

MF Group: опыт использования передовых решений для расчета и проектирования сценических конструкций на основе продуктов НТЦ «АПМ»

Игорь Агеев

В этом году россияне впервые смотрели новогоднее шоу Первого канала в режиме Live. На Красной площади была возведена оригинальная сцена, на которой исполняли хиты глав-

ные звезды эстрады. Зрители были впечатлены не только форматом мероприятия, но и тем, как была выполнена главная сцена с конусообразной верхушкой.

Приходя на мероприятие, зрители и не подозревают, сколько труда и знаний вкладывают сотрудники компании MF Group в реализацию подобных масштабных проектов.



Игорь Агеев, главный конструктор MF Group

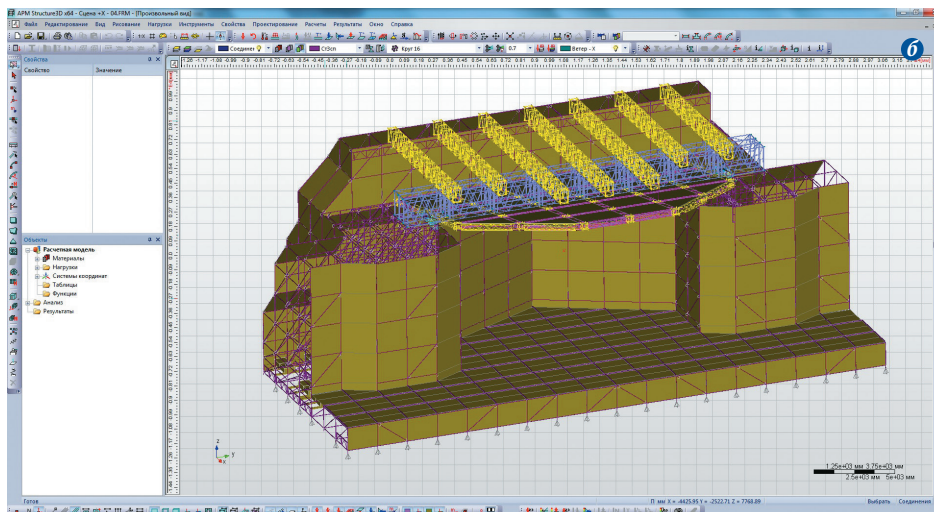
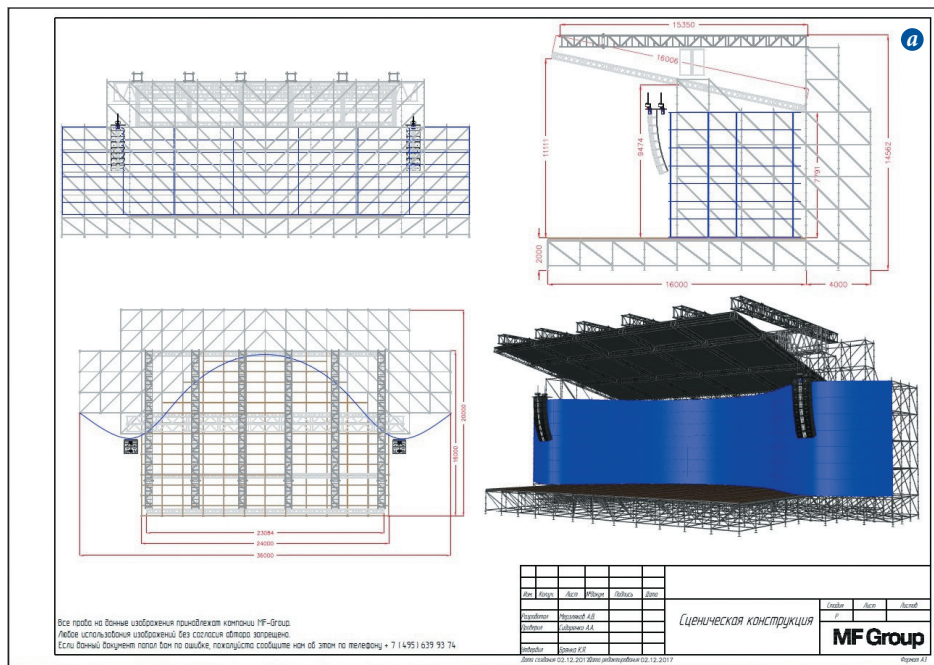


Рис. 1. От эскиза к расчетной модели: а — рабочий чертеж сценической конструкции; б — расчетная модель сценической конструкции

Трудности, которые приходится преодолевать разработчикам и строителям временных сценических сооружений, остаются незамеченными. За несколько дней на пустой площадке необходимо возвести монументальное сооружение, проследить за ходом мероприятия, а затем снова разобрать и вывезти всё до последнего болта.

Огромное значение при создании таких сооружений инженеры MF Group придают устойчивости и прочности конструкции, надежности всех составляющих ее компонентов для гарантированной безопасности гостей мероприятия и персонала. Первым вопросом для проектировщиков временных строительных сооружений является степень приближения расчетных моделей и схем прилагаемых нагрузок к реальным конструкциям и воздействиям на них (рис. 1).

Дополнительную сложность в решении этого вопроса создает отсутствие реальной нормативной базы, регламентирующей проведение расчетов в области строительства времен-

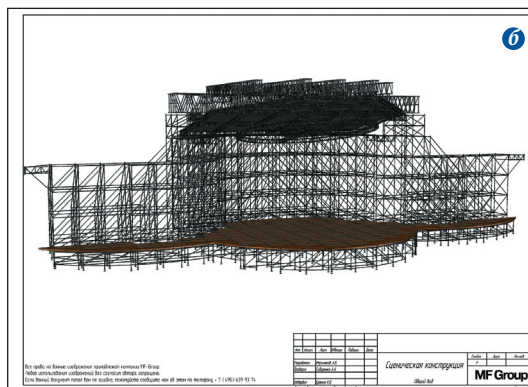
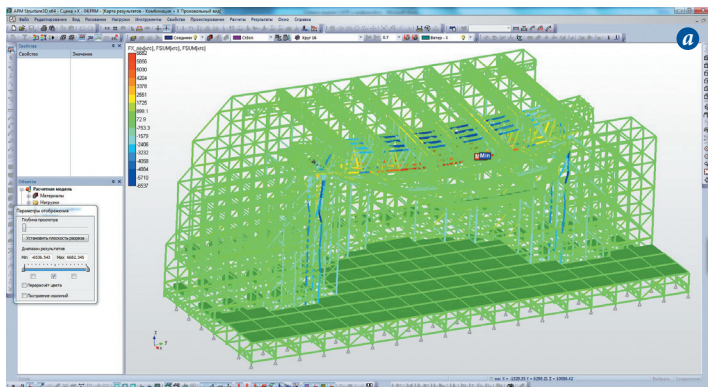


Рис. 2. От расчета к проекту: а — пример вывода результатов расчета; б — пример рабочего чертежа сцены

ных сооружений. Единственный нормативный документ, применяемый на территории РФ для регламентации расчетов, — это СНиП 2.01.07-85 и актуализированная редакция:

средств расчета — программных продуктов, выполненных на основе метода конечных элементов (МКЭ).

Но не все современные средства расчета подходят для

НТЦ «АПМ». С его использованием мы получили возможность делать более точные расчеты «простых» конструкций и оптимизировали затраты на их монтаж и эксплуатацию.

целом приводит к экономии затрат на 8-12%.

К «простым» конструкциям мы относим стенки для размещения экранов и звукового оборудования, столбы для под-



Рис. 3. От монтажа — к шоу!

СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».

Этот документ не в силах отразить все разнообразие временных конструкций и ситуаций их применения (рис. 2 и 3). При проведении расчетов сложных конструкций инженеры MF-Group вынуждены самостоятельно «додумывать» возможные схемы приложения ветровых нагрузок, экстраполировать используемые аэродинамические коэффициенты и перекрывать накапливающуюся погрешность применяемыми коэффициентами запаса.

Решение поставленных задач было бы невозможно без применения современных

применения в нашей области. После поиска оптимального решения инженеры MF Group остановились на **APM Civil Engineering** — продукте российского производителя

В итоге это выражается в уменьшении количества материалов, применяемых в изделии, что ведет к снижению затрат на транспорт, персонал, сокращает время монтажа и в

веса звуковых массивов или светового оборудования, арки, переходы и мостки (рис. 4). Эти сооружения либо имеют полностью открытую ветровому воздействию решетчатую

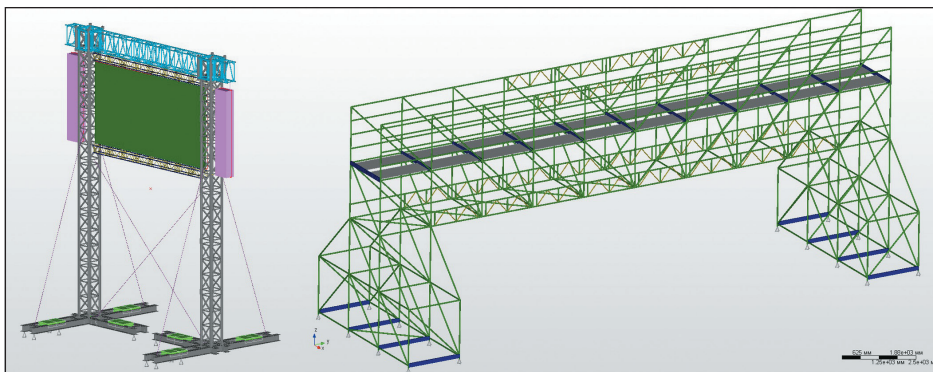


Рис. 4. Примеры «простых» конструкций

структуру металлоконструкции, либо полностью закрыты баннерным покрытием, не допускающим прямого ветрового воздействия на элементы металлоконструкций. Ветровые воздействия, описанные в СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», свободно применимы при расчете простых конструкций, а все методики расчета реализованы в продукте APM Civil Engineering.

Рассмотрим подробнее расчет часто встречающейся простой конструкции входной арки (рис. 5). Целью расчета является проверка прочности металлоконструкции и ее устойчивости к ветровому воздействию, характерному

для региона эксплуатации. Металлоконструкция арки собрана из лесов системы Layher ALLROUND и полностью закрыта баннерами. Так как проектируется бесфундаментная конструкция, то ее устойчивость к ветровому воздействию обеспечивается весом бетонного балласта, размещенного на брусковой обрешетке. Бетонный балласт размещается на первом этаже каждой колонны конструкции.

Расчет производится с применением модуля APM Structure3D. Каждому стержню модели присваивается сечение и материал, соответственно применяемые в металлокон-

струкции, задаются связи с соседними элементами. Стойки и ригеля имеют на обоих концах стержней жесткую связь по всем шести степеням свободы, что соответствует жесткому креплению лесов клинового типа, а для раскосов предусмотрены соединения типа «шарнир». Тентовое покрытие моделируется элементами типа «пластина без жесткости» с заданной толщиной и материалом, сходным с баннерным покрытием.

Все опоры сооружения задаются как шарнирные. В принципе, модуль позволяет использовать для опор вариант типа «односторонняя опора». Это именно то, что применя-

ется монтажниками MF-Group в реальных конструкциях, ибо опорные домкраты, на которых выставлены леса, просто стоят на фанерных прокладках, никак не прикреплены к грунту и теоретически, при некотором воздействии, опорам ничто не мешает отрываться от него. Но использование такого типа опор реализуется в расчетном модуле только при проведении нелинейного расчета, а это исключает возможность учитывать динамическую составляющую ветрового воздействия, что в данном расчете имеет принципиальное значение.

Обойти проблему мы смогли путем применения ряда последовательно проводимых статических расчетов. Определяя опоры с отрицательной вертикальной реакцией и последовательно исключая их из модели на каждой итерации, мы находим такую конфигурацию, при которой отрывающиеся опоры отсутствуют. Этот метод имеет существенный недостаток — многократное повторение одного и того же расчета, что ведет к увеличению времени, потраченного на расчет, на порядок и более. Это очень серьезный недостаток, ибо специфика бизнеса в сфере создания временных строительных сооружений заставляет нас работать в предельно сжатые сроки, а время, затраченное на оптимизацию и доводку конструкции до идеала, часто является определяющим критерием для реализации всего проекта в целом.

Приложение APM Structure3D позволяет прикладывать нагрузку от ветрового воздействия непосредственно по параметрам, заданным в СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». В окне программы задается аэродинамический коэффициент и тип местности. Нормативное значение ветрового давления

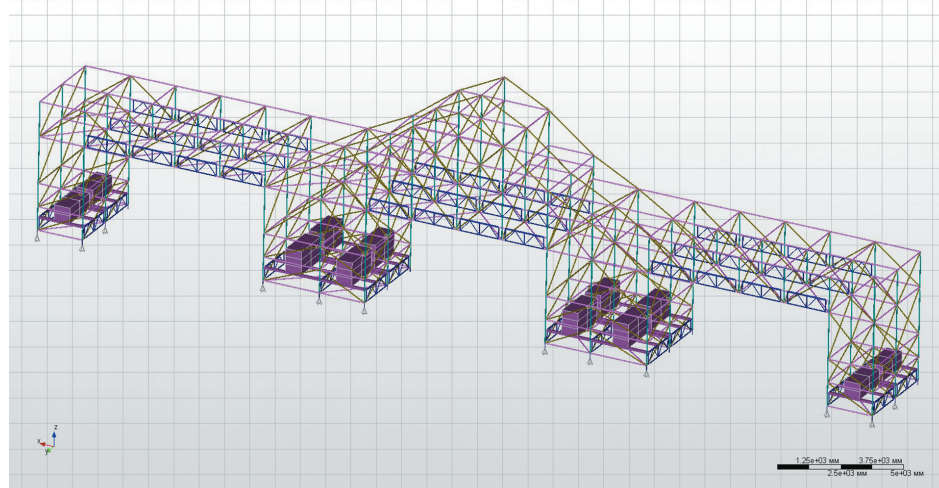
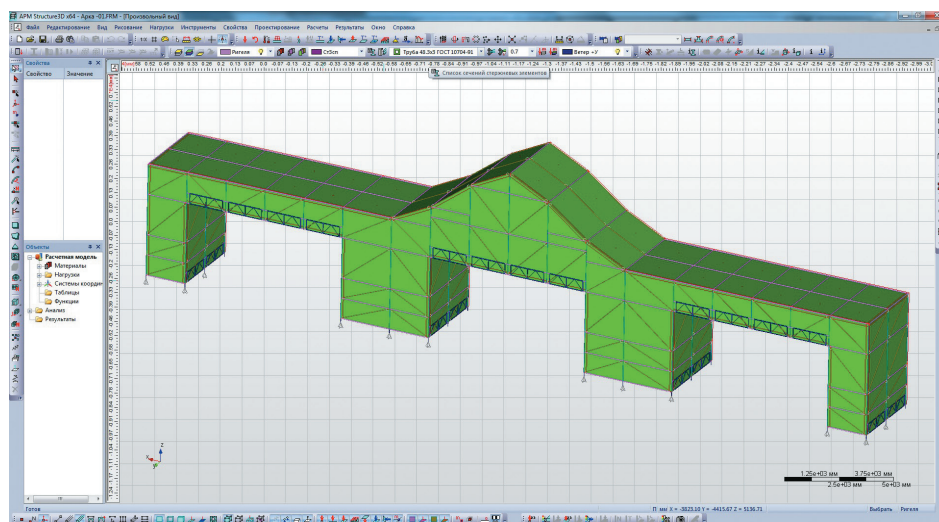


Рис. 5. Расчетная модель арки

автоматически задается в зависимости от номера ветрового района. Программа переводит эти данные в значение интенсивности давления в зависимости от высоты с шагом, определенным в СП. Задается направление воздействия. Величины аэродинамических коэффициентов для каждой плоскости модели самостоятельно задаются из СП.

Пульсационную составляющую ветрового воздействия модуль APM Structure3D позволяет задавать в окне задания динамической нагрузки. Каждое динамическое нагружение привязывается к своему ветровому нагружению. В окне программы задается количество учитываемых собственных форм колебаний, габариты сооружения и координаты его нижней точки, тип местности с ветровым районом, тип сооружения и логарифмический декремент. Величины этих параметров самостоятельно задаются из СП.

Разложив все нагрузки на модель по видам нагружений, программа позволяет отследить реакцию сооружения на разные типы нагрузок без посторонних влияний. Статический расчет комбинации нагружений позволяет просчитать реакцию сооружения на их различные сочетания. Важно понимать, что собственные частоты сооружения напрямую зависят от точности построения модели. Поэтому нежелательно прикладывать к модели в виде нагружений балластные нагрузки. Более правильным будет применение элементов, смоделированных твердотельными конечными элементами с массогабаритными характеристиками, соответствующими реальным бетонным блокам ФБС.

От величины первых собственных частот зависит и

пульсационная составляющая ветровой нагрузки, воздействующей на сооружение. Превышение величины пульсационной составляющей над постоянной иногда может быть более чем в 3-4 раза, и учесть этот момент позволяет только применение модуля APM Structure3D. Он позволяет не только просчитать значения первых собственных частот и построить визуализацию их форм, но и автоматически выбирать методику расчета пульсационной составляющей, оговоренную в СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» в зависимости от величины предельного значения собственной частоты. Ручной расчет по СП в данном случае сильно затруднен, и ошибка при определении пульсационной составляющей может превышать правильные значения в разы.

В результате расчета мы подбираем минимально необходимое количество балласта для обеспечения устойчивости сооружения от опрокидывания и сдвига. При этом мы имеем возможность допустить отрыв некоторых опор, находящихся первыми по направлению ветрового воздействия. Критерием устойчивости конструкции к опрокидыванию является обязательная положительная вертикальная реакция в опорах хотя бы в двух последних по направлению ветрового воздействия рядах опор. Критерием устойчивости конструкции к сдвигу является превышение суммарной вертикальной реакции опор над горизонтальной более чем в 2 раза. Это обеспечивает коэффициент трения 0,5 для сухого асфальта. Для мокрого нагрузка рассчитывается исходя из коэффициента трения 0,2.

Критерии допустимых нагрузок на элементы сооружения мы получаем от произво-

дителя лесов. По критериям определяем перегруженные или недогруженные элементы в металлоконструкции. Проводя оптимизацию, сокращаем количество нерационально установленных элементов или добавляем их там, где это необходимо. Модуль APM Structure3D позволяет выводить значения рассчитываемых параметров отдельно, чтобы не затенять диаграмму. Элементы с нагрузками, превышающими допустимые, видны на диаграмме — их можно скорректировать (рис. 6).

Грамотно спроектированная и оптимизированная конструкция позволяет инженерам MF-Group уверенно ставить сооружение на площадке заказчика с минимальными вложениями, не беспокоясь за ее прочность и надежность.

Второй тип «простых» конструкций — изделия, полностью открытые ветровому воздействию. Пример такой конструкции — столбы для размещения звуковых массивов или светового оборудования. Конструкция состоит из объемного основания —

APM Engineering

Реклама

Оптимальные решения в строительстве и машиностроении

АПМ
Научно-технический центр
Тел.: (498) 600-25-10
E-mail: com@apm.ru
www.cae.apm.ru
www.apm.ru

Machine

15000
10000
5000
0

0 4 8 12 16 20

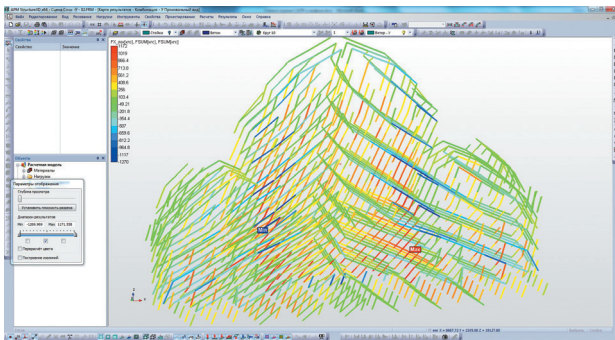


Рис. 6 Внутренние нагрузки в откосах сцены

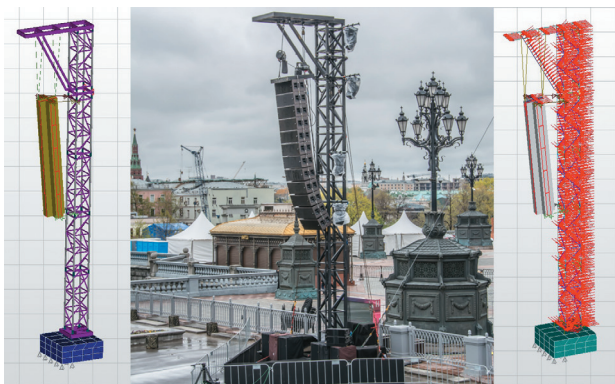


Рис. 7. «Простая» конструкция типа «столб» и ветровая нагрузка на стержни металлоконструкции

балласта, смоделированного твердотельными конечными элементами, с массогабаритными характеристиками, соответствующими реальному балласту, металлоконструкции столба, смоделированной стержневыми элементами с материалом и сечениями, соответствующими реальным, и пластинами, моделирующими полезное оборудование с весом и площадью, характерными для реальных приборов (рис. 7).

Создание расчетных моделей таких конструкций аналогично описанному выше. Отличие только в приложении ветровой нагрузки. В соответствии с СП 20.13330.2016

«Нагрузки и воздействия» ветровая нагрузка на фермовые конструкции моделируется ветровым воздействием на условную пластину без жесткости, натянутую на габариты фермы. Сложность этого метода — в необходимости дополнительного определения аэродинамических коэффициентов для каждой фермы как вдоль, так и поперек. Эта методика проработана в СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» гораздо хуже, есть некоторые неточности и противоречивые моменты. Например, авторы СНиП делают допущение, что ветровое воздействие на сооружение

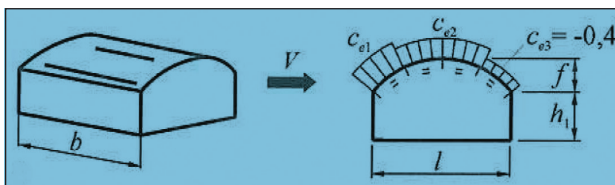


Рис. 8. Схема задания ветровой нагрузки

происходит непосредственно по осям X или Y, и задние по направлению ветра элементы ферм второго и последующего поясов находятся в тени передних элементов. Это обязывает расчетчика применять коэффициенты затенения на 4-6-м поясе, уменьшающие воздействие ветра на элемент практически на порядок. В реальной жизни ветер не имеет строгого курса, и вероятность совпадения направления ветра с осью сооружения очень мала. При изменении угла даже на несколько градусов задние элементы выходят из тени передних, и величина ветрового воздействия на них резко возрастает. СНиП не дают точных значений, насколько изменится эта величина. Строительные нормы также имеют неточности при определении величины коэффициента K_A при учете относительного удлинения.

В последней версии модуля APM Structure3D эта проблема решена. Теперь мы можем приложить ветровую нагрузку в зависимости от ветрового района, типа местности и направления ветра непосредственно к стержневому элементу. Программа учитывает форму сечения элемента и его положение к вектору ветрового воздействия.

Новая версия заметно облегчила решение еще одного типа задач. Теперь мы причисляем к «простым» сооружениям и сооружения скелетного и фермового типа, не закрытые баннерами или декорациями.

Помимо «простых» сооружений мы проектируем и сооружения смешанного типа. Пластичатые и стержневые элементы в них чередуются в различных сочетаниях и конфигурациях. Задание величины аэродинамических коэффициентов для таких

сооружений не описывается ни в одном нормативном документе. Поэтому при расчете приходится моделировать, экстраполировать и предполагать, что отрицательно влияет на точность проводимых расчетов. Это приводит к увеличению стоимости проектов из-за превышения коэффициентов запаса.

Большие надежды на решение проблемы проектирования смешанных конструкций мы возлагаем на новый модуль APM FGA («Система автоматизированного анализа механики жидкости и газа») от НТЦ «АПМ». Модуль входит в новый программный продукт APM Multiphysics. В применении к нашим задачам этот модуль позволяет моделировать поведение воздушной массы при движении с заданной скоростью, определять давление на произвольно заданные препятствия в этом потоке. С использованием APM FGA мы можем получить реальные нагрузки от ветра даже на сложные конструкции.

В качестве примера рассмотрим вариант ветрового нагружения ангара с крышей цилиндрической формы. Для анализа ветровых давлений выполним сравнительные расчеты согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» и с использованием APM FGA. Номинальное давление принимаем для 3-го ветрового района (300 Па) при скорости обдува $V = 22,5$ м/с, для типа местности А. Свойства ветрового течения характеризуются: плотностью $\rho = 1,185$ кг/м³; вязкостью $\mu = 1,831e - 5$ Па·с.

Расчетная модель объекта и перечень участков для определения ветрового давления по нормативным строительным документам представлены на рис. 8.

Численные значения действующих удельных давлений

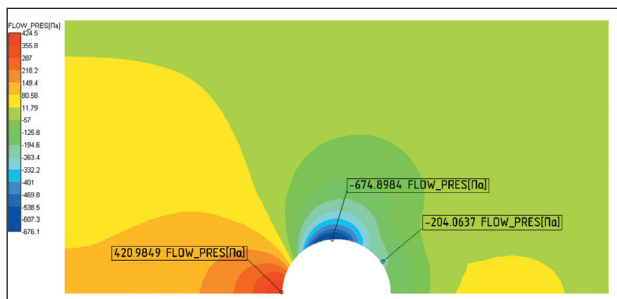


Рис. 9. Карта распределения давлений по результатам вычислений APM FGA

определяются исходя из аэродинамического коэффициента — c . Для выделенных участков получим:

$$c_{e1} = 0,8; c_{e2} = -1,2; c_{e3} = -0,4$$

Учитывая, что ветровое давление равно 300 Па (III ветровой район), получим распределение давления по купольной крыше ангара:

$$W_{m1} = 240 \text{ Па}; W_{m2} = -360 \text{ Па}; W_{m3} = -120 \text{ Па}.$$

Решение задачи численным моделированием процедуры обдува ангара ветровым потоком с использованием программной среды APM FGA позволяет построить карты давлений, которые

Таблица 1. Давление, действующее на первом участке

Номер узла	299	380	378	376	374	372	370	368	366	364	362	Среднее давление
Давление, Па	423	416	395	360	313	253	183	104	19,6	-69,2	-160	203,4

Таблица 2. Давление, действующее на втором участке

Номер узла	361	359	357	355	353	351	349	347	345	343	341
Давление, Па	-205	-269	-376	-453	-521	-577	-622	-653	-671	-673	-662

Номер узла	339	337	335	333	331	329	327	325	323	321	Среднее давление
Давление, Па	-636	-593	-539	-477	-415	-356	-307	-270	-246	-231	-464,38

Таблица 3. Давление, действующее на третьем участке

Номер узла	320	318	316	314	312	310	308	306	304	302	196	Среднее давление
Давление, Па	-225	-214	-206	-200	-193	-185	-174	-161	-147	-137	-133	-179,55

представлены на рис. 9. На рисунке видно, что величины давлений плавно меняются по дуге. Для сравнения полученных результатов методом конечных элементов с рекомендациями СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» необходимо определить средние давления на каждом из трех заявленных участков. Результаты усреднений приведены в табл. 1-3.

Сравнительный анализ результатов расчета позволяет утверждать, что численные решения задачи обдува строительной конструкции моделированием позволяют получить более точные значения ветровых нагрузок любых геометрических форм и размеров, в том числе тех, которые не описаны в нормативных документах. Справедливости ради следует отметить и то, что этот путь получения более точных решений является и более трудоемким. Это связано с тем, что при моделировании используются

твердотельные конечные элементы, нагрузки с которых на металлический каркас следует переносить вручную. Правда, по словам разработчиков, подготовлена 16-я версия APM Multiphysics, выпуск которой планируется на лето 2018 года, в которой операцию перехода от ветрового давления к прочностному анализу можно будет выполнить в автоматизированном режиме.

Выводы

Оценивая проделанную работу, можно сделать вывод, что модуль APM FGA имеет огромные перспективы при применении в процессе разработки временных строительных сооружений, но сегодня его применение требует большого объема ручных операций.

В качестве пожеланий для разработчиков APM FGA можно отметить, что потребительские свойства этого программного продукта существенно повысятся, если:

- соединить в одной расчетной модели как стержневую пластинчатую модель изделия, так и твердотельную модель окружающего воздуха таким образом, чтобы устранить ручной пересчет давлений на пластины и стержни конструкции;
- упростить процесс задания конечно-элементной сетки твердотельных элементов воздуха для минимизации количества элементов в сетке без ущерба точности расчета так, чтобы время расчета сократилось хотя бы на порядок;

- добавить функцию задания ветрового воздействия не только путем задания скорости ветра в зависимости от высоты, но и посредством обозначенных в СНиПе параметров: ветрового района и типа территории; учесть пульсационную составляющую воздействия на изделие.

И все-таки решение сложных задач становится более доступным! Дальнейшее развитие функциональности и удобства интерфейса модуля APM FGA дает возможность в будущем решать задачи любой сложности с максимальной точностью и скоростью. В дальнейшем, в случае успешного развития модуля, мы рассматриваем возможность сертификации данной методики и внесения ее в соответствующий СНиП, что позволит решать эти вопросы на законных основаниях не только инженерам MF Group, но и всей отрасли строителей временных сооружений бесфундаментного типа. ■