УДК69.001.5

КОНСТРУИРОВАНИЕ БАШНИ ИЗ СПАГЕТТИ С ИНЖЕНЕРНЫМ ПОДХОДОМ

Лебедев Д.С., Венчакова В.В., Кабанов А.Н., Матвейчук В.В., Головкин А.В., Черемных С.В.

Тверской государственный технический университет (170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22), e-mail:lebedevdiman97@yandex.ru.

Статья посвящена экспериментальному определению геометрических и физических характеристик макаронных изделий, используемых при конструировании башни из стержневых элементов. Также была определена не только фактическая несущая способность стержней, но и их прогибы в пролетах, которые позволяют оценить прочностныеи деформативныесвойства материала.Кроме этого, в ходе исследования была установлена критическая нагрузка, при которой вертикальные элементы конструкции теряют устойчивость. В статье эмпирическимспособом определена наиболее оптимальная форма сечения башни из стержней, способных долгое время работать упруго под нагрузкой, не теряя устойчивость в различных плоскостях. С помощью программно-вычислительного комплекса SCAD была создана расчетная модель конструкции, определены усилия, действующие на конкретные элементы конструкции, а также внутренние усилия, возникающие в сечениях конечных элементов. По результатам нагруженияэафиксировано напряженно-деформированное состояние стержней, установлены фактические значения напряжений, вызванных сжимающими, изгибающими и крутящими нагрузками. Графическим анализом определенынаиболее нагруженные элементы конструкции согласно цветовой индикации, требующие усиления. Применив полученную теоретическую информацию на практике и обеспечив жесткость и устойчивость элементов конструкции, было выполнено строительство башни из макарон.

Ключевые слова:макаронные изделия, прочностные и деформативные характеристики, SCAD, модель, башня, сечение.

CONSTRUCTINGSPAGHETTI TOWERS ENGINEERING APPROACH

LebedevD. S.,Venchakova V. V., Kabanov A. N., Matveychuk V. V., Golovkin A.V., Cheremnykh S. V.

Tver State Technical University, (170026, Tver, qy. A. Nikitin, d. 22), e-mail:lebedevdiman97@yandex.ru.

The article is devoted to the experimental determination of the geometric and physical characteristics of pasta used in the construction of the tower of core elements. It was also determined not only the actual bearing capacity of the rods, but also their deflections in the spans, which allow to evaluate the strength and deformative properties of the material. In addition, during the study, a critical load was established, at which vertical structural elements lose their stability. The article empirically determined the most optimal shape of the tower section of rods that can work for a long time elastically under load without losing stability in various planes. With the help of the SCAD software complex, a computational model of the structure was created, the forces acting on the concrete elements of the structure, as well as the internal forces arising in the sections of finite elements were determined. According to the results of loading, the stress-strain state of the rods was fixed, the actual values of the stresses caused by compressive, bending and torsional loads were established. Graphic analysis identifies the most loaded structural elements according to the color indication, which require amplification. Applying the theoretical information obtained in practice and ensuring the rigidity and stability of the structural elements, the construction of a macaroni tower was carried out.

Keywords:pasta, strength and deformative characteristics, SCAD, model, tower, section.

В современном мире технологии строительства уже позволяют воплотить в жизнь проекты небоскребов из металлических конструкций. Любому осуществленному проекту высотных зданий, да и просто сооружению обычно предшествует расчетная схема и 3D модель, созданная в компьютерных программах, программно-вычислительных комплексах (ПВК), которые позволяют не только представить проектируемое строение в целом, но и детализировать его отдельные элементы.

Однако разработка моделей конструкций не ограничивается только автоматизированными программамипроектирования. В исключительных случаях при конструировании применяется

создание макета для особых сооружений, выделяющихся на фоне типовой застройки. Для макетирования могут применятьсяне только фактические материалы, уменьшенные до определенного размера, но и нестандартные, обладающие схожими характеристиками с реальными строительными материалами. Например, макетбудущей башни из металлических элементоввозможно выполнить изматериалов,работающих упруго под нагрузкой и имеющих пропорциональные размеры по длине и форме сечения элементов. Поскольку несущую способность, жесткость и устойчивость такого строения обеспечивают стержневые элементы, соединенные в узлах, то данный строительный материал, предположительно, могут заменить макаронные изделия. Кроме этого, в узлы стержней необходимо поместить скрепляющий материал, который будет обеспечивать пространственную жесткость и геометрическую неизменяемость всей конструкции. Данным требованиям удовлетворяет скульптурный пластилин.

При необходимости уточнения способности материала противостоять нагрузкам и потере устойчивости следует начать исследование с определения характеристик материала.Основными параметрами, определяющими форму и размеры сечений элементов, являются геометрические характеристики. На этапе инструментального исследования образцов были проведены измерения величин размеров материала.

Используя геометрические размеры, можно определить площадь и момент инерции полой трубы макаронного изделия, определяемые по формулам (1) и (2) соответственно [4].

$$F = \frac{\pi(d^2 - d_1^2)}{4}, (1)$$

где d - диаметр внешней поверхности полой трубы, см; d_1 - диаметр внутренней поверхности полой трубы, см;

$$I = \frac{\pi d^4}{64}(1 - (\frac{d_1}{d})^4). \qquad (2)$$

Геометрические характеристики единицы каждого вида представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Геометрические характеристики единицы макаронных изделий.

Производитель	Длина единицы, *см*	Диаметр внешний единицы d, *см*	Диаметр внутренний единицы d_1, *см*	Площадь поперечного сечения F, *см*^{2}	Момент инерции сечения макаронного изделия I, *мм*^{4}
«Barilla»	25,0	0,31	0,11	0,157	4,53

Параметры материала, характеризующие его строение, определяются физическими характеристиками. В процессе исследования была определена масса одного макаронного изделия. Расчетом получены объем и фактическая плотность исследуемых элементов. Объем полого трубчатого элемента можно определить по формуле (3).

$$V = FL, \qquad (3)$$

где L - длина образца, см.

Плотность материала может быть найдена из выражения (4)[5].

$$\rho = \frac{m}{v}, \quad (4)$$

где m - масса элемента, см.

Собственный вес определяется формулой (5).

$$P = mg, (5)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2;

Результаты эксперимента и расчетов представлены в таблице 2.Собственный вес одного изделия является сравнительно небольшим, что положительно сказывается на параметрах конструкции, поскольку большие нагрузки привели бы к утяжелению сооружения, что, в свою очередь, повлекло бы за собой укрепление основания.

Таблица 2 – Физические характеристики единицы каждого вида.

Производитель	Масса единицы *m*, *г*	Объем единицы *V*, *см*$^{.3}$	Плотность единицы ρ, $г/см^3$	Собственный вес*P*, *мН*
«Barilla»	2,5	3,925	0,64	24,5

Для того чтобы охарактеризовать любой материал по прочностным и деформативным свойствам, необходимо экспериментально определить его несущую способность и деформации под нагрузкой соответственно [2].Испытания макаронного изделия на изгиб с целью выявления деформативных характеристик велись по расчетной схеме, изображенной на рисунке 1.

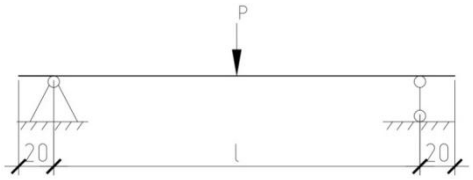


Рис. 1.Расчетная схема нагружения элементов макаронных изделий

Результаты, полученные в ходе данного эксперимента, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Определение прогибов единицы макаронных изделий.

Производитель макаронных изделий	Масса груза $m_{гр}$, г при количестве испытаний равных				Среднее Значение массы груза $m_{ср}$, г	Значение разрушающей силы P , Н	Прогиб в середине пролета l_1, см
	1	2	3	4			
«Barilla»	208	219	205	212	211	2,07	6,1

Испытания велись разрушающим методом посредством приложения вертикальной сосредоточенной нагрузки на центр пролета до появления трещин в макаронных изделиях в растянутой зоне и разрушения образца. Для наиболее точных измерений массы разрушающей нагрузки в качестве груза был принят сыпучий материал, который после разрушения образца взвешивался на электронных весах. При этом, в ходе эксперимента, была закреплена статично измерительная линейка для визуального контроля прогибов середины пролета. Величина предельного прогиба, данная в таблице 3, определялась по записи видеокамеры, установленной на момент эксперимента, путем сопоставления шкалы линейки и фактического прогиба образца из макарон.В ходе эксперимента было обнаружено, что «Barilla»под нагрузкой работает достаточно упруго, что оказывает на конструкцию положительное влияние, так как стержни в таком случае могут претерпевать деформации с последующим возвращением в положение равновесия без разрушения.

В ходе исследования были изучены прочностные характеристики макаронного изделия, которые определялись разрушающим методом путем одноосного сжатия единицы изделия сосредоточенной нагрузкой, приложенной к торцу элемента. Расчетная схема нагружения показана на рисунке 2.

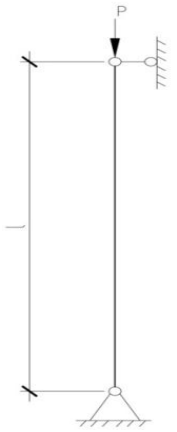


Рис. 2.Расчетная схема нагружения элемента сосредоточенной силой

Конструкция упруго работает до тех пор, пока вертикальные стержни не теряют устойчивость [1]. После этого момента все характеристики прочности материала резко снижаются. Нормальные напряжения, возникающие в момент потери устойчивости образца определяются по формуле (6):

$$\sigma_z = \frac{P_{кр}}{F_к}, \qquad (6)$$

где $P_{кр}$ – критическая нагрузка, приводящая к потери устойчивости образца; $F_к$ - площадь кольцевого сечениябразца.

Вычисленные нормальные напряжения занесеныв таблицу 4.

Таблица 4 – Определение несущей способности макаронных изделийпод действием сосредоточенной силы.

Производитель	Масса нагружения единицы изделия $m_{гр}$, *г*	Сила нагружения единицы изделия $P_{кр}$, *Н*	Напряжения в нормальных сечениях в момент потери устойчивости σ_z, *МПа*
Barilla	510	4,50	0,29

Получение экспериментальным путем критической силы, действующей на один стержень,позволяет определить нагрузку, которую способны нести несколько стержней у основания, тем самым становится возможным расчет массы конструкции, смонтированной выше рассматриваемых стержней.

Конструирование башни ведется из предположения, что макаронные стержни играют роль прокатных металлических элементов, а роль металлических фасонок играет пластилин, на который крепятся концы конечных элементов.

После проведения многократных опытных исследований была получена форма сечения башни из макаронных изделий, которая являлась жестким диском и соединялась в 12 точках в одной плоскости из горизонтальных стержней. Сечение представляет собой верхние грани треуголных призм, перекрещивающиеся между собой.

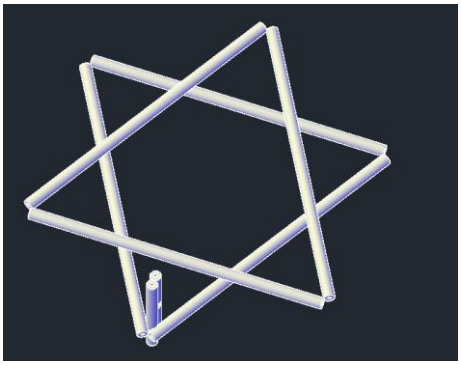
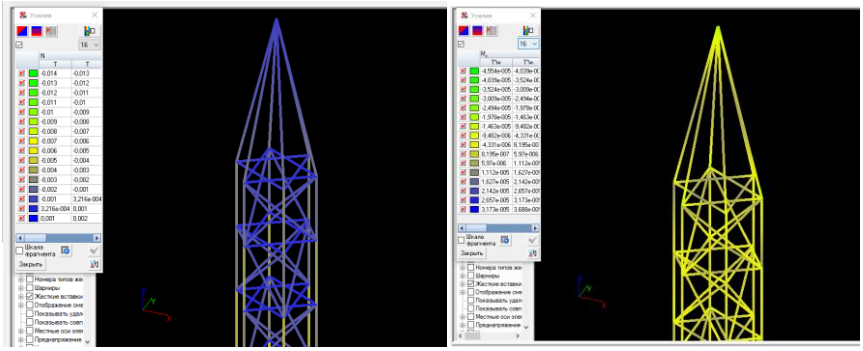


Рис.3. Схема сечения башни

Эмпирическим методом определено, что такая конструкция в объемном виде хорошо противостоит сжимающим нагрузкам, крутящим моментам и нагрузкам, вызывающим потерю устойчивости. Опытным путем было определено также, что наилучшим конструктивным методом, а также методом возведения является принцип «монолитного строительства». Его суть состоит в том, что сначала выполняетсяфундамент, затем на нем устраиваются неразрезные стойки, к которым прикрепляются горизонтальные элементы и связываются между собой. Далее на шести гранях конструкции устраиваются связи перекрестного типа для обеспечения пространственной жесткости сооружения.

Для расчета и анализа напряженного состояния стержней модели, полученной эмпирическим методом, воспользуемся программой SCAD[3].

Из рисунка 4 видно, что при условии нагружения стержней только от собственного веса элементы в верхней части башни практически не испытывают сжимающих и изгибающих усилий, в то время как стержни на нижнем ярусе (рисунок 6) значительно сжаты, поскольку нижние стержни несут нагрузку от всех элементов, расположенных выше них самих. Также на рис. 6 видно, что горизонтальные стержни не испытывают перегрузок и устроены конструктивно для связи стоек между собой и исключения их чрезмерных деформаций в случае возможной потери устойчивости.Крестообразные связи установлены конструктивно.

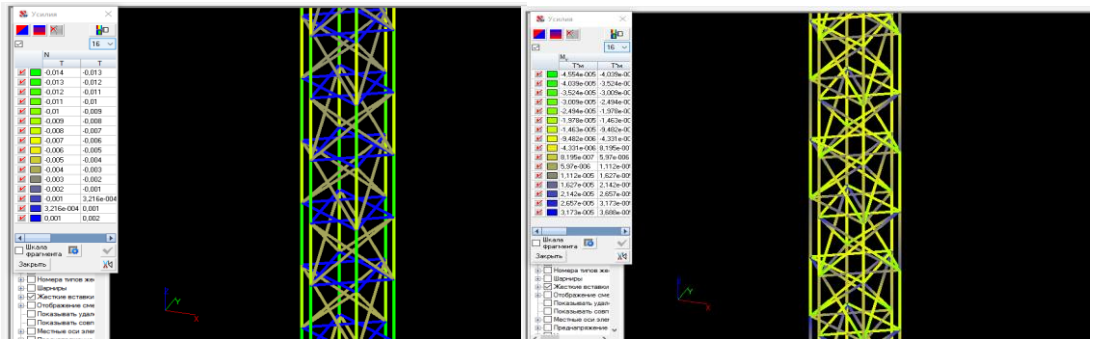


а б

Рис. 4.(а) - нормальные усилия в стержнях в верхней части башни; (б) - изгибающие усилия в стержнях в верхней части башни

Исходя из графического анализа можно сделать вывод, что конструкция в данной части модернизации и усиления не требует.

Рассмотрим стержни средней части башни. Они показаны на рисунке 5.



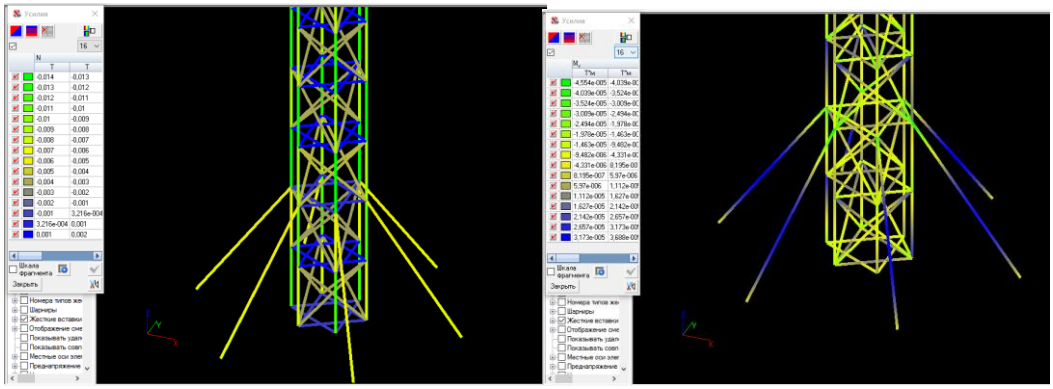
а б

Рис. 5.(а) - нормальные усилия в стержнях в средней части башни; (б) - изгибающие усилия в стержнях в средней части башни

Горизонтальные элементы (пояса) башни также остаются не задействованными с точки зрения воприятия растягивающих, сжимающих и изгибающих усилий. Усилия в стойках заметно увеличились по сравнению с верхней частью башни. Они держат стержни, расположенные выше. Изгибающие усилия также увеличились, потому что в центре пролета при рассмотрении стойки как неразрезной балки велика вероятность потери устойчивости стержня. Крестообразные связи уже включились в работу. Но, поскольку кроме собственного веса, конструкция других нагрузок не несет, а также усилия в стержнях в данной части башни не исытывают максимальных напряжений, то конструкцию средней части башни также оставляем без изменений.

Рассмотрим нижнюю часть башни. Здесь вертикальные стойки испытывают максимальные сжимающие усилия. Важна роль и связей, которые главным образом предохраняют стойки от потери устойчивости, но еще и распределяют внутри себя сжимающие напряжения. Максимальные изгибающие моменты испытывают подпорные наклонные элементы и стойки в нижней части, потому как в случае отклонения башни от вертикали, они изгибаются, что и видно

на рис. 6. Эти элементы однозначно требуют усиления, поскольку выбранный материал хоть и достаточно упругок, но склонен к деформациям.



а б

Рис. 6. (а) - нормальные усилия в стержнях в нижней части башни; (б) - изгибающие усилия в стержнях в нижней части башни

Некоторые характеристики, такие как коэффициент линейного расширения, изгибная, линейная, сдвиговая и крутильная жесткости, размеры ядра сечения определить невозможно в виду отсутствия фиксирующего оборудования, поэтому назначить сечение с «макаронными» характеристиками в ПВК не представляется возможным. Можно лишь проанализировать и спрогнозировать, как поведет себя констуркция, выбрав произвольное сечение в SCADe. Приняв сечение наклонных раскосов и вертикальных стоек из двух макаронин, рассчитаем примерный вес башни (таблица 6) и проанализируем, достаточным ли будет принятое сечение максимально нагруженных элементов.

Таблица 6 – Определение веса констуркции.

Суммарная длина элементов на 1 ярусе, *см*	Коли-чество ярусов, *шт.*	Суммарная длина элементов оголовка башни, *см*	Длина наклонных раскосов у основания	Масса скульп-турного пластилина, *г*	Суммарная масса элементов, *г*	Вес конструк-ции, *Н*
444	21	180	150	500	1465,4	14,37

Поскольку весь вес констуркции распределяется на 6 стоек, то на 1 приходится нагрузка в 2,4 Н. Согласно опытным данным стержни работают нормально без потери устойчивости до момента достижения нагрузки в 4,5 Н. Но так как изначально для расчета башни в ПВК было задано кольцевое металлическое сечение, то оценить фактическое нормальное усилие в стержнях макарон не представляется возможным. Можно полагаться только на опытные данные.

Имея определенные характеристики макаронных изделий как строительного материала и зная самые загруженные элементы, приняв во внимание меры по их усилению, было выполнено строительство башни, изображенной на рисунке 7.

Рис. 7. Башня из спагетти

По истечению 24 часов в теле башни не появилось дополнительных деформаций, отклонений от вертикали. Более того, не появились даже трещины в особо растянутыхэлементах, что говорит о том, что конструкция башни и ее сечениебыло подобрано верно.

Имея расчетную схему сооружения, выполненную в SCAD, можно выбрать для элементов любое сечение, имеющееся в базе сортамента с целью архитектурной выразительности или определить минимально допустимое сечение с точки зрения экономии материала.

Таким образом, воспользовавшись программно-вычислительным комплексом, можно запроектировать любое сооружение. Полагаясь на световую индикацию и численные фактические значения деформаций элементов, можно увидеть самые уязвимые места проектируемых конструкций, принять меры по обеспечению жесткости и устойчивости конструкций и выполнить строительство сооружений из самых разных материалов с инженерным подходом.

Список литературы:

1. Битюрин А.А. Лекции по устойчивости стержневых систем. : методические указания для магистров, обучающихся по направлению «Строительство» - Ульяновск : УлГТУ, 2011URL: http://venec.ulstu.ru/lib/disk/2011/Biturin.pdf (дата обращения: 03.12.2018г.).

2. Водопьянов В.И. Курс сопротивления материалов с примерами и задачами : учеб. пособие / В. И. Водопьянов, А. Н. Савкин, О. В. Кондратьев ;ВолгГТУ. – Волгоград, 2012 – 136 с. URL: https://docviewer.yandex.ru/view/340674015/?*=aFtunI063BH8rXOy%2Bub0BgS%2B9ed7InVyb (дата обращения: 09.12.2018г.).

3. КардаенкоА.ПSCADOffice. Шагзашагом/Учебное пособие. – Санкт-Петербург, 2011. URL: www.kapproject.ru (дата обращения: 03.12.2018г.).

4.Куриленко Е.Ю., Огороднова Ю.В. Сопротивление материалов. Краткий справочник для студентов специальности «Промышленное и гражданское строительство». – Тюмень: РИО ГОУ ВПО ТюмГАСУ, 2010.URL:http://tyumgasu.ru/content/sopromat/sm_spravochnik_10_tyumgasu.ru_wm.pdf (дата обращения: 03.12.2018г.).

5.Скрипникова, М.Л. Методы определения основных свойств строительных материалов, 2013.URL:http://portal.tsuab.ru/Met_2013.05/31.pdf (дата обращения: 03.12.2018г.).