При $H \to 0$ второй член дифференциального уравнения (8) равен нулю, поэтому уравнение (8) преобразуется к виду, описывающему поперечный изгиб простой балки. Следовательно, функция прогибов (16), являющаяся решением уравнения (8), при $H \to 0$ справедлива и для балки с защемленными концами, находящейся под воздействием поперечной сплошной нагрузки, описанной произвольной функцией $q(x)$.

Таким образом, функция прогибов v (16) и изгибающих моментов M_S (17), а также полученная на их основе система разрешающих уравнений (22) совместно с (19) позволяют сформировать вектор $\{P_S'\}$ для всех видов напряженно-деформированного состояния гибких стержней. Следовательно, система матричных уравнений (1), описывающая напряженно-деформированное состояние гибких стержней рассчитываемой системы произвольной геометрической структуры становится разрешимой однозначно вплоть до вычисления вектора $\{r'\}$ (5), содержащего действительные значения опорных реакций его концов.

Поскольку гибкий стержень как КЭ системы в состоянии моделировать работу гибких или жестких вант, балок, а также сжато-изогнутых стержней при произвольном сопряжение их между собой, это подтверждает, что его можно рассматривать как *универсальный конечный элемент* МКЭ. С другой стороны, поскольку с его помощью можно описать и решить все многообразие НДС КЭ стержневой системы произвольной геометрической структуры, то рассматриваемый МКЭ с КЭ в виде гибкого стержня может рассматриваться как *метод деформаций* [6], [7] в матричной форме.

3. Учет деформированной схемы равновесия. Ввиду возможности существенного влияния продольных деформаций гибких стержней на общее напряженно-деформированное состояние стержневых систем сложной геометрической структуры, и в особенности – на величины перемещений узлов, их расчет должен быть выполнен по деформированной схеме равновесия. Заметим, что в этом случае система основных разрешающих уравнений МКЭ вида (1) справедлива только для *исходного состояния* деформированной системы. В *рассчитываемом состоянии* будем рассматривать деформированное состояние равновесия системы, в которое она переходит из *исходного* под воздействием параметров, возмущающих исходное состояние. Тогда, уравнения (1) представим так

$$\left[K(\Delta)\right]\cdot\{\Delta\} = \{P_u\} + \left[T_\alpha\right]^T \cdot \{P_s'\} + \{R\}. \quad (24)$$

Для решения нелинейной системы уравнений МКЭ (24), описывающей переход балочно-вантовой системы из *исходного состояния* в *рассчитываемое*, разработан итерационный способ «последовательных увязок», основные положения которого изложены в [4].

Заключение. Разработан метод формирования и расчета моделей стержневых систем сложной геометрической структуры с учетом геометрической нелинейности продольных и угловых деформаций гибкого стержня как универсального КЭ, построенный на основе матричной системы уравнений МКЭ (1). При необходимости учета геометрической нелинейности всей стержневой системы предложена матричная система геометрически нелинейных уравнений (24), а также метод его решения способом «последовательных увязок» [4].

Изложенный метод статического расчета моделей плоских стержневых систем сложной геометрической структуры дает возможность построить эффективный алгоритм ядра программы для ПК средствами программирования математической среды MathCAD с последующей разработкой к нему интерфейса для ввода исходной информации и обработки результатов расчета на других языках программирования высокого уровня.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дарков, А.В. Строительная механика: учебник для строит. спец. вузов / А.В. Дарков, Н.Н. Шапошников. – 8-е изд. – М.: Высшая школа, 1986. – 607 с.
2. Игнатюк, В.И. Метод конечных элементов в расчетах стержневых систем: учебное пособие / В.И. Игнатюк. – Брест, 2004. – 172 с.
3. Уласевич, В.П. Деформационный расчет и исследование напряженно-деформированных состояний пологих однопоясных распорных систем: автореф. дис. …канд. техн. наук: 01.02.03 / В.П. Уласевич; ЦНИИСК им. Кучеренко. – М., 1984. – 24 с.
4. Уласевич, В.П. Деформационный расчет гибких балочно-вантовых систем методом конечных элементов в среде MathCAD) / В.П. Уласевич, О.В. Костюк // Вестник БрГТУ. – 2004. – № 1(25): Строительство и архитектура. – С. 111–117.
5. Матвеев, Н.М. Дифференциальные уравнения: учебное пособие / Н.М. Матвеев. – М.: Просвещение, 1988. – 256 с.
6. Рабинович, И.М. Основы строительной механики стержневых систем / И.М. Рабинович. – М.: Госстройиздат, 1660. – 256 с.
7. Борисевич, А.А. Строительная механика / А.А. Борисевич, Е.М. Сидорович, В.И. Игнатюк – Минск: БНТУ, 2007. – 821 с.

Материал поступил в редакцию 18.04.2018

ULASEVICH V.P. Static calculation of flexible rod systems of complex geometrical structure by method of deformations

In article on the basis of MKE equations in the form of the method of movements and the equations of balance of the rectilinear flexible core which is rigidly fixed to motionless support and loaded by continuous loading of any intensity the matrix system of the universal allowing equations is developed for static calculation of flat flexible rod systems of complex geometrical structure.

Are brought allowing the equations of deformation calculation of a rectilinear flexible core as the universal rod KE constructed on the analytical solution of his differential equation of balance in integrated quadratures concerning function of deflections. The equations allow to create a vector column of reactions $\{P_S\}$ from influences of KE of cross continuous loadings of any intensity, temperature influences, a preliminary tension distributed on length, taking into account any boundary conditions of fixing of KE in knots. It allows to consider a rectilinear flexible core as universal rod KE thanks to which the matrix system of the equations of MKE degenerates in a method of deformations.

УДК 624.042.42

Матвеенко Е.В.

ОБОБЩЕННЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СНЕГОВОЙ НАГРУЗКИ

Введение. На величину снеговых нагрузок на здание сильно влияет ветер, который перераспределяет частицы снега через метелевый перенос. Наиболее высокие снеговые нагрузки на здания, как правило, вызваны метелевым переносом снега [1]. Положения действующих ТНПА учитывают более распространенные формы снеговых наносов, но рекомендуют исследования на масштабных или численных моделях (или их комбинациях) для интерпретации положений и помогают определять снеговые нагрузки для случаев, когда форма крыши отличается от форм, представленных в ТНПА. Кроме того, когда объекты на прилегающей территории (такие как близлежащие более высокие здания или топографические объекты) генерируют необычные потоки ветра над крышей, численное и масштабное моделирование может быть использовано для обнаружения необычных распределений снеговой нагрузки.

***Матвеенко Евгений Викторович,** ст. преподаватель кафедры архитектуры Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.*

Существуют два основных подхода, которые используются для изучения метелевого переноса снега по масштабным моделям. Согласно первому подходу, масштабная модель подвергается предполагаемому ветровому потоку в аэродинамической трубе либо в водном лотке, а мелкие частицы вводятся в поток для имитации снежинок. В качестве мелких частиц использовались различные материалы, в том числе песок, древесные опилки, пшеничные отруби, бикарбонат натрия, стеклянные сферы, активированные частицы глины и измельченные ореховые оболочки. Целью этого подхода является симуляция траекторий частиц с достаточной точностью, чтобы реальные метелевые образования появлялись на модели, из которой могут быть сделаны полномасштабные прогнозы. Метод, использующий этот подход, называется методом частиц. Примеры применения метода частиц описаны у Вуббена [2], Иверсена [3], Ирвина и Уильямса [4], Анно [5], Кинда [6], Петерсена и Чермака [7], Исюмова и Микитюка [8], О'Рурка и Вейтмана [9], Ирвина и Гэмбла [10]. Метод частиц наиболее подходит для одиночных событий (маловероятных расчетных ситуаций, таких как шторм) или ситуаций, в которых допускается пренебрегать изменениями направлений или скоростей ветра, таяния, дождя на снегу и т. д. Поэтому данный метод обычно применяется при представлении качественной или полуколичественной информации для дополнения данных из нормативных документов и полевых наблюдений и не позволяет делать независимых количественных прогнозов. В ограниченных условиях, например, когда процессами уплотнения, затвердевания и таяния снега можно пренебречь, этот метод использовался для моделирования снеговой нагрузки после воздействия нескольких штормов. Однако, несмотря на ограничения метода частиц, он может быть полезен в случаях сложной геометрии кровли здания или фрагмента застройки в целом для определения наличия необычных снежных заносов, не предусмотренных в ТНПА, а также для устранения неопределенностей при интерпретации ТНПА.

Трудность метода частиц заключается в том, что он становится очень трудоемким, когда необходимо отслеживать историю накопления снега на крыше в течение нескольких недель или всего зимнего сезона, хотя попытки преодоления данных трудностей предпринимались Петеркой и Эстердаем [11]. Чтобы преодолеть эту трудность предлагается второй подход, в основе которого лежит метод конечных элементов (МКЭ). Но специфика сбора снеговой нагрузки подразумевает использование сетки из плоских двумерных элементов, поэтому второй подход получил название метод конечных площадей (МКП). Метод конечных площадей позволяет учитывать в расчете процессы выпадения снега в сочетании с ветрами различного направления и скорости, а также включает в себя баланс тепла и массы на протяжении расчетного периода. Баланс тепла и массы определяется на основании метеорологических наблюдений направления и скорости ветра, температуры, облачности, осадков.

Механизм метелевого переноса снега. Метелевый перенос является сложным процессом, который был изучен рядом авторов: Багнольдом [12], Дюниным [13], Меллором [14], Исюмовым [15], Кобаяши [16], Таблером [17], Киндом [18], Иверсеном [3] и Шмидтом [19]. При наиболее повторяемых скоростях ветра, т. е. менее 14 м/с вблизи поверхности снега, основной массоперенос частиц снега происходит в пределах нескольких сантиметров над поверхностью в результате процесса резкого изменения скорости и направления движения снежинок. В процессе резкого изменения направления и скорости участвуют снежинки, выбрасываемые с поверхности ударом. Поднятые ударом снежинки подхватываются и ускоряются потоком воздуха и, перед тем как приземлиться, выбрасывают еще больше снежинок. Меньшие снежинки, несмотря на то, что летают выше и могут вызвать проблемы видимости, имеют малую долю в массопереносе, а траектории тяжелых снежинок, которые в большинстве участвуют в массопереносе, составляют не более нескольких сантиметров в высоту и несколько десятков сантиметров в длину. Массоперенос снега начинается, когда скорость ветра превышает определенное значение. Эта пороговая скорость U_{th} для свежего снега обычно составляет около 4 м/с (измерено около 1 м над поверхностью). Полежавший и уплотненный снег, особенно после периода таяния или дождя, имеет гораздо большую пороговую скорость.

Массоперенос снега в конечном счете ограничен эффектом сопротивления снежинок при движении вдоль поверхности снега. Ветер замедляется настолько, что он больше не может выдерживать вес снежинок в воздухе и достигается равновесная величина массового потока. Как обсуждалось у Гэмбла [20], расстояние, необходимое для достижения равновесной величины массового потока, составляет 5 м или менее. Равновесная величина массового потока q может быть выражена как функция от скоростей:

$$q = (U, U_{th}), \tag{1}$$

где U – средняя скорость ветра на контрольной высоте, обычно порядка 1 м;

U_{th} – пороговая скорость ветра, при которой начинается массоперенос.

Примером такой функции является соотношение предложенное Дюниным [13]:

$$q = cU^2 (U - U_{th}), \tag{2}$$

где U – средняя скорость ветра на контрольной высоте, обычно порядка 1 м, м/с;

U_{th} – пороговая скорость ветра, при которой начинается массоперенос, принимается 4 м/с;

c – константа, принимаемая равной 3,34x10^{-5} кг/(с^{2}м^4).

Другая зависимость, подходящая для свежего снега, предложена Кобаяши [16]:

$$q = cU^3, \tag{3}$$

где c – константа, принимаемая равной 3x10^{-5} кг/(с^{2}м^4).

Эти соотношения в основном описывают метелевый перенос с точки зрения массопереноса. Например, данные Кобаяши, полученные путем захвата переносимого снега в траншеях. Меньшие частицы в снеговой взвеси не были бы захвачены. Дополнительный массовый перенос в снеговой взвеси очень высок при малых скоростях ветра, но становится еще более значительным на высоких скоростях. Массовый перенос в снеговой взвеси становится доминирующим, когда среднеквадратичное значение вертикальных колебаний скорости в турбулентном ветре превышает конечную скорость более тяжелых частиц снега, и, как показывают данные, обычно это происходит, когда средняя скорость ветра находится в диапазоне от 15 до 20 м/с на высоте 1 м над поверхностью снега. Шмидт [19] дает информацию о разделении массопереноса снега и массопереноса снеговой взвеси, которая может быть использована для оценки вероятного влияния массопереноса в снеговой суспензии смещения суспензии в общем массопереносе снега.

Важной особенностью массопереноса снега является то, что перенос происходит на небольшой высоте от уровня земли или крыши, поэтому снежинки, переносимые по земле, не могут попасть на крышу. Следовательно, если снег может спускаться с крыши, но не подниматься на нее, то общее количество снега на крыше будет уменьшаться под воздействием ветра. Исключения из этого могут происходить при чрезвычайно сильных ветрах, например, в арктической метели или если рельеф образует уклон (рампу) до уровня крыши.

Схема скоростей ветра на крыше зависит от геометрии крыши и может быть очень сложной. Снег будет стремиться накапливаться в областях замедляющего потока и выдуваться в областях ускоряющегося потока. В аэродинамической трубе или водном лотке моделирование с полной скоростью ветра может производиться на масштабных моделях, если в набегающем потоке получается соответствующее моделирование приземного пограничного слоя. Требования к моделированию приземного пограничного слоя аналогичны требованиям для исследований ветровых нагрузок в аэродинамической трубе [21].

Масштабные ограничения для метода частиц. Моделированием переноса снега с использованием масштабных моделей занимались такие ученые как Исюмов [15], Иверсен [3], Ирвин и Уильямс [4], Анно [5], Кинд [6], Петерка и Петерсен [22], Квок и др.[23], Исюмов и Микитюк [8], О'Рурк и Вейтман [9], Тоёда и Томабеши [24]. Для получения корректных моделей необходимо учитывать два основных аспекта. Первый – это моделирование траектории частиц в потоке воздуха, второй – это взаимодействие воздушного потока и уже выпавших частиц, которые и регулируют дрейф.

Если рассматривать поведение частиц снега по уравнению движения частицы в воздушном потоке [4, 25], то можно сделать вывод, что следующие соотношения должны быть одинаковы как для масштабной модели, так и для натурной.

$$\frac{w_t}{U}, \quad \frac{U^2}{Lg\beta}, \tag{4}$$

где w_t – конечная скорость падающих частиц;

U – средняя скорость ветра в контрольной точке;

L – габаритный размер здания;

g – гравитационное ускорение;

β – коэффициент, определяемый по формуле:

$$\beta = (\gamma - 1) / (\gamma + \gamma_a), \tag{5}$$

где γ – отношение плотности частиц к плотности потока (воздуха);

γ_a – дополнительный вклад в γ за счет добавочного эффекта массы.

Для моделей в аэродинамической трубе $\gamma_a = 0$, т. к. добавочный эффект массы в воздухе пренебрежимо мал, а из-за малой плотности воздуха $\beta \approx 1{,}0$. Для водяного потока $\gamma_a \approx 0{,}5$ и, если используются, например, частицы песка $\beta \approx 0{,}5$.

Первый из приведенных выше параметров означает, что отношение конечной скорости частиц к скорости потока воздуха или жидкости должно быть одинаковым на модели и в натуре. Второй параметр – это денситометрическое число Фруда, и совпадение этого параметра гарантирует, что отношение силы аэродинамики к гравитационной силе является правильным для модели.

Выполнение двух вышеуказанных параметров – это, по существу, все, что необходимо для полного соответствия модели и натурного объекта при решении задач, в которых взаимодействием частиц снега с поверхностью можно пренебречь. Примерами таких задач являются начальное осаждение падающего снега с учетом действия ветра, отслеживание частиц снега, падающих с высокой поверхности на более низкую и некоторые проблемы с проникновением снега в воздухозаборники.

Тем не менее, большинство задач о распределении снеговой нагрузки связаны с метелевым массопереносом снега, где важное значение имеет взаимодействие снежных частиц со снежной поверхностью. Важным дополнительным параметром поверхностного взаимодействия является отношение средней скорости потока U к пороговой скорости. U_{th} для начала массопереноса. Это соотношение должно иметь одинаковое значение для модели и натурного объекта.

$$\frac{U}{U_{th}} = const. \tag{6}$$

Дополнительным условием, связанным с этим требованием, является то, что отношение массового потока для модели должно соответствовать аналогичной функциональной форме для натурного объекта. Отношение потока, может быть выражено из уравнения равновесного массового потока в безразмерной форме:

$$\frac{q}{\rho_p h_s U_{th}} = Cf\left(\frac{U}{U_{th}}\right), \tag{7}$$

где ρ_p – плотность частиц;

h_s – высота, на которой определяется средняя потока;

c – безразмерная константа.

Значение h_s обычно составляет от 0,5 м до 1 м в натурном масштабе, что намного меньше, чем габаритные размеры здания. На модели h_s также должно быть намного меньше размеров модели. Это позволит обеспечить согласованность с натурным наблюдением в том, что процесс массопереноса ограничивается тонким слоем вблизи поверхности снега и что траектории дрейфа являются короткими по отношению к размерам здания. Функция f должна быть идентичной для модели и полной шкалы, но безразмерная константа c может отличаться.

Исследования Петерка и Петерсена [22] показали, что для многих геометрий накопление частиц относительно нечувствительно к числу Фруда и, следовательно, к отношению U/U_{th}.

Иверсен [3], Ирвин и Уильямс [4] предложили использовать отношение массового потока для установления подходящего безразмерного времени $\bar{t}$. В конечном виде оно выглядит следующим образом:

$$\bar{t} = \frac{cU_{th}h_s}{L^2} t, \tag{7}$$

где t – время.

Это безразмерное время должно иметь одинаковое значение как для модели, так и для натурного объекта. Следовательно, масштабный коэффициент между временем натурного объекта t_p и временем модели t_m может быть найден выражением:

$$\frac{t_p}{t_m} = \frac{(cU_{th}h_s)_m}{(cU_{th}h_s)_p}\left(\frac{L_p}{L_m}\right)^2, \tag{8}$$

где индексы m и p обозначают величины модели и натурного объекта соответственно.

При испытании на модели с определенным безразмерным временем результирующая глубина дрифта d, выраженная как безразмерная глубина d/L, будет такая же, как и на натурном объекте, если выполнены другие масштабные требования. Стоит также учитывать, что продолжительность испытаний на модели имеет обратно квадратическую зависимость от размеров модели.

Кинд [6] предполагает, что должно выполняться по крайней мере одно или нескольких из следующих условий:

$$\frac{u_{*th}}{2gv} \geq 30, \tag{9}$$

$$\gamma \geq 600, \tag{10}$$

где u_{*th} – скорость, образующая перерезывающую силу на поверхности, на пороге образования массопереноса;

v – кинематическая вязкость среды.

Первое неравенство численно равняется минимально требуемому числу Рейнольдса, а второе минимальному отношению плотности частиц к плотности потока, которое удалось получить Кинду при испытаниях в аэродинамической трубе. При испытании в водных лотках, последнее неравенство практически никогда не выполняется, но реалистичные картины массопереноса образуются во многих случаях при испытаниях в водных лотках.

Применение метода частиц. На практике вопросы сопоставимости параметров, определяющих траектории падающих частиц, решены без особых трудностей. Например, для масштабной модели 1:200 в аэродинамической трубе для соответствия требуемому денситометрическому числу Фруда будут учитываться скорости ветра в туннеле, равные $1/\sqrt{200}$ от реальной скорости ветра и частицы с конечной скоростью, равной $1/\sqrt{200}$ от реальной скорости частиц. Скорости испытания очень малы, и частицы должны иметь очень низкую конечную скорость. Такие скорости могут быть легко достигнуты и найдены подходящие частицы. Аналогично в водных лотках установлено, что параметры динамического подобия можно подобрать в полном масштабе путем выбора частиц.

Однако в аэродинамической трубе, если параметры динамического подобия выполнены, оказывается невозможным совпадение одновременно с условиями (6), (9) и (10), которые влияют на массоперенос. Скорость ветра при испытаниях становится слишком низкой, чтобы получить совпадение с натурным значением пороговой скорости для инициирования метелевого переноса, который обычно является наиболее важным механизмом массопереноса. Поэтому при использовании метода частиц в аэродинамической трубе часто принимается решение отступить от равенства числа Фруда в модели и натурном объекте, а вместо этого сосредоточиться на сопоставлении параметров (6), а также удовлетворить уравнениям (9) и (10). Из-за несоответствия денситометрического числа Фруда, длина и высота траекторий переносимых частиц становится преувеличенной по сравнению с натурным объектом. Последствия этого могут быть различными в зависимости от применения. Достаточно хорошее совпадение было продемонстрировано с помощью полномасштабных наблюдений за метелевым переносом вокруг снежных заграждений в аэродинамической трубе, например [3, 26]. Однако преувеличенные траектории частиц создают трудности при использовании аэродинамической трубы для дублирования некоторых других типов полномасштабных дрейфов, например, треугольные метелевые переносы в области аэродинамической тени на крыше или метелевый перенос на подветренной половине сводчатой крыши, расположенной продольной осью, перпендикулярно ветру.

При испытаниях в водных лотках выяснилось, что денситометрическое число Фруда и параметр (6) возможно удовлетворить одновременно и поэтому избежать проблемы преувеличенных траекторий частиц. Также могут быть получены хорошие результаты симуляции треугольного метелевого переноса на крыше. Описывается ряд случаев, когда испытания в водных лотках дают качественные прогнозы снежных заносов на зданиях и вокруг них [4]. Однако, из-за гораздо более высокой плотности воды по сравнению с воздухом, не достигается условие (10), что приводит к некоторым различиям в деталях процесса массопереноса. Так, например, при применении песка для имитации снега в водных лотках, на гладких открытых участках модели могут образовываться нерегулярные ряби или небольшие дюны.

Учитывая изложенные выше ограничения метода частиц, можно сделать вывод, что ни в аэродинамической трубе, ни в водном лотке невозможно точное динамическое моделирование, а скорее приближенная интерпретация аналогов реальных метелевых процессов. Возможно применение масштабного коэффициента времени, но отсутствие точного динамического сходства затрудняет точность определения безразмерного времени. Поэтому приемлемой и простой альтернативой применению точного масштабного коэффициента времени является использование метода Относительной Глубины Снега. Суть метода Относительной Глубины Снега заключается в том, что определяется опорная точка на модели. Опорная точка выбирается в местах, где известна натурная глубина снега. Натурная глубина снега может быть определена при помощи справочной либо нормативной документации, измерена непосредственно на натурном объекте. Также опорная точка может быть размещена в тех местах, где есть уверенность, что модель приводит реалистичные данные. Испытание модели выполняется до тех пор, пока модель безмерной глубины снега d/L в опорной точке не будет соответствовать известному значению натурного объекта. Например, при моделировании в водном лотке опорное местоположение может быть у подветренного выступа крыши, где нормативно достаточно точно определены ожидаемые 50-летние пики максимальной снеговой нагрузки и глубины снега в треугольном метелевом переносе. В качестве опорного может быть использован специальный блок с уступчатыми крышами, установленный рядом с моделью. Когда модель достигает требуемой глубины снега в контрольной точке, испытание останавливается, а глубина снега в другом месте модели считается показателем полномасштабной глубины, которая возникнет после возведения объекта.

В методе частиц измерения, как правило, представляют собой модельные глубины снега. В зависимости от требуемой точности оборудование, используемое для измерения глубины, может варьироваться от простых градуированных стержней до лазерных дистанционных преобразователей [24]) или камеру муаровых полос [23].

Применение метода конечных элементов. Метод МКЭ менее требователен в плане масштабирования модели, чем метод частиц, потому что нужно моделировать только поле скорости ветра. Способы моделирования описаны в [21].

Основная задача проведения исследования – измерить среднюю скорость и направление ветра во многих местах вблизи поверхности крыши. Как правило, для этих измерений выбирается эталонная высота, соответствующая около 1 м над крышей в натурном масштабе, и они выполняются на схеме с размером сетки 10 м (полномасштабной) для 16 направлений ветра. Возможно применение сетки более плотной, чем 10 м, но в конечном итоге плотность сетки ограничена равновесной длиной для процесса метелевого переноса, который, как сказано выше, составляет порядка 5 м. Для этих типов измерений скорости были разработаны специальные зонды [20].

Как только поле скоростей определено для разных направлений ветра, метод прогнозирования выполняется путем вычисления. Детали были описаны в [27]. Для определения массового потока используются эмпирические соотношения, такие как уравнения (2) и (3). Метеорологические записи вводятся в цифровой форме, и используются эмпирические отношения для описания переноса тепла, таяния и удержания воды в снежном покрове. Как правило, модели снежного покрова на крыше моделируются на часовом графике от 20 до 50 пробников, из которых могут быть проведены статистические анализы для определения условий проектной нагрузки, включая равномерные и неравномерные типы распределения нагрузки, а также переменные нагрузки.

Метод вычисления динамики потока. Данный метод основан на методе конечных элементов, однако позволяет полностью моделировать не только поле скоростей, но и полностью описывать параметры среды и характеристики движущихся частиц. Также становится возможным моделировать не только натурный объект, но и верификационные модели данного объекта, применяемые в методе частиц, со всеми их известными ограничениями.

Недостатком данного метода является сложность расчета. Даже принимая во внимание возможность компьютерного моделирования и расчета, данный метод очень трудозатратен и требует серьезных знаний в области динамики жидкости и газов. Однако несмотря на сложность, в рамках данного метода выделилось отдельное, в основе которого находится параметрическое моделирование. Результатом данного моделирования являются почасовые прогнозы распределения снега на крышах на 50-ти летний период [28]. При этом учитываются такие процессы, как кумулятивное накопление, таяние и др.

Заключение. На основании изложенного можно сделать выводы:

1. Существующие методы моделирования снеговой нагрузки позволяют в ряде случаев более точно определить величину и характер распределения снеговой нагрузки по крышам уникальных зданий, чем это регламентировано действующими ТНПА в области проектирования.
2. Метод частиц позволяет получить визуальную картину распределения снега, но имеет ряд ограничений. В зависимости от исследуемых явлений более оптимальным может быть моделирование в аэродинамической трубе или водном лотке. Отдельного рассмотрения требуют измерительные приборы, применяемые для получения данных с масштабных моделей. При мелких масштабах увеличивается погрешность измерений.
3. С помощью метода конечных элементов возможно более точно моделировать именно метелевый перенос снега, а также учитывать явления таяния, накопления снега на крышах и воздействие тепла здания на снежный покров.
4. Параметрическое моделирование позволяет установить взаимосвязь между формой сложных крыш типовых зданий, ориентацией и климатическими особенностями региона строительства, с целью определения понижающих коэффициентов для снеговой нагрузки без потери надежности проектируемых зданий.
5. Современный уровень развития автоматизированных вычислительных систем позволяет моделировать процессы метелевого переноса с высокой точностью, учитывая точные климатические параметры и физические характеристики снега.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Templin, J.T. Loads due to Drifted Snow / J.T. Templin, W.R. Schriever // J. Struct. Div. – 1982. – Vol. 108, № 8. – P. 1916–1925.
2. Wuebben, J.L. A Hydraulic Model Investigation of Snow Drifting // Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Hanover NH: U.S. Army' – Corps of Engineers: Hanover NH, 1978.
3. Iversen, J.D. Small-scale modelling of Snowdrift Phenomena // Proc. Int. Workshop on Wind Tunnel Modelling Criteria in Civ. Eng. Applications. – Gaithersburg, Maryland: Cambridge Univ. Press., 1982. – P. 522–545.
4. Irwin, P.A. Application of Snow Simulation Model Tests to Planning and Design / P.A. Irwin, C.J. Williams // Proceedings Eastern Snow Conf. 28, 40th Annual Meeting. – № 1. – 1983. – P. 18–130.

5. Anno, Y. Requirements for modeling of a snowdrift // Cold Reg. Sci. Technol. – 1984. – Vol. 8, № 3. – P. 241–252.
6. Kind, R.J. Snowdrifting: A review of modelling methods // Cold Reg. Sci. Technol. – 1986. – Vol. 12, № 3. – P. 217–228.
7. Petersen, R. Application of Physical Modeling for Assessment of Snow Loading and Drifting / R. Petersen, J. Cermak // Proceedings of First International Conference on Snow Engineering. – Santa Barbara CA: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover NH, July, 1988. – P. 276–285.
8. Isyumov, N. Wind Tunnel Modeling of Snow Accumulations on Large Area Roofs / N. Isyumov, M. Mikitiuk // Proceedings of Second International Conference on Snow Engineering. Santa Barbara CA: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover NH, July, 1992. – P. 181–193.
9. O'Rourke, M. Laboratory Studies of snow Drifts on Multilevel Roofs / M. O'Rourke, N. Weitman // Proceedings of second International Conference on snow Engineering. Santa Barbara CA: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover NH, July, 1992. – P. 195–206.
10. Irwin, P.A. Model and Computer Studies of Snow Loading / P.A. Irwin, S. Gamble // Proceedings of the International Congress on Innovative Large Span Structures, Int. Assoc. Of Shell and Space Struct. and Canadian Soc. of Civ. Eng. Toronto, 1992. – P. 381–392.
11. Peterka, J.A. Roof Design Snow Loads by Wind Tunnel Test and Analysis / J.A.Peterka, W.S. Esterday // ASCE Struct. Congr, 2004.
12. Bagnold, R.A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes // Nature. – 1941. – Vol. 148. – P. 480–481.
13. Dyunin, A.K. Solid Flux of Snow-Bearing Air Flow // Technical Translation TT-1102, (from Russian). Ottawa: National Research Council of Canada, 1963.
14. Mellor, M. Blowing snow // Cold Regions Science and Engineering, Part III, Section A3C. Hanover, NH: U S Army Cold Region Research and Engineering Laboratory, 1965.
15. Isyumov, N. An Approach to the Prediction of Snow Loads. University of Western Ontario, 1971.
16. Kobayashi, D. Studies of Snow Transport In Low-Level Drifting Snow* // Contrib. from Inst. Low Temp. Sci, 1972.
17. Tabler, R.D. The Geometry and Density of Drifts Formed by Snow Fences // J. Glaciol. – 1980. – Vol. 26, № 94. – P. 405–419.
18. Kind, R.J. Snow Drifting, Handbook of Snow, Principles, Processes, Management and Use. D.M. Gray. Pergamon Press, 1981.
19. Schmidt, R.A. Transport rate of drifting snow and the mean wind speed profile // Boundary-Layer Meteorol, 1986.
20. Gamble, S.L. Finite area element snow loading prediction - applications and advancements / S.L. Gamble, W.W. Kochanski, P.A. Irwin // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. – 1992. – Vol. 42, № 1–3. – P. 1537–1548.
21. Isyumov, N. Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures // ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice. – № 67. – New York, NY: American Society of Civil Engineers, 1999.
22. Peterka, J.A. On the relaxation of saltation length as a modeling criteria for particulate transport by wind / J.A. Peterka, R.L. Petersen // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn, 1990.
23. Kwok K.C.S. et al. Snowdrift around buildings for antarctic environment // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn, 1992.
24. Toyoda, K. Development of a Wind Tunnel for the Study of Snowdrifting / K. Toyoda, T. Tomabechi // Proceedings of Second International Conference on Snow Engineering. Santa Barbara CA: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover NH, July, 1992. – P. 207–214.
25. Etkin, B. The Interaction of Precipitation with Complex Flows // Proceedings of the Third International conference on Wind Effects on Buildings and Structures. Tokyo: Saikon Shuppan co. Ltd, 1971. – P. 135–143.
26. Kind, R.J. Saltation flow measurements relating to modeling of snowdrifting / R.J. Kind, S.B. Murray // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. – 1982. – Vol. 10, № 1. – P. 89–102.
27. Irwin, P.A. Erratum: Effects of roof size, heat transfer, and climate on snow loads: studies for the 1995 NBC / P.A. Irwin, S.L. Gamble, D.A. Taylor // Can. J. Civ. Eng. – 1996. – Vol. 23, № 2. – P. 576.
28. Brooks, A. et al. Parametric Simulation of Roof Structural Snow Loads, 2016.

Материал поступил в редакцию 13.02.2018

MATSVEYENKA Y.V. Generalized analysis of snow load simulation methods

The technical regulatory legal acts in force in the Republic of Belarus regulate the rules for determining snow loads in the design of building structures. However, when compiling these documents, generalizations were made for applicability to most standard designs. In some cases, this leads to a non-optimal design. In this article the main ways of modeling the snow load are considered. Their advantages and disadvantages are analyzed. Conclusions are made about the complexity and the possibility of implementing the data method in the design process.

УДК 624.07

Курлапов Д.В., Милютин Б.Г., Хабарков А.В.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ФУНДАМЕНТНЫХ ПЛИТ, АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРОЙ

Введение. Техническое обследование фундаментных плит хранилищ проводилось в августе…сентябре 2015 года. На момент обследования выполнены фундаментные плиты хранилищ, выставлены стальные каркасы армирования колонн и стен строящихся сооружений. Фундаментные плиты хранилищ выполнены в феврале…апреле 2015 года. С целью уточнения геометрических размеров фундаментных плит и определения состояния фундаментных плит были выполнены визуальный осмотр и необходимые обмеры, проведены инструментальные измерения. Толщина плит 0,7 м. Плиты прямоугольные в плане с размерами 30,6×40,6 м.

Анализ публикаций. Для анализа скрытых от обзора дефектов конструкций в необходимых местах были произведены вскрытия и оценка физико-механических характеристик по существующим методикам [1, 2, 3].

Для уточнения прочности бетона фундаментных были отобраны

***Курлапов Дмитрий Валерьевич**, к.т.н., доцент, профессор кафедры гидротехнических сооружений, строительных конструкций и механики твердого тела Военного института (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева.*

***Милютин Борис Григорьевич,** инженер кафедры гидротехнических сооружений, строительных конструкций и механики твердого тела Военного института (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева.*

***Хабарков Андрей Владимирович,** инженер кафедры гидротехнических сооружений, строительных конструкций и механики твердого тела Военного института (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева.*

Россия, ВИТУ, 224017, г. Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, 22.