

Рис. 2 Схема сооружения с распределением нормативного ветрового давления по длине дуги.

Согласно полученным данным и проведенному анализу можно сделать следующие выводы:

1. Ощутимая разница в полученных значениях нормативного ветрового давления связана с определением значения скоростного напора  $q_b$  по EuroCode 1991-1-4:2004, который определяется в зависимости от средней скорости ветра, а не от ветрового района. Тип местности по EuroCode 1991-1-4:2004 фигурирует только в определении коэффициента изменения ветрового давления по высоте  $c_e(z)$ , значения которого гораздо выше по сравнению со значениями в СНиП 2.01.07-85 для схожего типа местности.
2. При описании воздействия ветрового потока по СНиП 2.01.07-85 не учитываются такие параметры, как шероховатость подстилающей поверхности и детальный рельеф местности, а также влияние сооружений, расположенных выше по направлению потока (в EuroCode 1991-1-4:2004 частично учтено влияние соседних сооружений).
3. Описание воздействия ветрового потока по EuroCode 1991-1-4:2004 является более детальным, учитываются многие немаловажные факторы, которые не учтены в СНиП 2.01.07-85. EuroCode 1991-1-4:2004 даёт более точную качественную и количественную оценку воздействия ветрового потока на здания и сооружения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия/Госстрой СССР. - Москва: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. - 36 с.
2. СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика/Госстрой СССР. - Москва: ЦИТП Госстроя СССР, 1983. - 136 с.
3. Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения. - Москва: Издательство литературы по строительству, - 1972. - 110 с.
4. Eurocode 1: Actions on structures - General actions - Part 1-4: Wind actions. - B-1050 Brussels: CEN, 2004. -148 p.

УДК 642.042.41

Мигель А.В.

Научный руководитель: проф. Мухин А.В.

#### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОКРЫТИЕ ЛЕТНЕГО АМФИТЕАТРА В Г. ВИТЕБСКЕ

Численное моделирование ветрового воздействия для покрытия Летнего амфитеатра в г. Витебске выполнялось с использованием объединенного программного продукта *SolidWorks+FloWorks*. Программный продукт *SolidWorks+FloWorks* обладает простым в освоении интерфейсом, позволяет на различных уровнях точности решать задачи обе-

кания тел, хорошо зарекомендовал себя на рынке (используется в задачах различного рода, в том числе задачи обтекания летательных аппаратов), более доступен по сравнению с другими продуктами подобного уровня.

Объединенный программный продукт *SolidWorks+FloWorks* представляет собой комбинацию полной версии системы *SolidWorks* как графической среды и гидрогазодинамического решателя *COSMOSFloWorks*. Трехмерная параметрическая геометрическая модель исследуемого тела создается в CAD-программе *SolidWorks*. В CAE-программе *FloWorks* определяются свойства среды, граничные условия, точность решения, геометрические размеры расчетной зоны и осуществляется численное решение задачи. В общем случае возможно решать следующие задачи механики жидкостей и газов: стационарные и нестационарные течения, ламинарные и турбулентные течения, несжимаемые и сжимаемые течения, шероховатости стенки и степени турбулентности потока или без них.

Для численного решения задач используется метод конечных объемов и нестационарные уравнения Навье-Стокса. Дискретизация уравнений осуществляется в консервативной форме, частные производные аппроксимируются со вторым порядком точности, производные по времени - по неявной схеме Эйлера первого порядка.

Суть алгоритма численного решения можно проиллюстрировать на примере анализа течения смеси несжимаемых жидкостей. Расчет параметров потока при переходе на временной ( $n+1$ ) слой осуществляется по их известным значениям на слое ( $n$ ) с помощью системы дискретных уравнений, приближающих исходную систему уравнений Навье-Стокса:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\bar{U}^* - \bar{U}^n}{\Delta t} + A_n(\bar{U}^n, p^n) \cdot \bar{U}^* &= S^n; \\ L_n \delta p &= \frac{\text{div}_n(\rho \bar{u}^*)}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{p^* - p^n}{\Delta t}; (p^* = \rho(T^*, y^*)); \\ \rho^{n+1} &= \rho \bar{u}^* - \Delta t \cdot \text{grad}_n \delta p; \\ p^{n+1} &= p^n + \delta p; \\ \rho T^{n+1} &= \rho T^*; \rho k^{n+1} = \rho k^*; \rho \varepsilon^{n+1} = \rho \varepsilon^*; \rho \bar{y}^{n+1} = \rho \bar{y}^*; \\ \rho^{n+1} &= \rho(T^{n+1}, \bar{y}^{n+1}). \end{aligned} \right\} (1)$$

Здесь индекс \* присвоен промежуточным значениям параметров;  $\bar{U} = (\rho \bar{u}, \rho T, \rho k, \rho \varepsilon, \rho \bar{y})^T$  - полный набор базовых переменных, исключая давление  $p$ ;  $\bar{u} = (u_1, u_2, u_3)^T$  - вектор скорости;  $\bar{y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T$  - вектор компонент концентраций смеси жидкостей;  $\delta p = (p^{n+1} - p^n)$  - дополнительная переменная, которая называется *невязкой давления*. Все указанные параметры являются дискретными функциями, которые определяются в центрах расчетных ячеек с помощью приведенной выше системы уравнений. Дискретные операторы  $A_n; \text{div}_n; \text{grad}_n; L_n = \text{div}_n \text{grad}_n$  приближают со вторым порядком точности соответствующие дифференциальные операторы исходных уравнений.

На первом шаге алгоритма решается первое уравнение системы, которое является уравнением конвективного переноса. В результате получают промежуточные значения величин количества движения и окончательные значения турбулентных параметров, температуры и концентраций компонентов. Затем определяется невязка давления  $\delta p$  с помощью второго уравнения системы, которое является уравнением второго порядка эллиптического типа и определено таким образом, чтобы окончательное поле значений

количества движения  $\rho u^{n+1}$  удовлетворяло дискретным уравнениям сохранения. Расчет окончательных значений параметров течения производится с помощью последних четырех уравнений системы.

Программа имеет разнообразные средства визуализации и обработки результатов расчетов в среде *SolidWorks* (векторные линии, изолинии, цветовые контурные заливки, изоповерхности, сечения, трассировки частиц, линии тока). Есть возможность представления результатов в виде графиков и таблиц *Excel* или же в виде отчетов стандартной формы, которые формируются автоматически [1].

Численное моделирование ветрового воздействия рассмотрим на примере следующей задачи: направление ветра вдоль структурного покрытия слева от сцены (со стороны склона), этот вариант направления ветрового потока позволяет получить наиболее адекватные численные данные (см. рис.3). Другие варианты направления ветрового потока (поперёк покрытия, под углом к покрытию) могут дать менее адекватную картину распределения давлений по поверхности, потому что пространственная модель сооружения представлена твердотельной (ввиду не применимости использования стержневых моделей в модуле расчёта *COSMOSFloWorks*).

Для решения поставленной задачи использовался модуль расчёта *COSMOSFloWorks* и графическая оболочка *SolidWorks Office Premium 2006*. При решении задачи были применены следующие начальные условия:

- Среда ветрового потока – воздух. Характер ветрового потока – ламинарно-турбулентный. Граничных условий – нет, шероховатость подстилающих поверхностей и покрытия отсутствует. Покрытие представлено как «идеальная стенка».
- Скорость ветра 19.2 м/с, что приблизительно соответствует нормативному значению скоростного напора  $w_0=23 \text{ кг/м}^2$  (согласно СНиП 2.01.07-85 для I ветрового района),
- Начальная температура среды  $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$ , давление  $P=101325 \text{ Па}$ .

В результате решения задачи были получены изополя статического давления: в продольном и поперечном сечении, см. рис. 1, 2.

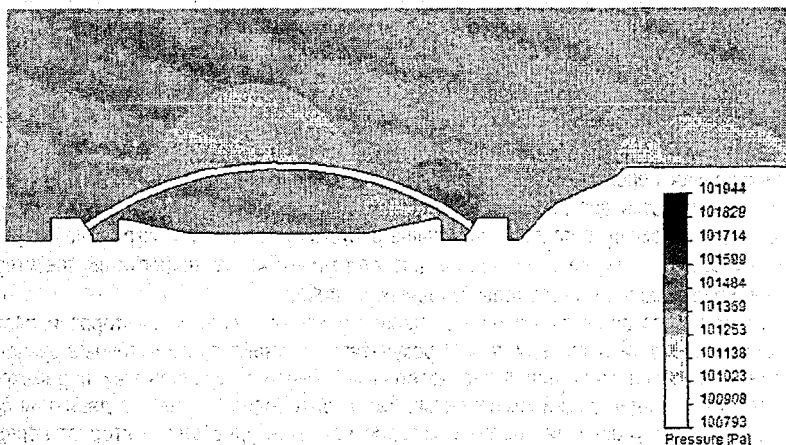


Рис. 1 Распределение статического давления в продольном разрезе.

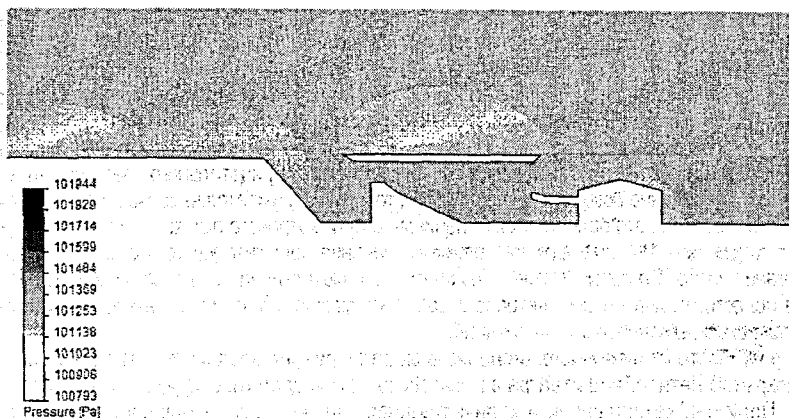


Рис. 2 Распределение статического давления в поперечном разрезе.

На рис. 1, 2 показаны области повышенного давления – более тёмным цветом, а также области пониженного давления – более светлым цветом. На основании графиков распределения статического давления, которые были получены по результатам моделирования, сверху и снизу от покрытия в характерном сечении была построена диаграмма давления ветрового потока на поверхности. Значения давлений ветрового потока по длине дуги с шагом 3 м были получены путем разности статических давлений в характерных точках. Диаграмма давления ветрового потока в характерном сечении представлена на рис.3.

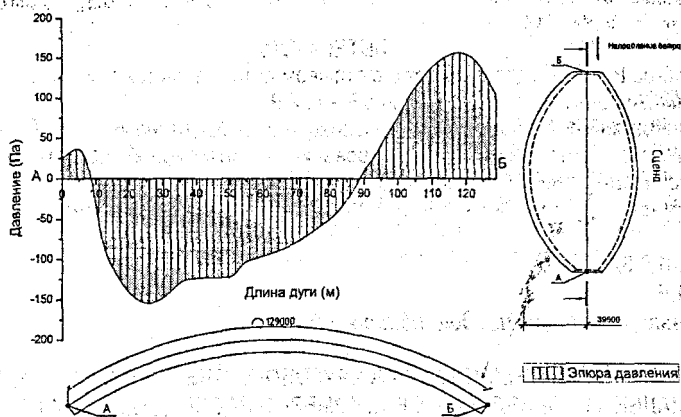


Рис. 3 Диаграмма давления ветрового потока в характерном сечении.

На рис. 3 показаны области положительного давления ветрового потока – «напор» и области отрицательного давления ветрового потока – «отсос». Максимальное значение положительного давления составляет 155 Па, максимальное значение отрицательного давления ветрового потока составляет 127 Па.

Эпюра распределения ветрового давления имеет следующий характер: со стороны воздействия ветрового потока наблюдается область положительного давления, небольшой спад со стороны точки Б объясняется наличием в этой области фундамента см. рис. 1; далее наблюдается постепенное возрастание, а затем убывание положительного давления ветрового потока; область приблизительно между 80 и 100 м. по длине дуги – так называемая «область срыва ветрового потока», которая характеризуется возникновением турбулентных вихрей; далее по длине дуги (от точки А к точке Б) находится зона отрицательного давления ветрового потока, постепенно возрастающая и убывающая; со стороны т. А имеется небольшая зона положительного давления, это объясняется наличием на пути ветрового потока в этой области фундамента (см. рис. 1). Несколько завышенные значения положительного давления в области набегания ветрового потока можно объяснить наличием склона. Ступенчатый характер эпюры в области отрицательного ветрового давления можно объяснить возникновением в этих местах локальных турбулентных течений.

В результате проведенного численного моделирования воздействия ветрового потока на покрытие Летнего амфитеатра в г. Витебске можно сделать следующие выводы:

1. Получена качественная и количественная картина распределения ветрового давления на поверхности покрытия. Полученная диаграмма распределения ветрового давления подобна схеме распределения давления ветрового потока для здания со сводчатыми и близкими к ним по очертанию покрытиями согласно СНиП 2.01.07-85. Отличия в полученной схеме распределения давления ветрового потока по СНиП 2.01.07-85 можно отнести на наличие рельефа и более точный учёт всех факторов ветрового воздействия при численном моделировании.

2. Современные расчётные модули, такие как *COSMOSFloWorks*, учитывают практически все параметры ветрового потока. Параметры самого ветрового потока, такие как сжимаемость, вязкость, турбулентность и т.д., учитываются при приближенном решении системы уравнений Навье-Стокса. Рельеф местности, шероховатость, влияние соседних сооружений учитываются граничными условиями и моделью сооружения с возможной степенью точности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ушаков В. Анализ обтекания тел с отрывом потока в системе SolidWorks\FloWorks. CAD/CAM/CAE Observer #3 12 (2003), 2003. – с. 2-9.
2. Алямовский А. А., Собачкин А. А., Одинцов Е. В., Харитонович А. И., Пономарев Н. Б. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, - 2005. - 800 с.

УДК 681.3:624.04

Тур А.В.

Научный руководитель: доц. Игнатюк В.И.

## РАСЧЕТ ДВУХШАРНИРНЫХ АРОК КРУГОВОГО ОЧЕРТАНИЯ НА ДЕЙСТВИЕ РАДИАЛЬНО НАПРАВЛЕННЫХ РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ НАГРУЗОК

В практике проектирования находят применение длинные цилиндрические оболочки, выполненные из легких материалов. Для таких оболочек особую роль играет ветровая нагрузка, которая действует на них в радиальных направлениях [1]. Расчетная схема длинной цилиндрической оболочки может быть сведена к расчету двухшарнирной арки. Поэтому расчет двухшарнирных арок кругового очертания на действие радиально направленных равномерно распределенных нагрузок (рис. 1) актуален и представляет интерес.