

На правах рукописи



Костинец Ирина Константиновна

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
ВНЕШНЕГО ДВИЖИТЕЛЯ ГЕОХОДА**

Специальность 05.05.06 – «Горные машины»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Хорешок Алексей Алексеевич

Официальные оппоненты:

Воронова Элеонора Юрьевна доктор технических наук, доцент, Шахтинский институт (филиал) ЮРГПУ(НПИ) имени М.И. Платова, заведующая кафедрой
«Фундаментальные инженерные дисциплины»

Блащук Михаил Юрьевич кандидат технических наук, Юргинский технологический институт (филиал) ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», и.о. заведующего кафедрой «Горно-шахтное оборудование»

Ведущая организация: ФБГОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится 17 мая 2018 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. Факс (3842) 68-23-23, e-mail: siyu.eav@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте:

<http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2018/kos/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Семькина Ирина Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Освоение подземного пространства, связанное на протяжении многих веков с добычей полезных ископаемых и со строительством подземных сооружений, всегда базировалось на технологии проведения выработок.

Следует ожидать, что интенсивность освоения подземного пространства странами мирового сообщества, включая Россию, уже в ближайшее время будет существенно увеличиваться. Остро встают задачи повышения скорости проходки и снижения стоимости работ.

Существующие горнопроходческие системы и технологии проведения горных выработок не соответствуют задачам, возникающим при интенсификации освоения подземного пространства.

На основании ряда проведенных исследований был предложен отличный от традиционного инновационный подход к процессу проведения горных выработок, основная идея – рассматривать проходку выработок, как процесс движения твердого тела (проходческого оборудования) в твердой среде. Данный подход лежит в основе геовинчестерной технологии проведения горных выработок, базовым функциональным элементом которой является геоход.

В настоящее время ведутся работы по созданию нового поколения геоходов. Одной из основных систем геохода является *внешний движитель* (ВД). Существующие движители проходческих систем не соответствуют особенностям работы геохода. Сдерживающим фактором в разработке геоходов является отсутствие методик определения параметров ВД. Поэтому исследования, направленные на обоснование параметров опорной поверхности (ОП) внешнего движителя геохода являются актуальными.

Степень разработанности

Проблемами создания геоходов занимались Эллер А.Ф., Аксенов В.В., Нагорный В.Д., Горбунов В.Ф, кроме того, обоснованием параметров отдельных систем геоходов занимались Садовец В.Ю., Бегляков В.Ю., Блащук М.Ю., Ананьев К.А, Ермаков А.Н. и др. Были созданы и испытаны образцы геоходов. Однако, при создании этих образцов были созданы лишь принципиально работоспособные внешние движители, задачи обоснования рациональных параметров движителей не решались.

Цель работы – обоснование параметров ОП ВД геохода и создание предпосылок к увеличению несущей способности межвиткового целика.

Идея работы заключается в обеспечении смещения значений главных напряжений в породе приконтурного массива в сторону сжатия.

Задачи:

1. Разработать схемные решения и модель взаимодействия ВД геохода с породой винтового законтурного канала (приконтурного массива);
2. Определить влияние угла наклона ОП ВД на напряженно-деформированное состояние (НДС) породы винтового законтурного канала (приконтурного массива);
3. Обосновать рациональную форму опорной поверхности ВД;
4. Разработать конструктивное решение ВД опытного образца геохода.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использовался комплекс методов, включающий:

- численное и математическое моделирование взаимодействия лопастей ВД с приконтурным массивом пород;
- метод конечных элементов (МКЭ);
- применение ограничений и допущений при формировании условий задач;
- выявление, графическое отображение и анализ зависимостей НДС породы от геометрических параметров ОП ВД и способов приложения нагрузок.

Научные положения, выносимые на защиту:

1 Зависимость напряжений в породе от угла наклона ОП ВД носит не монотонный характер, существует угол наклона, при котором напряженное состояние породы наименее опасно, причем значение этого угла увеличивается с увеличением радиальной координаты точки ОП;

2 При равномерном распределении нагрузки по опорной поверхности напряжения породы в области заднего края лопасти смещены в сторону растяжения по сравнению с напряжениями породы в области переднего края, от переднего к заднему краю лопасти растут касательные напряжения, возрастает опасность разрушения породы.

3 Бóльшая несущая способность межвиткового целика обеспечивается при вогнутой форме опорной поверхности у её основания и выпуклой при вершине профиля.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, обеспечиваются корректностью допущений при разработке условий задач математического моделирования; гарантируются использованием фундаментальных положений механики, сопротивления материалов, прикладной математики, доказываются логической сходимостью результатов исследований, проводимых на разных этапах работы.

Научная новизна работы:

- впервые разработаны схемные решения ОП, введены понятия системы «ВД – геосреда» и её элементов, параметров ОП, предложена классификация;
- усовершенствована математическая модель взаимодействия геохода с геосредой;
- модернизирована модель взаимодействия ВД геохода с геосредой, определено влияние параметров ОП на НДС приконтурного массива;
- впервые определена рациональная форма профиля ОП, обеспечивающая смещение главных напряжений в породе в сторону сжатия;

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что результаты работы позволяют:

- использовать полученные параметры ОП и ВД в качестве исходных данных при проектировании ВД и законтурных исполнительных органов геоходов;
- использовать созданные математические модели при разработке методик расчета параметров ВД геоходов;
- создавать новые рабочие программы для обучения студентов и специалистов по направлениям, связанным с проектированием горных машин;

– промышленным предприятиям, занимающимся выпуском горнопроходческой техники, расширить номенклатуру выпускаемых изделий.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Результаты работы использовались при реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства новых образцов горнопроходческой техники – геоходов, в рамках конкурса по Постановлению Правительства РФ №218 № договора 02.G25.31.0076 от 23 мая 2013 г.

Личный вклад автора:

- разработка схемных решений ОП, определение и систематизация геометрических признаков ВД;
- преобразование модели взаимодействия геохода с геосредой;
- создание модели взаимодействия лопасти ВД с геосредой;
- оценка влияния угла наклона ОП лопасти ВД на напряжения в приконтурном массиве и определение рациональной формы профиля ОП лопасти ВД геохода;
- выработка рекомендаций по выбору основных параметров ВД, разработка конструктивного решения ВД геохода.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и получили одобрение на Международной научно-практической конференции «Перспективы развития горнотранспортного оборудования» (УНПЦ «Стройгормаш», г. Москва, 2013 г.); III, IV и VII Международных научно-практических конференциях «Инновационные технологии в машиностроении» (ЮТИ, г. Юрга, 2012, 2013, 2016 гг.), X Международной научно-практической конференции «Инновации в технологиях и образовании» (КузГТУ, университет «Св. Кирилла и Св. Мефодия», г. Белово, г. Велико-Тырново, 2017 г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 15 печатных работ, в т. ч. 9 работ опубликовано в изданиях, входящих в перечень ВАК.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 153 страницах машинописного текста, содержащих 71 рисунок, 18 таблиц, список литературы из 102 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, характеризуется степень её разработанности, определяются цели и задачи, описывается теоретическая и практическая значимость.

В **первой главе** приведен обзор способов механизированной проходки горных выработок. Приведено краткое описание нового вида проходческого оборудования – геоходов, (рис. 1) устройство и принципы работы которых, изложены в работах А.Ф. Эллера, В.В. Аксенова и В.Ф. Горбунова.

Приведен обзор движителей существующих проходческих систем и конструктивных решений ВД геоходов.

Во **второй главе** приведено описание особенностей работы геохода, в соответствии с которыми разработаны требования к ВД геохода:

- преобразование вращательного движения поворотной секции в поступательное движение геохода;
- создание напорного усилия на исполнительном органе;
- развиваемое осевое (тяговое) усилие, достаточное для преодоления осевой составляющей сил трения о среду;
- равномерное распределение между лопастями реакции взаимодействия рабочей поверхности ВД с геосредой;
- исключение заклинивания в выработке корпуса и рабочих поверхностях движителя;
- достаточная прочность межвиткового целика.

Введены понятия системы «внешний движитель – геосреда» (СВДГ) и опорной поверхности СВДГ, определены их элементы (рис. 2, 3).

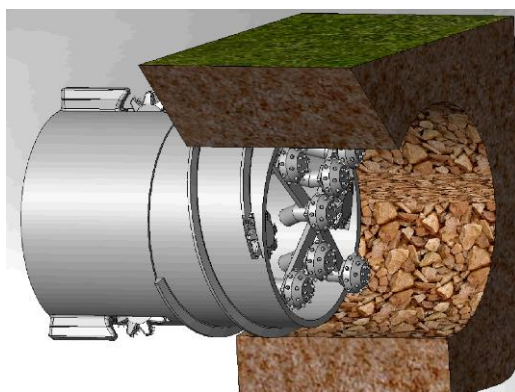


Рисунок 1 – Конструктивное исполнение геохода

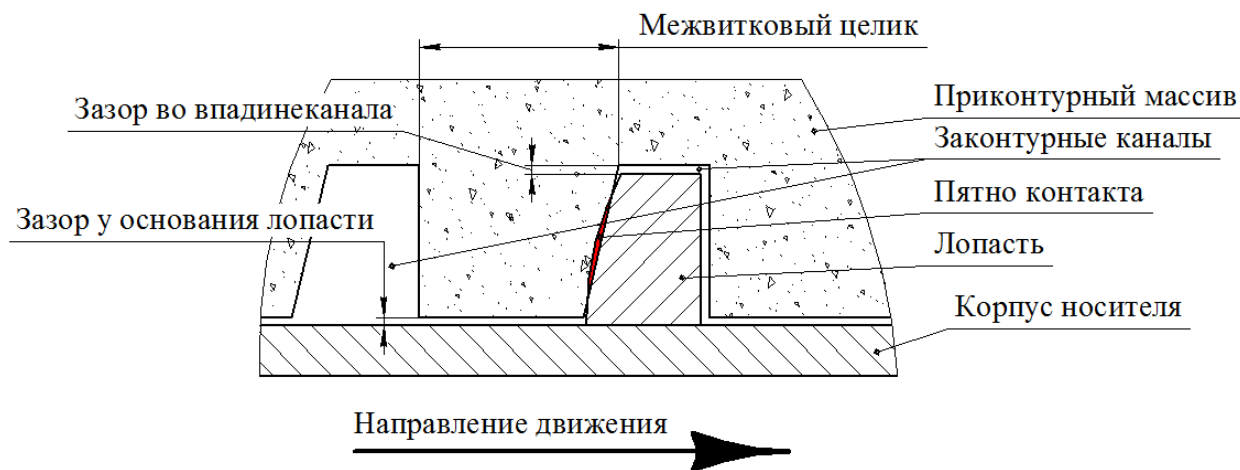


Рисунок 2 – Система «двигатель - геосреда»

Определен список геометрических параметров ОП СВДГ и предложена их классификация по подчиненности (иерархии) и первичности (зависимости).

По подчиненности выделены два уровня геометрических параметров:

- «качественные» (*первый уровень*) – параметры, которые дают характеристику форме ОП на качественном уровне по наличию тех или иных признаков;
- «количественные» (*второй уровень*) – параметры, которые численно характеризуют параметры *первого уровня*.

По признаку первичности выделены две группы параметров:

- *независимые (первичные)* – параметры, значения которых напрямую определяются конструктивными параметрами ВД или других систем геохода;

– *зависимые (вторичные)* – параметры, значения которых определяются «автоматически» в результате формирования первичных параметров.

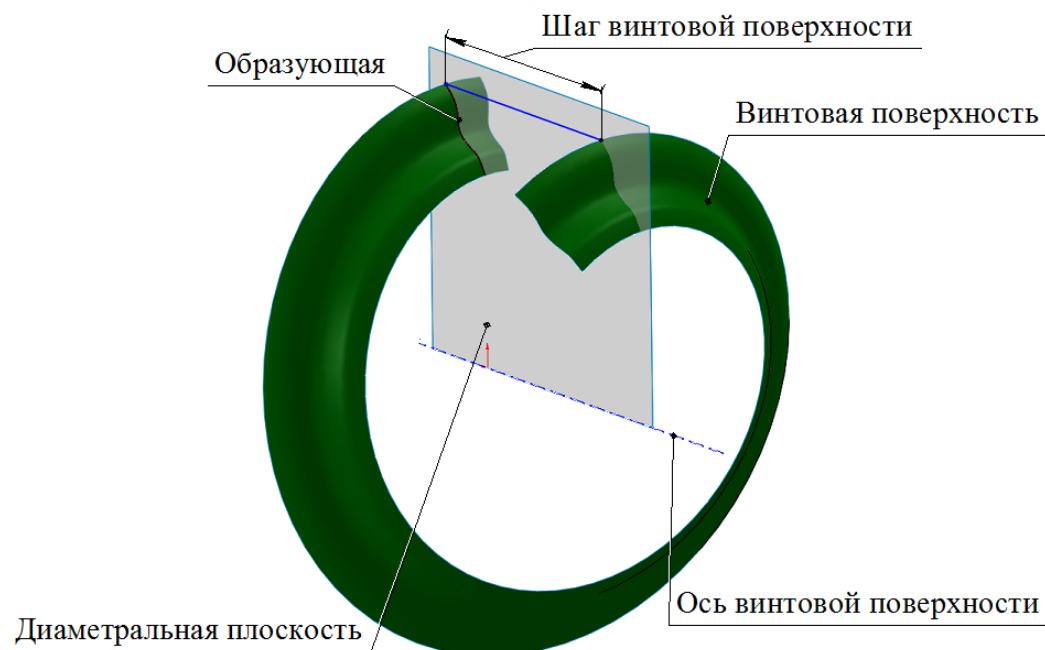
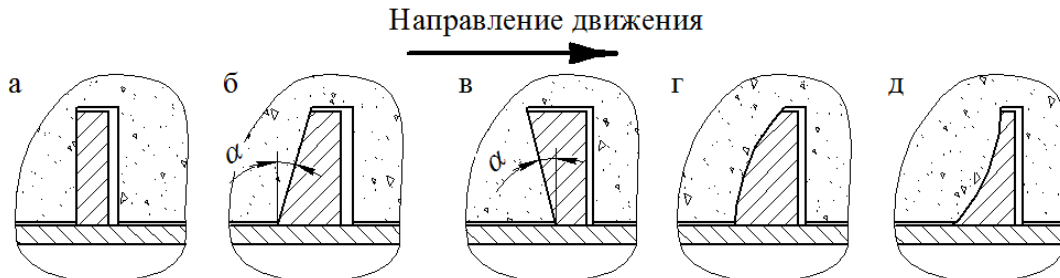
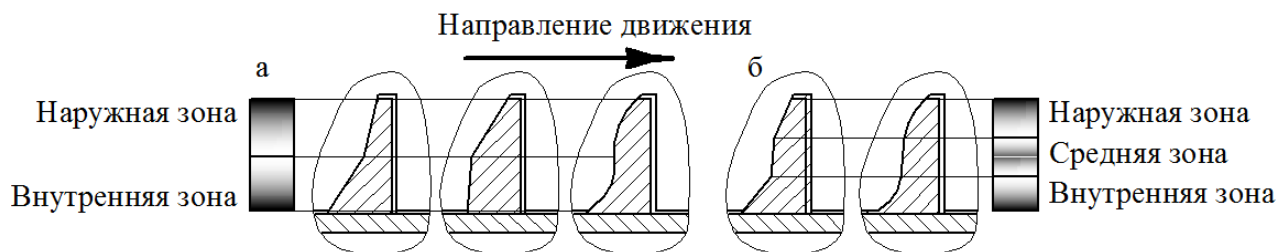


Рисунок 3 – Элементы опорной поверхности СВДГ

Разработаны варианты профилей ОП СВДГ (рис. 4, 5), проведен их анализ и обоснована целесообразность применения на данном этапе ОП СВДГ с линейной образующей, прямой (рис. 3 а) или с положительным наклоном (рис. 4 б).



линейные: а) прямой, б) с положительным наклоном, в) с отрицательным наклоном; криволинейные г) выпуклая, д) вогнутая
Рисунок 4 – Профили опорных поверхностей с непрерывной образующей



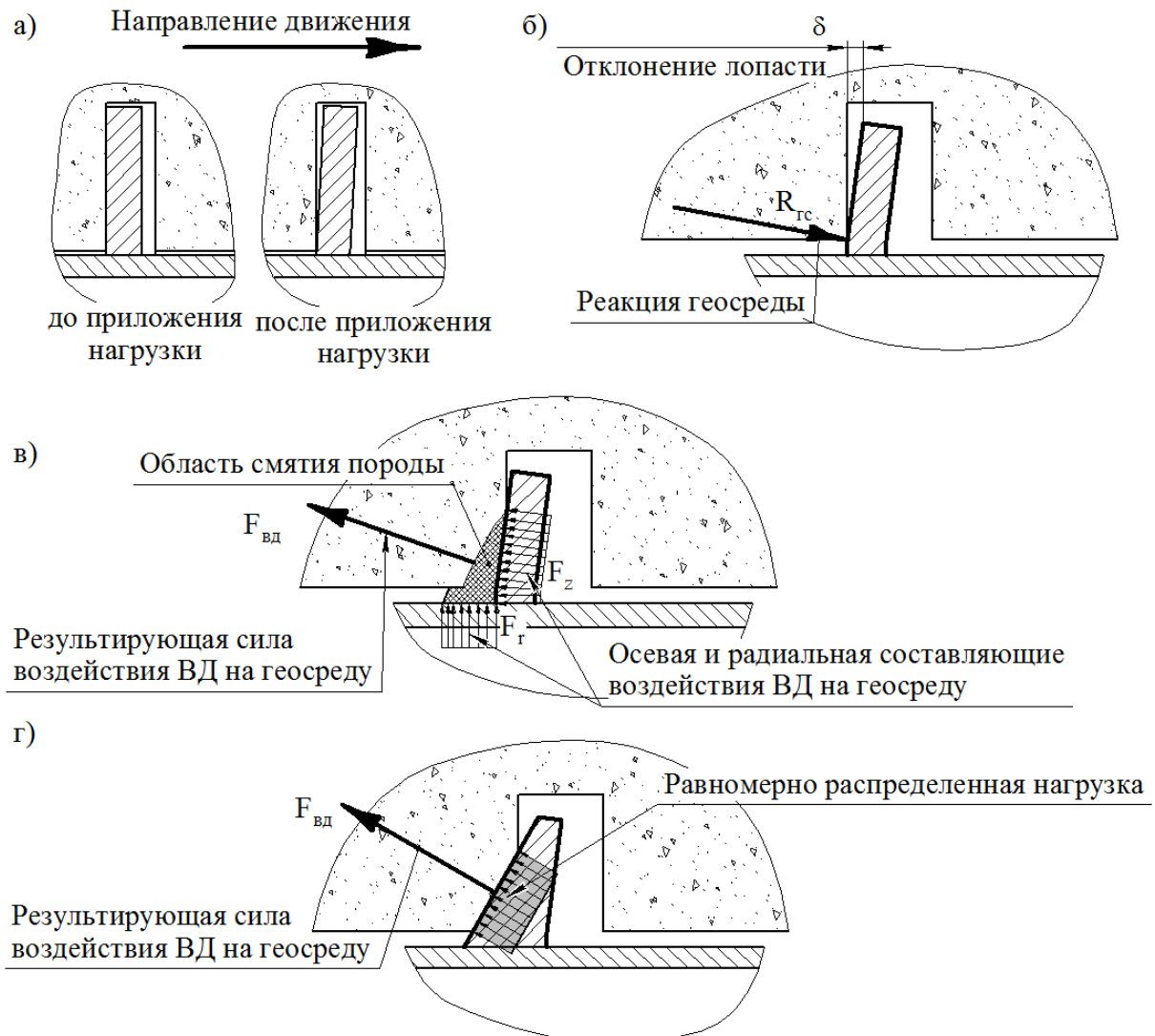
с разделением а) на две зоны, б) на три зоны

Рисунок 5 – Профили опорных поверхностей с дискретной образующей

В третьей главе определены исходные данные для моделирования НДС приконтурного массива пород при взаимодействии с ВД геохода.

На рисунке 6 показана схема силового взаимодействия лопасти и геосреды при условии совпадения ненагруженных профилей ОП лопасти ВД и винтового законтурного канала.

Из схемы на рисунке 6 в видно, что до наступления процесса смятия породы (рис. 6 а, б) площадь контакта стремится к нулю. Это приведет к превышению предела прочности породы и к формированию области смятия (рис. 5 в). Граница области смятия является границей разрушения, поэтому сделали допущение, что на границе области смятия породы напряжения равны или весьма близки к пределу прочности на одноосное сжатие и направлены по нормали к границе области смятия. Также сделали допущение, что модель поведения породы в области смятия близка к поведению вязкой среды. Поверхность, ограничивающая область смятия с одной стороны и неразрушенную породу с другой, можно рассматривать, как вновь сформированную опорную поверхность законтурного канала, к которой приложена равномерно распределенная нормальная нагрузка, численно равная пределу прочности породы на одноосное сжатие (рис. 6 г). При этом возможно избежать или минимизировать формирование области смятия породы.

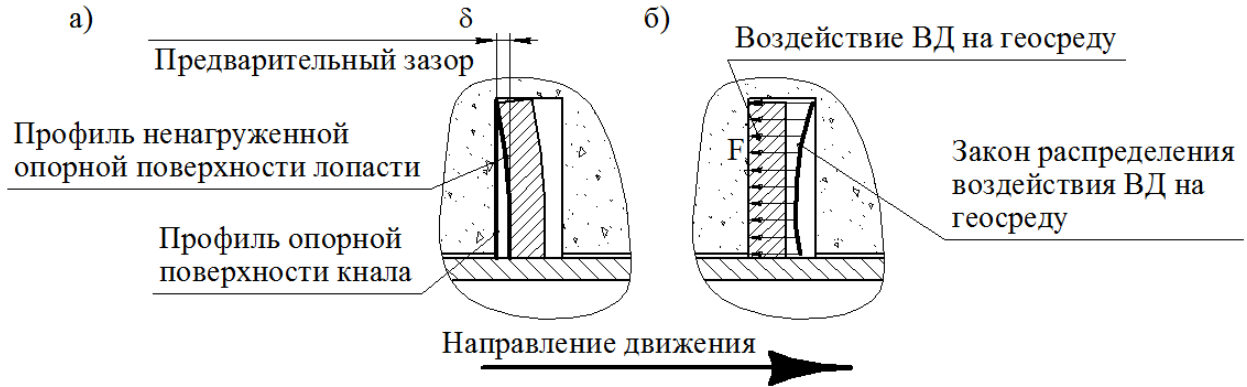


- а) деформация лопасти ВД под воздействием реакции геосреды,
 б) формирование реакции геосреды до смятия породы, в) формирование пятна контакта и сил взаимодействия ВД и геосреды после смятия породы,
 г) замещение области смятия лопастью

Рисунок 6 – Схема взаимодействия ВД с геосредой

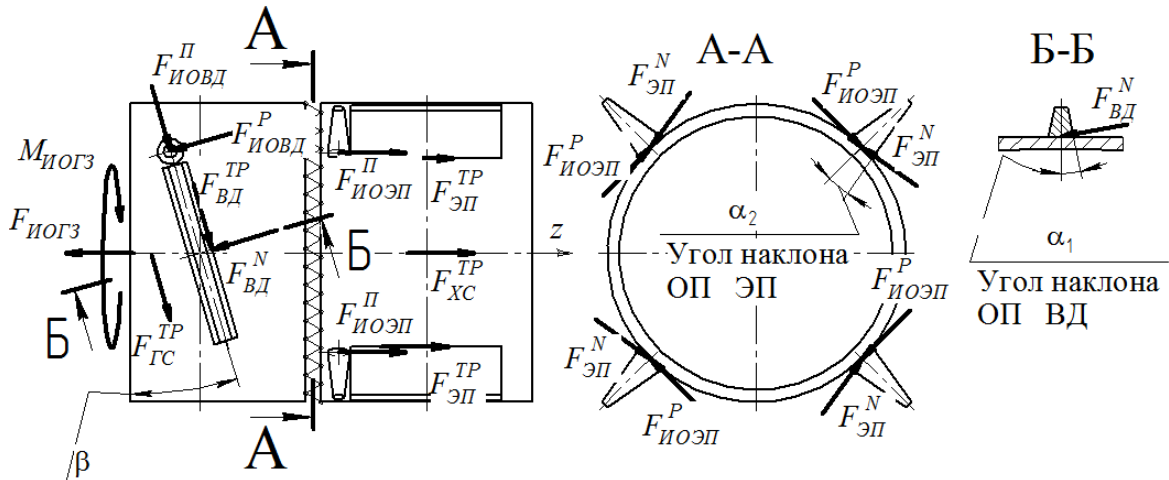
На рисунке 7 показана схема силового взаимодействия лопасти и геосреды при условии совпадения нагруженных профилей ОП лопасти ВД и винтового законтурного канала. Из схемы на рисунке 7 видно, что закон распределения нагрузки по ОП определяется параметрами лопасти и может быть произвольным. Схемы распределения нагрузки по ОП, приведенные на рисунках 6 и 7, позволяют допустить применение равномерно распределенной нагрузки при моделировании процесса взаимодействия лопасти ВД с геосредой.

На рисунке 8 показана схема к упрощенной модели силового взаимодействия основных систем геохода с геосредой.



а) до приложения нагрузки, б) после приложения нагрузки

Рисунок 7 – Схема взаимодействия ВД с геосредой



Угол подъема винтовой линии ВД

$F_{иогз}$ и $M_{иогз}$ - суммарные осевая сила и момент на исполнительном органе главного забоя, $F_{гс}^{TP}$ и $F_{гс}^{TP}$ - силы трения оболочек головной и хвостовой секций о породу, $F_{иовд}^P$ и $F_{иовд}^П$ - силы резания и подачи на исполнительных органах ВД, $F_{иозп}^P$ и $F_{иозп}^П$ - то же на исполнительных органах элементов противовращения (ЭП), $F_{вд}^N$ и $F_{вд}^{TP}$ - нормальная сила и сила трения на ОП ВД, $F_{эп}^N$ и $F_{эп}^{TP}$ - то же на ЭП

Рисунок 8 – Схема к модели взаимодействия геохода с геосредой

Учитывая, что силы трения пропорциональны нормальным силам:

$$F_{вд}^{TP} = f_{тр} \cdot F_{вд}^N; \quad F_{эп}^{TP} = f_{тр} \cdot F_{эп}^N, \quad (1)$$

где $f_{тр}$ - к-нт трения, уравнения равновесия для схемы на рисунке 8 имеет вид:

$$\begin{cases} F_{XC}^{TP} + F_{FC}^{TP} \sin \beta - F_{ИОГЗ} + n_1 F_{ИОВД}^{\Pi} \sin \beta - n_1 F_{ИОВД}^P \cos \beta + \\ + n_2 F_{ИОЭП}^{\Pi} - n_1 F_{ВД}^N (\cos \beta \cos \alpha_1 - f_{mp} \sin \beta) - n_2 f_{mp} F_{ЭП}^N = 0 \\ F_{XC}^{TP} \cos \beta - \frac{M_{ИОГЗ}}{R_C} + n_1 F_{ИОВД}^{\Pi} \cos \beta + n_1 F_{ИОВД}^P \sin \beta + \\ + n_2 F_{ИОЭП}^P + n_1 F_{ВД}^N (\sin \beta \cos \alpha_1 + f_{mp} \cos \beta) - n_2 F_{ЭП}^N \cos \alpha_2 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

где n_1 и n_2 – количество лопастей ВД и элементов противовращения.

После введения констант, независящих от угла α_1 наклона ОП ВД и решения системы уравнений (2) получили вид зависимости нагрузки $F_{ВД}^N$ от α_1 .

$$F_{ВД}^N = A_1 / (A_2 \cdot \cos \alpha_1 - A_3). \quad (3)$$

Из (3) получили условие $A_2 \cdot \cos \alpha_1 - A_3 > 0$, определяющее диапазон:

$$\alpha_1 < \arccos(A_3/A_2).$$

При этом критическое значение угла α_1 составило: $\alpha_{1кр} = 54^\circ 28'$.

Значения сил, полученные из (2) (3) и (4) в диапазоне $0^\circ \leq \alpha_1 \leq 54^\circ$ использовались в качестве исходных данных при моделировании НДС породы при взаимодействии лопасти ВД с приконтурным массивом.

Для модели были обоснованы толщина законтурного массива, равная двум диаметрам выработки (6,4 м), и размеры конечных элементов – $\Delta = 50$ мм у опорной поверхности и $\Delta = 500$ мм в остальной части массива.

В четвертой главе определено влияние угла α_1 наклона ОП ВД на напряжения в породе приконтурного массива пород, рассмотрена модель взаимодействия ВД с породой (рис. 9).

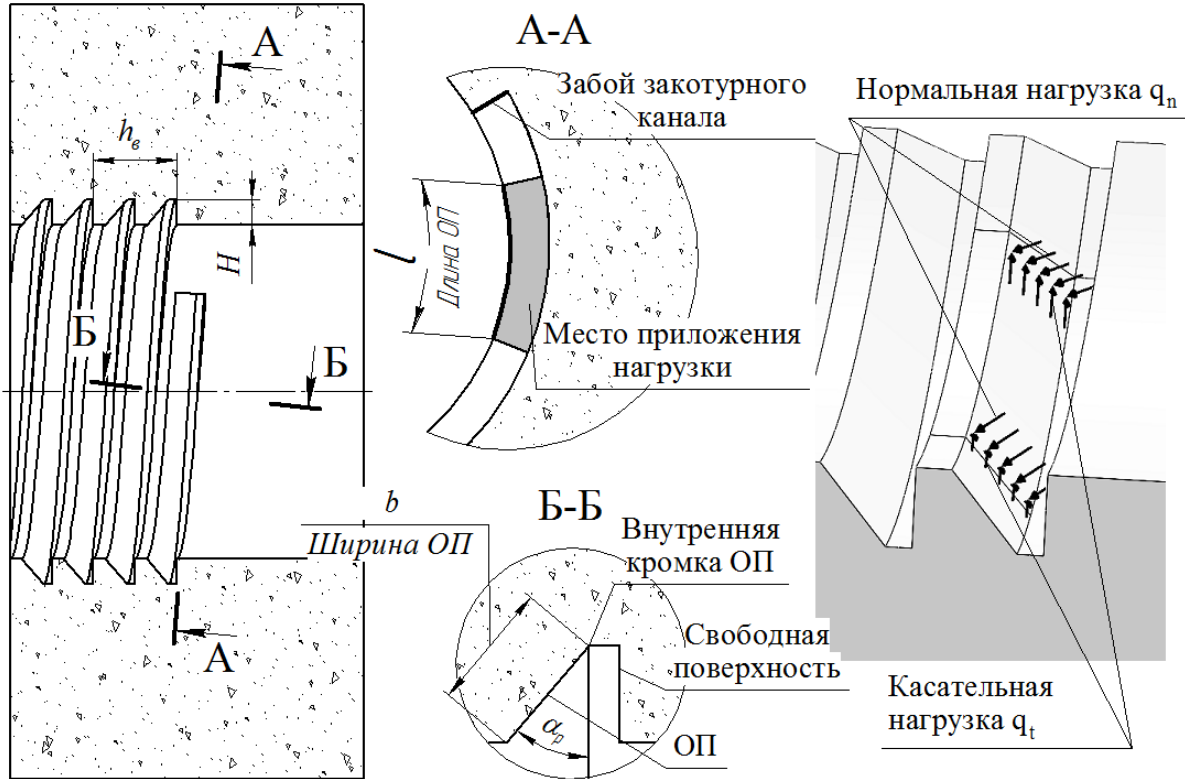


Рисунок 9 – Схема модели взаимодействия ВД с породой

К опорной поверхности прикладывались равномерно распределенные нормальная и касательная нагрузки (таблица 1):

$$q_n = F_{ВД}^N / S_{ОП} \quad \text{и} \quad q_t = F_{ВД}^{TP} / S_{ОП}, \quad (3)$$

где площадь $S_{ОП}$ ОП измерялась непосредственно на модели, а силы $F_{ВД}^N$ и $F_{ВД}^{TP}$ определялись по (2), (3) и (4).

На рисунке 10 показаны эпюры главных и касательных напряжений в срединном поперечном сечении ПО ВД.

Таблица 1 – Параметры нагружения модели

α_p	q_n (МПа)	q_t (МПа)	α_p	q_n (МПа)	q_t (МПа)	α_p	q_n (МПа)	q_t (МПа)
0°	1,195	0,837	25°	1,392	0,974	50°	4,993	3,495
5°	1,201	0,841	30°	1,516	1,061	51°	6,169	4,318
10°	1,221	0,855	35°	1,713	1,199	52°	8,218	5,753
15°	1,256	0,879	40°	2,053	1,437	53°	12,684	8,879
20°	1,310	0,917	45°	2,759	1,932	54	29,957	20,970

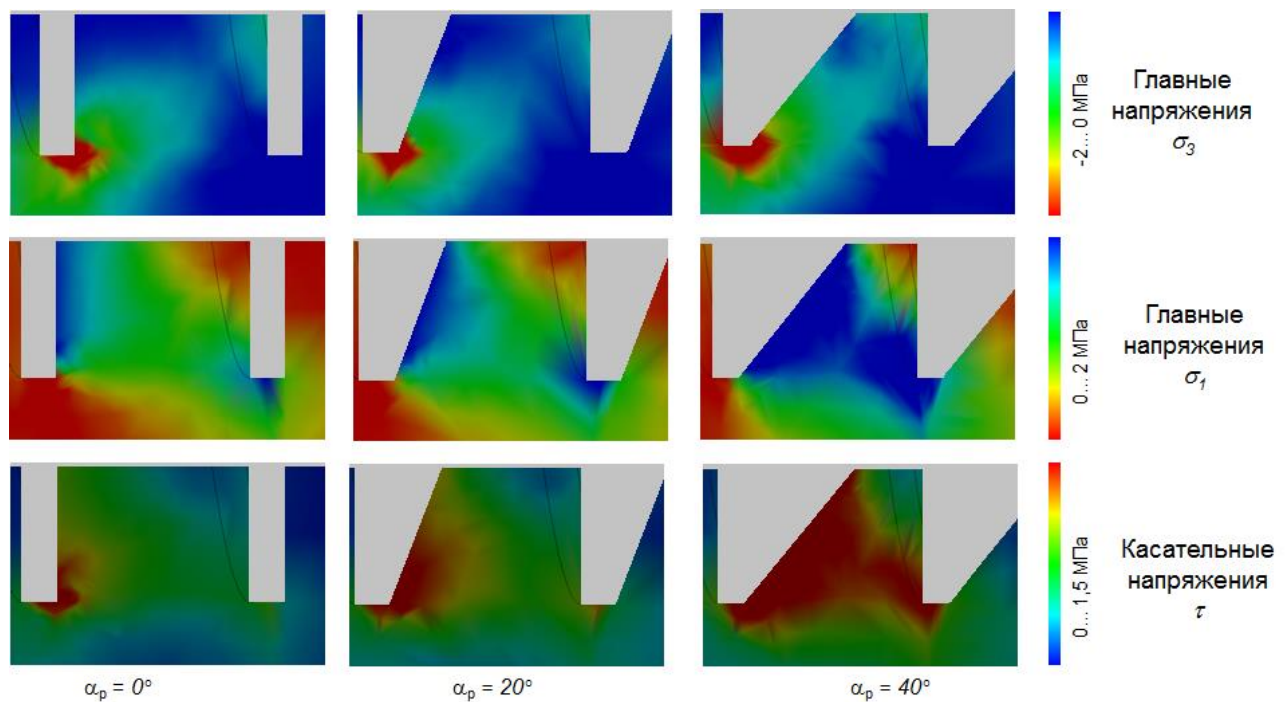


Рисунок 10 – Эпюры напряжений в срединном сечении ОП канала

Из эпюр напряжений в видно, что максимальные напряжения имеют место на поверхности контакта и уменьшаются с удалением вглубь массива. При значениях угла $\alpha_p > 20^\circ$ модули напряжений растут с увеличением угла.

Также при предварительном моделировании визуально оценивалось распределение напряжений по опорной поверхности (рис. 11).

Из эпюр распределения напряжений по ОП законтурного канала видно, что в области переднего края лопасти преобладают сжимающие напряжения, а в области заднего края лопасти – растягивающие. Касательные напряжения растут от переднего к заднему краю лопасти. Изменение напряжений от переднего до заднего краев лопасти носит монотонный характер.

При дальнейшем моделировании исследовалось влияние угла α_p на напряжения в породе в контрольных точках ОП, обозначенных на рисунке 12.

В ходе моделирования изменяли угол наклона опорной поверхности α_p от 0° до 50° с шагом в 5° и от 50° до 54° с шагом в 1° , на поверхности взаимодействия лопасти с массивом определялись главные напряжения σ_1 и σ_3 , касательные напряжения τ и эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$, сравнивались распределения напряжений по поверхности при разных углах наклона α_p .

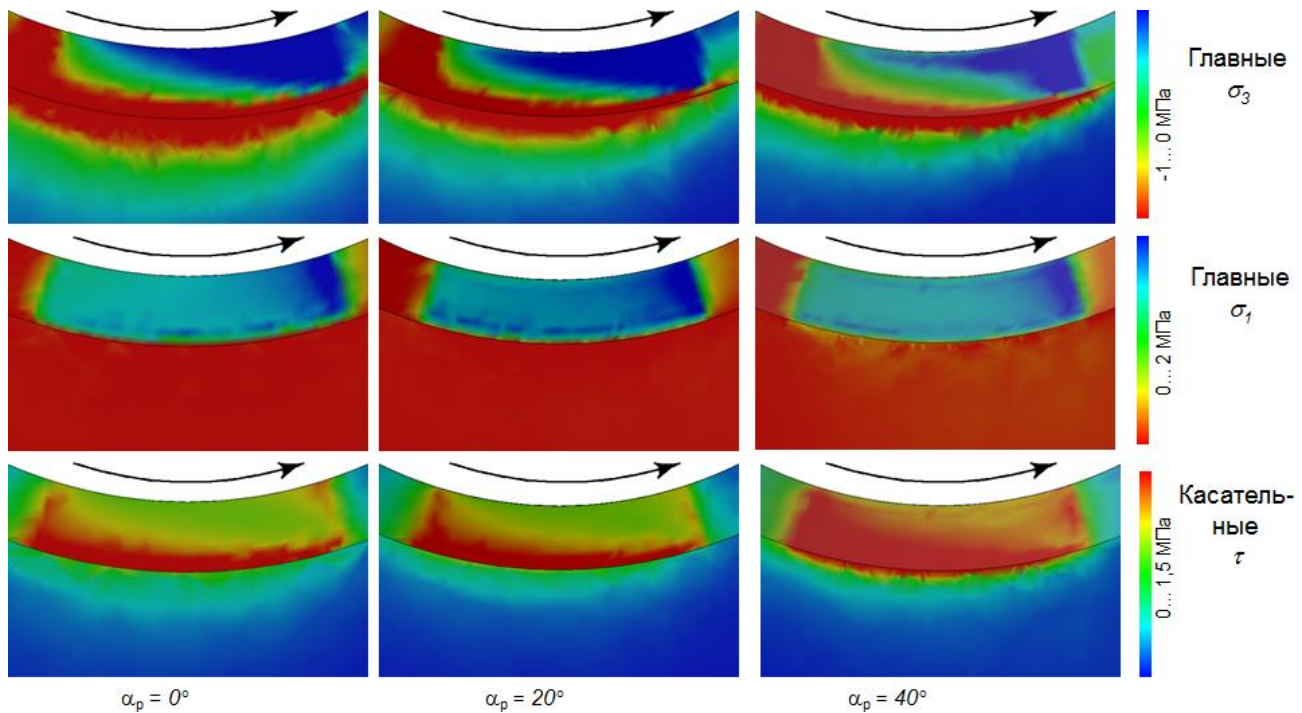
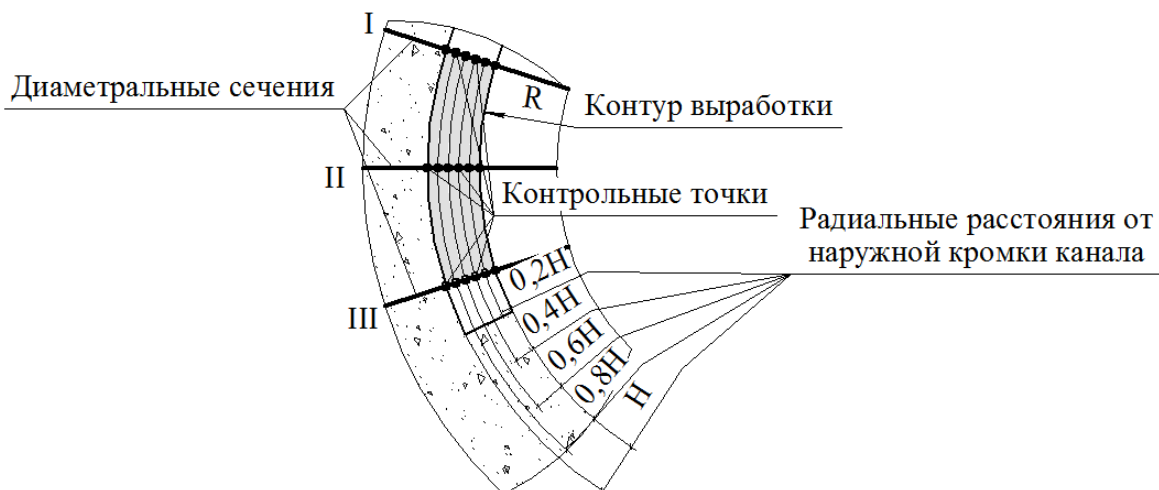


Рисунок 11 – Распределение напряжений по ОП законтурного канала

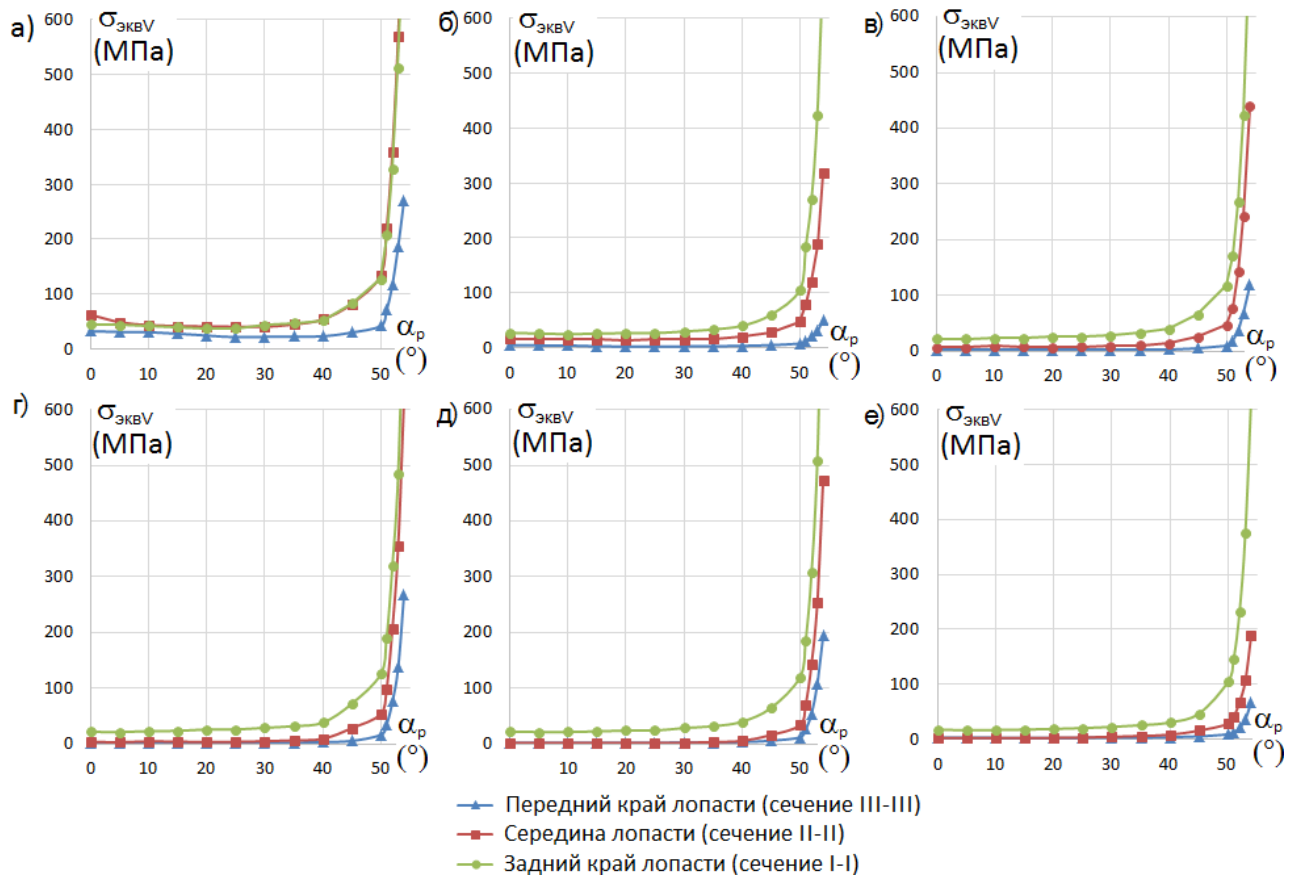


Сечения I I – у заднего края лопасти, II II – посередине лопасти,
III III – у переднего края лопасти

Рисунок 12 – Схема размещения контрольных точек на опорной поверхности законтурного винтового канала

На рисунке 13 показаны графические зависимости, которые отражают влияние угла α_p наклона ОП ВД на напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ в контрольных точках. Из

графиков заключаем, что зависимость напряжений от угла наклона ОП носит немонотонный характер, т.е. **существует угол, при котором вероятность смятия опорной поверхности канала минимальна (рациональный угол)**, причем этот угол зависит от положения точки на опорной поверхности. С увеличением угла α_p в диапазоне от 0 до 20 градусов значения эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{эквV}}$ незначительно уменьшаются, при дальнейшем увеличении угла α_p значения напряжений $\sigma_{\text{эквV}}$ увеличиваются. Значения рациональных углов лежат в диапазоне углов α_p от 0 до 30 градусов, при углах $\alpha_p > 50^\circ$ происходит резкий рост напряжений.



а) в области внутренней кромки, б) на расстоянии $0,8H$ от наружной кромки, в) на расстоянии $0,6H$ от наружной кромки, г) на расстоянии $0,4H$ от наружной кромки, д) на расстоянии $0,2H$ от наружной кромки, е) в области наружной кромки

Рисунок 13 – Зависимость эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{эквV}}$ от угла наклона опорной поверхности α_p

Для точек, лежащих в области заднего края лопасти, в диапазоне $0^\circ \leq \alpha_p \leq 30^\circ$ построили эмпирические зависимости напряжений от угла α_p :

$$\tilde{\sigma}(\alpha_p) = \sigma_0 + A_1 \alpha_p + A_2 \alpha_p^2 + A_3 \alpha_p^3, \quad (4)$$

где σ_0 , A_1 , A_2 и A_3 – эмпирические константы.

Для определения констант σ_0 , A_1 , A_2 и A_3 применили метод наименьших квадратов. Условие для определения эмпирических коэффициентов полинома третьей степени:

$$S_3 = \sum_{i=1}^n [\tilde{\sigma}(\alpha_i) - \sigma_i]^2 \rightarrow \min$$

$$S_3 = \sum_{i=1}^n (\sigma_0 + A_1 \alpha_i + A_2 \alpha_i^2 + A_3 \alpha_i^3 - \sigma_i)^2 \rightarrow \min$$

На рисунке 14 представлены графики полученных эмпирических зависимостей (4). По нижним точкам графиков определили значения рациональных углов для точек, расположенных в области заднего края лопасти. Значения углов и уклонов приведены в таблице 2.

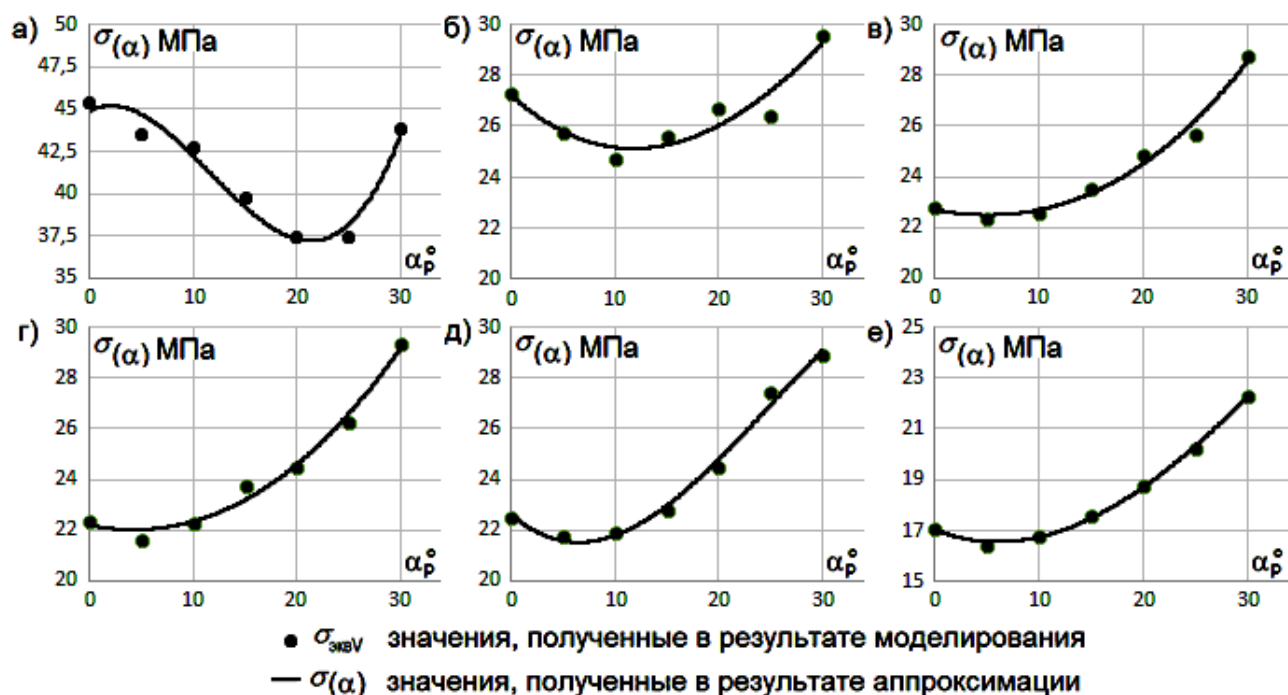
Таблица 2 – Значения рациональных углов и уклонов для заднего края ОП

Точка	I-I _{0,0H}	I-I _{0,2H}	I-I _{0,4H}	I-I _{0,6H}	I-I _{0,8H}	I-I _{1,0H}
Угол α_{py}	5°59'	4°29'	4°12'	6°4'	11°44'	21°19'
Уклон $\tan \alpha_{py}$	0,1048	0,0783	0,0733	0,1063	0,2076	0,3901

По значениям углов в точках, лежащих в области заднего края лопасти, построили эмпирические зависимости уклона от радиальной координаты точки:

$$\tan \alpha_{py} = dZ/dY = dz/dh = B_0 + B_1 h + B_2 h^2, \quad (5)$$

где B_0 , B_1 и B_2 – эмпирические константы.



а) в области внутренней кромки, б) на расстоянии 0,8H от наружной кромки, в) на расстоянии 0,6H от наружной кромки, г) на расстоянии 0,4H от наружной кромки, д) на расстоянии 0,2H от наружной кромки, е) в области наружной кромки

Рисунок 14 – Зависимость эквивалентных напряжений $\sigma_{эквV}$ от угла наклона опорной поверхности α_p в диапазоне $0^\circ \leq \alpha_p \leq 30^\circ$

Рассматривая линию образующей как график функции (рис. 15) и решая уравнение (5) получили уравнение эмпирической линии образующей:

$$z(h) = B_0 h + \frac{B_1 h^2}{2} + \frac{B_2 h^3}{3}; \quad Z(Y) = B_0 Y + \frac{B_1 Y^2}{2H} + \frac{B_2 Y^3}{3H^2}. \quad (6)$$

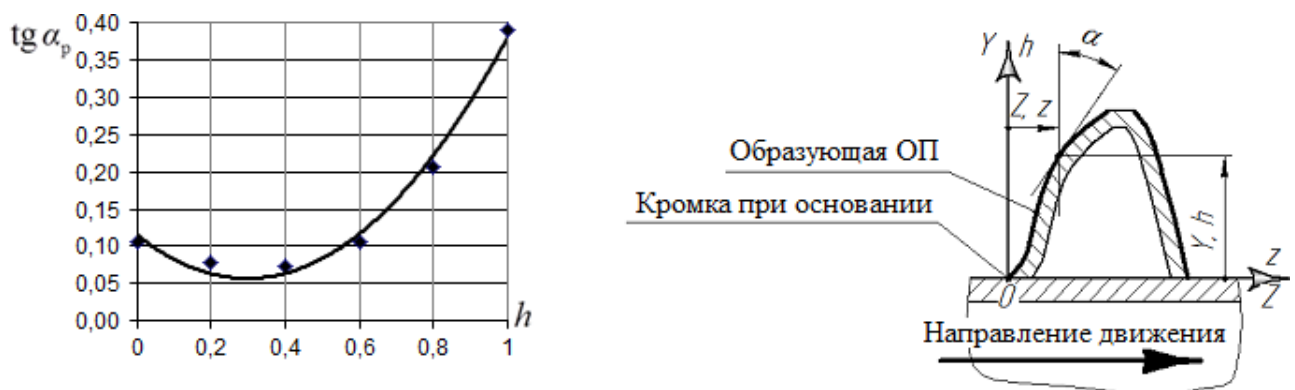
Ра рисунке 16 представлены масштабные изображения рациональной линии образующей и соответствующего профиля лопасти ВД.

Учитывая целесообразность применения на данном этапе линейной образующей (рис. 4 б), была построена линейная образующая $z_L(h) = a + b \cdot h$.

Условие максимального соответствия линейной и эмпирической образующих определили по наименьшему среднеквадратическому отклонению:

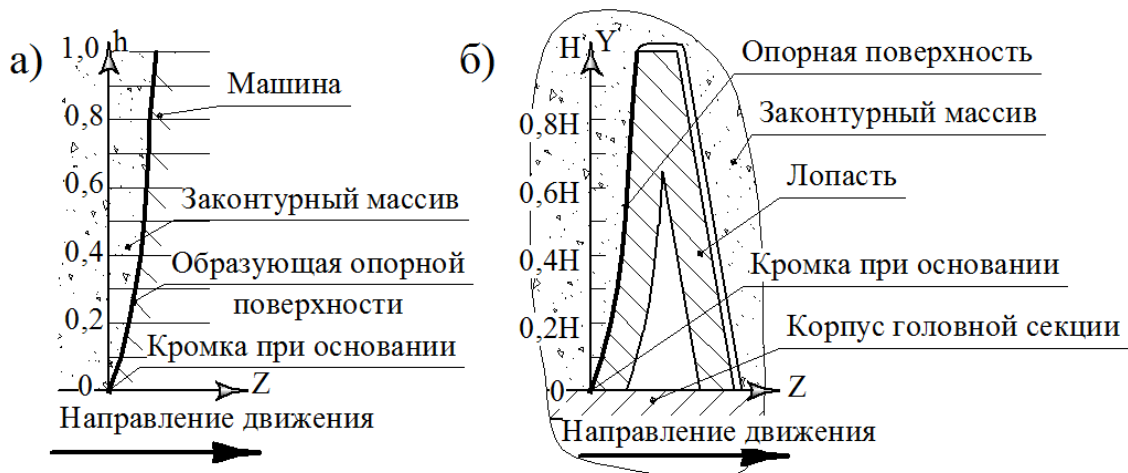
$$S_1 = \int_0^1 (z_L(h) - z(h))^2 dh = \int_0^1 \left(a + b \cdot h - B_0 h - \frac{B_1 h^2}{2} - \frac{B_2 h^3}{3} \right)^2 dh \rightarrow \min \quad (7)$$

Решая уравнение (7) получили значение рационального угла наклона линейной образующей $\alpha = \arctg(b)$; $\alpha = 6^\circ 40'$.



♦ $\text{tg } \alpha_p$ значения, полученные в результате моделирования
— $\text{tg } \alpha_{(h)}$ значения, полученные в результате аппроксимации

Рисунок 15 – Параметры линии образующей ОП ВД в координатах ZY и zh



а) форма образующей, б) профиль лопасти

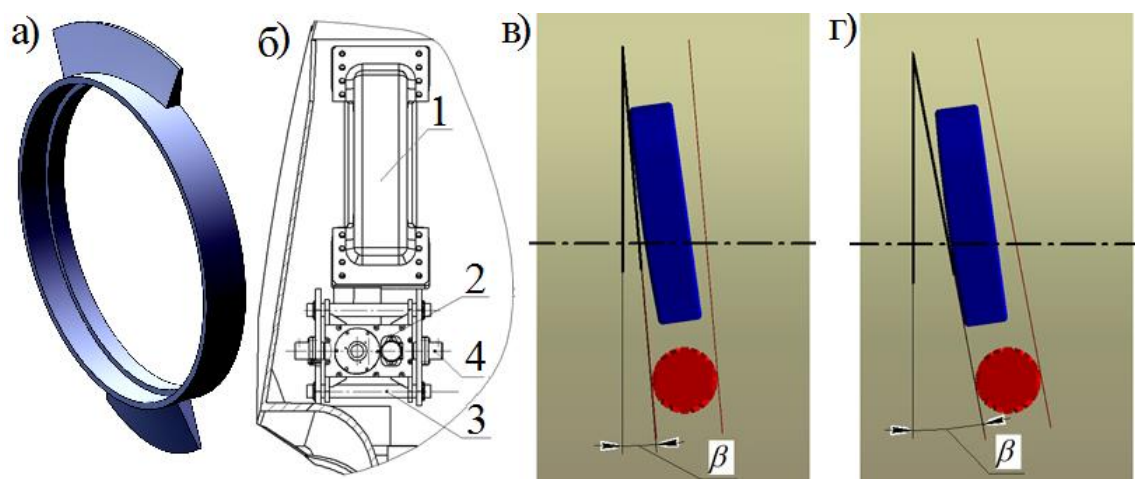
Рисунок 16 – Эмпирическая линия рациональной образующей опорной поверхности лопасти внешнего движителя геохода

В пятой главе разработано конструктивное решение ВД геохода для пород с коэффициентом крепости $f = 1 \dots 5$ по шкале профессора М.М. Протодьяконова.

Обосновано применение двухлопастного ВД пропеллерного типа с числом заходов равным числу лопастей (рис. 17 а).

Рекомендовано обеспечить управляемое перемещение исполнительного органа внешнего движителя (ИО ВД) (рис. 17 б), с возможностью управления распределением нагрузки по ОП ВД углом подъема винтовой линии в диапазоне $\beta = 4^\circ \dots 5^\circ$ подъема винтовой линии и (рис. 17 в, г).

Обосновано размещение лопасти ВД, ИО ВД и барабана главного исполнительного органа на одной винтовой линии (рис. 18).



1 – лопасть, 2 – ИО ВД, 3 – направляющие, 3 – гидроцилиндр перемещения привода ОИ ВД

а) взаимное расположение лопастей, б) механизм перемещения ОИ ВД, в) уменьшение угла подъема винтовой линии и смещение нагрузки на задний край лопасти при смещении ИО ВД назад, г) увеличение угла подъема винтовой линии и смещение нагрузки на передний край лопасти при смещении ИО ВД вперед

Рисунок 17 – Конструктивное решение ВД геохода

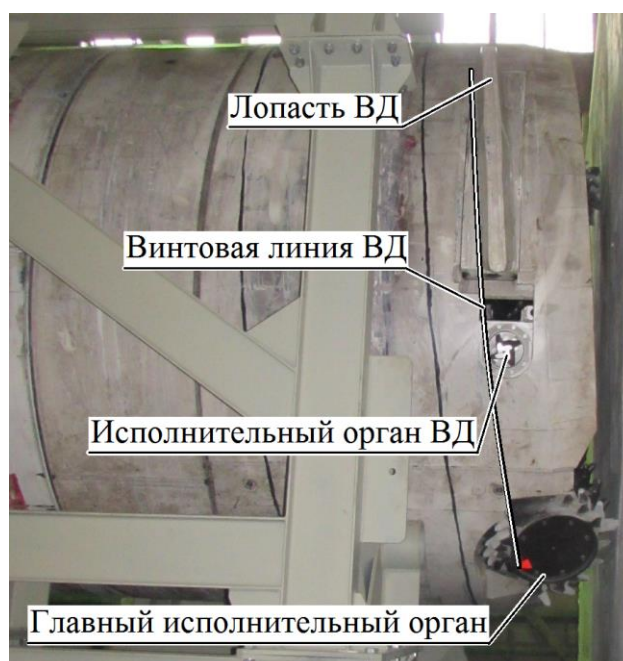


Рисунок 18 – Взаимное расположение лопасти ВД, ИО ВД и главного ИО

Предложено обеспечить снижение жесткости лопасти в области заднего края за счет формирования консоли и уменьшения толщины стенок и ребер.

Рекомендовано углы наклона ОП лопасти и канала выполнить в диапазоне $\alpha = 6^\circ \dots 8^\circ$, причем угол наклона ОП канала делать несколько больше угла наклона ОП лопасти.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации научно обоснованы параметры ОП ВД геохода, изложены технические решения ВД для пород средней крепости, применимые для создания новых горных машин, обладающих повышенной производительностью, что имеет существенное значение для горного машиностроения.

В рамках исследований получены следующие основные результаты:

1. Установлено, что при взаимодействии лопасти ВД с породой образуется область смятия породы, на границе которой имеет место равномерно распределенная нагрузка с интенсивностью равной или близкой к пределу прочности породы на одноосное сжатие; а размеры, форма и расположение области смятия зависят от профиля и механических характеристик канала и лопасти.

Доказана возможность применения равномерно распределенной нагрузки при моделировании процесса взаимодействия ВД с геосредой возможно применение равномерно распределенной нагрузки.

Предложено на данном этапе применение ВД с ОП, сформированной вращательно-поступательным движением прямой линии (образующей), при этом угол между ОП и контуром выработки должен быть больше 90° .

2. Доказано, что в области взаимодействия лопасти ВД с приконтурным массивом пород максимальные по модулю значения напряжений приходятся на поверхность взаимодействия, а с удалением от поверхности вглубь массива значения напряжений уменьшаются.

При этом в области заднего края лопасти по сравнению с областью переднего края лопасти имеют место следующие отличия:

- главные напряжения смещены в сторону растяжения на $1,2 \dots 5$ МПа;
- значения касательных напряжений больше на $0,2 \dots 1,2$ МПа;
- значения эквивалентных напряжений больше на $13 \dots 26$ МПа;
- различия напряжений сильнее проявляются при увеличении угла α наклона опорной поверхности к фронтальной плоскости.

Предложено при проектировании внешних движителей геоходов принимать меры по смещению максимальных нагрузок на передний край лопасти и частичной разгрузке заднего края лопасти.

Доказано, что НДС породы зависит от угла α наклона ОП, и зависимость напряжений от угла α носит немонотонный характер, существует рациональный угол α_p наклона ОП, при котором эквивалентные напряжения принимают минимальное значение, а также минимальна вероятность смятия породы в канале, причем этот угол зависит от положения точки на опорной поверхности.

3. Доказано, что значения рациональных углов α_p наклона опорной поверхности зависят от радиальной координаты, максимальные значения рациональных углов α_p имеют место у внутренней кромки опорной поверхности канала (кромки при вершине лопасти), по мере удаления от внутренней кромки значения углов α_p уменьшаются, а в области наружной кромки канала (кромки

при основании лопасти) начинают расти. Значения рациональных углов α_p лежат в интервале $4^\circ < \alpha < 22^\circ$. Для заданных горно-технологических условий получено рациональное значение угла наклона ОП ВД $\alpha = 6^\circ 40'$.

Доказано, что применение углов $\alpha > 30^\circ$ нецелесообразно, так как приводит к увеличению усилий взаимодействия и росту напряжений в породе.

4. При проектировании элементов системы «внешний движитель – геосреда» для заданных горнотехнических условий рекомендовано:

- обеспечить угол наклона опорной поверхности винтового законтурного канала несколько большим чем угол наклона опорной поверхности лопасти ВД, а величину предварительного зазора определять опытным путем с учетом расчетов корпуса и лопасти на жесткость;
- применять максимальное возможное значение угла подъема винтовой линии ВД геохода, которое ограничено характеристиками главного исполнительного органа и составляет $\beta_{\max} = 4^\circ 33'$ (уменьшение угла β нецелесообразно, так как приводит к увеличению удельных затрат энергии, расходуемой на движение геохода);
- для обеспечения центрирования геохода в выработке применять многолопастной ВД пропеллерного типа;
- для рационального размещения оборудования в головной секции применять двухлопастной ВД (по числу барабанов исполнительного органа), короткие винтовые лопасти которого размещаются за барабанами исполнительного органа, а число заходов винтовых каналов равно числу лопастей;
- для обеспечения достаточной несущей способности межвиткового целика обеспечить равномерное распределение нагрузки между лопастями ВД, для управления распределением нагрузки между лопастями ВД обеспечить управление взаимным положением лопасти и исполнительного органа ВД.

Направление дальнейших исследований:

1. Моделирование НДС породы при нелинейной образующей ОП ВД.
2. Снижение сопротивления движению на лопастях ВД.
3. Обоснование геометрических параметров профиля ВД: высота лопасти и глубина канала, толщина лопасти и ширина канала, зазоры между лопастью и породой по ширине и высоте профиля.
4. Обоснование конструктивных параметров лопасти ВД.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи в изданиях рекомендованных ВАК

1. Аксенов В.В. Проведение подземных выработок. Структура инновационного инструментария для формирования подземного пространства / В.В. Аксенов, Б.Л. Герике, **И.К. Костинiec**, Н.А. Емельяненко // ГИАБ. - 2011. - №. S10. - С.9-15
2. Аксенов В.В. Зависимость напряжения в породе забоя от относительной инструментальной высоты уступа / В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, **И.К. Костинiec**, В.Ю. Бегляков // Вестник КузГТУ. - 2012. - №4(92). - С. 33-36
3. Аксенов В.В. Зависимость напряженно-деформированного состояния забоя от угла наклона поверхности взаимодействия исполнительного органа ге-

охода с геосредой / В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, **И.К. Костинец**, В.Ю. Бегляков // Вестник КузГТУ. - 2012. - №5(93). - С. 12-15

4. Аксенов В.В. Влияние угла наклона поверхности взаимодействия исполнительного органа геохода с породой забоя на ее напряженно- деформированное состояние/ В.В. Аксенов, **И.К. Костинец**, В.Ю. Бегляков // ГИАБ. - 2012. - №. S2. С.30-36

5. Аксенов В.В. Влияние относительной инструментальной высоты уступа на напряжения в породе забоя / В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, **И.К. Костинец**, В.Ю. Бегляков // ГИАБ. - 2012. -№. S3. С. 159-166

6. Аксенов В.В. Обоснование необходимости создания внешнего движителя геохода для проведения аварийно-спасательных выработок / В.В. Аксенов, **И.К. Костинец**, В.Ю. Бегляков // ГИАБ. - 2012. - №6. - С.110-114

7. Аксенов В.В. Особенности работы внешнего движителя геохода/ В.В. Аксенов, **И.К. Костинец**, В.Ю. Бегляков // ГИАБ. - 2013. - №.6.- С. 419-425

8. Аксенов В.В. Классификация геометрических параметров внешнего движителя геохода / В.В. Аксенов, В.Ю. Бегляков, А.А. Казанцев, **И.К. Костинец**, А.В. Коперчук // Горное оборудование и электромеханика. - 2016. - №8. - С. 33-39

9. Бегляков В.Ю. Разработка законтурной опорно-двигательной системы геоходов / В.Ю. Бегляков, В.В. Аксенов, А.А. Казанцев, **И.К. Костинец** // Вестник КузГТУ. - 2017. - №6. - С. 176-181

Статьи в прочих изданиях

10. Аксенов В.В. Разработка требований к внешнему движителю геохода / В.В. Аксенов, **И.К. Костинец**, В.Ю. Бегляков //Горный инженер (научно-технический журнал). - 2013. - №1. - С. 182-188

11. Аксенов В.В. Влияние угла наклона поверхности взаимодействия исполнительного органа геохода с породой забоя на ее напряженно- деформированное состояние / В.В. Аксенов, В.Ю. Бегляков, **И.К. Костинец** // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сб. тр. III Международной научно-практической конференции с элементами научной школы для молодых ученых: в 2-х т. – Томск. - 2012.- Т.2. - С.272-275

12. Аксенов В.В. Обоснование необходимости создания внешнего движителя щитового проходческого агрегата многоцелевого назначения – геохода состояние / В.В. Аксенов, В.Ю. Бегляков, **И.К. Костинец** // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сб. тр. IV Международной научно-практической конференции с элементами научной школы для молодых ученых 23-24 мая, 2013г. – Томск. - 2013. - С.513-515

13. Аксенов В.В. Анализ применимости для геохода движителей существующих проходческих систем / В.В. Аксенов, **И.К. Костинец**, В.Ю. Бегляков // Инновационные технологии в машиностроении: сб. тр. VII Международной научно-практической конференции, 2016г. – Томск. - 2016. - С.439-444

14. Аксенов В.В. Геометрические параметры внешнего движителя геохода и поверхности его взаимодействия с законтурным каналом / В.В. Аксенов, **И.К. Костинец**, В.Ю. Бегляков // Инновации в технологиях и образовании: сборник статей X Международной научно-практической конференции, 16-17 марта, 2017г. - Белово, Велико-Тырново. - 2017. - Ч.1. – С. 205-210

15. Аксенов В.В. Моделирование процесса взаимодействия внешнего движителя геохода с геосредой / В.В. Аксенов, **И.К. Костинец**, В.Ю. Бегляков // Инновации в технологиях и образовании: сборник статей X Международной научно-практической конференции, 16-17 марта, 2017г. - Белово, Велико-Тырново. - 2017. - Ч.1. – С. 210-215

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, заключается в следующем:

[1] , [9] – структурный анализ движителей существующих машин;

[2], [3], [4], [5], [11] – построение графических зависимостей, формулировка выводов;

[6], [7], [10], [12], [13] – анализ особенностей работы геохода и его ВД, анализ соответствия существующих движителей особенностям работы геохода;

[8], [14] – формирование списка геометрических признаков и параметров ВД геохода;

[15] – постановка задачи, верификация модели.

Подписано к печати «05» марта 2018 г.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Объем 1 п.л.. Тираж 100 экз. Заказ 141

ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева»

650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Типография ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева»

650009, г. Кемерово, ул. Д. Бедного, 4 а.