

На правах рукописи

\_\_\_\_\_  
*Подпись аспиранта*

Кожикин Владимир Владимирович

\_\_\_\_\_  
*ФИО аспиранта*

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ  
ПНЕВМАТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

\_\_\_\_\_  
*наименование темы научно-квалификационной работы*

15.06.01 «Машиностроение»

\_\_\_\_\_  
*Код и наименование*

15.06.01\_03 «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»

\_\_\_\_\_  
*Код и наименование*

Академический степень **Исследователь. Преподаватель-исследователь**

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

Научный руководитель: к.т.н Мацко Ольга Николаевна

Санкт Петербург – 2022

Научно-квалификационная работа выполнена в ВШ/на кафедре Института Высшая школа автоматизации и робототехники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ/зав. кафедрой: – *Мацко Ольга Николаевна, к.т.н.*

Научный руководитель: – *Мацко Ольга Николаевна, к.т.н.*

Рецензент: – *Дьяченко Владимир Алексеевич, д.т.н., профессор, профессор ВШАиР, ФГАОУ ВО СПбПУ*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы.**

Актуальность данной работы определяются высокими требованиями к качеству выполнения разгрузочно-погрузочных работ в случае с взаимодействием с сыпучими материалами, при их перегрузке из бункеров, когда нужно обеспечить разрыхление слипшейся и утрамбованной породы, а также необходимости снижения затрат энергии и газа в пневматической системе.

Использование пневмоимпульсного устройства позволит добиться существенного выигрыша в затратах энергии при проведении погрузочно-разгрузочных работ из бункеров для разного рода сыпучих материалов. Как правило, данным устройством является пневмоимпульсный генератор, который включает в себя ресивер, клапан и ствол. Из-за специфики конструкции происходит быстрый выпуск сжатого газа, практически мгновенное его истечение, что позволяет очищать промышленное оборудование от загрязнений и отложений. Кроме того, использование подобного устройства позволяет значительно экономить время, энергию и повышает безопасность работы.

Проведенный анализ литературы показал, что данная задача ранее уже решалась, но без применения нечеткой логики, что и обеспечивает новизну данной работе. Необходимость применения подобного устройства также доказывается большим количеством используемых в сельском хозяйстве мелких сыпучих материалов. В России их доля от общего объема достигает 60 % от всех сыпучих материалов. Сыпучий материал гораздо хуже подвергается выгрузке, так как он подвержен воздействию статистических электрических сил, а также на него воздействуют более мощные силы сцепления, чем в случае с зернистым или иным материалом.

Подобное и создает необходимость использования дополнительных устройств, которые могли бы обеспечить облечение взаимодействия с ним при проведении погрузочно-разгрузочных работ.

Также следует отметить гигроскопичность материала, что создает ситуацию, при которой даже при небольшом повышении влажности силы сцепления существенно возрастают.

В случае с нечеткой логикой, посредством использования этих принципов можно экономить затраты энергии в существующих вариантах пневмоимпульсных установок, которые применяются, но не обладают высокой эффективностью.

Существующие системы не позволяют производить симуляцию разгрузки сыпучих материалов с высокой степенью правдоподобности, а также можно отметить, что, несмотря на известность пневмоимпульсных систем с начала шестидесятих годов, их использование не всегда является в достаточной степени эффективной. Это связано с затратами энергии и неправильным выбором момента воздействия, так как для застарелого «тромба» требуется удар импульсом большей силы, чем для предупреждения его образования.

### **Цель и задачи исследования**

Целью исследования является: разработка методов повышения энергоэффективности мехатронных пневмоимпульсных систем для разгрузчиков и рыхления сыпучих пород путем применения нечеткой логики или методов нечеткой логики при управлении мехатронными пневматическими системами на примере пневмоимпульсного устройства, используемого у разгрузчиков для рыхления утрамбованного сыпучего материала.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

1) Анализ известных способов и конструктивных решений разгрузчиков с различными приспособлениями для рыхления утрамбовавшейся сыпучей породы, а также препятствующих образованию «тромбов»;

2) Разработка математической модели импульсной установки для проведения разгрузочных работ сыпучего материала на основе нечеткой логики, учитывающей переменный период между импульсами и затраты энергии;

3) Разработка и анализ алгоритмов, оптимальных по критериям энергосбережения и расхода используемого газа, с предиктивным анализом.

### **Научная новизна**

1) Метод разрушения сводов из сыпучего материала с помощью пневмоимпульсной установки, работающей по адаптивным алгоритмам нечеткой логики.

2) Математическая модель пневмоимпульсной установки для рыхления утрамбовавшейся сыпучей породы, работающей по алгоритмам нечеткой логики и учитывающая длительность, частоту и мощность ударных, разрушающих импульсов.

3) Адаптивный алгоритм устранения слипания и утрамбовывания сыпучих материалов, построенный на элементах нечеткой логики, для повышения энергосбережения до двадцати процентов и понижения до тридцати процентов расхода газа.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая значимость работы заключается в том, что впервые разработан научный подход, на основании анализа существующих методов разрушения сводов из сыпучих материалов и создании на основе полученных данных математической модели в Matlab. Которая была завязана на применении принципов нечеткой логики.

Практическая значимость работы заключается в реализации предложенной методики и алгоритмов, позволяющих повысить эффективность работы бункерных накопителей для сыпучих материалов.

### **Апробация работы**

По теме диссертации опубликовано две печатных работы, в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК.

### **Публикации**

1. А.М. Абрамов, В.Ю. Ключин, В.В. Кожикина и О.В. Кочнева, «Использование нечеткой логики для управления системами очистки бункеров, содержащих сыпучие вещества», Новгород, октябрь 2020 г., № 939.

2. В.Ю. Ключин, В.В. Кожикин, О.В. Кочнева, «Использование нечеткой логики для управления пневматическими системами обрушения в бункерах в условиях низких температур», Earth and Environmental Science, 2020, № 539(1).

### **Представление научного доклада: основные положения**

1. На основании анализа существующих технологий выгрузки сыпучих материалах сделаны выводы об их неэффективности и возможности их доработки
2. В ходе исследования выявлены основные факторы, которые влияют на образование «тромбов» из сыпучих материалов и рассмотрено математическое обоснование их появления.
3. С учетом полученных в рамках исследования данных создана принципиальная модель работы пневмоимпульсного устройства под действием алгоритмов нечеткой логики
4. На основании проведенных опытов доказана целесообразность внедрения принципов управления на основе нечеткой логики.

Над задачей повышения степени эффективности пневмоимпульсной системы, в свое время занимались различные специалисты, в том числе и Ордин Владимир Георгиевич (RU), Ерошкин Сергей Борисович (RU), Булатов Наил Якубович (RU), Канаплин Леонид Николаевич (RU).

У существующих систем разбивания скоплений сыпучего материала существуют серьезные недостатки. Например, можно указать на то, что импульс не может охватить большое расстояние и не способен с одного раза разбить застоявшийся сыпучий материал.

Для исправления этого недостатка обычно используют систему нескольких пневмоимпульсных установок, но подобное негативно сказывается на точности управления и цене оборудования.

Обоснованность научных положений, выводов и практических рекомендаций, полученных в диссертационной работе, обеспечивается результатами экспериментальных исследований. Кроме того, можно отметить успешное донесение главных положений работы на конференциях и тот факт, что по полученным результатам была создана экспериментальная модель устройства.

Внедрение результатов работы. Совместно с компанией «Иста» был разработан опытный образец установки, к которому уже был проявлен интерес заказчиков с юга России.

Личный вклад автора. Автором лично проведен анализ существующих методов устранения сбития сыпучих материалов в «тромбы».

На основе проведенного анализа была создана математическая модель работы пневмоимпульсной системы под управлением алгоритмов нечеткой логики.

Проведены исследования, доказывающие превосходство предложенной методики в сравнении с существующими аналогами разбития сыпучих материалов. Разработана математическая модель, способствующая применению результатов работы на практике.

С учетом проведенных исследований разработан метод разбития «тромбов» из сыпучих материалов с помощью пневмоимпульсной установки под управлением алгоритмов нечеткой логики. Подготовка основных публикаций проводилась с соавторами, при этом вклад автора был основным.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Материал изложен на 90 страницах, включает 11 таблиц, 9 рисунков и схем, а также одно приложение. Список использованной информации включает в себя 91 наименование.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, характеризуется степень ее разработанности, устанавливаются цели и задачи, осуществляется выбор предмета и объекта исследования. Рассматриваются положения, выносимые на защиту. В первой главе произведен обзор существующих пневмоимпульсных систем для разбития «тромбов» из сыпучих материалов. Описаны особенности устройства этих систем и принципы работы.

Рассмотрены современные методы проведения разгрузочных работ сыпучих материалов, а также основные особенности их проведения.

Приведена схема работы математической модели на основе принципов нечеткой логики.

Отмечено, что многие системы разбития «тромбов» из сыпучих материалов работают без применения систем нечеткой логики, что серьезно влияет на их эффективность.

На данный момент использование подобного устройства – один из наиболее эффективных способов опустошения хранилищ для сыпучих материалов.

В различных областях деятельности существует необходимость иметь оптимальную, эффективную и безопасную систему дозирования сырья. В сельском хозяйстве это вытекает из условий, в которых хранится сырье. Температура в регионе, физико-химические свойства продуктов способствуют появлению дополнительного риска при выгрузке. Это факторы, которые влияют на возникающую проблему.

Соевый жмых, кукурузный дистиллят, фураж, соевые бобы и кукуруза — это сырье, которое подвергается уплотнению в процессе хранения и перегрузке, что способствует возникновению проблем и риска для людей и объектов инфраструктуры.

Как правило, типичное хранилище сыпучего материала - металлический силос, опирающийся на плоское или коническое бетонное основание. В случае, если она плоская, для удаления будет использоваться импульсные установки или подметательные системы. Стандартный угол конической формы составляет  $37^\circ$ , возможен и другой угол, для этого типа может быть установлена спиральная разгрузочная система с кожухом. Тем не менее, в этой форме возможно образование «тромба», что приводит к необходимости использования дополнительных устройств для полного удаления сыпучего материала из емкости.

Высота типового силоса определяется его диаметром и количеством колец на корпусе. Как правило, первое кольцо имеет размер 1190 мм, а каждое дополнительное добавляет 1140 мм к общей высоте.

Высота силоса оказывает прямое влияние на количество сыпучего материала, как следствие на силы, возникающие в нем, а также на вероятность образования затора, требующего применения пневмоимпульсной системы.

Данное решение сейчас представляется одним из самых распространенных в мировой практике, их можно увидеть на зернохранилищах в Европе и Америке, в России также существует ряд компаний, которые производят подобное специфическое оборудование, имеющее ряд недостатков.

Именно поэтому применение систем с нечеткой логикой повышает качество использования данного метода, так как позволяет включиться в момент, когда «тромб» только начал образоваться, что значительно экономит усилие на его разбитие. Также с помощью нее возможно выбрать нужную частоту и выпустить газ в оптимальный момент, чтобы устранение сбивания происходило максимально быстро и с минимальными затратами энергии.

Кроме сельского хозяйства такие технологии могут использоваться в том числе и в строительстве. Например, существует проблема с очищением емкостей от бетона, в котором силы адгезии постепенно становятся сильными и плохо поддаются разбивке. Очищение импульсом здесь могло бы очень помочь, так не пришлось бы счищать остатки вручную. Алгоритмы нечеткой логики также бы помогли выбрать наиболее оптимальный момент для включения. Правильное время включения позволяет экономить средства на ремонт оборудования, а также затраты времени на ручную очистку, так как данное действие является протяженным по времени.

Сыпучие материалы трудно перемещать, как в случае самосвалов и бункеров. Они прилипают к стенам и негативно влияют на производительность. Это широко распространенная проблема, поскольку большинство конструкций проектируются без точных знаний о сыпучих материалах, которые они должны содержать. При влажности хранение материала в состоянии покоя приводит к появлению мощных связующих сил, что ухудшает проведение погрузочно-разгрузочных работ.

Проблема состоит еще и в том, что факт наличия такого «тромба» обычно становится известным только после того, как он уже образовался и постоял какое-то время, сформировав довольно крепкую структуру, которая сложно поддается разрушению.

Такое происходит из-за отсутствия фиксирующих датчиков по причине их высокой стоимости, а также сложными условиями при проведении разгрузочных работ – сыпучие материалы, особенно мелкодисперсной формации довольно сильно пылят, что затрудняет использование оптических устройств. А также вызывает необходимость применения пылезащитных технологий в этом случае, что серьезно увеличивает стоимость конструкции. Такое положение дел приводит к тому, что проблему образования слипания требуется решать иными методами, не приводящими к существенному удорожанию.

Одним из основных способов устранения «тромбов» является использование пневмоимпульсных установок (рисунок 1). В них под большим давлением в место образования слипания подается сжатый воздух или газ, который разбивает «тромб».

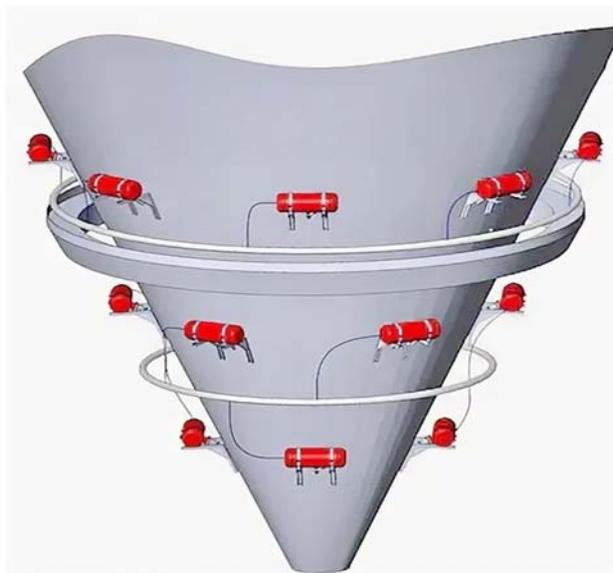


Рисунок 1. Система пневмоимпульсной очистки

Возникающие «тромбы» являются довольно известной проблемой, известной на мировом уровне и подвергающейся решению разными способами.

Некоторые компании продают специализированное покрытие, отделка которым позволяет избегать появления слипшихся фракций сыпучего материала, но текущая политическая обстановка и общая дороговизна покрытия такого рода не позволяет использовать его на постоянной основе.

Одними из основных производителей такого типа покрытия являются испанские компании, применимость их материала выходит за рамки сельского хозяйства, оно также используется и в строительстве, но сейчас его преимуществами отечественные компании пользоваться не могут, так что разработка и внедрение отечественных систем является обоснованной.

Но они обладают рядом недостатков, например, иногда бывают не эффективны с уже какое-то время простоявшими «тромбами», так как адгезия в этом случае будет требовать существенных затрат энергии. Застарелый затор вычистить при помощи такой системы может быть затруднительно, что создает задачу упреждения их образования, чтобы импульс установки расходовался с максимальной эффективностью и был бы направлен на конкретный участок, требующий воздействия для недопущения образования «тромба», так как иначе сила импульса для разрушения будет существенно выше. Проведенное исследование показало, что системы нечеткой логики активно применяются в различных областях науки и техники, в частности используются для осуществления разного рода технологических операций, где задача является сложной для прогнозирования и воссоздания всех воздействующих факторов.

Нечеткая логика породила мощные методы, появившиеся сегодня, которые позволяют добиться гораздо более строгих результатов, что в значительной степени удовлетворяет потребность в математических методах для решения оценки проблем, возникающих в критически важных областях.

Одно из часто упоминаемых преимуществ нечетких контроллеров по сравнению с контроллерами других типов заключается в том, что они могут быть спроектированы, даже если у вас нет точной математической модели объекта, которым нужно управлять так как, что они основаны на определенных правилах.

Это способствовало появлению саморегулирующихся контроллеров и систем, которые имеют в своей основе некоторый алгоритм, позволяющий им оценивать производительность и в соответствии с определенными критериями скорректировать их конструкцию.

Эти алгоритмы самонастройки (также известные как алгоритмы автонастройки) очень полезны в ситуациях, когда контролируемая установка изменяется во времени, что подразумевает, что контроллер должен приспосабливаться к таким изменениям.

Это делает подобные принципы незаменимыми в случае работы с сыпучими материалами, так как момент «выстрела» должен быть наиболее четко выверен для достижения максимальной эффективности.

Математическое моделирование процессов появления разного рода «тромбов» из сыпучих материалов, а также воздействия на них с целью разрушения представляет довольно сложную задачу, выражаемую в ряде математических уравнений, а также требующую большого количества времени на их решение. Зачастую данный метод сбора данных для управления процессами сводообрушения или разрушения завесаний путем математического моделирования процесса неэффективен.

На образование «тромбов» может влиять большое число факторов, которые по-разному проявляют себя в различных условиях, что создает дополнительные сложности для предсказания их возникновения в процессе моделирования. Кроме того, характер слипания сыпучего материала также может быть различным, в зависимости от условий (рисунок 2).

Простое воссоздание ситуации, при которых может возникнуть данная проблема становится затруднительным. И здесь проблему могут помочь решить системы на основе нечеткой логики.



Рисунок 2. Классические типы «тромбов».

При работе с системами, которые используют нечеткую логику, больше всего подходит математическая среда MathLab, в которой существуют специализированные модули, например, пакет Fuzzy Logic Toolbox. Он считается наиболее подходящим под имеющуюся задачу и имеет возможность показывать изменение функций в реальном времени и учитывает множество входных параметров, в том числе и с применяемых в работе датчиков.

Здесь в качестве входного сигнала выступает значение с датчиков, которое обновляется каждые пять секунд, что можно использовать для анализа динамики образования слипания, а также общего состояния сыпучего материала в бункере, что может в принципе не допустить возникновения проблемы.

Значения показаний датчиков лежат в диапазоне от 0 до 10 В. В качестве выхода используется длительность пневматического импульса и частота его воспроизводства. При проведении эксперимента вначале длительность импульса изменяться не будет, так как сила импульса обычно выбирается исходя из мощности ресивера, который содержит сжатый газ.

В связи с тем, что впоследствии эта величина будет подвергаться изменению, то одной из основных выходных переменных будет частота псевдоимпульсов установки.

В роли алгоритма нечеткого вывода в решении этой задачи используется алгоритм Мамдани. Две входных переменных обозначаются «Текущее значение датчика» и «Предыдущее значения датчика». Выходное значение – «Частота псевдоимпульсов». После этого окно редактора FIS будет выглядеть следующим образом (рисунок 3). Далее задаются термы и их функции принадлежности для каждой из переменных.

При создании правил следует использовать математическую логику и следить, чтобы они не расходились с практическими наблюдениями за работой системы. Зададим первое правило в виде «Если текущее значение датчика высокое и предыдущее значение датчика высокое, то пневмоимпульсное устройство не работает (частота равна нулю - терма «Отсутствует»).

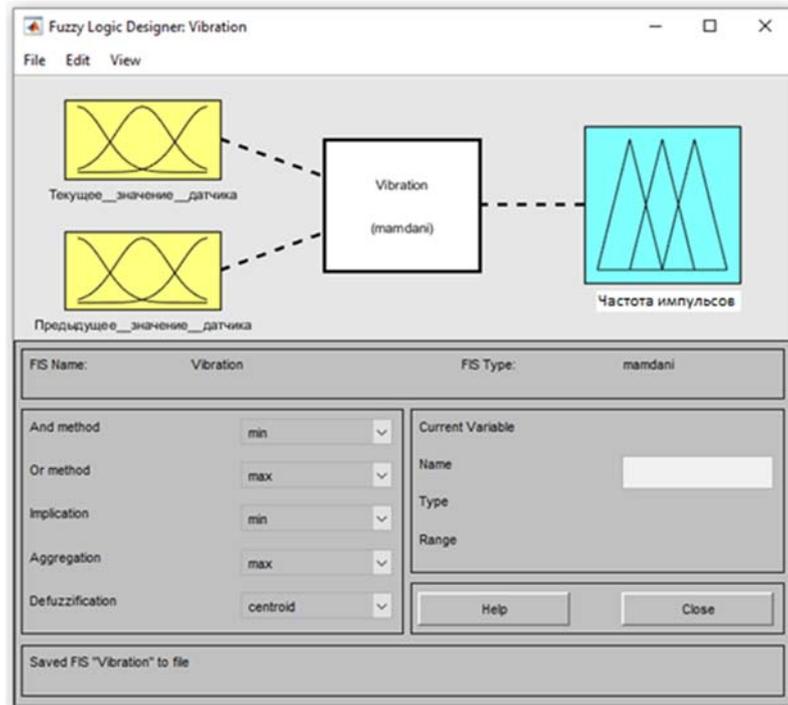


Рисунок 3 - Окно редактора FIS с входными и выходными переменными

Так как в данной системе имеется две входные переменные, каждая из которых имеет по три терма, можно задать девять уникальных правил. Полученные правила приведены в таблице 1 и рисунке 4.

Таблица 1 - Правила для нечёткого вывода

Текущее Предыдущее	Низкое	Среднее	Высокое
Низкое	Максимальное	Высокое	Среднее
Среднее	Высокое	Среднее	Низкое
Высокое	Среднее	Низкое	Отсутствует

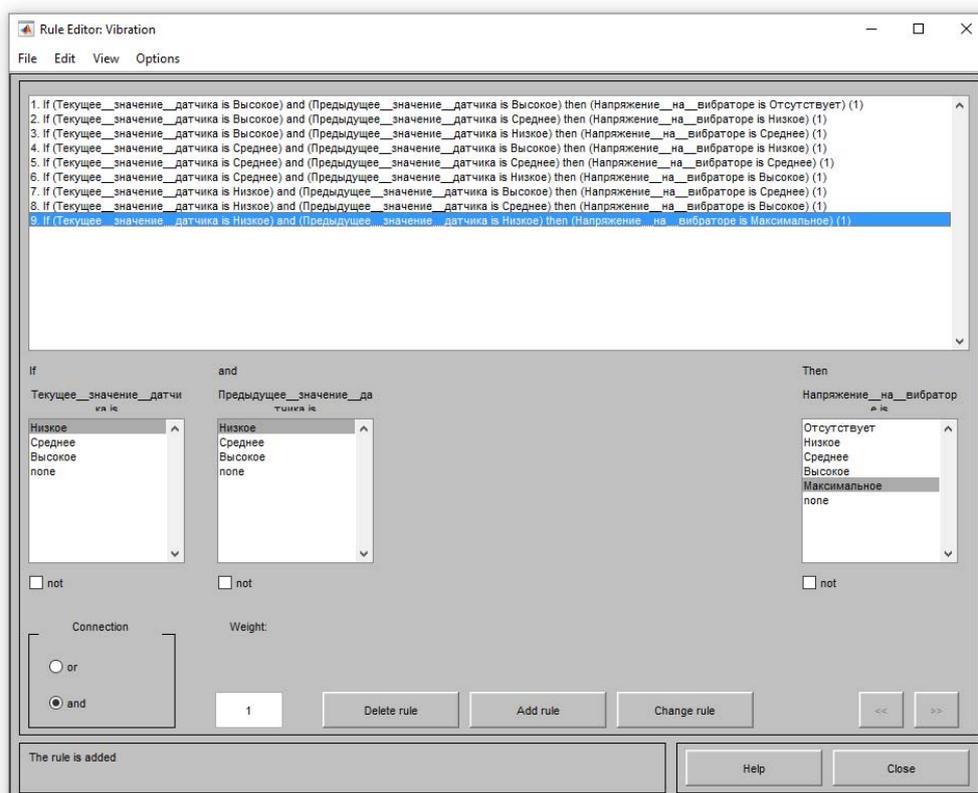


Рисунок 4. База правил нечеткой системы

После задания всех правил система готова к работе.

Полученные результаты представлены ниже на рисунках 5, 6 и 7.

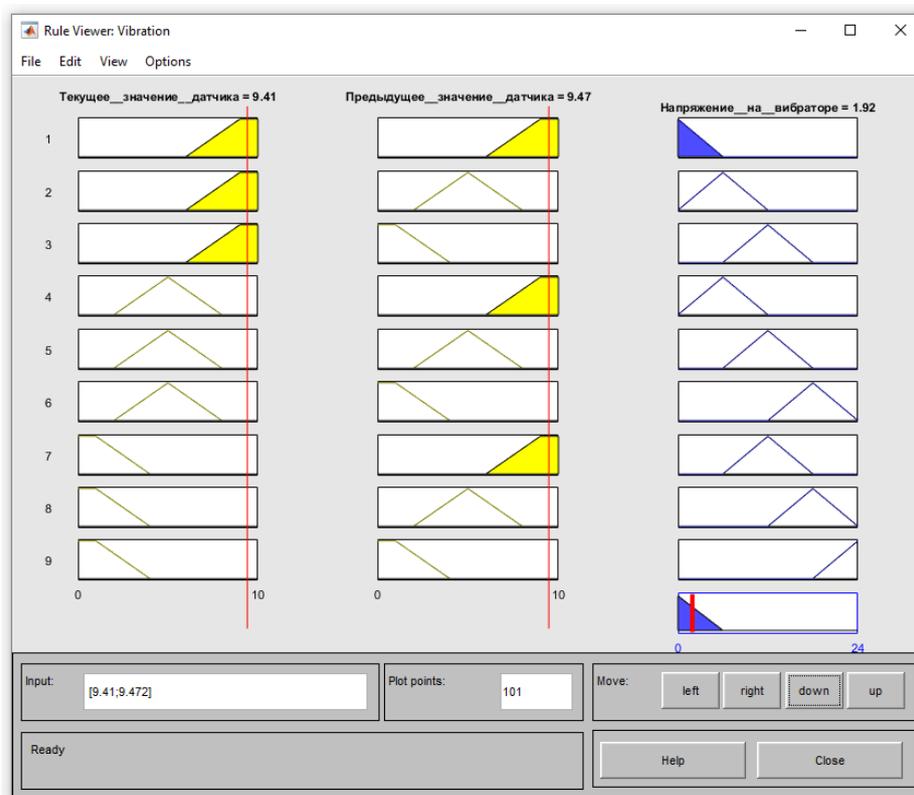


Рисунок 5. Результат работы системы при высоких значениях сигнала

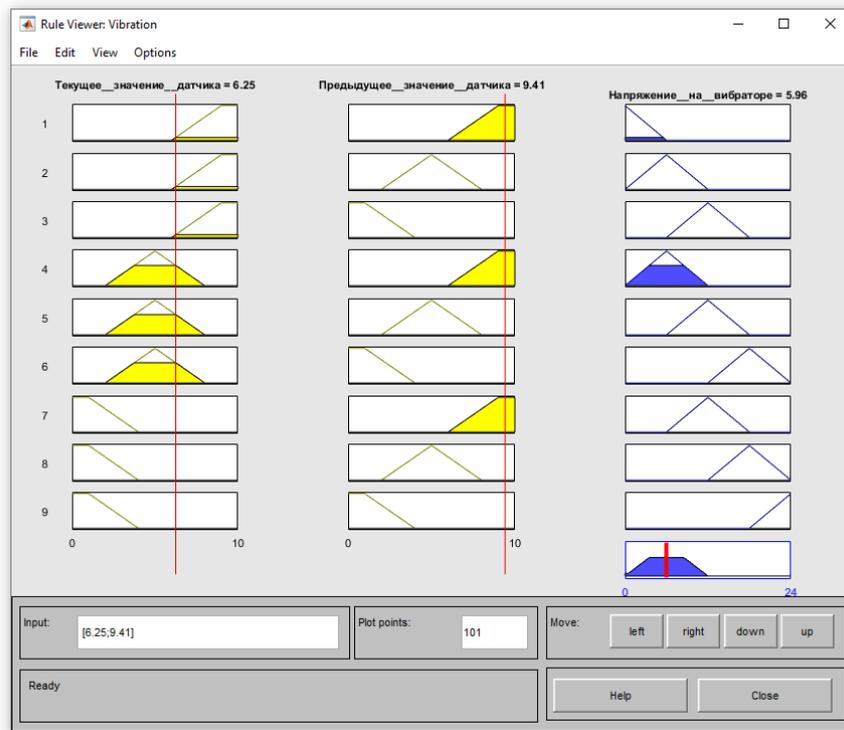


Рисунок 6. - Результат работы системы при понижении сигнала

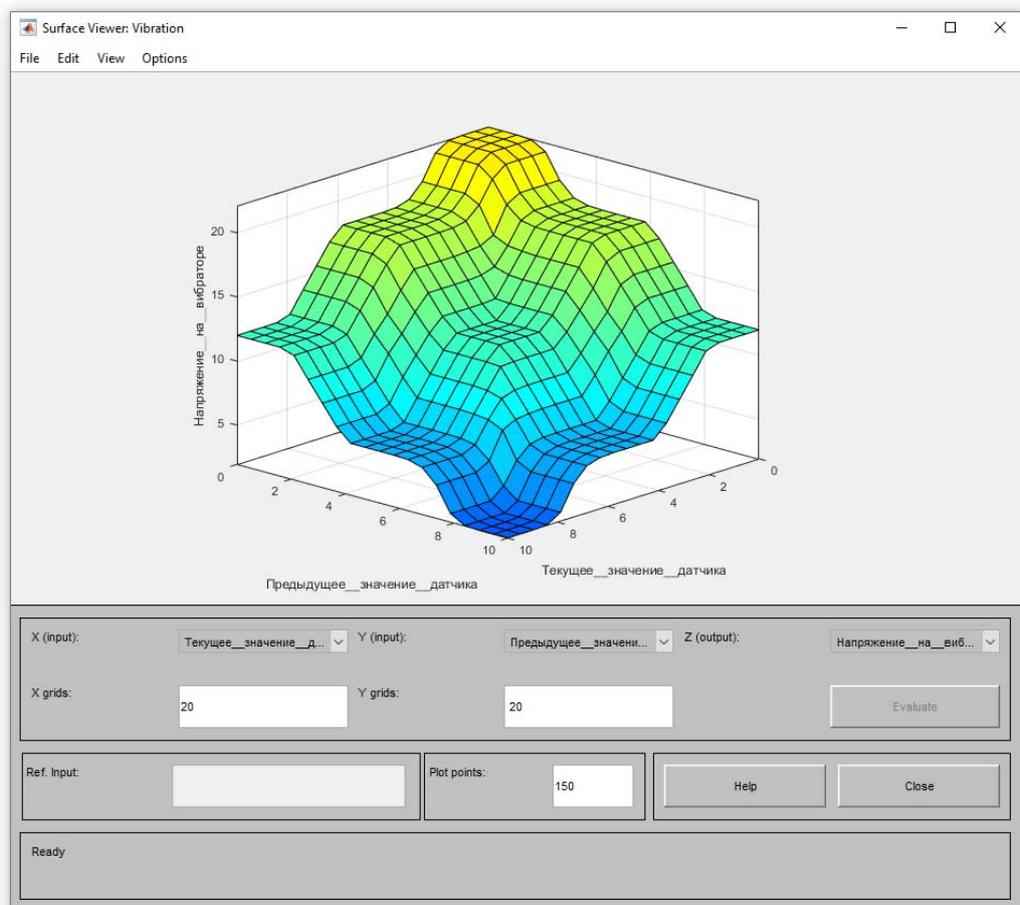


Рисунок. 7 - Поверхность нечеткого вывода

Как можно заметить по рисункам, выходная переменная изменяется с течением времени, причем это изменение происходит неравномерно, так как на диаграмме отображаются и плоские участки. Изменение функции входного сигнала положительно влияет на рисунок и плавность изменения функции.

Впоследствии именно данную вариацию следует считать за отправную для осуществления работ на практике, так как в этом случае результат становится более предсказуемым и наглядным.

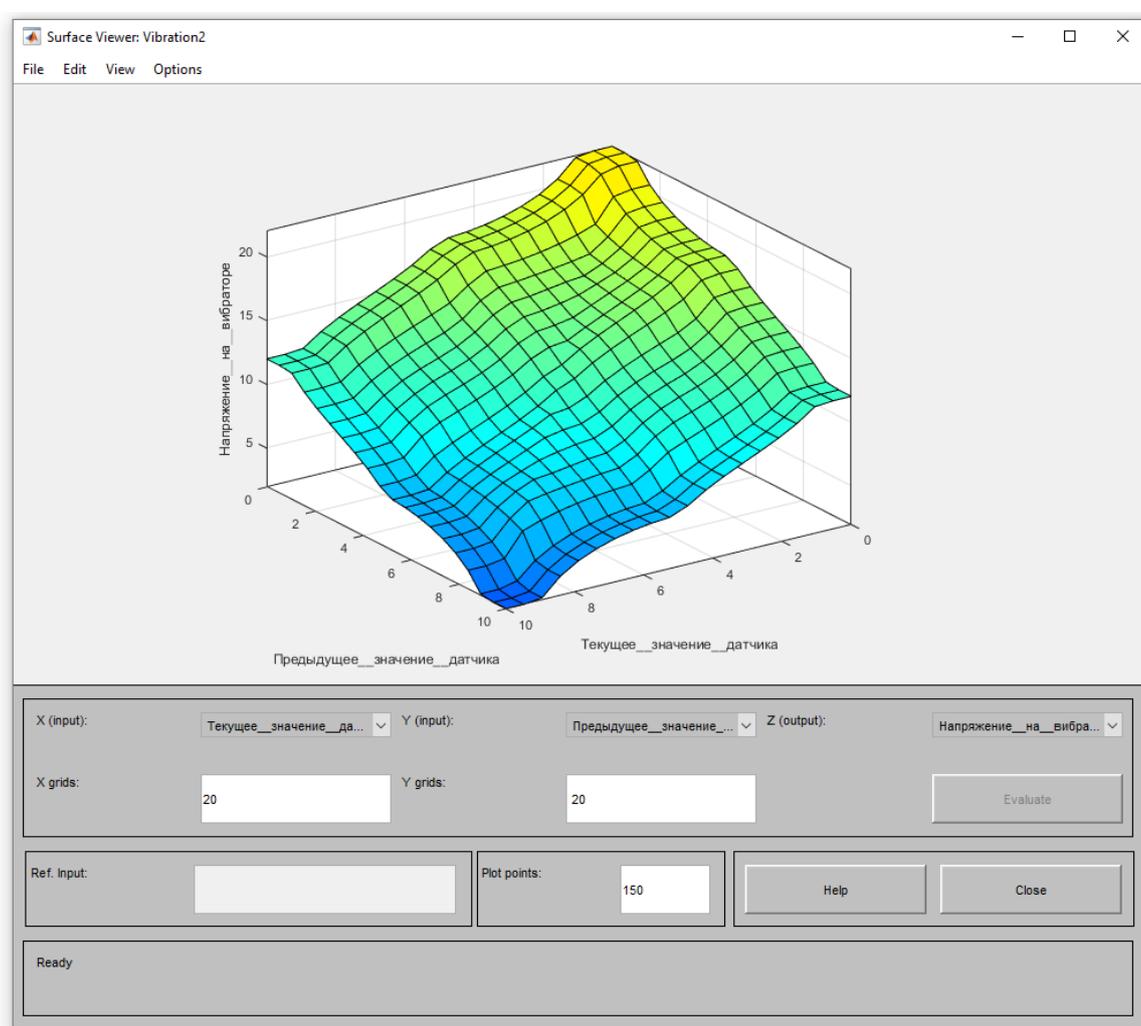


Рисунок 8. - Поверхность нечёткого вывода для изменённых функций принадлежности

Вариации работы системы заметно отличаются от того, в каких условиях работает пневмоимпульсная система. Если она запускается часто, то необходимо использовать метод дефаззификации известный как метод центра тяжести, который способен обеспечить более плавное управление всей системой и учет основных правил работы. Но у него есть существенное ограничение - выходные параметры системы будут всегда меньше, чем область определения этих переменных. То есть, система не будет учитывать ситуацию, когда пневмоимпульсная установка простаивает в течение долгого времени, что не позволит ее применять.

Для большего охвата рекомендуется использовать метод середины максимумов. Функции принадлежности останутся прежними, изменится только метод дефаззификации. Пример показан на рисунке 9.

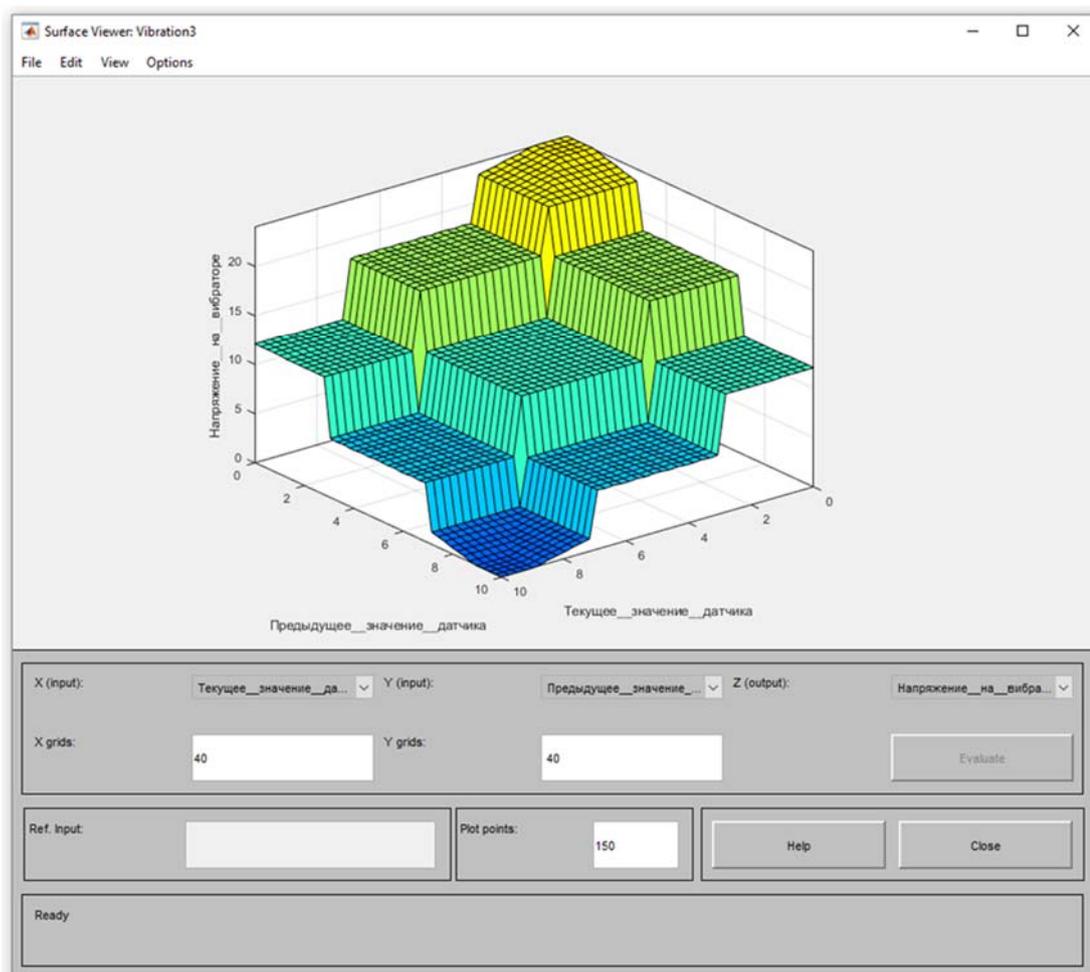
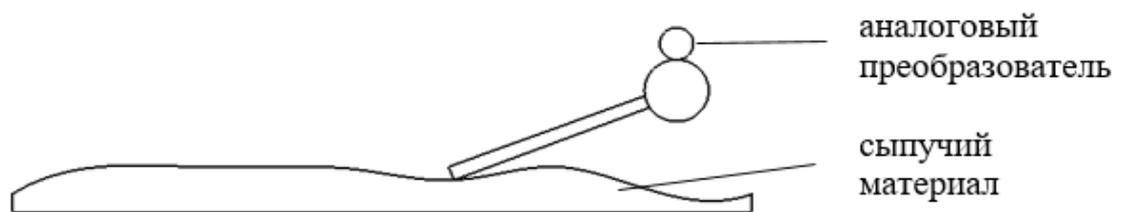
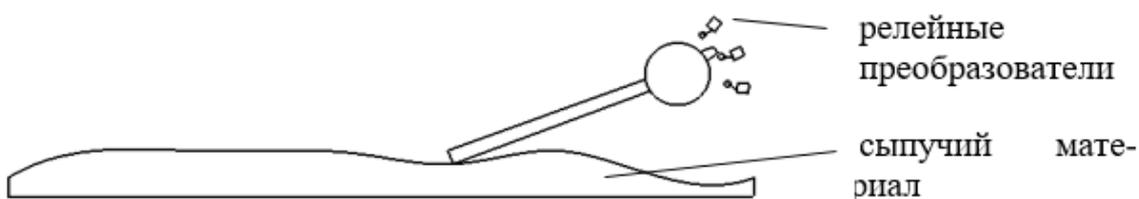


Рисунок 9. Изменение графика под воздействием смены метода

На практике, в металле, данную проблему можно решить с помощью установки специального датчика, который бы мог адекватно отслеживать изменения консистенции сыпучего материала.



а) использование датчика с аналоговым преобразователем



б) использование датчика с несколькими релейными преобразователями

Рисунок 10. Виды датчиков, используемых при проведении разгрузочных работ

Такие датчики призваны отслеживать объемы высыпаемого груза, что позволит получать данные о ходе процесса. Пластина датчика может изменять свой угол наклона, под воздействием объема сыпучего материала, что дает возможность зафиксировать аналоговый сигнал, значение которого будет отражать текущие параметры сыпучего материала относительно его плотности и толщины слоя. На этом моменте используется нечеткая логика. Чем больше материала проходит мимо датчика за единицу времени, тем эффективнее выгрузка.

По мере уменьшения слоя сыпучего материала показания датчика будут изменяться, так что можно будет использовать их для настройки скорости работы выпускного клапана, регулирующего выпуск газа или воздуха, в зависимости от того, какая именно технология пневмоимпульсной системы будет использована в конкретном случае.

При уменьшении толщины слоя сыпучего материала, показание датчика также уменьшится, и требуется нарастить вибрацию для ускорения хода потока.

Динамика изменения величины слоя отслеживаться при помощи второго датчика, который устанавливается в удалении от первого и дает данные об уровне сыпучего материала уже в своей точке.

Также для этих целей можно просто задать некоторую временную задержку от показаний первого датчика, так как зная объем емкости хранения, можно вычислить, как именно будет меняться слой с течением времени, что может быть полезно, в том числе, для предсказания образования «тромбов» и для того, чтобы понять, насколько эффективно на них подействовала пневмоимпульсная установка.

Как только сигнал с датчика получает обрабатывающее устройство, происходит фаззификация, то есть вся модель приводится к нечеткости, что позволяет интерпретировать изменение положения системы в конкретный момент времени. Под конкретный показатель выделяется своя переменная, которая показывает уровень сигнала через термы. Функция принадлежности находится через степень принадлежности сигнала конкретной терме. Для создания выводов применяется алгоритм Мамдани, что позволяет создать конкретные правила, по которым работает система, с учетом оценок показателей системы в момент времени, что помогает для корректировки, если возникают расхождения с реальностью.

Далее производится дефаззификация по одному из вышеописанных методов. По входному сигналу работу системы можно адаптировать, что позволяет устанавливать данную технологию в различных сборках пневмоимпульсных устройств. Это серьезно расширяет спектр применимости рассмотренной в работе технологии и позволяет закрыть потребность в очистке хранилищ не только в сельском хозяйстве, но и в строительстве.

## **Результаты и их обсуждение**

Технический результат предлагаемого изобретения заключается в повышении экономичности работы пневмоимпульсной установки, так как под действием алгоритмов нечеткой логики она сможет включаться в оптимальный момент и не потребуются использовать повторный выхлоп.

Данное преимущество обосновывается тем, что созданная математическая модель позволяет использовать оборудование с большей эффективностью за счет применения принципов нечеткой логики для предсказания момента образования «тромба» из сыпучего материала.

В этом плане тема диссертационной работы актуальна как в теоретическом, так и практическом отношении.

Применение в технологическом процессе нечеткой логики позволяет добиться высокого процента положительного результата в срабатывании пневмоимпульсной системы.

### **Объекты, (предмет) и методы исследования**

Объект исследования – бункер для подачи сыпучих материалов.

Предмет исследования – пневмоимпульсная установка под управлением нечеткой логики.

Методы исследования. В рамках решения задач, исследуемых в диссертации, применяются методы компьютерного моделирования в системе MathLab. Кроме того, был произведен анализ и синтез собранных данных

## **Заключение**

В рамках работы был разработан алгоритм управления пневмоимпульсной системой очистки бункеров для сыпучих материалов на основе нечёткой логики. В качестве среды разработки был выбран пакет Fuzzy Logic Toolbox вычислительной среды MATLAB, которая является распространенной системой для решения технических задач и наиболее подходит для конкретного случая.

На основе вышеперечисленного можно заключить, что разработка системы, которая могла бы в высокой степени выявлять предпосылки образования «тромбов» является действительно важной и перспективной задачей.

А нечеткая логика способна существенно ее упростить, так как обеспечивает более эффективное применение вспомогательных систем, призванных обеспечить не только устранение «тромбов», но и препятствовать их образованию.

### **Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)**

#### **Публикации в международных журналах, индексируемых в реферативной базе Scopus:**

1. A.M. Abramov, V.Yu. Klyukin, V.V. Kozhikin and O.V. Kochneva, The use of fuzzy logic for the clean-up systems control for bunkers, containing bulk solids from the Conference “Materials Science and Engineering”, Veliky Novgorod, Russian, October 2020, No 939.
2. V.Yu. Klyukin, V.V. Kozhikin, O.V. Kochneva, Usage of fuzzy logic for controlling pneumatic caving systems in hoppers in low temperature conditions from the Conference Earth and Environmental Science, 2020, No 539(1).

Аспирант \_\_\_\_\_ **Кожикин В.В.**

(подпись)

## Список литературы:

1. Рагимов Шафагат Рахим Оглу, and Мамедов Джаваншир Фирудин Оглу. "Экспериментальное исследование процесса управления активных элементов гибких производственных систем в условиях неопределенности" Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, vol. 20, no. 2, 2022, pp. 148-160.
2. Крапивин Д.М., and Лукьянченко Е.А.. "Пусконаладочные работы при использовании плк в цикловой системе управления роботом" Инновационная наука, no. 6-1, 2022, pp. 26-30. В.Г. Чернов. Нечеткие контроллеры. Основы теории и построения: Учеб. пособие по курсу «Интеллектуальные системы управления» / Владим. гос. ун-т. Владимир, 2020. 148 с.
3. Леоленков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб., 2021.
4. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. - М.: Радио и связь, 2020.
7. Пивкин В. Я., Бакулин Е. П., Кореньков Д. И. Нечеткие множества в системах управления. - Новосибирский ГУ, физический факультет, 2018.
8. Jantzen J. Tutorial On Fuzzy Logic. – TU of Denmark, 2019.

## List of references:

1. Rahimov Shafagat Rahim Oglu, and Mammadov Javanshir Firudin Oglu. "experimental study of the control process of active elements of flexible production systems under uncertainty" Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, vol. 20, No. 2, 2022, pp. 148-160.
2. Krapivin D.M., and Lukyanchenko E.A. "COMMISSIONING WHEN USING A PLC IN A cyclic robot control system" Innovative Science, No. 6-1, 2022, pp. 26-30. V.G. Chernov. Fuzzy controllers. Fundamentals of theory and construction: Textbook on the course "Intelligent control systems" / Vladimir State University. Vladimir, 2020. 148 p.
3. Leolenkov A.V. Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH. – St. Petersburg, 2021.
4. Kofman A. Introduction to the theory of fuzzy sets. - M.: Radio and Communication, 2020.
7. Pivkin V. Ya., Bakulin E. P., Korenkov D. I. Fuzzy sets in control systems. - Novosibirsk State University, Faculty of Physics, 2018.
8. Jantzen J. Tutorial On Fuzzy Logic. – TU of Denmark, 2019.