

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ)

**ГУСЕВА АННА МИХАЙЛОВНА**

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ  
РАБОТЫ ШНЕКОВОГО ПРЕССА ФРЕЗФОРМОВОЧНОЙ  
МАШИНЫ ДЛЯ ДОБЫЧИ КУСКОВОГО ТОРФА**

**Специальность 05.05.06 Горные машины**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель – д.т.н., доцент Яблонев Александр Львович

Тверь – 2019

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Запасы торфа в России превышают энергетический потенциал отечественных запасов нефти и газа вместе взятых, и составляют более 175,6 млрд. тонн в 60-ти субъектах Федерации. В настоящее время в мире разрабатывается 0,05 % от общей площади торфяных месторождений, 51 % из которых используются для производства тепла и электроэнергии, остальные – для нужд сельского хозяйства. Использование торфа в энергетике негазифицированных зон обеспечит повышение энергетической безопасности и независимости районов, организацию рабочих мест, рациональное природопользование и охрану окружающей среды за счет разумной добычи местного топлива, решит вопрос экономической замены дальнепривозных мазута и углей, а также сверхлимитного газа.

Кусковой торф – безопасное топливо для его перевозки любым видом транспорта, имеющее теплотворную способность 3 200 Ккал/кг при влаге 33 %. Наибольшее распространение как в России, так и за рубежом получил фрезформовочный метод добычи кускового торфа, основанный на применении навесной, прицепной или полунавесной на колесный трактор машины, осуществляющей щелевое фрезерование торфяной залежи на глубину до 550 мм, формование торфа шнековым прессом и выстилку куска на картовое поле через многопоточный мундштук в виде цилиндров или волнистого расстила для последующей естественной сушки. Щелевое фрезерование и формование – самые энергоемкие операции (около 50 % эксплуатационных расходов и около 25 % от общей себестоимости продукта) во всем технологическом цикле производства торфа фрезформовочным методом.

В связи с изложенным, а также учитывая, что в настоящее время в России ведутся работы над проектированием различных модификаций фрезформовочных машин, представляется актуальным данное исследование, направленное на изыскание путей снижения энергоемкости диспергирования и формования торфа без потери куском прочностной характеристики как на стадии проектирования машин, так и в процессе их работы в полевых условиях.

**Степень научной разработанности темы исследования.** Вопросами изучения производства качественного кускового торфа занимались Солопов С.Г., Опейко Ф.А., Семенский Е.П., Корчунов С.С., Чураев Н.В., Копенкин В.Д., Лиштван И.И., Воронков Б.Б., Суворов В.И., Афанасьев А.Е., Евсеев В.Н., Кужман Г.И., Шамбер О.В., Гамаюнов С.Н., Цветков В.И., Фомин В.К., Михайлов А.В., Зюзин Б.Ф. и др. Большая часть этих исследований была направлена на повышение качества кускового торфа за счет нахождения оптимальных значений влаги, дисперсности, вида и типа исходного сырья, интенсификации процессов сушки куска

методами оптимальной ворочки и принудительного обдува фигур сушки. Однако вопросы повышения качества кускового торфа за счет обоснованной модернизации и поиска рациональных параметров и режимов работы формующего оборудования остаются недостаточно изученными. Кроме того, отсутствуют исследования, касающиеся оценки влияния параметров и режимов работы фрезформовочных машин на качество продукции не в момент выстилки кускового торфа на поля сушки, а в момент уборки, когда кусок набирает кондиционную влагу.

**Целью работы** является обоснование рациональных параметров и режимов работы шнекового пресса фрезформовочной машины для добычи кускового торфа, приводящее к снижению энергоемкости процесса диспергирования и формования при сохранении куском требуемых показателей плотности и прочности.

**Идея работы** заключается в нахождении рациональных соотношений внутреннего диаметра мундштука и напорной трубы, скорости вращения и шага витков шнека фрезформовочной машины при производстве кускового торфа по критериям требуемой плотности и прочности, определяемым после сушки в момент достижения куском кондиционной влаги.

**Задачи исследования:**

- анализ современного состояния и перспектив развития фрезформовочных машин для добычи кускового торфа;
- анализ, систематизация и обоснование требований к сырью, конструкции формующего агрегата и готовой продукции при добыче кускового торфа;
- установление закономерностей изменения энергоемкости формования торфа в зависимости от: соотношения внутренних диаметров мундштука и напорной трубы, скорости вращения и шага витков шнека на стадии добычи кускового торфа при естественной влаге;
- оценка плотности кускового торфа в зависимости от режимов его производства фрезформовочной машиной на стадии кондиционной влаги;
- разработка конструкции и методики оценки показателя прочности кускового торфа на стадии кондиционной влаги;
- установление рациональных параметров и режимов работы шнекового пресса при производстве кускового торфа по критериям показателей плотности и прочности;
- разработка математических моделей зависимости энергоемкости формования кускового торфа от коэффициента напора и скорости вращения шнека при работе агрегата в рациональном режиме.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Аналитические зависимости, устанавливающие характер изменения напора, создаваемого шнеком формующего агрегата от конструкции и расположения формующих мундштуков.

2. Закономерности изменения энергоемкости формования торфа в зависимости от: диаметра формующего мундштука, соотношения внутренних диаметров мундштука и напорной трубы, скорости вращения и шага витков шнека на стадии производства кускового торфа.

3. Обоснование выбора рациональных параметров и режимов работы шнекового пресса при производстве кускового торфа по критериям требуемой плотности и прочности, определяемым после сушки в момент достижения куском кондиционной влаги.

4. Математические модели, описывающие зависимость энергоемкости формования кускового торфа от коэффициента напора и скорости вращения шнека, полученные методом планирования эксперимента.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается: теоретическими и экспериментальными исследованиями с использованием математического анализа, теории вероятностей и математической статистики, теоретической и прикладной механики; адекватностью математических моделей процессу функционирования горных машин, достаточным объемом экспериментальных данных, полученных с доверительной вероятностью не менее 0,9 при величине относительной ошибки не более 0,1.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

- установлены зависимости энергоемкости формования кускового торфа на стадии производства фрезформовочной машиной от частоты вращения и шага витков шнека, соотношения внутренних диаметров формующего мундштука и напорной трубы;

- установлены зависимости плотности и прочности на изгиб кускового торфа на стадии кондиционной влаги от коэффициента напора, частоты вращения и шага витков шнека;

- установлена корреляционная связь плотности и прочности на изгиб кускового торфа;

- разработаны математические модели зависимости энергоемкости формования кускового торфа от коэффициента напора и скорости вращения шнека при работе агрегата в рациональном режиме.

**Научное значение работы** заключается в разработке комплексного метода оценки и снижения энергоемкости формования торфа при условии достижения требуемых показателей плотности и прочности куска как на стадии проектирования фрезформовочных машин, так и на стадии их работы в полевых условиях.

**Практическое значение работы** заключается в:

- разработке методики оценки энергоемкости формования кускового торфа в зависимости от частоты вращения и шага витков шнека, соотношения диаметров формующего мундштука и напорной трубы;

- разработке методики для определения прочности на изгиб формованной торфяной продукции;
- разработке методики обоснования рациональных параметров и режимов работы шнекового пресса фрезформовочной машины для добычи кускового торфа;
- разработке методики управления качеством кускового торфа на стадии производства при приведении параметров и режимов работы фрезформовочной машины к рациональным.

**Реализация результатов диссертационной работы.** Методика оценки энергоемкости формования кускового торфа в зависимости от коэффициента напора, частоты вращения и шага витков шнека, устройство и методика для определения прочности на изгиб формованной торфяной продукции внедрены и используются в учебном процессе ФГБОУ ВО ТвГТУ при подготовке студентов специальности 21.05.04. «Горное дело». Методика обоснования рациональных параметров и режимов работы шнекового пресса фрезформовочной машины для добычи кускового торфа и методика управления качеством кускового торфа на стадии производства при приведении параметров и режимов работы фрезформовочной машины к рациональным внедрены и используются ООО «Гринмаш» при проектировании и разработке рекомендаций по использованию фрезформовочных машин. Устройство для создания и измерения разрушающей нагрузки защищено патентом РФ № 2696070.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались на Международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, 2015, 2016, 2019 г.), на II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы безопасности жизнедеятельности и экологии» (Тверь, 2016 г.), на VII Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Опыт прошлого – взгляд в будущее» (Тула, 2017 г.), на XIV Международной конференции «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (Тула-Минск-Донецк, 2018 г.), на Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы устойчивого развития торфяного дела в России» (Тверь, 2018 г.), на XVII Международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (Екатеринбург, 2019 г.), на семинарах кафедры ТМО ФГБОУ ВО ТвГТУ (2017–2019 гг.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 работ, из них 2 – в изданиях, входящих в базу Scopus, 3 – в изданиях, входящих в перечень утвержденных ВАК Минобрнауки России, 1 – патент РФ на изобретение.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа представлена на 145 страницах основного текста и состоит из введения, трех глав,

заключения, списка использованных источников из 118 наименований, приложений, включает 62 рисунка и 14 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, отмечена степень ее разработанности. Сформулирована цель, идея, задачи исследования, научные положения, выносимые на защиту. Дана оценка научной новизны, теоретической и практической значимости работы. Приведены методология и методы диссертационного исследования, сведения о достоверности и апробации результатов.

**В первой главе** отмечается, что вопросами изучения качества кускового торфа занимались Солопов С.Г., Опейко Ф.А., Семенский Е.П., Корчунов С.С., Чураев Н.В., Копенкин В.Д., Лиштван И.И., Воронков Б.Б., Суворов В.И., Афанасьев А.Е., Евсеев В.Н., Кужман Г.И., Гамаюнов С.Н., Цветков В.И., Фомин В.К., Михайлов А.В., Зюзин Б.Ф. и др.

Общий анализ научно-исследовательских работ по теме показал, что большое их количество связано с установлением внешних условий повышения качества кускового торфяного топлива (оптимальное влагосодержание, степень разложения, зольность, вид и тип исходного торфяного сырья, условия сушки), но недостаточно изученными остаются вопросы о параметрах шнекового пресса и режимах формования – скорости вращения шнека, шаге витков шнека, соотношении площадей живого сечения напорной трубы и мундштука.

Представлены основы технологии производства кускового торфа методом щелевого фрезерования, существующие конструкции фрезформовочных машин и их основные элементы, которые осуществляют экскавацию торфа из залежи, его механическую переработку, формование методом экструзии и стилку на картофельные поля. В России и за рубежом известны различные фрезформовочные машины, которые отличаются видом экскавирующих устройств, типом сцепки с трактором и видом стилки, а также конструкцией формователя.

Отмечено, что существует реальная возможность обеспечения энергетической независимости населенных пунктов Крайнего Севера местным коммунально-бытовым и промышленным торфяным топливом.

Анализ технического уровня конструкций отечественных и зарубежных фрезформовочных машин показал, что с точки зрения мобильности, снижения габаритных размеров и веса наиболее рациональными являются навесные машины с дисковой наклонной фрезой, шнековым формователем и многопоточным мундштуком.

На основании технических характеристик существующих фрезформовочных машин построен параметрический ряд зависимости производительности машины от веса (рисунок 1).

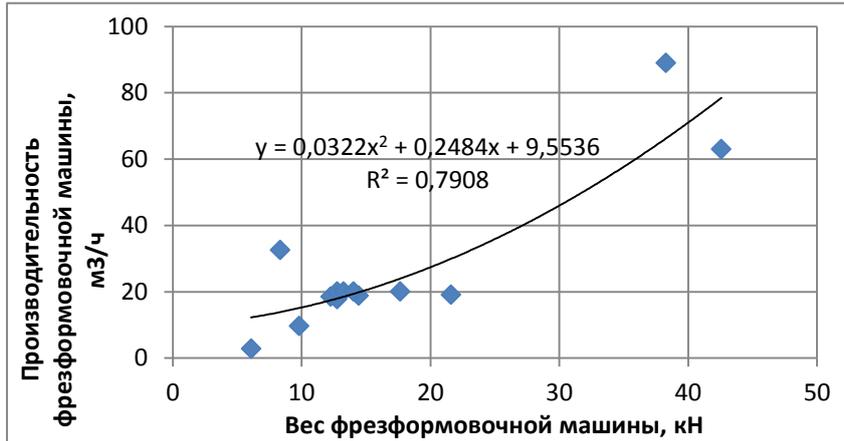


Рисунок 1–  
Зависимость  
производительности  
фрезеровочных  
машин от их веса

Наибольшая концентрация опытных точек наблюдается в зоне производительности 18–23 м³/ч при весе 12–14 кН, которые являются наиболее рациональными.

На основании выполненного анализа современного состояния теоретических и экспериментальных работ по добыче кускового торфа методом щелевого фрезерования сформулированы основные задачи исследования, приведенные в общей характеристике работы.

**Во второй главе** рассмотрен вопрос требований к исходному сырью при добыче кускового торфа фрезеровочными машинами, требований к готовой продукции, а также конструктивные особенности шнековых прессов и варианты рационального исполнения формующих мундштуков.

Сформованный торфяной кусок можно и нужно оценивать по двум параметрам: плотности, влияющей на теплотворную способность и прочности, обеспечивающей его сохраняемость при проведении всех последующих технологических операций и транспортирования.

Из природных факторов на прочность кускового торфа влияют степень разложения, содержание волокнистой части, составляющей каркас; из технологических – степень переработки, размер куска и др. Катионный состав различных видов торфа является следствием торфообразовательных процессов, которые, наряду со степенью разложения и дисперсностью, определяют структурообразование куска. Верховой торф средней и высокой степени разложения более пластичен, чем насыщенный катионами низинный. Систематизация многочисленных данных по вопросам требований к качеству исходного сырья позволяет сделать вывод о том, что наилучшим с точки зрения формуемости является именно верховой торф со степенью разложения  $R = 20–35 \%$  и содержанием влаги  $w = 82–84 \%$ .

Сформованный торфяной кусок должен обладать свойствами: сохранения целостности формы, заданной мундштуком при прочности на изгиб не менее 3,5–4,5 МПа, позволяющего проводить последующие технологические операции, отсутствия микродефектов и трещин после

формования и сушки, достижения куском плотности 750–1 100 кг/м<sup>3</sup>, обеспечивающей необходимую теплотворную способность.

В шнековых прессах одновременно сочетаются несколько функций: транспортирование материала, его резание-перетиравание-раздавливание, сжатие, гомогенизация и формование, которые осуществляются при продвижении торфа от загрузочной воронки к формующему мундштуку. В результате таких механических воздействий, переработанный торф принимает свойства – аморфность, пластичность, а после формования и сушки – высокие плотность и прочность. Расположение мундштуков на фрезформовочной машине возможно осевое и радиальное.

На основании работ В.И. Цветкова и В.К. Фомина, при скорости истечения торфомассы до 2 м/с, оптимальной является длина  $l$  мундштука:

$$l = 3 \div 4d, \quad (1)$$

где  $d$  – внутренний диаметр мундштука,

причем мундштук должен работать, по возможности, полной длиной.

Согласно формуле Ф.А. Опейко, напор, развиваемый шнеком:

$$\sigma = 4\pi \left(1 - \frac{2R}{3S}\right) \frac{L}{S} \tau, \quad (2)$$

где  $R$ ,  $L$  и  $S$  – наружный радиус, длина напорной части, шаг витков шнека;  $\tau$  – тангенциальное напряжение на внутренней поверхности кожуха.

Приравнивание нулю производной  $\frac{d\sigma}{dS}$  для условия обеспечения максимального напора дало возможность Ф.А. Опейко получить оптимальное соотношение радиуса  $R$  и шага  $S$  витков шнека:

$$S = \frac{4}{3}R, \quad (3)$$

т.е. шаг витков шнека должен находиться в пределах от  $\frac{1}{2}$  до  $\frac{2}{3}$  его наружного диаметра  $D_{ш}$ .

Тогда, исходя из (2) и (3) максимальный напор, развиваемый шнеком:

$$\sigma_{max} = \frac{3\pi\tau L}{D_{ш}}. \quad (4)$$

Для определения потерь напора в шнековых прессах стилочных машин С.Г. Солоповым впервые был применен гидродинамический метод расчета, показавший адекватность реальным условиям при расхождении с опытными данными в пределах точности инженерных расчетов.

Для фрезформовочных машин справедливы следующие рассуждения. Напор, создаваемый шнеком расходуется на потери по длине мундштука  $\sigma_l$ , отвечающие непосредственно за формование куска, местные потери  $\sum \sigma_m$  на местных сопротивлениях и потери, необходимые для придания скорости торфомассе при выходе ее из мундштука  $\sigma_v$ :

$$\sigma = \sigma_l + \sum \sigma_m + \sigma_v. \quad (5)$$

Потери напора, создаваемого по длине мундштука на основании формулы Дарси-Вейсбаха:

$$\sigma_l = \lambda \frac{l v^2 \rho}{d 2}, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент трения вязко-пластичной среды (торфомассы) о внутреннюю поверхность мундштука;  $v$  – средняя скорость движения торфомассы (может быть принята равной средней скорости выхода торфомассы из мундштука);  $\rho$  – плотность торфомассы.

Местные потери напора, с учетом формулы Вейсбаха:

$$\sigma_m = \zeta \frac{v^2 \rho}{2}, \quad (7)$$

где  $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления (зависит от вида местного сопротивления и средней скорости течения).

Напор, необходимый для придания торфомассе скорости при ее выходе из мундштука:

$$\sigma_v = \frac{v^2 \rho}{2}. \quad (8)$$

Аналитическая модель, устанавливающая характер изменения максимального напора, создаваемого формующим шнеком при осевом расположении мундштука:

$$\sigma = \frac{3\pi\tau L}{D_{ш}} = \frac{v^2 \rho}{2} \left( \lambda \frac{l}{d} + \zeta_1 + 1 \right), \quad (9)$$

где  $\zeta_1$  – коэффициент местного сопротивления при сужении сечения.

В случае радиального расположения мундштука местные потери напора складываются из потерь на поворот потока торфомассы на  $90^\circ$  и потерь на сужение сечения. Тогда аналитическая модель будет иметь вид:

$$\sigma = \frac{3\pi\tau L}{D_{ш}} = \frac{v^2 \rho}{2} \left( \lambda \frac{l}{d} + \zeta_1 + \zeta_2 + 1 \right), \quad (10)$$

где  $\zeta_2 = 1,1$  – коэффициент сопротивления при повороте сечения на  $90^\circ$ .

Тангенциальное напряжение на внутренней поверхности кожуха  $\tau$  и коэффициент трения вязко-пластичной среды (торфомассы) о внутреннюю поверхность мундштука  $\lambda$  для верхового торфа со степенью разложения  $R = 20\%$  и влагой  $w = 82,8\%$  изменяются от 8,5 до 10 кПа и от 0,03 до 0,09, соответственно, для различных степеней переработки.

Анализ моделей (9) и (10) наглядно показывает, что радиальное расположение мундштука вызывает большие потери напора, что ведет к увеличению энергоемкости без улучшения качества продукции.

По форме перехода от напорной трубы к мундштуку различают резкое сужение, конический переход (постепенное сужение), сферический и тороидальный (плавное сужение) переходы. Последние наиболее дороги.

Для случая резкого сужения коэффициент местного сопротивления:

$$\zeta_1 = \xi \left( 1 - \frac{S_2}{S_1} \right), \quad (11)$$

где  $S_2$  – площадь живого сечения мундштука,  $S_1$  – площадь живого сечения напорной трубы шнека;  $\xi$  – коэффициент смягчения сужения, для резкого сужения равен 0,5. В случае постепенного сужения величина коэффициента смягчения сужения зависит от центрального угла сужения  $\beta$ , причем минимальные потери напора наблюдаются при  $\beta = 40-60^\circ$  при

коэффициенте смягчения сужения  $\xi = 0,1$ . В случае плавного сужения величина  $\xi$  находится в зависимости от отношения  $r/d$  (где  $r$  – радиус скругления боковых стенок). Коэффициент смягчения сужения  $\xi$  достигает минимума ( $\xi = 0,03$ ) при  $r/d=0,2$  и далее остается постоянным.

Любые местные сопротивления кроме создания потерь напора по длине уменьшают рабочую длину мундштука, которая напрямую зависит от формы перехода от напорной части трубы к мундштуку (рисунок 2), что ведет к понижению качества (плотности) сформованного торфа.



Рисунок 2 – Траектория движения частиц (линии тока торфомассы) в зависимости от расположения мундштука: *a* – осевое расположение с резким сужением; *б* – осевое расположение с постепенным сужением; *в* – радиальное расположение мундштука с резким сужением

В зависимости от варианта расположения мундштука (осевого или радиального, резкого или плавного сужения) меняется физика процесса истечения торфомассы. Как видно из рисунка 2, мундштук работает большей длиной при плавном переходе от напорной трубы (рисунок 2 б). В случае резкого сужения (рисунок 2 а) в начальном участке мундштука формируются зоны с пониженной плотностью и давлением торфомассы а в торцевых внутренних углах напорной трубы создаются зоны завихрения и налипания. Максимальные потери рабочей длины мундштука наблюдаются в случае радиального расположения мундштука.

Таким образом, наиболее рациональным с точки зрения простоты исполнения, обеспечения качества формования и минимума энергозатрат является осевое расположение мундштука с коническим переходом от напорной трубы к мундштуку с центральным углом сужения  $\beta = 40-60^\circ$ .

**Третья глава** посвящена вопросам экспериментального обоснования рациональных параметров и режимов работы шнекового пресса фрезформовочной машины для формования кускового торфа.

Лабораторный эксперимент по формованию проводился на комплексном верховом торфе степенью разложения  $R = 25-30\%$  при среднем содержании влаги  $w = 83,44\%$ . Содержание влаги определялось

по стандартной методике путем высушивания навески торфа с помощью анализатора влажности ЭЛВИЗ 2С.

Опытные образцы торфяного сырья были предварительно измельчены (что свойственно фрезформовочной машине) дополнительным диспергированием с отсевом древесных включений. Формование проводилось на лабораторной установке (рисунки 3, 4), позволяющей ступенчато изменять частоту вращения шнека от 55,81 до 429,86 об/мин.



Рисунок 3 –Лабораторный шнековый пресс Рисунок 4 – Формование торфа

Пресс комплектовался тремя мундштуками внутренним диаметром 52, 60 и 92 мм и двумя шнеками с шагом витков  $S = 50$  и 110 мм (рисунок 5).



Рисунок 5 – Сменные мундштуки и шнеки для пресса

В процессе экспериментов проводилось исследование работы шнекового пресса в холостом и нагруженном состоянии на 5-ти режимах, соответствующих 5-ти различным скоростям в коробке передач. Вычисление мощности, необходимой для привода пресса на холостом ходу и под нагрузкой ( $N_{xx}$  и  $N$ , Вт, соответственно) определялось так:

$$N_{xx} = 3UI_{xx} \cos\varphi, \quad (12)$$

$$N = 3UI \cos\varphi, \quad (13)$$

где  $U$  – напряжение в одной из фаз электродвигателя, В;  $I$  – сила тока в одной из фаз электродвигателя, А;  $\cos\varphi$  – коэффициент мощности

асинхронного двигателя (для установленного на шнековом прессе двигателя  $\cos\varphi = 0,88$ ).

Измерение силы тока и напряжения производилось по блоку контрольных приборов, включающему цифровой амперметр и вольтметр.

Полезная мощность  $N_{\text{п}}$ , Вт, определялась, как разница полной мощности и мощности холостого хода:

$$N_{\text{п}} = N - N_{\text{хх}}. \quad (14)$$

Скорость выхода формованного торфа из мундштука  $v$ , м/с, оценивалась по прикрепленному к мундштуку шаблону длиной  $L = 0,15$  м и секундомеру (рисунок 4).

Производительность пресса  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, рассчитывалась по формуле:

$$Q = v \frac{\pi d^2}{4}. \quad (15)$$

Энергоемкость процесса диспергирования и формования  $A$ , Дж/м<sup>3</sup>, определялась по зависимости:

$$A = \frac{N_{\text{п}}}{Q}. \quad (16)$$

После проведенных расчетов и их анализа с отсевом промахов были получены графические зависимости средней по 5-ти опытам энергоемкости от частоты вращения шнека при различных установленных мундштуках диаметром  $d$  и шнеках с шагом витком  $S$  (рисунки 6, 7).

Как видно из рисунков 6 и 7, энергоемкость формования зависит от частоты вращения и шага витков шнека, соотношения диаметров напорной трубы и мундштука. В исследовании энергоемкость изменялась от 0,88 до 3,42 МДж/м<sup>3</sup>. Минимальное ее значение во всех экспериментах приходится на диапазон скорости вращения шнека 220–320 об/мин.

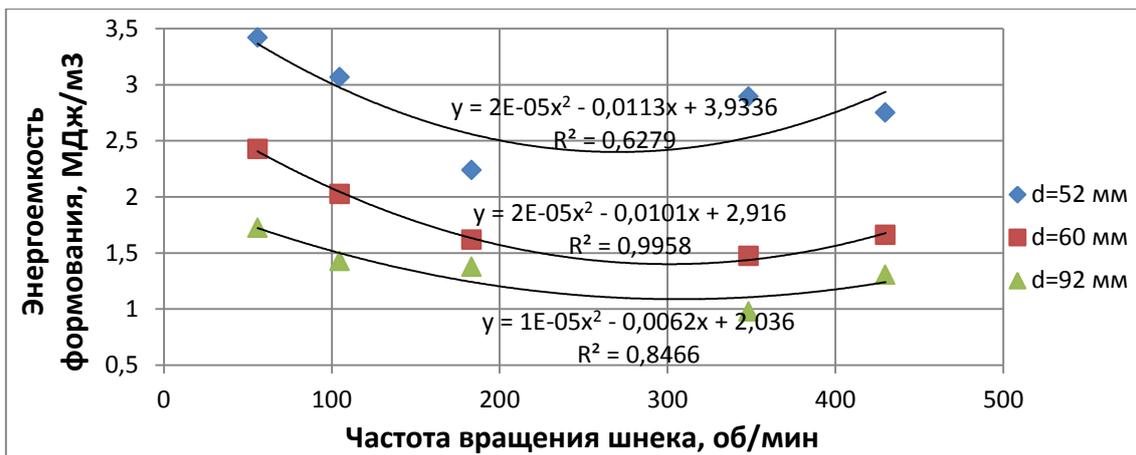


Рисунок 6 – Зависимость энергоемкости формования от частоты вращения шнека с шагом витков  $S = 110$  мм и диаметра мундштука  $d$

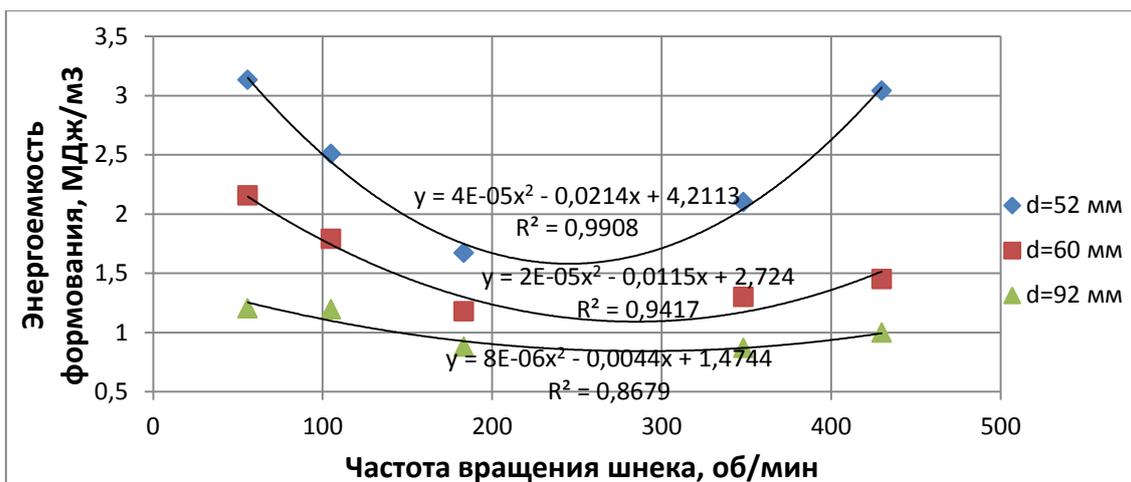


Рисунок 7 – Зависимость энергоёмкости формования от частоты вращения шнека с шагом витков  $S = 50$  мм и диаметра мундштука  $d$

Интенсивность роста производительности выше, чем интенсивность роста мощности, необходимой для производства куска до определенной частоты вращения шнека. Выше этой частоты начинается неустановившееся движение материала (частицы материала прекращают двигаться только в осевом направлении и все больше начинают вращаться вместе со шнеком). Это приводит к изменению интенсивностей роста производительности и мощности, в результате чего повышается энергоёмкость процесса.

Для оценки сходства или различия статистических показателей зависимостей, представленных на рисунках 6, 7, и подверженных влиянию случайных факторов, обусловленных различными значениями шага витков шнека, применялся метод проверки статистических гипотез. Сравнению были подвергнуты выборки значений энергоёмкости, полученные при формовании с мундштуками внутренним диаметром 52, 60 и 92 мм шнеками с шагом витков 110 и 50 мм. Во всех случаях табличные значения статистики оказались выше рассчитанных, поэтому можно считать, что на энергоёмкость формования кускового торфа различными шнеками с шагом витков 110 и 50 мм влияют одни и те же факторы.

После формования куски торфа были подвергнуты сушке в мягком режиме на протяжении 25 суток до достижения среднего равновесного содержания влаги  $w = 23,12$  %, измеряемой прибором ЭЛВИЗ 2С для последующей оценки плотности и прочности, т.к. известно, что максимальная прочность кускового торфа наблюдается при влаге 20–30 %. Оценка плотности производилась объёмным методом с использованием цифрового штангенциркуля ШЦЦ 1-150-0,01 с точностью 0,01 мм и весов «Асом JW-1» с точностью 0,1 г.

Оценка плотности кусков при среднем содержании влаги  $w = 23,12$  %, показала, что в зависимости от числа оборотов шнека при формовании, плотность меняется по логарифмическому закону (рисунки 8, 9).

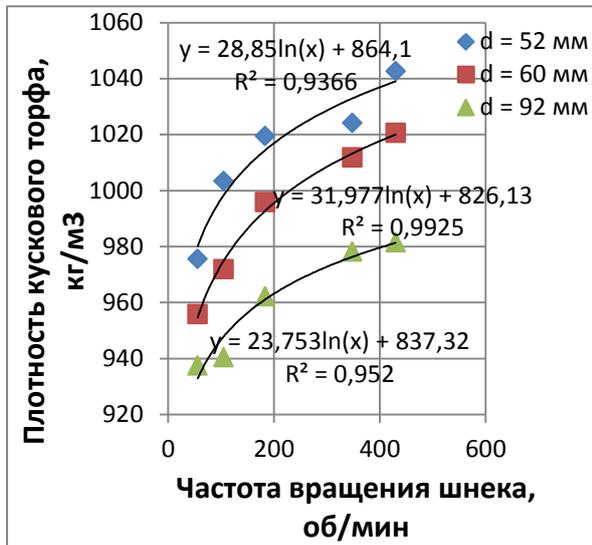


Рисунок 8 – Зависимость плотности кускового торфа от частоты вращения шнека с шагом витков  $S = 110$  мм

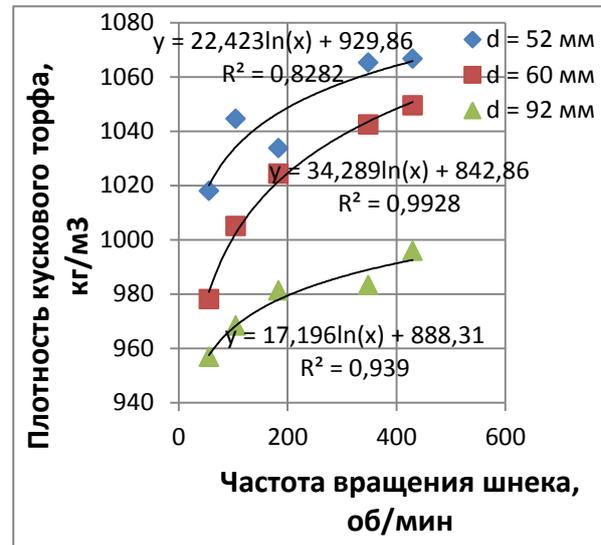


Рисунок 9 – Зависимость плотности кускового торфа от частоты вращения шнека с шагом витков  $S = 50$  мм

Среди прочих способов управления энергоемкостью и плотностью в производственном процессе, проще изменять количество и размеры мундштуков. Учитывая факт, что напор создается шнеком еще в напорной части трубы и продолжается в мундштуке, испытывая противодействие, для описания степени уплотнения торфа в иных условиях и использования метода геометрического подобия, нами предлагается ввести понятие «коэффициент напора»  $k_n$ , который представляет собой отношение площадей живых сечений напорной трубы и мундштука:

$$k_n = \frac{D^2 - d_{\text{вн}}^2}{md^2}, \quad (17)$$

где  $D$  – внутренний диаметр напорной трубы;  $d_{\text{вн}}$  – наружный диаметр трубы, являющейся основой для спирали шнека;  $m$  – количество мундштуков;  $d$  – внутренний диаметр установленного мундштука.

В исследовании применялся шнековый пресс с параметрами  $D = 102$  мм,  $d_{\text{вн}} = 49$  мм. В этом случае коэффициенты напора  $k_n$  составили для мундштуков диаметром 52, 60 и 92 мм, соответственно 2,96, 2,22 и 0,95.

Поскольку минимальная энергоемкость формования наблюдается при скорости вращения шнека 220–320 об/мин, для скорости 270 об/мин построен график зависимости конечной плотности кускового торфа от энергоемкости формования (рисунок 10).

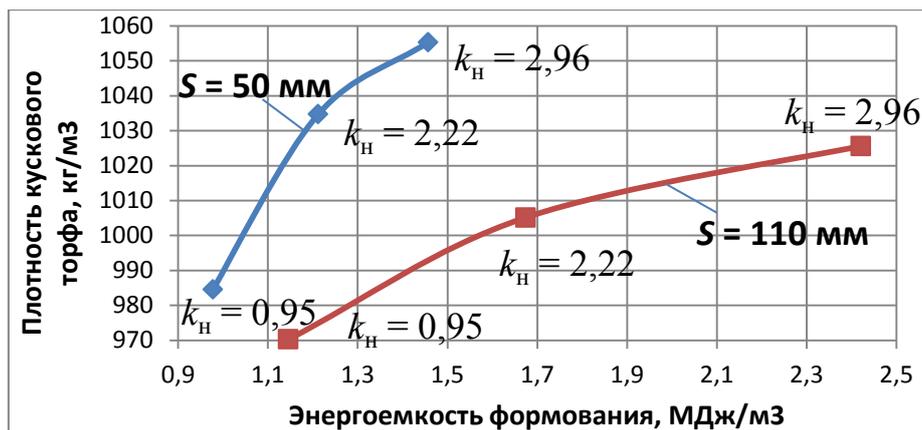


Рисунок 10 – Зависимость плотности кускового торфа от энергоёмкости формования при частоте вращения шнека  $n = 270$  об/мин

Как следует из полученной зависимости, интенсивность роста плотности куска при увеличении энергоёмкости заметно падает при изменении  $k_n$  с 2,22 до 2,96. Поэтому формование при коэффициенте напора  $k_n = 2,22$  можно считать рациональным режимом.

Бóльшая плотность сформованных кусков соответствует бóльшей частоте вращения и меньшему шагу витков шнека (рисунки 8, 9). Очевидно, что меньшая энергоёмкость и бóльшая плотность кусков, достигаемая при использовании шнека с шагом витков 50 мм способствует работе машины в более рациональном режиме.

Поскольку большинство операций по производству кускового торфа после его формования связано с изгибными деформациями, испытания на изгиб являются более информативными. Существующий метод



Рисунок 11 – Испытание на изгибную прочность образцов кускового торфа круглого сечения

определения изгибной прочности предполагает использование громосткого гидравлического пресса; результаты обладают низкой точностью из-за невозможности исключения динамических нагрузок и инерционности. С целью минимизации влияния перечисленных факторов и обеспечения возможности быстрого контроля качества продукции, разработана и создана конструкция механического стенда с ручным механическим приводом (рисунок 11).

В ходе стандартной статистической обработки данных получены логарифмические кривые (рисунки 12, 13), вид которых весьма

близок к зависимостям, полученным для плотности. Поскольку минимальная энергоёмкость формования наблюдается при скорости вращения шнека 220–320 об/мин, для скорости 270 об/мин, как и в случае с плотностью, построен график зависимости прочности кускового торфа от энергоёмкости формования для трех коэффициентов напора, реализованных в исследовании (рисунок 14).

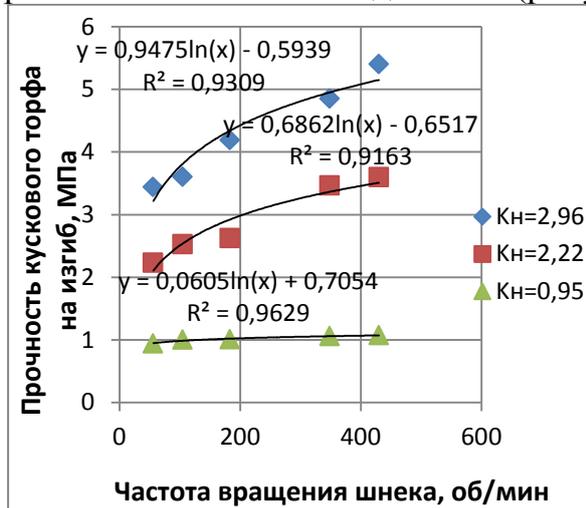


Рисунок 12 – Зависимость прочности кускового торфа от частоты вращения шнека при формовании прессом с шагом витков  $S = 110$  мм для коэффициентов напора  $k_n$

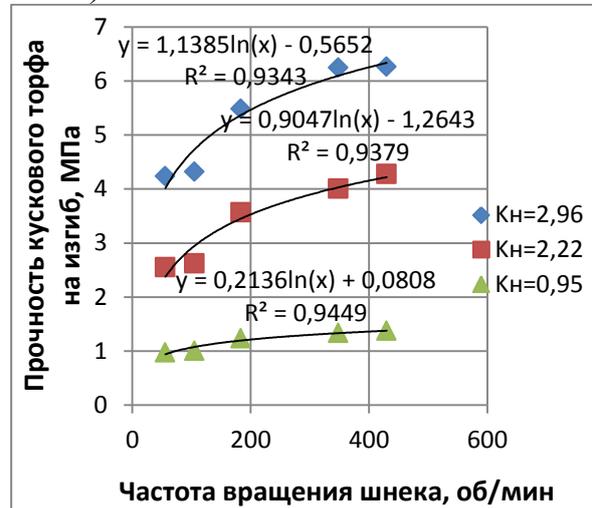


Рисунок 13 – Зависимость прочности кускового торфа от частоты вращения шнека при формовании прессом с шагом витков  $S = 50$  мм для коэффициентов напора  $k_n$

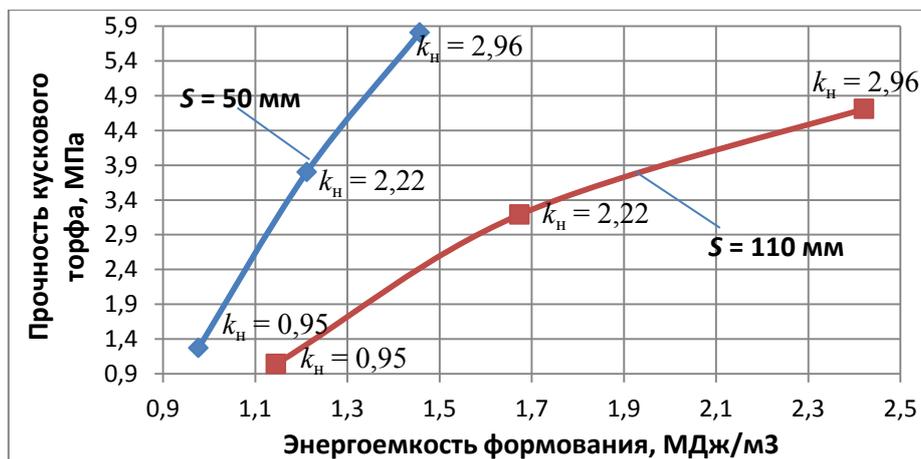


Рисунок 14 – Зависимость прочности на изгиб кускового торфа от энергоёмкости формования при частоте вращения шнека  $n = 270$  об/мин для различных коэффициентов напора  $k_n$

Как следует из полученной зависимости (рисунок 14), интенсивность роста прочности куска при увеличении энергоёмкости падает при изменении  $k_n$  от 2,22 до 2,96.

Анализ результатов по определению как плотности, так и прочности кускового торфа позволяет сделать вывод, что наиболее рациональным режимом формования является частота вращения шнека  $n = 220\text{--}320$  об/мин при коэффициенте напора  $k_n = 2,22$  и шаге витков шнека  $S = 0,5D_{ш}$ .

Схожесть форм кривых, полученных по плотности и прочности дает возможность предположить их тесную, линейную связь. Для проверки этого предположения был произведен корреляционный анализ с расчетом коэффициентов корреляции, которые в двух случаях, говорят о сильной связи ( $|r| > 0,7$ ) и в четырех случаях из шести – о практически функциональной связи ( $|r| > 0,9$ ) между плотностью и прочностью на изгиб кускового торфа. Таким образом, зависимости прочности от плотности кускового торфа можно аппроксимировать прямыми линиями (рисунки 15, 16).

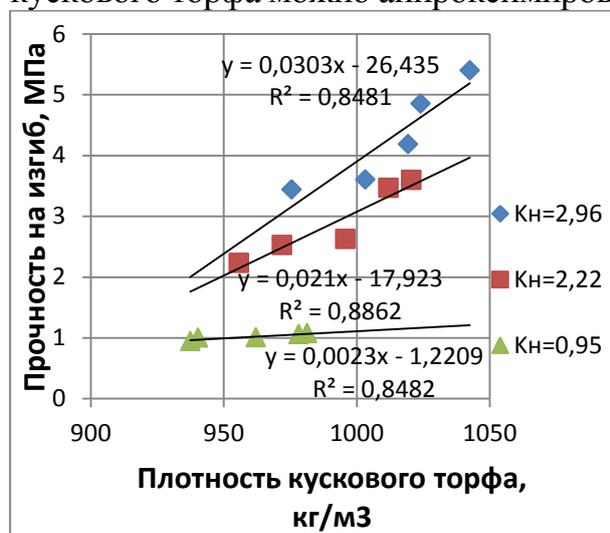


Рисунок 15 – Зависимость прочности на изгиб от плотности кускового торфа при коэффициентах напора и шаге витков шнека  $S = 110$  мм

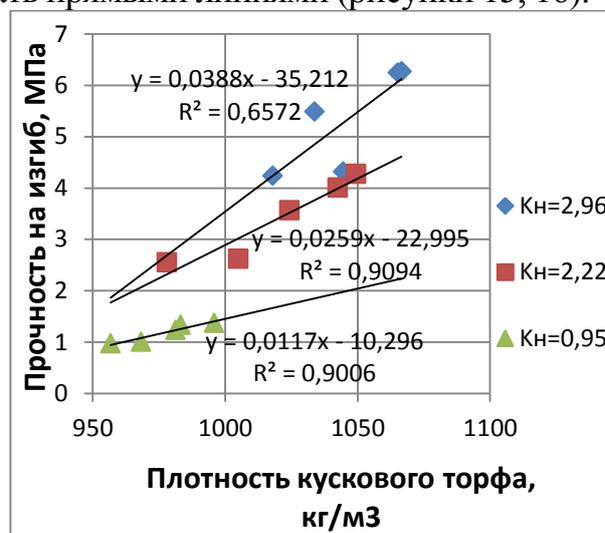


Рисунок 16 – Зависимость прочности на изгиб от плотности кускового торфа при коэффициентах напора и шаге витков шнека  $S = 50$  мм

Для сохранения формы куска в полевых условиях главной механической характеристикой является прочность на изгиб. При сжигании торфа в топках стоит задача обеспечения необходимой теплотворной способности, которая достигается, прежде всего, плотностью. Таким образом, зная один из параметров и воспользовавшись вышеприведенными математическими моделями, можно с высокой вероятностью на уровне достоверности 95 % определить другой параметр.

Поскольку наиболее рациональными из всех исследованных являются режимы, в которых применялся шнек с шагом витков, равным половине диаметра, а перечень технико-механических факторов, влияющих на энергоемкость формования, ограничивается коэффициентом напора и числом оборотов шнека, следует найти функцию отклика, являющуюся зависимостью энергоемкости  $A$  от двух факторов:

коэффициента напора и числа оборотов шнека. Данная задача решена с помощью метода планирования с составлением оптимального двухуровневого плана или полного двухфакторного эксперимента (ПФЭ) для двух областей экспериментальной зависимости. Первая область зависимости энергоемкости  $A_1$  [МДж/м<sup>3</sup>] от коэффициента напора и частоты вращения шнека имеет зону значений исследуемого параметра, ограниченную минимальной и средней частотой вращения шнека  $n_1$ :  $k_H = [k_H^{min}; k_H^{max}] = [0,95; 2,96]$ ;  $n_1 = [n_1^{min}; n_1^{max}] = [55,81; 183,28]$  об/мин. Для данной зоны получено уравнение регрессии:

$$A_1 = 0,19577 + 1,20827k_H + 0,00168n_1 - 0,00444k_H n_1. \quad (18)$$

Вторая область имеет зону значений исследуемого параметра, ограниченную средней и максимальной частотой вращения шнека  $n_2$ :  $k_H = [k_H^{min}; k_H^{max}] = [0,95; 2,96]$ ;  $n_2 = [n_2^{min}; n_2^{max}] = [183,28; 429,86]$  об/мин. Для данной зоны получено уравнение регрессии:

$$A_2 = 0,85453 - 0,06746k_H - 0,00191n_2 + 0,00252k_H n_2. \quad (19)$$

Данные по энергоемкости для эксперимента с трехкратной повторяемостью ( $A_j^{(1-3)}$ ) взяты из журнала проведения эксперимента. Среднее значение энергоемкости по эксперименту с трехкратной повторяемостью ( $\bar{A}_j$ ) так же взято из журнала проведения эксперимента.

Таким образом, для двух областей зависимости энергоемкости формования от коэффициента напора и частоты вращения формующего шнека методом планирования эксперимента составлены математические модели. Все рассчитанные коэффициенты регрессии являются значимыми на уровне достоверности  $P = 95 \%$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе, выполненной автором, представлено новое решение научной задачи, состоящей в установлении закономерностей изменения энергоемкости формования при производстве кускового торфа и разработке математических моделей, описывающих зависимость энергоемкости формования от коэффициента напора и частоты вращения шнека, позволяющее обосновывать рациональные параметры и режимы работы фрезформовочной машины, которое имеет важное значение для развития торфодобывающей отрасли РФ.

### Результаты и выводы, полученные лично автором:

1. Обобщение научных работ по теме позволило выявить наилучшие характеристики торфяного сырья для добычи кускового торфа: тип торфа – верховой, степень разложения  $R = 20-35 \%$ , содержание влаги  $w = 82-84 \%$ .
2. Получена аналитическая зависимость, устанавливающая характер изменения напора, создаваемого шнеком формующего агрегата от конструктивных особенностей мундштуков, и сделан вывод о

рациональности осевого расположения многопоточного мундштука фрезформовочных машин.

3. Экспериментально установлены закономерности изменения энергоемкости формования торфа в зависимости от: коэффициента напора, скорости вращения и шага витков шнека на стадии производства кускового торфа.

4. Разработано устройство и методика для определения прочности на изгиб формованной торфяной продукции, позволяющие контролировать качество куска и оперативно изменять количество и размеры мундштуков фрезформовочной машины в целях снижения энергоемкости.

5. На основании экспериментального анализа качества кускового торфа кондиционной влаги по параметрам плотности и прочности на изгиб сформулированы рациональные параметры шнекового пресса и режимы его работы: частота вращения шнека  $n = 220\text{--}320$  об/мин при коэффициенте напора  $k_n = 2,22$  и шаге витков шнека равном половине наружного диаметра витков.

6. Разработаны математические модели, описывающие зависимость энергоемкости формования от коэффициента напора и частоты вращения шнека. Все полученные коэффициенты уравнений регрессии являются значимыми на уровне достоверности  $P = 95\%$ .

7. Доказано методом корреляционного анализа, что зависимость прочности на изгиб от плотности кускового торфа можно аппроксимировать линейными математическими моделями.

#### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.**

Материалы данного исследования рекомендуются к применению в компаниях, заинтересованных в разработке и производстве фрезформовочных машин, а также на торфодобывающих предприятиях, осуществляющих добычу кускового торфа. В дальнейшем рекомендуется исследовать влияние формы сечения мундштука на энергоемкость производства кускового торфа.

**Основные научные результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях:**

#### **Научные статьи, опубликованные в изданиях, входящих в базу Scopus**

1. Яблонев, А.Л. Экспериментальное обоснование рациональных режимов производства кускового торфа / А.Л. Яблонев, А.М. Гусева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал). – 2019. – № 2. – С. 163–171. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-163-171.

2. Yablonev, A.L. Justification of Screw Press Rational Parameters and its Working Modes during Sod Peat Extraction by Milling-forming Method / A.L. Yablonev, A.M. Guseva // E3S Web of Conferences. Electronic Edition. 2019. Vol. 105. p. 01033. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910501033>

**Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных  
ВАК Минобрнауки России**

3. Яблонев, А.Л. О корреляционной связи плотности и прочности на изгиб кускового торфа, получаемого в процессе формирования шнековым прессом / А.Л. Яблонев, **А.М. Гусева**// Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – № 1. – С. 62–65.
4. Яблонев, А.Л. Методика и оборудование для испытания на прочность кускового торфа / А.Л. Яблонев, **А.М. Гусева**// Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – № 6. – С. 26–33. DOI: 10.26730/1816-4528-2018-6-26-33.
5. Зюзин Б.Ф. Современные направления модернизации комплексов оборудования в связи с эволюцией способов добычи торфа / Б.Ф. Зюзин, Т.Б. Яконовская, А.И. Жигульская, **А.М. Гусева** и др.// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал). – 2015. № 6. – С. 67–73.

**Патент**

6. Устройство для создания и измерения разрушающей нагрузки: пат. 2696070 Рос. Федерация: G01L 5/00 (2006.01), G01N 3/20 (2006.01) / Яблонев А.Л., **Гусева А.М.**, Жуков Н.М.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тверской государственный технический университет"– № [2018143458](#); заявл. 07.12.2018; опубл. 30.07.2019, Бюл. № 22. – 7 с.

**Публикации в прочих научных журналах и сборниках**

7. Яблонев, А.Л. Обоснование параметров шнекового пресса для добычи кускового торфа / А.Л. Яблонев, **А.М. Гусева** // В сб. «Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности». Мат-лы XVII Междун. научно-техн. конф. «Чтения памяти В.Р. Кубачека». Под общ. ред. Ю.А. Лагуновой. Екатеринбург: УГГУ. – 2019. – С. 172–175.
8. Яблонев, А. Л. Добыча и использование кускового торфяного топлива для арктических условий / А.Л. Яблонев, **А.М. Гусева**, Н.М. Жуков // Труды Инсторфа. – 2018. – № 17(70). – С. 46–49.
9. **Гусева, А.М.** Перспективы добычи кускового торфа в условиях Крайнего Севера / А.М. Гусева, Ш.Г. Муталибов // В сб.: «Проблемы и перспективы устойчивого развития торфяного дела в России». Мат-лы Междун. научно-практ. конф. Тверь: ТвГТУ. – 2018. – С. 44–48.
10. Заливина, Е.А. Перспективы использования биотоплива / Е.А. Заливина, **А.М. Гусева**, А.С. Амбарцумян // В сб.: «Опыт прошлого – взгляд в будущее». Мат-лы VII Междун. научно-практ. конф. мол. ученых и студ. под общ. ред. Р.А.Ковалева. Тула: ТулГУ. – 2017. – С. 353–357.
11. Зюзин, Б.Ф. Экологический потенциал торфяной промышленности/ Б.Ф. Зюзин, А.И. Жигульская, **А.М. Гусева** [и др.] // В сб.: «Актуальные

проблемы безопасности жизнедеятельности и экологии». Мат-лы II Междун. научно-практ. конф. Тверь: ТвГТУ. – 2016. – С. 154–155.

**Личный вклад автора** состоит в исследовании и систематизации данных с проработкой вопросов, касающихся производства кускового торфа, проведении лабораторного эксперимента, обработке и анализе экспериментальных данных, выведении аналитических зависимостей напора, создаваемого шнеком от его геометрических параметров.