



Министерство образования
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Машиностроительный факультет

НИРС МСФ-2024

Сборник материалов

80-й студенческой научно-технической конференции

Секция «Металлорежущие станки и инструменты»

Электронное издание

Минск БНТУ 2024

УДК 621.91.
ББК 34.4.я43
Н68

Редколлегия:

А.В. Ажар, А.А. Данилов, В.А. Данилов, С.С. Довнар, Ю.И. Касач,
Л.А. Колесников, А.Д. Лапука, Е.А. Маркова, А.М. Якимович,
О.К. Яцкевич

Составитель:

Л.А. Колесников

В сборник включены материалы докладов 80-й студенческой научно-технической конференции (секция «Металлорежущие станки и инструменты»).

Белорусский национальный технический университет
Машиностроительный факультет
Кафедра «Технологическое оборудование»
Пр-т Независимости, 65, уч. корп. 6,
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: mstools@bntu.by
<http://www.bntu.by/mstools.html>

© Белорусский национальный
технический университет, 2024

Содержание

Насосы для высоковязких жидкостей: применение и перспективы	
Студент гр. 10305221 Алейников И.А.	5
Моделирование термического растрескивания оксидного покрытия при шлифовании	
Данилович В.С., магистрантка	9
Скайвинг. Технология изготовления зубчатых колес	
Студент гр. 10301121 Делянко Г.П.	14
Концепция термостабилизации прецизионных крупногабаритных станков арктического базирования. Часть А: графическое представление концепции с помощью ИИ	
Студенты гр. 10305222: Жаврид Ю.Ю., Крепская В.Я	18
МКЭ-моделирование исторической робастной башни и её имплементация для создания порталов крупногабаритных станков с помощью ИИ	
Студенты гр. 10305222: Жаврид Ю.Ю., Крепская В.Я.; Болиев Аббос Акбар угли (ТГТУ, Узбекистан)	25
Концепция оснащения бетонной бионической башни аддитивно-субтрактивного станка инерционно-массовыми элементами	
Лапука А.Д., аспирантка; Данилович В.С., магистрантка	33
Концепция применения бионических технологических башен в компоновке аддитивно-субтрактивного карусельного станка	
Лапука А.Д., аспирантка; Данилович В.С., магистрантка; студент гр. 10305121 Мануш Д.А.	42
Динамический анализ рабочего органа центробежной дробилки на воздушной опоре	
Лютарович Д.А., магистрант	51
МКЭ-анализ деформирования крестового стола вертикально-фрезерного станка с помощью ИИ	
Студенты гр.10305120 Максименко А.А.; гр.10305222 Жаврид Ю.Ю., Крепская В.Я.	59
Логические пневматические элементы «И» и «ИЛИ»	
Студент гр.10305121 Стрижак А.Д.	66

Цифровой 3D-реинжиниринг металлорежущих станков лаборатории кафедры «Технологическое оборудование»	
Студенты гр. 10305221: Дервяго Д.Д., Тарасевич А.А., Цыбульский М.А.	74
Специальный проект «Тепловая бионическая башня»	
Бионическая башенная несущая система для базирования и обеспечения вертикальной экосистемы. Часть А: Графическое представление концепции с помощью ИИ	
Студенты гр.10305121, 10305221 Цыбульский М.А., Мануш А.Д, Тарасевич А.А.	87
Вертикальная бионическая башня как самодействующая тепло-механическая экологическая система (экспертно- авторское изложение инновационной студенческо- преподавательской концепции)	
Довнар С.С., доцент; Якимович А.М., профессор; аспирантка Лапука А.Д.	95

УДК 621.9.011

НАСОСЫ ДЛЯ ВЫСОКОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ: ПРИМЕНЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Студент гр. 10305221 Алейников И.А.

Научный руководитель – профессор Якимович А.М.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

В современной промышленности и экологии большое внимание уделяется изучению и управлению процессами, связанными с насосами высоковязких жидкостей. Эти вещества, обладающие повышенной вязкостью, имеют широкий спектр применений, начиная от нефтегазовой промышленности и заканчивая фармацевтикой и пищевой промышленностью. Однако их использование сопряжено с рядом технических и экологических трудностей, связанных с особенностями их поведения в окружающей среде.

Высоковязкие жидкости – это жидкости с вязкостью, на несколько порядков превышающей вязкость воды. Это могут быть как природные образования, так и синтетические материалы. В нефтегазовой промышленности высоковязкие жидкости используются в качестве буровых растворов, для улучшения нефтеотдачи пластов и в процессах гидроразрыва пласта. В пищевой промышленности они служат загустителями и стабилизаторами, в фармацевтике – основой для создания различных лекарственных форм. В строительстве фундаментов и подземных сооружений высоковязкие жидкости используются для укрепления грунта и предотвращения его осадки. Одним из примеров является метод инъекций, при котором высоковязкая смесь цемента и воды вводится в грунт для его уплотнения и увеличения несущей способности. Так же используются для создания тепло- и звукоизоляционных материалов. Например, полиуретановая пена, которая является высоковязкой жидкостью до затвердевания, используется для заполнения пустот в строительных конструкциях, обеспечивая эффективную изоляцию.

Одной из основных проблем, связанных с высоковязкими жидкостями, является их потенциально негативное воздействие на

окружающую среду. В случае утечек или аварий эти вещества могут длительное время оставаться в окружающей среде. Высокая вязкость этих жидкостей затрудняет естественное рассеивание и биоразложение, а также инструментальную очистку почвы и водоемов.

Для минимизации рисков использования высоковязких жидкостей, важно применять комплексные подходы, включающие:

- инженерные решения: разработка и использование более безопасных технологий и оборудования для обработки, хранения и транспортировки.
- регулирование: введение строгих норм и стандартов для обеспечения безопасности на всех этапах жизненного цикла высоковязких жидкостей.
- мониторинг: регулярный контроль состояния окружающей среды в районах, где проводятся работы с высоковязкими жидкостями, для своевременного обнаружения и устранения возможных загрязнений или протечек.
- обучение и тренинги: повышение квалификации персонала, работающего с высоковязкими жидкостями, для обеспечения их компетентности в области безопасности и экологической устойчивости.
- исследования и разработки: инвестирование в научные исследования для поиска новых, более экологически чистых и безопасных альтернатив высоковязким жидкостям, а также улучшения существующих технологий их обработки и утилизации.

Второй проблемой использования высоковязких жидкостей является трудности их перекачки с помощью насосов. Основные трудности при их перекачке:

- повышенное сопротивление потоку, что может привести к перегрузке двигателя насоса и снижению его производительности;
- забивание и закупорка насоса, клапанов и трубопроводов твердыми частицами или их агрегатами;
- повышенный износ насосных элементов, вызванные высокой вязкостью жидкости;
- нестабильность потока и колебания давления, что повышает вероятность повреждения оборудования и трубопроводов;

- запуск и остановка насоса, работающего с высоковязкими жидкостями, может быть сложным и требовать специальных процедур и оборудования.

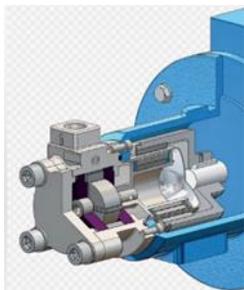
Выбор типа насоса зависит от множества факторов, включая вязкость жидкости, ее химические свойства, требуемый объем и давление потока, а также условия эксплуатации насоса. В настоящее время для перекачки высоковязких жидкостей используются следующие типы насосов:

- шнековые насосы (также известные как винтовые насосы), рисунок 1, а. Эти насосы идеально подходят для перекачивания высоковязких, абразивных и пастообразных жидкостей. Они работают за счет вращения винтов (шнеков), которые захватывают жидкость и перемещают ее к выходу.
- роторно-пластинчатые насосы (рисунок 1, б). Эти насосы используются для перекачивания вязких и загрязненных жидкостей с низкой скоростью потока. Они работают за счет вращения внутреннего ротора внутри статора с фиксированными пластинами, создавая полости, которые постепенно заполняются жидкостью и перемещают ее к выходу.
- шестеренные насосы (рисунок 1, в) – подходят для перекачивания вязких нефтепродуктов, масел и других жидкостей с низкой до средней вязкостью. Они работают за счет вращения двух или более шестерен, которые захватывают жидкость в межзубцовых пространствах и перемещают ее к выходу.

С учетом растущего спроса на высоковязкие жидкости в различных отраслях промышленности, важность разработки и внедрения более безопасных и экологически устойчивых технологий становится все более актуальной. Продолжительные исследования и совместные усилия ученых, инженеров и регулирующих органов могут способствовать созданию таких насосов, которые позволят эффективно использовать высоковязкие жидкости, минимизируя при этом их негативное воздействие на окружающую среду.



а)



б)



в)

Рисунок 1 – Некоторые типы насосов для перекачки высоковязких жидкостей

Таким образом, использование насосов для высоковязких жидкостей представляет собой перспективное направление исследований, которое может привести к созданию новых технологий с улучшенными свойствами и более широкими возможностями применения. Путем сочетания инноваций, строгого регулирования и повышения осведомленности можно достичь баланса между эффективным использованием, а также защитой окружающей среды.

УДК 661.862

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ОКСИДНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Данилович В.С., магистрантка

Научный руководитель – профессор Яцкевич О.К.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: mstools@bntu.by

Шлифование оксидной керамики требует тщательного учета множества параметров для достижения высокого качества обработки и минимального износа инструмента. Значительную долю применяемых для плазменного напыления порошков составляют керамические материалы, используемые для формирования защитных покрытий с высокой твердостью, химической стойкостью, низкой тепло- и электропроводностью. Типичными представителями покрытий данного типа являются плазменные керамические покрытия на основе широкодоступного и дешевого оксида алюминия (Al_2O_3).

Основной недостаток, сдерживающий распространение износостойких покрытий данного типа – низкая прочность сцепления с металлической основой. Основная причина растрескивания и отслаивания покрытий под нагрузкой – значительного отличия в свойствах покрытия и основы, а также наличия высоких остаточных напряжений после остывания покрытия.

Анализ существующих методов повышения прочности сцепления керамических покрытий показал, что решение этой проблемы достигается, как за счет подготовки поверхности, создания промежуточных переходных слоев и воздействия на уже сформированные покрытия, так и модификации самих напыляемых порошков. Среди указанных последний методов имеет наибольшие перспективы, поскольку позволяет одновременно решать проблемы повышения прочности сцепления и обеспечивать управляемость свойствами формируемых покрытий.

При шлифовании в зоне контакта «шлифовальный круг» – «деталь» могут возникать локальные высокие температуры из-за особенностей процесса микрорезания абразивными зёрнами. Локальный нагрев изменяет напряжённое состояние

поверхностного слоя. Если остаточные напряжения в поверхностном слое превысят по величине временное сопротивление материала к разрыву, то образуются прижоги. Прижоги сопровождаются местными трещинами, снижают твёрдость и износостойкость поверхностного слоя детали. При обработке покрытий из оксидной керамики эти явления усугубляются, как из-за высокой твердости и, соответственно, хрупкости покрытия, так и из-за разных термодинамических свойств покрытия и металлической основы.

Изучим условия разрушения покрытия при локальном повышении температуры из-за неравномерного теплового расширения покрытия и металлической основы посредством термоупругого МКЭ-расчета. В работе представлен оценочный расчет в стационарной постановке модели в виде вала. Необходимо определить температуру, при достижении которой начнет разрушаться оксидное покрытие на металлическом (стальном) вале.

Исходная модель, представленная на рисунке 1, включает три слоя – основа, подоснова и керамическое покрытие на поверхности вала. Слои создавались как отдельные детали, без объединения с предыдущими для оптимального расчета, толщина верхних слоев модели – 1 мм.

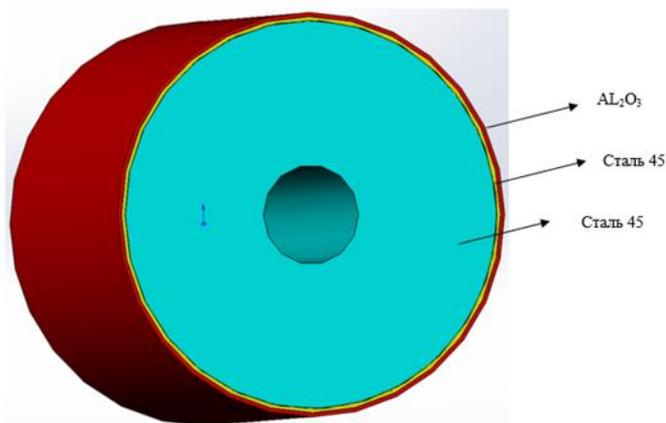


Рисунок 1 – Модель стального вала с покрытием

Моделирование нагрузок осуществлялось с помощью ANSYS, где были заданы размеры КЭ для наружных слоев 0,2 мм и

внутренних 1-2 мм. Параметры используемых материалов представлены в таблице 1.

Известно, что температура от прижога не распространяется дальше, чем на 1 мм в ширину и 0.5 мм в глубину. Поэтому в МКЭ-модели на выделенную площадку слоя керамики приложили температуру 1000°C, а во внутренних слоях стали задали температуру окружающей среды 22°C (рисунок 2).

Таблица 1 – Параметры материалов [1, 2, 3]

Параметры	Сталь 45	Оксид алюминия
Плотность, Кг/м ³	7850	3700
Модуль упругости, ГПа	200	320
Коэффициент Пуассона	0,3	0,23
Теплопроводность, Вт/м×°С		
Коэффициент теплового расширения, ×10 ⁻⁶ 1/°С	12	7

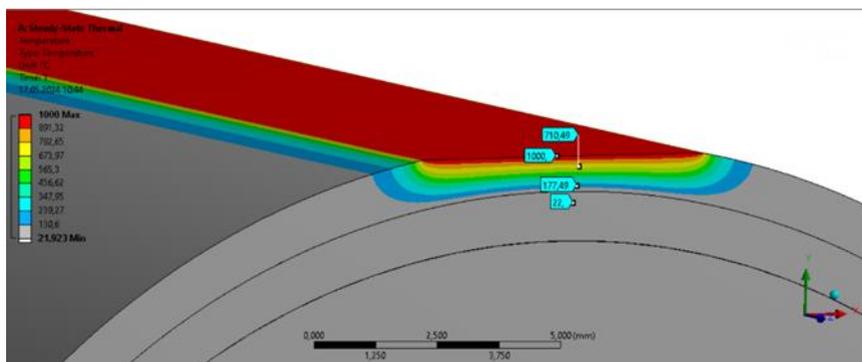


Рисунок 2 – Распределение температур в поверхностном слое

При приложенной температуре в 1000°C основной слой, состоящий из стали 45, практически не подвергается деформациям, а характер перемещений свидетельствует о расширении заготовки под действием температурного влияния. На рисунке 3 представлена картина эквивалентных напряжений, максимальное значение напряжения 2617 МПа достигается в верхнем слое керамики.

Исходя из картины минимального и максимального напряжения (рисунок 4), можно сделать вывод, что напряжение

сжатия почти в 3 раза превышает напряжение растяжения. Это происходит из-за разницы коэффициента линейного теплового расширения между сталью и оксидом алюминия, который равен для стали 12×10^{-6} , а для оксида алюминия 7×10^{-6} , в процессе нагревания оксид алюминия начинает расширяться.

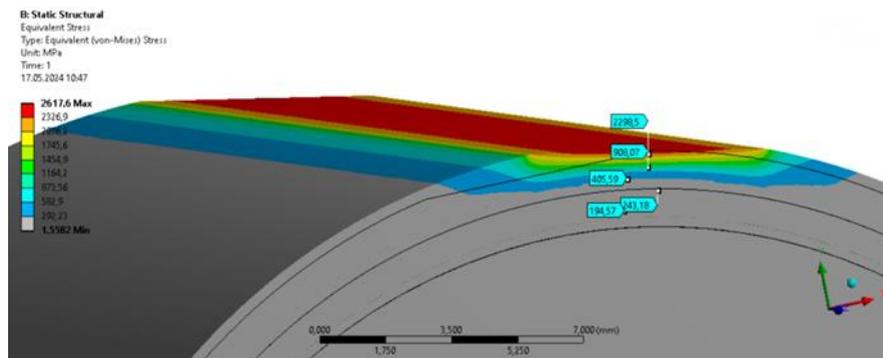


Рисунок 3 – Эквивалентные напряжения

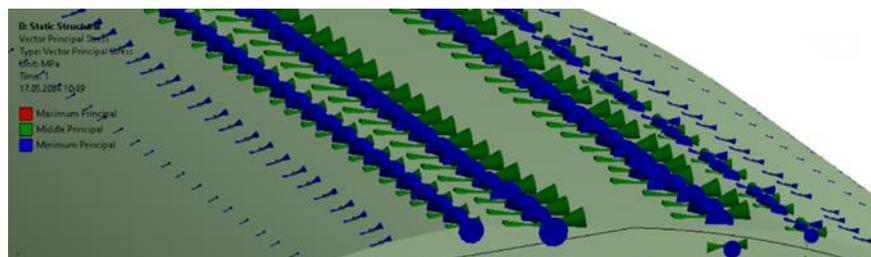
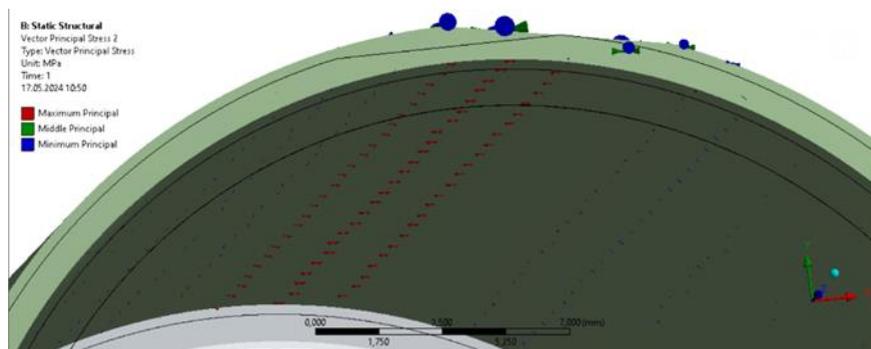


Рисунок 4 – Напряжения сжатия и растяжения

На границе стыка оксида алюминия и стали касательные напряжения составляют 272 МПа. Из этого можно сделать вывод, что полученные касательные напряжения при приложенной температуре 1000°C превышают почти в 3 три раза допустимые касательные напряжения, которые варьируются (по экспертным оценкам) от 20 до 100 МПа для оксида алюминия [3, 4, 5], возникающие из-за разницы коэффициента теплового расширения, что приводит к разрушению покрытия и предположительно к его отслаиванию. Поэтому, в данном опыте, температуру на поверхности последовательно уменьшали до 300°C. В этом случае касательные напряжения составляют 77 МПа (рисунок 5), что является меньше допустимых. При такой температуре в зоне резания при шлифовании отслаивание керамического покрытия маловероятно.

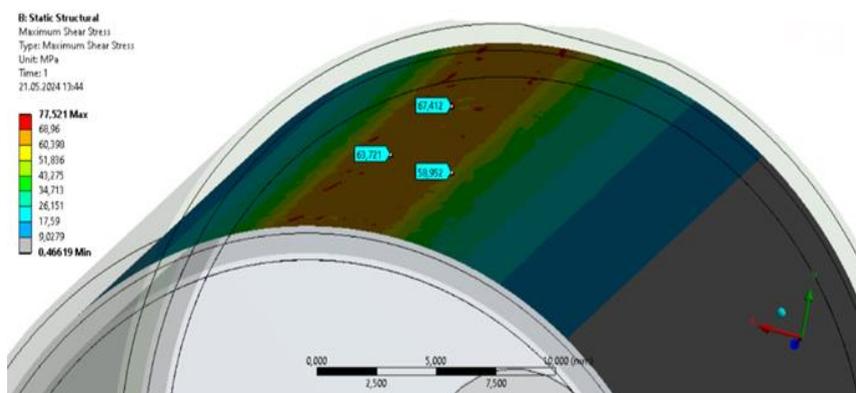


Рисунок 5 – Касательные напряжения при 300°C

Таким образом, оксид алюминия хоть и является твердым материалом с высокой температурой плавления (2072°C), что делает его устойчивым к высоким температурам в процессе обработки, может испытывать термические напряжения и деформации при высоких температурах, что приводит к снижению качества поверхности, превышению допустимых напряжений, а вследствие к отслаиванию и разрушению покрытия.

Литература

1. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: справочник/ Х. Уонг. – М.: Атомиздат, 1979. – с.
3. Машиностроительные материалы: Краткий справочник / В.М. Раскатов, В.С. Чуенков, Н.Ф. Бессонова, Д.А. Вейс. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1980. – 511 с.
3. Локтев Д., Ямашкин Е. Методы и оборудование для нанесения износостойких покрытий // Наноиндустрия. 2007. №4. – С. 18–25.
4. Тулина, А.А. Исследование трибологических характеристик вакуумно-дуговых покрытий на основе системы оксида алюминия // Молодежный Вестник УГАТУ 2023. №3(29). – С.145–14.
5. Пшеничный А.Д, Савченко Н.Л., Саблина Т.Ю., Севостьянова И.Н., Кульков С.Н. Физико-механические свойства и деформационное поведение пористой керамики из плазмохимических порошков Al_2O_3 , $ZrO_2(MgO)$ // Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении: сборник трудов Международной конференции, г. Томск, 9-11 июня 2016 г. — Томск : Изд-во ТПУ, 2016. – С. 260-266.

УДК 621.9.07

СКАЙВИНГ. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Студент гр. 10301121 Делянко Г.П.

Научный руководитель – ст. преподаватель Касач Ю.И.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Power Skiving (скайвинг или силовое точение, в некоторых источниках) – это технология изготовления зубчатых колёс, являющаяся совмещением процессов зубофрезеровки и зубодолбления и используемая для получения как внешнего, так и внутреннего зубчатого профиля. Этот метод был разработан в начале XX века, он является долблением заготовки с

одновременным вращением. Также метод обработки можно сравнить с фрезерованием многозаходной червячной фрезой [1].

В последние годы, с развитием технологии ЧПУ и инструментальных материалов, обработка методом скайвинга постепенно показала свои большие потенциальные преимущества. Для обработки скайвингом известными производителями были разработаны высококлассные станки.

Первый патент на скайвинг был зарегистрирован в Германии в 1910, поэтому технологию нельзя считать инновационной. В течение целого столетия метод обработки не применялся из-за ряда технологических ограничений, как со стороны программного обеспечения, так и металлорежущего оборудования: не было возможности обеспечить надежность, точность и скорость обработки. В настоящее время скайвинг является рациональной в использовании и высокопроизводительной технологией обработки зубчатых профилей

Использование технологии силового точения дает возможность обрабатывать деталь за один установ при обработке на многоцелевом станке или обрабатывающем центре даже без специализированного оборудования. Это помогает потратить меньше времени на обработку, упростить техпроцесс изготовления изделия, уменьшить погрешности, неизбежно возникающие в процессе переустановки обрабатываемой детали на разные станки, устраняет проблему выставления детали заново. [2]

Сущность метода определяется геометрическим расположением инструмента и заготовки относительно друг друга. При обработке зубчатых колес инструмент и заготовка вращаются вокруг своей оси, а заготовка одновременно подается вдоль оси вращения. Как показано на рисунке 1, параметры настройки инструмента Σ , a , L используются для определения угла поворота вала, межцентрового расстояния и расстояния смещения между инструментом и заготовкой соответственно. $S_I(x_I, y_I, z_I)$ – фиксированная система координат заготовки, которая вращается вокруг оси z_I и перемещается вдоль нее. $S_w(x_w, y_w, z_w)$ жестко закреплена на заготовке, и ее исходное положение совпадает с S_I . $S_2(x_2, y_2, z_2)$ – фиксированная система координат инструмента, который вращается вокруг оси z_2 . $S_c(x_c, y_c, z_c)$ – жестко закрепленная на инструменте система координат, исходное

положение которой совпадает с $S2$. R – вектор положения инструмента.

Если угловая скорость инструмента ω_c , а осевая скорость подачи заготовки вдоль оси z_I равна f , то угловая скорость заготовки ω_w может быть описана как

$$\omega_w = \frac{Z_c}{Z_w} \omega_c + \frac{f}{p} \quad (1)$$

где Z_c и Z_w – количество зубьев инструмента и заготовки соответственно;

p – параметр спирали, который может быть выражен как

$$p = \frac{p_z}{2\pi} \quad (2)$$

где P_z – направление спирали на опорный цилиндр заготовки.

Режущие кромки зубьев инструмента для скалывания могут быть определены как начальная кромка "А", которая является самой первой боковой кромкой, подходящей к заготовке, кромка углубления "R", которая является последней боковой кромкой, отделяющейся от заготовки, и верхняя кромка "Т" [3].

Технологию скавинга можно представить в виде сочетания процесса зубофрезерования червячной фрезой с процессом зубодолбления. В отличие от зубофрезерования, процесс формирования стружки при скайвинге происходит с изменением условий резания: в области выхода кромки из материала передний угол становится отрицательным; по этой причине метод обработки осуществляется за несколько проходов.

Режущий инструмент представляет собой фрезу с особым расположением режущих кромок. Инструмент может быть изготовлен как цельным, так и сборным (рисунок 2). Повернутое расположение режущей пластины в корпусе значительно повышают эффективность удаления стружки из зоны обработки. Корпус инструмента может иметь внутренний подвод СОЖ с подачей непосредственно на каждую режущую кромку пластины.

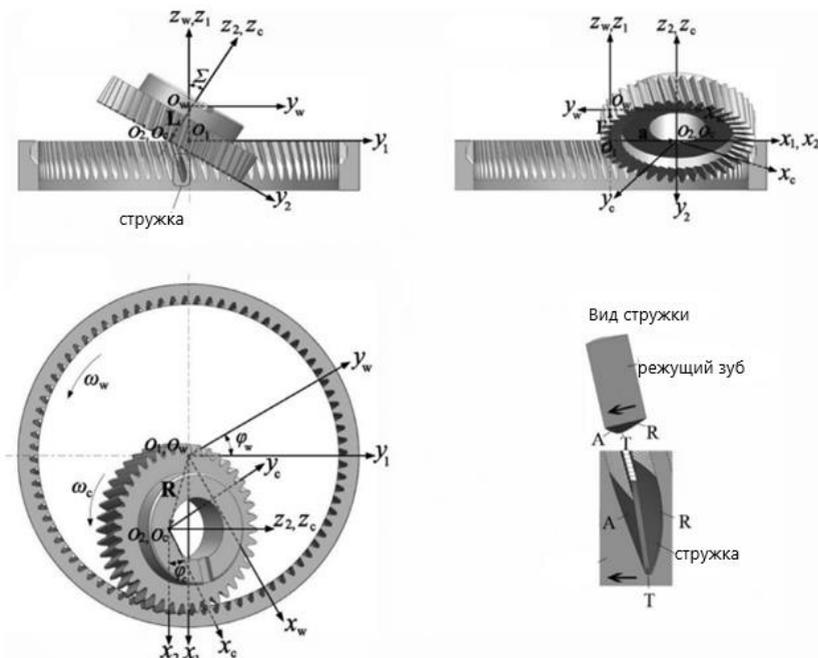


Рисунок 1 – Система координат при скайвинге



Рисунок 2 – Фреза для скайвинга

Хотя технология была разработана в начале прошлого века, она только сейчас начала демонстрировать свои полные возможности. Это стало возможным благодаря значительному прогрессу в современных методах обработки и создании режущего инструмента. Металлообработка не только не стоит на месте, но и активно развивается, комбинируя идеи прошлых лет с современным оборудованием и инструментом. Целью этого является постоянное совершенствование, достижение высокой точности и качества, а также снижение цены получаемого изделия.

Литература

1. Резание материалов. Режущий инструмент в 2 ч. Ч.1: Учебник / А.Г. Схиртладзе, В.А. Гречишников, Н.А. Чемборисов [и др.]. – 1-е изд. – Москва: Изд-во Юрайт, 2020. – 263 с.
2. Марков, А.М. Технологические особенности механической обработки деталей из композиционных материалов / А.М. Марков // Научные технологии в машиностроении. 2014. № 7.
3. Zheng Guoa , Shi-Min Maoa, Liang Huyanb , Dong-Sheng Duana Research and improvement of the cutting performance of skiving tool // Mechanism and Machine Theory Volume 120, February 2018, pages 302-313

УДК 621.9.011

КОНЦЕПЦИЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ПРЕЦИЗИОННЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СТАНКОВ АРКТИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ. ЧАСТЬ А: ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ С ПОМОЩЬЮ ИИ

Студенты гр.1030522 Жаврид Ю.Ю., Крепская В.Я.

Научный руководитель – доцент Довнар С.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Прецизионные крупногабаритные станки (ПКС), например, продольно-фрезерные порталные станки, требуют термостабилизации своей несущей системы (НС), чтобы избежать неравномерных температурных деформаций и потери точности.

ПКС являются важным, элитным видом технологического оборудования. Может оказаться целесообразным их размещение в разных регионах. Данная статья призвана показать эффективность размещения ПКС на арктических территориях, где присутствует ресурс холода. Более далекая перспектива – антарктические территории.

Ядро концепции заключается в удержании станка в некотором континиуме при температуре тающего льда, в водно-ледяной (водно-снежной) среде. В этом случае обеспечивается естественная термостабилизация станка и его окружения на уровне 0°C . Теплота, выделяющаяся при работе станка, осуществляет плавление некоторого количества льда. Так сохраняется нулевая температура, а, следовательно, сдерживаются термоупругие деформации ПКС. Разумеется, должна существовать некоторая внешняя система термостабилизации (ВСТ) континиума (хотя бы для восстановления запасов льда). Однако, в холодных арктических регионах энергетические затраты на ВСТ не должны быть велики.

Для представления и визуализации концепции представляется рациональным привлечь искусственный интеллект (ИИ). Речь идет о генерации реалистических 3D-изображений по текстовым запросам (ИИ типа «Text-to-graphics»). Вступительное изображение, созданное ИИ открытого доступа Dall-E3, представлено на рисунке 1. Здесь льдина 1, служащая базисом станка 2, плавает по бассейну 3. Бассейн наполнен тающими льдинками 4. Это указывает, что температура всех объектов стремится к 0°C .

Предполагается, что базис выполняет две функции. Во-первых, он работает стоком теплоты от станка и стремится стабилизировать температуру НС станка на уровне 0°C . Во-вторых, массивный базис поглощает вибрации станка, так как он сам опирается на специфическую заделку с низкой упругостью – воду бассейна. Это превращает большинство рабочих частот станка в зарезонансные частоты (зарезонансное демпфирование).

На рисунке 2 представлен вариант концепции для портального станка 1. Видимая часть льдины-базиса 2 опирается на погруженную часть 3. Бассейн с тающим льдом предполагается достаточно глубоким. Дополнительную термостабилизацию станка может осуществлять снег (иней) 4, подаваемый к НС через воздух.

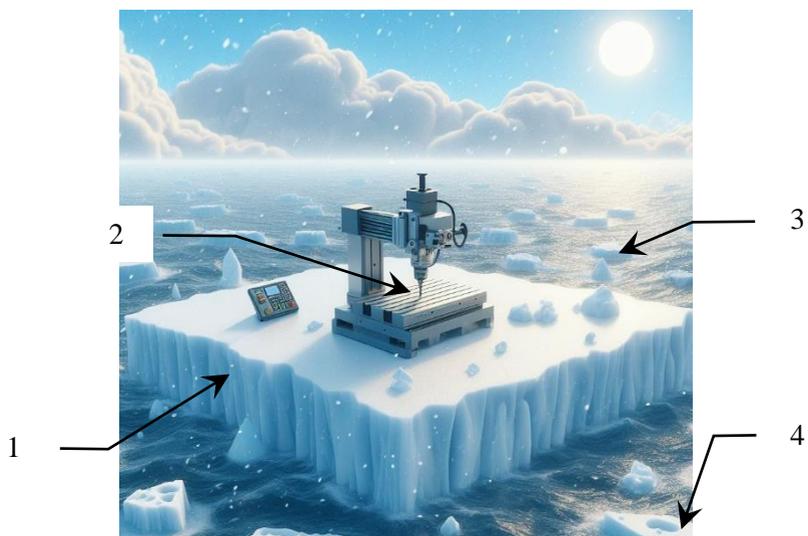


Рисунок 1 – Вступительная схема концепции: станок 2 плывет на льдине-базисе 1 по бассейну 3, термостабилизированному тающими льдинками 4

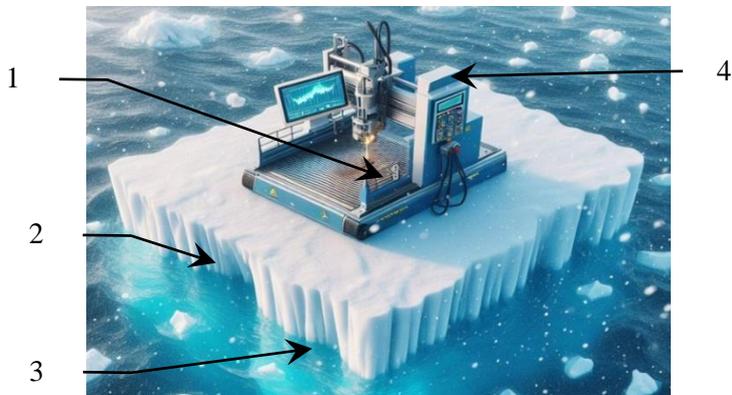


Рисунок 2 – Портальный станок с ЧПУ, работающий с высокоэнергетическими лучами 1, опирается на базис-льдину, имеющую надводную часть 2 и подводную часть 3: 4 – снег

Открытый бассейн является условностью. Термостабилизация предполагает закрытое помещение (ангар 1 на рисунке 3). Также

условностью является льдина. Вместо неё должна быть платформа 2 в бассейне с тающим льдом 3. Такая схема приемлема для станка любого типа, например для токарного станка 4 на рисунке 3.

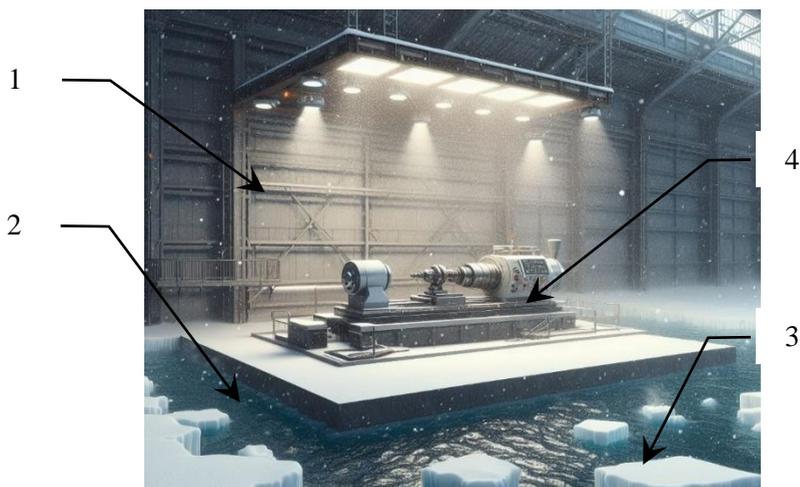


Рисунок 3 – ПКС токарного типа (4) заключен в ангаре 1 и опирается на платформу 2, находящуюся в бассейне с тающим льдом 3

Платформа может быть фиксированной 1 (опирается на дно бассейна – рисунок 4, а) или плавающей 2 (режим «льдины» на поверхности бассейна – рисунок 4, б). В обоих случаях платформа должна находиться при температуре тающего льда и служить термостатом. Жесткое или плавающее опирание на дно бассейна – это вопрос выбора конструктивного решения для защиты от колебаний именно конкретного станка.

Представление концепции на рисунке 4 проведено для одностоечных компоновок аддитивно-субтрактивных станков фрезерного типа.

На рисунке 5 представлен порталный станок 1 с бетонной ячеистой платформой 2. Ячейки 3 могут сообщаться друг с другом и с термостатичным (0°C) бассейном 4.



а

б

Рисунок 4 – Базирование ПКС фрезерного типа на зафиксированную платформу 1 (а) или на плавающую в бассейне платформу 2 (б)

Заполнение платформы смесью воды и льда должно обеспечить общую термостабилизацию ПКТ и некоторое демпфирование вибраций.



Рисунок 5 – Портальный станок 1, опирающийся на бетонную платформу 2 с ячейками 3 в бассейне 4

Размещение льда в составе несущей системы станка обсуждалось ранее [1]. Намораживание льда из водно-ледяной смеси (ВЛС) в ячейках платформы должно повысит статическую жесткость станка и несколько поднять резонансные частоты НС.

Расположение станков на «ледяных» термостабилизированных платформах в каналах, защищенных ангарами от внешних температурных воздействий, открывает интересную возможность (рисунок 6). Крупногабаритный станок 1 или большая деталь (например, ротор турбины гидроэлектростанции) может перемещаться (плыть) между различными производственными позициями поточной линии – канала 2 на своей ледяной платформе 3 как на транспортере.

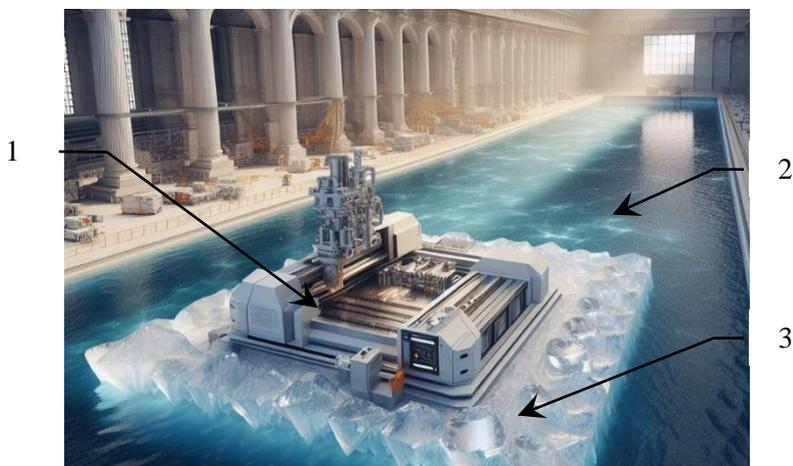


Рисунок 6 –>Addитивно-субтрактивный двух-портальный станок 1 плывет на ледяной платформе 3 по каналу 2 (поточной линии) с температурой ВЛС (0°C)

Основные черты концепции:

- термостабилизация ПКС (для уклонения от термоупругих деформаций) путем использования местных ресурсов холода в арктических (антарктических) регионах;
- термостабилизация ПКС именно на температуре 0°C путем создания бассейна со смесью воды и тающего льда;

- использование для термостабилизации объекта «платформа» с чертами льдины. Платформа находится в бассейне. Станок помещен на платформу;
- платформа выполняет в том числе функцию станины станка (они могут быть интегрированы друг с другом);
- платформа может (как опция) плавать в бассейне. Это должно обеспечивать как термостабилизацию, так и гашение вибраций;
- бассейн с платформой и ПКС заключен в ангар. Как опция, в ангаре может генерироваться рассеивание снега (инея) для дополнительной термостабилизации ПКС через таяние на нем снежинок и стекание их каплями;
- ледяные массивы могут создаваться в платформе и НС в различных ячейках для повышения статической и динамической жесткости системы.

Открытые вопросы концепции:

- балансировка плавающей платформу при перемещении крупных частей станка;
- коррозионная защита НС станка и направляющих от действия воды и снега;
- функционирование систем управления, приводов и систем смазывания при пониженных температурах;
- защита персонала от постоянного холода и максимальная автоматизация функционирования станка.

Литература

1. Довнар, С.С. 3D-моделирование и МКЭ-оценка системы слой-конвертов для поддержки легкого 5-координатного станка / С.С. Довнар, О.К. Яцкевич, К.Д. Макаренко, А.Г. Гринкевич, Т.А. Хруцкая // XI Форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства : сборник материалов, г. Минск, 12-16 декабря 2022 г. / Белорусский национальный технический университет. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 74–77. <https://rep.bntu.by/handle/data/126635>

УДК 621.9.011

МКЭ-МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОРИЧЕСКОЙ РОБАСТНОЙ БАШНИ И ЕЁ ИМПЛЕМЕНТАЦИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПОРТАЛОВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СТАНКОВ

Студенты гр. 10305222: Жаврид Ю.Ю.¹, Крепская В.Я.¹,
Болиев Аббос Акбар угли²

Научные руководители – Довнар С.С.¹, Яцкевич О.К.¹, Касач Ю.И.¹,
Мардонов Умиджон Тохир угли², Лапука А.Д.¹

1) Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

2) Ташкентский государственный технический университет
Ташкент, Узбекистан

Термины и аббревиатуры

ТБ – технологическая башня;

НС – несущая система;

ИРНС – историческая робастная несущая система (давнее сооружение, выдержавшее по ходу времени ряд экстремальных нагрузжений и доказавшее этим свою робастность);

ИРБ – историческая робастная башня (в работе рассматриваются два близких типа таких башен – белорусская ИРБ «Белая Вежа» и узбекский вариант конической башни ИРБ «UzCone»);

АйванПортал – вариант компоновки порталной технологической машины, когда две технологические башни соединены стеной, в которой сделан технологический проем с профилем айвана (структура подобна среднеазиатскому пештаку)

ИИ – искусственный интеллект (в данной работе открытая система «text – to – graphics» DALL-E3)

Узбекская промышленность испытывает потребность в крупных порталных технологических машинах, например, в порталных продольно-фрезерных и продольно-шлифовальных станках. Портал – это всегда две колонны (стойки, башни), соединенные траверсами (поперечинами, стенами, мостиками и т.д.). Требованием узбекского машиностроения является

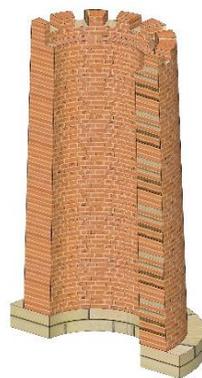
робастность (устойчивость, живучесть, прочность, жесткость НС) порталных машин. Белорусское станкостроение (например, ОАО «МЗОР») имеет существенный опыт создания робастных порталных станков. В данной работе обсуждается возможность проектирования робастных порталов на основе проверенных временем ИРНС. Одним из них является известная белорусская башня «Белая Вежа» (рис.1, а), имеющая 800-летнюю историю. Поэтому она может считаться ИРБ.



а



б



в

Рисунок 1 – Историческая белорусская башня «Белая Вежа» в г.Каменец (XIII-ый век): а – натуральный вид; б – вид, сгенерированный ИИ; в – 3D-модель несущей системы (НС)

Прежде всего, текстовый образ башни был использован для генерации её возможных геометрических вариаций. Один из вариантов спонтанного варьирования с помощью ИИ отражен на рис. 1, б. Здесь ИИ предложил 10(12)-гранную башню вместо конической.

Реалистичная 3D-модель башни в половинном виде представлена на рис. 1, в. Модель «Белой Вежи» была подвергнута виртуальным испытаниям методом конечных элементов (МКЭ). Сетка конечных элементов дана на рис. 2, а. Башня была нагружена одновременным действием силы тяжести и ураганного ветра с напором в 600 Па (рис. 2, б).

Картина эквивалентных напряжений σ_e (рис. 2, в) показывает постоянство напряжений в средней и нижней частях башни (маркеры 0,52674 МПа и 0,54581 МПа). Лишь на стыке башни с основанием наблюдается небольшая локальная концентрация напряжений (0,71762 МПа). Башню следует охарактеризовать как равнопрочную. Это обусловлено, прежде всего, нарастанием толщины её стен сверху вниз.

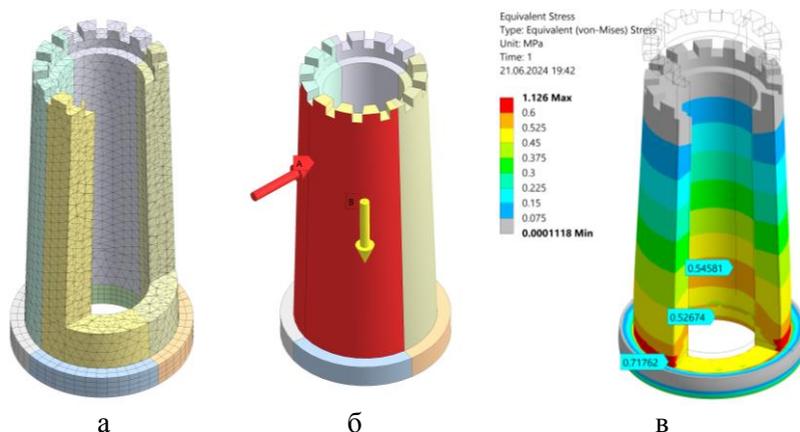


Рисунок 2 – МКЭ-моделирование ИРБ «Белая Вежа»: а – сетка конечных элементов; б – нагружение силой тяжести и ураганным давлением ветра; в – распределение эквивалентных напряжений σ_e (МПа; $\times 16000$)

Результаты МКЭ-оценки башни на рис. 3 показывают, что сооружение практически «не замечает» ураганный боковой ветер (и поэтому является действительно робастным). На рис. 3, дана картина векторов главных напряжений. Главные напряжения σ_1 и σ_2 повсюду близки к нулю и незаметны на рис. 3, а. Присутствуют только стрелки минимального главного напряжения σ_3 . Они всегда направлены вниз, по силе тяжести.

Распределение напряжения σ_3 на рис. 3, б показывает почти полное постоянство (и малую величину сжатия) по линии -0,55999 МПа до 0,55864 МПа. Вертикальное сжатие не угрожает прочности, а боковая нагрузка почти незаметна.

Итак, башню «Белая Вежа» можно считать ИРБ (вариант ИРНС) и использовать как проверенный образец при проектировании колонн и стоек технологических машин.

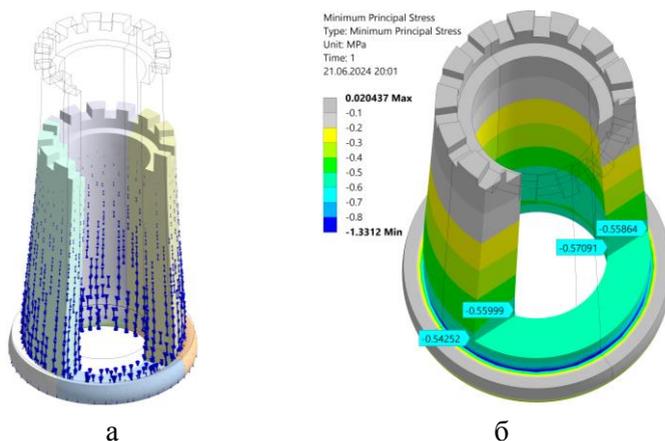


Рисунок 3 – Картины векторов главных напряжений (а; $\times 40000$) и минимального главного напряжения σ_3 (б; МПа: $\times 16000$) в ИРБ «Белая Вежа»

Оказалось, что геометрические формы «Белой Вежи» близки к очертаниям классических узбекских исторических башен. Общими чертами являются конусообразность, направленная вверх, и утолщение стен, ориентированное вниз. Далее узбекские конические башни будем обозначать ИРБ «UzCone». Базы фотографий узбекских башен, находящиеся в распоряжении использованного в работе ИИ, позволяют, надеемся, предложить их обобщенный облик (рис. 4). Фон пустыни использован ниже, как маркер того, что речь идет о башнях и порталах Средней Азии.

Башня на рис. 4, а выглядит как сравнительно податливое сооружение с небольшой конусностью. Она имеет приблизительно круговые поперечные сечения.

Башня на рис. 4, б сформирована ИИ как более жесткая структура с переменным сечением. Внизу башня является почти круглой, а вверху – квадратной.

III-генерация геометрических образов позволяет создать обобщенную геометрию не только субтильных башен (рис. 4), но и приземистых башен, способных быть основаниями для разных технических структур (рис. 5).



а



б

Рисунок 4 – III-образы вытянутых узбекских ИРБ-башен «UzCone» конусного типа (а) и типа «круг – квадрат» (б)

Башня на рис. 5, а является цилиндрической. Она может быть полезна как колонна, например, радиальной машины. III-образ с рис. 5, а интересен, в частности для создания аддитивно-субтрактивного лазерно-сверильного или разрезного станка.

Реальные узбекские исторические порталы – это композиции из башен, порталной стены и айвана (проема со стрельчатой аркой). Их описывает рис. 6. Такие порталы обозначают обычно термином «пештак».



а



б

Рисунок 5 – ИИ-образы узбекских ИРБ-башен большого диаметра цилиндрического (а) и конусного типа (б)



а



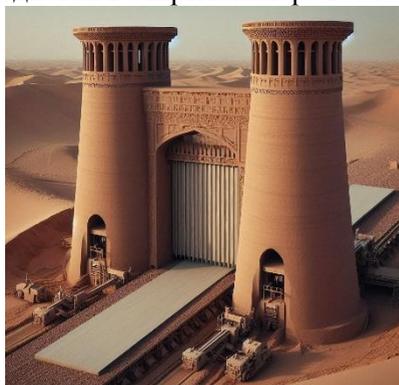
б

Рисунок 6 – Исторические узбекские порталы «пейштак» с парами башен и центральными нишами – айванами в вариантах (а, б)

Техническая ИИ-интерпретация исторических порталов дана на рис. 7. Обратим внимание, что башни, ограничивающие и удерживающие порталную стену (рис. 7, а), являются практически полными копиями ИРБ «Белая Вежа». Это ИИ-сходство возникло спонтанно. Оно никак не стимулировалось в текстах запросов.

Данное сходство, по-видимому, обусловлено просто близостью решений ИРБ «Белая Вежа» и ИРБ «UzCone».

Пара башен на рис. 7, б оказалась самопроизвольно близкой по форме к стволам деревьев. Данные башни похожи на стволы дубов. Это известные бионические решения. Так, форма дуба использовалась при построении в XIX-ом веке английского маяка Эдистон в открытом море возле Плимута.



а



б

Рисунок 7 – III-образы ИРНС «АйванПортал» с симметричными башнями (а; типа «Белая Вежа») и с бионическими башнями (б; типа «маяк Эдистон»)

На рис. 8 представлены варианты порталов с усиленной поддержкой несущей системы. На рис. 8, а типовые башни окружены с внешних сторон столбчатыми структурами. Пара башен на рис. 8, б выглядит весьма робастно. Основания башен увеличены. Это, в частности, важно для сейсмостойчивости. Конусность башен усилена. В верхних частях башен выделены развитые фонари с обратной конусностью. Потенциально они могут быть полезны как инерционно-массовые демпферы технологических и сейсмических колебаний портала.

Итак, выявлена близость геометрии исторических робастных несущих систем «Белая Вежа» и «UzCone». Конические башни с утолщающимися к низу стенами перспективны для конструирования порталных машин повышенной робастности для среднеазиатского региона.



а



б

Рисунок 8 – ИИ-образы ИРНС «АйванПортал» со внешней поддержкой башен (а) и с башнями сильной конусности (б)

По результатам МКЭ-анализа и генерации ИИ-образов предлагаются следующие практические оценки:

- для создания порталных машин весьма интересна схема «АйванПортал» с башнями типа «Белая Вежа»-«UzCone»;
- ограничивающие башни должны жестко поддерживать порталную стену с айваном;
- башням «АйванПортала» следует придавать увеличенные размеры горизонтальных сечений;
- интересным смотрится умышленное увеличение оснований и увеличение конусности башен «АйванПортал»;
- профиль айвана (проема) может быть весьма изменчив; следует подстраивать его под конкретную порталную машину;
- ожидается, что порталные машины по схеме «АйванПортал» будут обладать повышенной сейсмоустойчивостью;
- схема «АйванПортал» интересна как для создания крупногабаритных продольных станков, так для проектирования металлургических и химических поточных линий.

УДК 621.9.011

КОНЦЕПЦИЯ ОСНАЩЕНИЯ БЕТОННОЙ БИОНИЧЕСКОЙ БАШНИ АДДИТИВНО-СУБТРАКТИВНОГО СТАНКА ИНЕРЦИОННО-МАССОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Лапука А.Д., аспирантка; Данилович В.С., магистрантка
Научный руководитель – доцент Довнар С.С.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Термины и аббревиатуры

- АСС – аддитивно-субтрактивный станок, например, станок в котором производятся лазерные наплавочные и лезвийные стружкосъемные операции над деталями
- АСО – аддитивно-субтрактивная обработка, сочетание для одной детали аддитивных и субтрактивных манипуляций на одном станке АСС (например, цепочка ПОЛФО: подготовительная обработка детали – лазерное напыление покрытия – финишная обработка покрытия детали)
- ТСБ – технологическая станочная башня
- ББ – бионическая башня (пустотелая оболочечная конструкция бионической формы) – вариант ТСБ
- БФ – бионическая форма (в данной работе - наружная форма ствола ветроустойчивого дерева)
- БББ (Б³) – бетонная бионическая башня (выполненная, например, из фибробетона)
- Фибробетон (УНРС, УНРFRC) – высокостабильный бетон, армированный металлическими волокнами
- ИМЭЛ – инерционно-массовый элемент – контейнер с *грузом*, обладающий существенными массой, жесткостью и достаточной локальной инкапсулированностью. Может иметь внутренние степени свободы, пружины и демпферы (например, маятниковый гаситель)
- Работа относится к крупногабаритным аддитивно-субтрактивным (гибридным) станкам, в которых над деталью производятся цепочки манипуляций по удалению и добавлению материалов (например, ПОЛФО). Для таких машин

сформулирована [1–3] и продвигается концепция расположения инструментов на бионических башнях (ТСБ с бионической формой). Рекомендуется выполнять такие башни из фибробетона, получая объекты типа Б³.

Предлагается (рис. 1, а) компоновка АСС токарно-фрезерной направленности для обработки больших прецизионных упрочняемых валов, труб, оболочек. Деталь 1 установлена в бабках 2, 3 с возможностью вращения. Башня 4 (типа Б³) несет на себе лазерную головку. Башня 5 (тоже типа Б³) несет лезвийные инструменты, например, резцы и фрезы. Две оппозитные башни 4, 5 позволяют производить аддитивную и субтрактивную обработки одновременно. В компоновку станка включена вторая рабочая позиция с ещё одной башней (типа Б³) 6 и обрабатываемой деталью 7 (рис. 1, б). Детали 1 и 7 расположена параллельно друг другу с двух сторон от «аддитивной» башни 4. Данная башня должна быть способна обрабатывать обе детали.

Дело в том, что аддитивное оборудование (например, лазерная технологическая система) стоит гораздо дороже субтрактивной (режущей оснастки). Поэтому «аддитивную» башню 4 нужно загружать работой в первую очередь по сравнению с «субтрактивными» башнями 5 и 6.

Рис. 1 иллюстрирует следующие этапы движения башен. На рис. 1, а показана лазерная обработка (башня 4) и завершающее финишное резание (башня 5). В это время деталь 7 на рис. 1, б монтируется и предварительно обрабатывается резанием (БББ 6). После завершения обслуживания детали 1 башня 4 поворачивается к детали 7 (промежуточное положение суппорта 8 показано на рис. 1, б) и начинает маневрировать вдоль осей на столе 9 (показан условно) для обработки. Оппозитной для башни 4 становится башня 6.

В двойной компоновке станка ключевая башня 4 почти постоянно работает. На башни 5 и 6 возложены предварительные и финишные лезвийные обработки.

Оппозитные башни 4, 5 (или 4 – 6) не должны сталкиваться своими суппортами. По крайней мере, этого можно избежать поворотами башни 4 в промежуточное положение. Кроме того, подъем-опускание суппортов также позволяет оппозитным башням проходить мимо друг друга при смещениях вдоль детали.

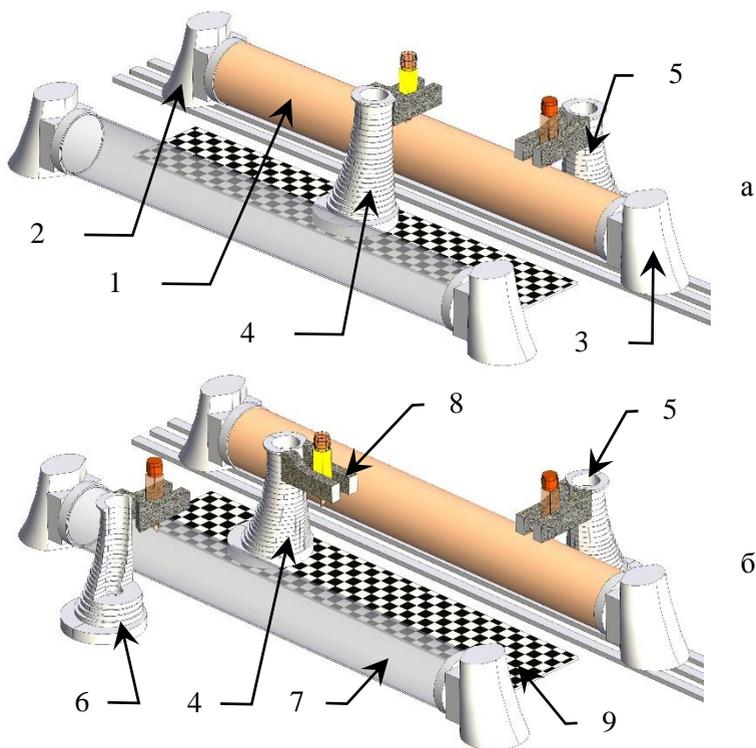


Рисунок 1 – Компоновка аддитивно-субтрактивного станка для обработки деталей типа валов на двух параллельных позициях (1, 7) с разделением времени аддитивной бионической башни 4 и с позиционными субтрактивными башнями 5, 6: а – башни 4,5 обрабатывают деталь 1; б – башня 4 перемещается для обработки детали 7. 2, 3 – бабки; 8 – суппорт; 9 – станина башни

Компоновка любой Б³ показана в двух ракурсах на рис. 2. Башня 1 состоит из слоев бетона, что подчеркнуто её ступенчатой формой. Башня эксцентрично стоит на поворотном столе 2. Эксцентричность нужна для создания бионического уклона (А1), уравновешивающего свешивание (А2) суппорта 3.

В общем случае башня в сборе имеет три степени свободы – перемещение горизонтально вдоль станины 9 (рис. 1, б), вращение на поворотном столе 2 (рис. 2) и подъем – опускание суппорта 3.

Дополнительно, внутри суппорта может маневрировать ползун 4 с рабочей головкой 5 (шпindel с инструментом, лазерная головка и т.д.) и приводом 6.

Бетонная башня на рис. 2 может иметь полость 7. В результате Б³ в рамках данной работы напоминает пустотелый, но толстый ствол ветроустойчивого дерева, например, дуба.

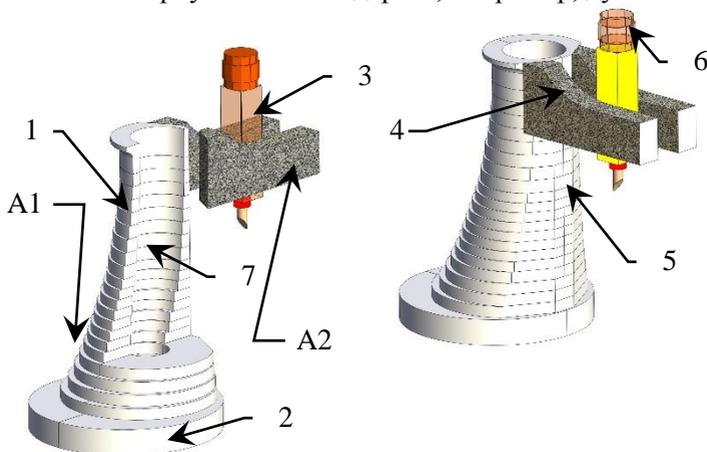


Рисунок 2 – Бионическая башня в сборе:

1 – слои бетона; 2 – поворотный стол; 3 – суппорт с вертикальной подвижностью; 4 – маневровый ползун; 5 – инструмент; 6 – приводная часть. A1 – уклон башни; A2 – свес суппорта.

Первое предложение данной работы – размещать и запечатывать в башенном бетоне объекты, противодействующие резонансным вибрациям высокой станочной башни. Это могут быть ИМЭЛ, известные также как инерционные гасители или tuned-mass dampers (TMD [4]). ИМЭЛ могут быть конструктивно оформлены (рис. 3) как шары 1 или цилиндры 2. Их можно заливать бетоном. После застывания бетона ИМЭЛ оказываются заделанным в бетонные блоки 3.

Таким образом, бионическая башня снабжается распределенным массивом инкапсулированных устройств для постоянного гашения вибраций. Каждый ИМЭЛ так или иначе реализует эффект антирезонанса (за счет своего внутреннего резонанса) и имеет свой узкий диапазон частот эффективного

гашения внешних вибраций. Получается, что в массиве ИМЭЛ должны быть представлены (и перемешаны) устройства с разными резонансными частотами. ИМЭЛ должны работать постоянно и автоматически на энергии колебаний станка.

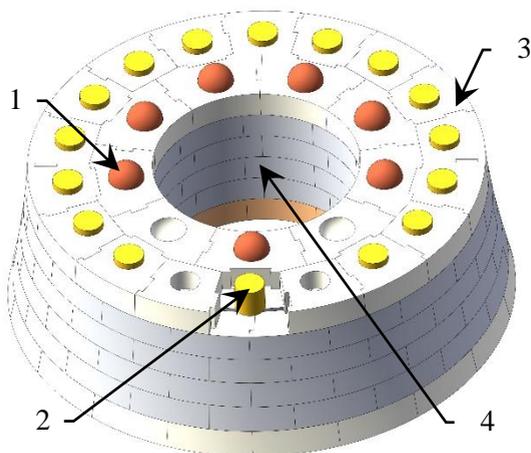


Рисунок 3 – Инкапсуляция ИМЭЛ в форме шаров 1 и цилиндров 2 в бетонные блоки 3 толстых стен бионической башни вокруг вертикальной полости 4

Принципиальная схема ИМЭЛ представлена с помощью ИИ на рис. 4, а. Груз 1 («гиря») раскачивается на цепной подвеске 2 как маятник. Условная жидкость 3 указывает на присутствие демпфирующих эффектов. Контейнер 4 создает внешнюю сферу, которая встроена в бетонную башню (1 на рис. 3). Цилиндрический вариант ИМЭЛ показан на рис. 4, б. Маркеры 5а и 5б обращают внимание на бетонное окружение устройств.

Размещение ИМЭЛ в башне станка в виде сфер, заделанных в бетон, образно отображено ИИ на рис. 5, а. Вторым вариантом (рис. 5, б) является создание многочисленных низкочастотных маятников в полости бионической башни. Данные маятники являются вариацией известного технического решения, когда внутри колонны станка размещают на цепи или тросе груз-противовес. Противовес служит для облегчения вертикального перемещения суппорта, бабки или траверсы.

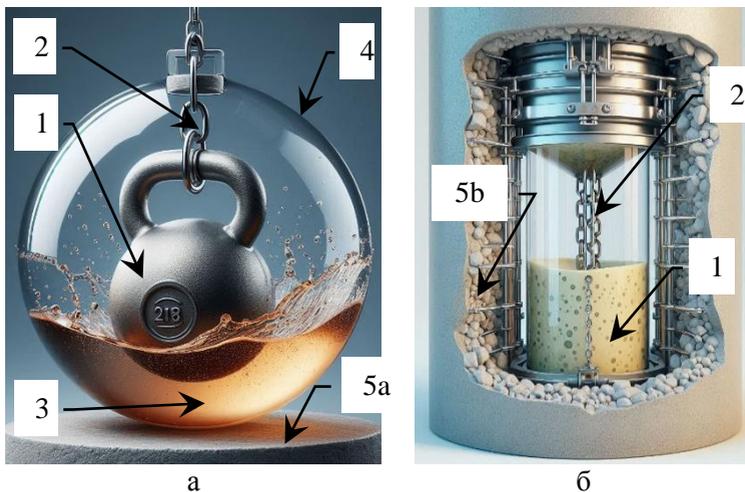


Рисунок 4 – Рисунки ИИ для инерционно-массовых элементов ИМЭЛ в форме шара (а) и цилиндра (б):

1 – груз; 2 – упругая подвеска; 3 – демпфирующая среда; 4 – инкапсулирующий контейнер; 5 – охватывающий бетон

Второе предложение данной работы касается материала тех грузов, которыми оснащаются ИМЭЛ любого вида. Дело в том, что эти грузы инкапсулируются внутри бетонной башни весьма надежно и на долгое время. Следовательно, в грузы (условные «гири» на рис 4, а) можно закладывать особо ценные или рискованные материалы. Назовем их инкапсулированными материалами ИМ. Речь может идти, например, о химических или изотопных составах, которые трудно сейчас переработать в безопасные формы.

Грузы с ИМ можно обозначить как ОЭХ – ответственные элементы хранения. Тогда шары и цилиндры с рис. 3 превращаются в шары хранения (ШХ) и цилиндры хранения (ЦХ). Оболочка груза является первой ступенью защиты внешней среды от инкапсулированного материала. Упругая подвеска груза (вторая ступень) защищает внешнюю среду и ИМ друг от друга в обоих направлениях. Третьей ступенью служит контейнер ИМЭЛ,

например, оболочка шара хранения. Четвертой ступенью является бетонный монолит башни Б³.



а

б

Рисунок 5 – Варианты применения ИМЭЛ в башне Б³:

*а – шары и цилиндры с ИМЭЛ инкапсулированы в бетон башни;
б – ИМЭЛ в виде маятниковых гасителей, свободно раскачиваются
в полости башни (рисунки ИИ)*

Обратим внимание, что пятой ступенью является управляемая подвижность башни в условиях работающего цеха. Башня постоянно оказывается под наблюдением, в том числе фоновым. Кроме того, очень трудно совершить несанкционированное вхождение в постоянно движущуюся и поворачивающуюся несущую систему. К тому же, несущая система (башня Б³) запечатана бетоном со всех сторон.

Условно-образное представление концепции публичного хранения дано на рис. 6. Строгость и информативность рисунка соответствуют современным открытым порталам доступа к ИИ. Ключевым объектом на рис. 6 является груз с ИМ (3). Башня 1 условно сделана прозрачной и имеющей только одну сферу 2 с ИМЭЛ. Изображения, сделанные ИИ, не являются полностью управляемыми исходным текстовым запросом. Поэтому упругая подвеска груза 3 в контейнере 2 представлена весьма абстрактно

(4). Система 5 из каретки и направляющих качения обеспечивает подвижность технологической башни.

Итак, крупногабаритный, постоянно работающий станок с бионическими бетонными башнями оказывается перспективным местом для публичного хранения ценных и рискованных материалов.

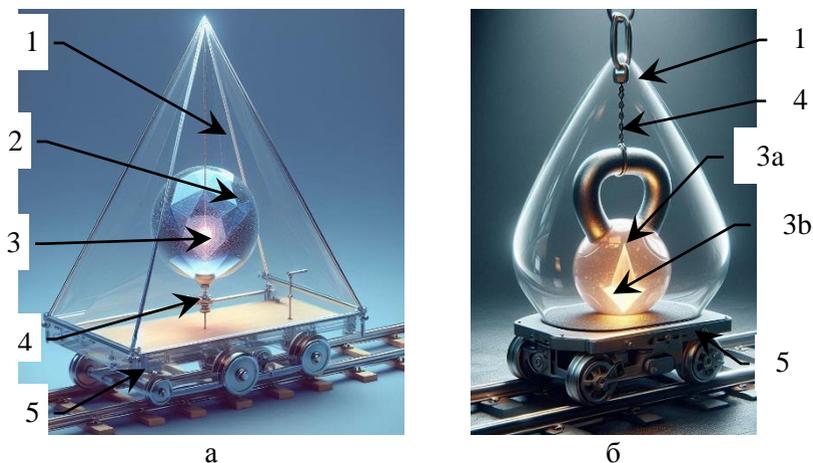


Рис. 6 – Идея подвижной несущей системы для публичного хранения ИМ (представление средствами ИИ в вариантах а, б): 1 – образ башни B^3 ; 2 – образ внешнего контейнера ИМЭЛ; 3 – груз (3а) с ИМ (3б); 4 – образ упругой подвески; 5 – направляющие качения башни

Достоинства предлагаемой концепции:

1. Для предлагаемой парно-параллельной компоновки станка обеспечивается высокая загрузка аддитивной технологической башни, ключевой по стоимости связанного с ней оборудования.
2. Бионические формы башен хорошо противостоят нагрузкам от односторонне размещенных суппортов
3. Компоновка станка позволяет сделать все башни высокоманевренными. Оппозитные башни могут расходиться свободно друг с другом при обработке длинной детали.
4. Количество башен не ограничено. Станок имеет открытую и расширяемую архитектуру.

5. Исполнение башен из бетона обеспечивает им повышенную жесткость.
6. Инкапсуляция инерционно-массовых элементов в бетоне должно противодействовать резонансным колебаниям башен с суппортами.
7. Бетон обеспечивает существенную дополнительную защиту грузам, входящим в состав ИМЭЛ. Это позволяет делать широкий выбор при назначении материалов для грузов ИМЭЛ.
8. Внутри бетонной башни в составе ИМЭЛ можно надежно и публично хранить на постоянной основе инкапсулированные материалы повышенной ценности или повышенного риска.

Литература

1. 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. «Системный анализ и прикладная информатика». 2023;(2):13-23. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-2-13-23>
2. Довнар С.С., Шведова Д.Н. Концепция бетонного бионического портала для крупногабаритного токарного гибридного станка // Беларусь-Китай: контуры инновационно-технологического сотрудничества: сборник материалов науч.-практ. конференции (Минск, 19-20 октября 2023 г.) // сост. М.А. Войтешенок. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 105-107. <https://rep.bntu.by/handle/data/137149>
3. Довнар, С.С. Квадрупольная компоновка для крупного многоцелевого гибридного станка / С.С. Довнар, А.Д. Лапука, С.В. Резник, А.В. Федорец // Инновационное станкостроение, технологии и инструмент: материалы I Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 30 нояб. 2023 г. / М-во пром-сти Респ. Беларусь [и др.]; под общ. ред. М. И. Михайлова. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2024. – С. 31–33. <https://elib.gstu.by/handle/220612/34357>
4. Narayuki Kitamura, Takafumi Fujita, Takayuki Teramoto and Hiromi Kihara, “Design and Analysis of a Tower Structure with Tuned Mass Damper” 9th world conference of Earthquake Engineering 1988 Vol.- III (11).

**КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ БИОНИЧЕСКИХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БАШЕН В КОМПОНОВКЕ
АДДИТИВНО-СУБТРАКТИВНОГО КАРУСЕЛЬНОГО
СТАНКА**

Лапука А.Д., аспирантка; Данилович В.С., магистрантка;
студент гр. 10305121 Мануш Д.А.

Научные руководители: Довнар С.С., Якимович А.М.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Термины и аббревиатуры

- АСС – аддитивно-субтрактивный станок (а также машина – АСМ), например, станок в котором производятся лазерные наплавочные (аддитивные) и лезвийные стружкосъемные (субтрактивные) операции
- БТБ – бионическая технологическая башня (а также ББ – бионическая башня)
- БББ (Б³) – бетонная бионическая башня (выполненная, например, из фибробетона)
- ИИ – искусственный интеллект (в данной работе – класса «text-to-graphics»). Изображения генерируются библиотекой ИИ (DALL-E3) по текстовым запросам
- И³ – (ИИ-интерпретация) – результат визуализации в библиотеке ИИ формально рационального тестового запроса (в данной работе – о компоновке станка в бионическом или в историческом контекстах). И³ может вести как к сбоям, так и к подсказкам
- НС – несущая система станка или технологической машины
- ТКС – токарно-карусельный станок (vertical turning machine)
- Фибробетон (UHPC, UHPFRC) – высокостабильный и бетон, армированный металлическими волокнами
- ФСД – форма ствола дуба: проверенная бионическая и историческая форма – первоочередная рекомендация при проектировании технологической башни

Целью работы является продвижение концепции бетонных бионических башен (БЗ) [1, 2] в область токарно-карусельных станков. Для этого пересматривается конфигурация несущей системы станка и уточняется общая компоновка ТКС. Задачи работы:

- перейти в несущей системе ТКС от чугунных отливок к фибробетонным композициям (литье, лепка, 3D-печать в вариантах);
- применить для колонн и стоек ТКС бионические формы (например, очертания ствола дуба – равнопрочной балки);
- превратить колонны и стойки станка в бетонные технологические башни (БТБ, что примерно соответствует БЗ);
- оснастить виртуально обновленный ТКС как субтрактивным инструментом (резцы, фрезы и т.д.), так и аддитивным инструментом (лазерные наплавочные головки, плазменные сопла и т.д.);
- проанализировать выгоды и ограничения, возникающие при переводе традиционных станков ТКС в класс аддитивно-субтрактивных машин (АСМ или АСС);
- оценить эффективность ИИ-интерпретаций как инструмента поиска и генерации структурных схем в области компоновок станков и их НС.

Очевидно, что горизонтальный токарный станок имеет ограничения при обработке деталей типа диск больших размеров (рис. 1). Габариты станка резко возрастают. Жесткость базирования диска всегда оказывается невысокой.

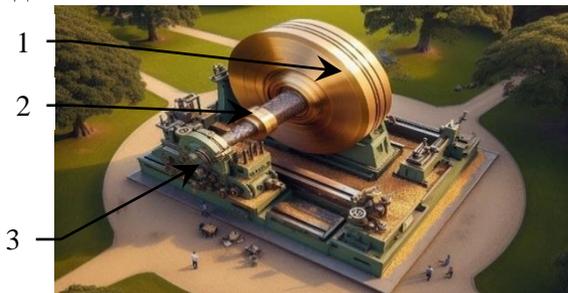


Рисунок 1 – ИИ-интерпретация концепции горизонтально-токарного станка: 1 – обрабатываемая деталь типа диска; 2 – оправка; 3 – шпиндельная бабка

Традиционно детали типа больших дисков, колец и втулок обрабатывают на вертикальных токарных станках (они же – токарно-карусельные станки ТКС) (рис. 2). У станка может быть одна или две стойки 1 (колонны). Обрабатываемый диск 2 базируется на обобщенном грунте. Поэтому его жесткость обеспечена.



Рисунок 2 – III-интерпретация концепции вертикально-токарного (карусельного) станка: 1 – стойка-башня; 2 – обрабатываемая деталь типа диска; 3 – обобщенная обрабатывающая головка

В данной работе вместо стоек с рис. 2 предлагается ставить технологические башни в духе рис. 3. Такие ВТБ должны:

- иметь бионическую форму;
- быть «вылепленными» из бетона класса УНРС;
- иметь повышенное число координат перемещения для свободного манипулирования как аддитивными, так и субтрактивными инструментами.

Традиционные ТКС могут иметь как одну стойку, так и две стойки, образующие портал. Аналогично, для модернизации ТКС можно предлагать как одну, так и две бионические башни. Схема с двумя башнями на очень отвлеченном уровне иллюстрируется на рисунке 4. Деревья являются образами БТБ. Карусель оказалась дословной интерпретацией вращающейся планшайбы ТКС.

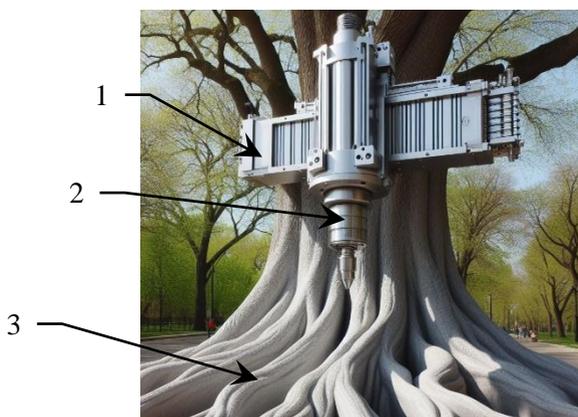


Рисунок 3 – III-интерпретация концепции бионической технологической башни БТБ: 1 – траверса; 2 – обрабатывающая головка на суппорте; 3 – бионическая башня из фибробетона

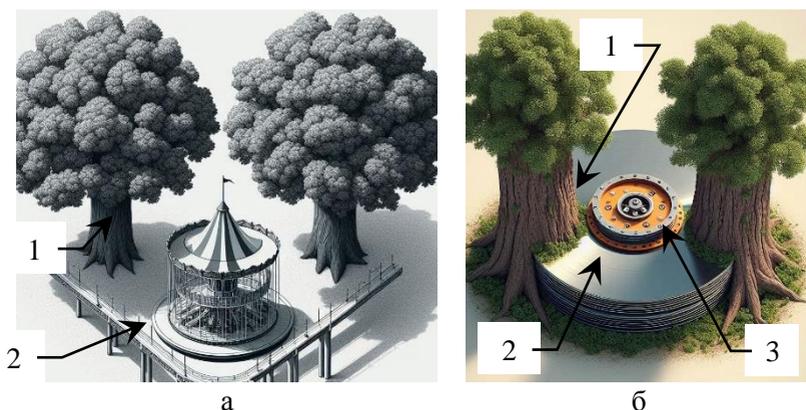


Рисунок 4 – III-интерпретация концепции карусельного станка с парой ББ (а – отвлеченная ситуация; б – приближение к реальности): 1 – образ бионической башни (в форме дуба); 2 – образ планишайбы; 3 – деталь

Более ясную III-интерпретацию объединения двух башен в портал удалось получить на рисунке 5. Здесь бетонные стойки (башни) 1 и 3 связаны друг с другом бетонной же траверсой в портал 1-2-3, на котором размещаются образы суппортов с

инструментами. Особенность модели на рисунке 5 является то, что башни сформированы в виде пилонов. Это не бионическое, а историческое решение. Одним из направлений возможного развития несущих систем станков является переход к формам, оправдавшим себя в ходе длительной службы в суровых условиях. Именно эти формы здесь названы историческими. Форма пилона ассоциируется с сохранившимися древнеегипетскими сооружениями.

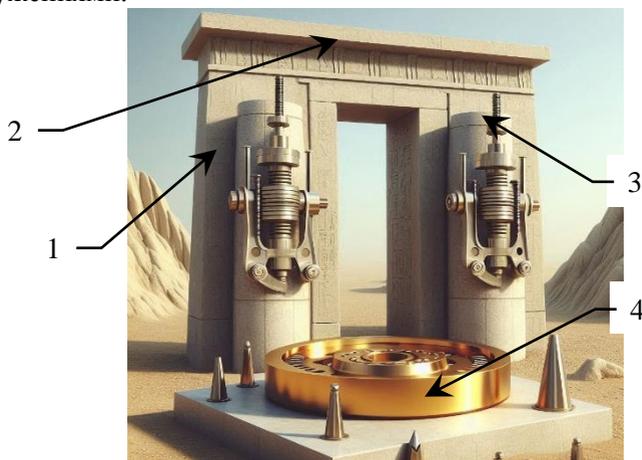


Рисунок 5 – III-интерпретация концепции порталного карусельного станка с порталом 1-2-3 из бетонных пилонов 1,3 и траверсы 2: 4 – образ обрабатываемой детали

Форма ствола дуба является одновременной и бионической формой (ветроустойчивое дерево) и исторической формой (маяк Эддистон, построенный в 1881 г. в открытом море). Поэтому форму ствола дуба (ФСД) рассмотрим для башен ТКС ниже (рис. 6).

Бионическая башня 1 выстроена вертикальной с правой своей стороны (рис. 6), чтобы обеспечить направление для суппорта 2 и консоли 6 с ползуном 5. Консоль в сборе односторонне свешивается (b) справа от башни. Для компенсации возникающей эксцентрической нагрузки (продольного изгиба и внецентренного сжатия башни) сделана модификация профиля башни. Слева внизу башни предусмотрено утолщение «ствола» влево (a). Возможность такой коррекции показывает удобство бионических форм.

Башня на рис. 6 должна иметь возможность поворачиваться на столе 3. Суппорт 2 и консоль 6 нуждаются в вертикальных приводах. Обобщенный инструмент суппорта 4 должен перемещаться радиально. Ползун 5 со своим обобщенным инструментом 7 предполагаются подвижными как вертикально, так и радиально вдоль консоли 6.

Обрабатываемая деталь 8 вращается вокруг вертикальной оси на планшайбе 9. Маркеры 4 и 7 на рис. 6 указывают и на места контакта инструментов и детали. Рационально силовые лезвийные инструменты (резцы, торцовые фрезы и т.п.) на станке позиционировать по маркеру 4. На позиции 7 может находиться чистовой субтрактивный инструмент (например, шлифовальная головка) или аддитивный инструмент типа лазерной головки. Очевидно, что на консоли следует располагать инструменты, работа которых не связана с созданием больших сил.

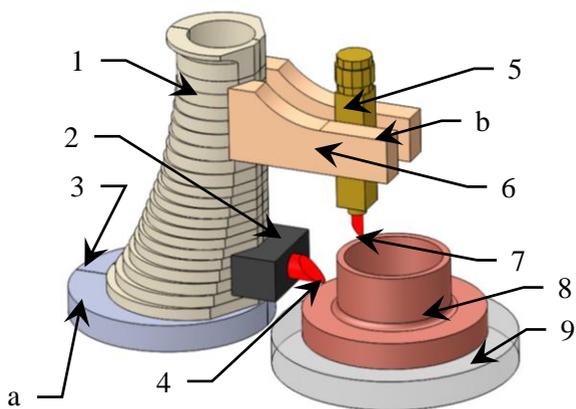


Рисунок 6 – Компоновка станка с одной бионической башней ФСД (1): 2 – вертикальный суппорт; 3 – стол башни; 4 – инструмент суппорта; 5 – ползун; 6 – консоль; 7 – инструмент ползуна; 8 – деталь; 9 – планшайба детали; а – прикорневое утолщение башни; б – свес консоли

На основе компоновки с одиночной башней (рис. 6) для ТКС предлагается компоновка с порталом. Портал образован из двух башен 1, 2 и траверсы, составленной из консолей 3, 4. В компоновке присутствуют по крайней мере четыре независимых друг от друга

инструмента (a, b, c, d). Это расширяет возможность проводить с одной установки детали целый спектр аддитивных и субтрактивных обработок. Например, после чистового обтачивания диска можно осуществлять лазерное напыление и оплавление, а далее шлифовать наплавленный слой.

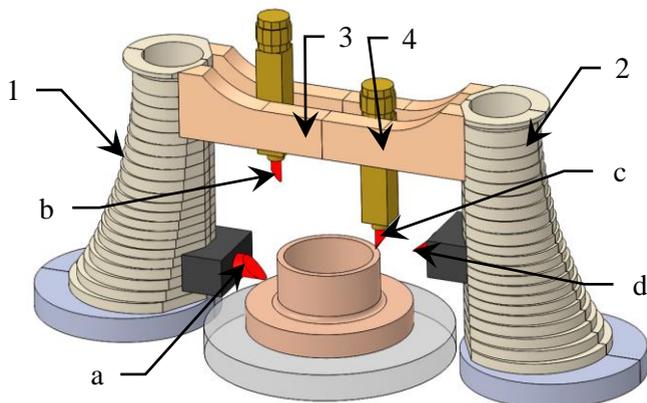


Рисунок 7 – Компоновка станка с порталом из двух бионических башен (1, 2) и траверсы (3, 4): a, d – инструменты суппортов; b, c – инструменты ползунов

На рис. 8 представлен вариант динамической реконфигурации портала. Предполагается, что каждая башня может вращаться и работать в одиночку на отдельных планшайбах.

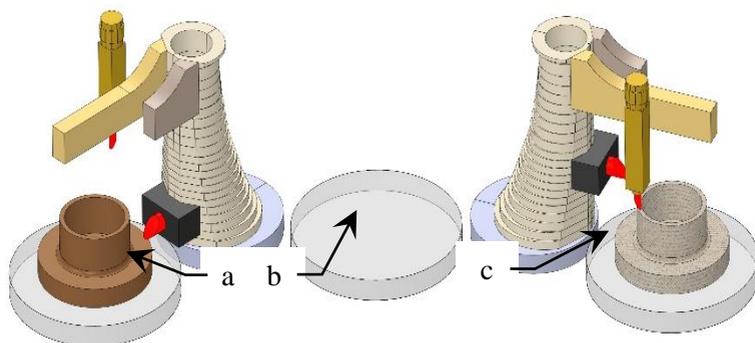


Рисунок 8 – Вариант динамической реконфигурации портала для работы на трех планшайбах a, b, c

Однако башни могут быть повернуты и навстречу друг другу и сведены над общей планшайбой 5 (рис. 9). Тогда портал замкнется и жесткость всех инструментов увеличится.

Каждая консоль может иметь короткую и длинную части. При этом возникает возможность сопряжения длинной консоли одной башни с короткой консолью другой (пары «1а – 2b» и «2а – 1b» на рис. 9). В результате после замыкания портала ползун с инструментом получает возможность далеко уходить от своей башни радиально и сохранять при этом жесткость. Например, левый ползун (рис.9) может по магнитной дороге выдвигаться на правый край длинной консоли 1а. Иными словами, ползун будет способен заходить за центр вращения планшайбы.

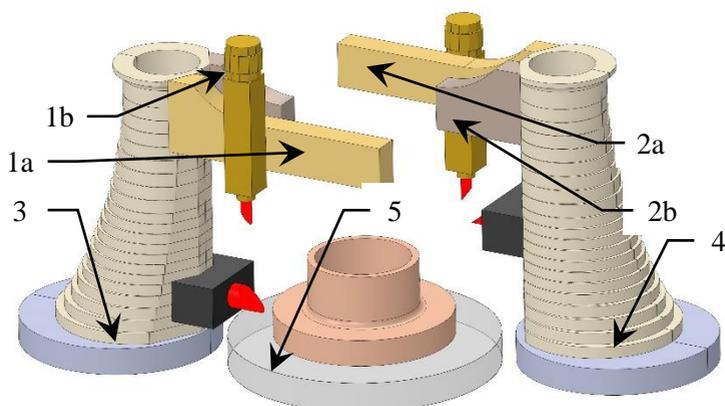


Рисунок 8 – Сведение коротких (1b, 2b) и длинных (1a, 2a) частей консолей в единую траверсу путем вращения столов (3, 4) башен навстречу друг другу: 5 – общая планшайба

Достоинства предлагаемой концепции:

9. Благодаря гибкому формоизменению одиночной бионической башни обеспечивается устойчивость её к одностороннему свешиванию с башни консоли с инструментами.
10. В перспективе конкретными профилями бионических башен можно будет управлять при проектировании станка в зависимости от его конкретного предназначения.

11. Объединение в портал именно бионических башен должно обеспечить повышенную жесткость инструментов в плоскости портала.
12. Динамическое смыкание башен в портал позволит регулировать жесткость инструментов.
13. Работа на трех планшайбах путем поворотов бионических башен позволяет обеспечить высокую загрузку ценного и дорогостоящего аддитивного оборудования
14. Рассмотренные компоновки хорошо подходят к приводам типа «магнитная дорога», хорошо зарекомендовавших себя в станках для лазерной резки.

Литература

1. Довнар, С.С. МКЭ-анализ эффективности бионической исторической консоли в качестве колонны крупногабаритного станка / С.С. Довнар, Д.Н. Авсиевич, О.К. Яцкевич, А.М. Шведова, И.Ю. Аглушевич // «Системный анализ и прикладная информатика». 2023; (2):13-23. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-2-13-23>.
2. Довнар, С.С. Концепция бетонного бионического портала для крупногабаритного токарного гибридного станка / С.С. Довнар, Д.Н. Шведова // Беларусь-Китай: контуры инновационно-технологического сотрудничества: сборник материалов научно-практической конференции (Минск, 19-20 октября 2023 г.); сост. М.А. Войтешенок. – Минск : БНТУ, 2023. ISBN 978-985-583-980-5 - С. 105-107 <https://rep.bntu.by/handle/data/137149>

УДК 661.862

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОЧЕГО ОРГАНА ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ДРОБИЛКИ НА ВОЗДУШНОЙ ОПОРЕ

Магистрант Лютарович Д.А.

Научный руководитель – профессор Яцкевич О.К.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Центробежно-ударные дробилки (в общепринятой терминологии – дробилки с вертикальным валом) находят все большее применение в процессах дробления и измельчения рудных и нерудных материалов. Благодаря тому, что практически вся подводимая к дробилке энергия используется для сообщения кинетической энергии измельчаемому материалу, центробежно-ударные дробилки имеют большой КПД и высокий коэффициент измельчения.

Что же касается проблемы обеспечения приемлемого ресурса подшипниковых узлов, то она по-прежнему не имеет удовлетворительного решения в рамках традиционных схем механического привода с фиксированной подшипниками осью. Это связано с тем, что узел, обеспечивающий вращение роторной части центробежно-ударной дробилки, должен удовлетворять многим требованиям.

Практика показывает, что невозможно создать дробилки на традиционной подшипниковой опоре (с фиксированной осью вращения), обладающие одновременно большой производительностью, высокой скоростью вылета кусков и способные перерабатывать материал большой исходной крупности. В дробилках на подшипниковой опоре крупность кусков исходного материала ограничена размером 40 мм, диаметр ускорителя не превышает одного метра, а максимальная частота вращения ускорителя составляет 1500 об/мин, ограничивая линейную скорость измельчаемого материала на выходе из ускорителя значениями 60–70 м/с для максимальных типоразмеров дробилок.

При таких ограничениях область применения ударной дезинтеграции сводится, в основном, к получению кубовидного

щебня, а измельчение руды до крупности ниже 5–10 мм становится неэффективным вследствие низкого коэффициента измельчения и высокой степени возврата на додрабливание. Поэтому центробежные дробилки на традиционных подшипниковых опорах не могут составить серьезную конкуренцию конусным дробилкам мелкого дробления и стержневым мельницам в существующих схемах рудоподготовки [1, 2].

Для преодоления ограничений, накладываемых на скорость вращения ускорителей в дробилках с традиционными подшипниковыми опорами, предлагается использовать воздушную (газостатическую) опору (рис. 1), представленную в работе [3].

Опора представляет собой два вложенных друг в друга кольцевых сферических сегмента (ротора и статора), в зазор между которыми типовым высоконапорным вентилятором нагнетается воздух. Создаваемая избыточным давлением воздуха подъемная сила заставляет ротор (с закрепленным на нем ускорителем) всплыть. Необходимая величина воздушного зазора обеспечивается регулировкой хода в шлицевом соединении одной из вилок карданного вала, передающего крутящий момент от двигателя, расположенного соосно с ротором. Наличие у карданного вала двух карданных шарниров, обеспечивает независимость положения геометрической оси ротора относительно оси вращения двигателя.

При включенном вентиляторе всплывший подвижный узел дробилки (ротор и ускоритель) находится в состоянии покоя. При этом вес ротора и ускорителя плюс сила натяжения карданного вала уравниваются подъемной силой, создаваемой избыточным давлением воздуха. Поскольку сила, действующая со стороны воздуха на сферическую поверхность ротора, везде направлена к центру сферы, то центр сферы фактически оказывается своеобразной «виртуальной» точкой опоры (подвеса) ротора. Это означает, что под действием любых сил, не проходящих через центр сферы (т.е. сил, создающих момент относительно точки опоры), ротор отклоняется от исходного положения так, как если бы он имел шарнирное закрепление в центре сферы. Иными словами, образуется воздушная опора, при которой ротор может совершать вокруг центра сферы колебательные движения, не касаясь при этом статора.

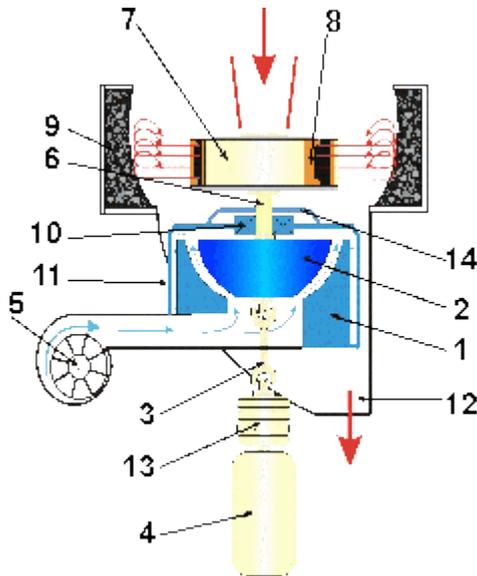


Рисунок 1 – Воздушная опора центробежных дробилок
 1 – статор; 2 – ротор; 3 – карданный вал;
 4 – электродвигатель; 5 – воздушный вентилятор; 6 – вал; 7 – ускоритель; 8 – концевая лопатка ускорителя;
 9 – камера измельчения; 10 – предохранительный узел на случай аварийного отключения воздуха; 11 – крышка опорной части; 12 – патрубок для выгрузки дроблённого продукта; 13 – центробежная муфта; 14 – пыльник.

Конечно, наличие связи фиксированной длины в виде карданного вала приводит к соответствующему уменьшению величины воздушного зазора при любом развороте ротора. Однако уменьшение это незначительно, а перемещение точки подвеса ротора происходит вдоль вертикальной оси (подобно шарниру в кулисе кривошипно-шатунного механизма).

При любом отклонении оси ротора от вертикали (а вернее, отклонении центра верхней крестовины карданного вала от прямой линии, соединяющей центр сферы и центр нижней крестовины) равнодействующая приложенных к верхней крестовине сил оказывается отличной от нуля величиной, направленной к оси вращения двигателя. Создаваемый при этом момент относительно

виртуальной точки опоры ротора стремиться вернуть ось ротора в исходное вертикальное положение. После приведения во вращение подвижный узел дробилки фактически становится гироскопом с точкой опоры в центре сферы, а потому обладает всеми свойствами, характерными для так называемых «тяжелых» (т.е. закрепленных в точке, не совпадающей с центром масс) гироскопов с тремя степенями свободы.

Для статической и динамической оценки предложенного конструктивного решения центробежной дробилки была создана геометрическая трёхмерная модель рабочего органа (ротора и ускорителя) и проведены расчеты методом конечных элементов. Исходная трехмерная модель представлена на рисунке 2.

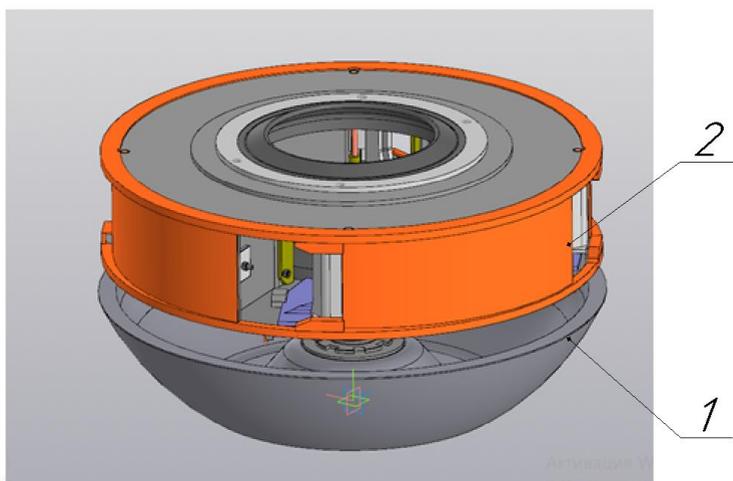


Рисунок 2 – Исходная геометрическая модель рабочего органа центробежной дробилки: 1-ротор; 2-ускоритель.

В расчетах использована упрощенная конечноэлементная модель. Для этого шарики подшипников между наружным и внутренним кольцом заменены промежуточным упругим кольцом с заданными свойствами. В совокупности промежуточного кольца и внутреннего и наружного кольца жёсткость должна быть такой же, как и у реального подшипника. Создана сетка упрощённой 3D модели для МКЭ расчёта (рисунок 3).

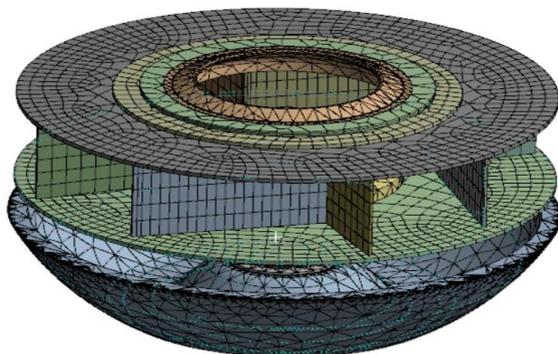


Рисунок 3 – Сетка конечных элементов рабочего органа центробежной дробилки

Закрепим нашу упрощённую модель как показано на рисунке 4. На наружные кольца подшипников задаем условие Fixed Support. На наружную поверхность ротора (площадь наружной поверхности ротора $S=1378370\text{мм}^2$) подаётся воздух от вентилятора. Представим это в виде условия Elastic Support с определённой (регулируемой) жёсткостью.

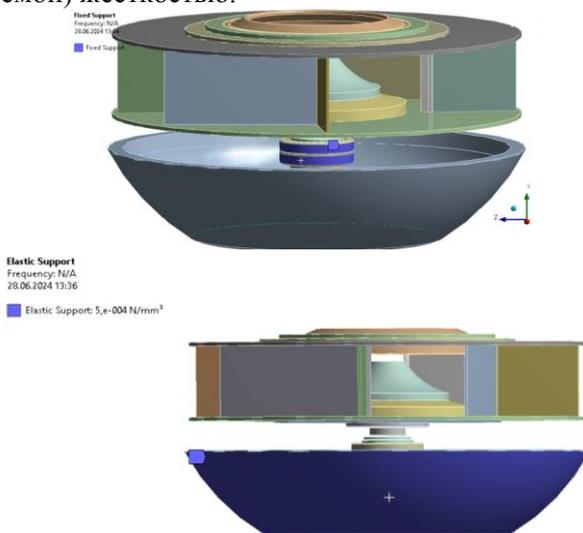


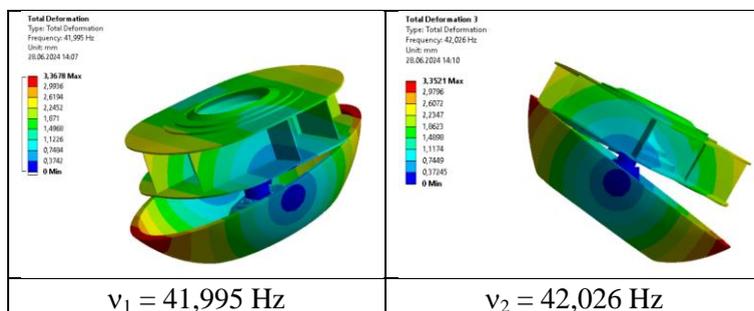
Рисунок 4 – Закрепление конструкции

Произведём первый расчёт собственных частот с жёсткостью воздушной подушки (газостатической опоры) $j=0,7$ Н/мкм. Получим следующие данные собственных частот, рисунок 5. Характер колебаний на каждой собственной частоте иллюстрирует рисунок 6.

На первой собственной частоте (41,995 Hz) конструкция начинает колебаться по оси X. На второй собственной частоте (42,026 Hz) конструкция начинает колебаться по оси Z. На третьей собственной частоте (46,03 Hz) конструкция начинает закручиваться по оси Y, а на четвертой (67,483 Hz) – колебаться по оси X. На пятой собственной частоте (67,74 Hz) конструкция колеблется вдоль оси Z, а на шестой(83,503 Hz) – конструкция начинает вращаться вокруг своей оси и складываться.

	Mode	<input checked="" type="checkbox"/> Frequency [Hz]
1	1,	41,995
2	2,	42,026
3	3,	46,03
4	4,	67,483
5	5,	67,74
6	6,	83,503

Рисунок 5 – Частоты собственных колебаний при жёсткости газостатической опоры $j = 0,7$ Н/мкм



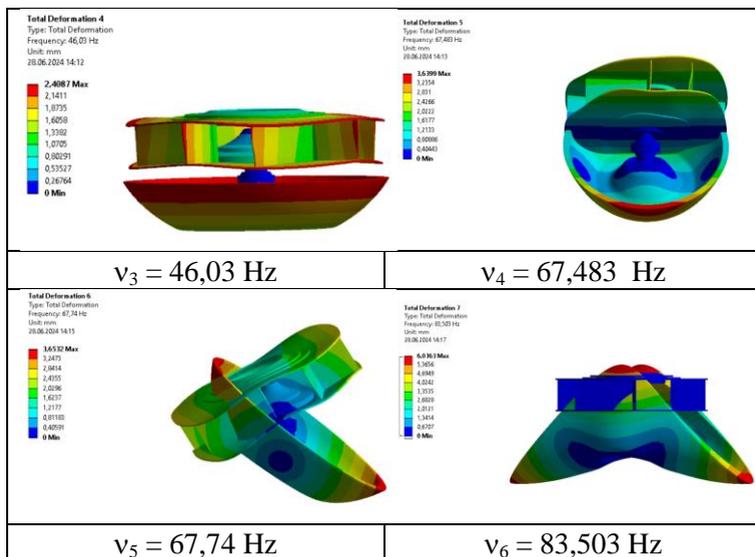


Рисунок 6 – Формы колебаний на собственных частотах при жесткости газостатической опоры $j = 0,7 \text{ Н/мкм}$

Аналогичным образом произведём расчёт собственных частот ротора с жесткостью газостатической опоры $j=7 \text{ Н/мкм}$ и $j=70 \text{ Н/мкм}$ (рисунок 7). По характеру формы собственных колебаний движения на каждой жёсткости была идентичной описанным выше. По полученным данным построим график зависимости собственных частот (рисунок 8). Из графика видно, что при повышении жёсткости воздушной подушки (газостатической опоры) также увеличиваются собственные частоты конструкции.

	Mode	✓ Frequency [Hz]		Mode	✓ Frequency [Hz]
1	1,	43,892	1	1,	46,03
2	2,	43,902	2	2,	50,885
3	3,	46,03	3	3,	50,899
4	4,	69,54	4	4,	91,54
5	5,	69,8	5	5,	91,741
6	6,	87,487	6	6,	97,386
а)			б)		

Рисунок 7 – Частоты собственных колебаний при жёсткости газостатической опоры при $j=7 \text{ Н/мкм}$ (а) и $j=70 \text{ Н/мкм}$ (б)

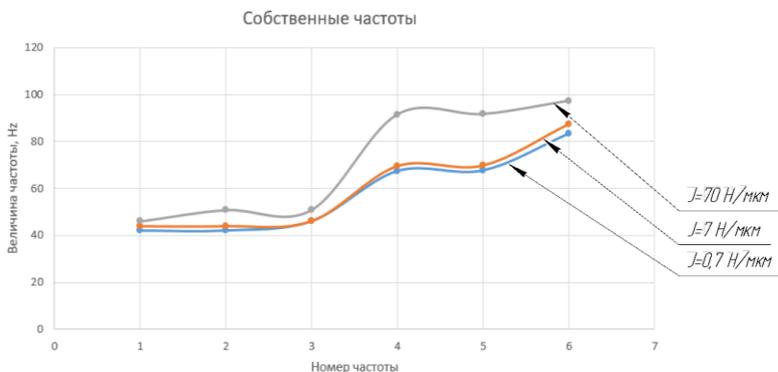


Рисунок 8 – Значения собственных частот при различной жесткости газостатической опоры

В ходе проведенного моделирования определены собственные частоты при разной жёсткости воздушной подушки (газостатической опоры), которых следует избегать для исключения резонансов при выборе рабочих режимов центробежной дробилки на воздушной опоре. Так же показано, что при повышении жёсткости воздушной подушки (газостатической опоры) увеличиваются собственные частоты конструкции, что также нужно учитывать при выборе конструктивных параметров рабочих органов дробилок данного типа.

Литература

1. Учитель С.А., Стець В.А. Опыт применения центробежно-ударных дробилок. М., Обзорная информация / Ин-т «Черметинформация». Сер. Обогащение руд. Вып.1. 1991. – 25 с.
2. Лисица А.В. Дробление и измельчение рудных и нерудных материалов свободным ударом в центробежно-ударных дробилках и мельницах // Тяжелое машиностроение. – 2005. – №. 7. – С. 40-42.
3. Интернет-ресурс: <https://stroit.ru/stati/vozdushnaya-opora-rasshirenje-vozmozhnostey-tsenrobezhnyh-drobilok/>

УДК 621.9.011

МКЭ-АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КРЕСТОВОГО СТОЛА ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА С ПОМОЩЬЮ ИИ

Студенты гр.10305120 Максименко А.А., гр.10305222 Жаврид Ю.Ю.,
Крепская В.Я.

Научные руководители – Довнар С.С., Яцкевич О.К., Касач Ю.И.,
Лапука А.Д.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Вертикально-фрезерные станки (ВФС) являются важным оборудованием в современном машиностроении. Они выпускаются (рис. 1, а) рядом белорусских станкостроительных заводов и обычно комплектуются крестовыми столами. Крестовый стол (рис. 1, б) с помощью системы ЧПУ обеспечивает перемещение обрабатываемой детали сразу по двум горизонтальным координатам X, Y.

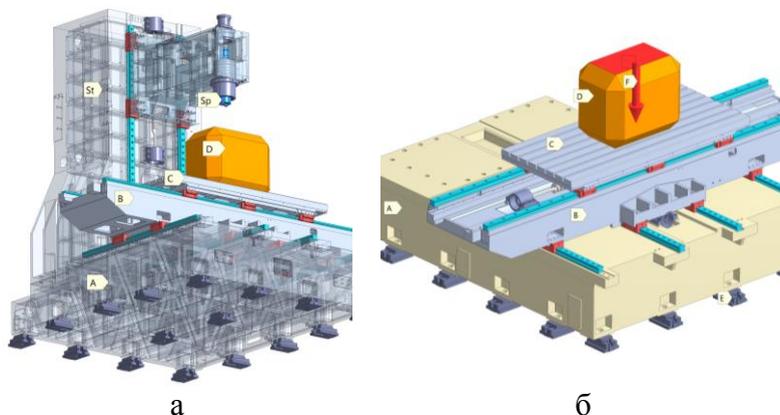


Рисунок 1 – Вертикально-фрезерный станок (ВФС) с чугунной станиной А (а) и крестовый стол (салазки В + плита С) на фибробетонной станине А (б): D – образ заготовки; F – вертикальная сила; St – стойка для вертикальных перемещений бабки со шпиндельным узлом Su

Крестовый стол является потенциально податливым узлом станка. Поэтому была поставлена задача проведения его виртуальных испытаний для последующего усиления несущей системы станка. Виртуальные испытания осуществлялись с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Объектом моделирования являлся вновь разрабатываемый вертикально-фрезерный станок ОАО «СтанкоГомель». Прежде всего, стол был подвергнут тестовому нагружению вертикальной силой по рис. 1, б. Картина деформаций стола приведена на рис. 2, а.

Видно, что податливым оказывается весь стек из трех плитообразных деталей, лежащих друг на друге – плита стола с системой направляющих X (находятся под ней), салазки с системой направляющих Y (лежат под ней) и потолок станины (находится по направляющим Y). Каждая система направляющих включает в себя рельсы и танкетки (опоры качения), катящиеся по ним.

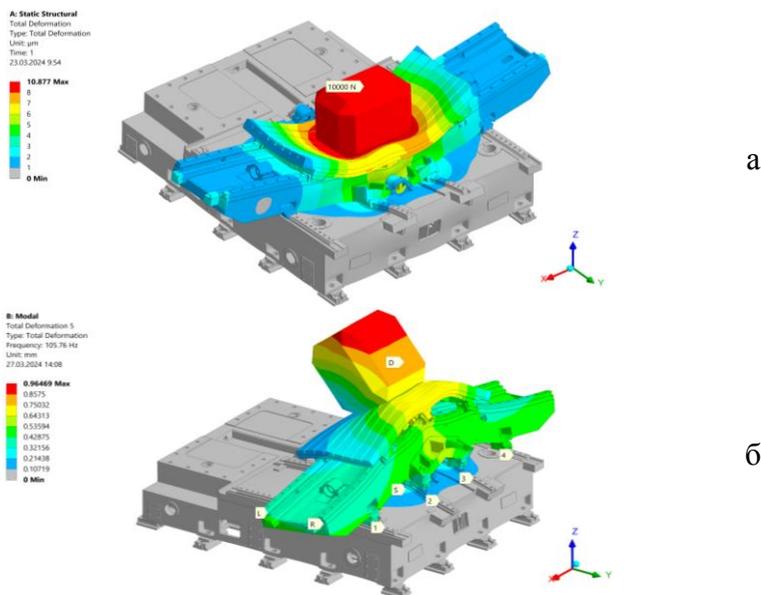


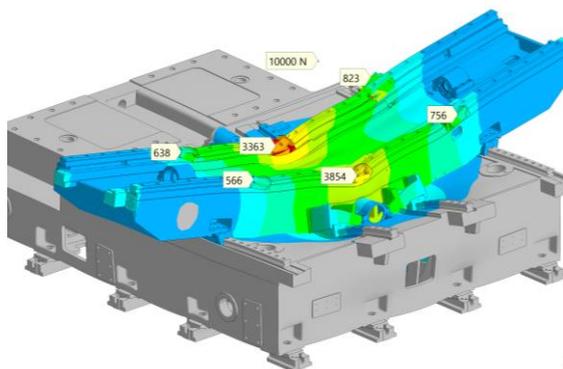
Рисунок 2 – Деформирование крестового стола под действием статической силы (а) и при резонансном возбуждении (б): L, R – рельсы системы направляющих X; 1, 2, 3, 4 – рельсы системы направляющих Y; D – образ детали; S – станина (здесь – чугунная)

На рис. 2, а стек из плиты, салазок и станины прогибается вниз. На рис. 2, б показано возбуждение резонанса (модальный МКЭ-анализ), когда плита, салазки и станина выгибаются вверх. В целом, рис. 2 передает податливость крестового стола как стека «плита – салазки – станина».

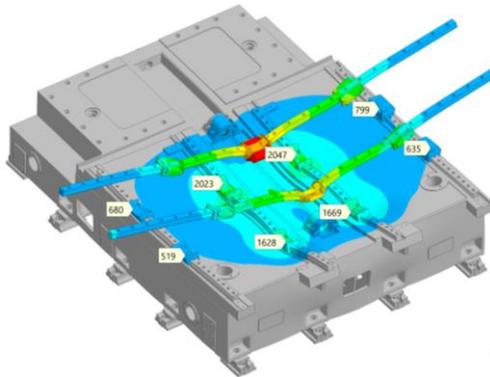
МКЭ-анализ позволил выявить силы в танкетках обеих систем направляющих (рис. 3). В системе направляющих X наиболее нагружены средние танкетки (рис. 3, а). В них силы реакции (3363 и 3854 Н) превышают силы в крайних танкетках (566 – 823 Н) в среднем в 5,18 раз. Получается, что крайние танкетки X выполняют, в основном балансирующую функцию.

В танкетках системы направляющих Y вертикальные нагрузки воспринимаются танкетками более равномерно (рис. 3, б). Средняя сила реакции для четырех центральных танкеток составляет 1841 Н, а для четырех концевых танкеток она равна 658 Н.

Таким образом, вертикальные нагрузки между этими двумя группами танкеток Y различаются только в 2,79 раза. Понятно, однако, что для крестового стола весьма актуальна задача управления силами в танкетках. Здесь можно действовать как через перераспределение жесткостных характеристик в салазках и плите, так и через изменение вертикального натяга в танкетках.

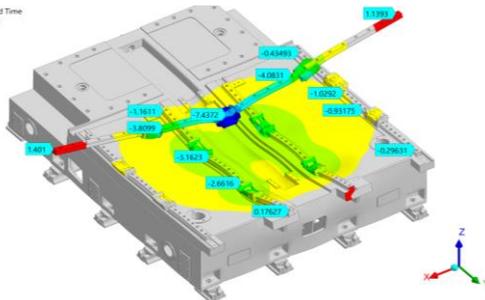


а

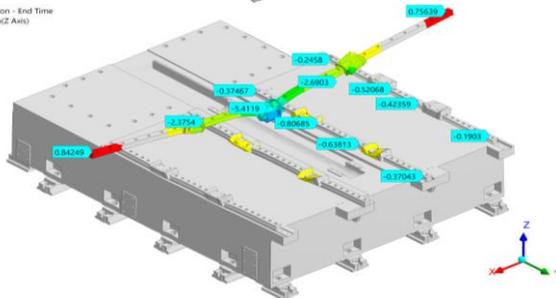
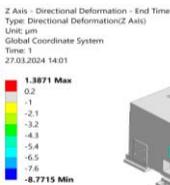


б

Рисунок 3 – Вертикальные компоненты сил реакции (Н) в танкетках направляющих X (а; 2 рельсы и 6 танкеток) и направляющих Y (б; 4 рельсы и 8 танкеток) под действием статической вертикальной силы $F = 10\text{kN}$



а



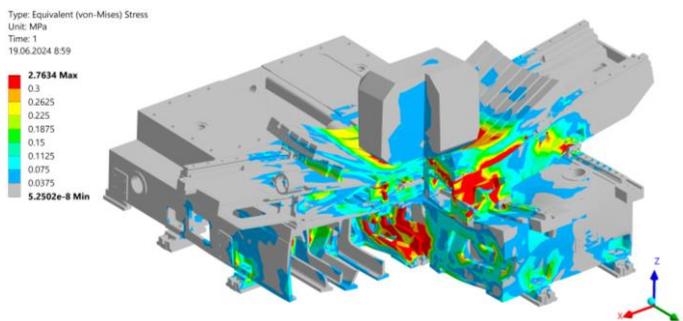
б

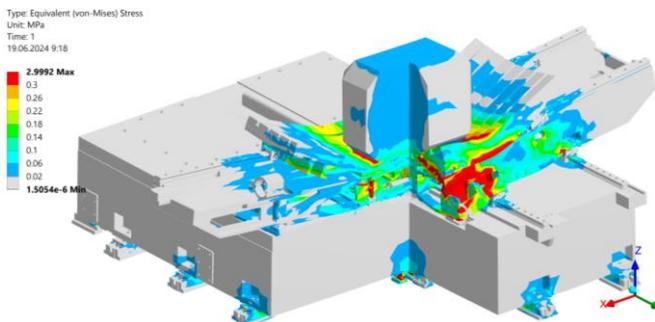
Рисунок 4 – Вертикальные перемещения (мкм; по оси Z) на рельсах и танкетках обеих направляющих систем (по X и по Y) для чугуновой станины (а) и фибробетонной станины (б)

На рис. 4 даны картины проседаний (вертикальных смещений) в системах направляющих X и Y. На рис. 4, а даны деформационные перемещения для чугунной станины. На средних рельсах Y они достигают 3,2 мкм (вниз по Z).

Для фибробетонной станины (рис. 4, б) аналогичные проседания не превышают -0,8 мкм, что в 3,9 раза меньше. Следовательно, фибробетонная станина хорошо решает задачу обеспечения жесткости и прямолинейности рельс в системе направляющих Y. Вверх по стеку «станина – салазки – плита» влияние жесткой фибробетонной станины ослабляется. Так, в середине рельсы X проседание составляет 7,4 мкм для чугунной станины (рис. 5, а). Для фибробетонного базиса (рис. 4, б) оно уменьшилось до 5,4 мкм (только в 1,37 раза). Итак, обеспечение жесткости крестового стола требует не только жесткой станины, но и усиления плиты и салазок.

Картины эквивалентных напряжений σ_e в станке даны на рис. 6 с использованием условного выреза «в четверть». Сами напряжения невелики, не превышают нескольких МПа и не угрожают прочности несущей системы. Однако распределения σ_e иллюстрируют неравномерность напряженного состояния всех чугунных литых деталей (плиты, салазок и стола на рис. 6, а). Здесь наблюдаются многочисленные локальные концентраторы напряжений. Только переход к монолитной фибробетонной станине (рис. 6, б) выравнивает и понижает напряжения в базисе станка. Возможно, салазки и плиту крестового стола также, в перспективе, следует делать с применением бетонного литья.





б

Рисунок б – Картины эквивалентных напряжений (МПа) в крестовом столе под действием вертикальной силы $F = 10\text{kN}$ для чугунной (а) и фибробетонной (б) станин. $\times 40000$

МКЭ-испытания крестового стола на чугунной и фибробетонной станинах вертикально-фрезерного станка позволяют сделать следующие наблюдения:

- крестовый стол в исходном состоянии передает вертикальные нагрузки, в основном на центральные танкетки по обоим (X, Y) системам направляющих;
- чугунная станина является самой податливой по вертикали деталью в стеке «стол – салазки – станина»;
- рекомендуется усиление чугунной станины диагональными ребрами или переход к фибробетонной станине;
- фибробетонная станина в монолитном исполнении резко, в 3–4 раза повышает жесткость под нижними рельсами X. Однако, на уровне заготовки эффект ослабляется оставшейся относительно высокой податливостью салазков и стола;
- крестовому столу требуется выравнивание (гармонизация) вертикальных жесткостей одновременно станины, салазков и стола. Только при этом условии потенциал фибробетона будет раскрыт в смысле жесткого базирования заготовки.

Вероятно, возможны и иные конструктивные решения узлов, обеспечивающих функции крестовых столов. Для снижения психологической инерции при поиске таких решений имеет смысл обратиться к средствам «искусственного интеллекта» (ИИ). Поэтому для анализа и обобщенного понимания компоновки было сделана попытка обращения к ИИ. Это отражено на рис. б.

Компоновки на рис. 6 подчеркивают открытость архитектуры крестового стола. Его стек плит может неограниченно наращиваться по вертикали. На рис. 6, а ИИ предложил концепцию из трех скользящих друг по другу плит, а на рис. 6, б число подвижных плит достигло четырех. Полагаем, что построения ИИ, хорошо передают склонность крестового стола к деформациям.

На рис. 7 представлен еще один вариант структурно-логического понимания идеи крестового стола, использующего тела качения для реализации имеющихся степеней свободы.



а



б

Рисунок 6 – Кинематическо-компоновочное ИИ-представление идеи крестового стола как набора скользящих друг по другу горизонтальных плит с помощью ИИ-библиотеки открытого доступа DALL-E3 в спонтанных вариантах а, б



Рисунок 7 – Специальное представление с помощью ИИ идеи крестового стола и интерфейса взаимодействия с ним авторов-студентов

**ЛОГИЧЕСКИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ
«И» И «ИЛИ»**

Студент гр.10305121 Стрижак А.Д.

*Научный руководитель – профессор Якимович А.М.*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

С функциональной точки зрения логический блок может состоять из одной или нескольких контактных пар. Элементарные логические функции, формирующие блоки: И, ИЛИ, НЕ. Эти логические функции могут быть реализованы как на пневматических, так и на электрических элементах. Пневматические распределители с пневмоуправлением (ППР) предназначен для управления исполнительными элементами пневмоавтоматики, например, ПД и, в том числе, используется для создания систем пневмологики.

Два таких ППР могут быть применены для управления цилиндрами двустороннего действия. ППР (рисунок 1) имеет одно отверстие для подвода воздуха, один канал управления, одно выходное отверстие и отверстие сброса воздуха. При подаче управляющего сигнала через канал в пневмоцилиндр управления, золотник перемещается вправо, перекрывая канал, соединяя отверстие с отверстием выхлопа и атмосферой.

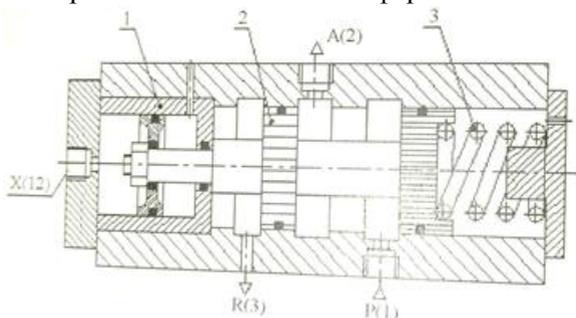


Рисунок 1 – Золотниковый 3/2 распределитель с пневмоуправлением

Пневматические трехлинейные распределители высокого давления с пневмоуправлением, кроме функции аппаратуры распределения направляющих потоков, могут так же выполнять функцию логических ячеек для реализации логических операций. При распределении потоков магистральный поток обычно подаётся на одну линию входа, а вторая линия соединяется с нагрузкой, которая при переключении ППР соединяется с атмосферой через третью линию. При использовании ППР в качестве логической ячейки, он как бы «переворачивается» (рисунок 2): две линии используются для входа двух пневматических сигналов, а третья линия соединена с выходом. Совокупность логических операций, выполняемых с помощью 3/2-пневмораспределителя, определяется соответствующей коммутацией линий X_1 , X_2 одного или двух ППР.

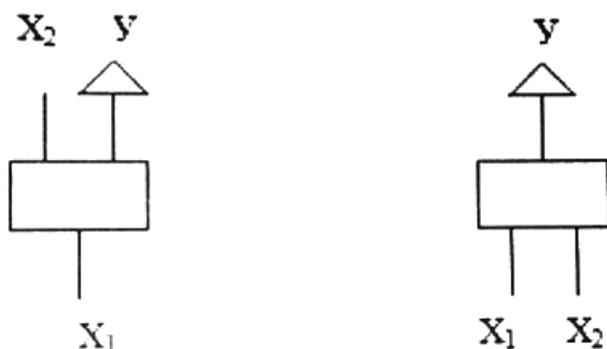


Рисунок 2 – Структура распределения сигналов

Логические операции также могут выполняться с помощью специально сконструированных пневмоэлементов. Элемент «И» (рисунок 3) имеет два входных канала, и один выходной. Сжатый воздух проходит через элемент на выход из канала в случае подачи сигнала на оба АУ входа 1 и 1; при этом запорный элемент находится в среднем положении и пропускает последний из поданных сигналов от каналов 1 и 1(3). При подаче одного входного сигнала, например, сигнала по каналу 1 проход воздуха на выход из канала 2 блокируется прижатием подвижного элемента к седлу

клапана. Аналогично работает элемент и при подаче сигнала по каналу 1 (рисунок 3).

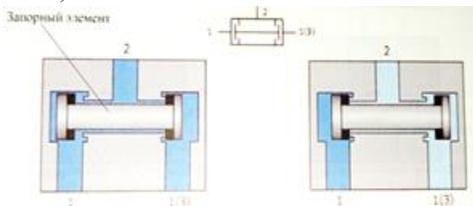


Рисунок 3 – Схема логического элемента «И»

На рисунке 4 приведена принципиальная схема управления пневмоцилиндром с помощью пневмоэлемента «И». В случае подачи сжатого воздуха на вход, подвижный запорный элемент перекрывает вход, позволяя воздуху свободно проходить на выход. При подаче сигнала по каналу сжатый воздух запирает канал 1 и поступает в канал 2. При обратном течении сжатого воздуха, то есть когда воздух, например, из полости пневмоцилиндра выпускается в атмосферу, подвижный запорный элемент остается в положении последнего переключения.

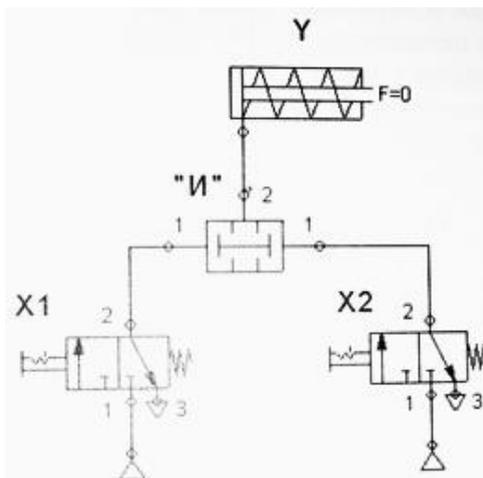


Рисунок 4 – Принципиальная схема управления пневмоцилиндром с помощью пневмоэлемента «И»

Если в схеме требуется 2 и более выходных логических сигналов управления, то следует установить несколько элементов «ИЛИ» (рисунок 5). На рисунке 6 представлена принципиальная схема управления пневмоцилиндром с помощью логического элемента «ИЛИ».

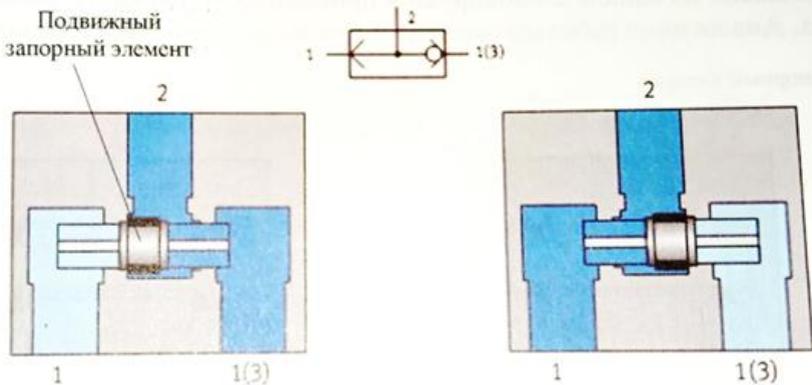


Рисунок 5 – Схема логического элемента «ИЛИ»
Y

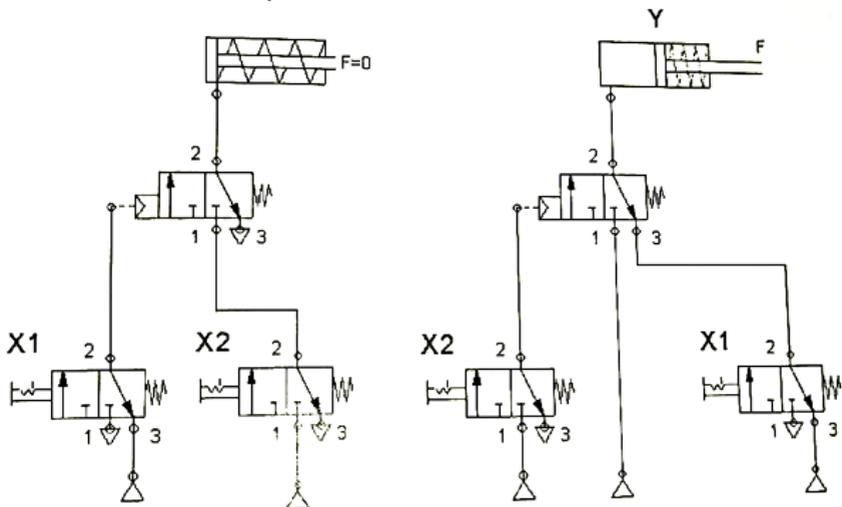


Рисунок 6 – Принципиальная схема управления пневмоцилиндром с помощью логического элемента «ИЛИ»

По условиям работы дискретные системы управления (ДСУ) делятся на одноктактные и многотактные (цикловые). К **одноктактным** относятся ДСУ, в которых комбинации выходных сигналов управляющей части определяются только состоянием входных сигналов в данный момент времени и не зависят от предыдущих их состояний. В **многотактных** ДСУ комбинации выходных сигналов зависят не только от состояния входных сигналов в данный момент времени, но и от предшествующих состояний входов и выходов. Информация о предшествующих состояниях вводится с помощью триггеров.

Задача структурного синтеза ДСУ – определить достаточный и необходимый набор логических элементов, обеспечивающий соответствие входных и выходных сигналов заданным условиям работы системы. Процедура определения минимально необходимого количества логических элементов и их взаимосвязей носит название «процедура минимизации». Синтез подразделен на несколько этапов, и, в какой-то мере, формализован, хотя в некоторых случаях легче строить систему управления исходя из определенных логических соображений, и она иногда получается лучше, чем, если бы был использован сугубо формальный метод. Однако здесь требуется уже определенный опыт и талант конструктора. Во всяком случае, каким методом решать задачу, зависит от разработчика.

Методы минимизации подробно описаны в литературе по автоматике. Это и симплекс метод, метод с использованием карт Карно, графоаналитические методы, и прочие. При синтезе одноктактных ДСУ довольно широкое распространение получил табличный метод. Суть его заключается в том, что в соответствии с условиями работы, по словесному описанию составляют таблицу состояний (таблицу истинности). Затем составляют уравнения, устанавливающие зависимость выходных сигналов Y_1, Y_2, \dots, Y_n от входных X_1, X_2, \dots, X_n . Эти уравнения могут быть записаны в совершенно дизъюнктивной нормальной форме (СДНФ) или в совершенно конъюнктивной нормальной форме (СКНФ). Ограничимся рассмотрением первой формы. СДНФ – это

логическая сумма всех конstituент единицы. Конституент единицы – это логическое произведение всех входных сигналов, при котором данный выходной сигнал принимает действительное значение, то есть равен 1. В соответствии с определением СДНФ:

$$Y = X_1 \overline{X_2} X_3 + \overline{X_1} X_2 \overline{X_3}.$$

В данном уравнении, «X» без верхней черты означает, что сигнал «действительный», а с чертой, - что сигнал «ложный», то есть равен нулю.

Следующим этапом анализа является минимизация полученного уравнения с целью сведения числа логических элементов к минимуму. Для этого путем анализа в полученном уравнении и в таблице выявляются состояния, «соседние» по отношению к членам СДНФ. Состояния считаются **соседними**, если они отличаются значением только одной переменной. В логическом уравнении соседних состояний нет, и поэтому это уравнение не подлежит минимизации.

Проанализируем состояние двух независимых переменных, приведенных в таблице 1. Логическое уравнение СДНФ будет иметь следующий вид:

$$Y = X_1 \overline{X_2} + \overline{X_1} X_2 + \overline{X_1} \overline{X_2}.$$

В этом уравнении четыре оператора «НЕ», три оператора «И», два оператора «ИЛИ», то есть система управления должна содержать в сумме девять логических операторов, что не всегда приемлемо. Однако первые и третьи состояния – «соседние», так как отличаются только первой переменной. Уравнение подлежит минимизации.

Таблица 1

X1	1	1	0	0
X2	1	0	1	0
Y	0	1	1	1

В данном случае действует следующее правило. Чтобы **минимизировать** уравнение для данного выхода «Y», к имеющимся членам **СДНФ, необходимо** дополнительно дописать «соседние»

состояния, а затем «склеить» на **основании** соответствующего закона алгебры логики. Для уравнения это выглядит следующим образом:

$$Y = X_1 \overline{X_2} + \overline{X_1} X_2 + \overline{X_1} \overline{X_2} = X_1 \overline{X_2} + \overline{X_1} \overline{X_2} + \overline{X_1} X_2 + \overline{X_1} \overline{X_2} = \overline{X_2} (X_1 + \overline{X_1}) + \overline{X_1} (X_2 + \overline{X_2}) = \overline{X_2} + \overline{X_1}.$$

В полученном минимизированном уравнении используются всего 3 логических оператора. После применения правила де-Моргана, уравнение принимает вид:

$$\overline{X_2} + \overline{X_1} = \overline{X_2 X_1}.$$

Таким образом, после процедуры минимизации вместо девяти логических операторов используются только два «И» и «НЕ».

Важной составляющей табличной минимизации является использование также «условных» состояний. **Условные состояния** – это состояния входов, при которых значение данного выхода не играет роли в соответствии с анализом работы проектируемой системы. Оно может быть любым из двух возможных, либо обязательным, то есть $X=1$, либо ложным, то есть $X=0$. Эти состояния в соответствующей графе таблицы состояний обозначаются прочерком. Важно и то, что при составлении таблицы состояний должен рассматриваться весь набор сочетаний независимых переменных, без ограничения его лишь перечнем обязательных и ложных состояний. Именно последнее обстоятельство и является характерной ошибкой при минимизации.

Например, пусть проектируемая система определяется тремя входами X_1, X_2, X_3 , и одним выходом Y . Общее число сочетаний входных сигналов «К» определяется для двоичной системы как $K = 2^3 = 8$. Состояния работы данной системы определены в таблице 2.

Таблица 2

X1	0	0	0	0	1	1	1	1
X2	0	0	1	1	0	0	1	1
X3	0	1	0	1	0	1	0	1
Y	0	0	0	1	0	–	1	–

Логическое уравнение в СДНФ запишется в следующем виде:

$$Y = \overline{X_1} X_2 X_3 + X_1 X_2 \overline{X_3}.$$

По состоянию обязательных сигналов уравнение минимизации не подлежит (нет соседних членов). Для его реализации требуются два оператора «НЕ», четыре «И», один «ИЛИ» - всего семь. Использование дистрибутивного закона сократит их число до шести.

$$Y = X_2(\overline{X_1}X_3 + X_1\overline{X_3}).$$

И это окончательно, если не использовать условные состояния.

В процессе анализа условных состояний, их можно рассматривать как обязательные, поскольку по определению состояние выхода не имеет значения и поэтому можно учитывать появившиеся «соседние» состояния. Из таблицы 2 видно, что первое условное состояние, а именно $X_1 X_2 X_3$, отличается от обязательных двумя переменными и, соответственно, не является соседним ни для одного из обязательных. Зато второе условное состояние, то есть $X_1 X_2 X_3$, «соседнее» по отношению к обоим обязательным, и их можно «склеивать». Далее уравнение, с учетом появившихся возможностей преобразуется и принимает вид:

$$Y = \overline{X_1}X_2X_3 + X_1X_2\overline{X_3} = (\overline{X_1}X_2X_3 + X_1X_2X_3) + (X_1X_2\overline{X_3} + X_1X_2X_3) = X_2X_3(\overline{X_1} + X_1) + X_1X_2(\overline{X_3} + X_3).$$

В полученном выражении, в соответствии с законом дополнительности, $\overline{X_1} + X_1 = 1$; $\overline{X_3} + X_3 = 1$. После дальнейших преобразований уравнение (1.37) окончательно принимает вид

$$X_2X_3 + X_1X_2 = X_2(X_1 + X_3)$$

Таким образом, с учетом условных состояний, число операторов минимизировано до двух. Это операторы «И» и «ИЛИ».

УДК 621.9.

Цифровой 3D-реинжиниринг металлорежущих станков лаборатории кафедры «Технологическое оборудование»

Студенты гр. 10305221 Деревяго Д.Д., Тарасевич А.А., Цыбульский М.А.
Научный руководитель – ст. преподаватель Ажар А.В.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Консольно-фрезерные станок модели 6М82 (рисунок 1) представляет собой оригинальный станок высокой точности и жесткости. Станок предназначен для выполнения различных фрезерных работ в условиях как индивидуального, так и крупносерийного производства. Характерная особенность станка это то, что его стол может быть повернут вокруг вертикальной оси на угол до 45° в обе стороны.

В условиях крупносерийного производства станки могут быть успешно использованы также для выполнения работ операционного характера. Станки могут быть настроены на различные автоматические циклы, что повышает производительность труда, исключает необходимость обслуживания станков рабочими высокой квалификации и облегчает возможность организации многостаночного обслуживания. Работа на станке и обслуживание его в строгом соответствии с руководством обеспечат безотказную работу станка и позволят сохранить на длительный период его первоначальную точность.

Процесс создания 3D модели станка был реализован с помощью программного комплекса САПР (SolidWorks). Исходные данные для работы были следующие: паспорт станка с техническим описанием конструкции, кинематики, принципа работы, станок как физический объект. Главная задача работы – обеспечить все возможные движения на станке. Исходные данные представляли ограниченную информацию для процесса реинжиниринга, как несущей системы станка, так и приводов. Поэтому при разработке цифровой модели производился дополнительный обмер корпусных деталей и расчеты геометрических параметров деталей приводов.



Рисунок 1 – Консольно-фрезерный станок модели 6M82

Для ускорения и упрощения моделирования построение всех зубчатых колес было осуществлено в программе Компас-3D. В данной программе есть функция для создания пар зубчатых колес, где нужно задать значение модуля, число зубьев, и ширину пар зубчатых колес. Сведения о зубчатых колёсах, содержащиеся в технической документации, ограничивались числом зубьев и модулем колес (рисунок 2).

Наличие полностью интегрированной библиотеки стандартных компонентов с различными вариантами исполнений “Toolbox” (рисунок 3), позволило ускорить работу при моделировании стандартных деталей станка в программе SolidWorks. Так были смоделированы не только подшипники, но и болты, гайки, втулки.

Геометрический расчёт

Страница 1

Наименование и обозначение параметра		Ведущее колесо	Ведомое колесо
1. Число зубьев	z_1, z_2	0	0
2. Модуль, мм	m_h	2	
3. Угол наклона зубьев на делительном цилиндре	β	0° 0' 0"	0° 0' 0"
4. Направление линии зуба ведущего колеса	—	прямое	
5. Угол профиля зуба исходного контура	α	20° 0' 0"	0° 0' 0"
6. Коэффициент высоты головки зуба исходного контура	h_a^*	1	
7. Коэффициент радиального зазора исходного контура	c^*	0.25	
8. Коэффициент радиуса кривизны переходной кривой в граничной точке профиля зуба исходного контура	ρ_f^*	0.38	
9. Ширина зубчатого венца, мм	b_1, b_2	0	0
10. Коэффициент смещения исходного контура	x_1, x_2	0	0
11. Диаметр измерительного ролика, мм	D_f, D_2	3.464	3.464
12. Тип зуборезного инструмента	—	червячная фреза	червячная фреза
13. Параметры зуборезного инструмента	Число зубьев	z_{o1}, z_{o2}	0
	Диаметр вершин, мм	d_{ao1}, d_{ao2}	0
14. Ширина межвенцовых канавки для выхода инструмента (у шевронных колес), мм	b_{1f}, b_{2f}	—	—

Рисунок 2 – Функция для создания зубчатых колес (Компас-3D)

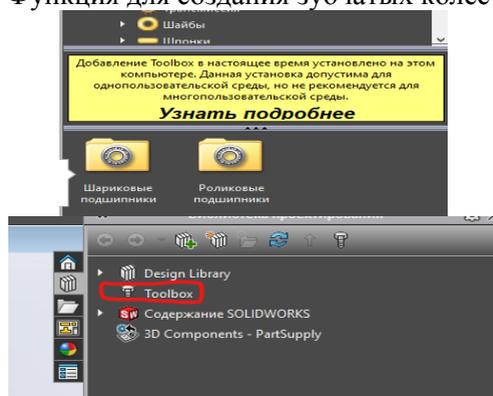


Рисунок 3 – Библиотека Toolbox

На первом этапе моделирования была реализована несущая система станка в виде основных базовых деталей: основание, станина, консоль, салазки, стол, хобот. Задано их взаимное положение относительно друг друга, реализовано перемещение в привязке к выбранной системе координат станка и ограничениями по длине хода и углу поворота. Таким образом, была получена компоновочная 3D схема с габаритами и рабочим пространством, соответствующими физическому объекту. Далее проведено моделирование приводов станка с заданием кинематических связей механизмов и узлов, передающих и преобразующих скорость,

направление, усилие и момент при движении от источника (электродвигателя) до исполнительного звена (шпинделя, консоли, салазок, стола). Проведена интеграция полученных приводных модулей в цифровую оболочку несущей системы.

Коробка скоростей (рисунок 4) смонтирована непосредственно в корпусе станины (в верхней ее части) и управляется с помощью вставной коробки переключения, расположенной с левой стороны станины. Первый вал коробки скоростей соединяется с валом двигателя упругой муфтой, допускающей несоосность в установке двигателя до 0,5–0,7 мм. Упругая муфта имеет стандартное исполнение с кожаными кольцами, которые нужно менять по мере износа.

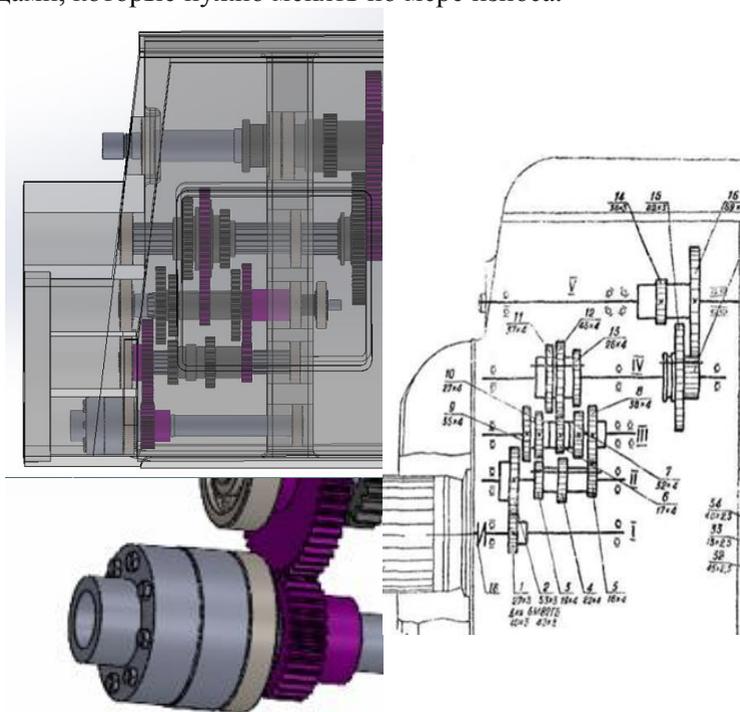
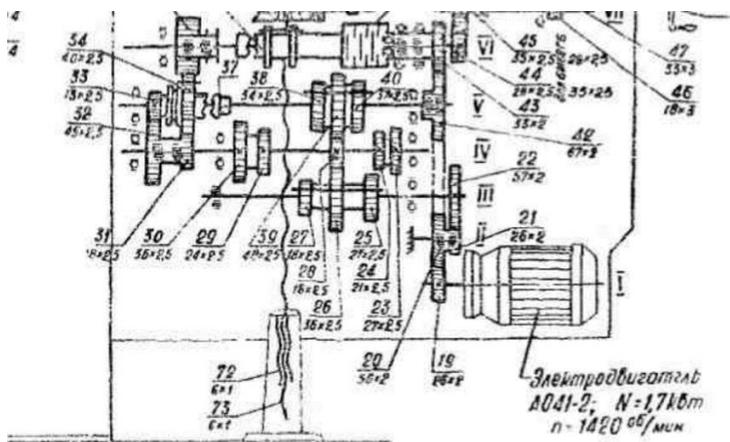


Рисунок 4 – Коробка скоростей

Коробка подач (рисунок 5) предназначена для изменения величины рабочих подач стола, салазок и консоли и сообщения этим узлам быстрых перемещений. При описании кинематической схемы было отмечено, что станки имеют 18 различных подач. Продольные и поперечные подачи одинаковы, в то время как вертикальные подачи в три раза меньше. Коробка подач представляет собой самостоятельный узел, смонтированный с левой стороны консоли, к которой она привертывается винтами и фиксируется двумя контрольными штифтами. К корпусу коробки подач прифланцована коробка переключения подач, имеющая в передней части лимб из пластмассы с обозначением величины подач и грибок для переключения.



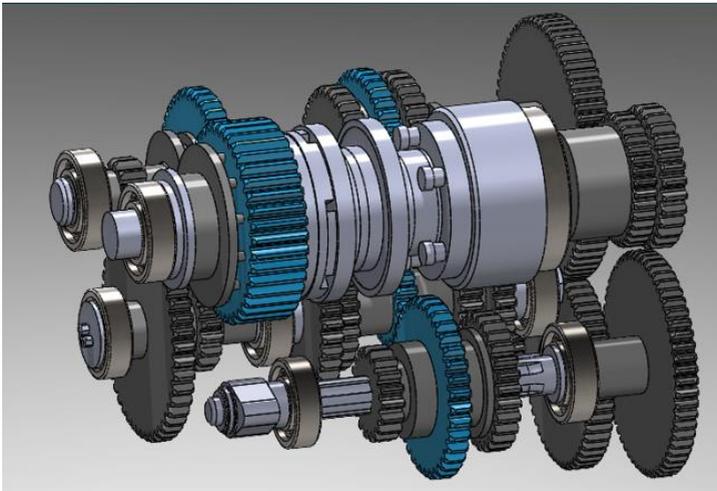
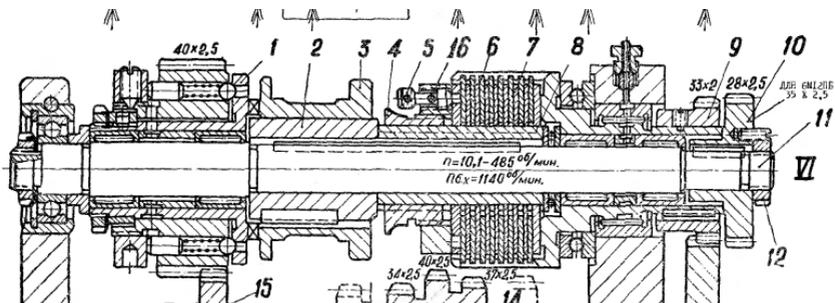


Рисунок 5 – Коробка передач

Получаемые в результате переключения восемнадцать различных скоростей зубчатого колеса 15 (рисунок 6) передаются на последний вал коробки передач через шариковую предохранительную муфту 1, кулачковую муфту рабочего хода 3 и втулку 2, жестко соединенную с кулачковой муфтой 3 и с валом 11. Кроме того, с валом 11 шпонкой связана втулка 8, передающая валу 11 при выключенной кулачковой муфте и включенной фрикционной муфте быстрое вращение.



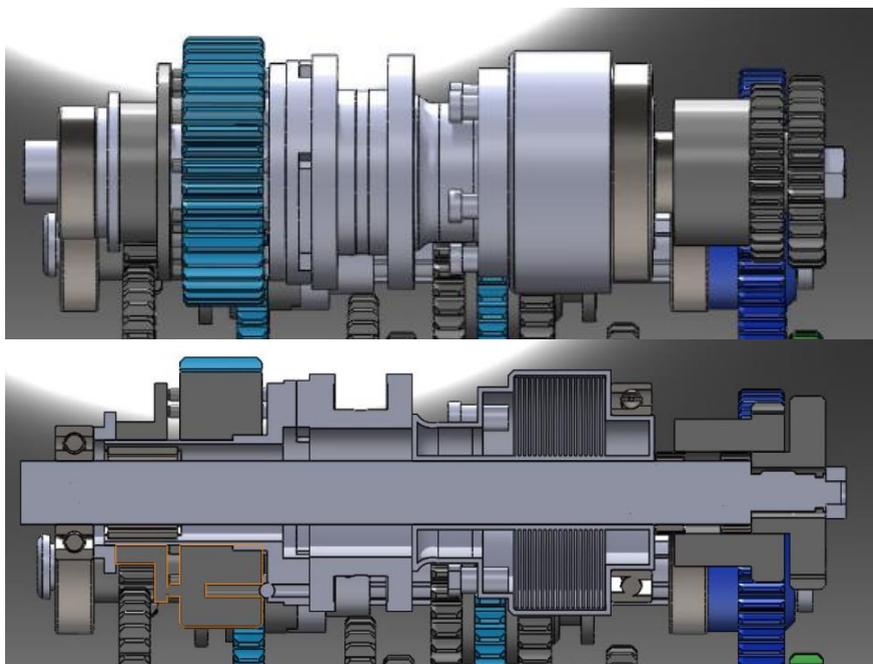


Рисунок 6 – Вал предохранительной и фрикционной муфт

Консоль (рисунок 7) является базовым узлом, объединяющим все остальные узлы цепи подачи и распределяющим движение на продольную, поперечную и вертикальную подачи. Консоль представляет собой чугунный корпус, имеющий развитые направляющие под станину профиля «ласточкина хвоста» и перпендикулярные к ним прямоугольные направляющие под салазки. Консоль несет на себе различные органы управления и устройства. Направление поворота рукоятки включения поперечной и вертикальной подач мнемонически связано с направлением движения салазок или консоли. Рукоятка имеет пять фиксированных положений: подача или быстрый ход консоли вверх; подача или быстрый ход консоли вниз; подача или быстрый ход салазок от себя; подача или быстрый ход салазок к себе; стоп поперечного и вертикального ходов.

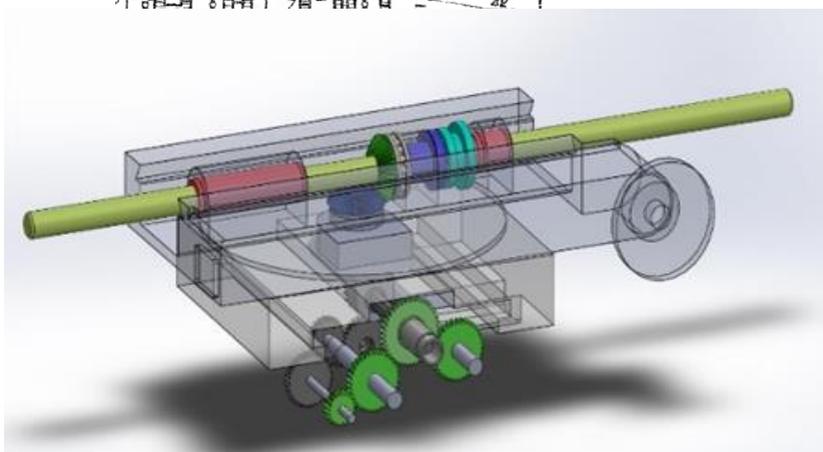
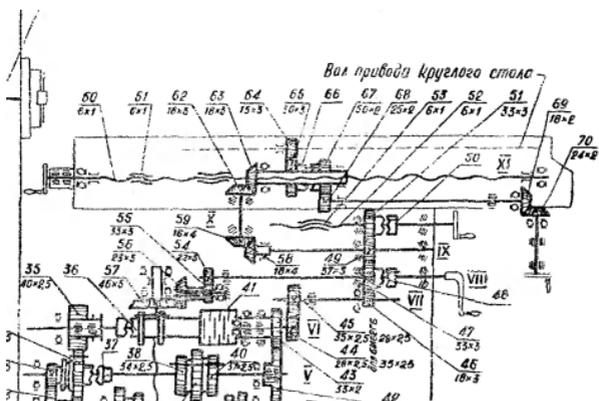


Рисунок 7 – Консоль

В консоли смонтирован ряд валов и зубчатых колес, передающих движение в трех направлениях: к винту поперечной, к винту продольной и к винту вертикальной подачи (рисунок 8). Зубчатое колесо 8 получает движение от зубчатого колеса коробки подачи и передает его на зубчатые колеса в передней части консоли. Зубчатое колесо 7 смонтировано на валу VII на игольчатом подшипнике и может передавать движение валу только через кулачковую муфту, связанную с валом шпонкой. Далее движение передается через пару цилиндрических и пару конических зубчатых колес на вертикальный ходовой винт.

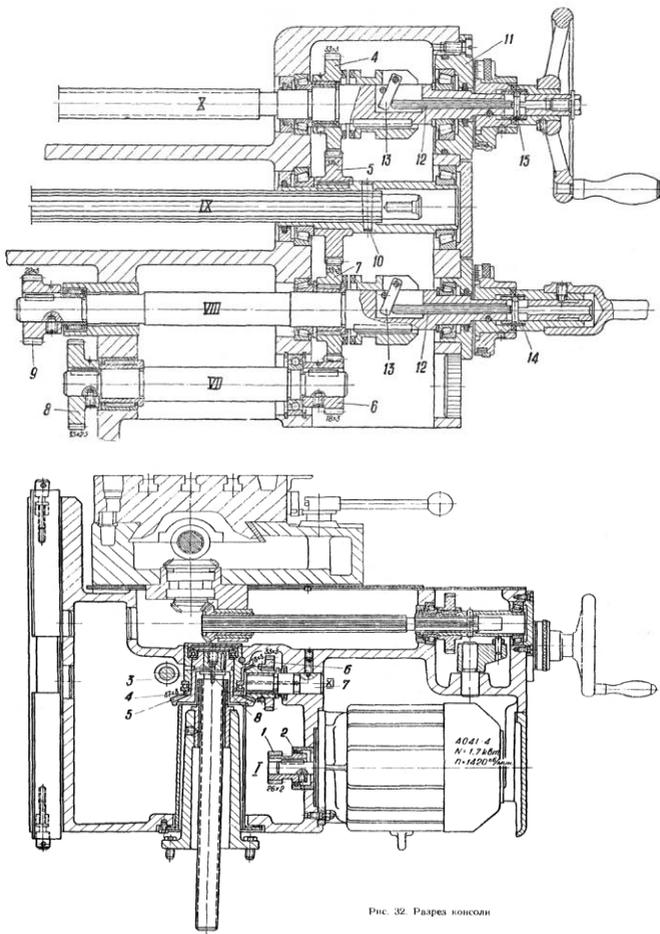


Рис. 32. Разрез консоли

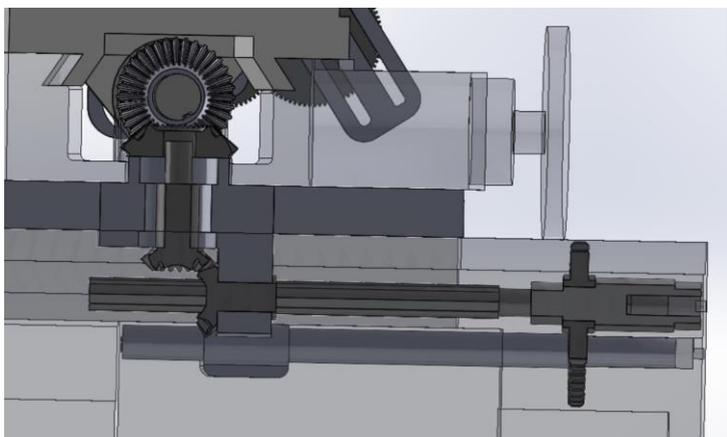


Рисунок 8 – Развертка и разрез консоли

На примере цепи главного движения можно показать, что 3D модель является кинематически активной, позволяет виртуально переключать передачи (переключаемые зубчатые колеса отмечены на рисунке 9). Используя данную модель, можно изучать кинематику, а также осуществлять настройку станка.

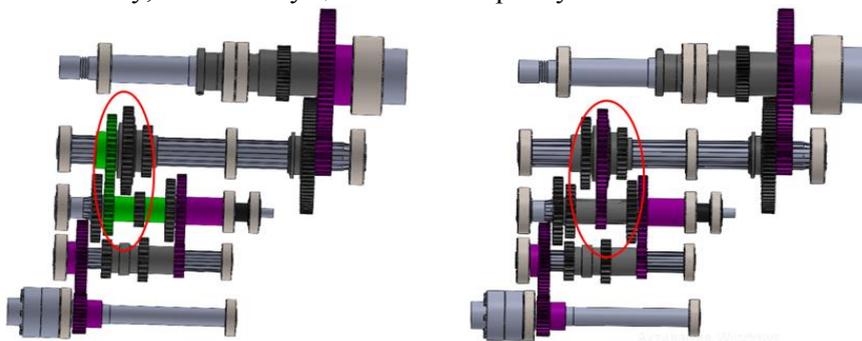


Рисунок 9 – Виртуальное переключение передач

Также была смоделирована УДГ (универсальная делительная головка), с точной передачей кинематики как на станке, для возможности осуществления нарезания стружечной канавки. Число и расположение отверстий на диске УДГ точно соответствует действительности, что обеспечивает реалистичную кинематику при виртуальной настройке (рисунок 10).

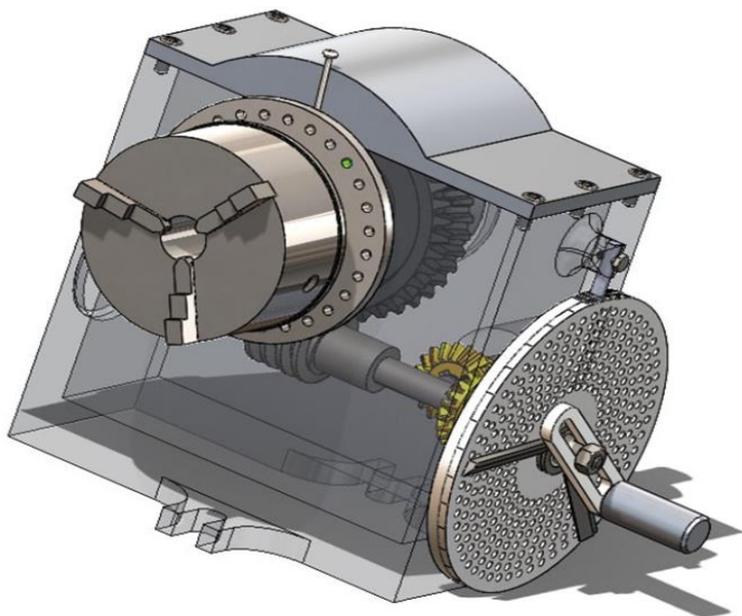


Рисунок 10 – Универсальная делительная головка

Все файлы сборок необходимо было объединить в единую конструкцию. Для этого были заданы все требуемые сопряжения, обеспечивающие реализацию всех движений станка. В частности, для создания подвижных деталей в составе сборки была применена функция "Сделать узел сборки гибким" (рисунок 11).

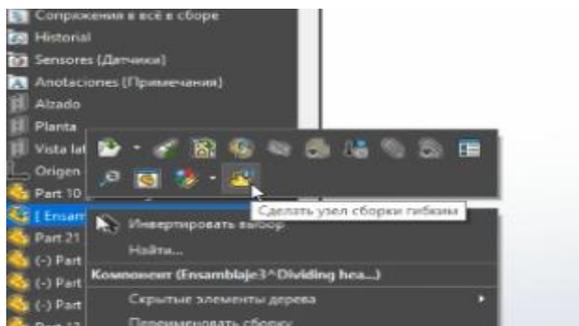


Рисунок 11 – Опции сборки станка

В результате была смоделирована полная 3D-модель станка 6M82 (рисунок 12), при этом полностью сохранена кинематика устройства. Вся модель обладает динамическими свойствами, что позволит осуществлять настройку и наладку станка. Виртуальная модель применяется при подготовке к лабораторным работам, а в дальнейшем предполагается ее использование в VR-технологиях.

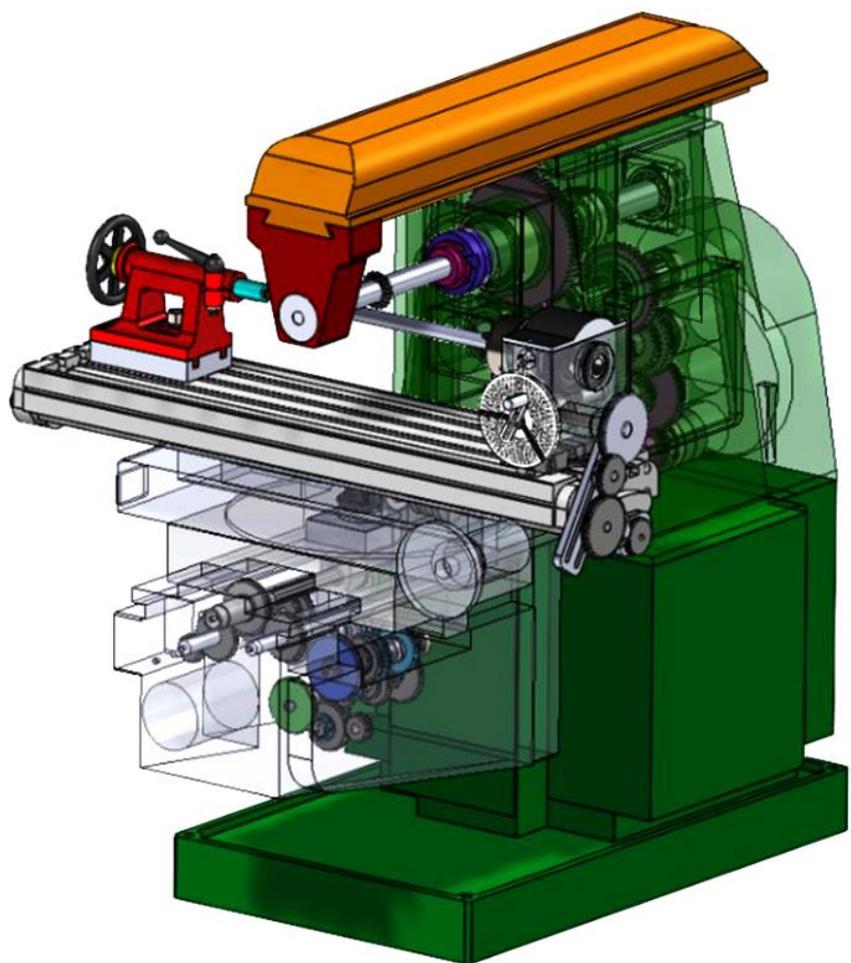


Рисунок 12 – Результат моделирования станка в целом

Специальный проект «Тепловая бионическая башня»

УДК 621.9.011

БИОНИЧЕСКАЯ БАШЕННАЯ НЕСУЩАЯ СИСТЕМА ДЛЯ БАЗИРОВАНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ. ЧАСТЬ А: ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ С ПОМОЩЬЮ ИИ

Студенты гр.10305121, 10305221 Цыбульский М.А.,

Мануш А.Д, Тарасевич А.А.

Научный руководитель – доцент Довнар С.С.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

- ББ – бионическая башня (пустотелая оболочечная конструкция бионической формы)
- БФ – бионическая форма (в данной работе – наружная форма ствола ветроустойчивого дерева)
- ВТЕТ – вытяжное отверстие с естественной тягой внутри бионической башни (вертикальное отверстие типа внутренней полости градирни)
- ВС – вертикальный сад (экосистема из растений на вертикальных, наклонных стенках, или на террасах). Пример экосистемы – легендарные Сады Семирамида
- СаС – сады Семирамиды (легендарные ВС, существовавшие до н.э. в междуречье Тигра и Евфрата). Упоминаются ниже как совершенно условный пример ББ
- ТВВ – теплый влажный воздух (синоним – *пар*)
- ПИ – парник-испаритель
- КБИС-ВС – концепция базирования и снабжения водой вертикального сада с помощью ББ. Синоним – *(ББ+ВС)*

Цель работы – изложить концепцию механического базирования и попутного водоснабжения вертикального сада с помощью бионической башни. Решение предназначено для равнинной местности, обеспеченной водой и имеющей хорошую инсоляцию. Концепция направлена на снабжение ВС водой

самопроизвольно, без расхода электроэнергии. В этом смысле концепция – самодействующая и экологичная.

Гипотетическим примером реализации концепции могут оказаться исторические Сады Семирамиды (СаС) [1]. Ниже они упоминаются лишь как удобная иллюстрация. Точные данные о несущей системе СаС и их функционировании отсутствуют.

Работа является попыткой изложить концепцию КБИС-ВС только с помощью изображений, сгенерированных ИИ (искусственным интеллектом). К чертежам и схемам умышленно не прибегают. Это важно для понимания сильных и слабых сторон современных ИИ при иллюстрации технических задач. В данной работе системы текстовых запросов обрабатывались графической библиотекой открытого доступа DALL-E3.

Традиционное понимание большого ВС (например, Садов Семирамиды) как холма или ступенчатой пирамиды дано ниже на рис. 1. Искусственный холм является массивным и дорогостоящим сооружением. Подача воды наверх холма для полива в современных условиях обычно предполагает установку насосов и постоянный расход электроэнергии.



Рисунок 1 – Традиционное представление вертикальных садов (ВС), например СаС: 1 – равнина; 2 – водные потоки; 3 – искусственный холм, покрытый растениями

В данной работе предлагается (рис. 2) заменить холм на легковесную оболочечную конструкцию – бионическую башню ББ. Башне придают бионическую форму (БФ) ствола дерева. Это обеспечивает ББ общее соответствие идее равнопрочной балки. Несущая система с переменным сечением и профилем ствола дерева должна эффективно выдерживать ветровые, гравитационные и сейсмические нагрузки.



Рисунок 2 – Сцена для реализации концепции: плоская равнина 1 с водяными потоками 2, обеспеченная инсоляцией, бионическая башня ББ с открытым верхним торцом 3 для вытяжки пара и горизонтальными садами 4

Важно, что ББ предполагается пустотелой. Внутренняя полость должна быть подобна внутренней форме градирни [2]. Иными словами, внутри башни должна существовать ВТЕТ – вытяжная труба на естественной тяге. Вопрос о газовой среде, вытягиваемая наверх таким естественным насосом (функционирует в каждой градирне) будет изложен ниже. Толщина стенок башни может быть переменной. Стенки могут быть отнюдь не гладкими.

Вернемся к гипотетическому примеру с СаС. Такая башня (рис. 2) могла бы быть относительно быстро и недорого возведена

из кирпича. Утилизация отслужившей свой срок ББ также могла произойти довольно легко. Может быть, поэтому следы Садов Семирамиды так и не обнаружены до сих пор.

В предлагаемой концепции существенно создание потока ТВВ (пара) и управление им. Предлагается рассматривать теплицу (парник) не только как место роста растений. В регионе с сильной парник способен испарять большое количество воды. Он превращается в парник-испаритель ПИ (рис. 3).

На рис. 3 дано два варианта такого ПИ, работающего от солнца автоматически и без расхода электроэнергии при условии подачи воды. Условно, пар выходит через крыши парников-испарителей через трубы Т благодаря наличию в них тяги.

Важным условием построения концепции является возможность управляемой конденсации воды из пара (поток капель К на рис. 3) при подъеме потока ТВВ вверх.

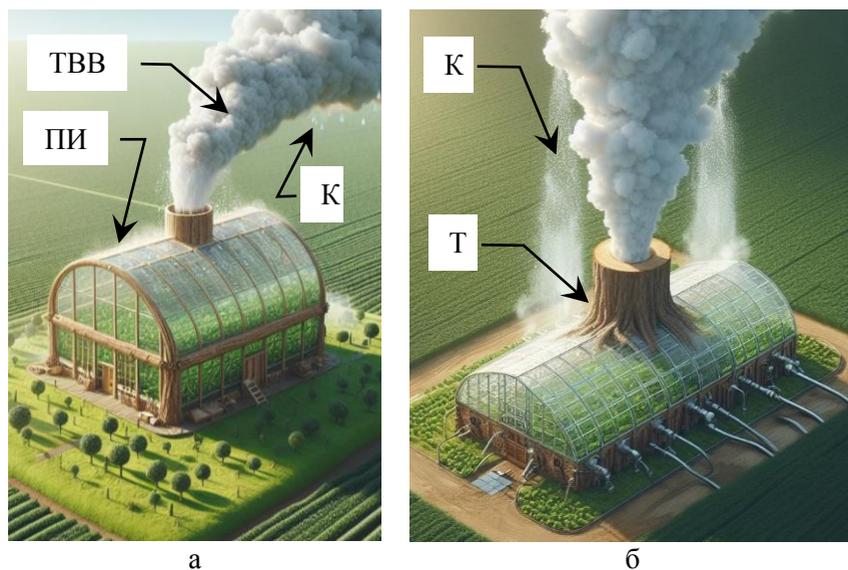


Рисунок 3 – Теплица как парник-испаритель воды (ПИ) и создание вертикального потока ТВВ (пара) в вариантах а, б: К – капли, конденсирующиеся из пара; Т – труба с естественной тягой

Направление выхода пара из парника не принципиально. Предлагается высасывать пар из ПИ с помощью естественной тяги в бионической башне (от ББ1 к ББ2 на рис. 4, а). Здесь пар поднимается вверх (ББ1-ББ2), а конденсирующиеся капли К падают внутри трубы вниз (от ББ2 к ББ1).

Конденсация обусловлена тем, что верхняя часть ББ2 охлаждается на большой высоте. А нижняя часть ББ1 дном находится в приземном прогретом воздухе.

Пар идет (рис. 4, б) по маршруту ПИ – СПП – ББ – ТВВ. На рис. 3 пар уходит через крышу парника благодаря малой естественной тяге. На рис. 4, благодаря высокой ББ, создается мощная тяга. Она может оказаться способной собирать потоки пара из многих парников, специально созданных вокруг ББ.

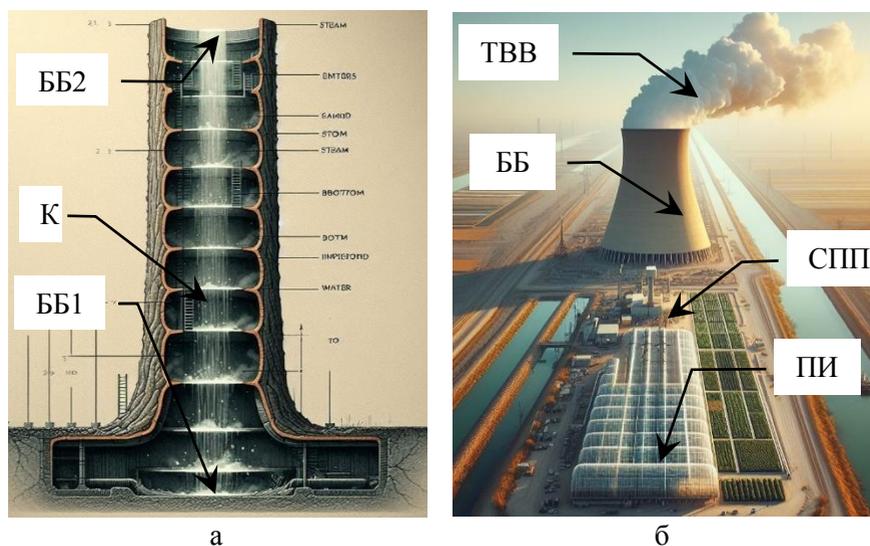


Рисунок 4 – Бионическая башня в разрезе (а) с восходящим потоком пара от ББ1 к ББ2 (и обратным потоком капель К), а также маршрут движения пара (б) от окрестных теплиц ПИ по скрытому паропроводу СПП сквозь ББ («насос») в облако ТВВ

В итоге, концепция КБИС-ВС заключается в том (рис. 5), что сквозь бионическую башню ББ проходит поток теплого влажного воздуха ТВВ и частично конденсируется в верхней, относительно

холодной части башни, или непосредственно над ней. Внутри и снаружи ББ возникают нисходящие потоки капель К. Конденсат собирают и направляют на полив растений в вертикальном саду ВС.

Генерация пара происходит в парниках 1 вокруг ББ автоматически и регулярно, на энергии солнца. Пар транспортируется в ББ и в верх также на естественной тяге (тоже на энергии солнца). Конденсат выпадает самопроизвольно и идет вниз самотеком. После решения задач настройки система способна работать автоматически без участия людей и потребления электроэнергии.

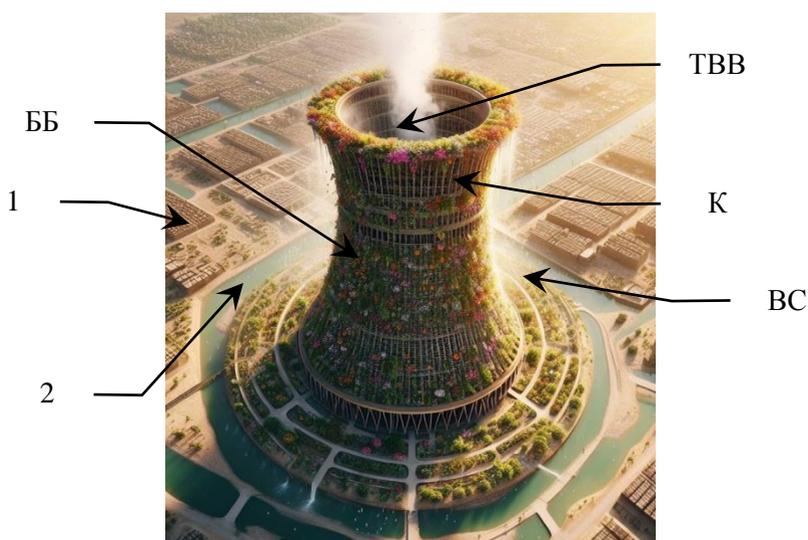


Рисунок 5 – Концепция бионической башни ББ: TVB – восходящий поток пара внутри башни; К – нисходящие потоки конденсирующихся из пара капель; BC – вертикальный сад снаружи ББ; 1 – системы парников-испарителей, поставляющие пар; 2 – водные потоки

Собирать капли воды из пара, возможно, эффективнее всего в верхней теневой части башни. Перспективно применять теплопроводные каналы (металлические балки, тепловые трубы), которые бы имели стоки тепла в тени верха башни. Эти каналы

могли бы входить внутрь башни в струю пара и обеспечивать интенсивную конденсацию.

На рис. 6 представлены варианты внешней формы бионической башни. Здесь возможно большое количество дизайнерских и оформительских решений.



а



б

Рисунок 6 – Варианты реализации КБИС-ВС (ББ+ВС):

а – вертикальный сад в верхней части ББ;

б – растения на специальных площадках по всей высоте ББ

Представленная концепция КБИС-ВС может быть реализована в самых разных ландшафтах. Например, она может работать на берегу моря (рис. 7). Соляные поля 1 будут испарять морскую воду и, попутно, получать морскую соль. Пар будет подаваться в башню (трассы не показаны) и конденсироваться на внутренних стенках верхней части башни 2. Далее капли воды будут самотеком выводиться на наружную стенку башни. Здесь в нижней части 3 башни расположен вертикальный сад.



Рисунок 7 – Выпариваемые соляные поля 1 на границе моря, верхний участок 2 башни, конденсирующий внутренними стенками воду, и нижний участок 3, несущий снаружи вертикальный сад

Достоинства предлагаемой концепции ББ:

1. Легкость и экономичность несущей системы (ББ), способность быть быстро построенной и утилизированной.
2. Потенциально высокое соотношение «несущая способность – масса несущей системы»
3. Потенциально хорошая устойчивость к вертикальным и горизонтальным нагрузкам.
4. Несущая система (ББ) одновременно служит вытяжной трубой для конденсируемого пара
5. Автоматический и регулярный режим конденсации воды для полива вертикального сада ВС
6. Функционирование ББ как носителя вертикального сада не требует в идеале управления, приводов и механизмов, работы подвижных объектов, потребления электроэнергии.
7. Бионический дизайн, возможность разнообразных стилистических решений ББ+ВС
8. Способность взаимодействовать с ресурсами как пресной, так и соленой воды.
9. Сочетание функционирования ББ+ВС с выращиванием в парниках-испарителях ПИ обычного урожая
10. Возможность использования ББ как экологически эффективной опреснительной установки, работающей без приводов только от энергии солнца.

11. Предполагаемый большой срок службы ББ.
12. Масштабируемость решения, возможность создавать поля ББ+ВС.

Открытые вопросы концепции ББ:

1. Создание эффективной системы конденсации воды.
2. Эффективное использование природной разности температур в нижней и верхней частях башни.
3. Использование эффектов разных температур на освещенной и теневой частях башни.
4. Настройка тяги в башне и управление потоками пара.

Литература

1. Dalley, Stephanie[англ.]. The Mystery of the Hanging Garden of Babylon: an elusive World Wonder traced. — Oxford University Press, 2013.
2. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий: Справочное пособие / Под общ. ред. В. С. Пономаренко. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 376 с.

УДК 621.9.011

**ВЕРТИКАЛЬНАЯ БИОНИЧЕСКАЯ БАШНЯ КАК
САМОДЕЙСТВУЮЩАЯ ТЕПЛО-МЕХАНИЧЕСКАЯ
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА**

(экспертно-авторское изложение инновационной студенческо-преподавательской концепции)

доц. Довнар С.С., проф. Якимович А.М., аспирантка Лапука А.Д.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Данная статья является одной из двух работ (тандела) в настоящем сборнике, посвященных интересной новации – применению вертикальной бионической башни (ВББ или просто «башни») не только как несущей системы, но и как особой тепломеханической машины. Просматривается возможность создания эффективного инженерного и экологического объекта. Первая работа в танделе [1] представляет, во-многом, студенческий

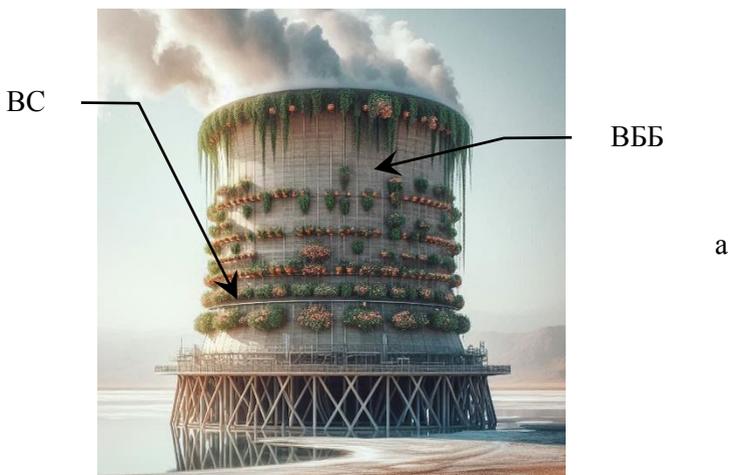
взгляд на потенциальную новацию. Данная, вторая, работа описывает новацию с точки зрения экспертов-преподавателей.

Таким образом, концепция параллельно излагается и интерпретируется в двух статьях. Это делается для достижения большей ясности и достоверности изложения потенциально интересной концепции. Все авторы обеих статей тандема являются инкорпорированными в данную новацию исследователями.

Упомянутая башня является центральным объектом в работе некоторой тепломеханической машины. Целью машины является *несение* высокорасположенного вертикального сада (ВС) и *обеспечение сада водой*. Вода как бы сама собой должна оказываться на высоте, достаточной для полива высоко расположенных растений.

Иначе, надо создать современную реплику (рис.1, а) легендарных Садов Семирамиды («Висячих садов Вавилона») [2]. Реплика должна работать в идеализированном экологическом режиме (ИЭР), в частности, без электричества и водяных насосов (рис.1, б).

Здесь развивается концепция: «горизонтальное испарение воды – естественная тяга – вертикальная высотная конденсация» (ГИВЕТ-В2К). В изложении применяются авторские 3D-модели и сгенерированные ИИ изображения.



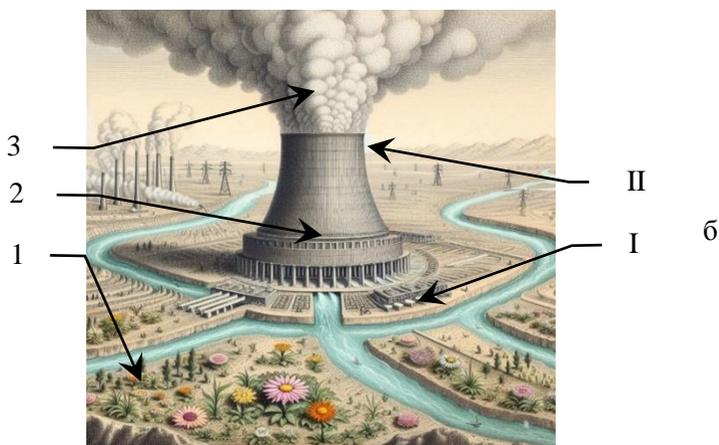


Рисунок 1 – Вертикальный сад ВС на несущей системе в виде вертикальной бионической башни ВББ (а) и цепочка превращения (б) воды 1 (на нижнем уровне I системы) с помощью возгонки в ВББ-башне 2 в пар 3 на верхнем уровне II системы (источник энергии – солнце – условно за кадром)

Предполагается, что башня (рис. 1) в составе инженерной системы выступает в качестве самодействующего преобразователя и потребителя солнечной энергии с задачами:

- снабжение вертикального сада (размещенного на самой башне между уровнями I и II) водой (самотеком);
- выращивание урожая цветов и растений (в вертикальном саду ВСБ и вокруг него) без потребления внешней электроэнергии и, по возможности, без монтажа каких-либо машин и механизмов.

Башне как инженерной системе должны требоваться только:

- достаточно много солнца сверху;
- вода (можно, соленая и даже загрязнённая) внизу;
- пространство для парников-испарителей вокруг башни;
- достаточно холодные слои воздуха в верхней части башни.

Для функционирования башни не принципиальны:

- ветер;
- характер основания (подходят почва, море, песок, отмель и т.д.);
- характер окружающего ландшафта.

Башня должна обеспечить:

- функционирование в верхней части башни распределенного источника воды (в жидкой фазе);
- самопроизвольную работу без расхода платных энергии и материалов;
- отсутствие обязательной системы управления;
- очистку и опреснение воды.

Предлагаемое техническое решение основывается на известной идее «солнечной тяги в трубе» (*solar chimney* or *sun updraft tower* – SUT [3]). Это идея заключается (рис.2, а) в нагреве воздуха в парнике (*collector*) и в создании благодаря этому естественной тяги в вертикальной башне (*tower*). Поток воздуха в достаточно высокой башне может стать настолько сильным, чтобы приводить турбины (*turbines*) и вырабатывать электричество. На этом принципе в конце 1980-х гг. в Испании была построена солнечная электростанция с высотой трубы 200 м, диаметром солнечного коллектора 250 м и мощностью 36 кВт. Аналогичная современная экспериментальная мини-станция [4] показана на рис.2, б.

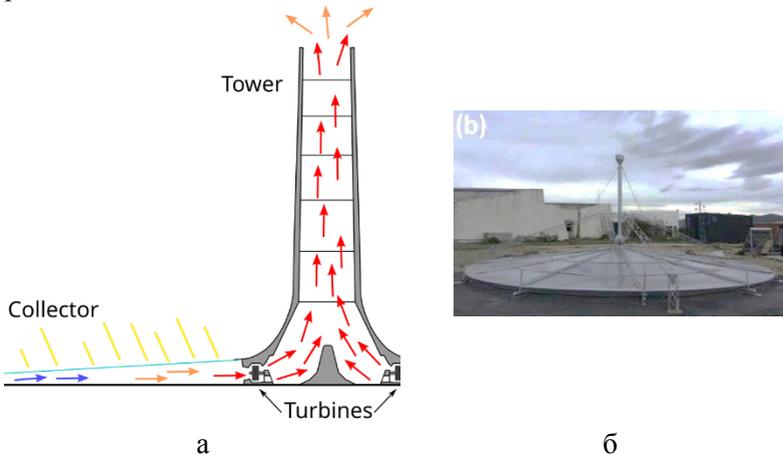


Рисунок 2 – Тепломеханическая машина SUT на схеме (а; [3]) и в эксперименте (б; [4]): поток сухого воздуха нагревается (переход от синих стрелок к красным) в парнике “collector” и поступает в башню “tower” с естественной тягой. Поток передает энергию турбинам “turbines”

В предлагаемом решении парники также должны снабжать нагретым воздухом высокие трубы-башни (рис. 3). Однако, *первое отличие* заключается в том, что в парниках воздух не только нагревается, но и насыщается парами воды (желательно, до предела). Такую среду далее будем называть паром, а парник – парником-испарителем (ПИ). Вода в ПИ может заливаться из любых подходящих источников, в том числе из моря.

Второе отличие заключается в том, что вода должна конденсироваться в верхней части башни, расположенной в относительно холодных слоях воздуха. Предполагается система холодных конденсаторов, которые обеспечивают осаждение капель воды. Далее капли собираются и самотеком направляются вниз по башне, к растениям вертикального сада. Сад может находиться как внутри башни (рис. 3), так и снаружи от нее (рис. 8).

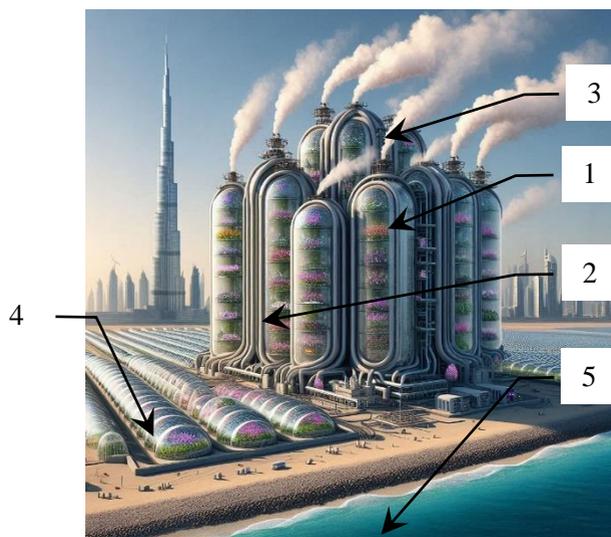


Рисунок 3 – Возможная компоновка для предлагаемой тепломеханической системы: сообщество вертикальных башен 1 с вертикальными садами 2 внутри, потребляющее пар 3 из горизонтальных парников-испарителей (ПИ) 4 путем испарения соленой воды 5

Идея парника-испарителя ПИ иллюстрируется на рис. 4. Испарение идет при солнечном свете. Предполагается наличие водоема (канала), в который поступает вода, например, из моря. Тогда уровень моря является самым нижним уровнем рассматриваемой инженерной системы.

Выращивание растений в ПИ возможно, но не является его основной функцией. Главным процессом является генерация насыщенного пара. Пар должен вытягиваться из ПИ путем естественной тяги в трубу (бионическую башню).



Рисунок 4 – Парник-испаритель ПИ, выпаривающий поступающую воду за счет энергии солнечных лучей (наличие в парнике растений необязательно)

Общая схема работы системы представлена на рис. 5. Солнце 1 служит единственным источником энергии. Вода поставляется по каналам 2. Реализована радиальная компоновка, когда парники-испарители 3 расположены на нижнем уровне радиально к оси башни 4. Потoki прохладного сухого воздуха 5 (синие стрелки) проходят парники-испарители и становятся горячими и влажными.

Горизонтальные потоки 5 собираются в вертикальный поток 7 (красная стрелка), идущий внутри башни 4 вверх. Из вертикального потока 7 выпадают капли пресной воды 6. Таким образом, данная система не только доставляет воду в верхнюю часть бионической башни, но и работает опреснительной установкой.

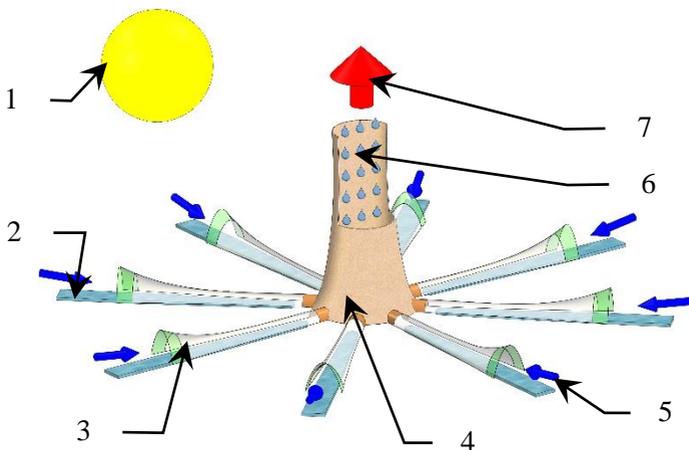


Рисунок 5 – Схема работы ВББ: 1 – солнце; 2 – водный поток; 3 – прозрачный парник-испаритель; 4 – бионическая башня; 5 – входящий поток сухого воздуха; 6 – конденсирующиеся капли воды; 7 – выходящий поток пара (воздуха, насыщенного парами воды)

Система конденсации пара (СКП) в верхней части башни способна самопроизвольно работать при условии обтекания башни потоками прохладного воздуха. Варианты устройства СКП многочисленны [5]. Один из вариантов показан на уровне общей схемы на рис. 6, а.

В башне 1 (условно показана прозрачной и в разрезе) закреплены конденсирующие структуры – «ветви». Ветви могут быть сделаны из теплопроводящего материала, например, бронзы, и иметь внутри себя стандартные тепловые трубы. Наружная часть каждой ветви 2а (сток тепла) охлаждается прохладным воздухом, особенно, в теневой части башни. Внутренние части ветви 2б собирают теплоту из идущего снизу вверх пара. Это обеспечивает конденсацию пара и сбор капель воды в поддоне 3. Далее вода поступает самотеком на стену башни (начиная с отметки 4) для полива растений.

Вариант конденсации «трубы» (рис. 6, б) также предполагает движение пара под действием вертикальной тяги по стрелкам А – В. Однако, в верхней части башни пар должен соприкоснуться со внутренними трубами, по которым проходит высотный прохладный воздух (стрелки С – D). Высотный воздух отбирает тепло у пара и сам устремляется вверх. Пар частично конденсируется на наружных поверхностях труб и собирается в поддоны и т.п.

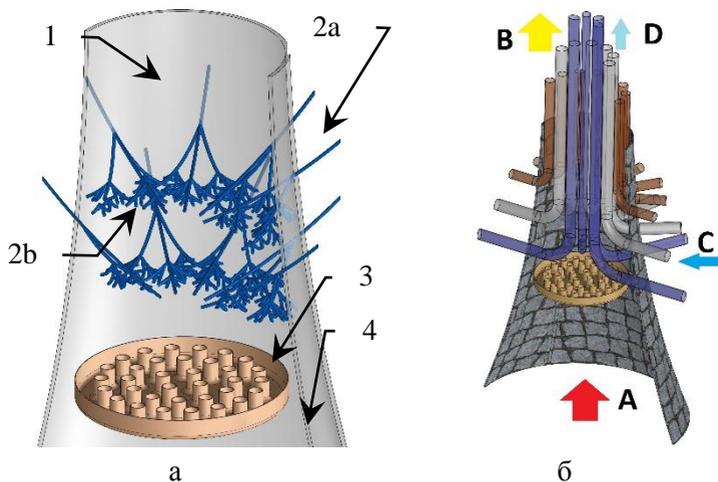


Рисунок 6 – Схема конденсации пара внутри башни ВББ в вариантах : а – «ветви» (1 – башня; 2а – наружная (охлаждаемая) часть конденсирующей структуры «ветвь»; 2b – внутренняя (нагреваемая) часть «ветви»; 3 – поддон для конденсата; 4 – отметка самотека); б – «трубы» (А, В – движение пара сквозь башню; С, D – движение прохладного высотного воздуха по трубе)

Как вариант «Ветви», так и вариант «Трубы» являются самодействующими. Они не требуют обязательного присутствия изнашивающихся механизмов и блоков управления.

Процесс конденсации пара в капли может происходить как внутри башни, так и непосредственно над ней. Это показано на рис. 7. На рис. 7, а башня установлена среди соляных полей на берегу соленого водоема с жарким климатом. На соляном поле под солнцем идет выпаривание воды. Ускорить технологический

процесс можно с помощью парникового эффекта. Сбор выпариваемой воды (пара) обеспечивает на рис. 7, а функционирование вертикального сада, архитектурно задрапированного под небоскреб. При наличии избытка пара в середине дня возможен самополив (2) башни благодаря восходящему потоку пара и капель.

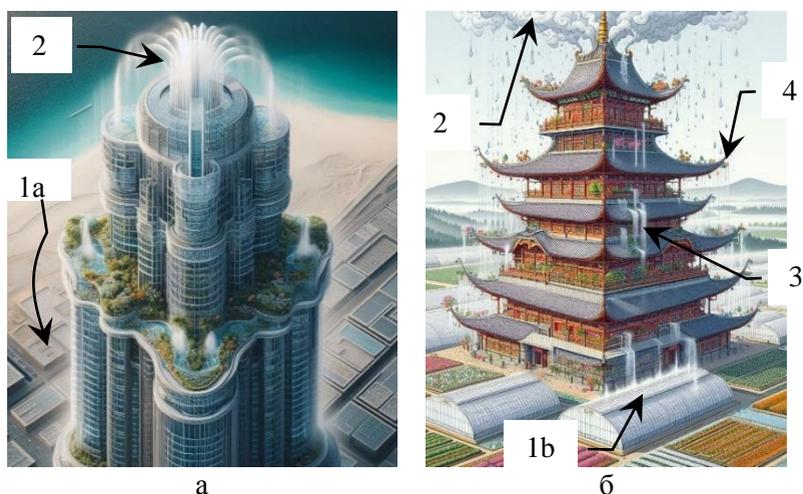


Рисунок 7 – Варианты башни, базирующейся на соляных выпариваемых полях (а) и на равнине (б): 1а, 1б – выпариваемое поле и парник-испаритель; 2 – внешняя конденсация пара над вертикальным садом; 3 – следы внутренней конденсации; 4 – архитектурно замаскированная охлаждаемая часть структуры конденсации.

На рис. 7, б вертикальный сад стилизован под пагоду, стоящую среди парников-испарителей 1б на сельскохозяйственных угодьях. Если сбор и конденсация пара идут эффективно, то возможны одновременно самополив 2 башни (наружная конденсация) и внутренняя конденсация, на которую указывают потоки 3 избыточной воды. Обратим внимание на хорошо обдуваемые воздухом свесы крыш 4 многоярусной пагоды. В них могут быть эффективно встроены охлаждаемые части (стоки теплоты) конденсирующих систем СКП.

На рис. 8 представлена компоновка с бионической башней морского базирования. Такой проект может быть реализован, например, в акваториях среди аравийских искусственных островов, где волнение моря ограничено.

Здесь бионическая башня снаружи своей нижней части 1а несет вертикальный сад. Вода для него поступает самотеком из верхней части башни 1б. Парники-испарители 2 превращают морскую воду 3 в пар 4. Возможно, внутри парников-испарителей окажется возможным выращивать какие-либо виды растений. Тогда объекты 2 станут своего рода горизонтальным садом под вертикальным садом ВББ.

Бионические башни с вертикальными садами могут применяться как мультисистемы. Например, они могут «заселять» пустынную береговую линию вдоль жаркого моря (рис.9). Тогда открываются экономические выгоды от их совместного возведения. Не исключены положительные сдвиги в исходном засушливом микроклимате.

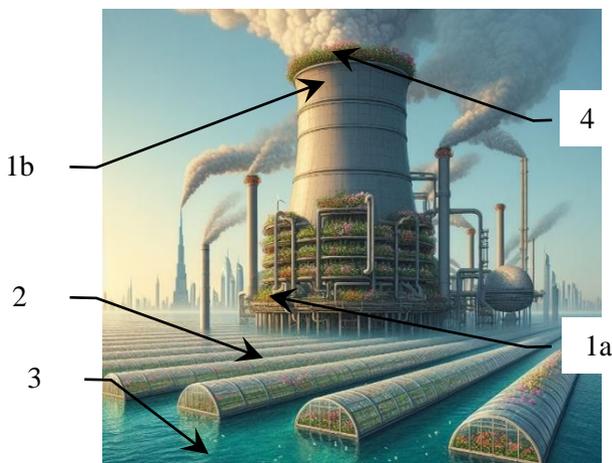


Рисунок 8 – Компоновка вертикального сада морского базирования:

1а – вертикальный сад снаружи башни; 1б – область сбора конденсирующейся воды внутри башни; 2 – парники-испарители; 3 – морская вода, отбираемая в парники; 4 – выход пара и каемка растений на верху башни.



Рисунок 9 – Заполнение пустынной морской береговой линии бионическими башнями с вертикальными садами

Итак, на базе механической несущей системы бионической башни виртуально построена самодействующая тепловая машина. В проекте все части статичны и не предполагают работы каких-либо обязательных механизмов и контроллеров. Система экологична и не создает загрязнений. Обеспечивается выращивание растений и опреснение воды.

Предлагаемая система позволяет многочисленные архитектурно-ландшафтные интерпретации. Поэтому концепция «горизонтальное испарение воды – естественная тяга – вертикальная высотная конденсация» (ГИВЕТ-В2К) представляется перспективной и заслуживающей дальнейшего развития.

Литература

1. Бионическая башенная несущая система для базирования и обеспечения вертикальной экосистемы. Часть А: графическое представление концепции с помощью ИИ. Студенты гр.10305121, 10305221 Цыбульский М.А., Мануш А.Д, Тарасевич А.А. Научный руководитель – доц. Довнар С.С. / НИРС МСФ-2024. Сборник материалов 80-й студенческой научно-технической конференции. Минск, БНТУ. 2024.
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Hanging_Gardens_of_Babylon
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_updraft_tower

4. Omar Faruqi Marzuki, Ellie Yi Lih Teo, Azmin Shakrine Mohd Rafie. CURRENT TREND IN SMALL SCALE SOLAR UPDRAFT TOWER DESIGNS: A REVIEW. Article in Huadong Ligong Daxue Xuebao /Journal of East China University of Science and Technology, May 2022
5. Libin Ma and Jianxing Ren 2018 *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 108 052116 DOI 10.1088/1755-1315/108/5/052116

Электронное издание

НИРС МСФ-2024

**Сборник материалов
80-й студенческой научно-технической конференции**

Секция «Металлорежущие станки и инструменты»

Машиностроительный факультет

Белорусский национальный технический университет

Компьютерная верстка Л.А.Колесников

E-mail: mstools@bntu.by
<http://www.bntu.by/mstools.html>