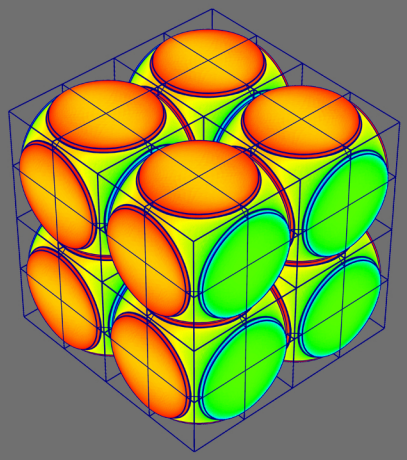
ISSN 2309-3684



Математическое моделирование и численные методы

Котмакова А.А., Авдеев Е.Э., Капица Д.В., Фомичев Д.В CFD анализ ветровой нагрузки на здания ядерного острова АЭС «Пакш-II». Математическое моделирование и численные методы, 2026, № 1, с. 119–139.

Источник: https://mmcm.bmstu.ru/articles/402/

Параметры загрузки:
IP: 216.73.217.38
16.07.2026 00:23:51

УДК 532.5 DOI: 10.18698/2309-3684-2026-1-119139

CFD анализ ветровой нагрузки на здания ядерного острова АЭС «Пакш-II»

© А.А. Котмакова[1], Е.Э. Авдеев[1], Д.В. Капица[1], Фомичев Д.В.[2]

[1]АО «Атомэнергопроект», г. Санкт-Петербург, 197183, Россия
[2]ГК Росатом, г. Москва, 119017, Россия

Одной из ключевых задач при проектировании зданий и сооружений АЭС является учет ветровой нагрузки, точный расчёт которой критически важен для обеспечения безопасности строительных конструкций. В статье представлена валидация отечественного CFD кода ЛОГОС на эксперименте по обдуву макета здания и результаты расчета ветровых нагрузок на здания ядерного острова АЭС «Пакш-II». Проведение численного эксперимента с помощью CFD кода позволило определить расчётные параметры во всех точках вычислительной области, в том числе распределение давления ветра на фасадах зданий. Кросс-верификация на данной проектной задаче с коммерческим CFD кодом STAR CCM+ показала хорошее совпадение результатов расчёта.

Ключевые слова: *ветровая нагрузка, аэродинамическая шероховатость, CFD*

Введение. Климатические воздействия на здания и сооружения включают в себя широкий спектр факторов, таких как температура, осадки, ветер, влажность, солнечная радиация, а также биологические и химические воздействия. Ветровая нагрузка, возникшая в результате динамического воздействия движущихся воздушных масс на поверхности конструкций, оказывает значительное влияние на конструктивные элементы зданий, их долговечность и эксплуатационные характеристики. Величина ветровой нагрузки зависит от многих факторов, включая условия приближающегося потока, рельеф окружающей местности, геометрию здания и направление ветра.

Существуют различные методы определения ветровых нагрузок на стены и компоненты зданий: полномасштабные измерения [1-2], измерения в аэродинамической трубе в уменьшенном масштабе [3-4], численное моделирование [5]. Все эти методы имеют свои преимущества и недостатки. Полномасштабные измерения показывают реальную картину, но граничные условия для таких измерений не контролируемы и зависят от метеорологических условий. Для исследований в аэродинамической трубе можно задать граничные условия, но обычно в таких случаях проводятся только точечные измерения на моделях в уменьшенном масштабе, а информация во всей области не рассматривается. При численном моделировании рассчитываются данные во всех точках вычислительной области. Что делает данный вид исследования более популярным и предпочтительным.

Стремительное развитие компьютерных технологий и программных средств, способствовало возможности использования методов математического моделирования для решения реальных проектных задач. В частности, расчётные коды вычислительной гидродинамики (CFD) являются удобным инструментом прогнозирования и оценки ветровых нагрузок на здания и сооружения.

Подходы и рекомендации по математическому моделированию ветровых нагрузок. К настоящему времени проведено достаточно исследований по проведению расчетов обтекания зданий, выявлены рекомендации и общие принципы моделирования [6-8], которые описывают важные моменты по использованию CFD вычислений. Большинство рекомендаций основано на использовании моделей RANS, хотя для более точного результата желательно использовать моделирование больших вихрей (LES). Однако на практике эти модели сложно использовать, поскольку они требуют больших вычислительных ресурсов. Ниже приведен краткий обзор подходов для каждого этапа численного моделирования.

1. Создание вычислительной области. В общем случае только нижняя часть вычислительной области соответствует фактической физической границе. Боковые и верхние грани вычислительной области являются нефизическими границами, они должны быть расположены достаточно далеко от расчетной модели и не влиять на получаемое решение. Рекомендации для определения размера вычислительной области описаны Franke [8], в них заложены принципы Baetke [11], которые представлены на рис. 1. Входная и боковые границы должны быть на расстоянии не менее $5H_{max}$ от моделируемых зданий, высота расчетной области $6H_{max}$, где H_{max} — высота самого высокого здания. Граница выходного потока должна быть на расстоянии не менее $15H_{max}$ от расчетной модели, чтобы обеспечить полное развитие потока за зданиями.

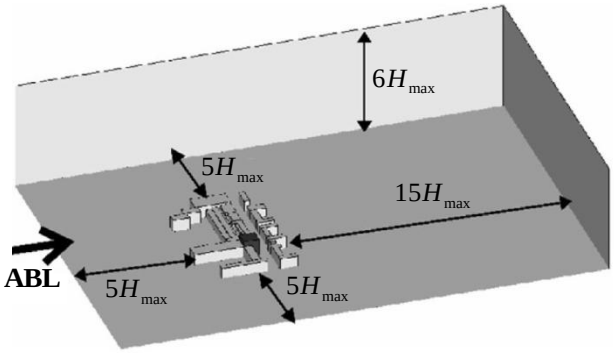


Рис. 1. Рекомендации по размеру расчетной области при моделировании обтекания зданий воздухом [6], H_{max} — высота самого высокого здания

2. Создание вычислительной сетки. Вычислительная сетка является одной из самых трудоемких работ при решении подобных геометрически сложных задач с помощью инструментов математического моделирования. Недостаточно качественно построенная расчётная сетка, может привести к проблемам со сходимостью и даже к некорректному результату, т.к. многие здания представляют собой плохо обтекаемые тела с острыми краями, на которых происходит срыв потока. Чтобы правильно моделировать поток, сетка должна иметь достаточное разрешение и хорошее качество ячеек с точки зрения формы (они не должны быть сильно скошенными).

Franke et al. [8] утверждают, что сетка должна быть достаточно детальной, чтобы с её помощью можно было получить такие важные физические явления, как зоны отрыва и вихревые структуры. В литературе [6]-[8] рекомендуется в качестве минимального размера ячейки сетки брать 10 % от длины стороны обтекаемой конструкции, это масштаб, начиная с которого численные методы способны описать срыв потока с острых углов. Оптимальный размер рабочей сетки достигается при исследовании сеточной сходимости, в ходе которого уменьшается размер ячеек до тех пор, пока результаты расчетов не перестанут существенно изменяться. Линейный коэффициент уточнения (в каждом направлении координат) должен быть не менее 1.5. Рекомендуется использовать на поверхности призматические ячейки, при этом сгущение сетки должно быть меньше 1.3 (aspect ratio). Также, согласно [6], призматический слой должен содержать 4-5 ячеек.

3. Определение параметров шероховатости. Точность моделирования потока при обтекании зданий также зависит и от корректного определения и задания в расчёте параметров шероховатости. Соответственно возникает дополнительная задача по вычислению её параметров в областях выше по течению и внутри вычислительной области, а также на поверхности моделируемых зданий.

а) Область выше по течению от вычислительной области. Шероховатость в этой области влияет на профиль скорости и характеристики турбулентности на входе в расчётную область. Эта шероховатость является крупномасштабной и характеризуется аэродинамической длиной шероховатости z_0. Один из вариантов определения z_0 из аэрокосмического снимка с использованием метода Davenport-Wieringa [9]. Эта оценка проводится на территории 5-10 км вверх по потоку, данного расстояния будет достаточно для того, чтобы сформировался определённый профиль скорости ветра, соответствующий шероховатости местности.

Классификация аэродинамической шероховатости Davenport-Wieringa [9] представлена в таблице 1.

Таблица 1

Классификация аэродинамической шероховатости Davenport-Wieringa [9]

z_0, m	Описание ландшафта
0.0002	Открытое море или озеро (независимо от размера волн), приливная равнина, заснеженная плоская равнина, безликая пустыня, асфальт, бетон, со свободным выносом в несколько километров.
0.005	Безликая поверхность суши без каких-либо заметных препятствий и с незначительной растительностью; например пляжи, паковый лед без больших гряд, болота, заснеженная или залежная открытая местность.
0.03	Ровная местность с невысокой растительностью (например, травой) и изолированными препятствиями с расстоянием между препятствиями не менее 50 высот; например пастбища без ветрозащитных полос, вереск, болото и тундра, взлетно-посадочные полосы аэропортов.
0.1	Посевная площадь с регулярным покрытием низких культур или умеренно открытая местность с редкими препятствиями (например, низкие живые изгороди, одиночные ряды деревьев, изолированные фермы) на относительных горизонтальных расстояниях не менее 20 высот препятствий.
0.25	Недавно сформировавшийся «молодой» ландшафт с высокими посевами или посевами различной высоты и разбросанными препятствиями (например, густыми лесными полосами, виноградниками) на относительных расстояниях около 15 высот препятствий.
0.5	«Старый» окультуренный ландшафт со множеством довольно крупных групп препятствий (крупные фермы, лесные массивы), разделенных открытыми пространствами высотой около 10 препятствий. Также невысокая крупная растительность с небольшими промежутками, такая как кустарники, фруктовые сады, молодой густой лес.
1.0	Ландшафт полностью и довольно регулярно покрыт крупными препятствиями одинакового размера, с открытыми пространствами, сопоставимыми с высотой препятствий; например зрелые регулярные леса, однородные города или деревни.
>=2.0	Центры крупных городов со смесью малоэтажной и высотной застройки. Также неравномерные большие леса с множеством полян.

В CFD кодах нет понятия аэродинамической шероховатости z_0, но зато есть параметр эквивалентная (песочная) шероховатость k_S. В статье [12] предлагаются различные способы учета аэродинамической шероховатости через песочную, отличающиеся различными способами описания пристеночных функций в CFD. Одно из них — это использовать общую формулу $k_S = 30z_0$.

б) Область внутри вычислительной области. Формирование потока в расчетной области зависит от находящихся поблизости с объектами исследования строений и элементов ландшафта (деревья, кусты, реки и т.д.). Поэтому моделируются не только здания, для которых необходимо провести анализ ветровых нагрузок, но также и сооружения, близко расположенные к рассматриваемым зданиям. Остальные строения и элементы ландшафта моделируются косвенно,

т.е. они учитываются при расчете в виде аэродинамической шероховатости. Это позволяет экономить вычислительные ресурсы.

в) Поверхности моделируемых зданий. Поверхности зданий (крыши, фасады) имеют шероховатые поверхности, которые можно охарактеризовать эквивалентной (песочной) шероховатостью k_S.

4. Определение граничных условий на входе в вычислительную область. Профиль скорости ветра в пограничном слое атмосферы и характеристики турбулентности зависят от высоты, а также как упоминалось выше от аэродинамической шероховатости. Наиболее часто используемые профили для моделирования обтекания зданий представлены Richards и Hoxey в их статье [13] и имеют следующий вид:

$$U(z) = \frac{U_{ABL}}{k} \ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right), \tag{1}$$

$$k(z) = \frac{U_{ABL}^2}{\sqrt{C_\mu}}, \tag{2}$$

$$\varepsilon(z) = \frac{U_{ABL}^3}{k(z + z_0)}. \tag{3}$$

где $U(z)$ — профиль скорости;

$k(z)$ — профиль кинетической энергии турбулентности;

$\varepsilon(z)$ — профиль скорости диссипации турбулентности;

z — высота, м;

z_0 — аэродинамическая шероховатость;

U_{ABL} — динамическая скорость (friction velocity);

k — постоянная Кармана, 0.4,

C_μ — константа, обычно принимаемая равной 0.09.

Эта и все перечисленные выше рекомендации были учтены при проведении дальнейших описанных в данной статье расчетов.

Математическая постановка задачи расчета ветровых нагрузок. Расчет ветровых потоков сводится к численному решению трехмерных нелинейных уравнений Навье-Стокса (4)-(6) [16]:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial\left(\rho u_j u_i\right)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}, \tag{4}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \tag{5}$$

$$\rho = const, \tag{6}$$

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

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

p — давление;

t — время;

ρ — плотность, кг/м^3;

μ — динамический коэффициент вязкости, м^2/с.

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

Прямое решение уравнений Навье-Стокса для обтекания зданий в настоящее время реализуемо только для малых скоростей потока и только для исследовательских задач. Поэтому для расчета такого типа течений используется подход RANS. В основе этого метода лежит полуэмпирический подход, основанный на разложении скорости на осредненную во времени и пульсационную составляющие $\left(u_i\left(t\right)=\bar{u}_i+u_i'\left(t\right)\right)$. В результате соответствующих преобразований уравнений Навье-Стокса появляются дополнительные неизвестные (сдвиговые «рейнольдсовы» напряжения).

Система уравнений для RANS моделей (7)-(8):

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\bar{u}_j\right)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho\bar{u}_i\bar{u}_j\right)=-\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\mu\left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i}\right)-\rho\overline{u_i'u_j'}\right], \qquad (7)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0,\ldots,\frac{\partial u_i'}{\partial x_i}=0, \qquad (8)$$

где $\bar{p}$ — среднее давление, индексы $i=1,\ 2,\ 3$ и $j=1,\ 2,\ 3$ соответствуют координатам x, y, z.

Сдвиговые (рейнольдсовы) напряжения $\rho\overline{u_i'u_j'}$ — являются дополнительными шестью неизвестными к параметрам осредненного движения $\left(\bar{u}_i,\bar{p}\right)$ и аппроксимируются, как правило, по гипотезе Буссинеска:

$$\rho\overline{u_i'u_j'}=-\mu_t\left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i}\right)+\frac{2}{3}\rho k\delta_{ij}, \qquad (9)$$

где μ_t — турбулентная вязкость;

k — осредненная энергия турбулентных пульсаций (TKE);

δ_{ij} — символ Кронекера.

Система является незамкнутой и требует дополнительных соглашений («моделей турбулентности»).

В данном исследовании для расчета использовалась стандартная $k-\varepsilon$ модель турбулентности, которая разработана Лаундером и Сполдингом [17] и основана на дифференциальных уравнениях пере-

носа турбулентной кинетической энергии k и скорости диссипации турбулентной энергии ε. Распределения кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε описываются следующими уравнениями (10), (11) [18]:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i} + P_t - \rho\varepsilon, \tag{10}$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} + C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}P_t - C_{\varepsilon 2}\frac{\rho\varepsilon^2}{k}. \tag{11}$$

Скорость генерации турбулентной энергии за счет энергии осредненного поля P_t выражают в следующем виде (12):

$$P_t = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \tag{12}$$

Турбулентная вязкость μ_t выражается с помощью эмпирической зависимости через значения k и ε следующим образом (13):

$$\mu_t = \rho C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \tag{13}$$

Для $k-\varepsilon$ модели сформирован стандартные рекомендуемый набор эмпирических констант, которые имеют значения:

$$C_\mu = 0.09,\ C_{\varepsilon 1} = 1.44,\ C_{\varepsilon 2} = 1.92,\ \sigma_k = 1.0,\ \sigma_\varepsilon = 1.219,\ f_\mu = 1.$$

Влияние шероховатости является критически важной проблемой в различных инженерных приложениях. Даже небольшие дефекты поверхности могут привести к значительным возмущениям в поле скоростей и изменить поведение потока. Учет влияния шероховатости твердой стенки математически определяется корректировкой безразмерной скорости течения в пограничном слое с помощью функции $B(h^+)$ [19]:

$$u^+ = \frac{1}{k}\ln y^+ + B(h^+), \tag{14}$$

где $u^+ = u / u_\tau$ — безразмерная скорость пристенного течения;

u — скорость течения, м/с^2;

$u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho}$ — динамическая скорость трения на стенке, м/с^2;

τ_w — касательное напряжение на поверхности стенки, Па;

ρ — плотность среды, кг/м^3;

k — константа Кармана;

$y^+ = yu_\tau / \nu$ — безразмерное расстояние до стенки;

y — расстояние до стенки по нормали, м;

ν — кинематическая вязкость, м^2/с;

$B(h^+)$ — функция шероховатости;

h^+ — характерный высотный параметр шероховатости.

Реализация моделей шероховатости основана на работе [20], где применялась концепция учета шероховатости, базирующаяся на понятии песочной шероховатости, входящей в безразмерный коэффициент R^+ (15):

$$R^+ = \frac{R_0 \rho u_\tau}{\mu}, \tag{15}$$

где R_0 — эквивалентная высота песочной шероховатости;

μ — динамическая вязкость, Па·с;

R^+ — далее применяется для выбора значения функции f.

Функция f входит в выражение для определения безразмерной скорости, переформулированной в сравнении с записанной ранее формулой:

$$u^+ = \frac{1}{k}\ln(Ey^+), \tag{16}$$

где параметр E' определяет влияние шероховатости (17):

$$E' = \frac{E}{f}. \tag{17}$$

Универсальная модель шероховатости основана на работе [20], где функция f определяется формулами:

$$f = \begin{cases} 1 & ; \quad R^+ \le R^+_{smooth} \\ \left[B\left(\dfrac{R^+ - R^+_{smooth}}{R^+_{rough} - R^+_{smooth}} \right) + CR^+ \right]^a & ; \quad R^+_{smooth} < R^+ < R^+_{rough} \\ B + CR^+ & ; \quad R^+ > R^+_{rough} \end{cases} \tag{18}$$

$$a = \sin\left[\frac{\pi}{2} \frac{\log(R^+ / R^+_{smooth})}{\log(R^+_{rough} / R^+_{smooth})} \right], \tag{19}$$

где R^+_{smooth}, R^+_{rough}, B и C константы.

Валидация CFD кода ЛОГОС на эксперименте по обдуву макета здания. Для отработки методики моделирования обтекания зданий был проведен тестовый расчет. В качестве тестового примера выбрана статья Chand [10], где представлены результаты эксперимента обдува макета здания в масштабе 1:30 в аэродинамической трубе. Размеры макета составляют $60\times25\times50$ см. В представленном эксперименте было два макета: с балконами (рис. 2) и без. Для сравнения моделей был выбран вариант без балконов, т.к. этот вариант более схож с геометрией зданий ядерного острова, анализируемых в данном исследовании. В качестве отслеживаемого параметра выступает коэффициент давления (формула (20)) на центральной и боковых линиях (M и Ed/Eu на рис. 2) на переднем и заднем фасадах здания.

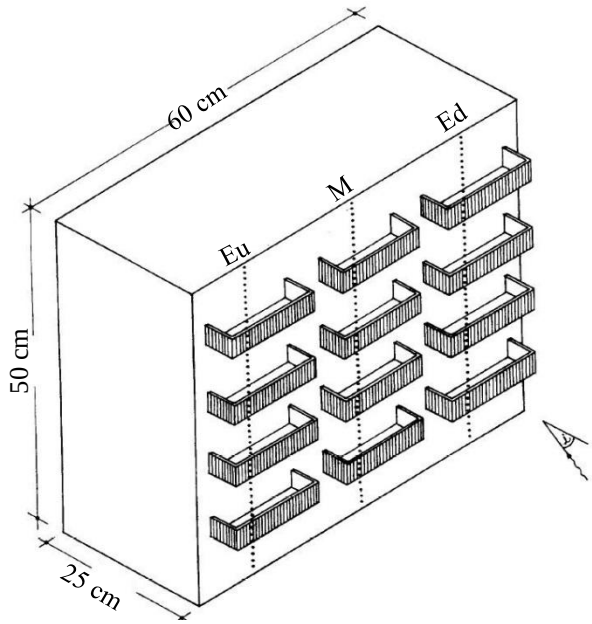


Рис. 2. Геометрия макета здания в эксперименте, M — центральная линия, Ed/Eu — боковые линии

$$C_p = \frac{P - P_0}{0.5\rho U_{ref}^2}, \tag{20}$$

где P — давление на поверхности, Па;

P_0 — давление набегающего потока (в 0.9 м перед зданием на высоте макета здания — 0.5 м);

ρ — плотность воздуха, 1.2 кг/м^3;

U_{ref} — скорость набегающего потока, 7.1 м/с на высоте 0.5 м.

В эксперименте измерялись профиль скорости и профиль интенсивности турбулентности (рис. 3). Параметры турбулентности вход-

ного потока в CFD кодах можно выражать либо через кинетическую энергию турбулентности и скорость ее диссипации [13], либо через интенсивность турбулентности и ее кинетическую энергию [7]. В данной задаче для описания турбулентности на границе мы будем использовать первую пару параметров. Кинетическая энергия турбулентности рассчитывается через скорость и интенсивность турбулентности по формуле (21), где параметр a изменяется от 0.5 до 1.5. В данном примере $a=1$, как рекомендуется в статье Tominaga et al. [7]. Скорость диссипации турбулентности рассчитывается по формуле (22).

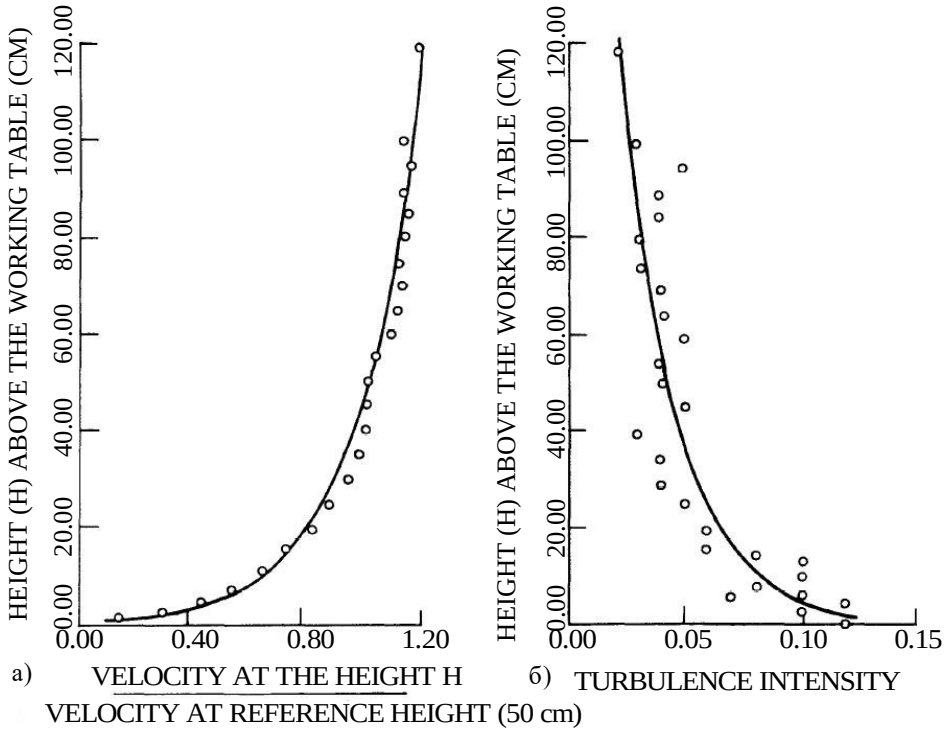


Рис. 3. Профиль скорости (а) и интенсивности турбулентности (б) в эксперименте [10]

$$k(z) = a\left(I_u(z)U(z)\right)^2, \tag{21}$$

$$\varepsilon(z) = \frac{U_{ABL}^3}{k(z+z_0)}, \tag{22}$$

где $U(z)$ — профиль скорости;

$k(z)$ — профиль кинетической энергии турбулентности;

$\varepsilon(z)$ — профиль скорости диссипации турбулентности;

z — высота, м;

z_0 — аэродинамическая шероховатость, 0.0018;

U_{ABL} — динамическая скорость (friction velocity);

k — постоянная Кармана, 0.4.

Размеры расчетной области соответствуют представленным выше рекомендациям. В данной задаче высота макета — 0.5 м, следовательно, расчетная область имеет размеры $5.6 \times 10.25 \times 3$ м.

На рис. 4 представлены результаты исследования на сеточную сходимость в многофункциональном программном комплексе ЛОГОС [14] созданной математической модели начиная с рекомендованного минимального в 10 % от размера наименьшей стороны объекта размера с шагом сгущения в 1.5. Как видно из результатов, достаточной точностью можно считать вариант в 0.01 м линейного размера ячейки. Для дополнительной кроссверификации на данном рисунке также представлены результаты моделирования данной задачи на коде STAR CCM+ с использованием стандартной $k-\varepsilon$ модели турбулентности для сетки с гексагональными ячейками 0.01 м.

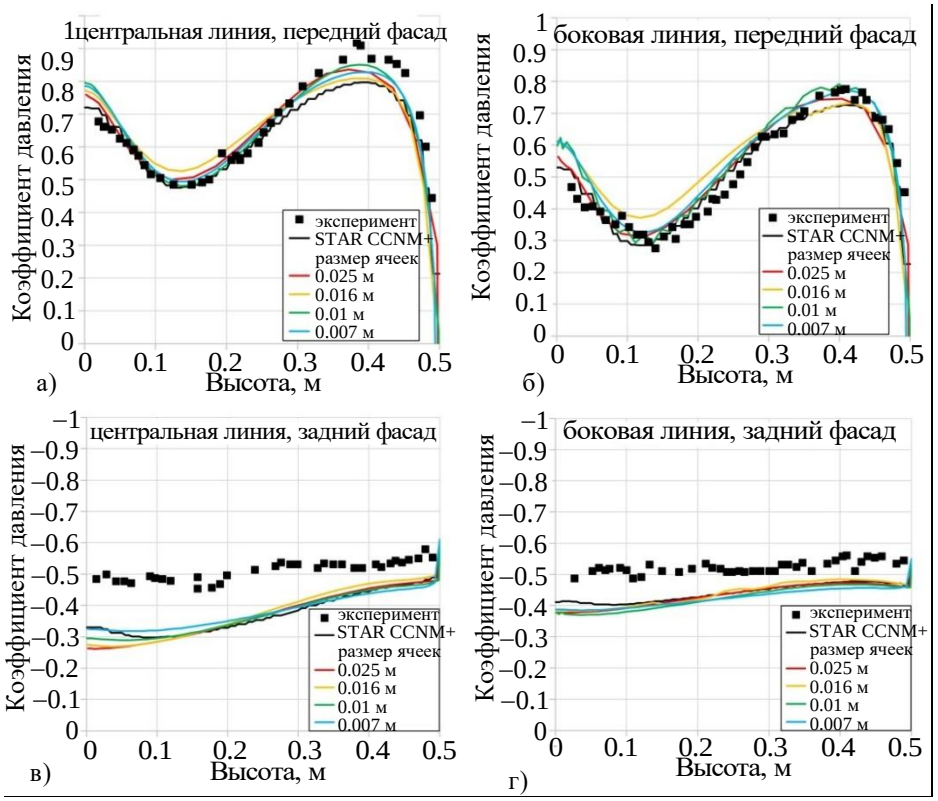


Рис. 4. Результаты исследования на сеточную сходимость. Вариант без балконов. Центральная линия, передний фасад (а); боковая линия, передний фасад (б); центральная линия, задний фасад (в); боковая линия, задний фасад (г)

Результаты исследования на применимость RANS моделей турбулентности представлены на рисунке 5. В программе ЛОГОС модель шероховатости реализована только для моделей турбулентности k-ω SST и Спаларта-Аллмараса. Однако, с учётом незначительного её влияния на результат расчёта и лучшего совпадения результатов расчёта для стандартной k-ε модели турбулентности с экспериментом, в дальнейших вычислениях на ПС ЛОГОС использовалась только k-ε модель турбулентности без учёта шероховатости. Все расчёты на коде STAR CCM+ проводились для сетки с гексагональными ячейками по стандартной k-ε модели турбулентности и учётом шероховатости. Как видно из рисунка 5 результаты расчёта на отечественном ПС ЛОГОС и коде STAR CCM+ показывают хорошее совпадение с экспериментом.

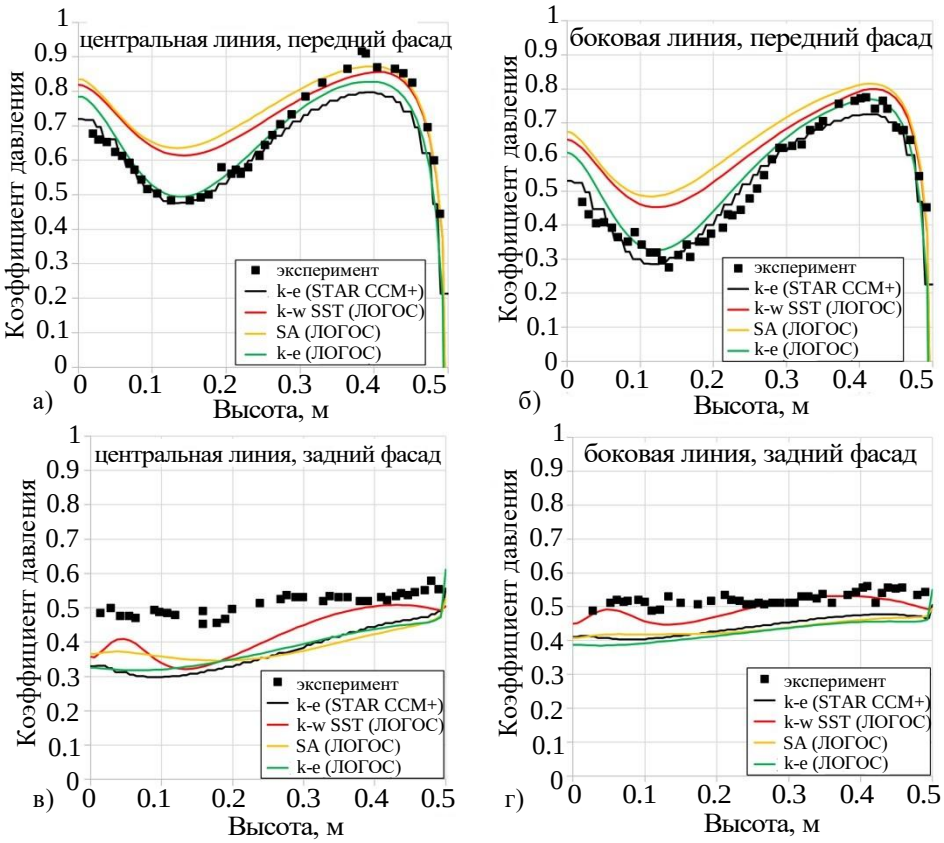
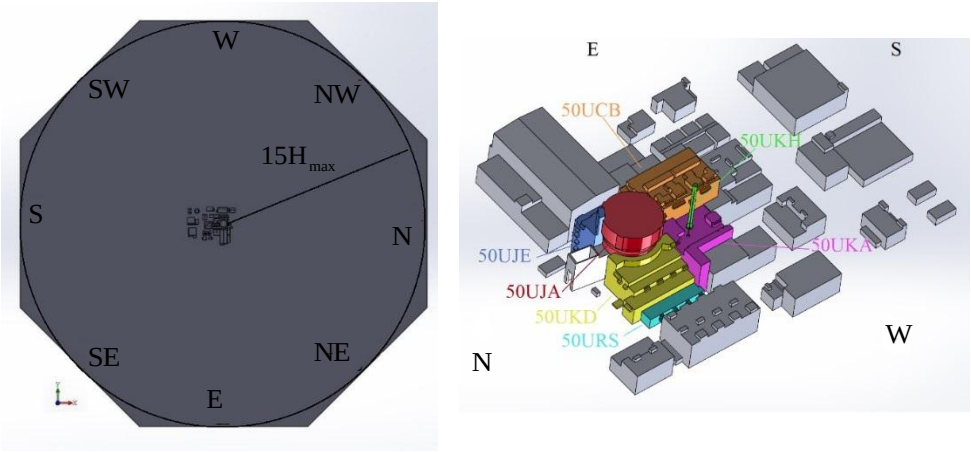


Рис. 5. Результаты исследования на применимость RANS моделей турбулентности. Вариант без балконов. Код ЛОГОС без модели шероховатости, код STAR CCM+ с моделью шероховатости. Центральная линия, передний фасад (а); боковая линия, передний фасад (б); центральная линия, задний фасад (в); боковая линия, задний фасад (г)

Численный расчет ветровых нагрузок на здания ядерного острова АЭС «Пакш-II». В ходе проектирования зданий ядерного острова энергоблока № 5 АЭС Пакш-II возникла задача по обоснованию обеспеченности необходимого запаса прочности строительных конструкций зданий при проектных ветровых нагрузках. Для её решения был проведён анализ ветровых нагрузок на шесть зданий ядерного острова энергоблока № 5 АЭС Пакш-II (50UJA, 50UJE, 50UCB, 50UKA, 50UKD, 50URS) и вентиляционной шахты с поддерживающей ее стальной конструкции 50UKH с помощью отечественного CFD кода ЛОГОС. Дополнительно была проведена кроссверификация на коде STAR CCM+ [15].

Размеры вычислительной области определялись из условия отсутствия влияния её границ на получаемое решение в соответствии с рекомендациями [6-8]. Для ядерного острова 5 блока Пакш-II самой высокой точкой является верхняя точка вентиляционной шахты UKH (H_{max}=100.1 м). Поэтому расчетная область имеет форму параллелепипеда с высотой $6H_{max}$ и основанием в виде восьмиугольника, в который вписана окружность с радиусом $15H_{max}$ (рис. 6(а)). Такой вид расчётной области обусловлен необходимостью моделирования ветровой нагрузки при всех направлениях ветра (8 направлений). Расчетная модель также включала в себя окружающие здания, что представлено на рисунке 6(б).



а) б)

Рис. 6. Геометрия расчетной области моделируемой задачи: общий вид (а) и детально моделируемые здания (б)

На входе в расчётную область задавались профили скорости, кинетической энергии турбулентности, и скорость диссипации, которые определялись по формулам (1)-(3). По формулам видно, что профили зависят от высоты и аэродинамической шероховатости. Значения

аэродинамической шероховатости определялись по аэрокосмическому снимку. На рис. 7 показана территория вокруг расчетной области с обозначением аэродинамической шероховатости, которая учитывается при определении входных профилей скорости и характеристик турбулентности по методу Davenport-Wieringa. Расчет проводился в стационарной постановке, с использованием стандартной $k-\varepsilon$ модели турбулентности, скорость ветра принималась равной 24.9 м/с на высоте 10 м.

Рис. 7. Величины аэродинамической шероховатости согласно анализу аэрокосмического снимка, прилегающей к площадке Пакш-II территории

Результаты расчётов в виде профилей ветровой нагрузки на поверхности здания для северного направления ветра представлены на рис. 8. На рисунке видно, что максимальные положительные ветровые нагрузки наблюдаются с наветренной стороны (красные области), а отрицательные давления расположены в зонах отрыва (синие). На рис. 9 видно, как происходит обтекание зданий ядерного острова Пакш-II, образование вихревых структур представлены в виде линий тока.

Для удобства сравнения результатов расчетов в программах ЛОГОС и STAR CCM+ ветровые нагрузки осреднялись по поверхностям зданий. Нумерация поверхностей, на примере здания 50UJE, представлена на рис. 10. Как видно из рис. 11 результаты расчётов, выполненных в программах ЛОГОС и STAR CCM+, хорошо совпадают.

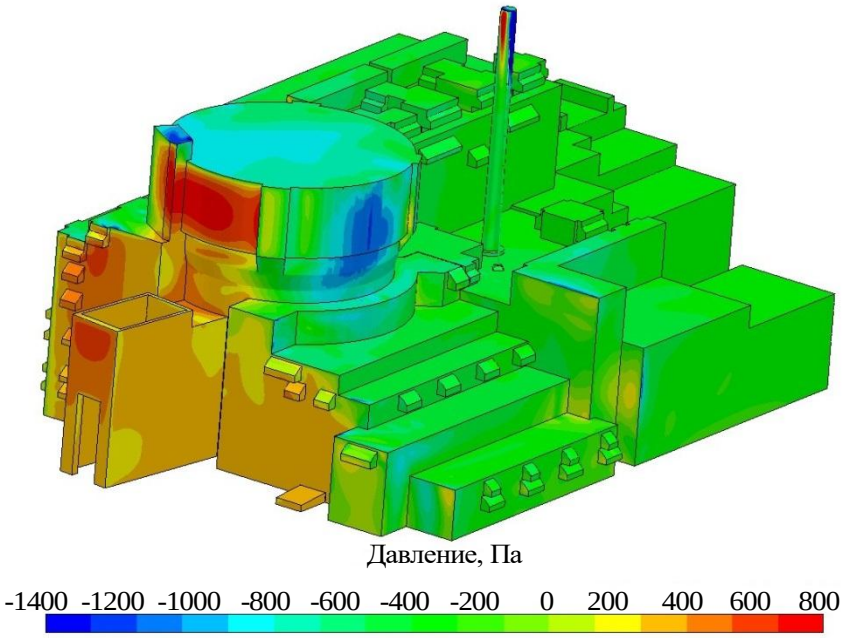


Рис. 8. Профили ветровой нагрузки на здания ядерного острова Пакш-II для северного направления ветра

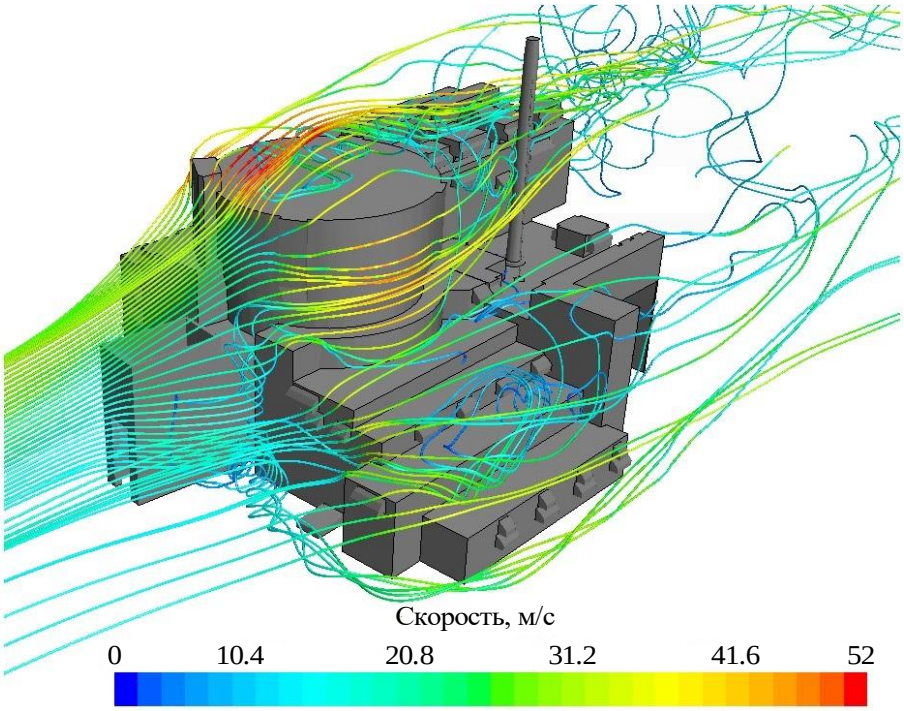


Рис. 9. Линии тока на здания ядерного острова Пакш-II для северного направления ветра

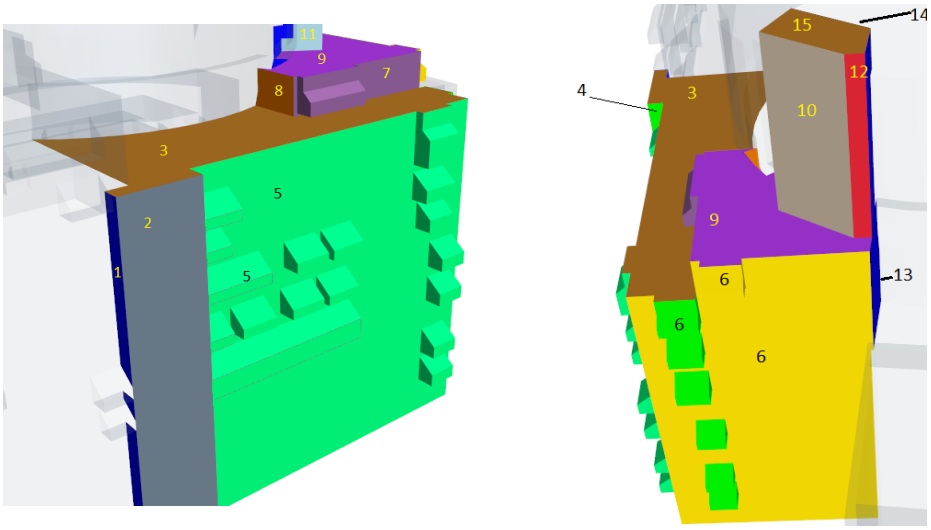


Рис. 10. Нумерация поверхностей на здании 50UJE

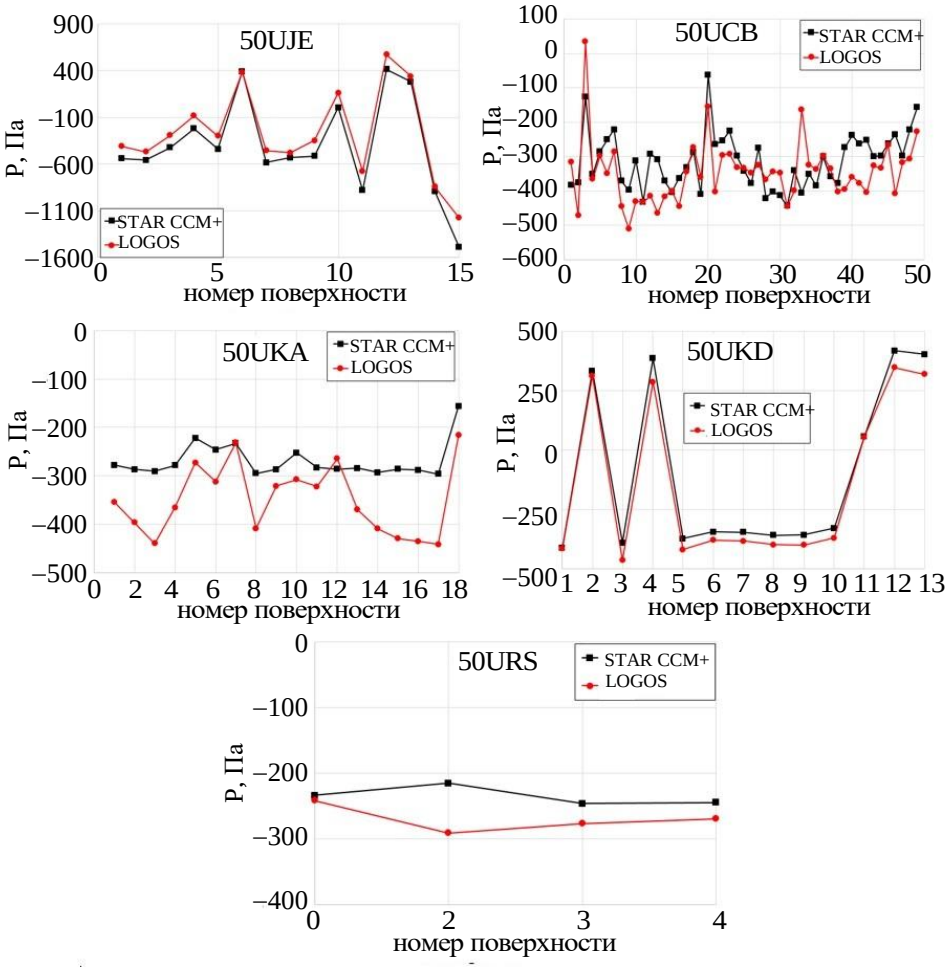


Рис. 11. График ветровой нагрузки для зданий

При расчёте ветровой нагрузки на вентиляционную шахту и её опорную конструкцию 50UKH, с целью снижения объёма расчётной сетки, моделировалась сама шахта и только одна стальная опора (рис. 12 (а) и (б)). Такой подход допустим, т.к. элементы стального каркаса 50UKH подобны друг другу (цилиндры разного размера). Обтекание таких объектов одинакового размера будет иметь аналогичный профиль течения, одинаковое максимальное давление и схожий градиент давления по поверхности.

Опора стального каркаса 50UKH, моделируемая в CFD расчете, разбивалась на высотные группы (рис. 12(а)) и для них вычислялось осреднённое по поверхности давление. На рис. 13(б) представлены результаты ветровой нагрузки на этих высотных группах. Также на соседнем рис. 13(а) представлены результаты расчетов ветровой нагрузки на цилиндрической поверхности вентиляционной шахты для 50UKH осредненной по секторам в 15°. Как видно из представленных графиков отмечается хорошее соответствие между результатами расчётов на отечественном ПС ЛОГОС и зарубежным ПС STAR CCM+.

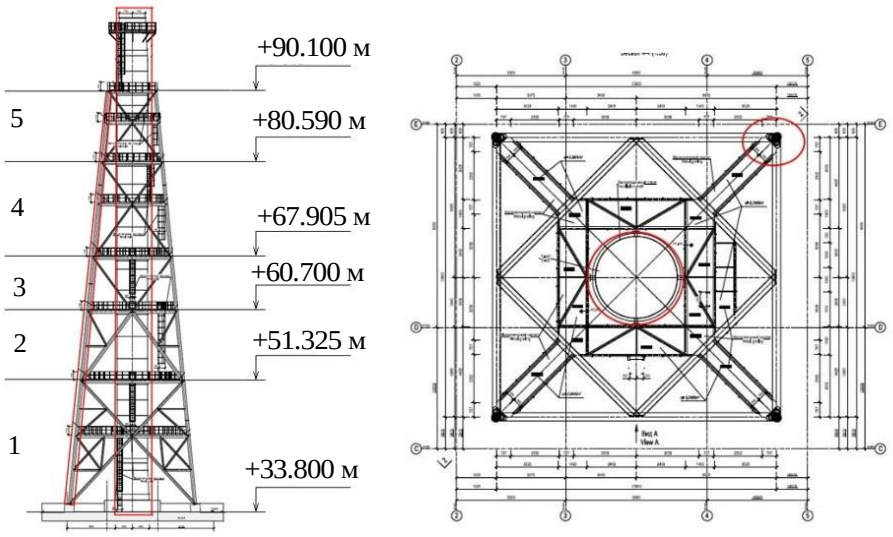


Рис. 12. Моделируемые в CFD части 50UKH (выделены красным): вентиляционная шахта и одна опора стального поддерживающего каркаса (а) и (б); разбивка по высотным группам стальной конструкции 50UKH (а)

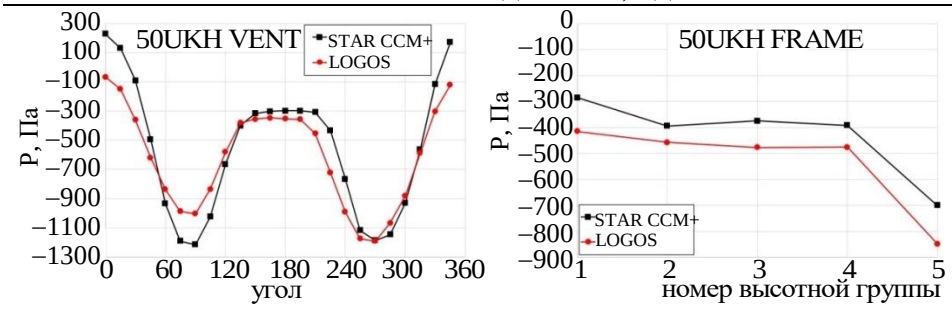


Рис. 13. График ветровой нагрузки для вентиляционной шахты 50UKH

Заключение. В ходе настоящей работы было выполнено моделирования ветровой нагрузки на здания ядерного острова энергоблока №5 АЭС «Пакш-II» с помощью отечественного отраслевого CFD кода ЛОГОС. Полученные результаты расчётов позволили обосновать обеспеченность необходимого запаса прочности строительных конструкций зданий при проектных ветровых условиях. Предварительная валидация на эксперименте по обдуву макета здания показала хорошее совпадение результатов расчёта с экспериментом, таким образом, была подтверждена корректность используемого подхода. Кроссверификация с широко известным коммерческим CFD кодом STAR CCM+ на эксперименте и проектной задаче также продемонстрировала хорошую согласованность результатов расчётов.

Выполненные расчёты показали возможность успешного использования CFD кода ЛОГОС для решения проектных задач анализа ветровой нагрузки на здания АЭС.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Richards P.J., Hoxey R.P. Pressures on a cubic building – part 1: full-scale results. *Journal Wind Eng Ind Aerodyn*, 2012, vol. 102, pp. 72-86.

[2] Caracoglia L., Jones NP. Analysis of full-scale wind and pressure measurements on a low-rise building. *Journal Wind Eng Ind Aerodyn*, 2009, vol. 97, pp. 157-173.

[3] Surry D. Pressure measurements on the Texas tech building: Wind-tunnel measurements and comparisons with full scale. *Journal Wind Eng Ind Aerodyn*, 1991, vol. 38, pp. 235-247.

[4] Richardson GM., Surry D. The silsoe structures building: Comparison between full-scale and wind-tunnel data. *Journal Wind Eng Ind Aerodyn*, 1994, vol. 51, pp. 157-176.

[5] Nore K., Blocken B., Thue JV. On CFD simulation of wind-induced airflow in narrow ventilated facade cavities: coupled and decoupled simulations and modelling limitations. *Build Environ*, 2010, vol. 45, pp. 1834-1846.

[6] Blocken B. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations, *Build Environ*, 2015, pp. 1-27.

[7] Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H., Nozu T., Yashikawa M., Shirasawa T. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind

environment around buildings. *Journal Wind Eng Ind Aerodyn*, 2008, vol. 96, pp. 1749-1761.

[8] Franke J., Baklanov A. Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Enviroment: COST Action 732 Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models, 2007.

[9] Wieringa J. Updating the Davenport roughness classification. *Journal Wind Eng Ind Aerodyn*, 1992, vol. 41, is. 1-3, pp. 357-368.

[10] Chand I., Bhargava P.K., Krishak N.L.V. Effect of Balconies on Ventilation Inducing Aeromotive Force on Low-rise Buildings. *Build Environ*, 1998, vol. 33, pp. 385-396.

[11] Baetke F., Werner H. Numerical simulation of turbulent flow over surface-mounted obstacles with sharp edges and corners. *Journal Wind Eng Ind Aerodyn*, 1990, vol. 35, pp. 129-147.

[12] Blocken B., Stathopoulos T., Carneliet J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmos Environ*, 2007, vol. 41, pp. 238-252.

[13] Richards P.J., Hoxey R.P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-ε turbulence model. *Journal Wind Eng Ind Aerodyn*, 2011, vol. 99, no. 4, pp. 257-266.

[14] Руководство пользователя многофункционального пакета программ «ЛОГОС». [Электронный ресурс]. URL: https://logos-support.ru

[15] Simcenter STAR CCM+ v.2020.1. User Guide. [Электронный ресурс]. URL: https://login.siemens.com

[16] Седов Л.И. *Механика сплошной среды. Том 1*. Москва, Наука, 1973, 536 с.

[17] Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974, vol. 103, pp. 456-460.

[18] Снегирев А.Ю. *Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений. Учебное пособие*. Санкт-Петербург, Издательство Политехнического Университете, 2009, 143 с.

[19] Шлихтинг Г. *Теория пограничного слоя*. Москва, Наука, 1974, 712 с.

[20] Jayatilleke C.L. The influence of Prandtl number and surface roughness on the resistance of the laminar sub-layer to momentum and heat transfer. *Progress in heat and mass transfer*, 1969, vol. 1, pp. 193-330.

Статья поступила в редакцию 12.12.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Котмакова А.А., Авдеев Е.Э., Капица Д.В., Фомичев Д.В CFD анализ ветровой нагрузки на здания ядерного острова АЭС «Пакш-II». *Математическое моделирование и численные методы*, 2026, № 1, с. 119–139.

Котмакова Анна Алексеевна — АО «Атомэнергопроект». e-mail: AAKotmakova@spbaep.ru

Авдеев Евгений Эдуардович — АО «Атомэнергопроект». e-mail: EEAvdeev@spbaep.ru

Капица Денис Владимирович — АО «Атомэнергопроект». e-mail: DVKapitsa@spbaep.ru

Фомичев Дмитрий Вадимович — ГК Росатом. e-mail: DVaFomichev@rosatom.ru

CFD analysis of wind loads on the nuclear island buildings of the Paks II NPP

© A.A.Kotmakova[1], Ye.E.Avdeev[1], D.V.Kapitsa[1], D.V. Fomichev[2]

[1]Atomenergoproekt JST, St. Petersburg, 197183, Russia
[2]Rosatom State Atomic Energy Corporation, Moscow, 119017, Russia

One of the key challenges in designing nuclear power plant buildings and structures is accounting for wind loads, the accurate calculation of which is critical to ensuring the safety of building structures. This article presents the validation of the domestic CFD code LOGOS using a blower experiment on a building model and the results of calculating wind loads on the buildings of the Paks II nuclear island. Conducting a numerical experiment using the CFD code allowed us to determine the design parameters at all points in the computational domain, including the wind pressure distribution on the building facades. Cross-verification of this design problem with the commercial CFD code STAR CCM+ showed good agreement between the calculation results.

Keywords*: wind load, aerodynamic roughness, CFD*

REFERENCES

[1] Richards P.J., Hoxey R.P. Pressures on a cubic building – part 1: full-scale results. *Journal Wind Eng Ind Aerodyn*, 2012, vol. 102, pp. 72-86.
[2] Caracoglia L., Jones NP. Analysis of full-scale wind and pressure measurements on a low-rise building. *Journal Wind Eng Ind Aerodyn*, 2009, vol. 97, pp. 157-173.
[3] Surry D. Pressure measurements on the Texas tech building: Wind-tunnel measurements and comparisons with full scale. *Journal Wind Eng Ind Aerodyn*, 1991, vol. 38, pp. 235-247.
[4] Richardson GM., Surry D. The silsoe structures building: Comparison between full-scale and wind-tunnel data. *Journal Wind Eng Ind Aerodyn*, 1994, vol. 51, pp. 157-176.
[5] Nore K., Blocken B., Thue JV. On CFD simulation of wind-induced airflow in narrow ventilated facade cavities: coupled and decoupled simulations and modelling limitations. *Build Environ*, 2010, vol. 45, pp. 1834-1846.
[6] Blocken B. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations, *Build Environ*, 2015, pp. 1-27.
[7] Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H., Nozu T., Yashikawa M., Shirasawa T. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal Wind Eng. Ind Aerodyn*, 2008, vol. 96, pp. 1749-1761.
[8] Franke J., Baklanov A. Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Enviroment: COST Action 732 Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models, 2007.
[9] Wieringa J. Updating the Davenport roughness classification. *Journal Wind Eng. Ind Aerodyn.*, 1992, vol. 41, is. 1-3, pp. 357-368.
[10] Chand I., Bhargava P.K., Krishak N.L.V. Effect of Balconies on Ventilation Inducing Aeromotive Force on Low-rise Buildings. *Build Environ*, 1998, vol. 33, pp. 385-396.

[11] Baetke F., Werner H. Numerical simulation of turbulent flow over surface-mounted obstacles with sharp edges and corners. *Journal Wind Eng Ind Aerodyn*, 1990, vol. 35, pp. 129-147.

[12] Blocken B., Stathopoulos T., Carneliet J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmos Environ*, 2007, vol. 41, pp. 238-252.

[13] Richards P.J., Hoxey R.P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-ε turbulence model. *Journal Wind Eng Ind Aerodyn*, 2011, vol. 99, no. 4, pp. 257-266.

[14] Rukovodstvo pol'zovatelya mnogofunkcional'nogo paketa programm «LOGOS» [User's guide for the multifunctional software package «LOGOS»]. [Electronic resource]. URL: https://logos-support.ru

[15] Simcenter STAR CCM+ v.2020.1. User Guide. [Electronic resource]. URL: https://login.siemens.com

[16] Sedov L.I. Mekhanika sploshnoj sredy. Tom 1. [Continuum Mechanics. Volume 1]. Moscow, Publishers Nauka, 1973, 536 p.

[17] Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974, vol. 103, pp. 456-460.

[18] Snegirev A.YU. *Vysokoproizvoditel'nye vychisleniya v tekhnicheskoj fi-zike. CHislennoe modelirovanie turbulentnyh techenij. Uchebnoe posobie* [High-performance computing in technical physics. Numerical modeling of turbulent flows. Textbook]. Sankt-Peterburg, Moscow Polytech, 2009, 143 p.

[19] Schlichting G. Teoriya pogranichnogo sloya [Boundary layer theory]. Moscow, Publishers Nauka, 1974, 712 p.

[20] Jayatilleke C.L. The influence of Prandtl number and surface roughness on the resistance of the laminar sub-layer to momentum and heat transfer. *Progress in heat and mass transfer*, 1969, vol. 1, pp. 193-330.

Kotmakova A.A., Atomenergoproekt JST. e-mail: AAKotmakova@spbaep.ru

Avdeev Ye.E., Atomenergoproekt JST. e-mail: EEAvdeev@spbaep.ru

Kapitsa D.V., Atomenergoproekt JST. e-mail: DVKapitsa@spbaep.ru

Fomichev D.V., Rosatom State Atomic Energy Corporation. e-mail: DVaFomichev@rosatom.ru