

ДОВНАР С.С., ЯЦКЕВИЧ О.К., АВСИЕВИЧ А.М., ШВЕДОВА Д.Н., АГЛУШЕВИЧ И.Ю.

МКЭ-АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИОНИЧЕСКОЙ ИСТОРИЧЕСКОЙ КОНСОЛИ В КАЧЕСТВЕ КОЛОННЫ КРУПНОГАБАРИТНОГО СТАНКА

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

Предложена концепция станочной колонны в виде вертикальной бионической консоли. Консоль получена виртуальной 3D-трансформацией древоподобной башни исторического маяка Эдистон. Колонну предложено создавать из полимербетона с послойным формированием переменного сечения.

МКЭ-анализ показал высокую жесткость колонны (от ~1500 до ~11000 Н/мм сверху вниз). Такая жесткость достигнута для высоты колонны в 4,5 м при массе бетона только 19,3 т. МКЭ-моделирование указывает, что резонансы колонны располагаются высоко (>49 Гц). АЧХ благоприятна для силового резания на дорезонансных частотах и для чистой резонансной обработки. Возможно использование как уединенной бионической колонны, так и создание из двух оппозитно размещенных колонн портала с динамической траверсой.

Ключевые слова: МКЭ, виртуальные испытания, историческая несущая система, маяк Эдистон, бионическая консоль, равнопрочная балка, колонна, портал, жесткость, станок

Введение

Работа относится к проектированию крупногабаритных металлорежущих и гибридных станков. Исследование направлено на привлечение свежих конструктивных идей в создание НС технологических колонн, башен, порталов. Замысел работы заключается в поиске идей среди ИНС. Первоочередное внимание должны привлечь стойкие, успешные в своей службе сооружения (СИНС). В данном исследовании обсуждается маяк Эдистон (1882 г.), построенный на скале частично под водой в открытом море южнее Плимута [1–3].

Современным эффективным материалом для структурных деталей станков является полимербетон класса УНРС [4]. Из него создают монолиты, отличающиеся хорошим демпфированием, достаточной жесткостью и умеренным весом. Полимербетон пока ещё с осторожностью применяют для возвышенных частей крупных станков [5, 6]. В данной работе в виртуальном поле 3D-моделирования и МКЭ-анализа [7] реализуется двойной замысел:

- перенести форму СИНС на колонну станка;
- выполнить такую колонну из полимербетона, без существенного участия чугуна или стали.

Область исследований, цель и задачи работ

Маяк Эдистон (рис. 1а) является хорошо известной осесимметричной, слоистой конструкцией, выполненной по форме ствола дуба [1, 2]. Маяк представляет собой полую башню, наружный диаметр которой увеличивается книзу. Внутренний диаметр при этом уменьшается (рис. 1б). В результате толщина стенок очень существенно нарастает к основанию

башни. Будем называть эту черту двойной клиновидностью стены (ДКС).

Маяк имеет бионическую форму (профиль ствола дуба). Он является примером вертикальной бионической консоли (БК). Для профиля маяка не сформулировано математическое описание. При проектировании в XIX-ом веке форма была задана таблично, как набор диаметров для 89 гранитных слоев.

Каждый слой маяка представляет собой набор гранитных блоков (рис. 1в), сцепленных друг с другом двойной системой ласточкиных хвостов. Дополнительно блоки соединялись друг с другом цементом.

Маяк Эдистон является стабильной исторической конструкцией, уединенной в море и выдержавшей многочисленные воздействия стихий. Поэтому его можно отнести к СИНС. Прочность маяка проверена в том числе путем как натуральных, так и виртуальных испытаний с помощью МКЭ [2, 3]. Было показано, что ИФ-МЭД практически лишена концентраторов напряжений при разных условиях нагружения. Исторический маяк близок к равнопрочной балке (РК) [8, 9].

Форма башни маяка многократно копировалась в других аналогичных сооружениях. Поэтому предлагаем говорить об удачной геометрической идее башни (маяка, колонны, стойки и т.д.). Множество её вариаций обозначим как ВаБЭД («Башня Эдистон»). Исходную (оригинальную) форму маяка Эдистон будем обозначать, как ИФ-МЭД.

Цель работы – создание и виртуальное испытание ещё одного варианта ВаБЭД для колонн и башен технологического оборудования. Например, идею маяка Эдистон можно воплотить в крупногабаритном металлорежущем станке типа «Подвижная колонна» [10, 11].

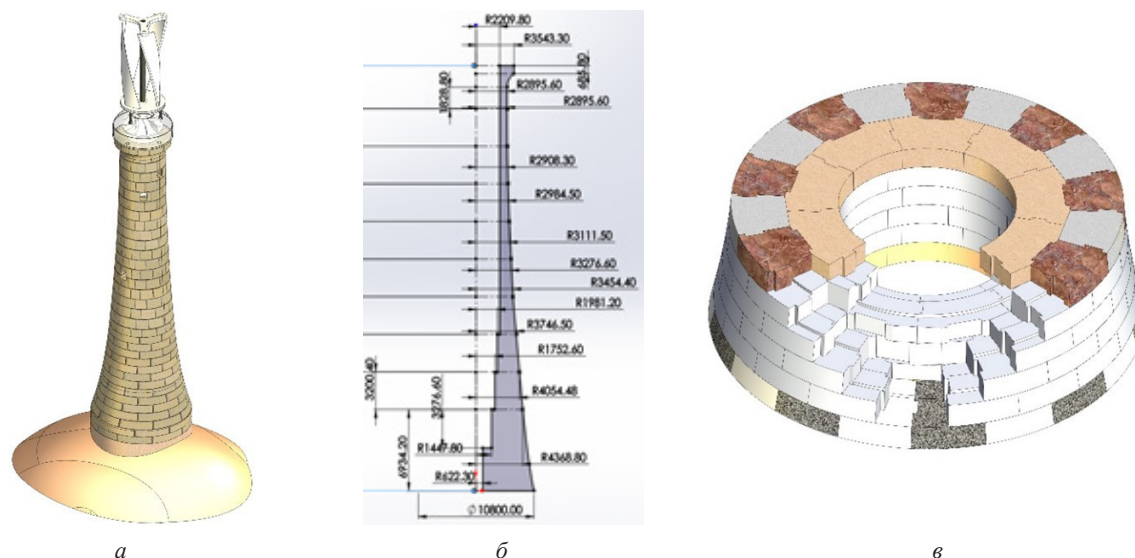


Рисунок 1. Исходная форма маяка Эдистон (*а*; ИФ-МЭД), принятый профиль стены маяка (*б*) и 31-ый слой гранитных блоков (*в*; показан верхним)

Первая задача работы – подвергнуть ИФ-МЭД сдвигу слоев и избирательному масштабированию так, чтобы достичь соответствия геометрическим условиям проектирования станочных колонн.

Вторая задача – стилизовать получающуюся СКЭД для полимербетонного исполнения.

Третья задача – подвергнуть полученную геометрическую модель виртуальным нагружениям с помощью метода конечных элементов (МКЭ) и оценить достигаемую статическую и динамическую жесткость.

Геометрическая модель станочной колонны Эдистон

Преобразование исходной формы маяка ИФ-МЭД (рис. 2*а*) в объект СКЭД представлено на рис. 2*б, в*. Использована слоистая модель из 77 сло-

ев (в реальном маяке присутствует 89 слоев, включая подводную часть). Слои имеют вид дисков с отверстиями (рис. 2*а*). Отдельные блоки внутри слоев не рассматриваются. Бионический профиль башни отмечен линией 1, дающей расширение наружной поверхности башни к низу. Внутри башни имеется колодец 2, который, наоборот, к низу сужается. Маркер 3 указывает на водобойное основание маяка. Оно будет использовано как базис станочной колонны.

Слои смещаются в CAD-модуле (рис. 2*б*; маркер 4) вправо так, чтобы выстроить из них прямую вертикальную линию 5–6. Это необходимо для создания на колонне станка вертикальных направляющих. Кроме того, производится двойное масштабирование ИФ-МЭД. Во-первых, вся конструкция была уменьшена равномерно в 4 раза. Во-вторых, толщина всех слоев была сокращена по вертикали вдвое (рис. 2*в*).

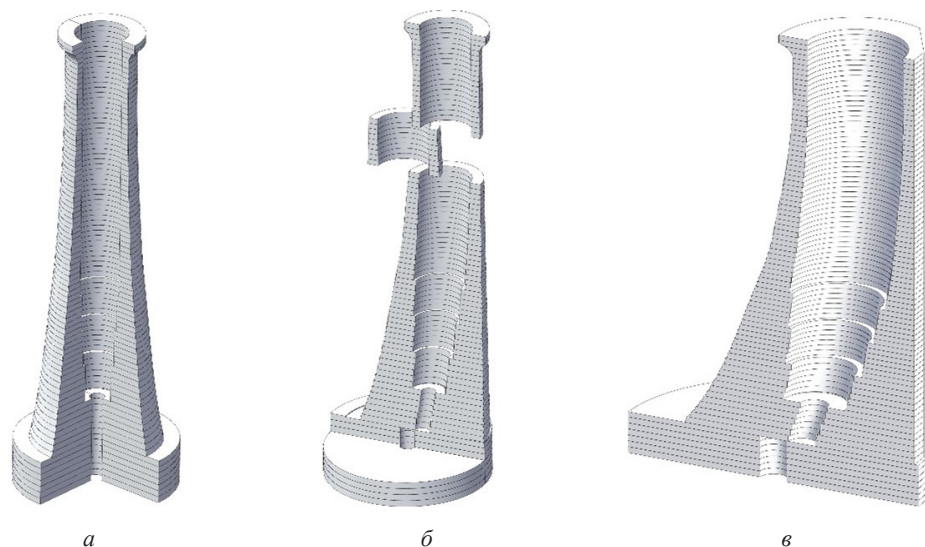


Рисунок 2. Геометрическая модель ИФ-МЭД (*а*), её преобразование горизонтальных сдвигом слоев (*б*) и вертикальное масштабирование для получения СКЭД (*в*)

В результате вертикального 8-кратного масштабирования башня приобрела высоту 4,5 м, типичную для колонн крупногабаритных станков. Толщина стенки вверху (маркер 7) равна 172 мм, а внизу (маркер 8) составила 1200 мм. Это и описано термином «двойная клиновидность стены» (ДКС).

Линия 9 указывает на бионический профиль СКЭД, отличающийся от аналогичного профиля 1 у ИФ-МЭД. Линия 10 является вертикальной и соответствует направляющим.

Колонна станка виртуально реализована на рис. 2, в как слоистый объект. Горизонтальные слои полностью отвечают процедуре послойной заливки полимербетона в переменные по высоте профили опалубки.

Конечно-элементная модель станочной колонны Эдистон

Геометрическая модель СКЭД была дополнена подвижными солидами и превращена в комплект сеток конечных элементов (рис. 3). Слоистая

колонна *Edc* опирается на базис *base* и несет суппорт *S* (рис. 3а). Суппорт может перемещаться вертикально по направляющим *G1–G2*, тип которых не детализирован. Это могут быть гидростатические направляющие или роликовые рельсовые направляющие качения.

В суппорте *S* установлен ползун *R* со шпиндельным узлом *SU* и главным приводом *M*. Ползун с инструментом способен выдвигаться по *Z*. Базис колонны может быть или неподвижным, или поворотным, или перемещающимся по *X* (например, на гидростатических направляющих). Это определяется компоновкой данного многоцелевого тяжелого станка.

На рис. 3б показаны модельные материалы и прогнозируемые массы прототипа станка. Механические свойства материалов отражены в табл. 1. Суппорт и базис предполагаются сделанными из полимербетона повышенной жесткости (фибробетон) или из комбинаций бетона с чугунными отливками. Поэтому им присвоены условные названия *granite* и *marble*.

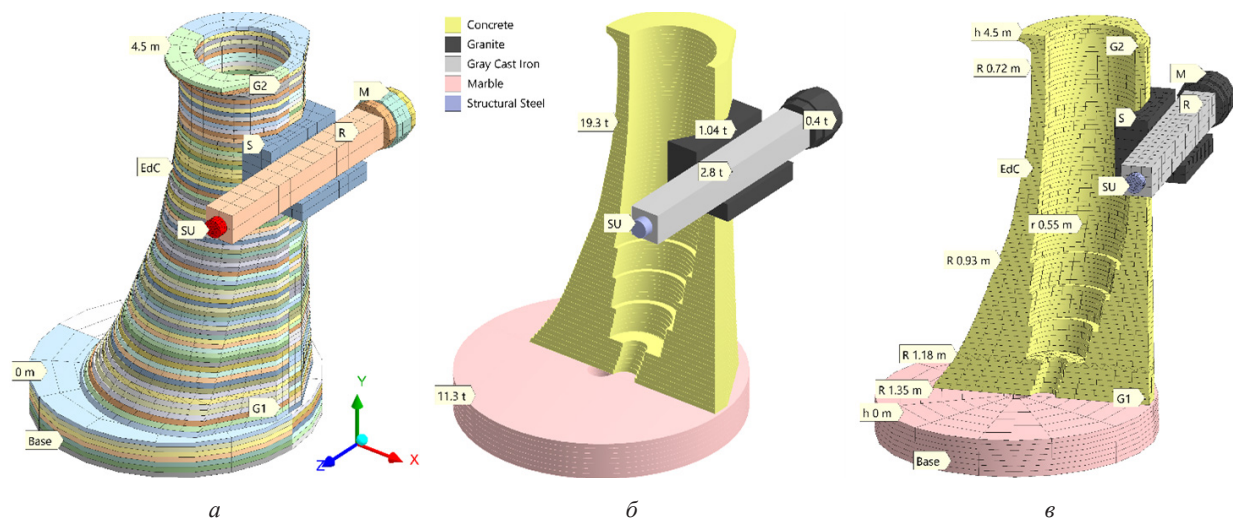


Рисунок 3. . Сетки конечных элементов для СКЭД (а), массы структурных деталей (б) и МКЭ-модель в разрезе (в).
R, r – наружный и внутренний радиуса; *h* – высота над базисом

Собственно колонна СКЭД выполнена из полимербетона среднего диапазона свойств (*concrete*). Колонна является самой тяжелой СД. Однако, она весит только 19,3 тонны. Это немного для гидростатических направляющих под базисом. Размеры колонны (высота 4,5 м) представлены на рис. 3в. Наружный радиус её сечения изменяется от 0,72 м вверху до 1,35 м на базисе. Внутренний радиус (радиус колодца) в верхней части колонны принят равным 0,55 м. Он уменьшается ступенчато вниз до 0,155 м. Отметим, что размеры и вертикальный профиль колодца легко изменяются при конкретном проектировании колонны. В данной работе СКЭД только трансформируется из ИФ-МЭД (без оптимизации).

Базис представлен как абстрактный диск диаметром $\varnothing 3,35$ м и высотой 0,47 м. Ползун принят чугунным. Он смоделирован с вылетом в 1,2 м. Высота оси шпинделя над базисом h_{sp} на рис. 3 составляет 3,5 м. Это считается верхним положением суппорта. Нижнее положение ($h_{sp} = 1,5$ м) показано на рис. 4а.

МКЭ-модель СКЭД содержит 174 солида. Столько же создается сеток объемных конечных элементов. Они связаны друг с другом контактными парами в состоянии схватывания (статус *bonded*). На образах направляющих возможность скольжения обеспечивается переключением пар в статус легкого скольжения (*no separation*).

Таблица 1. Механические свойства материалов для МКЭ-модели

Материал	Модуль упругости E , ГПа	Удельная плотность ρ , кг/м ³	Коэффициент Пуассона, μ	Коэффициент демпфирования, ξ , %
Полимербетон (<i>concrete</i>)	30	2300	0,18	3
Модельный материал суппорта (<i>granite - conditionally</i>)	50	2900	0,19	2,5
Серый чугун (<i>gray cast iron</i>)	130	7200	0,28	2
Модельный материал базиса (<i>marble - conditionally</i>)	55	2780	0,18	2,5
Сталь (<i>steel</i>)	210	7850	0,3	1,5

МКЭ-моделирование проводилось в линейной постановке. Были выполнены статический, модальный и гармонический анализы НС станка.

Компоновки станка и условия нагружения

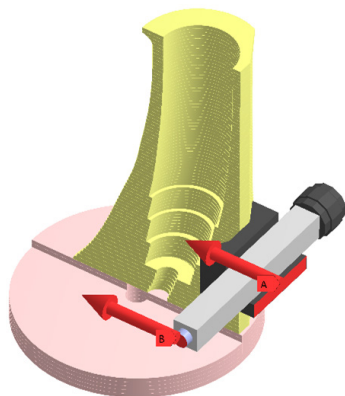
На рис. 4а, б показаны уединенные колонны СКЭД (моноколонны) с вертикальными (Y) суппортами. На рис. 4, а суппорт несет длинный ползун, способный достигать (по Z) инструментом удаленной детали, возможно, неподвижной. На рис. 4б представлена компоновка с токарно-фрезерной головкой Hd (маркер направлен на фрезерный шпиндель), имеющей две и более вращательные степени свободы. Трансляционные перемещения по X и Z могут осуществляться, например, столом детали.

На рис. 4, а стрелки тестовых сил показывают два варианта нагружения моноколонны с ползуном. Сила $F_x^{sp} = 1$ кН приложена к шпинделю, а сила $F_x^{supp} = 1$ кН действует на суппорт в плоскости симметрии колонны. Обе силы направлены по X . Сила F_x^{sp} стремится изогнуть ползун и осуществить

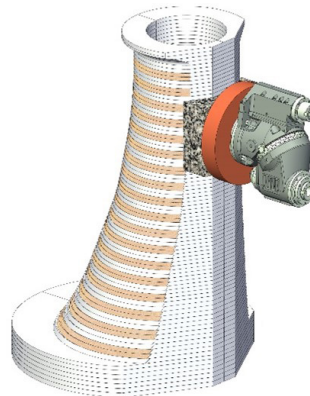
кручение колонны вокруг вертикальной оси. В смысле податливости и резонансов это самая опасная ситуация для станков с моноколонной [10].

Бионическая колонна СКЭД представляется также весьма перспективной для порталных крупногабаритных станков. Возможна компоновка с траверсой Tr1 (рис. 4в), соединяющей две оппозитные колонны в П-образную структуру. На траверсе могут находиться одна или несколько бабок с инструментальными ползунами разной ориентации. Обрабатываемая деталь перемещается в проеме под инструментальной траверсой Tr1.

Не менее интересной представляется компоновка портала (рис. 4г) с динамически возникающей траверсой Tr2. В состав траверсы на время обработки включается деталь W . Колонны $Edc1$ и $Edc2$ удерживают её с помощью суппортов S и планшайб Ch . Обработка ведется внешней инструментальной стойкой. Коробчатая деталь, показанная на рис. 4г, может, поворачиваться планшайбами за свои торцы. Тогда с одной установки будет проведена обработка всех четырех продольных сторон детали.



а



б

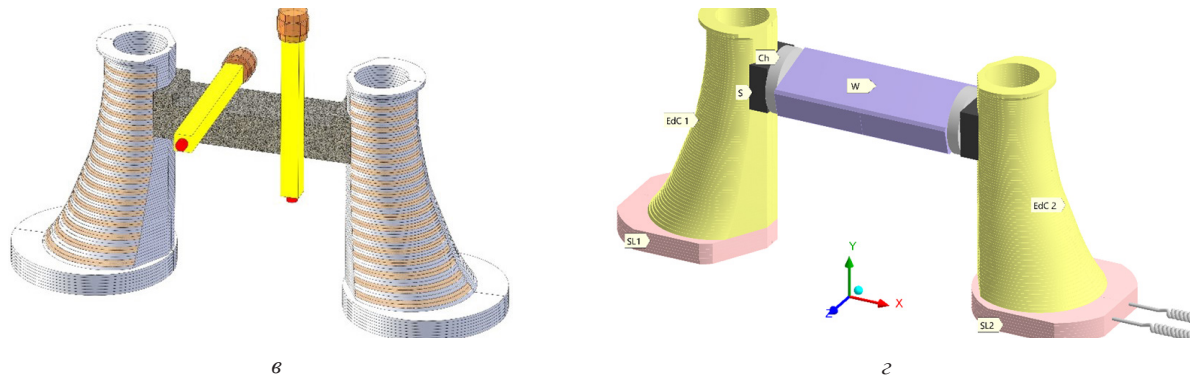


Рисунок 4. Варианты компоновки станка со СКЭД: *a* – моноколонна с суппортом и ползуном ($h_{sp} = 1,5$ м); *b* – моноколонна с токарно-фрезерной головкой Hd; *c* – портал из колонн с траверсой Tr1 и ползунами; *z* – подвижный портал из колонн SL1, SL2 с динамической траверсой Tr2 (включает деталь *W*, суппорты *S* и планшайбы Ch). $h_{sp} = 3,5$ м

Предполагаем, что бионические колонны в портале по рис. 4*c* способны выдержать большое распорное усилие. Поэтому к данному portalу приложим термоупругую нагрузку. При нагреве на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ деталь *W* в свободных условиях удлиняется по *X* на 366 мкм. Защемление траверсы Tr2 в абстрактных жестких колоннах приводит при указанном нагреве к созданию силы распора в 7031 кН по оси траверсы (*X*). В середине детали возникает сжимающее напряжение $\sigma_3 = 6,8$ МПа. Далее такую нагрузку будем обозначать как ТУН-10.

В МКЭ-модели колонна *Edc1* сделана неподвижной. Колонна *Edc2* может скользить вдоль *X*. Примем, что этим перемещением управляют две зубчато-реечные передачи. Они отражены на рис. 4*c* парой параллельных пружин. Жесткость каждой передачи принята равной 2000 Н/мкм.

Статический анализ

На рис. 5 отражено напряженно-деформированное состояние моноколонны под действием собственного веса. Суппорт в сборе имеет совокупный вес 4,31 т и подвергает колонну эксцентричному сжатию. Оголовок колонны отклоняется в сторону суппорта на 49,313 мкм (рис. 5*a*). Это типичная и даже умеренная систематическая погрешность для крупногабаритных колонн и порталов. Она компенсируется на этапе подгонки друг к другу СД станка.

Провисание ползуна (UY-81,7 мкм) также является известным систематическим эффектом. Оно практически не связано с изучаемой бетонной колонной и компенсируется специальными коррекциями в системе ЧПУ.

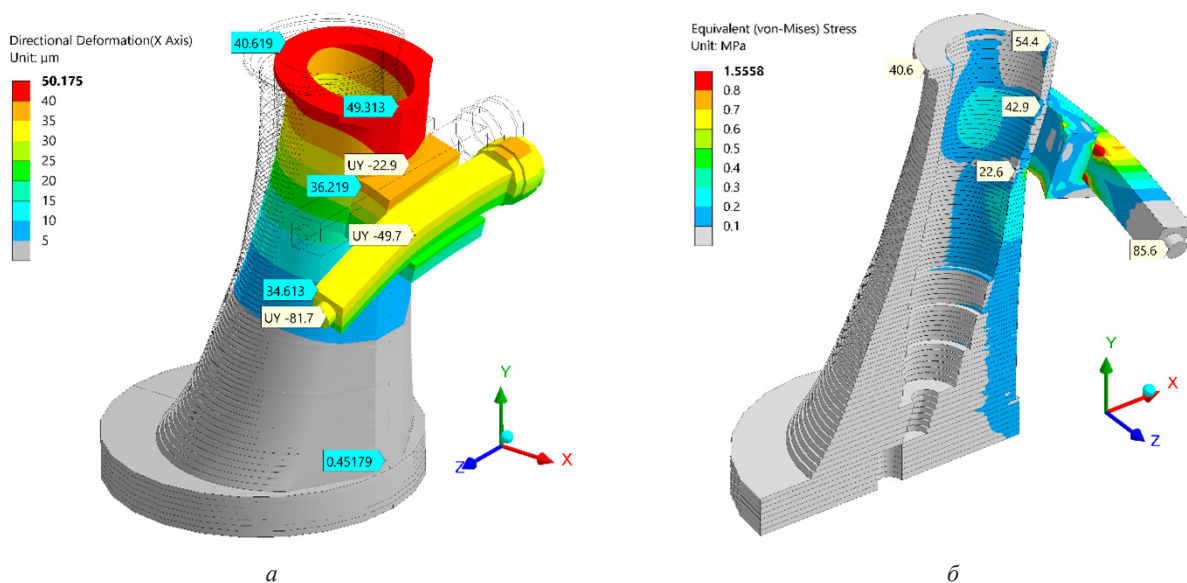


Рисунок 5. Воздействие на колонну собственного веса: *a* – перемещения *UX* (мкм) по оси *X* (маркеры с отметкой “UY” – вертикальные проседания по *Y*); *b* – картина эквивалентных напряжений σ_e (МПа) (маркеры – суммарные перемещения в мкм). $\times 10000$ $h_{sp} = 3,5$ м

Как видно из рис. 5б, сила тяжести не приводит к возникновению существенных напряжений в колонне. Максимальные напряжения наблюдаются в чугуне, связаны с его провисанием и не угрожают прочности. Более важно отметить локальный изгиб стенки колонны вдоль линии маркеров «22,6 мкм» – «42,9 мкм» – «54,4 мкм». В верхней части колонны стенка бетона за направляющими визуально показывает некоторую податливость. Её следует утолстить при дальнейшей оптимизации СКЭД.

Тестовые нагружения моноколонны по X иллюстрирует рис. 6. В верхнем положении суппорта шпиндельный узел ползуна отклонился на 12,07 мкм (рис. 6а). Следовательно, его жесткость

равна $J_{sp,X}^{stat} = 1000/12,07 = 82,8$ Н/мкм. Этого достаточно для обеспечения стабильного резания, например, при фрезеровании. При этом видно, что отклонение шпинделя происходит именно из-за изгиба ползуна при почти неподвижной колонне (на оголовке смещение составляет только -1,3768 мкм). Колонна достаточно жестка для обеспечения точной лезвийной обработки.

Этот вывод подтверждается на рис. 6б. Здесь на суппорт действует сила F_x^{supp} . Крутящий момент на колонне и изгиб вторичных деталей отсутствуют. При таком центральном воздействии суппорт смещается только на 0,80503 мкм. Это соответствует жесткости на суппорте 1249 Н/мкм.

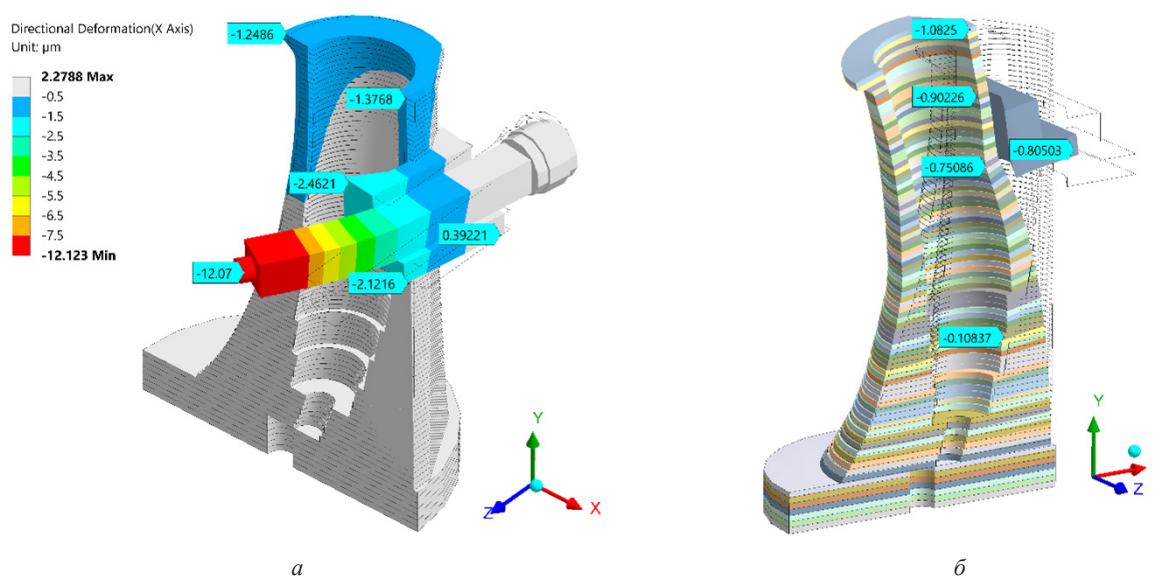


Рисунок 6. Статические перемещения колонны по X (мкм) при приложении тестовой силы в 1 кН: a – к концу ползуна (F_x^{sp} , $\times 60000$); b – к суппорту (сила F_x^{supp} , $\times 90000$). $h_{sp} = 3,5$ м

Для самой колонны ключевым показателем является маркер «0,75086 мкм». Он показывает итоговое перемещение от консольного изгиба колонны и локального прогиба стенки колонны под суппортом. Здесь получается эффективная жесткость 1331 Н/мкм. Это очень хороший уровень для тяжелого станка.

На рис. 7 представлены деформационные перемещения динамического портала при возникновении термоупругой нагрузки ТУН-10. Колонны опозитно друг другу подвергаются изгибу. В верхнем положении траверсы (рис. 7а) правая колонна скользит на 55,851 мкм. На пружинах суммарно возникает сжимающая сила в 214 кН. Левая колонна иллюстрирует классический консольный изгиб: при малом перемещении стыка с базисом (-3,2509 мкм) оголовки колонны отклоняется на -197,24 мкм.

Виртуальное опускание траверсы на 1 м (рис. 7б) дает для ТУН-10 силу распора вдвое больше

(429 кН). Это указывает на высокую жесткость нижней и средней части СКЭД. Термоупругое расширение детали компенсируется изгибом левой колонны (-113,35 мкм) и сочетанием скольжения и изгиба правой СКЭД (216,63 мкм).

Картина эквивалентных напряжений σ_e при распоре колонн дана на рис. 8а. Она типична для консольного изгиба. Внутренние стороны колонн подвергаются растяжению, а внешние – сжатию. Напряжения не превышают нескольких МПа и не угрожают прочности СД.

Сердцевина нижней части колонны (от А и почти до В) мало нагружена. На участке ВС наблюдаются локальные деформации, связанные с передачей распора через находящийся здесь суппорт (не показан). Поэтому присутствуют локальные умеренные концентраторы напряжений: 1,2701 МПа внутри колонны и 1,4414 МПа – снаружи. Выше, на участке СД колонна не нагружена.

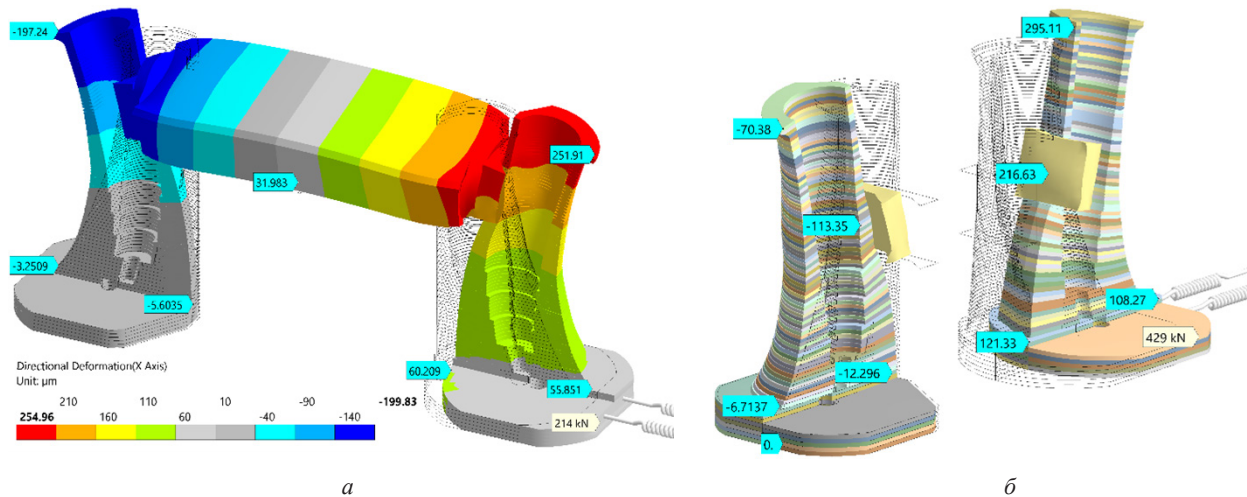


Рисунок 7. Перемещения по X (мкм) в портале станка при ТУН-10 (нагреве детали на $10\text{ }^\circ\text{C}$) для положений траверсы $h_{sp} = 3,5\text{ м}$ (а) и $h_{sp} = 2,5\text{ м}$ (б). Маркеры 214 кН и 429 кН указывают силу распора между колоннами. $\times 60000$

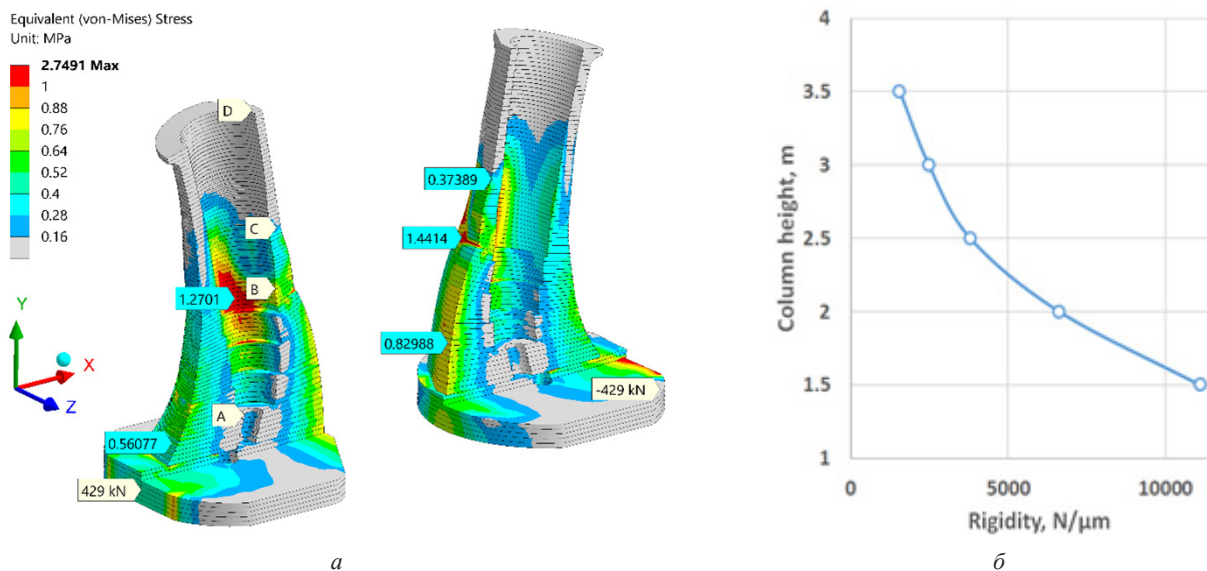


Рисунок 8. Картины эквивалентных напряжений σ_e (МПа) для распираемых колонн портала (а; $h_{sp} = 2,5\text{ м}$) и график жесткости колонны (Н/мкм; вдоль X) по высоте (б)

По результатам нагружения ТУН-10 на разных уровнях траверсы был построен график жесткости колонны (рис. 8б; базис неподвижен). Жесткость колонны по X в верхнем положении суппорта составляет $J_x^{3.5} = 1560\text{ Н/мкм}$. При опускании суппорта с 3,5 до 1,5 м жесткость возрастает (рис. 8б) до $J_x^{1.5} = 11108\text{ Н/мкм}$ (в 7,1 раз). Жесткость на очень хорошем уровне 2500 Н/мкм соответствует высоте суппорта 3 м. Итак, бионическая колонна СКЭД даже без оптимизации оказывается весьма жесткой конструкцией.

Модальный и гармонический анализ станочной колонны

Рассмотрено воздействие гармонической силы по X (F_x^{sp} на рис. 4а), приложенной к

шпиндельному узлу (например, компоненты силы резания при фрезеровании). Это был входом для АЧХ (рис. 9). Выходом являлись амплитуды колебания по X торца ползуна моноколонны и нижней левой кромки полки суппорта (также рис. 4а).

Семейство АЧХ было построено для диапазона частот от 1 до 200 Гц с шагом МКЭ-испытания в 1 Гц. Сплошные линии относятся к колебаниям торца ползуна (маркер «ram» в названии линии). Штриховые линии касаются амплитуды кромки суппорта («supp»). Маркеры «1.5 м», «2.5 м», «3.5 м» указывают высоту подъема оси ползуна над базисом (h_{sp}). Маркер «UX» указывает, что измерения перемещений проведены по оси X .

Все кривые АЧХ на частотах от 0 до ~ 40 Гц являются приблизительно горизонтальными. Это

проявляет себя дорезонансый (квазистатический) диапазон частот. Далее для ползуна на АЧХ наблюдаются резонансные пики. Это проявляют себя резонансные моды, обозначенные как M1 и M2.

Как видно из рис. 10, а мода M1 является изгибной. Модальное движение заключается, в основном, в консольном раскачивании колонны с суппортом вдоль X (маркеры «25,32 мкм»,

«28,811 мкм», «23,584 мкм») при почти неподвижном базисе («1,2627 мкм»). Колебания колонны дополняются изгибными осцилляциями выдвинутой части ползуна (от «29,547 мкм» до «59,29 мкм»). Мода M1 ярко проявляет себя в верхнем положении суппорта («M1-3.5» на рис. 9). Её пик ослабевает в среднем положении («M1-2.5») и почти не наблюдается в нижнем положении.

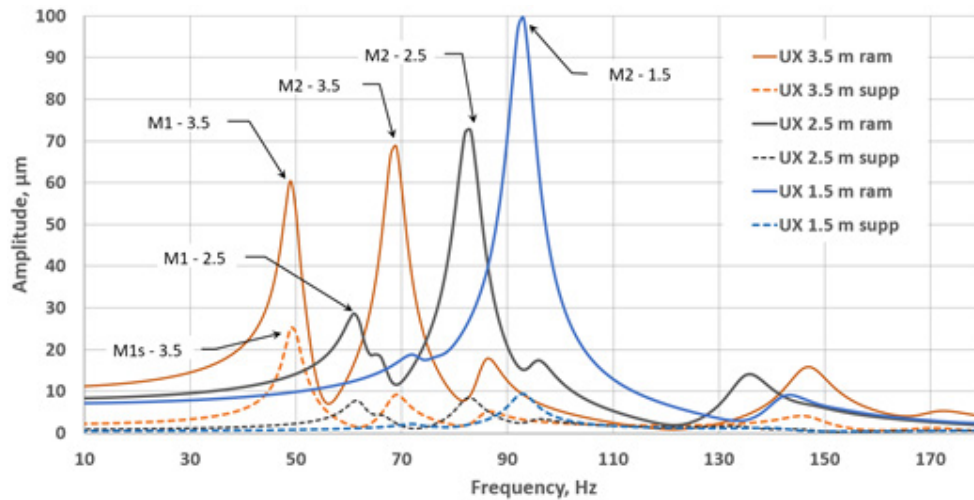


Рисунок 9. АЧХ колонны по X (мкм) для конца ползуна («ram») и кромки суппорта («supp») при приложении тестовой силы $F_x^{sp} = 1$ кН к шпинделю (высоты суппорта 1,5; 2,5; 3,5 м)

Мода M2 является крутильно-изгибной (рис. 10б). Кручение связки колонны с суппортом и ползуном происходит вокруг вертикальной оси, проходящей примерно через точку «O». Из-за возвратно-крутильных колебаний шпиндельный узел («81,238 мкм») и мотор («63,548 мкм») движутся в противоположных направлениях.

Верхняя часть колонны испытывает многоволновые изгибы стенок. Маркеры

«20,369 мкм» и «29,267 мкм» указывают на локальные пучности.

Мода M2 при опускании суппорта вниз лишь несколько усиливается. Для кривой «UX 1.5 m ram» на рис. 9 эта мода является единственно опасной. Подчеркнем, что речь идет не о резонансе изучаемой колонны СКЭД, а, в основном, о резонансном возбуждении дополняющего её ползуна.

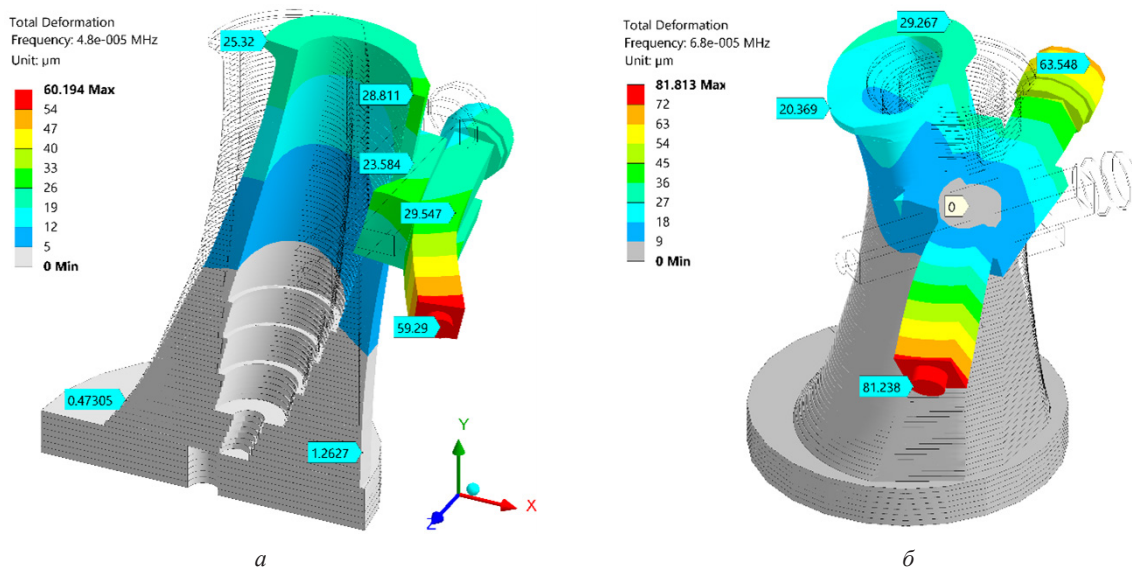


Рисунок 10. Возбуждение изгибного резонанса M1 (а; 49,4 Гц) и крутильно-изгибного резонанса M2 (б; 68,6 Гц). Сила на шпинделе $F_x^{sp} = 1$ кН. $\times 22500$; $h_{sp} = 3,5$ м. Маркеры – суммарные перемещения в мкм

Колебания самой колонны лучше отражают АЧХ суппорта (линии «supp») на рис. 9. Они все характеризуются весьма слабыми и плавными резонансными пиками. Исключение составляет пик М1 для верхнего положения суппорта («M1s-3.5»). Следовательно, полимербетонная СКЭД является динамически устойчивой и хорошо демпфированной структурой.

Зарезонансный диапазон частот для колонны с ползуном и суппортом начинается выше ~100 Гц. Наблюдаемые на рис. 9 пики в районе 130–150 Гц являются слабыми и касаются полуволновых колебаний собственно ползуна.

Обсуждение

Обзор деформаций и напряжений показывает, что даже первая версия СКЭД, выполненная трансформацией образца (маяка Эдистон) без оптимизации уже является достаточно жесткой и прочной конструкцией. При этом её масса является умеренной (для сверхтяжелого станка) и не превышает 20 т. Поэтому историческое и, одновременно, бионическое решение для СКЭД следует признать перспективным.

Полимербетон является сейчас востребованным материалом в станкостроении. Существует тенденция вытеснения чугунных СД полностью бетонными монолитами. Следует ожидать распространения этой тенденции на высокие станочные структуры. Поэтому концепция бионической полимербетонной колонны представляется актуальной. Самыми ответственными задачами при создании соответствующего тяжелого станка представляются создание и регулировка гидростатических направляющих и поворотных столов.

Выводы

1. Выполнение станочной колонны (СКЭД) в виде вертикальной бионической консоли, в стиле маяка Эдистон, перспективно при условии использования полимербетона.

2. Виртуальная трансформация образца (маяк Эдистон) в колонну тяжелого станка с типичной высотой 4,5 м требует не более 20 т полимербетона при перепаде диаметров от $\varnothing 1,44$ м до $\varnothing 2,7$ м. Такой вес приемлем для гидростатических направляющих и столов.

3. Для верхнего положения суппорта колонна СКЭД обеспечивает жесткость не менее 1500 Н/мм. К низу колонны жесткость резко нарастает, превышая 10000 Н/мм.

4. Параметры массы и жесткости, достигнутые при трансформации объекта из образца (маяк Эдистон), могут быть улучшены при оптимизации станочной колонны.

5. Резонансный диапазон у колонны в сборе с суппортом и ползуном начинается с частот от ~40 Гц и выше. Это достаточно высокий уровень. Выявлены два резонанса – изгибной М1 (49,4 Гц) и крутильно-изгибной М2 (68,6 Гц). Ведущей деталью оказывается ползун. Бетонная колонна проявляет себя как устойчивый к резонансной раскачке объект.

6. Рекомендуется обратить внимание на порталную компоновку из двух СКЭД. Две колонны с суппортами и планшайбами могут удерживать крупную коробчатую деталь (сляб, блом, отливку и т.д.) и поворачивать её для всесторонней обработки. Жесткость бионических консолей СКЭД обеспечит здесь точное и интенсивное резание одновременно.

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. **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. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/325553419>
3. **Trinh, Q.** [et al.] Modelling the eddystone lighthouse response to wave loading. *Engineering Structures*, 2016, vol. 25, pp. 566–578.
4. **Jiang, Du** [et al.] New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites, Part B: Engineering*, 2021, vol. 224, p. 109220.
5. **Hermansky D., Marek J.** An impact of the steel-concrete composite supporting structure on the dynamic parameters of the machining center. *MM Science Journal*, March 2022, pp. 5571–5574. DOI: 10.17973/MMSJ.2022_03_2020017
6. Vasilevich Y.V., Dounar S.S., Karabaniuk I.A. Finite element analysis of concrete filler influence on dynamic rigidity of heavy machine tool portal. *Science & Technique*, 2016;15(3):233–241. (In Russ.) DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-3-233-241
7. **Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L.** (2000) The finite element method. Butterworth-Heinemann, vol. 1: Basis. Oxford.
8. **Stanislau Dounar** [et al.] (2020) FEA Simulation of the Biomechanical Structure Overload in the University Campus Planting. *Applied Bionics and Biomechanics*, vol. 2020, Article ID 8845385. DOI: 10.1155/2020/8845385
9. **Dounar, S.S.** [et al.] Interactive FEM education for load-bearing system static and dynamic analyses by case of the bionic tower of the Eddystone lighthouse. *System analysis and applied information science*, 2022;(3):76–87. (In Russ.) DOI: 10.21122/2309-4923-2022-3-76-87

10. **Vasilevich Y.V., Dovnar S.S.** Resonance behaviour analysis of carrying system in heavy machine with traveling-column. *Science & Technique*, 2015;(5):10-17. (In Russ.)

11. **Doumar, S.** [et al.] Finite element analysis of the dynamically created portal in the huge machine tool of “travelling column” type. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, 2021, 65 (137). DOI: 10.17402/458

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. **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. [Electronic resource]. – Access: <https://www.researchgate.net/publication/325553419>

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

4. **Jiang Du, Weina Meng, Kamal H.Khayat, Yi Bao, Pengwei Guo, Zhenghua Lyu, Adi Abu-obeidah, Hani Nassif, Hao Wang.** New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). – *Composites, Part B: Engineering*, 2021, vol. 224, p. 109220.

5. **Hermansky D., Marek J.** An impact of the steel-concrete composite supporting structure on the dynamic parameters of the machining center. *MM Science Journal*, March 2022, pp. 5571-5574. DOI: 10.17973/MMSJ.2022_03_2020017

6. **Vasilevich Y.V., Doumar S.S., Karabaniuk I.A.** Finite element analysis of concrete filler influence on dynamic rigidity of heavy machine tool portal. *Science & Technique*, 2016;15(3):233-241. (In Russ.) DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-3-233-241

7. **Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L.** (2000) The finite element method. Butterworth-Heinemann, vol. 1: Basis. Oxford.

8. **Stanislau Doumar, 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*, vol. 2020, Article ID 8845385. DOI: 10.1155/2020/8845385

9. **Doumar S.S., Iakimovitch A.M., Jatskevitch O.K., Lapuka A.D.** Interactive FEM education for load-bearing system static and dynamic analyses by case of the bionic tower of the Eddystone lighthouse. *System analysis and applied information science*, 2022;(3):76-87. (In Russ.) DOI: 10.21122/2309-4923-2022-3-76-87

10. **Vasilevich Y.V., Dovnar S.S.** Resonance behaviour analysis of carrying system in heavy machine with traveling-column. *Science & Technique*. 2015;(5):10-17. (In Russ.)

11. **Doumar, S., Iakimovitch, A. & Jakubowski, A.** (2021) Finite element analysis of the dynamically created portal in the huge machine tool of “travelling column” type. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, 2021, vol. 65(137). DOI: 10.17402/458

DOUNAR S.S., JATSKEVICH V.K., AUSIYEVICH A.M., SHVEDOVA D.N., AGLUSHEVICH I.Y.

FEA STUDY OF EFFECTIVENESS OF BIONIC LEGACY-SHAPE CONSOLE AS HUGE MACHINE TOOL'S COLUMN

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Concept of machine tool's column in the appearance of vertical bionic console is proposed. Console was 3D-transformed from the shape of legacy oak-like structure – Eddystone lighthouse. It is proposed to create the variable-section column with “layer-by-layer” technics from the polymer concrete.

FEA shows high stiffness of the column. It increases from 1500 to 11000 N/μm from top to bottom along vertical guideways. Such stiffness needs only 19.3 ton of concrete for the instance of 4.5 m height's column. FEM-modelling pointed out rather high eigenmode's frequencies (>49 Hz). FRF is appropriate for pre-resonance heavy cutting as for post-resonance finishing. Proposed bionic-shape column is perspective as for stand-alone variant so for portal composition created by two opposite columns.

Keywords: *FEA, simulation, legacy load-bearing system, Eddystone lighthouse, bionic console, equal-stress beam, column, portal, stiffness, machine tool*

Работа выполнена при поддержке гранта, выделенного для БНТУ на 2023 г. Министерством образования Республики Беларусь по теме «МКЭ-оценка исторических несущих систем башенного типа для применения в проектировании крупногабаритных станков типа «Подвижная колонна»



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.

Stanislav 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.

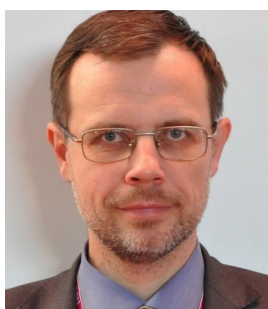
E-mail: dovnar@bntu.by



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.

E-mail: mtools@bntu.by



Авсиевич Андрей Михайлович – к.т.н., доцент, декан факультета информационных технологий и робототехники БНТУ. Область научных интересов: моделирование и МКЭ-анализ в сложных механических системах, виброзащита и вибродиагностика машин и оборудования.

Andrej Ausiyevich – candidate of technical sciences, docent, dean of informational technologies and robotization faculty of BNTU. Field of interest: complex mechanical system modelling and FEA, vibroisolation and vibrodiagnostics for machines and equipment.

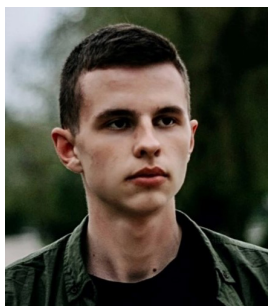
E-mail: ausi@tut.by



Шведова Дарья Николаевна – студентка 3-го курса машиностроительного факультета БНТУ. Область научных интересов: 3D-моделирование, аддитивные технологии, виртуальные испытания сложных механических систем с помощью МКЭ.

Darja Shvedova – student of the 3rd year of the mechanical engineering faculty of BNTU. Fields of interest: 3D-modelling, additive technologies of fast manufacturing, FEA of complex load-bearing systems concerning stress and stiffness management.

E-mail: dasha.shvedova111@gmail.com



Аглушевич Иван Юрьевич – студент 3-го курса машиностроительного факультета БНТУ. Область научных интересов: 3D-принтеры, аддитивные технологии, виртуальные и натурные испытания сложных механических систем.

Aglushevich Ivan – student of the 3rd year of the mechanical engineering faculty of BNTU. Fields of interest: 3D-printers, additive technologies of fast manufacturing, simulation and “workshop floor” testing of complex load-bearing systems.

E-mail: ivanaglushevich555@gmail.com