

Моделирование и исследование в **COMSOL** **Multiphysics** функциональных характеристик объектов социальной инфраструктуры

Рецензия эксперта на статью получена
11.11.2022 [The expert review of the article
was received on November 11, 2022]

Рост жилищного строительства в России вызвал активизацию спроса на социальную инфраструктуру, развитие которой стало в настоящее время одной из приоритетных задач государства [1]. К социальной инфраструктуре относятся объекты бытового обслуживания, досуговой занятости людей, их развития и поддержания здоровья, объекты образования, культуры, спорта, торговли. Однако строительство социальной инфраструктуры усложняется тем, что многие из них выполняются не по типовым проектам и формы их сложны и разнообразны. Значительная часть из них — объекты сезонного назначения (летние кафе и веранды ресторанов, торговые павильоны). Подобные сооружения выполняются, как правило, из современных лёгких и прочных материалов, что придаёт им эстетичный вид и привлекательность. Но в зимнее время эти объекты не выполняют свои функции по причине отсутствия отопления помещений. Постройки занимают городские площади, не принося прибыли.

Важной строительной задачей является превращение подобных объектов в объекты круглогодичного функционирования. То есть спроектировать или реконструировать их необходимо таким образом, чтобы в летний период они были приспособлены к обслуживанию человека на открытом воздухе, а в зимний период в данных помещениях поддерживалась комфортная температура. Однако обеспечение этих объектов эффективной отопительной системой также является сложной задачей. Вызвано это тем, что оригинальные формы стен, окон и крыши требуют предварительного индивидуального исследования энергетических потерь через ограждающие конструкции объекта

В настоящее время в России места размещения и виды конструктивных форм объектов социальной инфраструктуры учитываются и при разработке технологии информационного моделирования в строительстве — BIM-технологии

в зимний период от совместного действия наружной отрицательной температуры и ветровых потоков на элементы сложной формы. Иначе некоторые зоны стен и перекрытия помещений могут отпотевать или даже промерзать, создавая некомфортные условия для посетителей и обслуживающего персонала.

В настоящее время места размещения и виды конструктивных форм объектов социальной инфраструктуры учитываются и при разработке технологии информационного моделирования в строительстве (BIM), так как при создании архитектуры улиц и проектировании комплекса строящихся зданий они зачастую играют важную роль в общем ансамбле района или города. Одна из основных задач генерального плана города и любого поселения заключается в создании комфортной среды для жителей, поэтому эти объекты должны тесно увязываться с окружающим пространством улиц и площадей. При этом проектировщики обязательно учитывают природные условия, такие как направление и силу ветра, то есть характеристики поля течения воздушных потоков в зонах застройки жилых домов и в расположении объектов социального назначения, непосредственно влияющие на комфортность обслуживания населения и надёжность эксплуатации.

УДК 725.949. Научная специальность: 05.23.03 (2.1.3).

Моделирование и исследование в **COMSOL Multiphysics** функциональных характеристик объектов социальной инфраструктуры

В. А. Сучилин, д.т.н., профессор; **А. С. Кочетков**, старший преподаватель; **Н. Н. Губанов**, старший преподаватель, [Российский государственный университет туризма и сервиса](#) (РГУТиС, дп. Черкизово Московской области)

Рост жилищного строительства вызвал активизацию спроса на социальную инфраструктуру, в которую входят, например, объекты, формирующие комфортность среды места пребывания человека. На основании изучения современной городской социальной инфраструктуры сделаны выводы, что номенклатура их может быть значительно расширена за счёт применения при разработке конструктивных видов известных в научных изданиях многочисленных форм аналитических поверхностей. Сооружения на их основе могут выполняться из современных лёгких и прочных материалов, что придаст им эстетичный вид и гармоничность с окружающей средой. Моделирование проблем энергосбережения и шумопоглощения данных объектов при ветровых нагрузках выполнено в ПО **COMSOL Multiphysics**.

Ключевые слова: социальная инфраструктура, аналитические поверхности, свойства объектов из оболочек, ветровые нагрузки, энергосбережение, вибрация, частотные характеристики, надёжность, метод крупных вихрей, моделирование в **COMSOL Multiphysics**.

UDC 725.949. Scientific specialty number: 05.23.03 (2.1.3).

Modeling and research in **COMSOL Multiphysics** of the functional characteristics of social infrastructure facilities

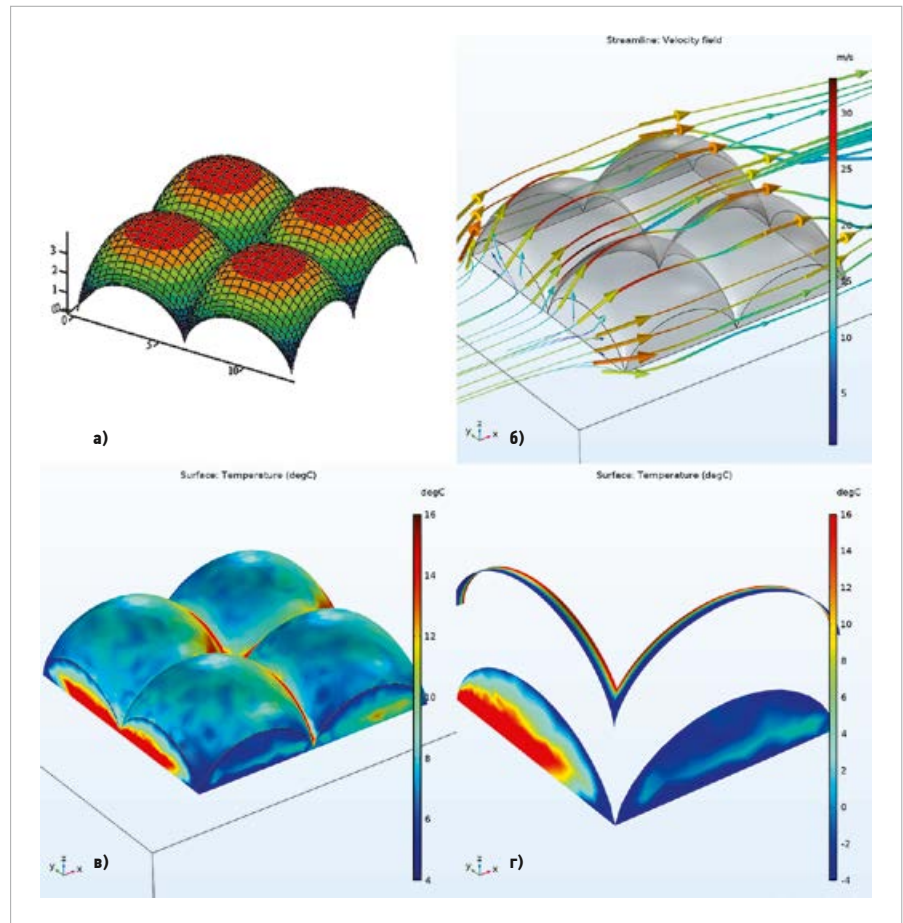
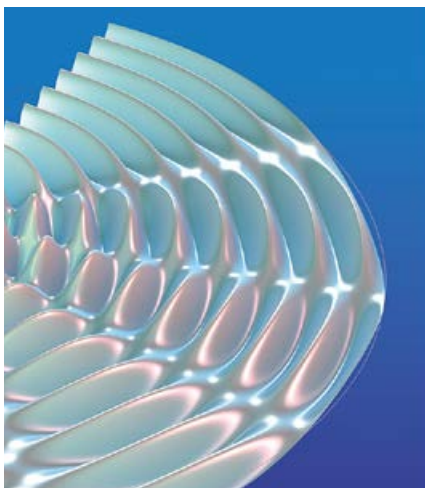
V. A. Suchilin, Doctor of Technical Sciences, Professor; **A. S. Kochetkov**, senior lecturer; **N. N. Gubanov**, senior lecturer, [Russian State University of Tourism and Service](#) (RGUTIS, dp. Cherkizovo, Moscow region)

The growth of housing construction caused the intensification of demand for social infrastructure, which includes, for example, facilities that form the comfort of the environment of a person's stay. Based on the study of the modern city social infrastructure, conclusions have been made that their nomenclature can be significantly expanded due to the use in the development of constructive types of numerous forms of analytical surfaces known in scientific publications. Structures based on them can be made of modern light and durable materials, which will give them aesthetic appearance and harmony with the environment. Modeling the problems of energy conservation and noise absorption of these facilities during wind loads is made in the **COMSOL Multiphysics**.

Key words: social infrastructure, analytical surfaces, properties of shell objects, wind loads, energy saving, vibration, frequency characteristics, dependability, the large eddy simulation method, modeling in **COMSOL Multiphysics**.

Номенклатура объектов социального назначения может быть значительно расширена, например, за счёт применения при разработке конструкций многочисленных известных форм аналитических поверхностей, которые уже систематизированы по видам поверхностей и классифицированы по соответствующим группам применения в научных изданиях и справочниках [2, 3]. Сооружения на их основе могут выполняться из лёгких и прочных материалов, в частности, из алюминиевых сплавов, полимерных материалов или многослойных ламинатов в различных сочетаниях, что придаст им высокий уровень эстетичности и гармоничность с окружающей средой.

Анализ широко представленных в литературе аналитических поверхностей позволил выделить из них ряд форм, перспективных для городской социальной инфраструктуры, и задал направление дальнейшего углублённого математического моделирования для исследования конструктивных решений, отвечающих новым функциональным требованиям реальных объектов. Цифровое представление аналитических поверхностей — это практически компьютерная модель реального объекта или, в полном смысле, его цифровой двойник [4, 5], который может воспроизводить состояние объекта как на стадиях разработки и производства, так и в процессе эксплуатации объекта, при условии оснащения его соответствующими датчиками, что позволяет прогнозировать поведение объекта в реальных условиях обслуживания, верифицировать результаты взаимодействия его с окружающей средой, а после дополнительных конструктивных проработок (добавление опорных фундаментов, подкрепляющего каркаса и других элементов) проводить корректировку с целью использования в соответствующих областях городской инфраструктуры.



•• Рис. 1. Геометрия и функциональные характеристики энергозащищённости объекта в зимний период [а — циклоидальная поверхность переноса; б — линии поля скорости воздушного потока вблизи поверхности модели; в — распределение температуры в среднем сечении теплозащитных блоков; г — то же для двух теплозащитных блоков и тепловых мостов]

Необходимо отметить, что некоторые формы аналитических поверхностей уже воплощены в реальных конструкциях, главным образом за рубежом, в виде выставочных и хозяйственных павильонов различного назначения в городской инфраструктуре, придорожных кафе и других подобных объектов [6]. В то же время с развитием современных компьютерных программ и применением новых строительных материалов появляются и новые возможности при моделировании и более глубоком анализе взаимосвязей формы, прочности и эргономичности сооружений.

Исследуемая модель и результаты

В статье как пример показана только одна форма трёхмерной аналитической поверхности: циклоидальная поверхность переноса, ранее рассматривавшаяся как модель каркасного объекта типа малой архитектурной формы (МДФ) в системе Mathcad [7], где приведено её математическое выражение и функциональное описание как возможной новой формы объекта городской инфраструктуры. Параметрическая форма задания поверхности:

$$\begin{aligned}x &= a[t + \sin(t) + \pi], \\y &= b[u + \sin(u) + \pi], \\z &= c[1 + \cos(t)] + d[1 + \cos(u)],\end{aligned}$$

где a, b, c и d — размерные параметры.

В данной модели $a = b = c = d = 0,79577$, что даёт габариты объекта параметрической архитектуры в плане 10×10 м.

Геометрия и функциональные характеристики объекта в зимний период представлены на рис. 1, где показан внешний вид данной аналитической поверхности. В таком виде конструкция, созданная на её основе, представляет собой летний вариант объекта (торгового павильона или летнего кафе на открытом воздухе).

В зимнем варианте объект дополняется утепляющими блоками, которые заполняют восемь открытых проёмов в стенах конструкции и четыре куполообразных полости под крышей. Положение окон и входных дверей в стенных блоках не указано и в тепловых расчётах не учитывалось. Боковая поверхность каждого стенного блока имеет образующую в виде одной ветви циклоиды. В этой модели теплоизоляционный слой блока (0,25 м) скреплён для прочности по боковой стороне стальной лентой толщиной 1 мм (геометрические размеры модели могут не совпадать с размерами реального объекта). Тем самым создаётся конструкция типа теплового моста, состоящего из внутренней тёплой стены помещения, слоя теплоизоляции, отделяющей её от внешней среды, и стальной ленты, их соединяющей.

Задача совместного влияния тепла и влажности на функционирование строительных конструкций в виде теплового моста решалась в [8] с помощью интерфейса Heat Transfer in Building Materials. В данной статье конвективный теплообмен в неизотермическом турбулентном потоке моделируется как два последовательных этапа решения в интерфейсах Turbulent Flow, k - ϵ и Heat Transfer in Fluids.

На первом этапе задаётся скорость ветра $U = 20$ м/с, что соответствует турбулентному течению при высокой плотности потоков воздуха. При аэродинамическом анализе объектов сложной формы требуется получить корректные начальные условия моделирования.

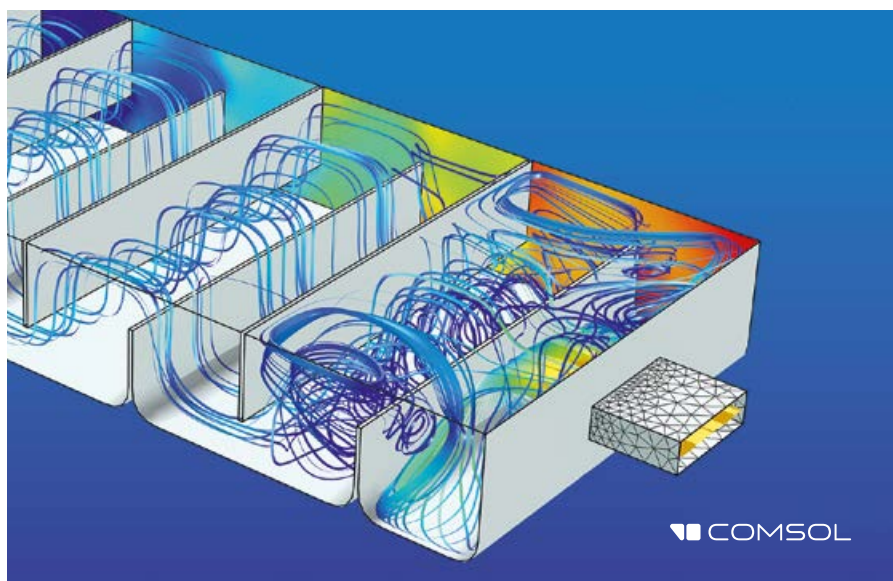
Для этого, согласно методике [9], нужно решить уравнение Лапласа для потенциального течения потоков воздуха. Далее полученное решение используется в качестве начальных условий для осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса (RANS). Расчётная область должна быть достаточно большой, чтобы поставить граничные условия для скорости ветра и давления на внешних границах. Воздушный домен в данной модели имеет размеры $90 \times 40 \times 10$ м.

В данной статье конвективный теплообмен в неизотермическом турбулентном потоке моделируется как два последовательных этапа решения в интерфейсах Turbulent Flow, k - ϵ и Heat Transfer in Fluids

На рис. 1б показана область течения воздушного потока в зоне расположения объекта. Цвет линий поля скорости соответствует средней скорости потока, а толщина пропорциональна кинетической энергии турбулентности k . Видно, что воздушный поток, обтекая модель, изменяет скорость и направление движения неравномерно. Сталкиваясь с фронтальной поверхностью, поток резко тормозится и изменяет направление, энергия турбулентности растёт. Над верхней поверхностью скорость потока увеличивается до 30 м/с, но энергия турбулентности уменьшается, течение становится однородным, вихри не образуются. Огибая боковую поверхность, течение замедляется, линии потока выпрямляются, что обеспечивает более длительный и плотный контакт потока холодного воздуха с поверхностью объекта. Следовательно, можно ожидать интенсивного остывания именно боковых поверхностей объекта.

Видно, что в целом течение воздушных потоков не становится вихревым вблизи поверхности модели, что обусловлено хорошей аэродинамической формой объекта в зимний период, то есть с закрытыми стенными проёмами.

На втором этапе решается стационарное уравнение теплообмена для тепловых мостов, образованных блоками утеплителя. Теплопроводность теплоизоляционного материала 0,032 Вт/(м·К), теплопроводность стальной ленты 50 Вт/(м·К), температура наружного воздуха -10°C , температура воздуха в помещении 20°C (источник тепла не указывается). Функциональные характеристики энергозащитности объекта показаны на рис. 1в-г.



На рис. 1в приведено распределение температуры в среднем сечении теплозащитных блоков (0,125 м от внешней поверхности). Видно, что передние блоки удерживают тепло лучше: от 4 до 16°C в среднем сечении, причём зона нагрева смещена вниз и к середине от внешних кромок объекта. Блоки под крышей на боковой части среднего сечения удерживают температуру от 6 до 10°C , но в угловой зоне ниже: до 4°C , а в центре выше: около 16°C . Боковые блоки остывают интенсивнее: на двух блоках справа температура в среднем сечении от 4 до 8°C , причём небольшая зона нагрева до 12°C смещена от фронтальной поверхности модели и сосредоточена в середине второго блока. Таким образом, энергозащитность объекта неравномерна для передней, верхней и боковой поверхности и требует доработки.

На рис. 1г показано распределение температуры в среднем сечении двух теплозащитных блоков, контактирующих по углу, и поверхностях связанных с ними тепло-

вых мостов. Видно, что вблизи внешней кромки, где находится стальная лента, температура в среднем сечении обоих блоков намного ниже, чем в средней зоне: до -6°C . Такое же резкое уменьшение температуры в направлении внешней поверхности на самой кромке. Это вызвано повышенной теплоотдачей стальной ленты по всей длине кромки, что приводит к потерям тепловой энергии в тепловом мосте. Это говорит о его слабой энергозащитности и также требует доработки. Например, стальную ленту можно заменить на полимерную или армированную полимерным материалом.

Дальнейшее исследование функциональных характеристик данного объек-

та связано с его летним вариантом, когда модель представляет собой поверхность без дополнительных блоков. Для оболочки, выполненной из алюминиевого сплава, требуется провести аэродинамическое моделирование воздействующих на неё воздушных потоков и исследование её функциональных характеристик, а также предложить инженерную проработку параметров объекта. Очевидно, что при той же скорости ветра $U = 20$ м/с параметры воздушных потоков в зоне летнего объекта будут другими.

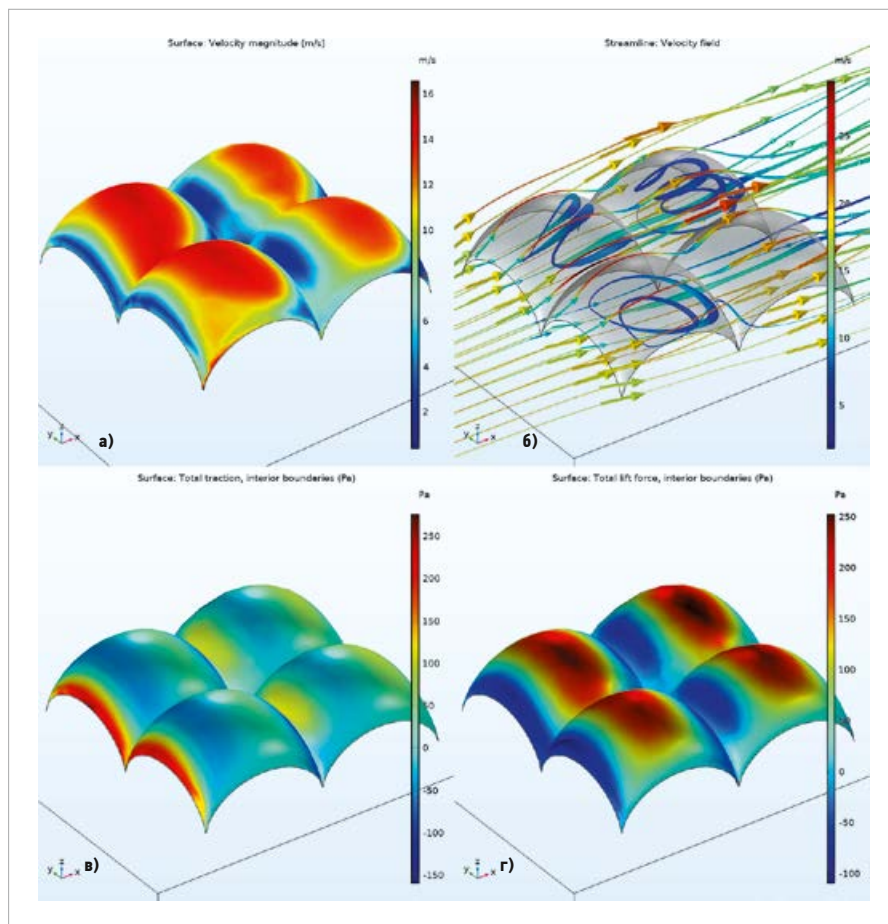
В связи с тем, что конструкция планируется облегчённой (перекрытие в виде оболочки из алюминиевого сплава с дальнейшим креплением её на каркасе из тонкостенных труб), предполагается под действием высоких скоростей ветровых потоков появление вибрации, вызывающей неприятные звуковые ощущения. Важным фактором, определяющим уровень вибраций при высоких скоростях воздушных потоков, являются аэродинамические характеристики формы перекрытия.

Выполнив расчёт скорости ветровых потоков и давления воздуха, обтекающего поверхность, можно затем провести вибрационный анализ и оценить нагрузки на поверхностных элементах. В рамках такого анализа важно определить также амплитуду действующих в воздушном потоке колебаний и их частоту. Это обуславливает применение метода крупных вихрей (LES) [9–11] для расчёта аэродинамических сил, действующих на конструктивные элементы поверхности. Основная идея LES заключается в формальном математическом разделении крупных и мелких вихревых структур посредством фильтрации. По сравнению с методами прямого численного моделирования турбулентности LES требует меньших вычислительных ресурсов, поскольку исключает прямой расчёт мелких вихрей.

Преимущество метода LES заключается в том, что он позволяет довольно точно смоделировать силовые пульсации в потоке воздуха. Это означает, что можно рассчитать нестационарные силы, действующие на оболочку, провести прочностной анализ элементов конструкции и выделить проблемные участки. Затем с помощью быстрого преобразования Фурье перевести пульсирующие нагрузки в частотную область, осуществить моделирование в выделенных локальных областях поверхности и проанализировать их собственные частоты и колебания, возбуждаемые приложенными ветровыми нагрузками. Таким образом, можно оценить риск возникновения резонансных явлений и повышенной вибрации поверхности перекрытия конструкции объекта, что позволит провести прогноз по оптимальной конструкции подкрепляющего каркаса и способа крепления облегчённой поверхности (в данном случае из алюминиевого сплава).

На первом этапе проводилось моделирование и расчёт полей скорости и давления в окружающем воздушном домене для безотрывного и стационарного режима обтекания поверхности. Такая задача решается в интерфейсе Turbulent Flow, $k-\epsilon$.

Воздушный домен имеет размеры $90 \times 40 \times 10$ м. Поверхность без подкрепляющего каркаса рассматривается как его внутренняя граница. На рис. 2 показаны результаты расчёта движения воздушных потоков в этой области и обтекания ими элементов поверхности. Средняя скорость воздушного потока на верхней поверхности модели представлена на рис. 2а. Видно, что при обтекании объекта поток движется очень неравномерно: резко замедляется до 5 м/с на передней кромке, затем ускоряется выше 25 м/с над пер-



• • Рис. 2. Результаты стационарного аэродинамического расчёта [а — средняя скорость воздушного потока вблизи поверхности модели; б — линии поля скорости воздушного потока вблизи поверхности модели; в — распределение давления фронтальной силы ветрового напора; г — распределение давления подъёмной силы ветра]

вым куполом, и то же явление повторяется с меньшей разницей скоростей над вторым куполом. Такой характер движения потока приводит к неравномерности давления на внешней и внутренней поверхностях объекта.

На рис. 2б показана область течения воздушного потока вблизи поверхности объекта. Цвет линий поля скорости соответствует средней скорости потока, а толщина пропорциональна кинетической энергии турбулентности k . Видно, что воздушный поток, обтекающий модель, изменяет скорость и направление движения неравномерно: над внешней поверхностью скорость отдельных струй увеличивается, а под внутренней поверхностью уменьшается. Поток замедляется, но становится более вихреобразным, и кинетическая энергия турбулентности растёт. При этом давление на внешней и внутренней поверхности изменяется неравномерно. В составе ветровой нагрузки на поверхность модели можно выделить фронтальную силу ветрового напора в направлении оси Ox и подъёмную силу в направлении оси Oz . Рост давления на внешней поверхности создаёт фронтальный напор воздушного потока, а увеличение давления на внутренней поверхности приводит к образованию подъёмной

силы. Видно, что более вихревым течение воздушных потоков становится вблизи кромок элементов поверхности. В этих зонах могут возникать значительные деформации материала оболочки объекта.

На рис. 2в распределение давления фронтальной силы ветрового напора имеет выраженную область максимума на передней кромке поверхности до 275 Па. Аналогично на рис. 2г распределение давления подъёмной силы ветра показывает наибольшие значения (до 252 Па) на верхней зоне поверхности. Кроме того, огибающие струи с высокой энергией турбулентности k по внешней поверхности оболочки и круговые вихри с внутренней будут оказывать неравномерное давление на отдельные зоны поверхности, что вызовет напряжённое состояние в оболочке при совместном действии фронтального давления потока и подъёмной силы и может привести к смещению оболочки с подкрепляющего каркаса. При этом сила ветрового напора составляет всего 1549 Н, а подъёмная сила 9093 Н. Были также найдены коэффициент лобового сопротивления $C_D = 0,1$ и коэффициент подъёмной силы $C_L = 0,6$. Таким образом, под действием ветра опрокидывание конструкции более вероятно, чем горизонтальное смещение.

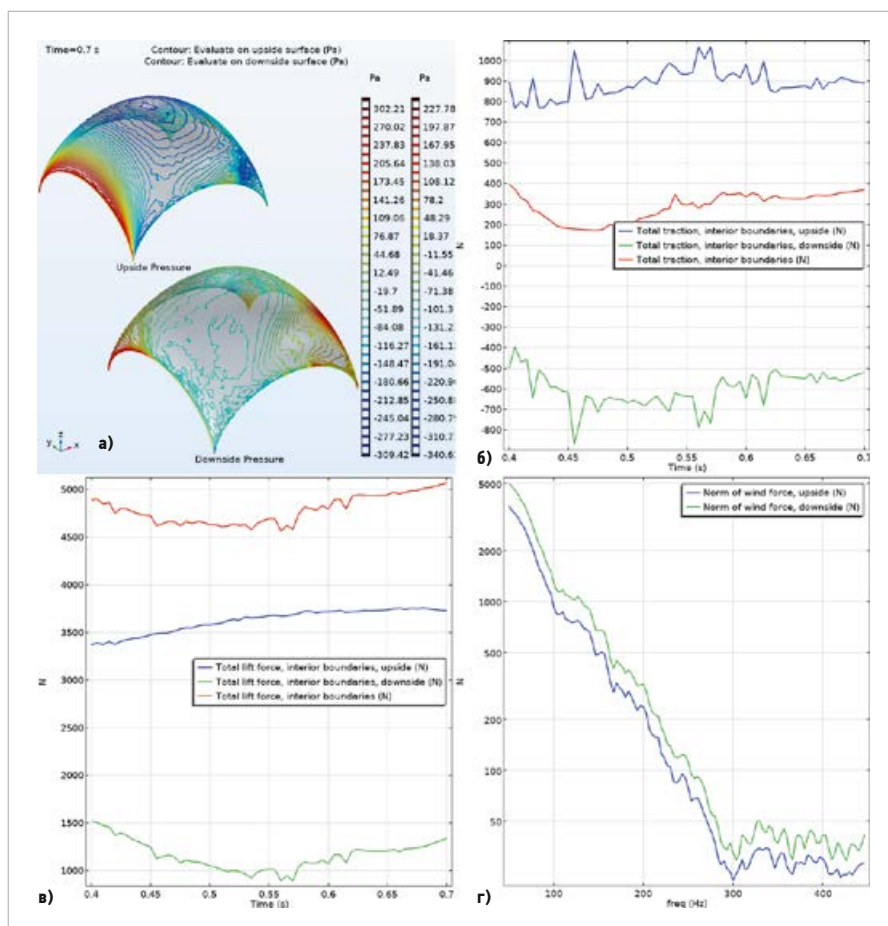


Рис. 3. Результаты аэродинамического расчёта во временном и частотном интервалах [а — линии изобар на внутренней и внешней поверхностях (0,7 с); б — величины фронтальной силы ветрового напора на внешней и внутренней поверхностях и суммарной силы в зависимости от времени; в — то же для подъёмной силы; г — величины нормализованных полных сил, действующих на внешнюю и внутреннюю поверхности в зависимости от частоты]

На втором этапе результаты стационарного RANS-моделирования используются в качестве начальных условий для метода LES во временной области. Как следует из результатов первого этапа, деформации элементов поверхности будут выше вблизи её кромок. Поэтому для сокращения расчётного времени достаточно провести исследование для части поверхности, включающей кромку. Моделиро-

Надёжные результаты во временной области можно получить только при выполнении моделирования в течение длительного времени

валось воздействие ветрового потока со скоростью $U = 20$ м/с на 1/4 часть оболочки в течение 0,7 с. Стабилизация течения наступает, когда воздушный поток проходит 8 м со скоростью 20 м/с и достигает передней кромки поверхности. Детальное моделирование с шагом 0,005 с выполнено на интервале от 0,4 до 0,7 с. Результаты воздействия воздушных потоков на фрагмент оболочки во временном и частотном интервалах показаны на рис. 3.

На рис. 3а показано распределение давления воздуха в момент времени 0,7 с на внутренней (справа внизу) и внешней (слева вверху) поверхности оболочки представлено линиями изобар. Хорошо видно, что со стороны набегающего потока на внешней фронтальной кромке возникает зона повышенного давления воздуха до 320 Па, а на внутренней кромке при вихревом движении воздуха давление уменьшается вдоль кромки слева направо от положительного (около 100 Па) до отрицательного (около -100 Па). Аналогично на верхней области внешней поверхности давление явно пониженное до -350 Па, а на внутренней распределение имеет неоднородный характер. Таким образом, силовые пульсации в воздушном потоке возникают преимущественно на внутренней поверхности.

Силы ветрового напора, действующие на конструкцию, являются алгебраической суммой сил, действующих на внутреннюю и внешнюю поверхность оболочки. На рис. 3б показаны величины фронтальной силы ветрового напора на внешней поверхности (синяя линия), внутренней поверхности (зелёная линия) и суммарной силы (красная линия) в зависимости от времени. Видно, что сила

на внешней поверхности положительна, а на внутренней отрицательна, что соответствует характеру движения воздушных потоков вблизи поверхности объекта (рис. 2а) и рис. 3а. Величина суммарной силы в каждый момент времени меньше, чем оба слагаемых по абсолютной величине, а её график имеет меньше особенностей с меньшей амплитудой пульсаций, чем их графики, так как при сложении многочисленных локальные экстремумы на графиках внешней и внутренней сил компенсируют друг друга.

На рис. 3в показаны величины подъёмной силы на внешней поверхности (синяя линия), внутренней поверхности (зелёная) и суммарной силы (красная) в зависимости от времени. Здесь силы на внешней и на внутренней поверхности положительны, что соответствует распределению давления на рис. 3а. Таким образом, величина суммарной силы в каждый момент времени больше, чем оба слагаемых, а её график имеет многочисленные явно выраженные особенности, причём происхождение этих пульсаций по-прежнему связано с внутренней поверхностью.

Целью моделирования является прочностной анализ элементов конструкции объекта, но из-за случайного характера нагрузки надёжные результаты во временной области можно получить только при выполнении моделирования в течение длительного времени. Поэтому согласно методике [11] на третьем этапе данные о колебании сил в воздушном потоке на интервале от 0,4 до 0,7 с, где решения наиболее детализированы, переносятся из временной области в частотную с помощью быстрого преобразования Фурье. Поскольку делается выборка с периодом 0,3 с, разрешение в частотной области составит 3,33 Гц.

На рис. 3г даны графики величин нормализованных полных сил, действующих на внешнюю и внутреннюю поверхности оболочки в диапазоне частот 50–450 Гц. Видно, что на всем интервале полная сила на внутренней поверхности больше, чем на внешней. На участке до частоты 270 Гц обе силы быстро убывают с практически одинаковыми пульсациями и с небольшими пиками на частотах 110, 125 и 200 Гц. Интервал частот выше 270 Гц характеризуется интенсивными колебаниями обеих сил с многочисленными пиками, но пульсации полной силы на внутренней поверхности отстают по частоте от пульсаций на внешней, причём последние происходят чаще и с большей амплитудой. Если пиковые частоты совпадают с собственными частотами конструкции, существует риск резонанса.

После переноса данных о пульсациях сил в потоке воздуха в частотную область можно использовать их для вычисления нагрузок на кромки поверхности. На четвёртом этапе в интерфейсе Shell рассматривается оболочка из алюминиевого сплава толщиной 1,2 мм и в исследовании Eigenfrequency определяется спектр её собственных частот. Граничные условия задачи состоят в фиксации точек опоры конструкции на поверхности земли. В исследовании Frequency Domain, Modal расчёт проводится в частотной области с возбуждением от ветровой нагрузки, причём силы, действующие на внешнюю и на внутреннюю стороны поверхности, задаются отдельно. В системе предполагается демпфирование с коэффициентом гистерезисных потерь 0,03.

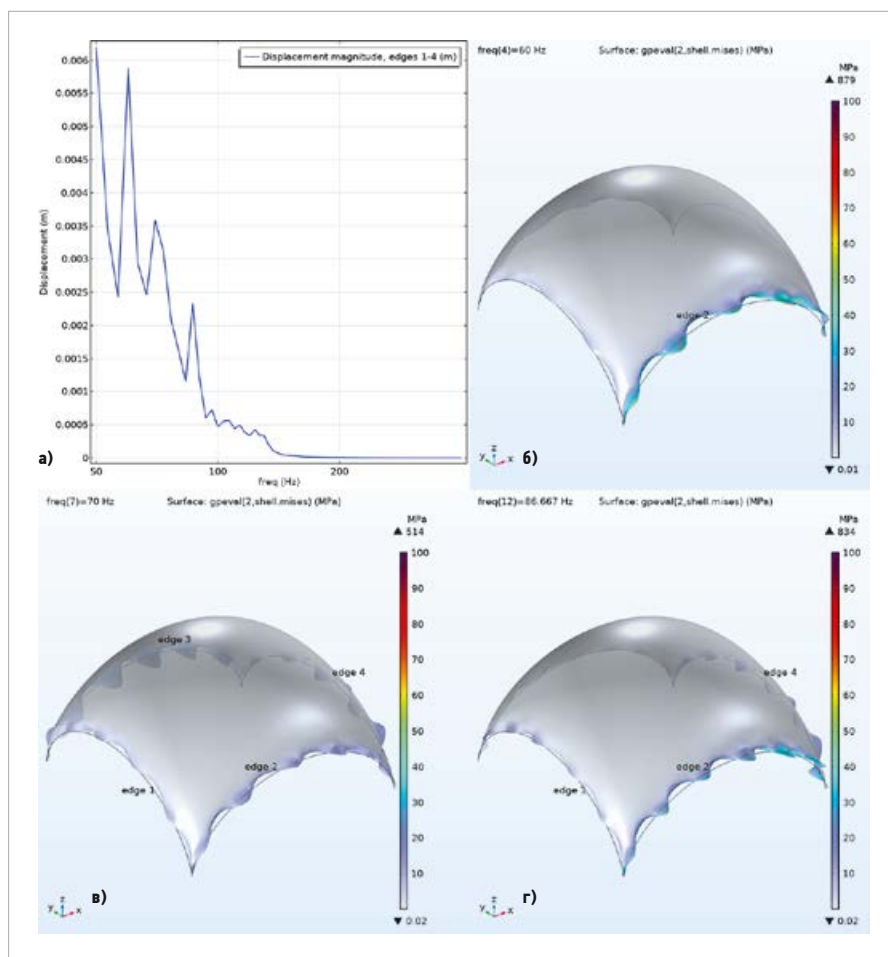
Результаты частотного отклика кромок оболочки на приложенные гармонические нагрузки показаны на рис. 4 для нескольких характерных частот. Чтобы определить эти характерные частоты, необходимо построить кривую частотного отклика для некоторого параметра системы. На этой кривой будут визуализированы пики, положение которых определяется ближайшими собственными резонансными частотами системы.

На рис. 4а дана кривая частотного отклика для средней величины смещения кромок под действием гармонической нагрузки. На кривой выделяются пики на 60, 70 и 86,67 Гц, которые соответствуют собственным частотам оболочки, найденным ранее. Итак, в системе определяются три первые моды, для которых можно провести анализ напряжений и деформаций кромок оболочки.

На рис. 4б показано распределение напряжения по Мизесу на кромках и деформация их в увеличенном масштабе для частоты 60 Гц. Видно, что напряжение сосредоточено преимущественно на кромке 2 с максимальным значением 50 МПа, и она же подвергается наибольшей деформации синусоидального типа с амплитудой до 5,7 мм. Остальные кромки практически не реагируют на гармоническую нагрузку на данной частоте.

Таким образом, стрессовая нагрузка распределена неравномерно и резонирует только кромка 2, что может привести к смещению оболочки с подкрепляющего каркаса.

На рис. 4в распределение напряжения по Мизесу при частоте 70 Гц заметно на всех кромках поверхности МАФ с максимумом около 40 МПа. Они получают значительные деформации синусоидального типа с амплитудой до 3,6 мм и будут колебаться с частотой, близкой к собственной.



• • Рис. 4. Результаты частотного отклика на приложенные гармонические нагрузки [а — кривая частотного отклика для средней величины смещения кромок; б — распределение напряжения по Мизесу на кромках и деформации (в увеличенном масштабе) для частоты 60 Гц; в — то же для частоты 70 Гц; г — то же для частоты 86,67 Гц]

Это означает, что скорее всего, кромки будут резонировать и издавать шум на этой частоте. Надо будет искать способ гашения таких колебаний, так как от этого зависит комфортность пребывания на объекте посетителей и обслуживающего персонала. Кроме того, эксплуатационная надёжность будет определяться усталостью материала оболочки, вызванной циклическим нагружением кромок поверхности.

На рис. 4г дано распределение напряжения по Мизесу для частоты 86,67 Гц. Оно проявляется на кромках 2 и 4, и в меньшей степени на кромке 1 с максимумом около 30 МПа. Амплитуда синусоидальных деформаций составляет до 2,3 мм. Неравномерность стрессовой нагрузки и в этом случае может привести к смещению оболочки. Резонанс кромок 2 и 4 также может вызвать нежелательный шум.

Частотный отклик кромок на ветровую нагрузку наблюдается с разной интенсивностью практически по всем краям поверхности. Однако эти локальные вибрации могут быть погашены при выполнении инженерной проработки

В целом можно заметить, что с каждой из мод собственных колебаний системы связаны резонансные явления на разных кромках оболочки и для их устранения требуются комплексные решения.

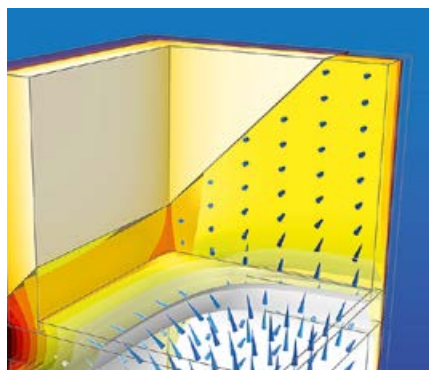
Таким образом, частотный отклик кромок на ветровую нагрузку наблюдается с разной интенсивностью практически по всем краям поверхности. Однако эти локальные вибрации могут быть погашены при выполнении инженерной проработки. Так, при соединении оболочки объекта с подкрепляющим каркасом необходимо кромки и всю поверхность закреплять, например, с помощью эпоксидного клея. Подкрепляющий каркас желательно выполнять облегчённым, например, из тонкостенных трубчатых элементов.

Следует отметить, что, в случае выполнения оболочки объекта из полимерных материалов, характеристики колебательных явлений в кромках поверхности будут другими. Например, возможны проявления краевого эффекта (расслоение ламината оболочки), следовательно, будут необходимы дополнительные исследования и рекомендации по способу устранения расслоения. Однако приведённая методика моделирования практически остаётся неизменной.

Заключение

1. Социальные архитектурные объекты, смоделированные по поверхностям, заданным аналитически, позволяют исследовать фундаментальные свойства объектов, их качественное поведение при эксплуатации, анализировать структурную параметризацию при расширении функционального ряда. Цифровое же представление аналитических поверхностей — это практически компьютерная модель реального объекта или, в полном смысле, цифровой двойник его, который может воспроизводить состояние объекта, как в условиях разработки и производства, так и в процессе эксплуатации. Наличие большого выбора разнообразных форм аналитических поверхностей может решить ряд эстетических и дизайнерских проблем городской архитектуры, коммунального хозяйства и сферы бытового обслуживания.

2. В данном исследовании выполнена комплексная оценка тепловой и ветровой защищённости предложенного социального объекта с использованием теплоизоляционных блоков с целью энергосбережения в зимний период эксплуатации. Получены подтверждения важности изучения подобных процессов, так как повышение энергосбережения помещений социальных объектов в период жизненного цикла, безусловно, отражается на эффективности в целом функционирования городской инфраструктуры в рамках технологии Building Energy Modeling (BEM).



3. При моделировании подобных объектов необходимо учитывать, что облегчённость элементов перекрытия конструкции априори предполагает появление вибрации в них под действием высоких скоростей ветровых потоков, приводящей к некомфортным звуковым ощущениям. Устранение подобных явлений является важной задачей. Известно, что уровень вибрации тонкостенных оболочек при высоких скоростях воздушных потоков зависит во многом от аэродинамических характеристик формы объекта. С помощью численного моделирования проведён аэродинамический расчёт потока воздуха, обтекающего поверхность объекта, методами RANS и LES.

4. Визуализация поля течения воздушных потоков вблизи поверхности исследуемого объекта подтверждает их турбулентный характер. Показано влияние скорости ветра на динамику внешней конвекции тепловых мостов объекта и их температурные характеристики в зимний период. В летний период эксплуатации объекта показано, что огибающие струи

с высокой энергией турбулентности по внешней поверхности оболочки и круговые вихри с внутренней будут оказывать неравномерное давление на отдельные зоны поверхности, что вызовет в них значительные деформации. Кроме того, под внутренней поверхностью воздушный поток замедляется, но становится более вихреобразным, и кинетическая энергия турбулентности растёт. Увеличение давления на внутренней поверхности приводит к образованию подъёмной силы, что может вызвать смещение оболочки. Необходимо предусмотреть способ крепления поверхности к укрепляющему каркасу.

5. Найдены собственные резонансные частоты колебаний элементов оболочки, по которым проведён анализ стрессового состояния и деформации кромок поверхности. Показано, что в турбулентном потоке воздуха кромки поверхности, выполненной из алюминиевого сплава, могут резонировать в определённом диапазоне частот и создавать неприятный звуковой эффект, делающий дискомфортным пребывание на объекте посетителей и обслуживающего персонала. Кроме того, цикличность деформации кромок поверхности объекта приведёт к их усталостному разрушению и снижению эксплуатационной надёжности. Дальнейшее исследование может быть связано с использованием полимерных материалов для оболочки поверхности, а также с разработкой подкрепляющего каркаса и способов крепления оболочки к нему. ●

1. Боровских О.Н. Особенности строительства объектов социальной инфраструктуры на современном этапе // Российское предпринимательство, 2015. Т. 16. №20. С. 3559–3568.
2. Кривошапко С.Н., Иванов В.Н., Халаби С.М. Аналитические поверхности: материалы по геометрии 500 поверхностей и информация к расчёту на прочность тонких оболочек: науч. издание. — М.: Наука, 2006. 536 с.
3. Кривошапко С.Н., Мамиева И.А. Аналитические поверхности в архитектуре зданий, конструкций и изделий: монография. — М.: Кн. дом «Либроком», 2012. 328 с.
4. Орельяна Урсуа И.О. Из истории развития BIM-технологий [Электр. текст]. Журнал СОК. Режим доступа: c-o-k.ru. Дата обращения: 26.10.2022.
5. Сучилин В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н. Моделирование и исследование в COMSOL Multiphysics динамических характеристик малых ветроэнергетических установок // Журнал СОК, 2022. №5. С. 70–76.
6. Мамиева И.А. Аналитические поверхности для параметрической архитектуры в современных зданиях и сооружениях // Academia. Архитектура и строительство, 2020. №1. С. 150–165.
7. Сучилин В.А., Тюменев Ю.Я. Моделирование малых архитектурных форм по аналитическим зависимостям // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы», 2014. №1 [Электр. текст]. Режим доступа: resources.today. Дата обращения: 26.10.2022.
8. Сучилин В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н. Моделирование в COMSOL Multiphysics энергосбережения типовых зданий ЖКХ при реконструкции и ремонте // Журнал СОК, 2020. №6. С. 44–50.
9. Ed Fontes. Simulating wind load on a sports car's side door and mirror. Web-source: comsol.com. Access date: October 26, 2022.
10. Large eddy simulation of a sports car. COMSOL Multiphysics User's Guide. Web-source: comsol.com. Access date: October 26, 2022.
11. Fluid-structure interaction on a sports car door. COMSOL Multiphysics User's Guide. Web-source: comsol.com. Access date: October 26, 2022.
12. S.N. Krivoschapko, V.N. Ivanov, S.M. Halabi. *Analyticheskie poverhnosti: materialy po geometrii 500 poverhnostej i informaciya k raschetu na prochnost' tonkih obolochek: nauch. izdanie* [Analytical surfaces: materials on geometry 500 surfaces and information for calculation for the strength of thin shells: A scientific publication]. Moscow. Izd-vo "Nauka" ["Nauka" Publishers]. 2006. 536 p. [In Russian]
13. S.N. Krivoschapko, I.A. Mamieva. *Analyticheskie poverhnosti v arhitekture zdaniy, konstrukcij i izdelij: monografija* [Analytical surfaces in the architecture of buildings, designs and products: A monograph]. Moscow. "Librokom" ["Librokom" Publishers]. 2012. 328 p. [In Russian]
14. I.O. Orel'jana Ursua. *Iz istorii razvitiya BIM-tehnologii* [From the history of the development of BIM-technologies]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. Web-source: c-o-k.ru. Access date: October 26, 2022. [In Russian]
15. V.A. Suchilin, A.S. Kochetkov, N.N. Gubanov. *Modelirovanie i issledovanie v COMSOL Multiphysics dinamiceskikh harakteristik malyh vetroenergeticheskikh ustanovok* [Modeling and research in COMSOL Multiphysics of the dynamic characteristics of small wind power plants]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2021. No. 4. Pp. 72–77. [In Russian]
16. I.A. Mamieva. *Analyticheskie poverhnosti dlja parametricheskoj arhitektury v sovremennykh zdaniyah i sooruzhenijah* [Analytical surfaces for parametric architecture in modern buildings and structures]. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo* ["Academia. Architecture and construction" Magazine]. 2020. No. 1. Pp. 150–165. [In Russian]
17. V.A. Suchilin, Ju. Ja. Tjumenev. *Modelirovanie malyh arhitekturnykh form po analiticheskim zavisimostjam* [Modeling small architectural forms by analytical dependencies] *Internet-zhurnal "Otdohy i resursy"* [Russian journal of resources, conservation and recycling]. 2014. Vol. 1. No. 1. Web-source: resources.today. Access date: October 26, 2022. [In Russian]
18. V.A. Suchilin, A.S. Kochetkov, N.N. Gubanov. *Modelirovanije v COMSOL Multiphysics jenergoberezenija tipovykh zdaniy ZhKH pri rekonstrukcii i remonte* [Modeling in COMSOL Multiphysics of energy saving of typical housing and communal services buildings during reconstruction and repair]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2020. No. 6. Pp. 44–50. [In Russian]
19. Ed Fontes. Simulating wind load on a sports car's side door and mirror. Web-source: comsol.com. Access date: October 26, 2022.
20. Large eddy simulation of a sports car. COMSOL Multiphysics User's Guide. Web-source: comsol.com. Access date: October 26, 2022.
21. Fluid-structure interaction on a sports car door. COMSOL Multiphysics User's Guide. Web-source: comsol.com. Access date: October 26, 2022.

REFERENCES

1. O.N. Borovskih. *Osobennosti stroitel'stva ob'ektov social'noj infrastruktury na sovremennoj etape* [Special aspects of social infrastructure facilities construction at the modern stage]. *Rossijskoe predprinimatel'stvo* [Russian Journal of Entrepreneurship]. 2015. Vol. 16. No. 20. Pp. 3559–3568. [In Russian]