входе» (INLET). Альтернативно в качестве начальных условий могут использоваться результаты предварительных стационарных расчетов, обеспечивающих сходимость решения.

Проведение численного расчета

ANSYS CFX включает следующие ключевые этапы: настройка параметров численного решения и запуск расчета, мониторинг сходимости.

1. Выбор решателя: модуль CFX использует высокопроизводительный Algebraic Coupled Multigrid решатель, обеспечивающий быструю и устойчивую сходимость при решении задач гидрогазодинамики.

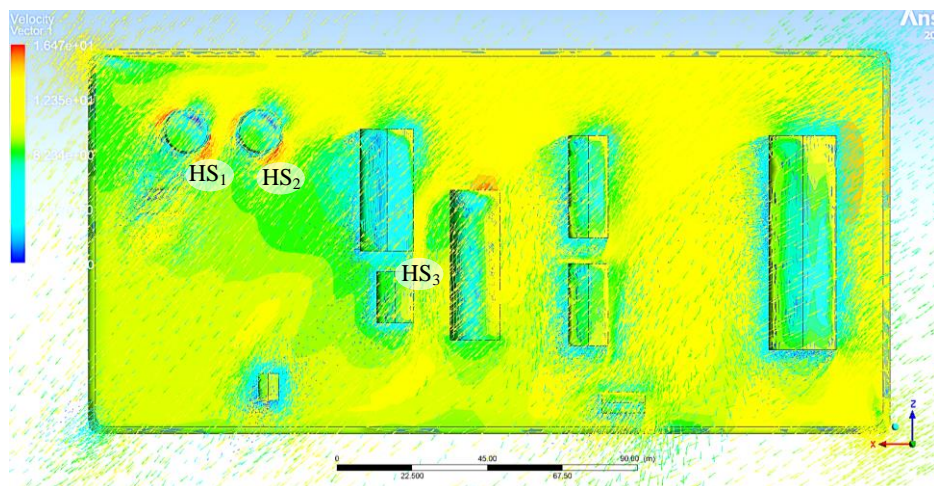
2. Настройка итерационного процесса: определяются критерии сходимости, шаг времени (для нестационарных задач) и максимальное количество итераций. Эти параметры влияют на точность и стабильность решения.

3. После настройки всех параметров запускается вычислительный процесс. Важно контролировать сходимость решения, анализируя остатки (residuals) и другие показатели, чтобы обеспечить надежность и точность результатов.

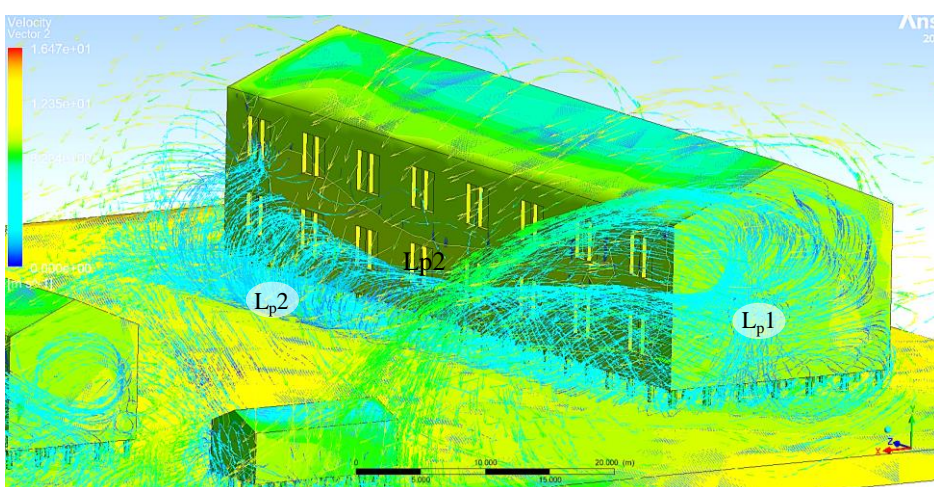
Результаты и исследования

В результате проведенного численного моделирования получены качественные данные о распределении скоростей ветра и давлений вокруг исследуемых объектов. На рисунке 4 (а, б, в) представлены визуализации основных полей: пространства потоков воздуха по периметру зданий, распределение давления на поверхностях сооружений и предполагаемые зоны накопления снега. Анализ показывает, что на наветренных сторонах вблизи зданий формируются области повышенного давления, а вокруг углов и в узких промежутках между сооружениями поток ускоряется, создавая локальные сильные струи. За объектами, с подветренной стороны (обратной направлению ветра), наблюдаются зоны пониженного давления (разрежения) и турбулентные вихревые области.

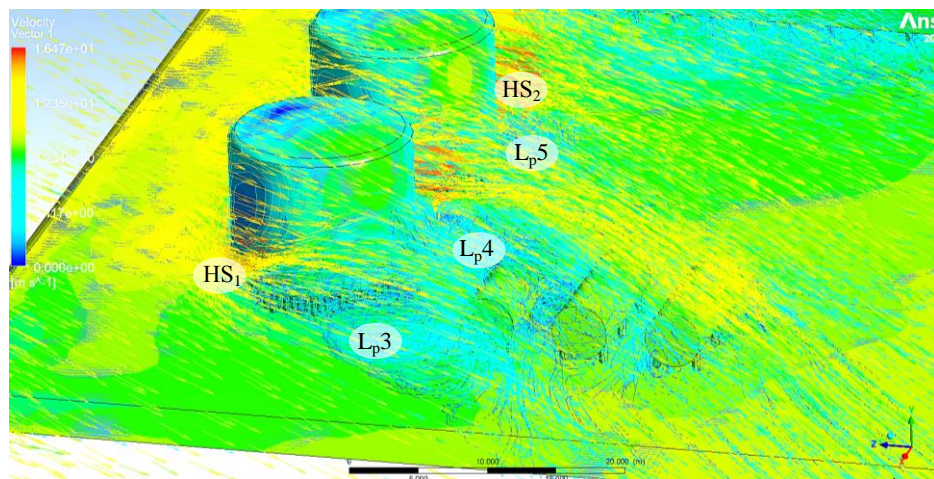
Выявленные аэродинамические особенности непосредственно влияют на перераспределение снежных масс. Участки с высокими скоростями ветра HS_1 – HS_3 остаются выдуваемыми (снег на них не задерживается), тогда как в затишных зонах L_{p1} – L_{p5} позади зданий происходит отложение снега. Иными словами, позади крупных строений формируются ветровые тени, в которых поток воздуха значительно замедляется, создавая условия для накопления снега. В частности, можно ожидать образование наиболее массивных сугробов на подветренной стороне самого крупного здания жилого комплекса, тогда как с наветренной стороны и на открытых участках площадки снег практически не накапливается. Таким образом, выявлена закономерность: группа близко расположенных зданий создает обобщенную зону затишья, в пределах которой происходит интенсивное накопление снежных отложений, тогда как отдельные (обособленные) сооружения образуют более локальные сугробы сразу за своими тыльными сторонами.



a)



б)



в)

Рис. 4. Результаты численного моделирования

Обсуждение результатов

Полученные результаты численного моделирования демонстрируют, что аэродинамическое взаимодействие между элементами застройки существенно воздействует на локальное распределение ветровых потоков. Высокие скорости на наветренных фасадах (напр., «S₁–S₃», рис. 4) создают зоны повышенного давления, в то время как в затененных зонах зданий наблюдаются области пониженного давления и турбулентности, что способствует накоплению снега. Эти выводы согласуются с ранее опубликованными исследованиями [3], тем самым подтверждая, что зоны с затишьем являются местами образования повышенного снегонакопления.

Стоит отметить, что анализируемая модель основана на стационарной постановке с фиксированными входными данными (скорость ветра, направление, тип поверхности) и не учитывает динамику выпадения и оседания снега в реальном времени. Применение стандартной модели турбулентности и конечного размера расчетной сетки могут сгладить мелкомасштабные эффекты. Несмотря на это, результаты представляют качественную оценку влияния аэродинамических процессов на распределение снеговых нагрузок, что имеет практическое значение при проектировании объектов в условиях Арктики.

Выводы

1. *Результаты моделирования.* Проведенный CFD-анализ позволил получить качественную информацию о распределении ветровых потоков и определить потенциальные места снегонакопления. Анализ методом численного моделирования на основе уравнений Навье — Стокса выявил, что наветренные стороны зданий испытывают повышенное давление, содействуя формированию зон с ускоренным потоком воздуха, в то время как подветренные области характеризуются пониженным давлением, способствующим накоплению снежных масс.

Установлено, что максимальная снеговая нагрузка формируется в турбулентных зонах, образующихся за зданиями, что подтверждается расчетами, выполненными с использованием программного комплекса ANSYS. Также можно предположить, что конструктивные элементы, расположенные вблизи зон интенсивного снегопереноса, подвержены повышенной снеговой нагрузке, что может приводить к изменению температурного режима грунта основания ввиду образования большого количества воды в результате таяния снега в летний период. Результаты моделирования указывают на необходимость комплексного учета аэродинамических эффектов при проектировании инфраструктуры в условиях экстремального климата Арктики.

2. *Влияние на срок эксплуатации объектов.* Выявленные закономерности перераспределения снеговых масс свидетельствуют о вероятности локальных перегрузок конструкций. В частности, при скорости ветра

5,6 м/с снег откладывается в зонах пониженного давления, что может приводить к увеличению снеговой нагрузки на отдельные элементы сооружений на 20–30 %. Однако основной риск связан не только с нагрузкой на конструкции, но и с последующим таянием снега, что может вызвать локальное переувлажнение грунта и оттаивание мерзлых грунтов под зданиями. Этот процесс, в свою очередь, способен привести к неравномерным осадкам фундаментов и деформации сооружения. Для минимизации подобных рисков требуются дополнительные расчеты термодинамических процессов в зоне взаимодействия снежных масс, конструкций и грунтового основания, а также разработка инженерных решений по отведению талых вод и стабилизации температурного режима грунта.

3. *Рекомендации для проектирования.* Для повышения устойчивости зданий предлагается оптимизировать их расположение в плане, сокращая зоны интенсивного снегозадержания. Необходимо предусмотреть установку снегозащитных экранов высотой 1,5–2 м на расстоянии 3–5 м от зданий и усиление конструктивных элементов в зонах повышенного снегонакопления, улучшение аэродинамических характеристики отдельных сооружений и аэродинамических групп с учетом ландшафтных особенностей и принципа высотности. Дополнительно рекомендуется применять системы активного удаления снега, не допуская критических значений, которые должны быть в результате прогнозных теплотехнических расчетов для каждого типа сооружений, а также подогреваемые поверхности, снегозадерживающие барьеры высотой 1,8–2,5 м и направляющие аэродинамические конструкции для перераспределения воздушных потоков.

4. *Перспективы дальнейших исследований.* Необходимо интегрировать процесс моделирования переноса снежных частиц с аэродинамическим моделированием воздушных потоков, что позволит более точно прогнозировать распределение снеговых нагрузок и качественно и количественно оценивать снегонакопление на объектах нефтегазовой инфраструктуры. Дальнейшее развитие моделей с учетом многослойной структуры снежного покрова и его физико-механических характеристик улучшит точность расчетов и усилит надежность проектируемых решений.

5. *Валидация полученных данных.* Для подтверждения достоверности численного моделирования должны быть проведены полевые наблюдения с использованием систем мониторинга снеговых отложений, анеометров и тепловизоров. Требуется выполнить контрольные замеры высоты и плотности снежного покрова в критических зонах, сравнить их с расчетными значениями и корректировать модели с учетом полученных данных. Кроме того, рекомендуется организовать длительное наблюдение в течение нескольких сезонов для выявления долгосрочных тенденций снегопереноса.

6. *Учет изменяющихся климатических условий.* В дальнейших исследованиях необходимо учитывать комплексное воздействие климатических факторов, включая рост среднегодовой температуры, изменение

структуры и интенсивности осадков, а также вариативность ветровых нагрузок. Для повышения устойчивости инфраструктурных объектов к изменяющимся условиям эксплуатации следует разрабатывать адаптивные проектные решения, интегрирующие прогнозируемые климатические сценарии, учитывающие динамику снежного покрова, ветровых потоков и термодиформационных процессов в конструкциях.

Список источников

1. Чепур, П. В. Особенности деформирования крупногабаритных резервуаров со стационарной крышей при неосесимметричном воздействии ветровой нагрузки / П. В. Чепур, А. А. Тарасенко. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12–1. – С. 97–102.
2. Тарасенко, А. А. Оценка работоспособности крупногабаритного резервуара РВСПК-100000 при образовании зоны неоднородности грунтового основания / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур, Ю. Гуань. – Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 4. – С. 134–136.
3. Проектирование, строительство и эксплуатация высотных зданий с учетом аэродинамических аспектов / М. К. Михайлова, В. С. Далинчук, А. В. Бушманова, Л. В. Доброгорская. – DOI 10.18720/CUBS.49.4. – Текст : непосредственный // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 10 (49). – С. 59–74.
4. Воронков, Л. С. Изменения климата и императивы круглогодичной деятельности в Арктике / Л. С. Воронков. – Текст : непосредственный // Ежегодник Института международных исследований Московского государственного института международных отношений (Университета) Министерства иностранных дел Российской Федерации. – 2015. – № 1(11). – С. 9–18. – EDN : VKQKEX.
5. Афанасьев, В. А. Моделирование и оценка снеговых нагрузок на промышленные сооружения / В. А. Афанасьев, Д. М. Лебедев. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Строительство. – 2020. – № 7. – С. 32–39.
6. Сидоров, Н. К. Анализ моделей снегопереноса для промышленных объектов / Н. К. Сидоров. – Текст : непосредственный // Промышленная безопасность. – 2021. – № 4. – С. 22–29.
7. Белостоцкий, А. М. Ветровое нагружение высотных зданий, сооружений, комплексов (предложение по актуализации свода правил) / А. М. Белостоцкий, И. Н. Афанасьева, П. А. Акимов. – DOI 10.22337/9785432302212-2017-104-114. – Текст : непосредственный // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2016 году : сборник научных трудов РААСН / Российская академия архитектуры и строительных наук. – Москва : Издательство АСВ, 2017. – С. 104–114.
8. Горчакова, О. С. Математическое исследование аэродинамических характеристик с использованием программного комплекса / О. С. Горчакова. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 3. – С. 58–61.
9. Mahr, C. Optimization of a cloud chamber for the production of snow by CFD methods: Flow simulations using ANSYS fluent under given general conditions. – Text : electronic // Technische Universität Wien. – 2017. – URL: <https://doi.org/10.34726/hss.2017.28493> (дата обращения : 01.03.2025).

10. Tominaga, Y. CFD prediction of flow field and snowdrift around a building complex in a snowy region / Y. Tominaga, A. Mochida. – Text : direct // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1999. – Vol. 81, Issue 1–3. – P. 273–282.
11. Bournet P.-E., Rojano F. Advances of Computational Fluid Dynamics (CFD) applications in agricultural building modelling: Research, applications and challenges / P. E. Bournet, F. Rojano. – DOI 10.1016/j.compag.2022.107277. – Text : direct // Computers and Electronics in Agriculture. 2022. – Vol. 201. – P. 107277.
12. Thiis, T. K. Numerical simulation of snow drift development on a gabled roof / T. K. Thiis, J. Potac. – Text : direct // Proceedings of the 7th European and African Conference on Wind Engineering. Amsterdam, the Netherlands. – 2011.
13. Numerical simulation of snow drifting around building model / X. Sun, C. Hon, Y. Wu, F. Fan. – Text : direct // Engineering Mechanics. – 2014. – Vol. 31, Issue. 4. – P. 141–146.
14. Тарасенко, А. А. Особенности совместной работы кольцевого фундамента и грунтового основания при наличии зон неоднородности / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур. – Текст : непосредственный // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2016. – № 4. – С. 9–13.
15. Tarasenko, A. A. Study of deformations in a large-capacity oil storage tank in the presence of subgrade inhomogeneity zones / A. A. Tarasenko, P. V. Chepur, A. A. Gruchenkova. – Text : direct // MATEC Web of Conferences. Les Ulis. – 2016. – P. 01025.

References

1. Chepur, P. V., Tarasenko, A. A. (2015). Features of fixed roof tanks deformation effects in axisymmetric wind load. Fundamental research, 12(1), pp. 97-102. (In Russian).
2. Tarasenko, A. A., Chepur, P. V., & Guan, Yu. (2016). Performance evaluation of large tank RVSPK-100000 in development of differential settlement area. Oil industry, (4), pp. 134-136. (In Russian).
3. Mikhailova, M. K., Dalinchuk, V. S., Bushmanova, A. V., & Dobrogorskaya, L. V. (2016). Design, construction and operation of high-rise buildings, taking into account the aerodynamic aspects. Construction of Unique Buildings and Structures, 10(49), pp. 59-74. (In Russian). DOI: 10.18720/CUBS.49.4
4. Voronkov, L. S. (2015). Izmeneniya klimata i imperativy kruglogodichnoi deyatel'nosti v Arktike. *Ezhegodnik Instituta mezhdunarodnykh issledovaniy Moskovskogo gosudarstvennogo instituta mezhdunarodnykh otnosheniy (Universiteta) Ministerstva inostrannykh del Rossiyskoy Federatsii*, 1(11), pp. 9-18. (In Russian).
5. Afanasiev, V. A., & Lebedev, D. M. (2020). Modelirovanie i otsenka snegovykh nagruzok na promyshlennyye sooruzheniya. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo*, (7), pp. 32–39. (In Russian).
6. Sidorov, N. K. (2021). Analiz modelei snegoperenosa dlya promyshlennykh obektov. *Promyshlennaya bezopasnost*, (4), pp. 22-29. (In Russian).
7. Belostotsky, A. M., Afanasyeva, I. N., & Akimov, P. A. (2017). Vetrovoe nagruzhenie vysotnykh zdaniy, sooruzheniy, kompleksov (predlozhenie po aktualizatsii svoda pravil). In *Fundamentalnye, poiskovye i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitelstva i stroitelnoi otrasli Rossiiskoi Federatsii v 2016 godu: Sbornik nauchnykh trudov RAASN*. Moscow, ASV Publ., pp. 104-114. (In Russian). DOI: 10.22337/ 9785432302212-2017-104-114.

8. Gorchakova, O. S. (2020). Mathematical research of aerodynamic characteristics using the software complex. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, (3), pp. 58-61. (In Russian).
9. Mahr, C. (2017). Optimization of a cloud chamber for the production of snow by CFD methods: Flow simulations using ANSYS fluent under given general conditions. Technische Universität Wien. (In English). Available at: <https://doi.org/10.34726/hss.2017.28493>
10. Tominaga, Y., & Mochida, A. (1999). CFD prediction of flow field and snowdrift around a building complex in a snowy region. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81(1-3), pp. 273-282. (In English).
11. Bournet, P. E., & Rojano, F. (2022). Advances of Computational Fluid Dynamics (CFD) applications in agricultural building modelling: Research, applications and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, (201), P. 107277. (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2022.107277
12. Potac, J., & Thiis, T. K. (2011). Numerical simulation of snow drift development on a gabled roof. In *The 13th International Conference on Wind Engineering*. Amsterdam, the Netherlands. (In English).
13. Sun, X., Hon, C., Wu, Y. & Fan, F. (2014). Numerical simulation of snow drifting around building model. *Engineering Mechanics*, 31(4), pp. 141-146. (In English).
14. Tarasenko, A. A., & Chepur, P. V. (2016). Aspects of the joint operation of a ring foundation and a soil bed with zones of inhomogeneity present. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 53(4). pp. 238-243. (In Russian).
15. Tarasenko, A. A., Chepur, P. V., & Gruchenkova A. A. (2016) Study of deformations in a large-capacity oil storage tank in the presence of subgrade inhomogeneity zones. *MATEC Web of Conferences*. Les Ulis. P. 01025. (In English).

Чепур Петр Владимирович,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой строительной
механики, Тюменский индустриальный
университет, г. Тюмень, [chepur_p_v@
mail.ru](mailto:chepur_p_v@mail.ru), ORCID: [https://orcid.org/0000-
0002-6722-459X](https://orcid.org/0000-0002-6722-459X)
Web of Science Researcher ID:
L-1887-2015.
SCOPUS ID: 56491219700

Староверов Дмитрий Игоревич,
студент, Тюменский индустриальный
университет, г. Тюмень

Dmitry I. Staroverov, Student,
Industrial University of Tyumen

Берг Владимир Иванович,
кандидат технических наук, доцент
Центра проектного обучения, Высшая
инженерная школа ЕГ, Тюменский
индустриальный университет,
г. Тюмень, bergvi@tyuiu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9165-252X>
Author ID: 727278 (идентификатор
автора в РИНЦ)

Vladimir I. Berg, Candidate of
Engineering Sciences, Associate Profes-
sor, Center for Project-Based Learning,
Graduate School of Engineering EG, In-
dustrial University of Tyumen,
bergvi@tyuiu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9165-252X>
Author ID in RINTS: 727278

Поступила в редакцию / Received 28.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 29.03.2025

Принята к публикации / Accepted 05.04.2025