

БУДІВНИЦТВО

УДК 624.011

Стоянов В.В.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Жгалли Ш.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СНЕГОВЫХ НАГРУЗОК НА ПОКРЫТИЯХ УНИКАЛЬНЫХ И СОВРЕМЕННЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ФОРМ

В статье объектом и предметом внимания является достоверность и применимость численного моделирования процессов снегопереноса и снегоотложения с целью определения снеговых нагрузок на покрытиях уникальных и современных архитектурных форм на первом этапе концепции в условиях отсутствия нормативно-методической документации и научно-технического сопровождения. Эксперимент в специальных аэродинамических трубах всегда должен сопровождать процесс численного моделирования. Дается краткий анализ современного состояния численного моделирования, а также приводятся проверочные расчеты, результаты моделирования и их сопоставимость с ранее полученными численно и экспериментально результатами других авторов. Исследуется распределение снега на оболочки типа гиперболического параболоида. Моделирование проводится в программном комплексе ANSYS Fluent.

Ключевые слова: снеговые нагрузки, натурные эксперименты, снегоотложение и снегоперенос, гиперболический параболоид, ANSYS Fluent, аэродинамические трубы.

Постановка проблемы. Процесс формирования снеговых покровов на большепролетных покрытиях или оболочках является серьезной проблемой в последние годы, особенно когда глобальное потепление провоцирует реальные возможности изменения в снеговых и ветровых районах. Отсутствие схемы для определения характера распределения снеговой нагрузки с учетом сыпания и снегопереноса в (ДБНе, СНИПе, еврокоде, в актуализированной редакции этих документов)

усугубляет ситуацию, особенно для большого класса формы оболочки, в частности гиперболических покрытий, что является причиной случайных повреждений и разрушений эксплуатируемых конструкций (рис. 1).

В настоящее время прогнозирование снеговых нагрузок в значительной степени зависит от изменений в аэродинамической трубе. С развитием вычислительной механики особенно в области вычислительной гидродинамики (CFD) все боль-



Рис. 1. Обрушение стадиона в Миннеаполисе в 2010 г.

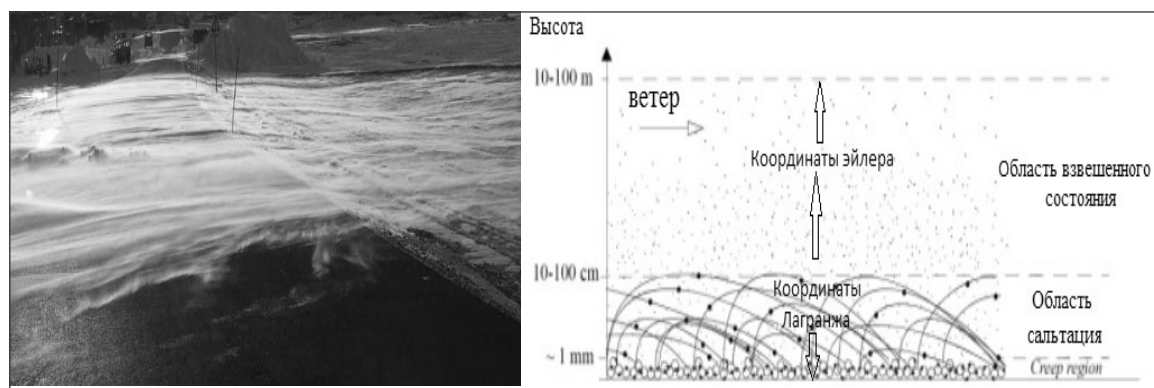


Рис. 2. Слева – поток сальтации снежных частиц г. Лонгиир, Норвегия; справа – классификация математических моделей снегопереноса в соответствии с двумя основными механизмами снегопереноса

шее число исследователей начинают изучать снеговые нагрузки путем численного моделирования. Между тем, численное моделирование имеет преимущества по низкой стоимости, сжатоу сроку и может быть легко использовано для проведения параметрического анализа.

В зависимости от подхода к моделированию, модели многофазных течений разделяются на два основных класса: Лагранжевы и Эйлеровы модели. Наиболее простые модели основаны на критической скорости U_* и распространяют подход Эйлера как на область сальтации, так и на область взвешенного состояния, в которой турбулентность играет значительную роль в процессе переноса частиц снега (рис. 2). С другой стороны, прямое моделирование динамики частиц снега в координатах Лагранжа значительно повышает требования к вычислительным ресурсам [1].

В связи с этим, данный подход нельзя рекомендовать к внедрению в инженерную практику, за исключением двумерных расчетов или моделирования ограниченных областей. Такое четкое разделение на два основных механизма снегопереноса и их математическая интерпретация приводят к определенным проблемам, что усложняет реализацию обеих механизмов снегопереноса одновременно. Возможный вариант решения указанной проблемы – использование результатов моделирования процесса сальтации в координатах Лагранжа в качестве входных граничных условий (например, в виде эффективной объемной концентрации снега) для задачи моделирования процесса переноса взвешенных частиц снега в координатах Эйлера [2].

Анализ последних исследований и публикаций. Первые попытки использовать технологии численного моделирования для расчета снеговых нагрузок предприняты еще в начале 90-х годов

прошлого века. В этот период началось активное строительство гражданских и промышленных объектов в высокогорных районах Франции и Норвегии, для которых характерна повышенная вероятность схода лавин с соответствующими катастрофическими последствиями. В связи с этими обстоятельствами, появилась идея использовать методы вычислительной гидродинамики для моделирования процессов снегоотложения и снегопереноса.

В 1998 году французский ученый Naaim [3] опубликовал работу, которая стала основой для разработки современных моделей снегопереноса и снегоотложения Thiis [4–7] и Bang [8]. Для моделирования массообмена между воздухом и снегом Naaim предложил «эрозионную» модель, в которой процесс массообмена зависит от характеристик турбулентности основного потока, от критической скорости потока (скорость потока, соответствующая началу переноса частиц снега) и локальной концентрации снега.

В предыдущих исследованиях, где моделировали снеговые нагрузки, использовалось множество различных моделей турбулентности. В работе [9] применили стандартную модель k-ε и указали, что необходимо критически изучить влияние неточности в отношении изотропной турбулентности при накоплении снега и эрозии. В работе [10] использовали исправную модель k-ε в моделировании снегопереноса и снегоотложений и сравнили результаты со стандартным k-ε.

Сравнительный анализ провиден в работе [11], где исследуется обтекание забора двухфазным потоком с применением различных моделей турбулентности (включая модель RSM, модель SST k-ω, k-ε модель и k-kl-ω), здесь авторы пришли к выводу, что модель k-kl-ω лучше согласуется с экспериментом. Эта модель представляет собой

три уравнения турбулентной кинетической вязкости на основании усреднения по Рейнольдсу. Эти три уравнения включают уравнения переноса для турбулентных кинетических энергий k_T , ламинарную кинетическую энергию k_L и обратный масштаб турбулентности (ω). Эти уравнения турбулентности представлены ниже:

$$\frac{Dk_T}{Dt} = P_{k_T} + R + R_{NAT} - wk_T - D_T + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{\alpha_T}{\alpha_k} \right) \frac{\partial k_T}{\partial x_j} \right], \quad (4)$$

$$\frac{Dk_L}{Dt} = P_{k_L} - R - R_{NAT} - D_L + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v \frac{\partial k_L}{\partial x_j} \right) \right], \quad (5)$$

$$\frac{D\omega}{Dt} = C_{\omega 1} \frac{\omega}{k_T} P_{k_T} + \left(\frac{C_{\omega} R}{f_{\omega}} - 1 \right) (R + R_{NAT}) \frac{\omega}{k_T} - C_{\omega 2} \omega^2 + C_{\omega 3} f_{\omega} \alpha_T f_w^2 \frac{\sqrt{k_T}}{d^3} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{\alpha_T}{\alpha_k} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

где P_{k_T} и P_{k_L} – генерации турбулентной и ламинарной кинетической энергии, R представляет собой усредненный эффект пробой турбулентной флуктуации в переходной поток, R_{NAT} – это естественный переход генерации, D_T и D_L – пристеночные диссипации.

Постановка задания. Целью работы является формулирование метода численного моделирования процесса снегопада, исследование закономерности формирования снеговых отложений на обложке типа гипара.

Изложение основного материала исследования. Процесс снегопереноса и снегоотложения рассматривается как задачи теории многофазной среды, где течение вязкой несжимаемой жидкости определяется на основе решения системы уравнений Навье-Стокса. В работе применяется модель смеси (mixture), где рассматривается течение многофазной смеси в дисперсном режиме как единого целого. Фазы считаются взаимопроникающими средами. При этом решается один набор уравнений сохранения импульса для определения поля скоростей смеси двух или более фаз. Скорости отдельных фаз могут вычисляться через поправки к скорости смеси.

Пристеночные сдвиговые напряжения являются очень важным параметром в процессе снегопереноса и снегоотложения. Частицы снега начинают двигаться, когда пристеночные сдвиговые напряжения τ на поверхности снега превышают его предельные значения τ_t , в противном случае частицы снега остаются неподвижными. В численном моделировании пристеночное сдвиговое напряжение τ заменяется скоростью трения u . следующему соотношению:

$$u = \sqrt{\tau / \rho} = \frac{\kappa u(z)}{\ln(z / z_s)}, \quad (7)$$

где κ обозначает постоянную вон Кармана и равную 0,4; z_s – аэродинамическая высота шероховатости над снежной поверхностью.

Снежный поток уноса q_{ero} в упрощенном виде описывается в зависимости от скорости трения. Поток осаждения q_{dep} рассчитывается как функция объемной доли f и скорость снегопада w_f , определяется следующим условным выражением:

$$q_s = \begin{cases} q_{ero} = A_{ero} (u_*^2 - u_t^2) & u_* > u_t \\ q_{dep} = \rho_s f w_f \frac{u_t^2 - u_*^2}{u_t^2} & u_* \leq u_t \end{cases} \quad (8)$$

Здесь A_{ero} является коэффициентом пропорциональности, характеризующим силу сцепления частиц снега, равняется 7.0×10^{-4} , u_t – предельная скорость трения, равняется, w_f – скорость осаждения частиц снег. Кроме того, на каждом временном шаге нестационарной задачи сетка деформируется в соответствии с условиями (8). Перемещение узлов сетки позволяет отслеживать изменение топологии снежного покрова во времени, ниже представлен необходимый код на языке C++ для программирования этого условия во Fluent ANSYS.

```
DEFINE_EXECUTE_AT_END(exec)
begin_c_loop(c, t)
{
    real x[ND_ND];
    real y, vof, up, ux, hs;
    C_UDMI(c, t, 0) = (ps*wf*vof*((uxt*uxt)-(ux*ux)))/(uxt*uxt);
    Domain *domain;
    cell_t c;
    Thread *t;
    domain = Get_Domain(3);
    thread_loop_c(t, domain)
    {
        begin_c_loop(c, t)
        C_UDMI(c, t, 2) = (C_UDMI(c, t, 0) - C_UDMI(c, t, 1))/150;
        {
            C_CENTROID(x, c, t);
            y = x[1];
            up = uxt*2.8;
            ux = (C_U(c,t)*0.4)*0.4 / log(y / zs);
            hs = 0.0815*ux*ux;
            C_VOF(c, t);
            if (y <= hs)
                vof += (0.68*uxt*((ux*ux) - (uxt*uxt))) /
                (ux*up*hs*9.81);
            else
                vof += (0.8*exp(-1.55*(4.78*pow(ux, -0.544) - pow(y,
                -0.544)))) / ps;
            }
        end_c_loop(c, t)
    }
    printf("\n VOF = %g\n", vof);
}
```

Обычно плотность частиц снега ρ_s немного больше объемной плотности ρ_b . В данном исследовании это отличие не рассматривается. Таким образом, скорость изменения глубины снега за единицу времени может быть рассчитана

$\Delta h = q_s / \dot{\lambda}_s$. После определенного периода времени снегопада Δt глубина снега или снеговой покров может быть рассчитан согласно уравнению (4), где h_0 – начальный снеговой покров:

$$h(t) = h_0 + \int_0^t \frac{q_s}{\rho_s} dt. \quad (9)$$

В реальных условиях процесс снегопада часто длится от нескольких часов до нескольких дней, поэтому традиционные методы моделирования снеготранспорта и снеготложения с использованием CFD становятся очень трудоемкими в отношении к потреблению времени. Следовательно, изменение поверхности снега обычно не рассматривалось во многих предыдущих работах [12].

Данный метод является упрощенным подходом для реализации моделирования небольших процессов снеготранспорта и снеготложения. Результаты прогнозирования показывали хорошую сходимость с данными, полученными путем испытаний в специальной аэродинамической трубе [13]. Также во время моделирования процессов эрозии и осаждения задача рассматривается как стационарное состояние, где скорость изменения глубины снега за единицу времени q_s / ρ_s остается постоянной. Таким образом, интеграл по времени становится следующей формулой (10):

$$h(t) = h_0 + \frac{q_s}{\rho_s} \Delta t. \quad (10)$$

Важно отметить, что снеготранспорт разделяется на три механизма в зависимости от высоты от поверхности земли, области оползня, области и сальтации, области взвешенного состояния (диффузия). Скорость переноса снега в слое оползня настолько мала, что можно пренебречь. Таким образом, движение снега в оползень не рассматривается.

В UDF-Fluent посредством кода на C++ динамику сетки можно представить в следующем виде:

```
DEFINE_GRID_MOTION(beam, domain, dt, time, dtime)
{
    Thread *tf= DT_THREAD(dt);
    face_t f;
    cell_t c0;
    Thread *ct0;
    Node *v;
    real NV_VEC(axis);
    real beam;
    int n;
    begin_f_loop(f, tf)
    {
        f_node_loop(f, tf, n)
        {
            v = F_NODE(f, tf, n);
            if (NODE_POS_NEED_UPDATE(v))
            {
                NODE_POS_UPDATED(v);
            }
        }
    }
}
```

```
c0 = F_C0(f, tf);
ct0 = THREAD_T0(tf);
beam = C_UDMI(c0, ct0, 2)*dtime;
NV_D(axis, =, 0.0, 1.0, 0.0);
NV_V_VS(NODE_COORD(v), =,
NODE_COORD(v),+,axis,*, beam);
}
```

Профиль концентрации частиц снега задается эмпирической формулой, предложенной в работах [14–15], в которой концентрация снега задается как постоянная в области сальтации ($z < h_{sat}$) и уменьшается экспоненциально с увеличением высоты к области взвешенного состояния ($z > h_{sat}$).

Концентрация частиц снега Φ представляет собой произведение объемной доли снега f и плотности частиц снега ρ_s , объемную долю снега f можно вычислить по формуле (11) и в коде C++, ниже представлено:

$$f = \begin{cases} \frac{0,68}{g u_p h_{sat}} u_t (u_t^2 - u_i^2) & z \leq h_{sat} \\ 0,8 \exp[-1,55(4,78 u_t^{-0,544} - z^{-0,544})] / \rho_s & z > h_{sat} \end{cases}, \quad (11)$$

где u_p – средняя скорость частицы снега в области сальтации и принимается как $2,8 u_t$, h_{sat} – это средняя высота области сальтации, которая определяется следующим уравнением:

$$h_{sat} = 1,6 \frac{u_t^2}{2g} \quad (12)$$

```
DEFINE_PROFILE(volume_fraction,thread,index)
{
    real x[ND_ND];
    real y;
    real up,ux,um,hs;
    face_t f;
    begin_f_loop(f,thread)
    {
        F_CENTROID(x,f,thread);
        y=x[1];
        up=uxt*2.8;
        um=Uref*pow(y/del,alpha);
        ux=(um*0.4)/(log(y/zs));
        hs=0.0815*ux*ux;
        if (y<=hs)
            F_PROFILE(f,thread,index)=(0.68*uxt*((ux*ux)-(ux*ux))/ (ux*up*hs*9.81));
        else
            F_PROFILE(f,thread,index)=(0.8*exp(-1.55*(4.78*pow(ux,-0.544)-pow(y,-0.544)))/ps);
    }
}
```

Результаты по моделированию снеготложения и снеготранспорта в условиях верификационных моделей. С целью проверки достоверности численного моделирования, мы проводим сравнительный анализ между экспериментом и результатом численного моделирования, приведенными нами и другими авторами. Для этого рассматриваются две модели: ступенчатая, исследуемая технологическим институтом Хоккайдо (Саппоро, Япония), где проведены серии экспериментов и наблюдений за моделью под снегопадом [16], и двускатная крыша, исследуемая множеством авторов [21–22].

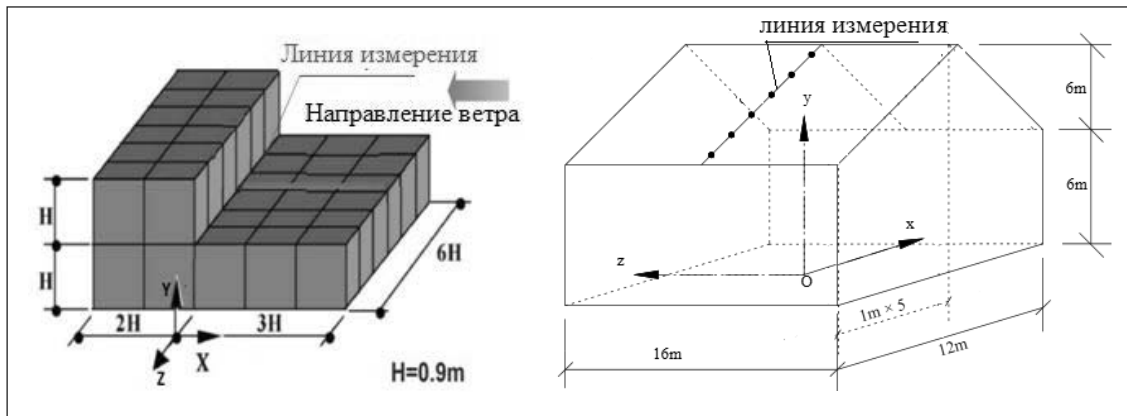


Рис. 3 Схема модели здания

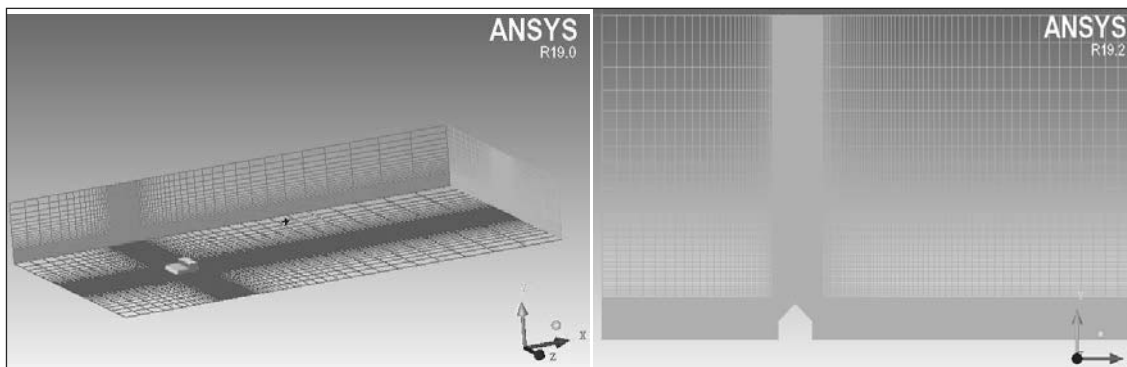


Рис. 4. Схема вычислительной области и конфигурации сетки

Размерность вычислительной области равняется $X \times Y \times Z = 21L \times 10B \times 14H$ (L обозначает длину здания, а B – ширину строения), в случае первого варианта $H = 0,9$, строится структурированная сетка с минимальным размером сетки $H / 40$ и общим количеством трехмерных конечных элементов (hexa) около 2,27 миллионов для ступенчатой формы здания, и 420800 для двускатной крыши (рис. 3–4).

Как отмечалось выше, транспортная модель снегопереноса и снеготложения сформирована на основе эмпирического параметра критической скорости U_{*t} [16; 17]. Если скорость трения превышает пороговую скорость трения, ветровые частицы входят в подвижное состояние. Из-за взаимодействия между частицами и ветром поток ветра изменяется и обновляется скорость трения, что приводит к вероятности для осаждения или переноса частиц [18; 19; 20].

Критическая скорость U_{*t} зависит от размера, формы и плотности частиц $[a, e]$ и выражается следующим образом:

$$U_{*t} = A_{t,e} \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_s}, \quad (13)$$

где $A_{t,e}$ – безразмерный параметр; ρ_s – плотность частиц снега; ρ – плотность воздуха; d_s – диаметр частиц снега; g – гравитационная постоянная. При свежем снеге $U_{*t} < 0,25 \text{ м / с}$, а старом или уплотненном снеге $0,25 \text{ м / с} < U_{*t} < 1 \text{ м / с}$.

Когда частицы снега начинают двигаться (сольтировать), длина шероховатости в зависимости от скорости трения может быть выражена как:

$$z_0 = 0,12u_*^2 / 2g. \quad (14)$$

Высота сальтации пропорциональна скорости подъема частиц и оценивается следующим выражением:

$$h_{sal} = 1,6u_*^2 / 2g. \quad (15)$$

Средняя скорость сальтации снега пропорциональна критической скорости трения, где $c = 2,3–2,8$, и представляется ниже в форме:

$$u_p = c u_{*t}. \quad (16)$$

Взаимосвязь между скоростью снегопада w_f и скоростью трения u обычно используется в качестве меры для различения режимов переноса снежных частиц, w_f играет большую роль в области взвешенного состояния. Если игнорировать вязкие и турбулентные напряжения, можно ее описать по закону Стокса:

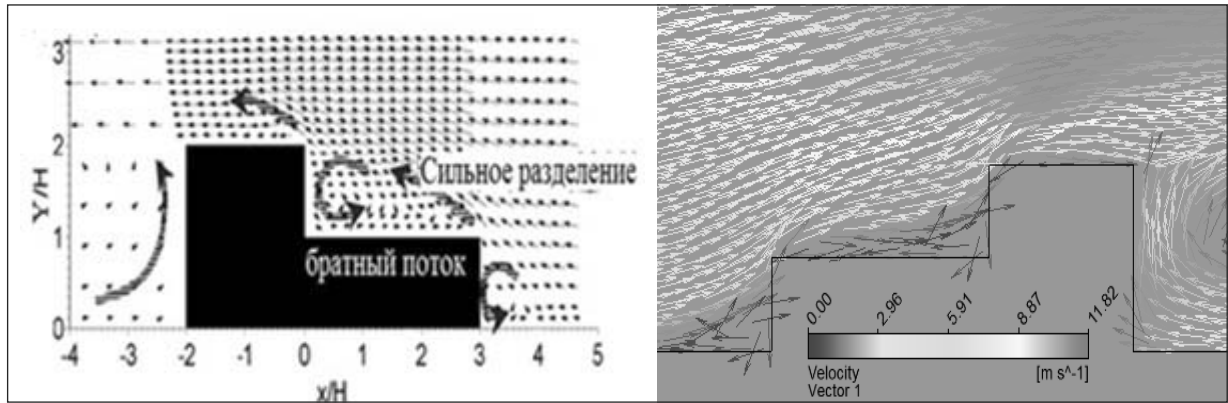


Рис. 5. Распределение скорости вокруг зданий: слева – эксперимент; справа – CFD

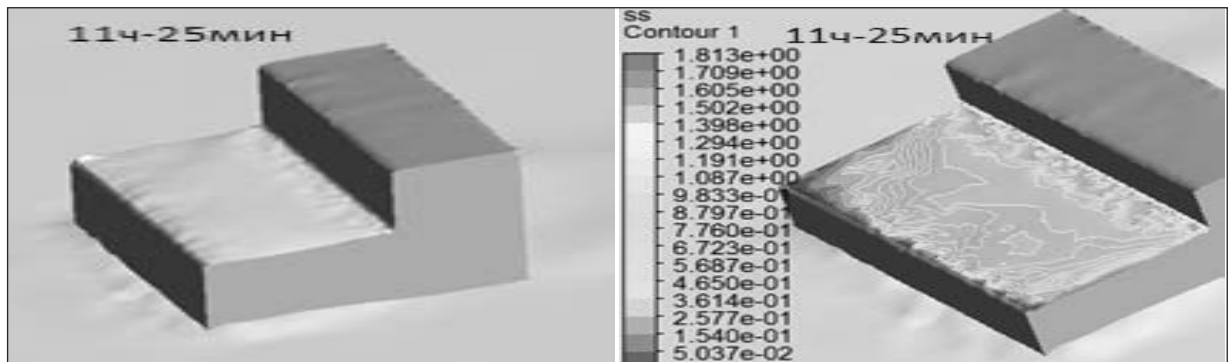


Рис. 6. Распределение снега на ступенчатой форме здания

$$w_f = \frac{(\rho_p - \rho) g d_s^2}{18\mu} \quad (17)$$

Однако скорость снегопада в реальности зависит от поля сдвига, где снежная частица, движущаяся через сдвиговое поле, может подвергаться подъемной силе, пропорциональной величине градиента скорости:

$$w_f = CD_p, \quad (18)$$

где C – пропорциональный коэффициент, зависящий от формы частиц, $C = 3880 c^{-1}$ для сферической геометрии, $C = 3880 c^{-1}$ для неопределенной формы.

Таблица 1

Физические свойства снега

Диаметр d_s (мм)	0,15
Плотность ρ_s ($кг.м^{-3}$)	150
Предельная скорость трения u_r ($м.с^{-1}$)	0,2
Скорость частиц снега в снегопаде w_f ($м.с^{-1}$)	0,2
Средняя скорость сальтации u_p ($м.с^{-1}$)	0,56

На рис. 6 показано сравнение изополя скорости между численным моделированием CFD и результатами, полученными в аэродинамической трубе в работе [16]. Легко заметить, как потоки

ветра подобны, что обеспечивает точность дальнейшего моделирования CFD.

Сильное разделение потока было сгенерировано, как показано на рис. 5, образуя вихревую струю на низком покрытии как в численном моделировании, так и в эксперименте. Также наблюдается течение, протекающее против основного потока ветра вблизи поверхности покрытий.

Максимальное значение обратного потока составляло по экспериментальным данным $\bar{u} / U_0 = -0,4$ на $x / H = 0,5$, а при CFD $\bar{u} / U_0 = -0,32$.

В результате численного моделирования (рис. 6) преобразуются две основные зоны на низкой ступени покрытий. Первая глубина снега развивается во времени в диапазоне ($x = 22,5 до 24,6$), а вторая область при ($x = 24,7 до 25,1$) характеризуется обратным эффектом, где отложение частицы снега сводится к минимуму. Ниже приводятся сравнительные результаты между численными и экспериментальными результатами.

На рис. 7 показана глубина снега по центральной линии низкого покрытия, где вертикальная ось обозначает коэффициент перехода (S / S_d) и ($S_d = 0,07 м$). Как видно, кривые хорошо сходятся, однако существуют некоторые различия между данными измерений и численным моделированием.

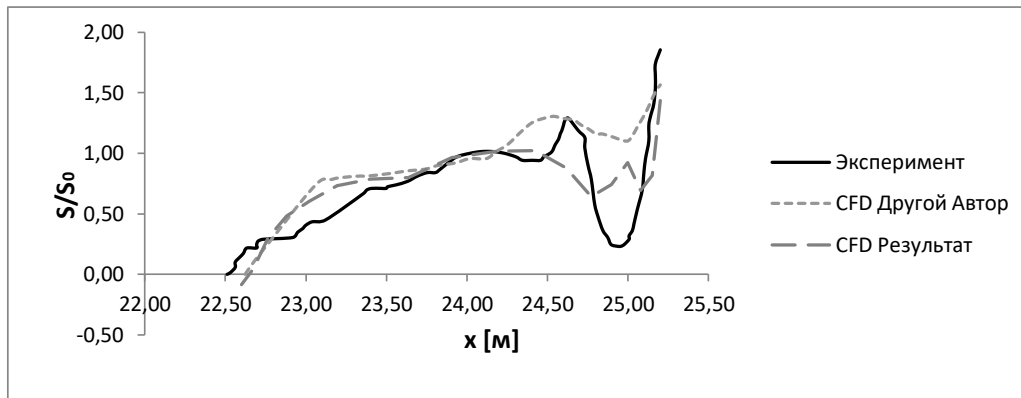


Рис. 7. Распределение коэффициента перехода по центральной линии на низком покрытии

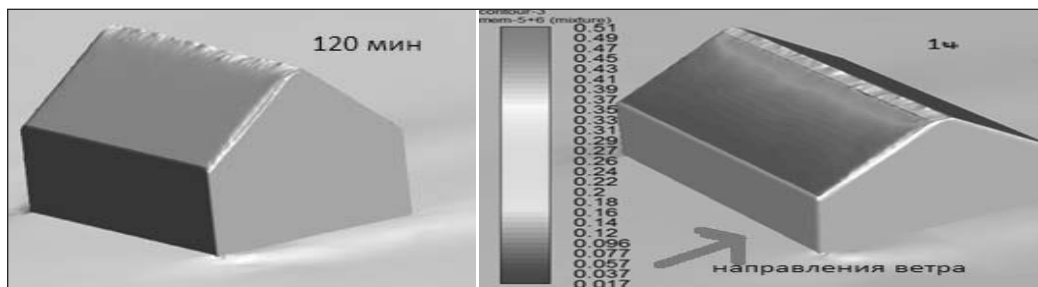


Рис. 8. Распределение снега на двухскатной крыше

Наибольшее скопление снега концентрируется около второй ступеньки ($x = 25,2$) из-за блокирующего эффекта более высокого покрытия.

Скорость ветра в этой области достаточно низкая, поэтому и значительное отложение частиц снега. Измерения в этой области равняется ($S / S_d = 1,8$), что немного больше, чем результаты моделирования.

В области $x = 24,7 - 25,1$ результаты измерения свидетельствуют о более эрозийном эффекте, чем результаты моделирования. В зоне более выраженного эрозийного эффекта по результатам моделирования наименьшие отложение равняется ($S/S_d = 1,10$ и $0,6$), тогда как данные измерений характеризуется более острым эффектом ($S/S_d = 0,24$).

Другой вариант, служивший объектом проверки модели снеготранспорта и снегоотложения, представлен на рис. 8, где показано распределение снега на двухскатной крыше в течение 120-минутного снегопада [21–22].

В результате численного моделирования, на наветренной стороне покрытий максимальная глубина снега увеличивается по мере снижения высоты, тогда как на подветренной стороне крыши толщина снега сохраняет равномерность по всей поверхности. Также как и в случае ступенчатого покрытия, проведем ниже сравнение между экс-

периментом и CFD. Видно как на рис. 9 наблюдается идеальное сходство по закону распределения снега по покрытию, однако степень точности чуть занижена за счет выбранных моделей турбулентности. Но в целом картинка распределения коэффициента перехода $\mu = S / S_d$ между численным и физическим экспериментами удовлетворительны.

Результаты по моделированию снеговых отложений на гипаре. Выполнена оценка характера распределения и величины снеговых отложений на гиперболическом параболоиде. Исследован ряд изменений в форме покрытий, как показано на рисунках ниже (рис. 10–11).

Оценка объемов выноса и отложения снеговых масс на кровле проведена при следующих исходных условиях:

- тип местности IV (по классификации ДБН В.1.2-2:2006);
- вес снегового покрова для II-го снегового района принят $S_g=1 \text{ кПа}$;
- интенсивность переноса снега и объем переносимого снега за время действия метели оценивается по формулам (8–11).
- профиля распределения скорости ветра и турбулентности по высоте от входа вычислительной области принимаются по следующей формуле:
нормальный профиль скорости ветра:

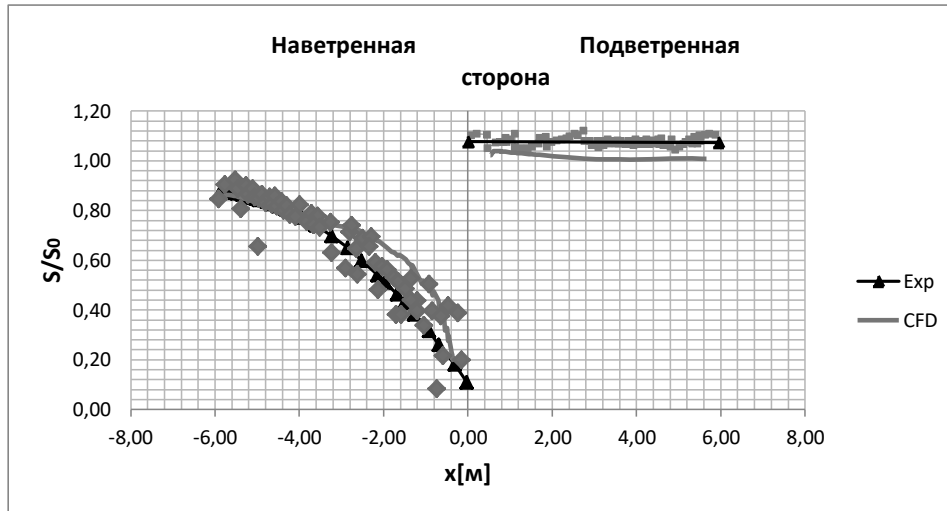


Рис. 9. Распределение коэффициента перехода по центральной линии на двухскатной крыше

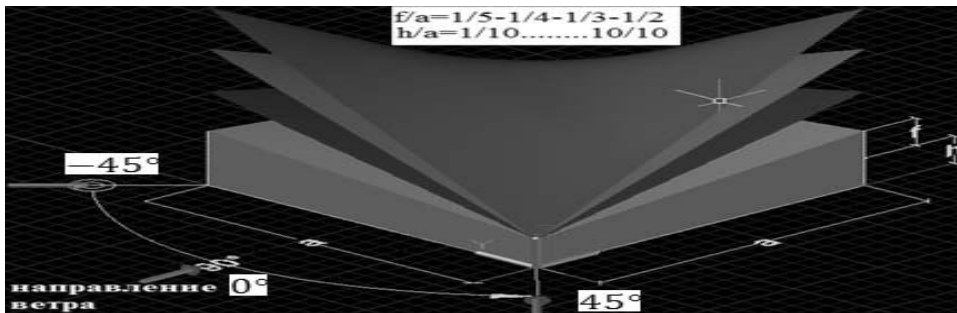


Рис. 10. Параметризация модели гипара

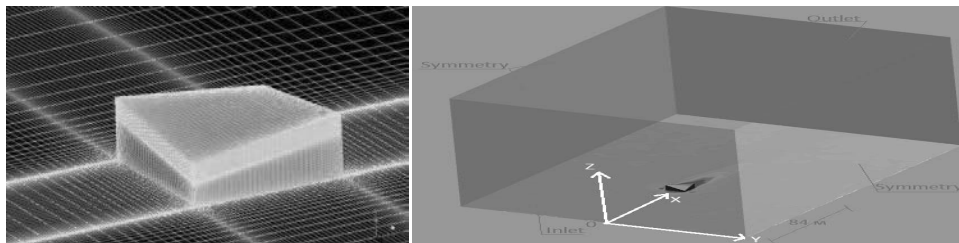


Рис. 11 Конфигурации сетки вокруг гипара с количеством конечных ячеек: 3,41 миллиона и область вычисления

$$U(z) = U_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha; \quad (19)$$

где z – высота от земли; U_{ref} – скорость ветра на высоте z_{ref} ; z_{ref} – базовая высота; α – безразмерный показатель степенного закона изменения скорости с высотой;

– нормальный профиль турбулентной кинетической энергии:

$$k(z) = \sqrt{C_1 \ln(z + z_0) + C_2}, \quad (20)$$

где C_1, C_2 – константы определяются испытанием в аэродинамической трубе

$C_1 = -0,064$ и $C_2 = 0,588$; z_0 – аэродинамическая высота шероховатости;

– нормальный профиль диссипации и скорости диссипации турбулентной энергии:

$$\varepsilon(z) = C_\mu^{1/2} k(z) \frac{\partial U}{\partial z}; \quad \text{и} \quad \dot{E} = \frac{\mu(z)}{C_{1/2} k(z)}; \quad (21)$$

где C_μ – констант равняется 0,09;

– поскольку гипар симметричен относительно оси, проходящей через низкие или высокие опоры, исходя от результатов полученных нами при испытание гипара в аэродинамической трубе, оценка выполнена для трех направлений ветра $0^\circ; 45^\circ; -45^\circ$;

– скорость потока ветра U_{ref} применяется от 3 до 6 м/с.

Результаты исследования и анализ при направлении ветра 0. Результаты по моделированию снеговой нагрузки на гиперболических покрытиях представлены ниже. Сначала пред-

ставлен процесс формирования снегового покрова на покрытии с геометрической конфигурацией

$$h/a = \left\{ \frac{2}{10}; \frac{4}{10}; \frac{9}{10} \right\} \text{ и } f/a = \left\{ \frac{1}{5}; \frac{1}{3}; \frac{1}{2} \right\}, \text{ при } \alpha = 0^\circ.$$

Процесс распределения снега на крыше во времени при скорости ветра 3 м/с и направлении ветра 0Y показан на рис. 12, где наблюдается начальный накапливаемый снег в течение 50 мин. и распределяется равномерно вблизи бортового элемента, расположенного в зоне наветренного фасада здания, по мере удаления от элемента глубина снегового покрова затухает до нуля из-за сдувания снега.

На следующем этапе (через два часа снегопада) набирается снеговой покров в форме треуголь-

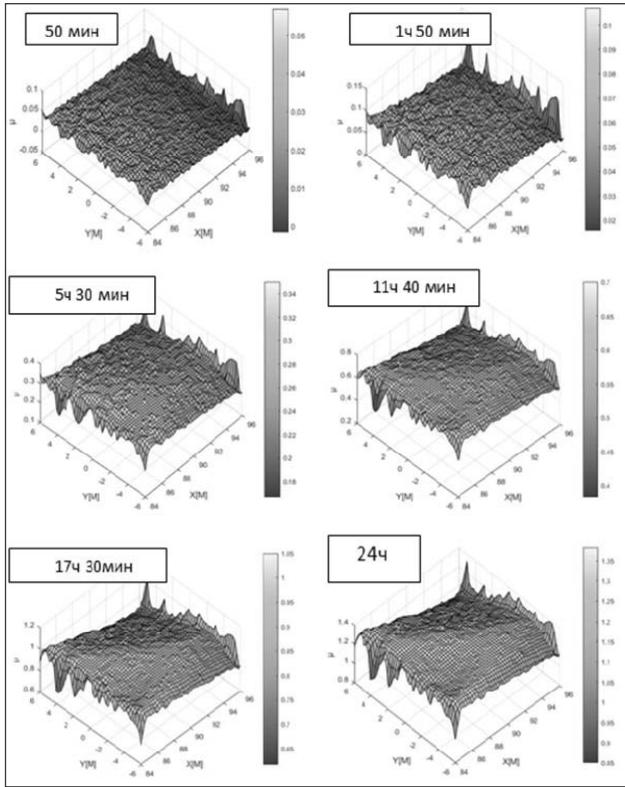


Рис. 12. Процесс распределения коэффициента перехода μ на гипар с конфигурацией $h/a = \frac{2}{10}; 8f/a = \frac{1}{5}$ при $\pm = 0^\circ$ и скорости потока $V = 3$ м/с

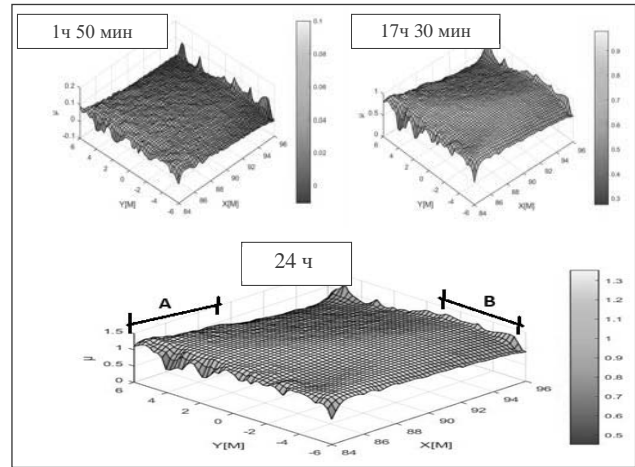


Рис. 13. Процесс распределения коэффициента перехода μ на гипар с конфигурацией $h/a = \frac{2}{10}; 8f/a = \frac{1}{5}$ при $\pm = 0^\circ$ и скорости потока $V = 6$ м/с

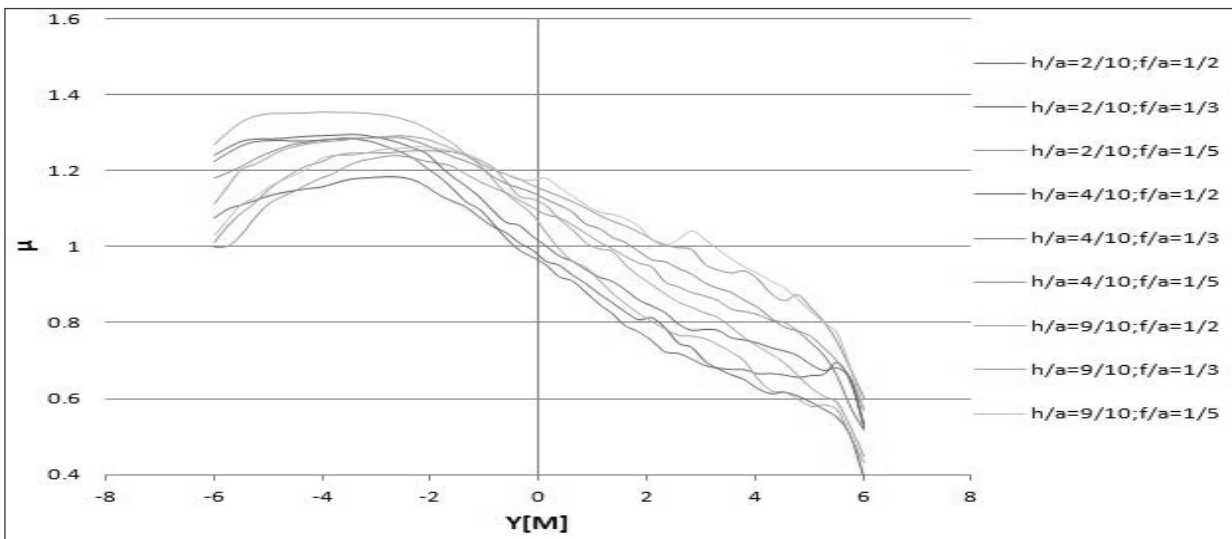


Рис. 14. Распределение коэффициента перехода μ на модель гипара по линии $x=94,7$ при $h/a = \left\{ \frac{2}{10}; \frac{4}{10}; \frac{9}{10} \right\}$ и $8f/a = \left\{ \frac{1}{5}; \frac{1}{3}; \frac{1}{2} \right\}$, $V = 6$ м/с и направлении ветра 0Y.

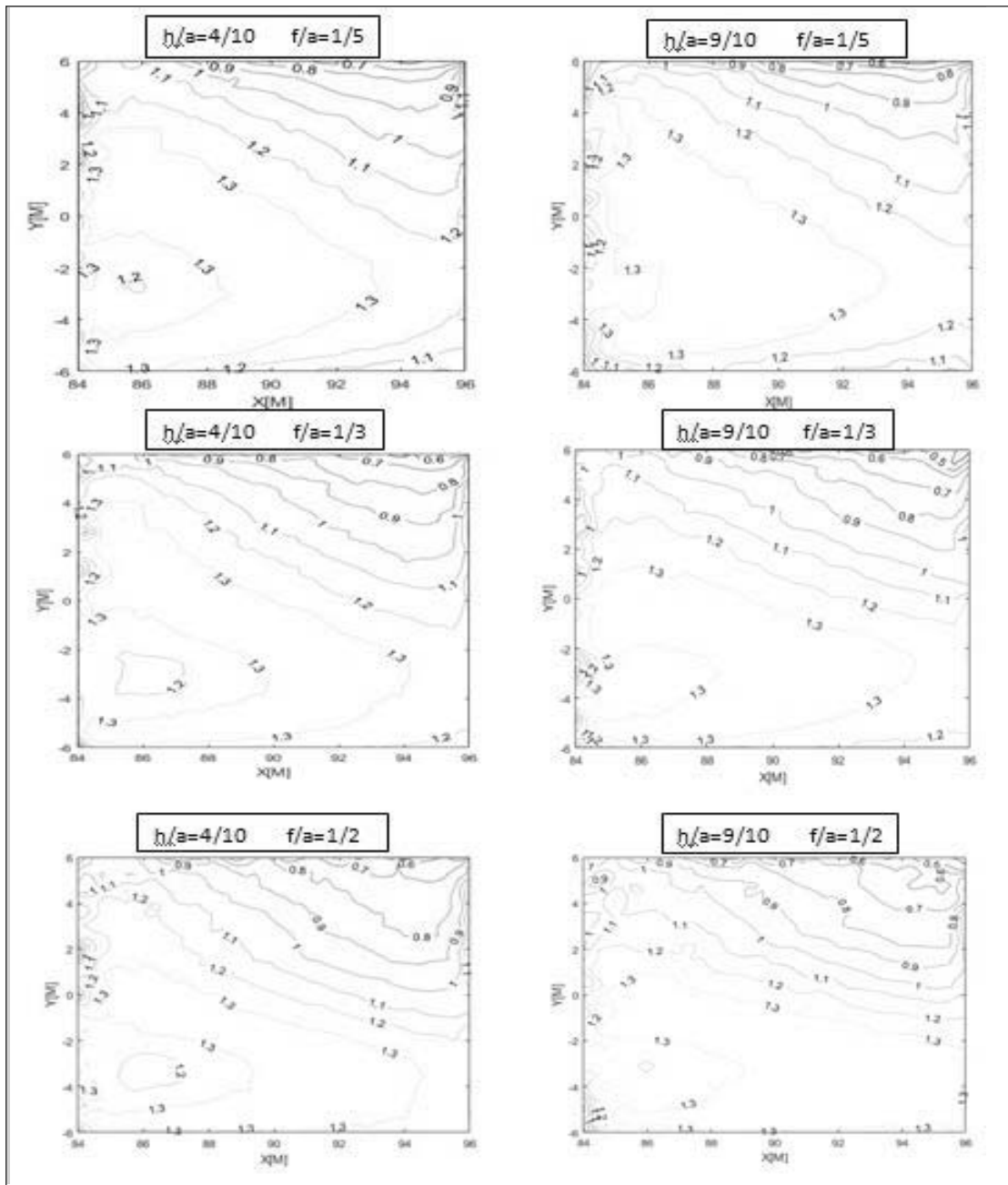


Рис. 15. Распределение коэффициента перехода μ на модель гипара

ника, где одна из его сторон занимает зону переднего бортового элемента и противоположенный угол, расположенный в центре оболочки. Через 6 ч видно, как снег концентрируется в подветренной области. Через 12 ч уже сформировалась конечная стабильная форма снегового покрова, в дальнейшем форма распределения сохраняется, тогда как значение глубины продолжает изменяться во времени, в итоге отмечается перенос снега с наветренной стороны в зону задней высокой опоры и также небольшой снос по периметру крыши. На участке покрытия, примыкающего к

передней высокой опоре на подветренной стороне крыши, именно в центре четверти оболочки наблюдается незначительный снос снега.

Снег образует вал на подветренной стороне покрытия вокруг передней высокой опоры, как и в передней части наветренной стороны крыши, но менее интенсивно. На наветренной стороне покрытия наблюдается хороший вынос снега, особенно в задней зоне высокой опоры. Конечная форма отложений снега на покрытии показана на рис. 12 после 24 ч. Снег распределен стремительно симметрично относительно нисходящей

главной диагонали, с изменением в степени асимметрии в зависимости от геометрических параметров, скорости и угла направления ветра, что нельзя говорить о симметрии относительно восходящей главной диагонали.

При скорости ветра 6 м/с результаты моделирования схожи с результатами при 3 м/с, однако интенсивность снега на покрытии при 6 м/с меньше, чем в первом случае. При дальнейшем увеличении скорости потока картина распределения снега меняется незначительно. Конечная форма отложений снега на покрытии при $\alpha = 0^\circ$ и $v=6$ м/с показана на рис. 13.

Наблюдается идентичный характер распределения в течение времени, и на наветренной стороне сохраняется слой снега незначительной мощности. Повышенные отложения снега наблюдаются на подветренной стороне покрытия. Также наблюдается частичный вынос снега в центре зоны высокой опоры наветренной стороны покрытия и увеличение интенсивности отложений вокруг нее.

В случае $f/a = \frac{1}{5}$ видно небольшой снос по периметру крыши в зоне задней низкой опоры, что не отмечается в других вариантах из-за высоты подъема оболочки. Общий суммарный вес снега на покрытии меняется определенным образом: чем больше подъем покрытия, тем меньше суммарный вес снега. Другие параметры, проявляющие себя, представляют собою ширину распределения снега на подветренной стороне покрытия в зоне низких опор (см. рис. 13, 24 ч). Можно сказать, что параметры А и В уменьшаются с увеличением подъема оболочки.

Относительно выпуклой зоны, находящейся в центре четверти оболочки, ближе к передней высокой опоре, наблюдается увеличение выноса снега по мере увеличения в подъеме оболочки. Наряду с этим и площадь наветренной стороны увеличивается.

В итоге, чем больше подъем гипара, тем значительнее неравномерность снеговой нагрузки на покрытие. Аналогичная тенденция имеет место и для всех остальных форм изменений.

По линии $x=94,7$ явно различается верхняя зона наветренной стороны (рис. 14), где наблюдаются высокие сносы снега $\mu=0,4$, и максимальные снеговые отложения формируются на подветренной стороне покрытия в нижней зоне $\mu=1,375$.

Значительного сноса или переноса снега не наблюдается во всех результатах численного исследования, сосредотачиваются в зоне высоких опор. Нужно отметить, что часть снега с наветренной стороны покрытия переносится на подветренную сторону или выносятся с покрытия. На рис. 15 видно, как на всех картинках снег распределен стремительно симметрично относительно вертикальной плоскости, проходящей через главную нисходящую диагональ. Можно выделить области с разным по величине уровнем снегового покрова.

На наветренной стороне крыши также наблюдается частичный снос снеговых масс с сохранением снегового покрова. На подветренной стороне крыши распределены снеговые массы. При этом наблюдаются повышенные снеговые отложения вокруг центр четверти оболочки, расположенной в зоне передней высокой опоры. Снос снега начинается с центральной зоны покрытия и направляется параллельно нисходящим парабол в стороны наветренной высокой опоры, насколько отдаленнее от центра оболочки тем, настолько выше степень сноса снега.

Выводы. Таким образом, на основании изложенного выше можем резюмировать следующее:

- в результате численного моделирования тестовых задач сходимость обоих вариантов между экспериментом и CFD достигала высокой точности, что свидетельствует о достоверности применяемой модели и методики симулирования;
- схемы распределения снеговой нагрузки на покрытиях гипара, полученные в результате численного моделирования, в любом случае нуждаются в экспериментальных данных для окончательной проверки и подтверждения;
- в качестве критерия, показывающего асимметрию распределения снеговых масс на симметричных покрытиях, применен коэффициент асимметрии распределения снеговых масс.

Список литературы:

1. Bosse T. Numerical simulation of disperse two-phase flows. PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zürich, 2005.
2. Gauer P. Blowing and drifting snow in alpine terrain: a physically-based numerical model and related field measurements. PhD thesis, Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research, Davos, 1999.
3. Naaim M., Naaim-Bouvet F., Martinez H. (1998). "Numerical simulation of drifting snow: erosion and deposition models", *Annals of Glaciology* 26, 191–196.
4. Thiis T.K. Large scale studies of development of snowdrifts around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91 (6) (2003), 829–839.

5. Thiis T.K., Ramberg J.F. (2008). "Measurements and Numerical Simulation of Development of Snow Drifts on Curved Roofs", Snow Engineering IV, Whistler, BC, Canada, ECI.
6. Thiis T.K., Potac J., Ramberg J.F. (2009). "3D numerical simulations and full scale measurements of snow depositions on a curved roof", EACWE 5, Florence, Italy.
7. Thiis T.K., Potac J., 2011. Numerical simulation of snow drift development on a gabled roof, in: Proceedings of the 7th European and African Conference on Wind Engineering.
8. Bang B., Nielsen A., Sundsbø, P.A., Wilk, T. (1994), "Computer simulation of wind speed, wind pressure and snow accumulation around buildings (SNOW-SIM)", Energy and Buildings 21, 235–243.
9. Beyers J.H.M., Sundsbø, P.A. and Harms T.M., 2004. Numerical simulation of three-dimensional, transient snow drifting around a cube. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 92(9): 725–747.
10. Tominaga Y. and 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): 273–282.
11. Sun X., Hon C., Wu Y., 2014. Numerical simulation of snow drifting around building model. Engineering Mechanics, 31(4): 141–146 (in Chinese).
12. Zhou X., Kang L., Gu M., Qiu L. and Hu J., 2016. Numerical simulation and wind tunnel test for redistribution of snow on a flat roof. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 153: 92–105.
13. Tominaga Y., Okaze T. and Mochida A., 2011. CFD modeling of snowdrift around a building: An overview of models and evaluation of a new approach. Building and Environment, 46(4): 899–910.
14. Pomeroy J.W., 1990. Saltation of Snow. Water Resource Research, 26(7): 1583–1594.
15. Pomeroy J.W., 1992. Steady-state suspension of snow. Journal of Hydrology, 136: 275–301.
16. Tsuchiya M., Tomabechi T., Hongo T. and Ueda H., 2002. Wind effects on snowdrift on stepped flat roofs. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90(12–15): 1881–1892.
17. Bagnold R.A., 1941. The physics of blown sand and desert dunes. London: Methuen.
18. Alhajraf S., 2004. Computational fluid dynamic modeling of drifting particles at porous fence. Environmental Modeling and Software, Volume 19, pp. 163–170.
19. Beyers M. & Waechter B., 2008. Modeling transient snowdrift development around complex three-dimensional structures. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 96, pp. 1603–1615.
20. Naaim-Bouvet F. & Mullenbach P., 1998. Field experiments on "living" snow fences. Annals of Glaciology, Volume 26, pp. 217–220.
21. Keqin Y., Xuanyi Z., Ming G., Kasperski M. Wind-drifted snow load simulation on gable roof. The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010) Chapel Hill, North Carolina, USA May 23-27, 2010.
22. Schmidt R., 1980. Threshold wind-speeds and elastic impact in snow transport. Hlaciology, Volume 26, pp. 453–467.
23. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів, навантаження і впливи, норми проектування, дбн в.1.2-2:2006.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СНІГОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПОКРИТТЯХ УНІКАЛЬНИХ І СУЧАСНИХ АРХІТЕКТУРНИХ ФОРМ

У статті об'єктом і предметом уваги є достовірність і прийнятність використання чисельного моделювання процесів снігопереносу і сніговідкладень з метою визначення снігових навантажень на покриттях унікальних і сучасних архітектурних форм в умовах відсутності нормативно-методичної документації та науково-технічного супроводу. Подається короткий аналіз сучасного стану цього питання, а також наводяться перевірені розрахунки, результати моделювання та їх порівняння з раніше отриманими чисельно й експериментально результатами інших авторів. Досліджується розподіл снігу на оболонки типу гіперболічного параболоїда. Моделювання проводиться в програмному комплексі ANSYS Fluent.

Ключові слова: снігове навантаження, натурні експерименти, сніговідкладення і снігоперенос, гіперболічний параболоїд, ANSYS Fluent.

NUMERICAL SIMULATIONS OF SNOW LOADS ON A CURVED ROOF AND MODERN ARCHITECTURAL SHAPES

This article is an subject of attention, on the part of the reliability and applicability of numerical simulation of snowdrift and snow deposition, in order to determine the snow loads, on the surfaces unique and modern architectural forms unique and modern architectural forms in the absence of regulatory and methodological documentation and scientific and technical support. The article provides a brief analysis of the current state of this issue, and also provides the verification of calculations, simulation results and their comparability with the wound results obtained numerically and experimentally by other authors. After that, the distribution of snow on shells of the hyperbolic paraboloid type is investigated. Simulations are carried out in the ANSYS Fluent software package.

Key words: snow load, Full-scale experiments, snowdrift and snow deposition, the hyperbolic paraboloid, ANSYS Fluent software, two phase, CFD.