

С.С.ДОВНАР, А.М.ЯКИМОВИЧ, О.К.ЯЦКЕВИЧ, А.Д.ЛАПУКА

ИНТЕРАКТИВНОЕ ОБУЧЕНИЕ МКЭ-АНАЛИЗУ СТАТИКИ И ДИНАМИКИ НЕСУЩИХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ БИОНИЧЕСКОЙ БАШНИ МАЯКА ЭДИСТОН

Белорусский национальный технический университет

Выполнена МКЭ-оценка напряженного состояния маяка Эдистон, включающего бионическую башню. Виртуальные испытания проведены для нагружения собственным весом, ветром, потоком воды и ударом предельной 50-летней волны. Выявлены концентраторы сжатия в башне. Показана компенсация силой тяжести потенциальных динамических концентраторов растяжения. Отмечена равномерность распределения напряжений в бионической башне. Даны рекомендации по мониторингу системы.

Собран методический опыт по привлечению студентов к командной интерактивной работе по виртуальным испытаниям ответственных сооружений с помощью МКЭ.

Ключевые слова: МКЭ, компьютерный аудит; образование студентов; ANSYS; историческая несущая система; маяк Эдистон; биомиметика; бионическая башня; концентратор сжатия; мониторинг.

Область исследований

В течение времени по мере развития техники накапливаются исторические несущие системы (*ИНС; legacy load-bearing systems – L-LBS*), которые выдержали достаточное количество природных или искусственных испытаний (*survived L-LBS*). *ИНС* доказали долгой службой свою эффективность и живучесть. Такие системы обычно являются выразителями сильных инженерных идей. Поэтому *ИНС* представляют собой ценный ресурс для

живого и непосредственного обучения студентов. Эффективным методическим подходом представляется МКЭ-анализ таких систем, проводимый объединенными бригадами преподавателей и студентов. Осуществляется компьютерный аудит *ИНС*, совмещенный с интерактивным университетским образованием.

В этом ключе в САЕ-системе ANSYS была выполнена настоящая работа, посвященная моделированию несущей системы маяка Эдистон (*Eddystone light-house*; рис.1).

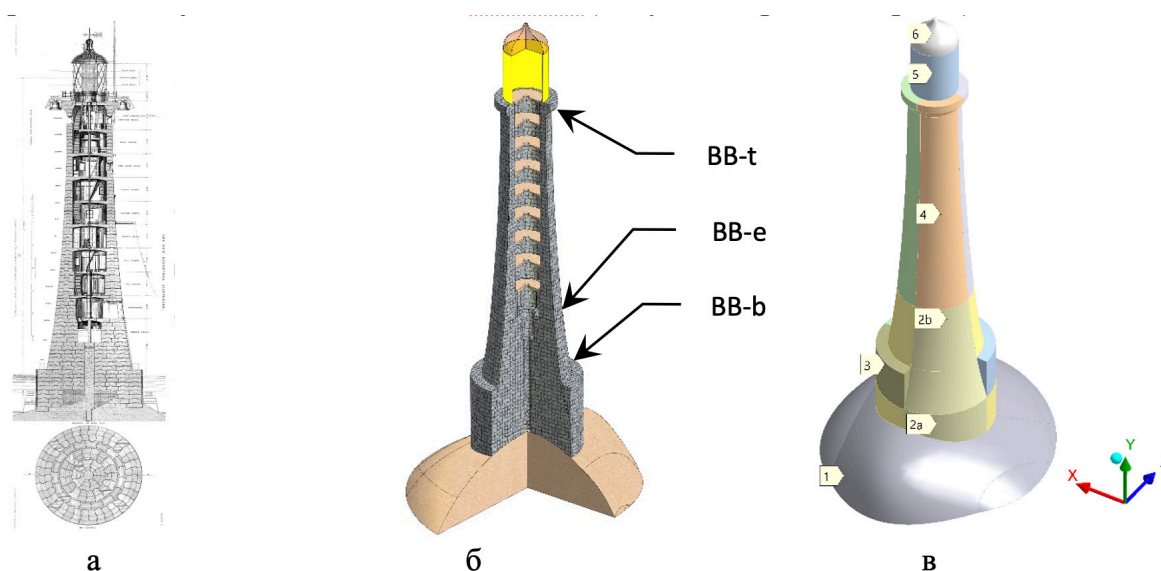


Рис.1. Маяк Эдистон на историческом рисунке (а), в виде 3D-модели в САЕ-модуле (б) и как система солидов в САЕ-модуле (в). *BB-b* и *BB-t* – низ и верх бионической башни ББ; *BB-e* – уровень входного проема

Маяк стоит уединенно в море и отмечает группу опасных скал в районе английского порта Плимут. Ныне работающий (с 1882 г.) маяк является 4-ым сооружением на этом месте. Третий маяк (1759 г, маяк Смитона – *John Smeaton*) и четвертый маяк (1882 г., маяк Дугласа – *James Douglass*) построены по общей инженерной идее [1, 2]. Они копируют форму ствола дуба. Маяк Эдистон в указанных модификациях послужил образцом для множества маяков в мире. Это один из первых удачных бионических объектов в современной технике.

Прочность башни маяка проверена временем и не вызывает сомнений. Это эффективное инженерное решение. Его стоит подвергнуть МКЭ-анализу (виртуальному испытанию) для понимания достоинств несущей системы.

Для обучения студентов МКЭ-анализу в случае маяка Эдистон ценным является наличие современных работ [3, 4], в которых собраны результаты натурных измерений для башни и проведено МКЭ-моделирование (пакет LUSAS). Эти работы снабжают настоящее исследование исходными данными, а также позволяют сопоставить и верифицировать результаты виртуальных испытаний.

Маяк является решением в духе

концепции равнопрочной балки (балки равных напряжений) [5]. Одновременно маяк относится к сфере биомиметики [6] (переносу геометрии живых объектов на технические).

3D-моделирование

По историческому рисунку (рис.1, а) была построена 3D-модель маяка (рис.1, б), состоящая из системы солюдов¹. В модели маяк разделен вертикальными плоскостями на четверти. Солиды импортированы из CAD-модуля в САЕ-модуль (рис.1, в).

Модель маяка включает (рис.1, в) скалу 1 (гнейс), гранитный базис (маркеры 2а – 2б), водобойную кольцевую ступеньку 3, ствол 4, фонарь 5 и крышу фонаря 6. Маяк имеет высоту 49 м при диаметре базиса 13,4 м [3, 4]. Часть маяка от ступеньки 3 до фонаря 5 будем называть бионической башней ББ. Именно эта структура (между маркерами *BB-b* и *BB-t* на рис.1, б) профилирована в виде ствола дуба. Диаметр ББ уменьшается снизу вверх от 10,8 до 7 м. Высота ББ равна 41,5 м. Толщина её стены внизу составляет ~2,6 м на уровне входа (маркер *BB-e* на рис.1, в). Внутри башни – цилиндрическая полость почти постоянного диаметра для 9 уровней помещений и водяного бака внизу.

1 В создании модели приняли участие студенты Громоковский Д., Гривусевич Е., Шведова Д., Роденя А.

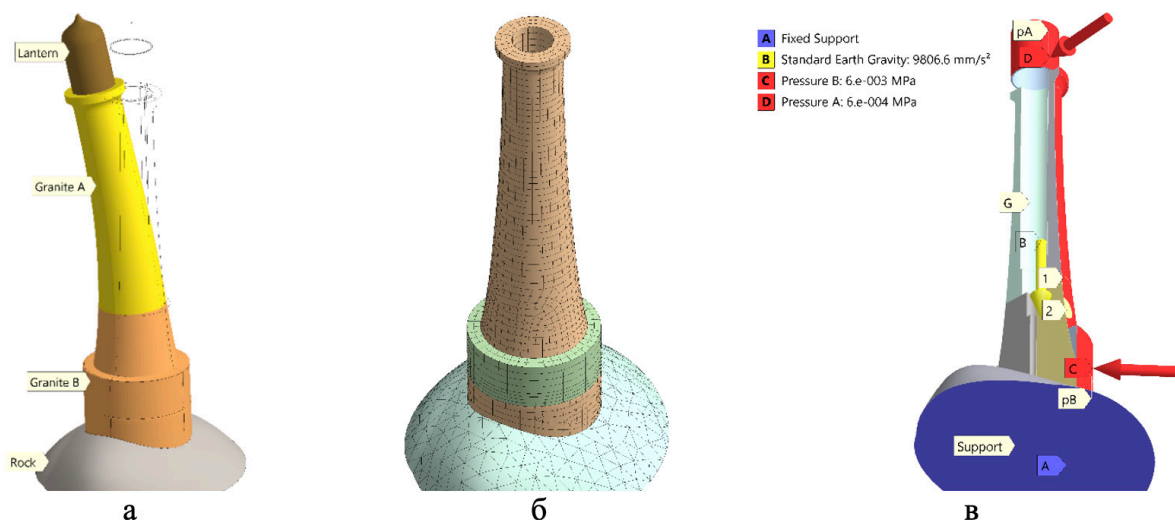


Рис.2. Колебания маяка (4,57 Гц) на первой резонансной моде (а), сетка конечных элементов (б) и граничные условия для модели на входе снизу (в)

Интервал от $BB-b$ до $BB-e$ будем называть основанием бионической башни (ОББ). Ожидается, что это самый ответственный по прочности участок ББ. Башня сложена из более чем 2000 гранитных блоков, зацепленных друг с другом «ласточкиными хвостами». Щели пролиты строительным раствором. Сооружение

можно считать монолитным и изотропным. МКЭ-модель и граничные условия. Маяк сложен из двух сортов гранита (рис.2, а) [4]. Гранит ствола (*granite A*) происходит из месторождения *De Lank* (табл.1) и относительно податлив. Гранит базиса (*granite B*) взят из месторождения *Dalbeattie* и имеет весьма высокий модуль упругости.

Таблица 1. Механические свойства материалов для МКЭ-модели

Материал	Модуль упругости E , ГПа	Удельная плотность ρ , кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа
Гранит А (<i>granite A</i>)	32,3	2644	219
Гранит В (<i>granite B</i>)	41,1	2670	147
Скала из гнейса (<i>rock</i>)	30	2300	>41
Сталь (<i>steel</i>)	210	7850	>250

Обратим внимание, что рис.2, а показан главный резонанс маяка, воспроизведенный с помощью МКЭ. Частота изгибной резонансной моды по расчету составила 4,58 Гц. Натурные измерения дают [3, 4] частоту 4,36 Гц. Совпадение удовлетворительное. Геометрия маяка и свойства материалов воспроизведены в МКЭ-модели с приемлемой точностью.

Сетки конечных элементов пред-

ставлены на рис.2, б¹. Каждому солиду соответствует своя сетка. Солиды базиса и ствола объединены в особую расчетную систему – деталь (part). Их сетки связаны друг с другом полностью жестко и непрерывно. Деталь «водобойная ступенька» соединена с базисом уже через контактную пару в статусе *bonded*. Также через контактную пару маяк сцеплен со скалой.

МКЭ-модель отработана и освоена на занятиях со студентами гр.10305120, 10305220, 30305120 БНТУ

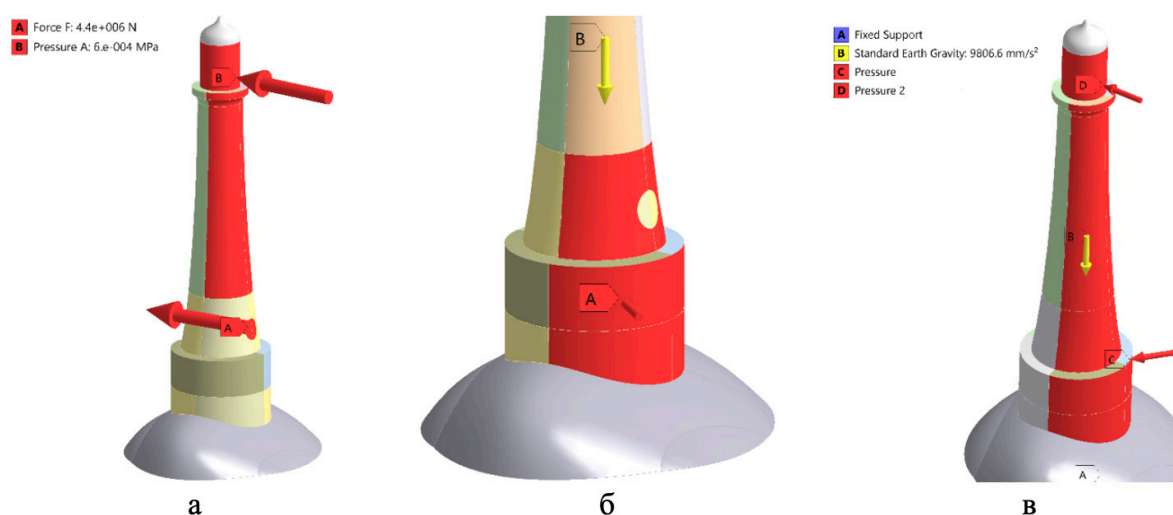


Рис.3. Различные варианты нагружения маяка: а – ветром и ударом волны; б – напором воды (и силой тяжести); в – ветром по всей высоте башни

Во всех МКЭ-расчетах скала была жестко закреплена снизу (*support* на рис.2, в). На модель прилагалась сила тяжести “*G*” (желтая стрелка), а также давление на группу поверхностей “*pA*” (выше маркера 1) и “*pB*” (от 1 ниже вплоть до скалы). Применялись два уровня давления. Ураганному ветру приписывалось давление $p_{wind} = 600\text{Па}$. Штормовому напору морского течения было установлено давление $p_{water} = 6000\text{Па}$.

Обратим внимание на пятно удара 2 (рис.2, в). Это место приложения ударной нагрузки при разбивании волны о ББ [4]. Для маяка Эдистон сила удара волны (маркер А на рис.3, а) определена [4] и составляет $F_{impact} = 4400\text{кН}$.

Варианты нагружения поясняет рис.3. На рис.3, а действует ветровая нагрузка p_{wind} на площади *pA*, а также сила удара волны F_{impact} . Этот случай обозначим как “*pAwind + F*”. Рис.3, б относится к случаю действия напора воды p_{water} на площади *pB* при учете сила тяжести (“*pBwater + G*”). На рис.3, в сила тяжести сочетается с ветровой нагрузкой по всем группам поверхностей (“*pAwind*

+ *pBwind + G*”). Это возможно при отливе.

Полная масса МКЭ-модели составила 6547 т (без учета скалы). Напор ветра на площадке *pA* равен 120 кН горизонтально (напор формирует изгибающий момент в ББ). Напор воды на площадке *pB* гораздо сильнее и составляет 1176 кН. В расчете принят самый опасный вариант совпадения напоров ветра и воды по направлению. Максимальную горизонтальную силу генерирует удар предельной, т.н. 50-летней волны (4400 кН) (вероятность такого удара – раз в 50 лет [3]).

Статический анализ

В напряженном состоянии башни благодаря силе тяжести доминирует сжатие (рис.6, а). Поэтому рационально анализировать картины минимального главного напряжения σ_3 (рис.4 а, б). Эквивалентные напряжения σ_e (рис.5, а) определяются почти полностью именно напряжениями σ_3 . Максимальное и среднее напряжения σ_1, σ_2 по всей модели близки к нулю.

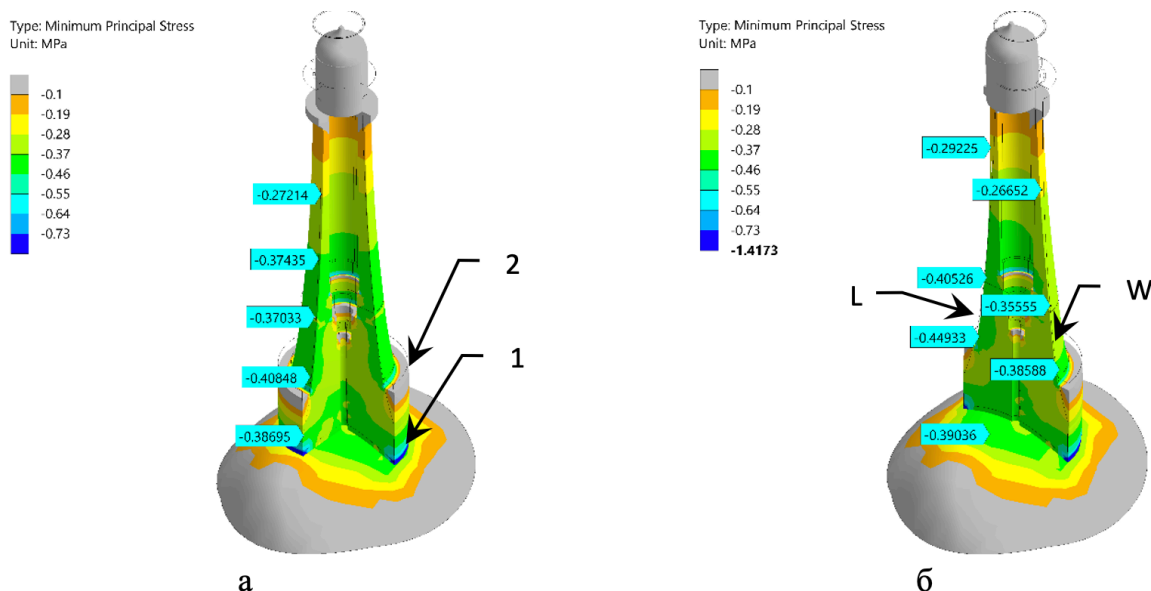


Рис.4. Картины минимального главного напряжения σ_3 при нагружении маяка собственным весом “*G*” (а) и комбинацией веса и ураганного ветра $p_{wind} = 600\text{Па}$ “*G+pAwind+pBwind*” по всей высоте маяка (б): $\times 7500$

Картина н.д.с. маяка под действием только силы тяжести отражена на рис.4, а. Поле σ_3 является слабым в верхней части маяка (-0,27214 МПа). Потом оно становится весьма равномерным в нижней половине ББ и внутри базиса: от маркера -0,37435 МПа до маркера -0,38695 МПа. Далее вниз напряжения сжатия ослабевают. Вес маяка распределяется внутри скалы. Важно отметить эффект кольцевой линейной концентрации сжатия (1). Повышенное сжатие соответствует нижней кромке базиса. Будем называть это место «краевым концентратором «базис – скала» (КК). Ступенька 2 практически не нагружена.

Главный вывод из рис.4, а заключается в том, что бионическая форма ББ выравнивает напряжения сжатия в башне. Степень сжатия постоянна независимо от высоты сечения. Увеличение площади нижних сечений довольно точно соответствует увеличению приходящегося на них веса. Профиль ББ (исходно - профиль ствола дуба) весьма оптимален. Он обеспечивает малоградиентное поле σ_3 .

Дополнение силы тяжести ураганным ветром (рис.4, б), как ни странно, почти не меняет картину σ_3 . Возникает лишь небольшое различие между профильными линиями L (наветренная сторона) и W (подветренная сторона). В основании ББ по линии W напряжение σ_3 находится в интервале -0,35...-0,39 МПа. На симметричной линии L сжатие выше из-за

изгиба башни ветром влево. Здесь напряжение σ_3 удерживается в интервале -0,40...-0,45 МПа.

Итак, бионический профиль башни позволяет весовой нагрузке противодействовать опрокидывающей ветровой нагрузке. Равномерность поля напряжений сохраняется.

Напряженное состояние маяка при более мощной комбинированной нагрузке “ $G+pA_{wind}+pB_{water}$ ” показано на рис.5. Сила тяжести сжимает маяк, а напоры ветра и воды, действующие совместно, пытаются изогнуть его влево. Картина эквивалентного напряжения σ_e на рис.5, а указывает, что пространственные распределения напряжений имеют малые градиенты. Пики напряжений возникают только на разного рода ступеньках. Эти концентраторы имеют форму линий (например, 1 на рис.5, в).

На рис.5, б нужно обратить внимание на профильные линии L, W и связанные с ними напряжения в основании ББ. С наветренной стороны (W) σ_3 находится в интервале -0,35...-0,41 МПа. С подветренной стороны (L) наблюдается уровень -0,40...-0,47 МПа. Итак, напряжения по разным сторонам маяка различаются для нижней части ББ только на 15%. Поэтому картину напряжений σ_3 следует признать достаточно однородной и равномерной, особенно с учетом внешних штормовых условий.

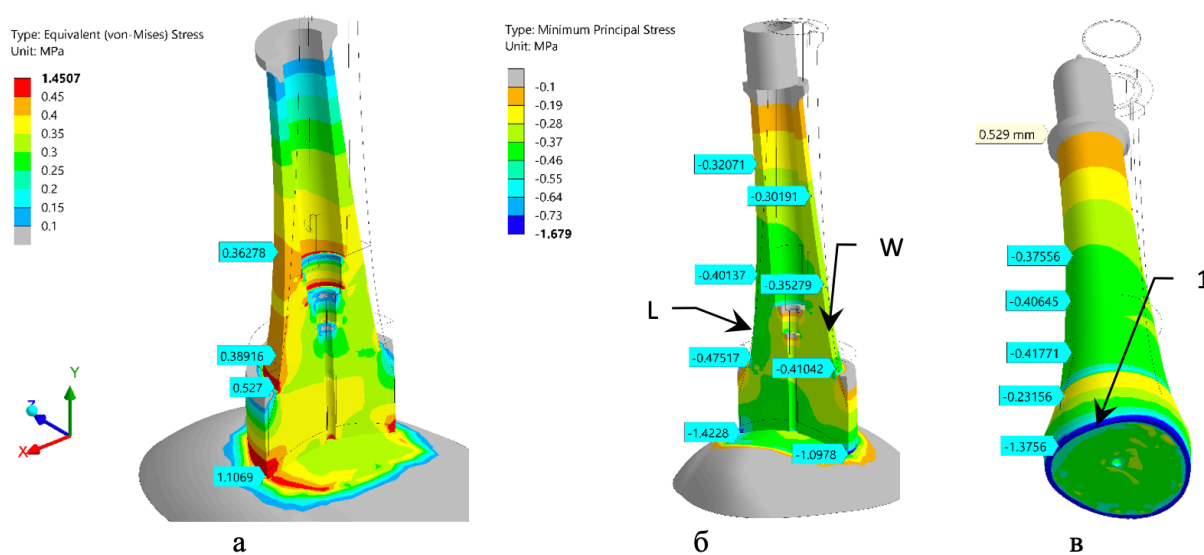


Рис.5. Картины эквивалентного напряжения σ_e (а) и напряжения σ_3 (б – вид сбоку, в – вид снизу) при нагружении маяка комбинацией веса, ураганного ветра $p_{wind} = 600Pa$ и напора воды $p_{water} = 6000Pa$ “ $G+pA_{wind}+pB_{water}$ ” (б): $\times 15000$

Отклонение вершины башни (напором воды и ветра) составляет (рис.5, в) только 0,529 мм. Жесткость башни является высокой. Концентрацию напряжений по линии 1 (КК) следует охарактеризовать как эффект несовместности деформаций. Он обусловлен несколько различными модулем упругости и коэффициентом Пуассона у гранита башни и гнейса скалы.

Напряженное состояние маяка на рис.6 обусловлено в первую очередь ударом волны по пятну удара 1 (сейчас смоделирован статически). Усиливают воздействие ветер на площадке рА и вес

конструкции. Пятно 1 оказывается (рис.6, в) локальным концентратором объемного сжатия ($\sigma_3 = 0.84234 \text{ МПа}$). На рис.6 а, б видно, что наклон башни влево создает краевой концентратор (КК) сжатия 2 (σ_3 до -1.9119 МПа). Он идет по границе базиса и скалы.

Между башней и водобойным кольцом наблюдается еще один линейный концентратор сжатия 3 (рис.6 б, в). Он привязан к резкому изменению диаметра маяка. Концентраторы 1, 2, 3 умеренно опасны, так как напряжения сжатия в них не превышают 2 МПа. Это намного меньше прочности гранита на сжатие (табл.1).

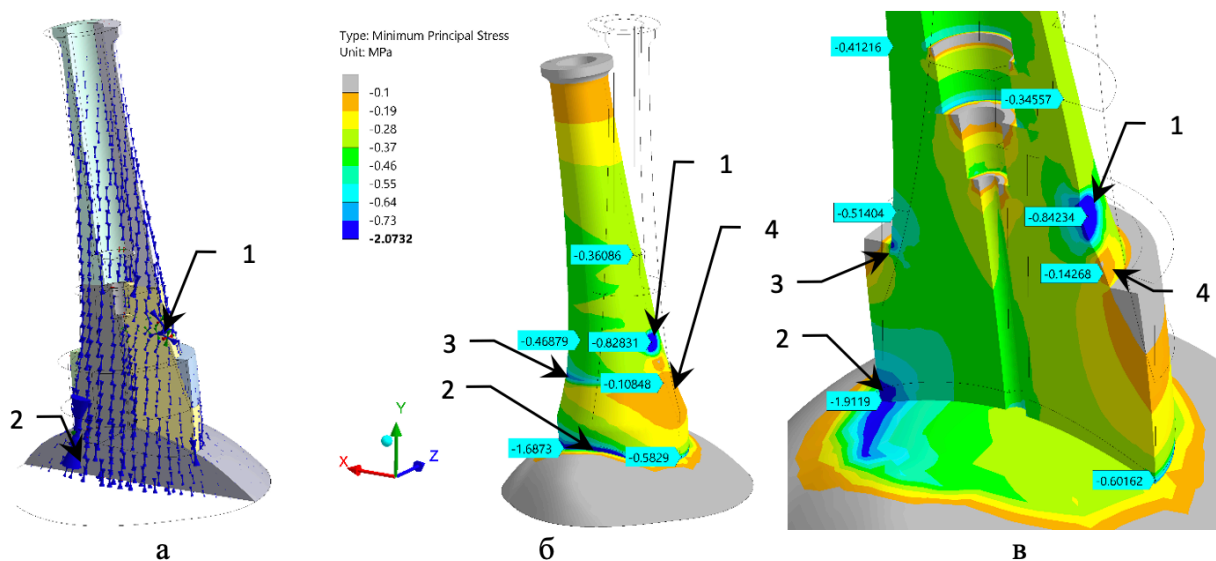


Рис.6. Картины напряжения при нагружении маяка комбинацией веса, ураганного ветра $p_{wind} = 600 \text{ Па}$ и удара волны $F_{impact} = 4400 \text{ кН}$ (" $G+pA_{wind}+F$ "): а – вектора напряжений; б – вид снаружи; в – вид в сечении (более мелкая сетка). $\times 10000$

Основную опасность для маяка представляет пятно разгрузки 4, расположенное под пятном удара волны 1. Здесь напряжения сжатия падают по абсолютной величине (-0,14268 МПа на рис.6, в). Это угрожает растрескиванием каменной кладки. Важно, что перехода вертикальных напряжений через ноль к растяжению не происходит. Опасность растяжения остается виртуальной. Прочное прилегание гранитных блоков обеспечивается.

С учетом того, что на рис.6 смоделировано действие 50-летней волны, прочность башни можно считать достигнутой. Малая градиентность полей напряжений в ББ сохраняется во всех

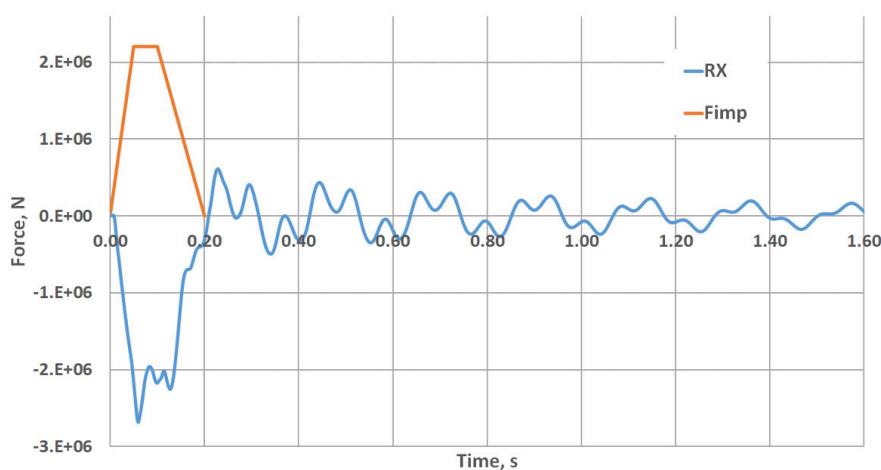
рассмотренных вариантах нагружения маяка.

Динамический отклик бионической башни

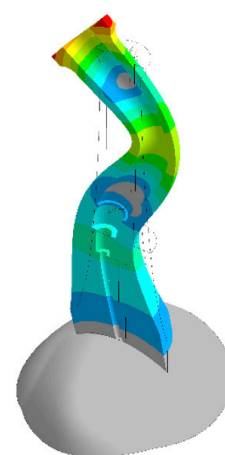
Рассмотрим воздействие удара волны на ББ в реальном времени и изучим переходные характеристики. Проанализируем башню как гладкую бионическую структуру (без водобойного кольца). В силу линейности и монолитности МКЭ-модели ограничимся моделированием только удара волны. Остальные нагрузки могут быть учтены в н.д.с. маяка позже в соответствии с принципом суперпозиции. На пятно удара прикладывался трапециевидный

(по времени) импульс силы согласно рис.3. а. Величина силы менялась по рис.7: линейный рост от нуля до 0,05 с; «плато» (2200 кН для половинной модели) до 0,1 с; линейный спуск до нуля к моменту времени 0,2 с. Эту форму импульса обозначим “0-0,05-0,1-0,2 с”. Смоделировано также нагру-

жение треугольным импульсом силы [4]: линейный подъем силы от начального момента до 0,1 с, а затем линейный спуск к моменту времени 0,22 с (“0-0,1-0,22 с”). Существенной разницы между действием импульсов не обнаружено.



а



б

Рис.7. Графики (а) силы (Н) волны (F_{imp}) для импульса “0-0,05-0,1-0,2 с” и силы реакции RX по ходу времени (с): половинная модель; коэффициент демпфирования $\zeta=2,7\%$, а также возбуждение изгибного резонанса MB3 на частоте 28,23 Гц (б).

Перед вычислением отклика маяка на импульсы силы был проведен модальный анализ. Отклик должно формировать возбуждение именно изгибных резонансов [3, 4]. Четыре нижние изгибные резонансные моды описаны в табл.2. Форма моды MB1

дана на рис.2, а и 10, б. Вторая изгибная мода MB2 проявляет себя почти в чистом виде на рис.10, а. Мода MB3 представлена на рис.7, а. Все изгибные отличаются друг от друга только количеством пучностей и узлов.

Таблица 2. Сопоставление частот (Гц) изгибных мод ББ по двум МКЭ-моделям

МКЭ-модель	Изгибные резонансные моды ББ			
	MB1	MB2	MB3	MB4
LUSAS [4] (модель настроена под измеренную частоту MB1)	4,36	15,17	30,66	48,64
ANSYS (модель под эксперимент не настраивалась)	4,58	14,35	28,23	45,6
Различие частот	5,0%	-5,4%	-7,9%	-6,1%

В табл.2 данные по резонансным частотам приведены и из параллельного МКЭ-решения [4] в пакете LUSAS, где частота MB1 настроена под наблюдаемую в натурных измерениях величину 4,36 Гц (варьировалась масса фонаря маяка). При этом различие между частотами мод в LUSAS и ANSYS оказалось невелико. Оно составляет только 5 – 8%.

Всплеск силы реакции на рис.7, а в интервале 0 – 0,2 с отражает, в основном, вынужденное движение от импульса силы. Сила реакции не превышает 2690 кН при высоте импульса 2400 кН. Свободное движение хорошо наблюдается после времени 0,2 с. Оно обусловлено возбуждением первых двух изгибных мод MB1 и MB2. К концу графика колебания по

MB2, в основном, затухают. Следовательно, в отклике маяка свободное движение не достигает большого размаха, что положительно с точки зрения прочности.

Статическая и динамическая картины максимального главного напряжения сопоставлены на рис.8. В статике (рис.8, а) под пятном удара (-0,21564 МПа; объемное сжатие) находится пятно разгрузки (0,45759 МПа; одноосное растяжение), а ниже – краевое растяжение в КК (0,46281 МПа; эффект

несовместности деформаций). В динамике данная картина сохраняется принципиально, а концентраторы напряжения даже несколько размываются. Так, сразу после пика импульса силы “0-0,1-0,22 с” (рис.8, б) соответствующие напряжения равны -0,2672 МПа, 0,35185 МПа и 0,47167 МПа.

Получается, что динамический отклик башни на волну не создает дополнительной опасности в смысле пиков сильного растяжения.

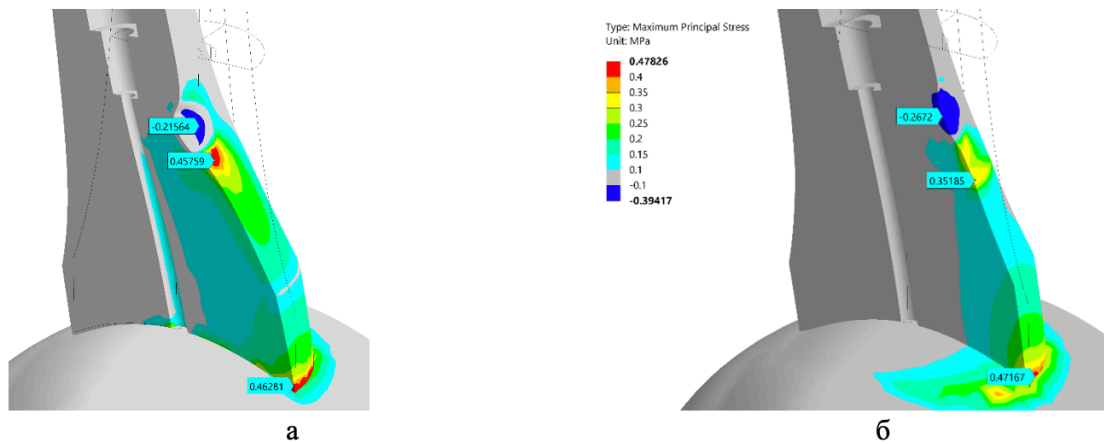


Рис.8. Картины напряжения σ_1 при нагружении ББ только ударом волны $F_{impact} = 4400\text{кН}$ (“0+0+F”): а – статическое решение; б – импульс “0-0,1-0,22 с” с демпфированием $\zeta = 2\%$ для пика напряжения в момент времени $t = 0,116\text{с}$. $\times 20000$

На рис.9 представлены отклики башни по параметрам: виброперемещение вершины (кривая *UX-top*) и максимальный текущий (по башне) уровень растягивающего напряжения (кривая *S1 max*). Линия

перемещений визуально отражает, главным образом, затухающие колебания по моде *MB1*. Линия растягивающего напряжения является результатом наложения осцилляций по *MB1...MB3*.

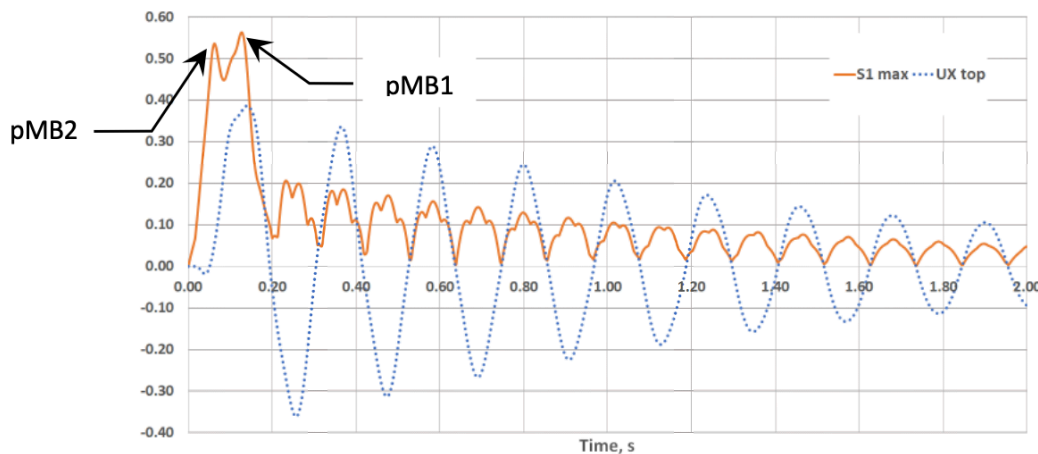


Рис.9. Колебания башни после удара волны $F_{impact} = 4400\text{кН}$ (импульс “0-0,05-0,1-0,2 с”). Переходные кривые: “*S1 max*” – текущий максимальный уровень σ_1 для всей башни (МПа); “*UX top*” – виброперемещение вершины ББ в направлении удара (мм; масштаб $\times 0,4$). Демпфирование $\zeta = 2,7\%$.

Общий вывод из рис.9 – пиковые растяжения достигаются именно во время удара волны (два пика в интервале 0 – 0,2 с для кривой $S1_{max}$). Далее колебания полей напряжений не представляют большой опасности. Статические и динамические решения для сочетания «ББ+удар волны»

весьма близки по своим экстремальным картинам.

Распределения напряжений для двух пиков (рМВ2, рМВ1) кривой $S1_{max}$ в интервале 0 – 0,2 с (рис.9) даны на рис.10 а, б соответственно.

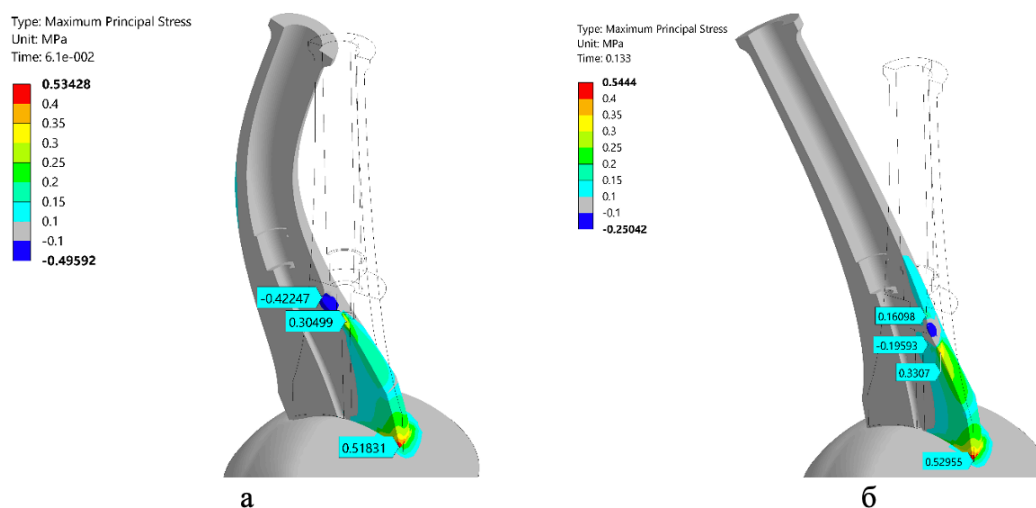


Рис.10. Картинки напряжения σ_1 при ударе волны на пиках кривой “ $S1_{max}$ ” (рис.9): а – пик рМВ2 для $t = 0,061$ с ($\times 40000$; ведет мода МВ2); б – пик рМВ1 для $t = 0,133$ с ($\times 20000$; ведет МВ1). Импульс “0-0,05-0,1-0,2 с”, демпфирование $\zeta = 2,7\%$.

Видно, что пики напряжений сформированы изгибными колебаниями по разным модам. Однако, неизменной на рис.10 а, б остается система из трех очагов напряжений: пятно удара (-0,42247 МПа и -0,19593 МПа соответственно), пятно разгрузки (0,30499 МПа и 0,3307 МПа) и краевой концентратор (0,51831 МПа и 0,52955 МПа). Растягивающие напряжения на рис.10 невелики и кратковременны. Они компенсируются постоянным сжатием от силы тяжести.

Итак, анализ динамического отклика башни показал, что для оценки прочности сооружения при ударе волны достаточно даже квазистатического МКЭ-решения.

Обсуждение

Маяк высмотрит как вполне прочная конструкция. Он подвергается умеренным

(по сравнению с прочностью гранита на сжатие) сжимающим напряжениям. Этим напряжений достаточно, чтобы компенсировать удары волн. Даже при ударе 50-летней волны гранитная кладка не должна попасть под растяжение. Ветровая нагрузка и напор морского течения оказываются менее существенными воздействиями, чем удар волны.

Собственные частоты бионической башни начинаются с $\sim 4,5$ Гц. Это достаточно высокий уровень, предотвращающий резонансную раскачку маяка ветром. Следует уделять внимание стыку ББ и базиса. Здесь есть острый внутренний угол, который может стать инициатором растрескивания гранитной кладки. Данный регион требует мониторинга. Более сложным для мониторинга районом является краевой концентратор «базис – скала»

Опыт, полученный студентами:

1. Студенты создали и настроили сложную МКЭ-модель, включающую несколько конечно-элементных сеток, различные материалы, структурные варианты и случаи нагружения.

2. Получены навыки выполнения статического, модального и переходного МКЭ-анализа.

3. Сформулировали особенности н.д.с. бионической башни для статики и динамики. Смоделирована консоль, близкая к равнопрочной.

4. Получено представление о несовместности деформаций (краевой концентратор «базис – скала»).

5. Получены навыки варьирования импульса возбуждающей силы и коэффициента демпфирования системы. Возникло представление об участии многих мод в переходном процессе.

6. Получены навыки верификации МКЭ-модели, в том числе путем сопоставления с натурными измерениями и данными параллельных виртуальных испытаний.

Выводы по напряженному состоянию маяка:

1. Несущая система маяка подвергается одноосному сжатию (обычно от 0 до -0,5 МПа), близкому к равномерному. Концентраторов растяжения не наблюдается. Объемное сжатие возникает временно только в пятне удара волны.

2. Концентраторы сжатия появляются на переходе от водобойной ступеньки к бионической башне (ББ) и по границе пятна опирания маяка на скалу. Напряжения сжатия не превышают 2 МПа и не угрожают прочности гранита.

3. Бионическая башня равномерно

распределяет напряжения от собственного веса по всей своей наружной поверхности. Здесь σ_3 находится обычно в диапазоне от -0,37 до -0,41 МПа. Он почти не меняется по высоте. Форму башни (копию профиля дуба) следует признать удачной и близкой к равнопрочной.

Ураганный ветер ($p_{wind}=600\text{Па}$) не нарушает примерного постоянства сжатия по высоте профильных линий. На наветренной стороне σ_3 немного уменьшается по абсолютной величине (-0,35...-0,39 МПа). С подветренной стороны сжатие несколько усиливается (-0,4...-0,45 МПа). Башня остается довольно однородно сжатой.

Сочетание ураганного ветра $p_{wind}=600\text{Па}$ и напора воды $p_{water}=6000\text{Па}$ также не нарушает постоянства напряжений сжатия по высоте в основании ББ. Напряжение σ_3 составляет -0,4...-0,47 МПа с подветренной стороны и -0,35...-0,41 МПа с наветренной.

Самым сильным воздействием на маяк является удар волны (максимальной в 50-летнем цикле). Сила в 4400 кН разгружает кладку гранита от сжатия под пятном удара. Однако, полной разгрузки не происходит, так как σ_3 не поднимается выше -0,108 МПа. Следовательно, швы между блоками не пытаются раскрыться. Прочность башни обеспечивается.

Бионическая башня маяка Эдистон обладает достаточной прочностью и высокой равномерностью (малым градиентом) напряжений по высоте. В основании ББ почти достигается постоянство напряжений в разных горизонтальных сечениях.

Динамическое нагружение ББ ударом 50-летней волны не создает опасных концентраторов растяжения. Свободные колебания башни являются довольно умеренными по амплитудам напряжений. Система очагов напряжений не меняется принципиально.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rowlett, Russ. Lighthouses of Southwest England (Devon and Cornwall). The Lighthouse Directory. University of North Carolina at Chapel Hill. Retrieved 30 April 2016.
2. Douglass, J. (1878), Note on the eddystone lighthouse., in "Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers", Vol. 53, Thomas Telford-ICE Virtual Library, pp. 247–248.
3. Davide Banfi. A field and laboratory study on the dynamic response of the Eddystone lighthouse to wave loading. School of Engineering Plymouth University Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, September 2017 <https://www.researchgate.net/publication/325553419>
4. Rinh, Q., Raby, A., Banfi, D., Corrado, M., Chiaia, B., Rafiq, Y. & Cali, F. (2016), "Modelling the eddystone lighthouse

response to wave loading”, *Engineering Structures*, 125, 566–578.

5. **Stanislau Dounar, Alexandre Iakimovitch, Katsiaryna Mishchanka, Andrzej Jakubowski, and Leszek Chybowski.** (2020) FEA Simulation of the Biomechanical Structure Overload in the University Campus Planting. *Applied Bionics and Biomechanics*, Volume 2020, Article ID 8845385. <https://doi.org/10.1155/2020/8845385>

6. **Vincent, Julian F. V.; Olga A Bogatyreva, Nikolaj R Bogatyrev, Adrian Bowyer, Anja-Karina Pahl.** (2006). «Biomimetics: its practice and theory». *Journal of the Royal Society Interface*. 3 (9): 471–482. <https://doi:10.1098/rsif.2006.0127>

7. **Довнар С.С., Лапука А.Д.** МКЭ-АНАЛИЗ БИОНИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ КОЛОНН СТАНКОВ. - «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» «Технология – Оборудование – Инструмент – Качество»: тезисы докл. 36-ой междуна. науч.-техн. конф. (Минск, 7 апреля 2022 г.). - Минск: Бизнесофсет, 2022. - с. 31 - 34. <https://rep.bntu.by/handle/data/111441>

REFERENCES

1. **Rowlett, Russ.** Lighthouses of Southwest England (Devon and Cornwall). The Lighthouse Directory. University of North Carolina at Chapel Hill. Retrieved 30 April 2016.

2. **Douglass, J.** (1878), Note on the eddystone lighthouse., in “Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers”, Vol. 53, Thomas Telford-ICE Virtual Library, pp. 247–248.

3. **Daive Banfi.** A field and laboratory study on the dynamic response of the Eddystone lighthouse to wave loading. School of Engineering Plymouth University Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, September 2017 <https://www.researchgate.net/publication/325553419>

4. **Rinh, Q., Raby, A., Banfi, D., Corrado, M., Chiaia, B., Rafiq, Y. & Cali, F.** (2016), “Modelling the eddystone lighthouse response to wave loading”, *Engineering Structures*, 125, 566–578.

5. **Stanislau Dounar, Alexandre Iakimovitch, Katsiaryna Mishchanka, Andrzej Jakubowski, and Leszek Chybowski.** (2020) FEA Simulation of the Biomechanical Structure Overload in the University Campus Planting. *Applied Bionics and Biomechanics*, Volume 2020, Article ID 8845385. <https://doi.org/10.1155/2020/8845385>

6. **Vincent, Julian F. V.; Olga A Bogatyreva, Nikolaj R Bogatyrev, Adrian Bowyer, Anja-Karina Pahl.** (2006). «Biomimetics: its practice and theory». *Journal of the Royal Society Interface*. 3 (9): 471–482. <https://doi:10.1098/rsif.2006.0127>

7. **Довнар С.С., Лапука А.Д.** МКЭ-АНАЛИЗ БИОНИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ КОЛОНН СТАНКОВ. - «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» «Технология – Оборудование – Инструмент – Качество»: тезисы докл. 36-ой междуна. науч.-техн. конф. (Минск, 7 апреля 2022 г.). - Минск: Бизнесофсет, 2022. - с. 31 - 34. <https://rep.bntu.by/handle/data/111441>

S. S. DOUNAR, A. M. IAKIMOVITCH, O. K. JATSKEVITCH, A. D. LAPUKA

INTERACTIVE FEM EDUCATION FOR LOAD-BEARING SYSTEM STATIC AND DYNAMIC ANALYSES BY CASE OF THE BIONIC TOWER OF THE EDDYSTONE LIGHTHOUSE

Belarusian National Technical University

FEM simulation of Eddystone lighthouse is provided. Incorporated bionic tower is modelled as well. Load cases including gravity force, wind thrust, water stream and 50-year wave impulse are accomplished. Stress concentrator system is described. Effect of tension stress concentrator compensation caused by gravity is showed. Low gradient stress dispensation is demonstrated for bionic tower outer surfaces. Recommendation touching places to monitor are given. Methodic experience related to interactive one-command student – professor FEM simulation of responsible load-bearing systems is collected.

Keywords: FEA; computer audit; student education; ANSYS; legacy load-bearing system; Eddystone lighthouse; biomimetic; bionic tower; concentrator of compression; monitoring.



Довнар Станислав Станиславович, к.т.н., доцент кафедры «Технологическое оборудование» машиностроительного факультета БНТУ. Область научных интересов: виртуальные испытания несущих систем в машиностроении и смежных областях, применение МКЭ в прочностных задачах, МКЭ-анализ в бионике и биомиметике.

Stanislau Dounar, candidate of technical sciences, docent, “Technological machines” department of mechanical engineering faculty of BNTU. Fields of interest: FEA for load-bearing system optimization in machinery and neighboring areas, simulation of strength-rigidity-durability tasks, FEA application in the bionics and biomimetics.

Email: dovnar@bntu.by



Якимович Александр Максимович, к.т.н., профессор кафедры «Технологическое оборудование» машиностроительного факультета БНТУ. Область научных интересов: прикладная гидравлика, сложные гидравлические приводы и системы, вихревые теплообменные аппараты и их технологии, компьютерное моделирование в машиностроении и смежных областях.

Aleksandre Iakimovitch, candidate of technical sciences, professor, “Technological machines” department of mechanical engineering faculty of BNTU. Fields of interest: applied hydraulics, complex hydraulic actuators and systems, eddy-type heat-transferring apparatuses and their technologies, computer simulations in the machinery and associated fields.

Email: mtools@bntu.by



Яцкевич Ольга Константиновна, к.т.н., заведующая кафедрой «Технологическое оборудование» БНТУ. Область научных интересов: защитные покрытия деталей и инструмента, компьютерное моделирование в машиностроении, методология обучения студентов CAD/CAM/CAE.

Jatskevich Volha, candidate of technical sciences, docent, chief of department “Technological machines” of BNTU. Field of interest: protective coatings for parts and tools, computer simulations in the machinery, methodology of student education in the CAD/CAM/CAE sphere.

Email: mtools@bntu.by



Лапука Анастасия Дмитриевна, ассистент кафедры «Технологическое оборудование» машиностроительного факультета БНТУ, магистрант. Область научных интересов: МКЭ-моделирование и оптимизация в механических и бионических системах.

Anastasia Lapuka, assistant of “Technological machines” department of mechanical faculty of BNTU. Fields of interest: FEA and optimization for load-bearing system of mechanical and bionic types.

Email: penkina@bntu.by