

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

А.М. Гусева, А.Л. Яблонев

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

Монография

Тверь 2023

УДК 622.331.002.5
ББК 33.35

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Горное оборудование, транспорт и машиностроение» ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» Кузиев Д.А.; доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Механизация природообустройства и ремонт машин» ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» Фомин К.В.

Гусева А.М., Яблонев А.Л. Обоснование рациональных параметров и режимов работы шнекового пресса фрезформовочной машины для добычи кускового торфа: монография. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2023. 160 с.

Изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на поиск и обоснование рациональных параметров шнекового пресса фрезформовочных машин, которые используются для производства кускового торфа. Представлен ретроспективный анализ развития конструкций фрезформовочных машин. Предложен гидродинамический метод оценки напора, развиваемого шнеком в процессе формования торфа. Рассмотрены случаи формования шнеками с различным шагом витков на изменяющихся частотах вращения при установке мундштуков с переменным диаметром. Определены зоны наименьшей энергоемкости процесса, соответствующие получению продукции с заданными свойствами без потери качества. Введено новое понятие – коэффициент напора. Показано влияние частоты вращения шнека и коэффициента напора на качественные характеристики кускового торфа.

Предназначено для магистрантов, аспирантов и инженерно-технических работников специальности 2.8.8 Геотехнология, горные машины.

ISBN 978-5-7995-1270-5

© Тверской государственный
технический университет, 2023
© Гусева А.М., Яблонев А.Л., 2023

ВВЕДЕНИЕ

Запасы торфа в России превышают энергетический потенциал всех отечественных запасов нефти и газа и составляют более 175,6 млрд т в 60 субъектах Российской Федерации. Это 47 % от мировых запасов торфа [1]. В настоящее время на планете разрабатывается 0,05 % от общей площади торфяных месторождений. Из них 51 % месторождений используется для производства тепла и электроэнергии, остальные – для нужд сельского хозяйства [2]. Большая часть торфа добывается в Финляндии, Ирландии, Канаде и Беларуси. Добыча торфа в этих странах необходима для обеспечения автономности, поддержания микроклимата, а также для организации рабочих мест в отдаленных районах. Поскольку за рубежом активно применяются небольшие энергетические станции на торфяном топливе мощностью от 2 до 10 МВт, существует тенденция роста добычи и потребления торфа. В России в этом вопросе наблюдается некоторая стагнация [3], хотя наша страна занимает лидирующее место в мире по запасам торфа. Являясь возобновляемым источником энергии, торф имеет постоянный прирост, превышающий сегодняшнюю среднегодовую добычу. Это открывает колоссальные перспективы для развития данного направления. Активное использование углеводородного топлива, к сожалению, не способствует решению вопроса энергетической автономности и безопасности негазифицированных районов. Здесь на первый план выходят привозные уголь и жидкое углеводородное топливо (мазут), которые, с одной стороны, являются дорогими, а с другой – требуют определенных условий для соблюдения необходимой экологической логистики и утилизации тары. Эти виды топлива не могут удовлетворить имеющиеся потребности населения, если говорить об использовании топлива в быту, в частности при простом приготовлении пищи. Таким образом, люди, особенно в труднодоступных районах, вынуждены экономить привозное топливо.

Для обеспечения энергетической безопасности, диверсификации источников энергии и улучшения экологии разработкой и использованием торфа активно занимается Республика Беларусь [3].

Проведенные в странах Скандинавии исследования показали, что с точки зрения экологии торф предпочтительнее угля, а по сравнению с природным газом он, выделяя меньше углекислого газа при сжигании, образует золу, которая может успешно применяться в качестве удобрения в растениеводстве. Таким способом может быть решена задача утилизации продуктов горения [3].

Торф становится нерентабельным топливом в случае организации его доставки на дальние расстояния, поскольку себестоимость перевозки может существенно превышать себестоимость добычи. Это говорит о

перспективах его использования именно в качестве местного источника энергии.

Еще одним важным аспектом возрождения и развития торфодобычи в России является занятость. Наличие торфоразработок обеспечит местное население рабочими местами и будет способствовать развитию социально-культурного сектора.

Комплексное использование торфяных ресурсов в энергетике и сельском хозяйстве позволит повысить плодородие истощенных почв на основе торфонавозных компостов. С одной стороны, это будет работать как утилизация отходов, а с другой – повысит качество сельхозугодий [4].

По оценкам специалистов [5], в ближайшее десятилетие торфодобывающие предприятия станут частью интегрированных холдингов, ориентированных на получение конечного продукта: тепла, энергии, композиционных и других материалов. Увеличится доля небольших компаний в торфодобыче, произойдет включение торфа в структуру альтернативной биоэнергетики, а также будет расти доля торфяной продукции, ориентированной на небольшие группы потребителей.

Использование торфа в энергетике негазифицированных зон обеспечит повышение энергетической безопасности и независимости районов, рациональное природопользование и охрану окружающей среды за счет разумной добычи местного топлива, а также поможет в решении вопроса экономической замены дальнепривозных мазута и углей, а также сверхлимитного газа.

Кусковой торф – безопасное топливо для перевозки любым видом транспорта. Оно имеет теплотворную способность 3 200 ккал/кг при содержании влаги в объеме 33 %. Наибольшее распространение как в России, так и за рубежом получил фрезформовочный метод добычи кускового торфа.

На основании вышеизложенного, а также при учете того, что в настоящее время в России ведутся работы над проектированием различных модификаций фрезформовочных машин, данное исследование представляется актуальным. Оно направлено на изыскание путей снижения энергоемкости процессов диспергирования и формования торфа без потери куском прочностной характеристики как на стадии проектирования машин, так и в процессе их работы в полевых условиях.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Основы технологии производства кускового торфа методом щелевого фрезерования

Добыча кускового торфа осуществляется двумя методами: фрезформовочным и методом стилки (экскаваторным). Фрезформовочный метод основан на применении навесной, прицепной или полунавесной машин, которые осуществляют щелевое фрезерование торфяной залежи на глубину до 550 мм, формование торфомассы шнековым прессом и выстилку куска на картовое поле через многопоточный мундштук в виде цилиндров или волнистого расстила (рис. 1.1). Благодаря частичному разрыву контакта с поверхностью карты, нарушающему капиллярную связь с залежью, сформованный торф лучше и интенсивнее сохнет. 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. Производительность фрезформовочных машин достигает 40 м³/ч [6].



Рис. 1.1. Фрезформовочные машины

Добыча кускового торфа фрезформовочными машинами наиболее рациональна и востребована на верховых торфяных залежах со степенью разложения более 15 % и пнистостью менее 1,5 %. Необходимо отметить, что добыча происходит как на новых полях, так и на полях, где ранее добывался фрезерный торф под различные нужды. Перед началом эксплуатации поля должны быть качественно прокорчеваны. Пни и щепу нужно удалить, так как при их попадании в шнековый пресс снижается производительность машины и существенно ухудшается качество готового продукта. В связи с этим для технологии подготовки полей под

производство кускового торфа нежелательно глубокое интенсивное фрезерование торфяной залежи вместе с древесными включениями машинами типа МПГ (МТП-42, МТП-44 и др.). Такая операция лишь «усредняет» качественную характеристику торфяной залежи. Пни не удаляются, а измельчаются и перемешиваются с торфом, после чего все древесные включения и щепки становятся трудноизвлекаемыми. По результатам многочисленных исследований, оптимальная эксплуатационная влажность залежи составляет 82–84 % [6].

Метод стилки (экскаваторный метод) реализуется путем использования стилочной машины, в которую сырой торф загружается экскаватором. В кузове такой машины может устанавливаться смеситель для дополнительного перемешивания и диспергирования торфа. Формование куска происходит, как и в фрезформовочном методе, шнековым прессом через многопоточный мундштук. Существенное отличие этого метода от фрезформовочного заключается в том, что выстилка готовых кусков может происходить не только в месте загрузки шнекового пресса, но и на сухих картах, куда торф доставляется в кузове стилочной машины, что способствует интенсификации сушки.

Выстилка на поверхность карты кусковой торф, произведенный обоими методами, подвергается естественной сушке и ворожке, которую производят особенно тщательно и бережно, чтобы не повредить еще не окрепший кусок при достижении им влажности 70–75 %. Когда влажность достигает 60–65 %, кусок собирают в валки, где процесс сушки продолжается, а при достижении им влажности 50–55 % производят переукладку валков на новое место. Впоследствии кусковой торф убирают погрузчиком непрерывного типа, вывозят и складывают в штабели [6]. Вместе с тем применяют и несколько иную технологию, когда выстилка на поверхность поля торф подвергают ворожке дважды, а убирают специальной машиной без формирования валков (прямо из расстила).

Конструктивно фрезформовочные машины состоят из устройства для экскавации торфомассы из залежи, пресс-формователя шнекового типа и одно- или многопоточных мундштуков. Эти машины выполняют следующие операции технологического цикла: экскавацию торфа из залежи, его механическую переработку, формование методом экструзии и стилку на картовые поля. В России и за рубежом известны различные фрезформовочные машины, которые отличаются друг от друга конструкцией экскавирующего устройства, вариантом сцепки с тягачом (трактором) и типом стилки сформованной торфомассы.

Экскавирующие устройства могут быть выполнены в виде цепного бара, винтовой или дисковой фрезы с ножами.

По компоновочному решению фрезформовочные машины могут быть прицепными, полунавесными и навесными.

Тип стилки, осуществляемой фрезформовочными машинами, предполагает стилку кусков внаброс, волнистыми или прямыми лентами. В случае стилки волнистыми линиями скорость выхода кускового торфа противоположна скорости движения машины и больше по величине в 1,5–2 раза. Установка мундштука осуществляется под углом у самой поверхности стилки, в результате чего лента изгибается аркой, а концами опирается на залежь. Такой вариант стилки позволяет интенсифицировать процесс сушки, но предъявляет жесткие требования к режимам формования по скорости и влаге [6]. В случае стилки прямыми лентами скорости движения машины и выхода торфомассы равны по модулю, но противоположны по направлению. Допустимо несовпадение скоростей по величине, но не более чем на 10 % [7–9]. Чем меньше разница величин, тем качественней происходит укладка кускового торфа лентами и тем меньше дефектов в образованной структуре куска. В случае стилки внаброс мундштук устанавливается над поверхностью стилки на высоту, составляющую 1,5–2 средней длины куска. Скорость выхода сформованного торфа превышает скорость движения машины в 2 раза. Такой расстил хорошо сохнет, не препятствует прохождению через себя осадков и имеет незначительную площадь контакта с подстилающей поверхностью. Однако при этом из-за изгиба и удара о подстилающую поверхность при падении (в связи с достаточно большой высотой установки мундштуков) может происходить зарождение трещин и даже отламывание отдельных кусков сформованной торфомассы. В результате этого в готовой продукции содержится много мелочи.

При использовании в качестве экскавирующего органа дисковых фрез осуществляется добыча торфа методом щелевого фрезерования, после чего торфомасса подается в перерабатывающий механизм фрезформовочной машины [7, 10, 11].

Дисковая фреза (рис. 1.2) выполнена в виде стального диска, по наружной обечайке которого установлены держатели с ножами. В случае поломки или износа ножи легко заменяются, так как являются легкоъемными. По конструкции ножи могут быть различными, но наиболее часто применяются прямоугольные и тарельчатые. Имея двустороннюю заточку, прямоугольные ножи при износе переворачиваются на 180° . У тарельчатых ножей режущая кромка круглая, что приводит к износу по дуге 120° . Это позволяет в процессе эксплуатации поворачивать нож трижды. Кожух фрезы выполняет функцию отбойного устройства, нижним концом соприкасаясь с поверхностью залежи [7, 9, 10].

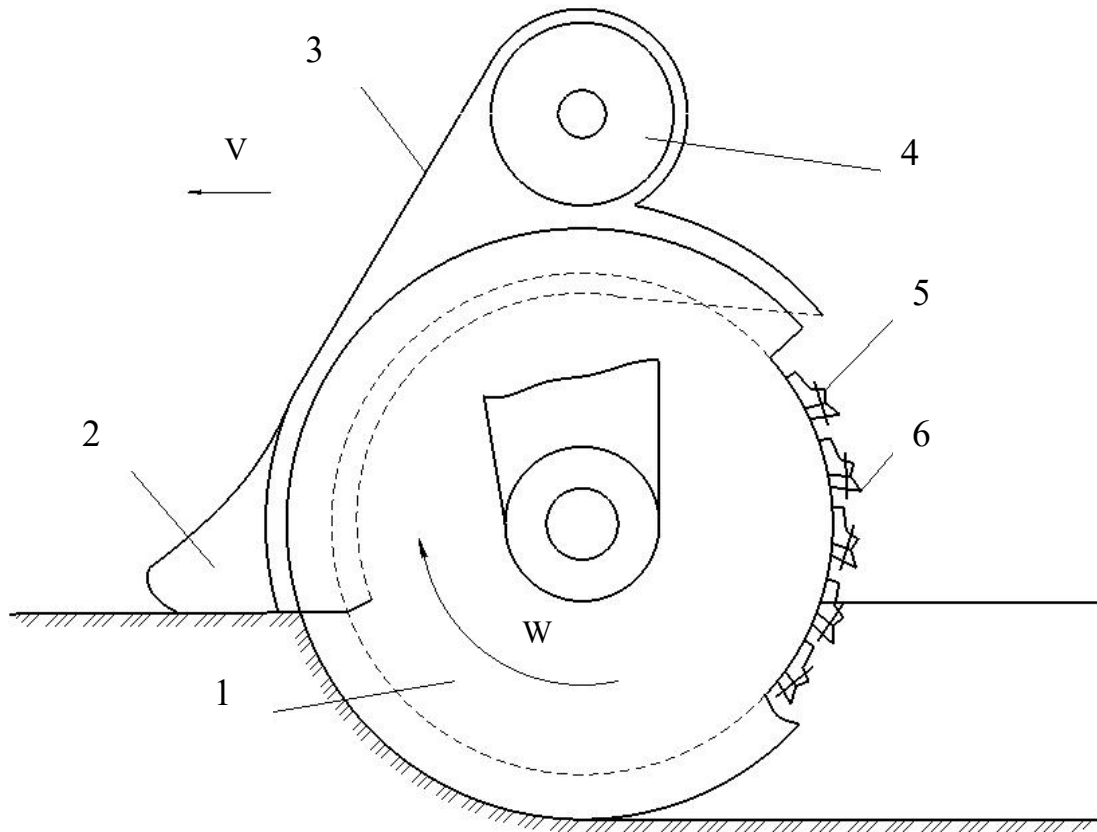


Рис. 1.2. Схема дисковой фрезы: 1 – диск; 2 – отбойная плита;
 3 – кожух; 4 – шнек; 5 – держатель ножей; 6 – ножи;
 W – окружная скорость вращения фрезы;
 V – скорость поступательного движения машины

Установка фрез на фрезформовочных машинах производится с наклоном до $15\text{--}20^\circ$ в поперечной плоскости. Такой наклон позволяет обеспечить сжатие стенок щелей, которое происходит за счет задавливания последних ходовыми устройствами тракторов и катками технологических машин при последующих проходах [7]. В результате необходимая для продолжения работы машин несущая способность залежи на данном участке повышается.

Для глубокой щелевой экскавации торфяной залежи используются винтовые фрезы. Они обеспечивают качественное перемешивание торфа, поэтому их целесообразно применять на верхних залежах со слаборазложившимся верхним слоем. Винтовая фреза представляет собой цилиндр с установленными по спирали съемными ленточными ножами. Фрезы бывают с постоянным диаметром и с утолщением в нижней части, одновальными и двухвальными (рис. 1.3). Ножи фрезы выполняют операции резания и транспортирования торфомассы снизу вверх в приемное устройство перерабатывающего механизма. Двухопорная фреза монтируется в сварном корпусе и получает вращение от редуктора,

установленного сверху. Нижняя опора нижней съемной части вала фрезы смонтирована на корпусе [7, 12].

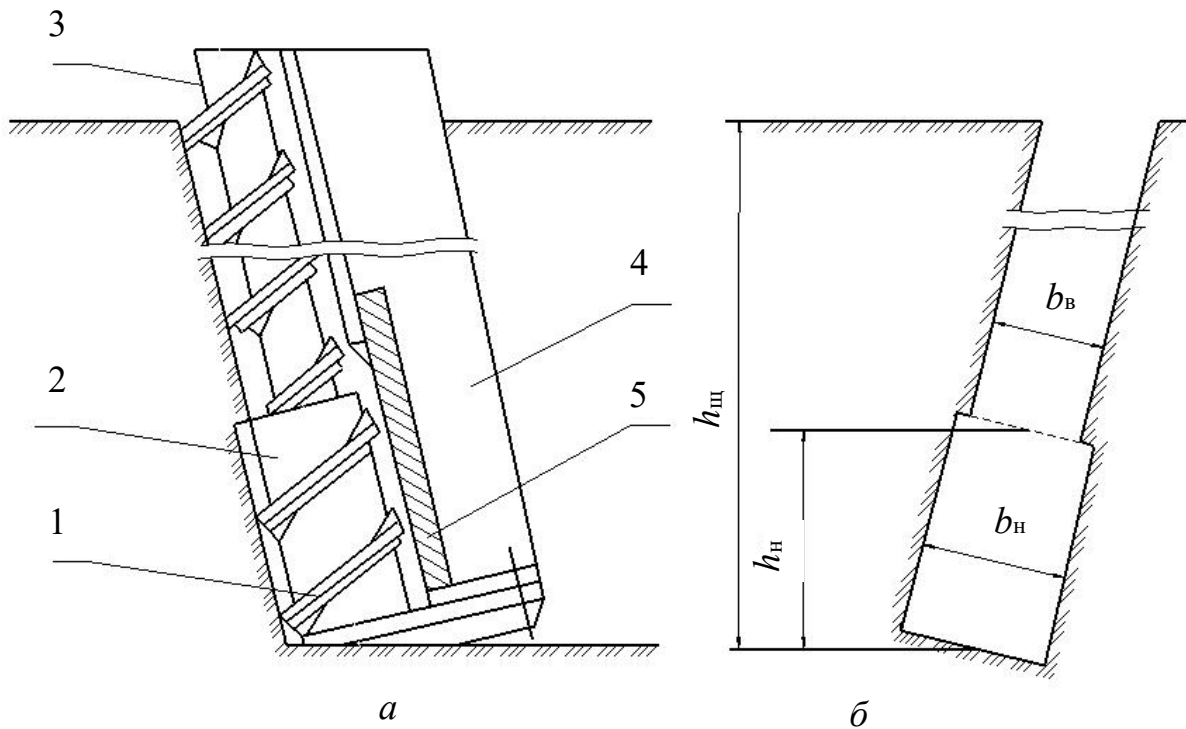


Рис. 1.3. Схема винтовой фрезы (а) и сечение щели (б):
 1 – спиральные ленточные ножи; 2 – нижняя часть вала фрезы;
 3 – верхняя часть вала фрезы; 4 – корпус; 5 – кожух;
 h_n – глубина нижней широкой части щели; $h_{ш}$ – общая глубина щели;
 $b_в$ – ширина верхней части щели; $b_н$ – ширина нижней части щели

Винтовые фрезы также устанавливаются под наклоном до 15° в поперечной плоскости для лучшей переработки древесных включений и возможности сжатия щели при последующих проходах машин [7, 10].

После экскавации из залежи торф поступает на переработку и формование. Обычно на фрезформовочные машины устанавливают шнековые прессы (рис. 1.4), которые состоят из цилиндрического корпуса с размещенным внутри шнеком и формирующего мундштука. Шнековый пресс кинематически связан с экскавирующим органом и имеет производительность, обеспечивающую полную переработку торфа, подающегося от дисковой фрезы или иного экскавирующего органа (цепного бара, винтовой фрезы). С одной стороны пресса находится загрузочное устройство, а с другой – устанавливаются мундштуки.

По длине шнековый пресс условно можно разделить на загрузочную, напорную и формирующую части. В торце формирующей части предусмотрен специальный объем – камера для улавливания посторонних предметов с люком для чистки [7–9].

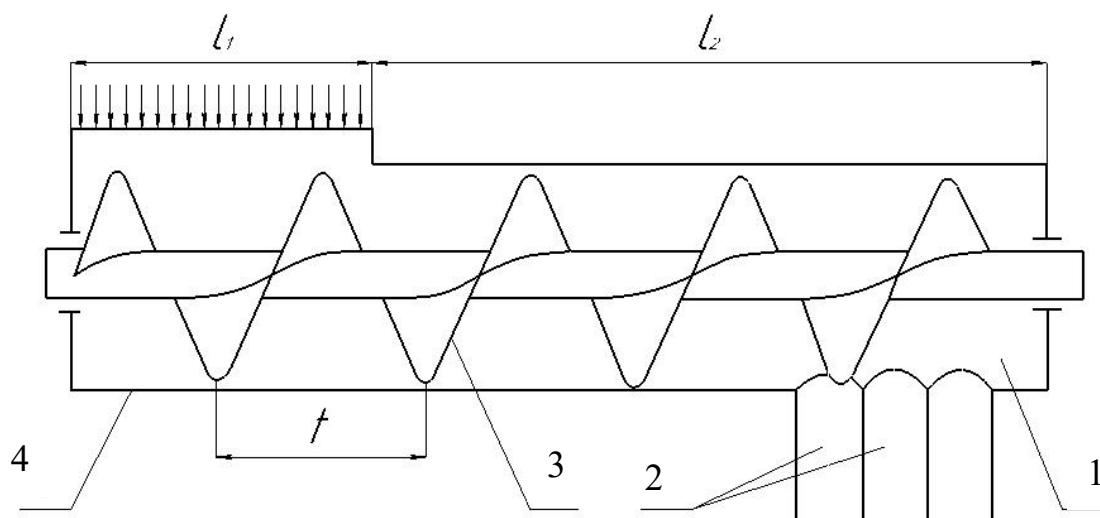


Рис. 1.4. Схема шнекового пресса:

- 1 – камера для улавливания посторонних предметов; 2 – мундштук;
 3 – шнек; 4 – корпус; l_1 – длина загрузочной части шнека;
 l_2 – длина напорной части шнека; t – шаг винтовой линии шнека

Фрезеровочный метод добычи кускового торфа требует высокоэффективных перерабатывающе-формующих устройств, позволяющих доводить торф до пластичного состояния и создавать необходимое давление (напор) при проталкивании его через мундштуки, имеющие радиальное или осевое расположение.

Шнековые формователи с радиальным расположением мундштуков обеспечивают простоту конструкции, но такое расположение ведет к неравномерной скорости выхода торфа из мундштуков, их забиванию и, как следствие, неравномерной плотности куска [7, 8, 12].

На машинах типа МБТ Института торфа АН БССР устанавливались шнековые формователи с осевым расположением мундштуков. Их недостатком является достаточно сложная конструкция: у каждого мундштука был свой питающий шнек (в конструкции их было 4 или 6) и шнеки должны были иметь переменный шаг. Такие шнеки, несомненно, обеспечивали равномерное распределение торфа по формователям, но происходило значительное удорожание конструкции производимой машины.

Существуют и другие конструкции прессов, активно применяемые в машиностроении: пластинчатые (шиберные) прессы (рис. 1.5) и шнековые прессы с переменным шагом винтовой линии или сечением.

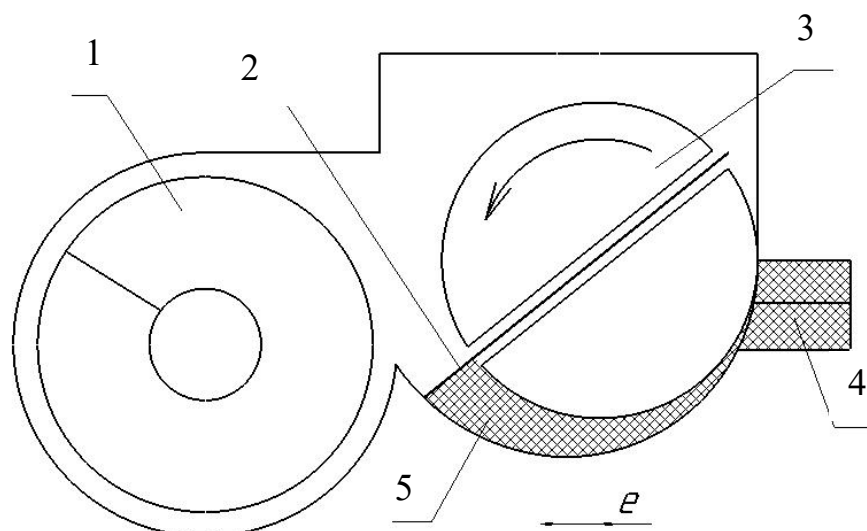


Рис. 1.5. Схема пластинчатого (шиберного) пресса:
 1 – загрузочный шнек; 2 – пластина; 3 – ротор; 4 – мундштук;
 5 – зона уплотнения торфа; e – эксцентриситет ротора

Шиберный формователь (установлен на машине МТК-15) работает по принципу пластинчатого насоса. Как диспергаторы такие формователи недостаточно эффективны, при этом они хорошо работают как нагнетатели. Шиберные прессы просты в эксплуатации, высокопроизводительны, но чувствительны к попаданию посторонних предметов и имеют порционную подачу торфомассы в мундштуки [7–9, 12].

В экспериментальном машиностроении используют, например, торовые формователи, представляющие собой набор дисков с лопатками, которые при вращении перемещаются по кольцевому каналу (тору) и толкают перед собой определенный объем торфомассы, захваченной лопатками при прохождении загрузочной зоны. При выходе из кольцевого канала сформованный торф падает на поверхность поля сушки в виде кусков цилиндрической формы с длиной, равной расстоянию между лопатками. Такой формователь можно установить на машину МБТ-600. Его достоинствами являются высокое качество формования, постоянство формы и размеров кусков и небольшая энергоемкость формования. Недостатки заключаются в сложности конструкции, чувствительности к попаданию посторонних предметов [7].

При работе фрезформовочных машин скорость выхода сформованной торфомассы зависит от многих факторов: глубины фрезерования, скорости передвижения машины, состояния ножей на фрезе, их комплектности и др. Несогласованность скорости выхода кусков из мундштуков и поступательной скорости машины приводит к деформации и разрушению сформованных кусков. Для устранения несогласованности

скоростей мундштуки приподнимают над поверхностью поля стилки. В этом случае куски отламываются от торфяной ленты под действием собственного веса и выстилаются на поверхности залежи. Для регулировки высоты сбрасывания кусков (как правило, она не должна превышать 0,3 м) к мундштукам крепят специальные лотки, а для снижения коэффициента трения между торфом и мундштуками на последние надевают эластичные резиновые наконечники, которые увеличивают время упругого расширения торфа после формования и уменьшают величину этого расширения [7].

Фрезформовочный метод добычи торфа предполагает формирование кусков различного сечения. Поскольку процесс отламывания ленты происходит произвольно, длина кусков не устанавливается. Обычно она составляет 1,5–2 линейного размера поперечного сечения (ширины или диаметра) [7–9, 13].

1.2. Существующие конструкции фрезформовочных машин

Частным случаем фрезформовочного является послойный метод добычи кускового торфа, разработанный Московским торфяным институтом. Он был спроектирован, чтобы решить проблему добычи торфа пониженной влаги. Для реализации данного метода создана прицепная к трактору ДТ-75 машина послойной добычи кускового торфа (МПДК) (рис. 1.6) [8, 14].

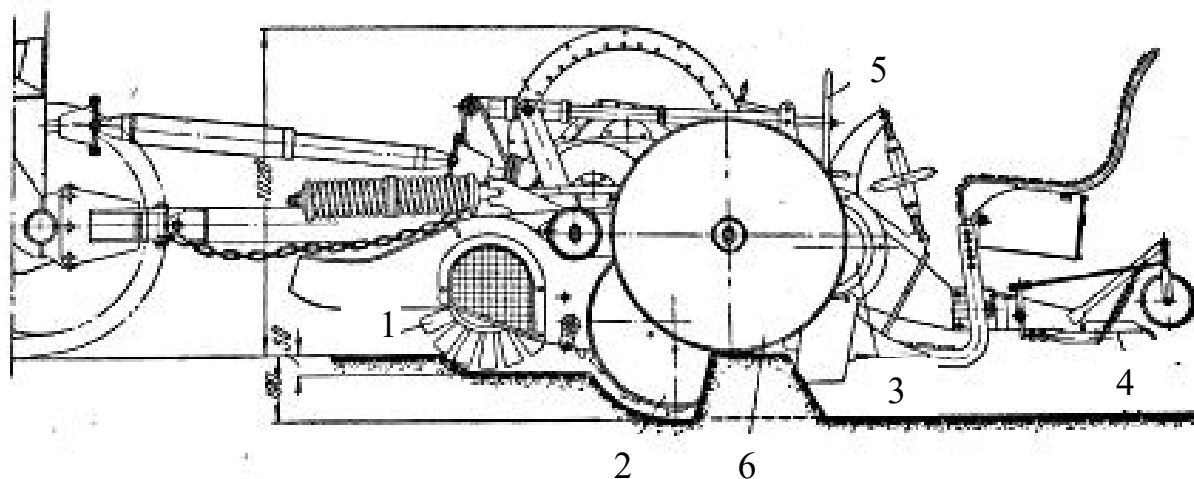


Рис. 1.6. Машина послойной добычи кускового торфа (вид сбоку)

Машина послойной добычи кускового торфа состоит из следующих узлов: вспомогательной фрезы 1, которая снимает верхний подсохший слой экскавируемой залежи на глубину 50 мм и отбрасывает его в сторону (на место выстилки вырабатываемого машиной торфа); рабочей фрезы 2 с шириной захвата 420 мм, которая фрезерует залежь на глубину до 140 мм

и забрасывает сфрезерованный торф в пресс; пресса 3, состоящего из трубы и находящегося в ней напорного шнека с переменным шагом, а также добавочного устройства для повышения интенсивности переработки; укладчика торфа 4, активного для большого куска и пассивного для малого (в первом случае кусок укладывается в фигуры, напоминающие змейки, а во втором – в валок (рис. 1.7)); системы пружинно-винтовых механизмов 5 для подъема и опускания вспомогательной и рабочей фрез и прицепа в сборе; двух катков 6 для передвижения машины, из которых один может быть заменен гусеницей (рис. 1.8).

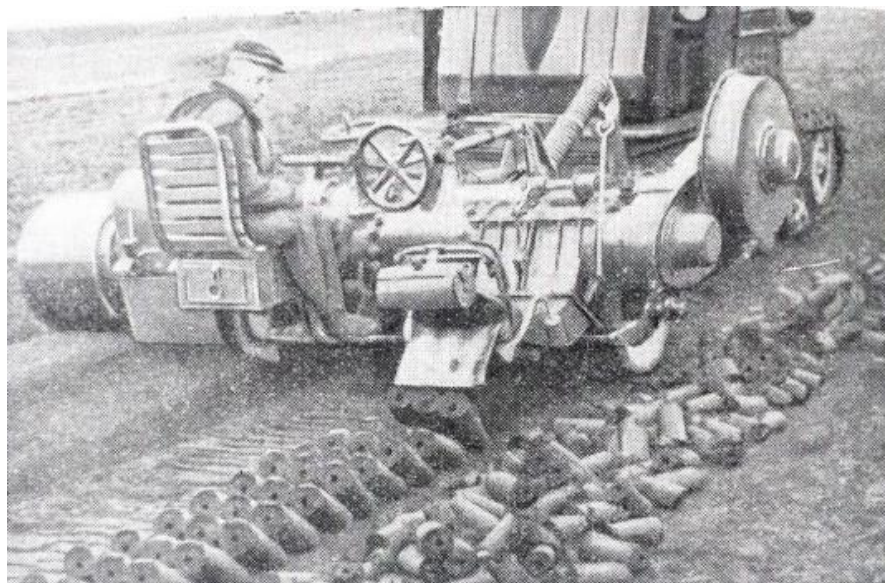


Рис. 1.7. Машина послойной добычи кускового торфа в работе

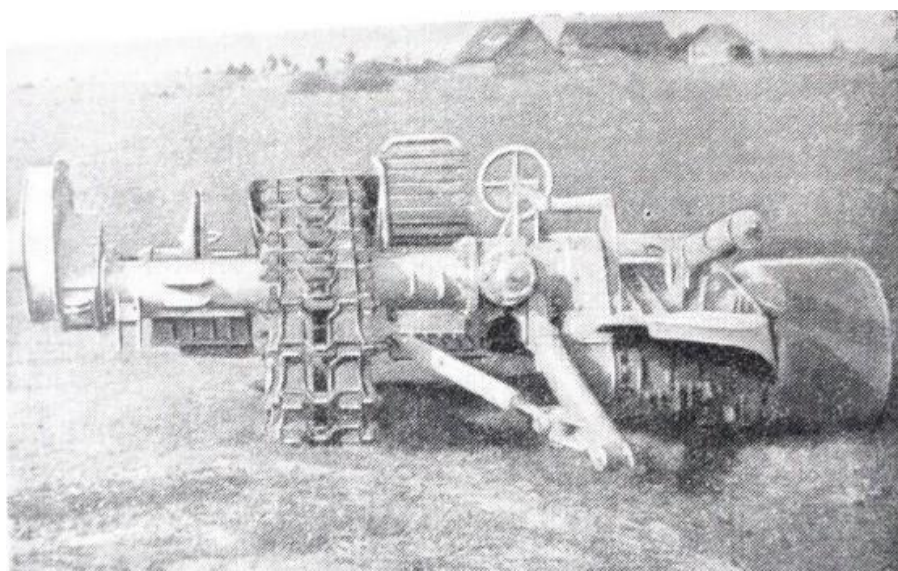


Рис. 1.8. Машина послойной добычи кускового торфа с гусеницей взамен одного катка

Привод рабочего органа осуществляется через карданно-телескопический вал от вала отбора мощности трактора, который укомплектован ходоуменьшителем [8, 14].

Машина обслуживается двумя рабочими: трактористом и оператором. Последний контролирует работу агрегата и регулирует величину заглубления фрез.

В МПДК процесс переработки торфа обеспечивается предварительным тонким измельчением фрезой экскавируемого слоя, последующим уплотнением и формованием измельченного торфа в шнековом торфяном прессе. Изучение такого способа переработки показало, что чем большему измельчению подвергается торф перед формованием, тем меньше общая затрата энергии на его переработку [14]. Машина послонной добычи кускового торфа, производя экскавацию и переработку торфа, вместе с тем выстилала его и укладывала в простейшие фигуры сушки. Данная технология добычи имела неоспоримые преимущества перед методом стилки: сокращение сроков сушки (поскольку влага исходного сырья была меньше), совмещение операций экскавации, переработки, формования и выстилки кусков на поле в одном агрегате [8]. Однако у нее же обнаруживались и существенные недостатки, основным из которых являлась сложность конструкции. Для устранения недостатков был разработан способ добычи кускового торфа методом целевого фрезерования [8]. Он предполагает создание парка технологических машин.

Работы по созданию нового (для того времени) поколения машин велись Калининским филиалом всесоюзного научно-исследовательского института торфяной промышленности (ВНИИТП) [15] и Институтом торфа АН БССР [16, 17]. Были выполнены теоретические и экспериментальные исследования процесса целевого фрезерования и формования [18].

В Калининском филиале ВНИИТП была разработана машина ДПК-5, добывающая кусковой торф для бытовых нужд, прицепная к трактору ДТ-75. Она осуществляла целевое фрезерование наклонной дисковой фрезой и формование торфа при помощи шнека. Формующий аппарат машины имел съемный кожух шнека, выполненный в двух вариантах: по принципу шнека с выходом сформованного торфа через мундштуки, радиально установленные в одну линию на задней части кожуха (рис. 1.9); по принципу шнека с выходом сформованного торфа через мундштук, установленный соосно со шнеком (рис. 1.10) [19].

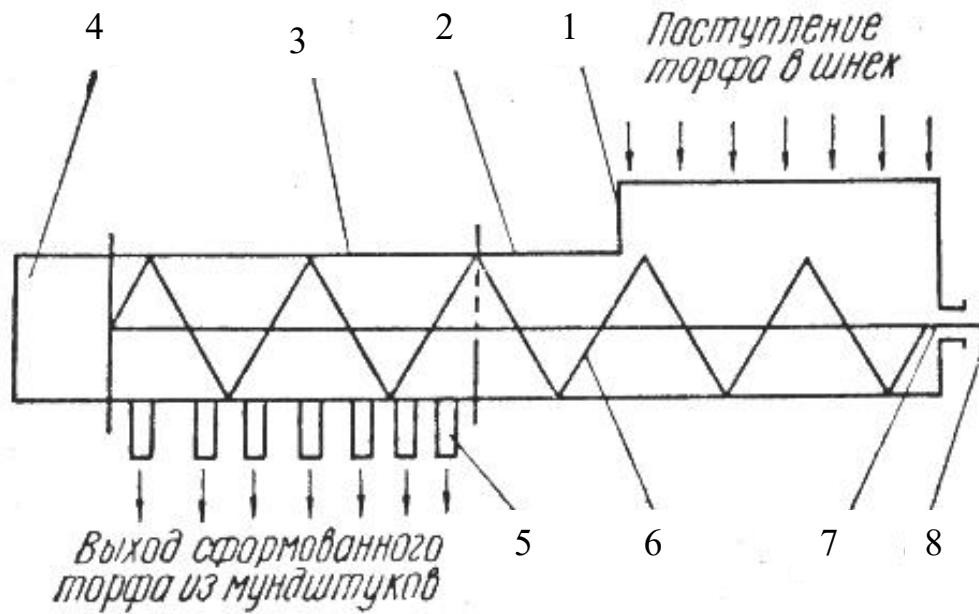


Рис. 1.9. Шнековый пресс конструкции Ф.А. Опейко:
 1 – приемная воронка пресса; 2 – закрытая часть кожуха шнека;
 3 – кожух шнека с отверстиями для мундштуков;
 4 – камера для улавливания твердых включений;
 5 – мундштук; 6 – шнек; 7 – вал; 8 – полумуфта

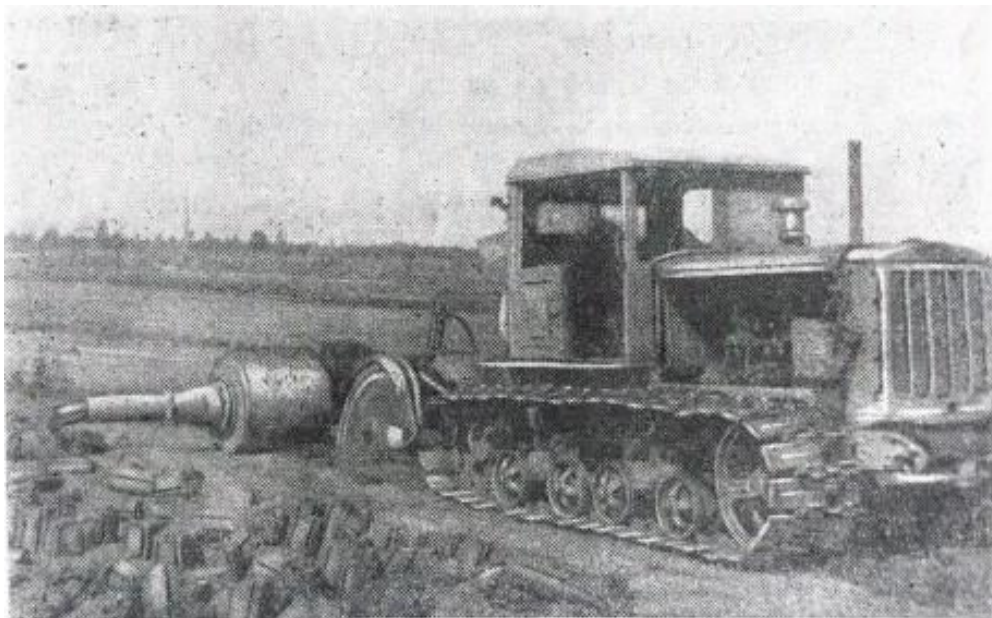


Рис. 1.10. Машина ДПК-5 (мундштук установлен соосно со шнеком)

Основными элементами машины ДПК-5 (МТК-12) являются наклонная дисковая фреза, шнековый пресс-формователь, смонтированный в правый опорный каток, левый опорный каток, прицеп и

трансмиссия с карданным валом [8, 9]. В основу работы машины положен принцип щелевой экскавации залежи дисковой фрезой с совмещением полей добычи и сушки торфа [12]. Машина опирается на два катка и прицепное устройство трактора. Дисковая фреза представляет собой стальной диск со сменными ножами. Относительно вертикальной плоскости фреза установлена под углом $15\text{--}20^\circ$ [9]. Снаружи она закрыта кожухом, служащим для направления потока сфрезерованной крошки в шнековый пресс [9]. Подъем и опускание фрезы, а также регулирование глубины экскавации осуществляются с помощью гидравлического подъемного механизма.

Перерабатывающе-формирующим механизмом машины служит однозаходный шнековый пресс [8, 9, 12], который состоит из корпуса с приемной камерой и уловителя древесных остатков (вмонтирован в правый опорный каток), шнека и формирующей головки. Последняя может быть оборудована пятью мундштуками диаметром 65 мм, двумя мундштуками диаметром 100 мм или одним мундштуком, формирующим полые куски кольцевого сечения 160×60 мм [8, 9] (устанавливается при разработке залежи с пнистостью более 2,5 %) [9]. Существует возможность регулирования зазора между витками шнека и внутренней стенкой корпуса за счет осевого перемещения шнека. Для предупреждения забивания мундштуков крупной щепой зазор должен быть минимальным. Неизмельченные древесные остатки проталкиваются в уловитель, который периодически прочищают [9].

Конструкция прицепа представляет собой сварную плоскую раму с упорной винтовой штангой. Путем изменения длины штанги возможно регулировать заглубление фрезы в залежь [9].

Рабочий орган состоит из карданно-телескопического вала, главного коническо-цилиндрического редуктора, передающего вращающий момент на шнек-формователю и цилиндрический редуктор привода фрезы. Привод осуществляется от вала отбора мощности (ВОМ) трактора [7–9, 12].

Существует модификация машины МТК-12А (рис. 1.11, 1.12), рабочие органы которой (рис. 1.13) не совмещены с осью правого колеса шнекового формователя, имеющего цилиндрический корпус и шнек с конической внутренней обечайкой, состоят из дисковой фрезы и двух мундштуков диаметром 100 мм с возможностью как осевого, так и радиального расположения. Корпус редуктора играет роль основной несущей конструкции, соединяющей узлы рабочего органа в целое. Данная машина имеет массу, которая на 170 кг меньше массы МТК-12 [7, 12].

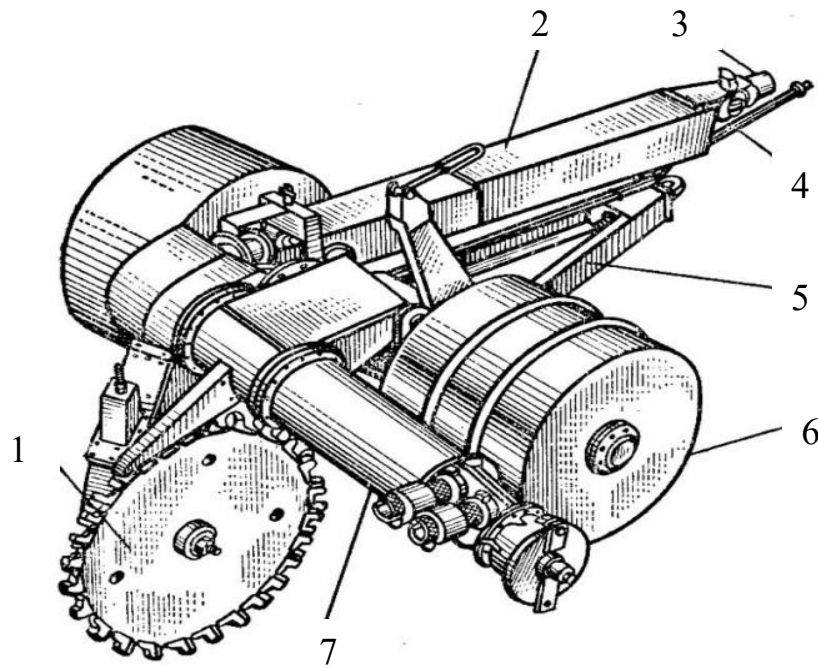


Рис. 1.11. Фрезформовочная машина МТК-12А:
 1 – дисковая фреза; 2 – ограждение карданного вала;
 3 – карданный вал; 4 – гидропривод; 5 – рама;
 6 – каток; 7 – шнековый пресс-формователь

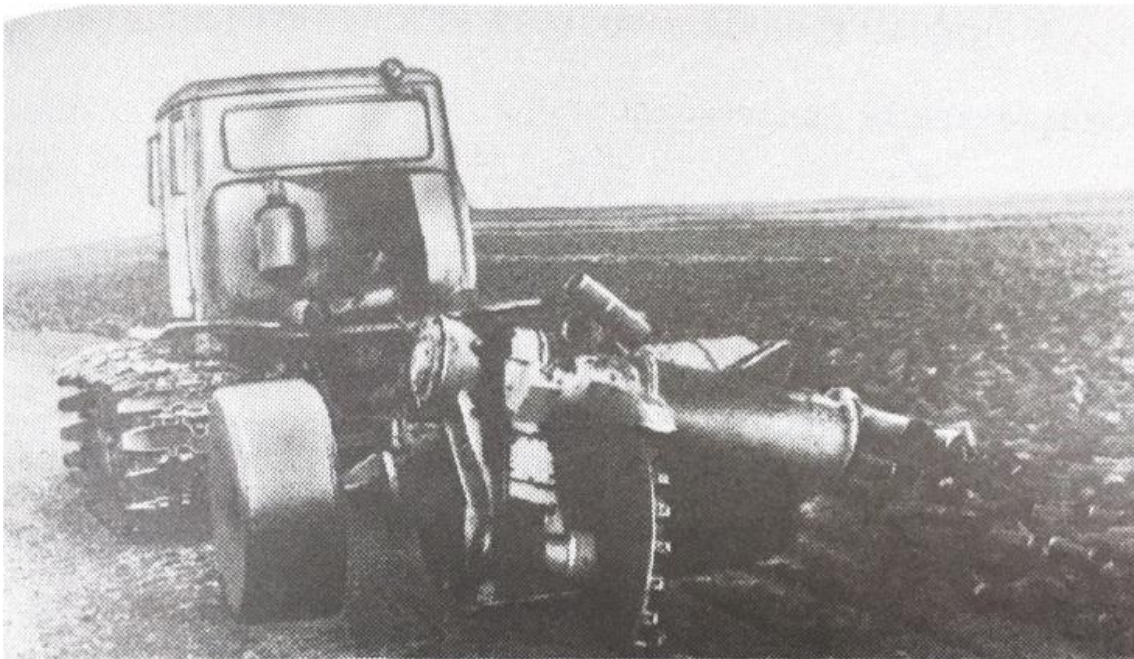


Рис. 1.12. Машина МТК-12А в работе

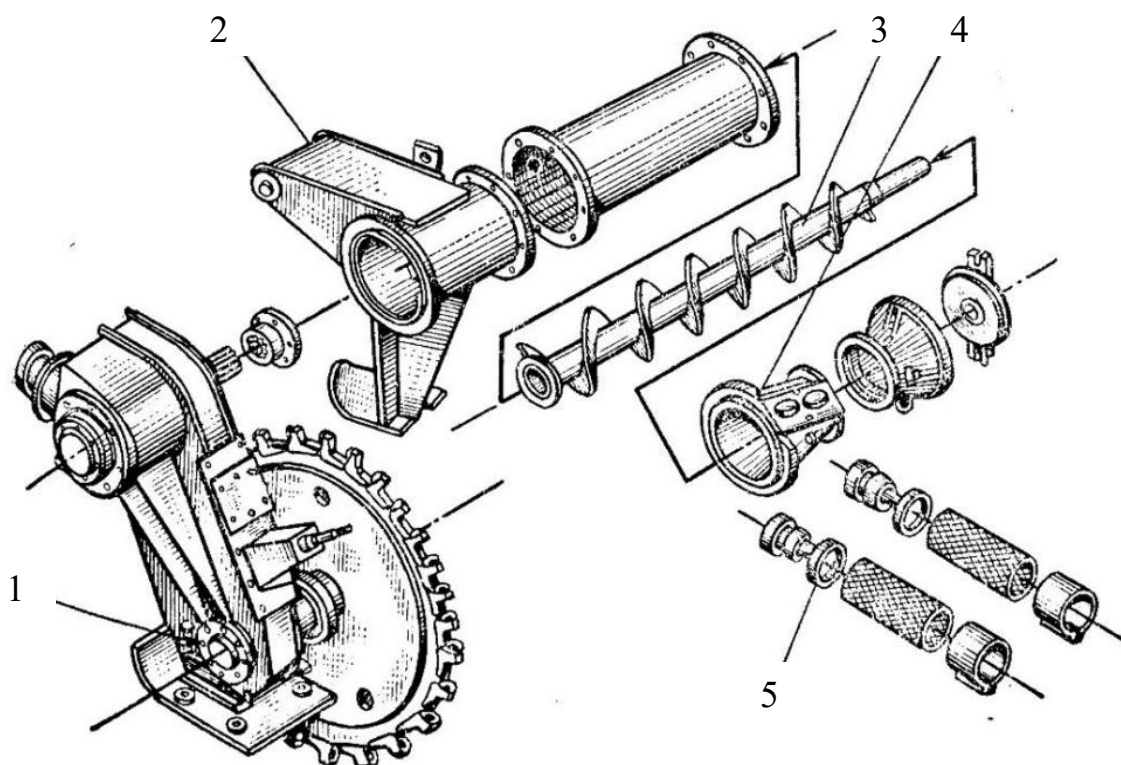


Рис. 1.13. Рабочий орган машины МТК-12А с приводом:
 1 – фреза с приводом; 2 – корпус формователя; 3 – формующий шнек;
 4 – конический переход к мундштукам; 5 – мундштуки

Позже в Калининском филиале ВНИИТП был разработан комплекс машин по производству кускового торфа на верховых залежах со слабой степенью разложения. Он обеспечивал получение более высоких технико-производственных и экономических показателей. Для выполнения операций по экскавации и переработке торфяной залежи, формованию и выстилке кускового торфа была спроектирована и произведена машина МТК-15 (рис. 1.14) [8, 12].

Машина МТК-15 – прицепная с приводом рабочих органов от вала отбора мощности трактора Т-100МБГС-1 (Т-130Б, Т-10МБ). Она производит экскавацию залежи винтовой фрезой из щелей глубиной до 1 000 мм и шириной 145 мм. Переработка производится в шнековом механизме. Сформованные куски диаметром 60 мм и длиной около 100–120 мм внаброс выстилаются на картовое поле шириной полосы около 2,6 м, что соответствует ширине гусеничного хода трактора [8].

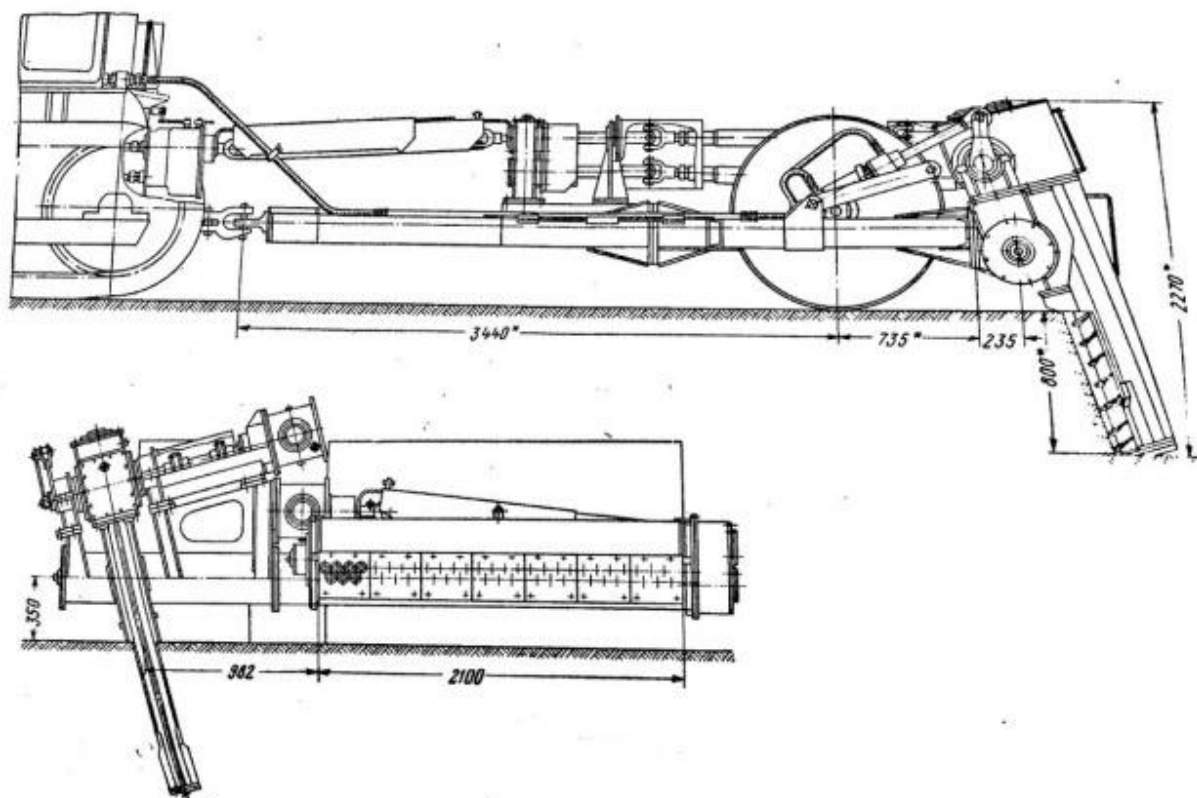


Рис. 1.14. Машина МТК-15

Через главный карданный вал вращения передается от ВОМ на раздаточный редуктор трансмиссии машины. Далее крутящий момент распределяется по двум направлениям: на привод фрезы и на формователь. На привод фрезы – через предохранительную муфту, карданный вал, конический редуктор, промежуточный вал и редуктор привода фрезы. На привод формователя – через предохранительную муфту, карданный вал, конический и бортовой цилиндрический редукторы формователя [8, 12].

Предохранительные муфты на фреze и формователе унифицированы. Это кулачковые муфты с гидравлическим регулированием по манометру нажима на диск. Рабочий орган машины состоит из винтовой фрезы и шнекового формователя. Винтовая фреза представляет собой шнек со съемными спиральными ножами. Она устанавливается под углом с наклоном на 15° . Фреза крепится к нижней плоскости редуктора, при повороте которого она поднимается в транспортное положение. Формователь состоит из шнека, шиберного ротора и решетки с цилиндрическими мундштуками. Шиберный ротор – это цилиндр, в направляющих которого радиально расположены свободно скользящие пластины шибера. Мундштуки диаметром 60 мм расположены в два ряда [12]. Машина оборудована гидросистемой для подъема фрезы в

транспортное положение и для питания предохранительных муфт в трансмиссии привода фрезы и формователя.

Машина МТК-15 работает следующим образом: экскавация торфа из наклонной щели производится при движении трактора опущенной в залежь фрезой, которая подает полученную торфомассу через приемное окно в корпусе формователя к питающему шнеку. Шнеком торфомасса транспортируется к шиберному ротору и равномерно распределяется по его ширине. Шиберы захватывают торфомассу от шнека и по цилиндрической поверхности решеток продавливают ее через цилиндрические мундштуки в виде сформованных кусков [12].

Следующей модификацией машины для добычи кускового торфа методом щелевого фрезерования стала МТК-16 (рис. 1.15) [6, 10].



Рис. 1.15. Фрезформовочная машина МТК-16
в транспортном положении

Машина является прицепной к трактору ДТ-175Т (ДТ-75 Б), диаметр фрезы составляет 1 180 мм. Агрегат оснащен четырьмя мундштуками шестигранной формы с диаметром описанной окружности 100 мм. Экскавация залежи производится на глубину 450 мм [10].

Существует также конструкция прицепной к трактору ДТ-75Б машины МТКП-1. Экскавация торфа из залежи выполняется в ней фрезой диаметром 1 026 мм, оснащенной ножами, на глубину 400 мм. Переработка

торфомассы производится шнековым прессом, а формование кусков кольцевого сечения размером 150×40 мм осуществляется одним мундштуком [10, 11].

Калининским филиалом ВНИИТП велись активные исследования в области добычи коммунально-бытового топлива в районах Крайнего Севера. На основе результатов был сделан вывод о том, что в этих условиях наиболее приемлемым способом добычи торфа является поверхностно-послойный [10, 11, 20–22]. Было разработано несколько конструкций машин для добычи торфа в данных условиях. Машина КДН-2 (комбайн добывающий навесной) предназначена для добычи торфа вблизи крупных населенных пунктов (рис. 1.16) [10, 18, 20–22].

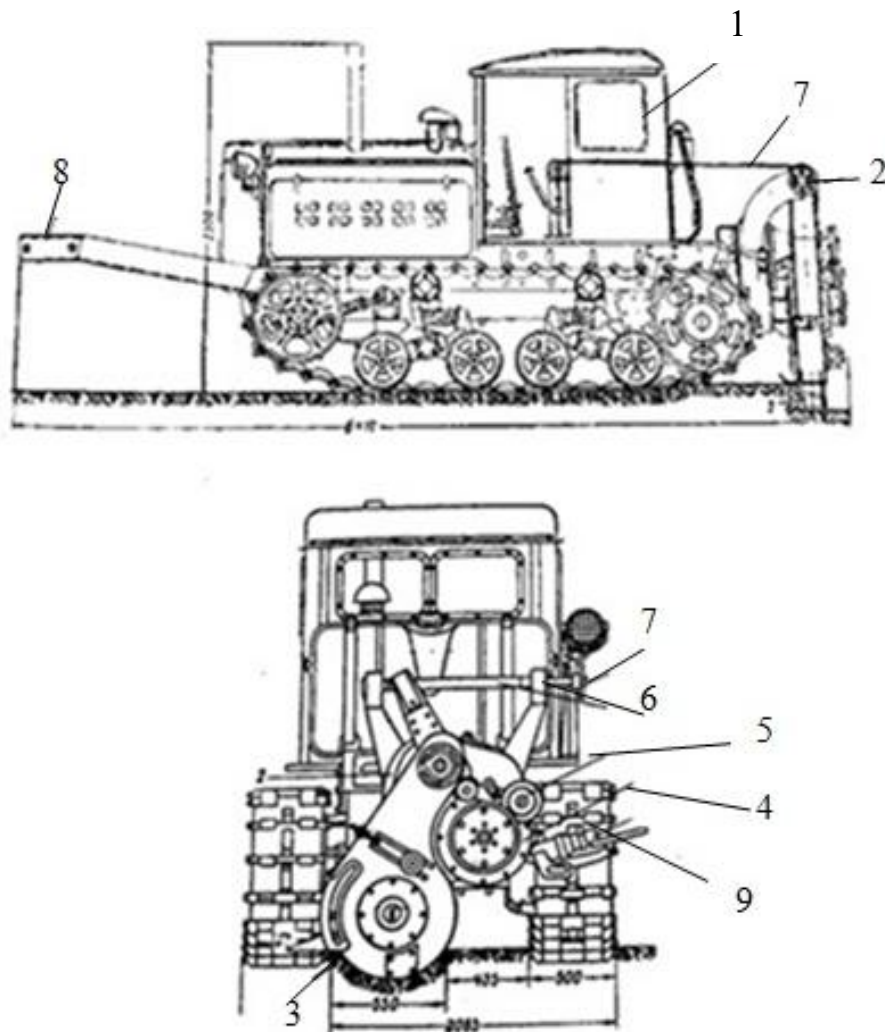


Рис. 1.16. Общий вид машины КДН-2: 1 – кабина гусеничного трактора; 2 – редуктор цилиндрический; 3 – фреза; 4 – кожух щелевого пресса; 5 – загрузочный барабан щелевого пресса; 6 – винтовой механизм подъема и опускания фрезы; 7 – цепная передача на винтовой механизм подъема и опускания рабочего органа; 8 – контргруз; 9 – мундштук с укладкой торфа в валок

Рабочими органами машины КДН-2 являются фреза и щелевой пресс с мундштуком. Фреза представляет собой цилиндр, на торце которого жестко закреплены режущие, а по образующей – вспомогательные ножи, и служит для экскавации, измельчения и подачи торфяной крошки в щелевой пресс. Щелевой пресс предназначен для переработки торфяной массы, уплотнения ее и подачи в мундштук. Пресс состоит из неподвижного кожуха, внутри которого вращается ротор с дисками, образующими между собой кольцевые щели. В процессе вращения ротора торфяная крошка, находящаяся в щелях, уплотняется, встретив преграду в виде гребенчатого съемника, и через загрузочный люк поступает в мундштук с металлическими насадками и резиновыми наконечниками. В мундштуке торфяная масса формуется в куски кольцевого сечения наружным диаметром 90 мм. Сформованные куски выходят из пресса перпендикулярно движению трактора и, отламываясь от выходящей из мундштука ленты, образуют на поле валок [20].

Специалисты Калининского торфяного института (ныне Тверского государственного технического университета) модернизировали машину КДН-2 для работы в условиях Крайнего Севера, создав дополнительный очистительный механизм, с помощью которого сухая крошка счищается перед фрезой и отбрасывается на место выстилки кусков торфа-сырца [18, 20]. Очистительный механизм состоит из ковшовой цепи, привода, системы рычагов для подъема и опускания цепи, кожуха и экрана для направления полета отбрасываемой крошки. Ковшовая цепь установлена на раме коробчатого сечения из листовой стали. На цепи жестко закреплены ковши, имеющие переднюю стенку, выполненную в виде ножа. Ковшовая цепь монтируется на корпус фрезы спереди по ходу движения трактора. Привод ковшовой цепи осуществляется от вала фрезы через одноступенчатый цилиндрический редуктор и цепную передачу. За счет введения в кинематическую схему редуктора ковшовая цепь вращается в противоположном направлении относительно фрезы, что необходимо для отбрасывания сухой крошки на место выстилки торфа-сырца. С помощью устройства для подъема и опускания ковшовой цепи обеспечивается глубина снимаемого слоя в пределах от 0 до 50 мм [20].

Применение очистительного механизма способствует устойчивости работы машины в любой период, улучшению условий сушки кусков торфа-сырца, выравниванию поверхности поля (так как крошка засыпает ранее выработанные карьеры), увеличению прочности вырабатываемой продукции за счет формирования кусков из однородной по влаге торфяной массы.

Для добычи кускового торфа вблизи небольших населенных пунктов создана малая послойно-добывающая машина МПДМ-1 (рис. 1.17), рабочими органами которой являются торцевая фреза, щелевой и шнековый прессы [18, 20]. Фреза представляет собой диск, на котором

закреплены ножи, охватывающие его с двух сторон, и предназначена для измельчения и экскавации торфяной залежи с последующей подачей сфрезерованной торфяной крошки в щелевой пресс. Щелевой пресс состоит из неподвижного кожуха, внутри которого вращается ротор с четырьмя дисками. Шнековый пресс включает в себя неподвижный кожух и шнек с переменным шагом. Оба приспособления служат для прессования торфяной крошки, переработки ее и выдачи в мундштук. Работа щелевого пресса основана на сцеплении прессуемого материала с кольцевой ребристой поверхностью вращающегося ротора. В процессе вращения ротора торфяная крошка, находящаяся в щелях, уплотняется, встретив преграду в виде гребенчатого съемника, и через загрузочный люк поступает в шнековый пресс. При вращении шнека торфяная масса уплотняется и подается в мундштук, в котором происходит ее формирование в куски кольцевого сечения наружным диаметром 90 мм и длиной 200–220 мм [20].

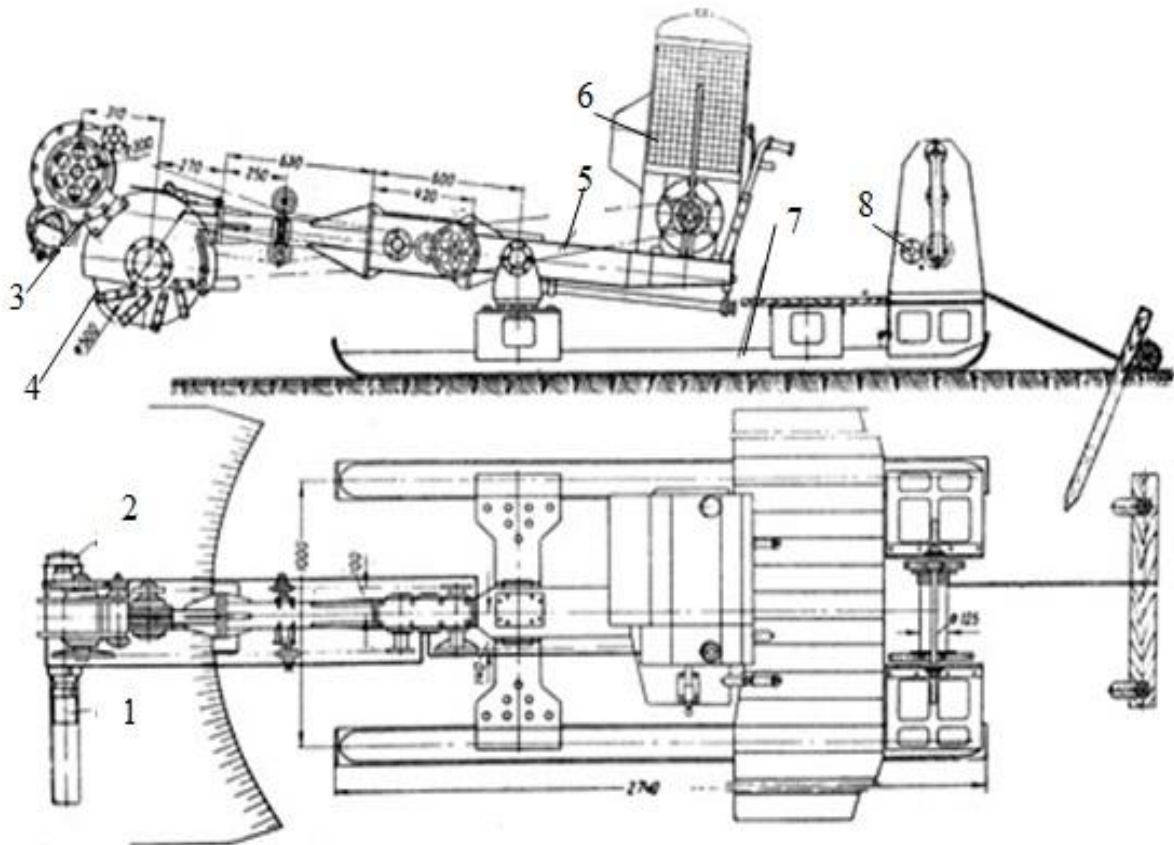


Рис. 1.17. Общий вид машины МПДМ-1:

- 1 – мундштук; 2 – шнековый пресс; 3 – щелевой пресс;
4 – фреза; 5 – стрела; 6 – двигатель; 7 – лыжи; 8 – лебедка

Белорусскими специалистами разработана машина для добычи кускового торфа МТК-1,6 (рис. 1.18). Она предназначена для работы в полуприцепном виде к трактору мощностью 120–150 кВт.

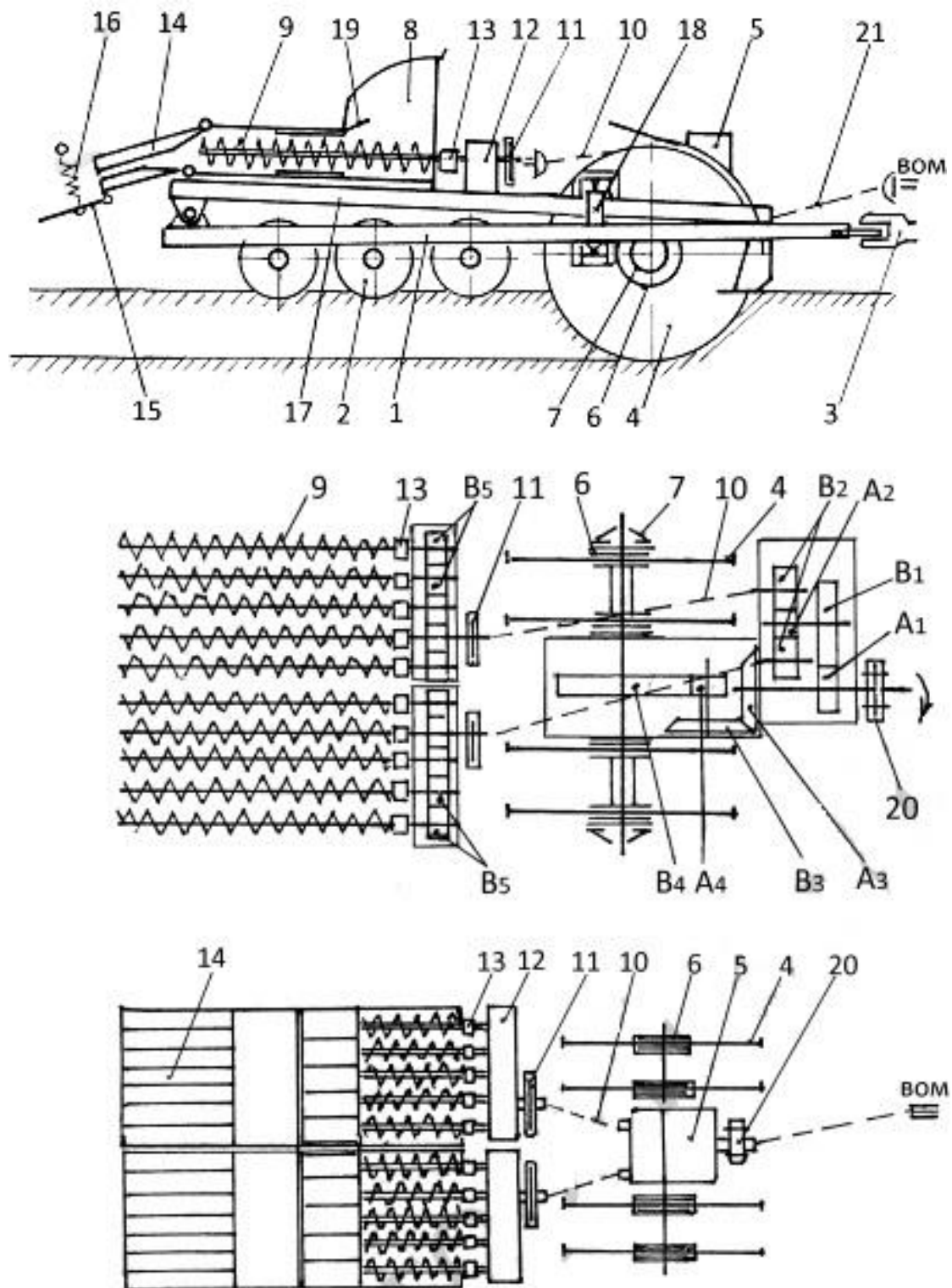


Рис. 1.18. Машина МТК-1,6

Рама ходового устройства 1 (см. рис. 1.18) машины МТК-1,6 опирается на три катка 2 и серьгу 3 трактора-тягача. Нагрузка на тягово-сцепное устройство трактора от веса машины достигает 1 900 Н. Давление на залежь при просадке 30 мм составляет 33,4 кПа. Все основные рабочие узлы смонтированы на раме неподвижно относительно друг друга, что упрощает конструкцию машины и обеспечивает надежность ее работы. Разработка залежи производится четырьмя дисковыми фрезами 4, смонтированными на валу редуктора 5. Режущие элементы – съемные, крепятся на фрезе. Перед ножами установлены лопасти, обеспечивающие экскавацию торфа из щели и его подачу в бункер 8. Для защиты от поломок на фрезе установлены дисковые фрикционные муфты 6. Усилие прижатия фрикционных накладок к диску фрезы регулируется тарельчатыми пружинами 7. Крутящий момент передается от редуктора через шестерни и карданные валы 10 на редуктор привода винтов пресса. Редукторы пресса 12 и винты 9 защищены от поломок фрикционными муфтами 11. Через зубчатые муфты 13 от валов редукторов пресса осуществляется привод винтов.

Существует возможность регулирования наклона блоков 14 (см. рис. 1.18) для увеличения или уменьшения поперечного сечения формирующих каналов. Очистка мундштуков от стружки или обломков пня производится с помощью гидроцилиндра во время движения по рабочему проходу. Сформированные ручки из мундштуков выходят на отладчик 15, отклоняющийся под тяжестью торфа при длине ленты 200–250 мм. Лента разламывается на куски, длина которых регулируется натяжением пружины 16.

Подъем и заглубление фрез (до 400 мм) производится изменением наклона рамы машины 17 гидроцилиндрами 18. Тяжелые твердые предметы в бункере пресса улавливаются ловушкой 19. Для защиты машины от высоких ударных нагрузок на входном валу редуктора фрез установлена предохранительная муфта 20 [23].

На МТК-1,6 установлен сдвоенный многовинтовой пресс (по пять винтов диаметром 150 мм) в одном кожухе (рис. 1.19). Вращение винтов встречное, что практически исключает возможность проворачивания торфа вместе с винтом. Формирующие мундштуки выполнены разъемными (рис. 1.20) и образованы верхним и нижним блоками, которые шарнирно крепятся к кожуху пресса [23].

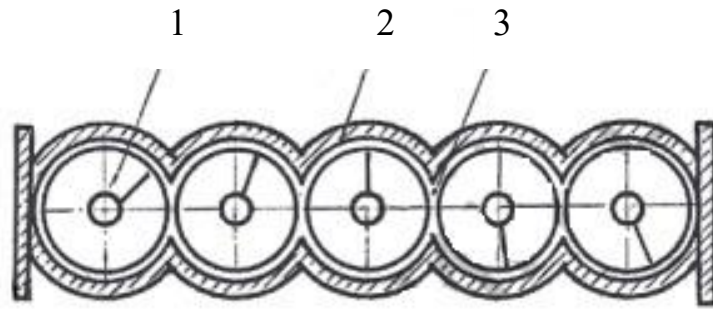


Рис. 1.19. Поперечный разрез пресса:
1 – винт; 2 – кожух; 3 – пресс-камера

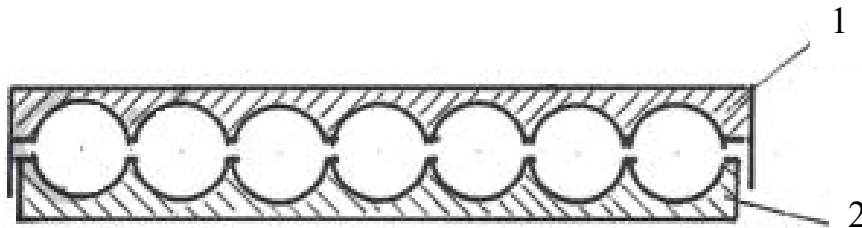


Рис. 1.20. Формующие каналы: 1 – верхний блок; 2 – нижний блок

Еще одной современной разработкой белорусских конструкторов является машина КТД-1 (рис. 1.21). Она производится РУП «Могилев-энерго» [24] и предназначена для добычи кускового торфа щелевым способом на торфяных залежах всех типов со степенью разложения свыше 15 %. Машина прицепная к трактору тягового класса 20–30 кН имеет 12 мундштуков диаметром 75 мм, в которые торфомасса подается после переработки в винтовом (шнековом) прессе. Технологическая операция выполняется при скорости 0,28–0,6 м/с. Производительность данной машины – не менее 20 м³/ч [24].



Рис. 1.21. Машина для добычи кускового торфа КДТ-1

Финская компания Suokone Oy разработала и производит ряд фрезформовочных машин (рис. 1.22) [25], отличающихся типом формовочного узла. Технические характеристики этих машин приведены в табл. 1.1 [10, 25].



Рис. 1.22. Машина для добычи кускового торфа РК-1 (РК-1S) финской компании Suokone Oy

Таблица 1.1

Технические характеристики машин для добычи кускового торфа компании Suokone Oy [10, 25]

Марка машины	PK-1SL C5	PK-1SL R12	PK-1SL W60
Диагностика			
Диаметр фрезы по концам ножей, мм	1 295		
Глубина фрезерования, мм	550		
Угол наклона фрезы, градус	15–20	10–15	15–20
Ширина прорезаемой щели, мм	75		
Количество ножей на фрезе, шт.	32		
Общая масса без дополнительного оборудования, кг	1 300	1 350	1 430
Общая масса с дополнительным оборудованием, кг	1 450	1 500	1 580
Частота вращения ВОМ, об/мин	1 000		
Диапазон мощности, кВт	100–150		

Ирландская компания DIFCO [25] производит фрезформовочные машины с необходимой мощностью 70–110 кВт. Их рабочим органом является цепной бар (рис. 1.23). Машины характеризуются производительностью 15–40 м³/ч и массой 1 150–1 350 кг в зависимости от модификации [10, 11].



Рис. 1.23. Фрезформовочная машина HERBST для добычи кускового торфа (компания DIFCO, Ирландия)

Существует множество разработок, которые оказались нереализованными по разным причинам. Чтобы изменить технологические параметры машины МТК-16, рационально использовать погодные условия при производстве коммунально-бытового топлива на всех типах залежей ВНИИТП разработал комплекс машин КМК-1. Он включал в себя прицепную к трактору машину для добычи, формования и выстилки кускового торфа (рис. 1.24) и полунавесную на трактор машину для валкования и погрузки торфа в транспортные средства, унифицированную с тракторным погрузчиком для схемы с отдельной уборкой фрезерного торфа. При выходе из формователя кусок обламывался и устанавливался на поверхности карты в вертикальном положении. Это делалось для улучшения условий сушки. Кусок получался трубчатой формы с кольцевым сечением 160×100 мм и длиной до 250 мм. Таким образом, в слое образовывались значительные воздушные лабиринты [10, 13].



Рис. 1.24. Машина КМК-1 для добычи, формирования и выстилки кускового торфа

Институтом тофа АН БССР (в настоящее время ГНУ «Институт проблем использования природных ресурсов и экологии НАН РБ») были разработаны опытно-промышленные машины МБТ-500 и МБТ-600 с торовыми формователями (рис. 1.25).



Рис. 1.25. Фрезформовочная машина МБТ-600 с торовым формователем

На указанных машинах устанавливались шнековые формователи с осевым расположением мундштуков. Торфяная масса поступала в мундштук непрерывным потоком, что исключало расслаивание кусков во время сушки. Недостатком конструкции являлась большая сложность, так как каждый мундштук должен был иметь свой шнек, которых на машине МБТ-600 было 6, а на МБТ-500 – 4. Кроме того, на данных машинах устанавливался шнек-питатель с переменным шагом (сложной спиралью).

1.3. Анализ технического уровня конструкций отечественных и зарубежных фрезформовочных машин

На основе проведенного обзора можно выделить ряд конструктивных вариантов исполнения фрезформовочных машин (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Морфологическая карта вариантов конструкций фрезформовочных машин

Параметр	Варианты исполнения		
	А	Б	В
Вид экскавирующего устройства	Цепной бар	Винтовая фреза	Дисковая фреза с ножами
Компоновочное решение	Прицепная	Полунавесная	Навесная
Вариант выстилания	Волнистые ленты	Прямые ленты	Внаброс
Расположение микрокарьера	Вертикальное	Наклонное	Горизонтальное
Формующий орган	Шнековый	Торовый	Пластинчатый (шиберный)
Расположение мундштуков	Радиальное	Осевое	–
Количество потоков мундштука	Однопоточный	Многopotочный	–
Форма (поперечное сечение) куска	Шестигранная	Цилиндрическая	Кольцевая

По результатам проведенного анализа можно сделать вывод о том, что наиболее востребованными и надежными оказались навесные фрезформовочные машины с дисковой наклонной фрезой, шнековыми формователями и многopotочными мундштуками.

На основе технической характеристики существующих фрезформовочных машин (табл. 1.3) построен параметрический ряд зависимости производительности машины от веса (рис. 1.26).

Таблица 1.3

Параметрический ряд фрезформовочных машин

Машина	Вес, кН	Производительность, м ³ /ч
МТК-12	14,431	18,71
МТК-12А	12,753	17,66
МТК-15	42,575	63
МТК-16	21,582	19,09
МТКП-1	12,263 5	18,455
КДН-2	9,81	9,648
МПДМ-1	6,082	2,814
МТК-1,6	38,259	89
КДТ-1	17,658	20
PK-1SL C5 (Suokone Oy)	12,753	20
PK-1SL R12 (Suokone Oy)	13,244	20
PK-1SL W60 (Suokone Oy)	14,028	20
HERBST (DIFCO)	8,339	32,5

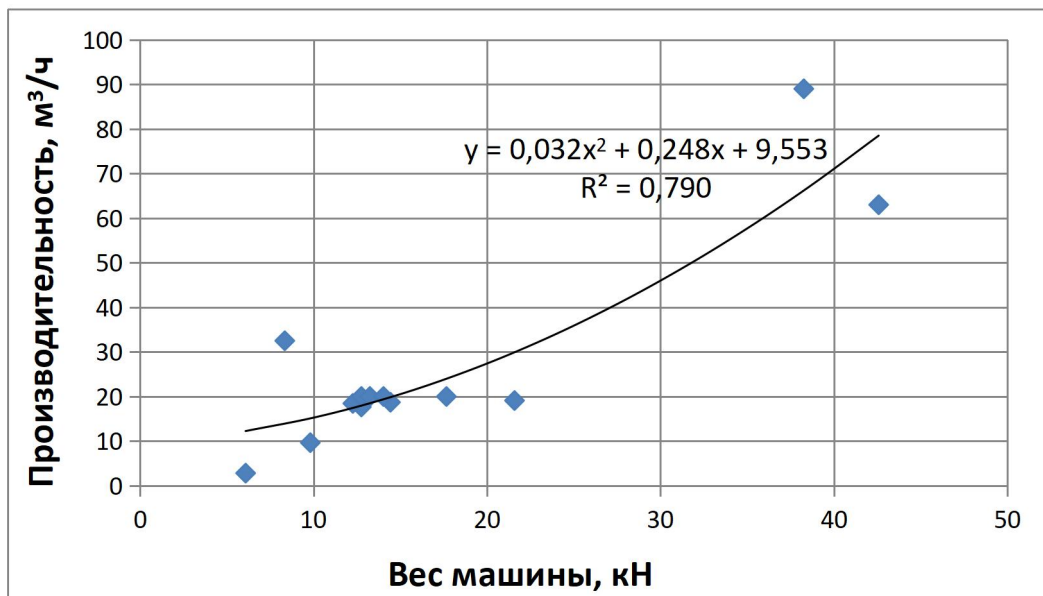


Рис. 1.26. Зависимость производительности фрезформовочных машин от их веса

Наибольшая концентрация опытных точек наблюдается в зоне производительности 18–23 м³/ч при весе 12–14 кН. С учетом того, что в эти границы вписываются ранее описанные нами навесные фрезформовочные машины с дисковой наклонной фрезой, шнековыми формователями и многопоточными мундштуками, следует считать данные параметры рациональными.

1.4. Существующие результаты исследований по вопросу производства кускового торфа фрезформовочным методом

Вопросами изучения производства кускового торфа занимались даже во время Великой Отечественной войны. Е.П. Семенский исследовал зависимость качества кускового торфа от вида и строения торфяной залежи, а также от качества переработки торфа-сырца [26–28]. В результате было установлено, что прочность кускового торфа определяется влагой и дисперсностью формуемой торфомассы, причем прочность растет с понижением влаги и достигает максимального значения при содержании влаги 25–30 %.

М.П. Воларович [29–31] в ходе экспериментальных исследований движения торфомассы при продавливании ее через цилиндрические и конические насадки установил наличие «мертвой зоны» в заходной части мундштука.

В рамках исследования С.С. Корчунова [32] была получена зависимость прочности кускового торфа R от влаги, которая справедлива для медленной сушки при условии, что прочность растет до полного высыхания материала. Уравнение имеет вид

$$R = R_c \cdot e^{-u\lambda}, \quad (1.1)$$

где R_c – прочность сухого образца; u – влагосодержание; λ – коэффициент упрочнения, который можно выразить формулой

$$\lambda = \frac{\rho k}{c\gamma_c}, \quad (1.2)$$

где ρ – плотность твердой фазы торфа; k – коэффициент усадки при сушке; c – коэффициент уплотнения; γ_c – плотность сухого образца.

Е.В. Раковский и Х.И. Ривкина в своей работе [33] определили, что в формировании прочного торфяного куска особую роль играет клеящая способность гуминовых и гидролизуемых веществ. Ученые пришли к выводу, что более высокая прочность верхового кускового торфа в сравнении с низинным вызвана повышенным содержанием гидролизуемых веществ и нахождением основной части гуминовых кислот верхового торфа в несвязанном состоянии.

М.Н. Кривошеин изучал процесс формирования торфомассы пониженной влаги [34]. Последняя в данном исследовании принималась в интервале 70–80 %. В своей работе автор установил, что наиболее целесообразным механизмом переработки торфомассы с таким содержанием влаги является валковый формователь, работающий по принципу растирания. Для сокращения сроков сушки и повышения цикловых сборов ученый предложил формировать куски диаметром 20 мм.

Исследованием прочности мелкокускового торфа занимался Н.П. Перов. В результате работ было определено, что в зависимости от содержания влаги торф может находиться в четырех состояниях: пластичном, упруго-пластичном, пластично-упругом и упруго-хрупком [35]. В первых трех состояниях при уменьшении влаги показатели прочности на сжатие, изгиб и предельное сопротивление проникновению конуса возрастают. В упруго-хрупком состоянии при уменьшении содержания влаги возрастает только предельное сопротивление проникновению конуса, а прочность на сжатие и изгиб уменьшается. В случае содержания высокой влаги прочность верхового торфа (при одинаковой степени разложения и переработки) становится ниже прочности низинного. И наоборот, при низкой влаге верховой торф становится прочнее низинного.

Производительность, потребляемая мощность, удельный расход энергии и качество готового торфа зависят (при прочих равных условиях) от степени переработки торфомассы. В основу определения физико-механического состояния торфомассы, соответствующего качественному готовому продукту, положен критерий, предложенный и обоснованный С.Г. Солоповым (удельная поверхность $S = 6\ 000\text{--}7\ 000\ \text{см}^2/\text{г}$ сухого вещества). Им же было сформулировано положение, согласно которому для получения кускового торфа высокого качества при пониженной влаге залежи обязательным условием, кроме интенсивной переработки, является уплотнение формуемой торфомассы до двухфазного или близкого к нему состояния. Эта цель достигается путем вакуумирования или вибрирования в процессе формования, что ведет к увеличению плотности и прочности материала [36, 37]. В статье [38] изложен вывод о том, что частицы торфа удерживаются в сформованном торфяном куске силами молекулярного притяжения и капиллярным давлением. С.Г. Солоповым выделено два вида сцепления: истинное молекулярное притяжение частиц и кажущееся, обусловленное силами капиллярного давления. Что касается механического диспергирования, то оно дает возможность получить более пластичную торфомассу, обеспечивающую лучшие условия формования и сушки.

В исследованиях В.Г. Пескова [39] определено, что изменение величины предельного напряжения сдвига торфомассы по мере прохождения ее через пресс имеет затухающий характер. В горловине и мундштуке переработка незначительна, а основная переработка происходит в шнековой части пресса. Это необходимо учитывать, поскольку изменение предельного напряжения сдвига по мере прохождения торфомассы по прессу пропорционально перерабатывающей способности той или иной части пресса. Кроме того, установлено, что производительность пресса зависит от способности напорной шнековой части создавать давление (напор), требующееся для преодоления

сопротивления горловины и мундштука, а условное предельное напряжение сдвига в пристенном слое в торфяных напорных шнеках меньше предельного напряжения сдвига самой торфомассы. Процесс течения торфомассы в напорном шнеке в первом приближении не зависит от ее пластической вязкости.

В исследованиях М.З. Лопотко [40] затрагивается тема валкования мелкокускового торфа лопастным валкователем. Это одна из немногих работ, посвященных именно вопросу повышения качества кускового торфа за счет модернизации и применения различных инноваций в оборудовании. Определены основные конструктивные параметры оборудования, интервал оптимальных скоростей передвижения валкователя, зависимость между углом установки лопасти, удельным расходом энергии на валкование и скоростью валкования.

Исследования Б.П. Нажесткина [41] посвящены удалению газовой составляющей торфомассы путем вибрирования. Применение вибрирования, по мнению ученого, приводит к переходу торфяной массы в состояние, близкое к двухфазной системе, а следовательно, дальнейшее уплотнение торфа может происходить только за счет удаления жидкой среды. В результате в насадке начинает развиваться обычное вязкопластическое течение, что приводит к снижению расхода энергии на формирование торфомассы. Уменьшение расхода энергии при формировании с применением вибрирования является следствием понижения предельного напряжения сдвига и вязкости торфомассы, а также коэффициента внешнего трения в результате передвижения влаги в торфе от центра к периферии (стенкам мундштука) и образования тонкой ее пленки на внутренней поверхности мундштука. Применение вибрирования в процессе формирования особенно целесообразно при добыче торфа с пониженной влажностью (когда торфомасса находится в трехфазном состоянии).

Н.В. Чураев в исследовании [42] пришел к выводу, что для получения качественного кускового торфа необходимое содержание фракций размером менее 10 мкм у верхового торфа должно составлять 55–65 %, у низинного – 45–55 %.

Анализ научно-исследовательских работ по добыче торфа в районах Крайнего Севера (г. Нарьян-Мар) [20–22] позволяет говорить о технологической и технической возможностях добычи кускового торфа поверхностно-послойным способом на торфяных месторождениях с вечной мерзлотой в условиях короткого полярного лета. Таким образом удовлетворяются местные коммунально-бытовые и промышленные потребности в топливе, а его стоимость снижается вследствие отсутствия дорогостоящей доставки. Наиболее приемлемыми торфодобывающими машинами в специфических условиях Крайнего Севера, согласно проведенным исследованиям [43], являются машины КДН-2 и МПДМ-1.

При этом для дальнейшего совершенствования технологических процессов и создания нового современного высокопроизводительного оборудования должны были проводиться научно-исследовательские работы. К сожалению, они не проводились.

В.Д. Копенкин [44] получил эмпирические зависимости, связывающие физико-механические свойства кускового торфа с показателем дисперсности:

$$M = (0,107 + 0,0252P_{250}) \cdot \Delta P_{250}, \quad (1.3)$$

где M – универсальный показатель изменения степени дисперсности торфа при переработке; P_{250} – содержание подситовых фракций в исходном торфе; ΔP_{250} – их приращение при переработке.

В.К. Фомин в работе [45], опираясь на исследования В.Д. Копенкина [44], предложил метод расчета механизма, обеспечивающего получение кускового торфа с заданной прочностью, и установил зависимость между условной поверхностью частиц S_0 (по С.Г. Солопову) и перерабатывающей способностью λ_{cp} (по Ф.А. Опейко [46]):

$$S_0 = 10\,000 \cdot \Delta m_c (1 + k), \quad (1.4)$$

где Δm_c – масса частиц фракцией 4 мкм и менее; k – коэффициент, зависящий от массы коллоидной фракции Δm_c в 1 г сухого вещества торфа;

$$\lambda_{cp} = \frac{\sqrt{2}}{2} (1 - \varepsilon) \frac{\omega}{Q} S_K, \quad (1.5)$$

где λ_{cp} – перерабатывающая способность шнекового механизма; ε – коэффициент скольжения торфа относительно внутренней поверхности кожуха и шнека; ω – угловая скорость вращения вала шнека; Q – производительность шнека; S_K – статический момент площади внутренней поверхности кожуха относительно оси шнека.

Полученная В.К. Фоминым зависимость имеет вид

$$S_\lambda = S_H \cdot \ln\left(\frac{\lambda}{a} + e\right), \quad (1.6)$$

где S_λ – величина условной удельной поверхности торфомассы после воздействия на торф механизма с интенсивностью λ_0 , см²/г; S_H – величина условной удельной поверхности торфомассы перед переработкой, см²/г; λ – величина перерабатывающего воздействия механизма на торф; e – основание натурального логарифма; a – коэффициент пропорциональности, зависящий от начальных физико-механических свойств торфа.

В.И. Цветков на основании исследований [47] пришел к выводу, что удельное давление формования зависит от длины мундштука. Оптимальное давление формования составляет 300–400 кПа. Его можно варьировать в зависимости от необходимой прочности готовой формованной продукции. Механическая прочность формованного торфа зависит от скорости истечения и длины формирующей насадки, которая должна составлять 3,5–4 внутреннего диаметра мундштука при

скорости истечения торфомассы до 2 м/с. Снижение влаги торфомассы при формовании требует увеличения необходимого давления формования.

И.И. Лиштван [48] теоретически и экспериментально обосновал влияние дисперсности, режима сушки, модифицирующих добавок и влагосодержания на прочность низинного кускового торфа. Оптимальное влагосодержание для обеспечения максимальной прочности низинного торфа при степени разложения более 30 % находится в диапазоне 4,3–5,0 г/г, а для верхового торфа со степенью разложения более 20 % – 4,0–5,1 г/г.

В работе Ф.Г. Сергеева [49] показано, что в торфе низкой дисперсности основное количество поглощенной влаги является капиллярно-впитанной. С увеличением дисперсности материала роль капиллярного механизма уменьшается, а влага поглощается преимущественно растительными остатками и продуктами распада. В работе также исследовано влияние размеров образцов мелкокускового торфа на величину водопоглощения. Наименьшей водопоглощающей способностью обладают образцы торфа с диаметром 40–60 мм.

В.М. Слыш [50] исследовал методы оценки механической переработки торфа и пришел к выводу, что степень перемешивания торфа в насадке круглого сечения зависит от геометрических размеров насадка, расхода торфа, давления в насадке и реологических свойств торфа.

Г.П. Вирясов [51] изучил влияние исходной влаги торфа и кратности его пропускания через перерабатывающий механизм на процесс диспергирования и дисперсность. Исследования проводились на лабораторном шнековом перерабатывающем механизме. Результаты и анализ данных эксперимента показали, что при снижении влагосодержания происходит увеличение диспергирующего эффекта. Была отмечена эффективность первого пропускания через диспергирующий механизм, которое привело к увеличению условной удельной поверхности на 44 %. Дальнейшая переработка лишь незначительно изменила степень дисперсности.

В исследовании В.И. Суворова [52] определен наилучший групповой состав торфа и показано, что наибольшей прочностью обладает кусок из верхового торфа. В результате выведены уравнения для определения основных свойств кускового торфа в зависимости от сырья:

прочность торфяного брикета при влагосодержании 32 г/г и степени разложения 45 % (кг/см²)

$$\sigma = 46,6 - 0,19 \cdot R - 1,060 \cdot A^c, \quad (1.7)$$

где R – степень разложения, %; A^c – зольность торфа, %;

прочность торфяного брикета при влагосодержании 32 г/г и степени разложения 53 % (кг/см²)

$$\sigma = 58,5 - 0,320 \cdot P_{<250} - 1,020 \cdot A^c, \quad (1.8)$$

где $P_{<250}$ – дисперсность торфа, мкм;

плотность торфяного брикета при степени разложения 46 % (кг/см³)

$$\gamma_{бр} = 1,033 + 0,00017 \cdot R + 0,0050 \cdot A^c. \quad (1.9)$$

Н.В. Гревцев [53] изучил вопросы интенсификации процесса сушки кускового торфа. Ученый предложил аэродинамические схемы расчета процесса активного вентилирования складочных единиц и расчет снижения влагосодержания торфа при естественном и принудительном воздухообмене.

Работа Б.Б. Воронкова [54] посвящена обоснованию требований к интенсивной технологии добычи высококачественного коммунально-бытового кускового топлива. Доказана целесообразность снижения средней влаги исходного сырья из верховых типов торфа низкой степени разложения путем предварительного механического обезвоживания в щелевых насадках при малых давлениях прессования. Теоретически и экспериментально обоснована возможность повышения плотности торфомассы перед ее формованием, увеличения прочности и плотности конечной продукции при замене метода диспергирования предварительным перемешиванием торфа в смесительной камере в течение 3–6 мин. Это обеспечивает формирование торфяного куска с наименьшими дефектами структуры, сохранение волокнистых фракций, создающих прочный пространственный каркас, и препятствует трещинообразованию при сушке.

Исследования О.В. Шамбера и других ученых [55] показали возможность повышения качества готовой продукции за счет досушки кускового торфа под навесом в контейнерах.

В работе В.И. Цветкова [56] установлено отсутствие линейной зависимости между силой и деформацией в дисперсных системах. Это объясняется тем, что энергия, сообщенная извне данным системам, не сохраняется в них полностью в упругой фазе, а с течением времени частично переходит в теплоту и рассеивается. Как и в работе [47], рекомендовано задавать конструктивные габариты мундштука, обеспечивающие давление прессования 300–400 кПа с учетом скорости истечения торфомассы, чтобы обеспечить достаточное уплотнение во времени.

Научная работа А.Е. Афанасьева [57] посвящена изучению зависимости прочности кускового торфа от его физико-механических свойств. Проведенные лабораторные исследования позволили установить взаимосвязь между прочностью куска при одноосном сжатии и плотностью его скелета, а следовательно, характеристиками его структуры.

В работах [15, 58] В.К. Фомин исследовал широкий спектр вопросов, связанных с установлением закономерностей и разработкой научных

принципов построения технологического процесса, выбором основных характеристик технологических схем и оборудования по производству формованного торфа. Особенности состояния гуминовых кислот в верховом и низинном торфе требуют различных физико-химических и технологических методов управления структурными свойствами формуемой торфомассы, поэтому для торфа верхового типа рекомендовано механическое диспергирование и перемешивание. Для низинного торфа необходимо проводить механическое диспергирование и перемешивание в объемно-напряженном состоянии, обеспечивающем разрушение полостей разлагающихся клеток растений, сгустков гуминовых кислот и их равномерное распределение по объему формуемой торфомассы.

Определено, что структурные и реологические свойства торфомассы достаточно полно характеризуются показателями: степенью разложения, дисперсностью, содержанием влаги, плотностью и предельным напряжением сдвига. Управление ими в сочетании с режимами и технологией сушки позволяет прогнозировать получение продукции с заданными физико-механическими свойствами при рациональных затратах энергии на переработку и формование. Выявлено, что в процессе добычи кускового торфа в зависимости от способа экскавации формуемая торфомасса имеет значительные колебания по влагосодержанию. Торфомасса с повышенным содержанием влаги обладает меньшей структурной прочностью, что при сушке способствует интенсивной капиллярной усадке, компактному агрегатированию и повышению плотности по сравнению с торфом пониженного влагосодержания одинаковой дисперсности.

Конструктивные, кинематические и энергетические характеристики формующе-перерабатывающих устройств в значительной степени определяются прочностными и реологическими свойствами торфа, характеризуемыми величиной напряжения сдвига (τ). В процессе производства кускового торфа механическое диспергирование является наиболее ответственной операцией, определяющей качество готовой продукции, так как дисперсность торфомассы характеризует физико-механические свойства готовой продукции и имеет высокие корреляционные связи. Установлено, что определенным значениям влагосодержания соответствуют свои оптимальные величины дисперсности формуемой торфомассы, при которых наступает максимум прочности. На основании анализа экспериментальных данных при разработке новых технологических схем и оборудования по добыче кускового торфа на залежах верхового типа рекомендовано принимать дисперсность и влагосодержание формуемой торфомассы в диапазонах 450–570 м²/кг и 5,65–3,5 кг/кг соответственно. Производство кускового торфа щелевым способом с совмещением полей добычи, сушки и уборки приводит к появлению сухой крошки, пересыханию верхнего слоя залежи.

Отсюда – рост неоднородности состава формуемой торфомассы по содержанию размера фракций и влаги, а следовательно, ее структурно-реологических свойств, что способствует снижению прочности готовой продукции на 20 % и увеличению водопоглощаемости на 20–25 %.

На основе совокупности выполненных исследований обоснована характеристика рабочего состава формуемой торфомассы, оцениваемая комплексным показателем, включающим степень разложения, дисперсность, содержание влаги, коэффициент приведенной гумификации, коэффициент концентрации гидрофобных компонентов. Решена задача качественной оценки состава торфа. Процесс диспергирования осуществляется в результате деформирования торфа за пределами упругих деформаций, т.е. после перехода из равновесного состояния в вязкопластическое течение. Полнота использования перерабатывающей способности устройств различна в зависимости от качественной характеристики исходного торфа. Выведены математические зависимости по определению перерабатывающей способности применительно к наиболее распространенным механическим устройствам: пластимеру Беловидова, шнековой фрезе, шнековой (напорной) фрезе для целевой экскавации, цилиндрической фрезе с чашечными ножами, штифтовой фрезе, дисковой фрезе, дисковому прессу, шиберному формователю. Выявленные закономерности взаимодействия различных перерабатывающих устройств с торфом и полученные зависимости позволяют решать вопросы управления диспергированием, а в зависимости от свойств исходного сырья и требований по качеству готовой продукции – выбирать наиболее рациональные конструктивные решения и режимы работы исполнительных органов машин по переработке и формованию торфа.

Таким образом, при переработке торфа с начальной дисперсностью менее $300 \text{ м}^2/\text{кг}$ необходимо предусматривать минимум две ступени переработки, а при дисперсности более $300 \text{ м}^2/\text{кг}$ целесообразна переработка в одну ступень. Физическая модель энергоемкости процесса разрушения представлена сопротивлением упругих деформаций и вязкопластического течения, выраженного величиной обобщенной удельной относительной деформации при предельно-напряженном состоянии торфа. На основании исследования энергоемкости переработки торфа установлено, что для большинства механических устройств при переходе от равновесного состояния к вязкопластическому течению деформируемый материал выходит из зоны активного воздействия, величина упругой деформации при этом не превышает единицы. Полученная автором аналитическая зависимость позволяет при проектировании оценивать торфоперерабатывающее устройство по величине удельного расхода энергии и определять нагрузочные характеристики для прочностных расчетов его элементов. Установлено,

что эффективность производства кускового торфа в значительной степени определяется технологически обоснованными затратами энергии на единицу выпускаемой продукции, полнотой использования мощности энергетической установки, массой агрегата и оборудования и их фактической производительностью. Дисперсность торфомассы принята в качестве основного параметра при выборе качества куска, технологических показателей производства продукции и степени перерабатывающего воздействия экскавирующе-перерабатывающих и формирующих устройств. Чтобы создать продукцию высокого качества, необходимо обеспечить совмещение направления выстилки куска с направлением движения машины, а также неразрывность и постоянство скорости в течении вязкопластического потока торфомассы от напорно-перерабатывающего устройства до камеры формования, плавную укладку сформованных кусков на поле сушки. Прочность на сжатие – параметр, характеризующий качество готовой продукции, т.е. сохранность куска при уборке и транспортировании. Выполненный комплекс экспериментальных и теоретических исследований служит основой для разработки методов управления процессом производства формованной торфяной продукции заданных качественных характеристик.

В работе Л.В. Копенкиной [59] показано, какие этапы развития прошла техника для добычи кускового торфа (от ручных орудий до комплексов машин). Определена периодизация развития по уровню технологии и механизации. Выполненные в работе систематизация и обобщение ретроспективных данных способствовали обоснованию основных направлений дальнейшего развития торфяной техники.

Специалистами Калининского политехнического института доказана эффективность организации сушки кускового торфа в однослойном расстиле на сетках, поднятых над залежью на высоту 0,5 м. Когда влага достигает 70 %, торфяные куски имеют необходимую прочность, обеспечивающую возможность выполнения механических операций. При такой влаге можно снять кусковой торф с сеток и уложить в контейнеры под навесом. Применение технологии с теневой досушкой под навесом и естественной вентиляцией подсеточного пространства происходит наиболее эффективно [60].

Максимальная интенсивность испарения выявлена у смесей, содержащих около 20 % слаборазложившегося торфа, что подтверждает структурные особенности смесей и активную водопроводящую роль волокон, сохранивших собственную структуру [61]. Чем выше уровень диспергирования материала, тем раньше наступает насыщение смеси высокомолекулярными соединениями, особенно гуминовыми веществами, способствующими цементации структуры торфа при сушке. В процессе механического воздействия на торф происходит обволакивание грубодисперсных частиц слаборазложившегося торфа хорошо

гумифицированной коллоидной составляющей другого торфа. При этом смесь приобретает свойства торфа более высокой степени разложения или приближается к нему по своим параметрам.

С.Н. Гамаюнов считает, что комплексной характеристикой кускового торфа, обуславливающей его физико-механические свойства, является плотность скелета, которая зависит от структуры торфа и отражает степень дисперсности материала. Между кубическим корнем из величины прочности кускового торфа и прочностью скелета существует линейная зависимость [62]:

$$\sigma^{1/3} = a \cdot \gamma_c + b, \quad (1.10)$$

где σ – прочность кускового торфа; a и b – экспериментальные коэффициенты; γ_c – плотность скелета торфа.

А.Е. Афанасьев и другие исследователи [63] пришли к выводу, что кусковой торф является конкурентоспособным коммунально-бытовым топливом для Тверского региона взамен привозного угля. Такой торф уступает углю по теплотворной способности на 19 %, при этом показатели зольности в среднем составляют 5 %, а у угля – 27 %. Наилучшим (с точки зрения качества получаемой продукции и технико-экономических показателей) способом добычи кускового торфа на торфяных месторождениях всех типов является фрезформовочный способ. Для повышения качества торфа, получаемого с верховых и переходных месторождений, предлагается не производить складирование на полях добычи, а вывозить продукцию на централизованный склад.

В работе К.В. Фомина [64] рассматривается вопрос, связанный с необходимостью определения вероятностных характеристик изменчивости физико-механических свойств торфяной залежи, которые требуются при проектировании и расчете перерабатывающих и перемешивающих устройств, а также при анализе динамической нагруженности элементов привода и конструкции торфяных машин. В другой работе К.В. Фомина [65] ставится задача – выбрать оптимальные параметры машин для добычи кускового торфа. Основные критерии: минимум суммарной удельной энергоемкости рабочего процесса при получении максимального качества продукции, которое определяется ее прочностью, а также минимальная металлоемкость агрегата при соблюдении первого критерия. Полученные параметры являются основой для введения ограничений, применяемых при выборе других подсистем агрегата (привода, элементов конструкции, ходовой части).

В работе Л.Н. Самсонова и других ученых [66] изучаются вопросы механизированного производства кусковой подстилки, обновления технологии и технологического оборудования по производству кускового торфа.

А.Е. Афанасьев и О.В. Пухова [67] исследовали возможности получения кускового торфа с высокими физико-механическими

свойствами и пришли к выводу, что необходимо изменять степень дисперсности и начальную влагу формования, а также управлять процессом структурообразования в процессе сушки в зависимости от сырьевой базы.

Из исследования Н.И. Гамаюнова и С.Н. Гамаюнова [68] следует, что наиболее прочные куски торфа получаются из композиций, состоящих из торфов различных типов, видов и степени дисперсности. Определенное сочетание грубодисперсных и высокодисперсных фракций способствует образованию более прочных композиций.

В работе Б.Ф. Зюзина [69] получено уравнение, в котором определяется зависимость коэффициента пластичности в любой точке характеристики процесса переработки. Уравнение имеет вид

$$a_i = 38,37 \left(\frac{WS_i}{\gamma_i} \right)^{3,29}, \quad (1.11)$$

где a_i – коэффициент пластичности исходного торфа; W – влагосодержание, кг/кг; S_i – дисперсность м²/кг; γ_i – плотность, кг/м³.

Автором подтверждено влияние дисперсности, влаги и плотности исходного сырья на закономерности процесса диспергирования под воздействием механических устройств.

В.И. Горячевым и другими исследователями доказана целесообразность применения местного торфяного топлива [70] и предложен технологический комплекс по производству кускового топливного торфа [71, 72]. С целью сокращения энергозатрат и эксплуатационных издержек требуется круглогодичный технологический процесс, имеющий ряд особенностей:

применение комбинированной сушки. В весенне-летний период для сушки кусков используется энергия солнца и ветра, а для круглогодичной работы – поля стилки и сушки торфяных кусков, расположенные на суходоле с дренажной системой, позволяющей быстро и эффективно отводить атмосферные осадки в водоем;

генерация топочных газов для досушки производится на линии этого же комплекса;

компактное размещение нескольких линий на одной производственной площадке способствует снижению расходов на транспорт;

процессы добычи и переработки разделены по времени и месту.

Главным достоинством комплекса, по мнению авторов, является надежность производства качественного торфяного топлива с меньшими эксплуатационными и теплоэнергетическими затратами [73].

А.А. Терентьев, В.И. Суворов [74] на основании исследований [27, 28, 32, 33, 36–38, 42, 44–46, 48, 75, 76] о структуре и прочностных свойствах кускового торфа пришли к выводу, что для получения качественной продукции из всех видов торфа необходимо комплексное

воздействие на исходное сырье путем диспергирования, перемешивания, физико-химического модифицирования.

Общий анализ научно-исследовательских работ показал, что б о льшее их количество, а именно 66 %, направлено на определение параметров и условий повышения качества готового коммунально-бытового торфяного топлива за счет определения оптимальных значений влаги, дисперсности, вида и типа исходного сырья. Часть работ (18 %) посвящена решению вопроса об интенсификации процессов сушки кускового торфа методами оптимальной ворочки и принудительного обдува фигур сушки. В работах, связанных с повышением качества кускового торфа за счет применения различных инноваций в формующем оборудовании (18 %), рассматривались варианты использования существующих технологий для определенных условий добычи. В связи с вышесказанным можно сделать вывод о том, что недостаточно изученными остаются вопросы о режимах формования – скорости вращения шнека, шаге витков шнека, соотношении площадей живого сечения напорной трубы и мундштука. Это делает направление такого исследования актуальным.

Что касается работ по исследованию работы шнековых механизмов в целом, то их достаточно много в различных отраслях производства.

В монографии М.В. Соколова и других авторов [77] рассмотрены вопросы автоматизированного проектирования и расчета шнековых механизмов для переработки полимерных материалов.

В работе Д.В. Тимофеевой и других исследователей [78] определены основные зоны работы шнека (рис. 1.27) и изучены свойства материала в этих зонах. По результатам работы создана конструкция шнекового пресс-экструдера для производства пищевых продуктов. Выбор пал на одношнековый механизм в связи с большей производительностью и надежностью в работе, низкой стоимостью и простотой конструкции.

Исследованию работы шнековых прессов в строительстве посвящена работа В.И. Григорьева [79]. Ее целями были повышение эффективности работы шнекового пресса и уменьшение энергоемкости при формовании глиняных кирпичей пластическим способом за счет уменьшения сил трения между формируемой массой и внутренней поверхностью корпуса пресса. В рамках исследования разработаны теоретические закономерности движения глиняной массы в шнековом прессе при различных условиях формования, структурная схема и конструкция шнекового пресса, а также математическая модель по определению оптимальных геометрических параметров элементов системы очистки внутренней поверхности корпуса при условии максимальной производительности шнека и при минимальных удельных энергозатратах.

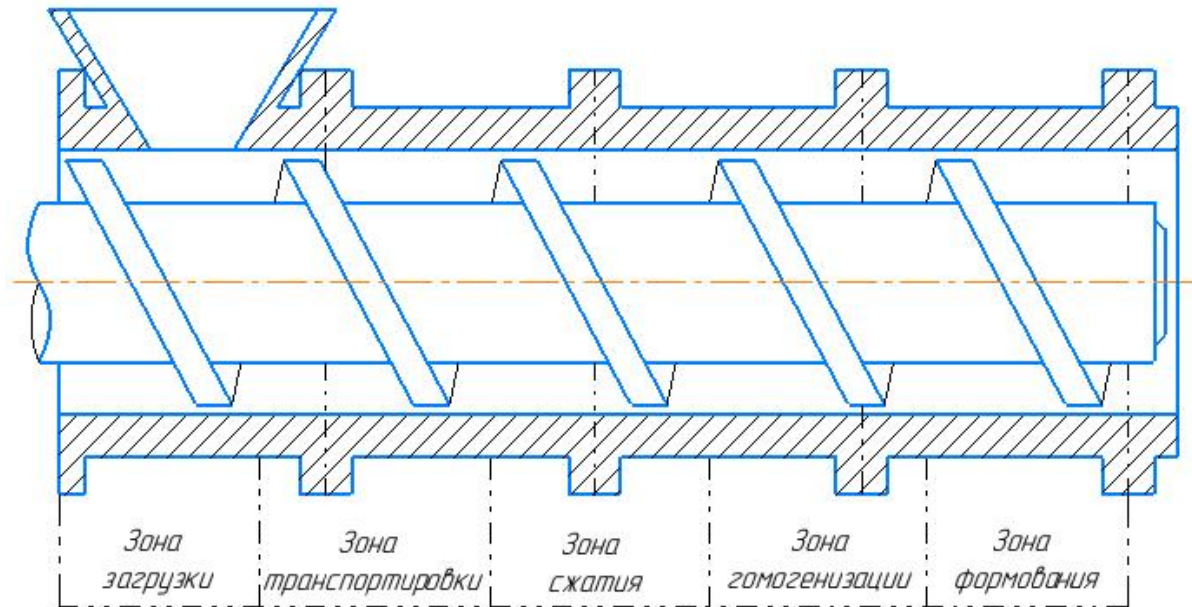


Рис. 1.27. Рабочий узел шнековой камеры пресс-экструдера

В работе [80] обоснованы рациональные параметры работы маслоотжимного двухшнекового пресс-экструдера. Проведен обзор особенностей конструкций современных двухшнековых пресс-экструдеров, предложены и научно обоснованы параметры пресс-экструдеров для производства биодизельного топлива.

В источнике [81] представлена математическая модель расчета процесса вытяжки заготовок из пластифицированных шихт порошковых и композиционных материалов на шнековых прессах через оснастки, имеющие местное уменьшение площади сечения формующего канала оснастки:

$$\sigma_{тр} = S(1 + \sin\rho\cos 2\varphi_{тр}) + K\cos\rho 2\varphi_{тр}; \quad (1.12)$$

$$\tau_{тр} = \sin 2\varphi_{тр}(S\sin\rho + K\cos\rho), \quad (1.13)$$

где $\sigma_{тр}$ – нормальное к поверхности оснастки напряжение в материале; $\tau_{тр}$ – касательное напряжение в материале; S – максимальное сжимающее напряжение; $\varphi_{тр}$ – угол между поверхностью оснастки и максимальным сжимающим напряжением в материале у этой поверхности; ρ – угол внутреннего трения материала; K – коэффициент сцепления материала.

В работе [82] установлен оптимальный шаг шнека для шнекороторного малогабаритного снегоочистителя, который составил два радиуса окружности вращения шнека, при обеспечении минимальной энергоемкости и максимальной пропускной способности.

В работе [83] определены стадии прессования сырья для получения топливных брикетов из биомассы по мере продвижения вдоль шнека, установлены зависимости между стадиями прессования, конструктивными

и технологическими параметрами устройства и процесса прессования, а также разработана методика расчета крутящего момента вала шнека и требуемой мощности. Автор работы пришел к выводу, что на последнем витке шнека происходит наибольшее уплотнение материала.

Вопросы экструдирования зерна рассмотрены в источнике [84]. С целью уменьшения энергоемкости процесса дано обоснование винтовой поверхности шнека переменного шага пресс-экструдера.

Анализ работ, касающихся шнековых механизмов, выявил общие принципы поведения материала во время формования в шнековом прессе. Особенности определяются свойствами формуемой массы. В связи с этим в каждом конкретном случае есть конструктивные и технологические нюансы, а главным направлением модернизации существующих конструкций шнековых прессов является повышение производительности при минимальных удельных энергозатратах.

1.5. Цель и задачи исследования

Целью настоящего исследования является обоснование рациональных параметров и режимов работы шнекового пресса фрезформовочной машины для добычи кускового торфа, определяющее снижение энергоемкости процесса диспергирования и формования при сохранении куском требуемых показателей плотности и прочности.

В связи с поставленной целью необходимо решить *задачи*:

провести анализ, систематизацию и обоснование требований к сырью, конструкции формующего агрегата и готовой продукции при добыче кускового торфа;

установить закономерности изменения энергоемкости формования торфа в зависимости от соотношения внутренних диаметров мундштука и напорной трубы, скорости вращения и шага витков шнека на стадии производства кускового торфа;

произвести оценку плотности кускового торфа в зависимости от режимов его производства фрезформовочной машиной на стадии кондиционной влаги;

разработать конструкцию и методику оценки показателя прочности кускового торфа на стадии кондиционной влаги;

установить рациональные параметры и режимы работы шнекового пресса при производстве кускового торфа по критериям показателей плотности и прочности;

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

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К СЫРЬЮ, ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ И ПАРАМЕТРАМ ШНЕКОВОГО ПРЕССА

2.1. Требования к исходному сырью

Торф – сложное природное геологическое органическое образование. С позиций физико-химических свойств он представляет собой многокомпонентную, многофазную, полидисперсную, высокомолекулярную систему с признаками полиэлектролитов и микромозаичной гетерогенности [85, 86]. Основой торфа являются растительные остатки твердых полимеров целлюлозной природы и продукты их биохимического распада, находящиеся в равновесии с водным раствором низко- и высокомолекулярных веществ. Неорганическая часть представлена в торфе компонентами торфяной воды, нерастворимыми минералами различного происхождения, адсорбционными образованиями, ионообменными органо-минеральными комплексами. Растения-торфообразователи, являющиеся исходным материалом, и широкий диапазон условий торфонакопления служат причиной многообразия состава и свойств торфа [85].

Для полного описания качеств торфяного сырья как массы для экструзии необходим достаточно большой набор различных параметров (значений вязкости в определенных режимах, пластичности, эластичности, периода релаксации, индекса течения, показателей формуемости и т.д.). Эти параметры, как правило, напрямую связаны с такими характеристиками торфа, как вид, содержание влаги, степень разложения, дисперсность и др. Как показывает опыт работы с самыми разнообразными дисперсными системами, зачастую важно не абсолютное значение тех или иных величин, а их взаимное соотношение [86].

К показателям формуемости торфяного сырья следует отнести:

- 1) легкое развитие пластических деформаций в торфомассе, т.е. способность принимать форму, заданную мундштуком;
- 2) сохранение приданной мундштуком формы без видимых дефектов с плотностью куска, обеспечивающей проведение последующих технологических операций (сушки, транспортирования, складирования);
- 3) минимизацию растрескивания сформованного куска, которое возникает в результате фазовых переходов, связанных с объемной усадкой торфа [2];
- 4) наличие волокон, определяющих структурный каркас будущего куска.

Качественный и количественный состав связанной воды изменяется с ростом степени разложения и дисперсности торфа. Преобладание внутриклеточной и капиллярной воды в крупных порах с малой энергией связи характерно для торфа низкой степени разложения. Торф высокой степени разложения содержит в основном иммобилизованную и осмотическую, а также капиллярную воду в мелких порах с более высокой энергией связи. Верховые виды торфа удерживают много влаги из-за высокой влагоемкости содержащихся в них растительных остатков и гидрофильных коллоидов, что затрудняет их обезвоживание и требует больших затрат энергии на обогащение по сравнению с низинными. Таким образом, из *природных факторов* на прочность кускового торфа влияют степень разложения, содержание гумуса и прочее; из *технологических* – степень переработки, степень уплотнения массы, размер куска и др. Катионный и групповой состав различных видов торфа в значительной мере является следствием торфообразовательных процессов, определяющих, наряду со степенью разложения R и дисперсностью, структурообразование в ходе получения куска. При этом данная взаимосвязь является важнейшим фактором в производстве кускового торфяного топлива [42].

Верховой торф средней и высокой степени разложения более пластичен, чем насыщенный катионами низинный. При десорбции влаги в его объеме отсутствуют условия, вызывающие неоднородное агрегирование и локальные перенапряжения: низкая диссоциация функциональных групп и повышенная подвижность макромолекул, образование плотных структур за счет непосредственного взаимодействия через функциональные группы.

В низинном торфе происходит компактно-коагуляционное образование структуры на основе взаимодействия через поливалентные катионы. Имеет место повышенное сопротивление усадке. Капиллярное давление развивается в центральных зонах сформованного куска, что вызывает неравномерный сдвиг и разрыв слабых связей между частицами торфа, а также появление микротрещин [86].

Прочность получаемого кускового торфа зависит от вида и типа торфа, зольности и степени разложения, а кроме того, от соотношения в торфе гуминовых и легкогидролизуемых веществ (табл. 2.1) [86].

Таблица 2.1

Классификация сырья по прочности
при производстве кускового торфяного топлива
в зависимости от соотношения гуминовых кислот
и легкогидролизуемых веществ

Категория прочности сырья	Соотношение гуминовых кислот и легкогидролизуемых веществ	Группа торфа и его характеристики (кислотность pH и степень разложения R)
Прочное	Менее 1,5	Верховой и переходный: моховая, травяно-моховая, травяная ($pH = 2,8-3,8$; $20 \leq R \leq 35$). Низинный: травяно-моховая, моховая ($pH = 2,8-3,8$; $10 \leq R \leq 20$)
Среднепрочное	1,5–2,0	Верховой и переходный: древесно-моховая, травяно-моховая, древесно-травяная ($pH = 3,8-4,5$; $35 \leq R \leq 50$). Низинный: травяная, древесно-травяная, древесно-моховая ($pH = 3,8-5,0$; $20 \leq R \leq 30$)
Низкопрочное	Более 2,0	Верховой и переходный: древесная, древесно-травяная ($pH = 4,5-5,2$; $R \geq 50$). Низинный: травяная, древесно-травяная, древесно-моховая, древесная ($pH = 4,5-5,5$; $R \geq 30$)

С точки зрения достигаемой прочности лучшим является верховой и переходный торф со степенью разложения 20–35 % и низинный торф со степенью разложения 10–20 %. Увеличение степени разложения ведет к ухудшению прочности получаемого кускового торфа.

Весь опыт производства кускового торфа отражен в ГОСТ Р 51062-2011 [87], который определяет требования, предъявляемые к сырью для производства куска: зольность – не более 23 %; степень разложения для низинного торфа – не менее 15 %, верхового – не менее 20 %; засоренность посторонними горючими примесями (куски размером более 25 мм) для низинного торфа – не более 20 %, верхового – не более 10 %. Существуют также требования и по виду торфа для последующего производства куска (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Виды торфа для производства куска

Вид торфа	Тип залежи		
	Верховой	Переходный	Низинный
Осоковый		+	+
Осоково-гипновый			+
Гипновый		+	+
Сфагновый		+	+
Осоково-сфагновый		+	+
Шейхцериевый	+	+	
Сосново-пушицевый	+		
Пушицевый	+		
Пушицево-сфагновый	+		
Шейхцерицево-сфагновый	+		
Фускум	+		
Магелланикум	+		
Комплексный	+		
Сфагновый мочажинный	+		

Степень механической переработки, а также дисперсность неразрывно связаны с характеристиками исходного сырья, прежде всего с предельным напряжением сдвига [88]. При уменьшении влагосодержания торфа возрастает сопротивление сдвигу, поэтому следует ожидать более интенсивного роста дисперсности. На плотность формованного торфа влияют дисперсность, условия формования и исходное содержание влаги. У более диспергированного торфа на последней стадии сушки наблюдается интенсивный рост плотности. Изменение плотности в зависимости от дисперсности происходит при однократном пропускании торфа через перерабатывающее устройство. С уменьшением исходной влаги торфа происходит снижение конечной плотности куска, которую можно повысить путем использования активных формователей; оптимальным для мундштучного способа формования является исходное содержание влаги в диапазоне 82–84 %.

Прочность формованного торфа находится в пропорциональной зависимости от дисперсности. Перемешивание – необходимое условие получения качественного кускового торфа, поскольку происходит равномерное распределение неразложившейся части, являющейся арматурным каркасом будущей формованной продукции [86]. Механическая переработка торфа – это процесс разрушения твердой фазы упругопластической системы с переходом в вязкопластичное состояние [89]. Предварительная механическая переработка ведет к улучшению свойств формуемости торфа, при этом увеличивается кратность пропуска сырья через переработку. Тем не менее существует рациональный предел кратности, обусловленный достижением

неизменяющейся величины удельной поверхности – 6 000–7 000 см²/г [89, 90].

Теоретический нижний предел формуемости по влаге составляет 40–45 %, а реальный для существующих перерабатывающих механизмов – 78–80 % [91].

Верховой торф средней и высокой степени разложения более пластичен, чем насыщенный катионами низинный. При десорбции влаги в его объеме отсутствуют условия, вызывающие локальные перенапряжения. В низинном же торфе происходит структурообразование на основе взаимодействия через поливалентные катионы, в центральных зонах куска развивается повышенное давление, что способствует образованию микротрещин [33]. Таким образом, с точки зрения формуемости наилучшим торфом является верховой. Многочисленные исследования показали, что он должен иметь начальное содержание влаги $w = 82–84$ % и степень разложения $R = 25–35$ %.

2.2. Требования к готовой продукции

Требования к готовому кусковому коммунально-бытовому топливу можно условно разделить на две группы:

обеспечение требуемой теплотворной способности;

сохранение куском формы, приданной ему мундштуком.

Обеспечение требуемой теплотворной способности определяется плотностью кускового торфа на стадии кондиционной влаги при отсутствии микродефектов и трещин после формования и сушки.

Сохранение целостности формы, заданной мундштуком, связано с отсутствием крошимости и прочностью на изгиб, позволяющей проводить последующие технологические операции при производстве кускового торфа.

Существует несколько методов определения плотности кускового торфа через объем:

для куска правильной формы – путем измерения размеров;

если кусок не имеет правильной формы – с помощью волюминометра, методом гидростатического взвешивания или путем засыпки мелким песком [8].

Наиболее простым является объемно-весовой метод определения размеров, который осуществляется путем измерения размеров и массы куска с последующим вычислением плотности [92].

Волюминометр – это цилиндрический сосуд с сообщающейся мерной трубкой. Сосуд заполняется обезвоженным керосином. В волюминометр помещают предварительно пропитанный в керосине и взвешенный образец кускового торфа и по разности отметок уровней жидкости в мерной трубке определяют объем образца, а в последующем и

плотность. Обезвоженный керосин применяется в связи с полным отсутствием набухания в нем кускового торфа даже при длительном хранении, что повышает точность определения внешнего объема [92, 93]. Существует также волюминометр Зегера, работающий по принципу вытеснения жидкости (закона Архимеда) и представляющий собой стеклянный сосуд с широким горлом и притертой пробкой, в которую вставлена небольшая трубка с шарообразным вздутием. В нижней части сосуда расположены два крана: один предназначен для спуска жидкости; второй соединен посредством резиновой трубки с бюреткой, имеющей в верхней части шарообразное вздутие, а на конце бюретки находится резиновая трубка [93].

Метод засыпки в песок – разновидность волюминометрического метода, в котором вместо керосина применяется песок (очищенный, высушенный и просеянный через сита с размером ячеек 0,25 мм) [92].

Известен метод определения плотности с помощью радиобура, производящего регистрацию рассеянного гамма-излучения, которое возникает в результате взаимодействия первичных гамма-квантов источника с электронами окружающей среды. Измерение плотности основано на предположении о пропорциональности между количеством электронов в окружающей среде и плотностью вещества [92].

Прочность кускового торфа можно установить путем испытания на гидравлическом прессе либо посредством стандартного метода определения крошимости.

Существующие конструкции гидравлических прессов для испытания образцов на изгибную прочность имеют некоторые недостатки:

наличие динамических нагрузок во время испытаний при использовании ручного привода;

наличие удара в связи невозможностью регулирования скорости движения штока гидроцилиндра;

низкая точность получаемых результатов изгибной прочности по давлению жидкости в системе вследствие инерционности гидросистемы.

Крошимость – это способность кускового торфа частично превращаться в крошку под влиянием погодных условий и под действием механических нагрузок. Крошимость определяется путем загрузки испытываемых образцов во вращающийся барабан с треугольной формой в поперечном сечении и разделения кусков размером менее и более 25 мм [92, 93]. Механическая прочность кусков на истирание (истираемость) Π_u устанавливается по формуле

$$\Pi_u = \frac{m_2}{m_1} \cdot 100 \% , \quad (2.1)$$

где m_1 – масса кусков торфа до загрузки в барабан, кг; m_2 – масса кусков торфа после испытания (без мелочи, крошки), кг.

Плотность кускового торфа (определяющая его теплотворную способность) на стадии кондиционной влаги при отсутствии микродефектов и трещин после формования и сушки должна составлять 750–1 100 кг/м³ [94].

Прочность на изгиб кускового торфа должна составлять не менее 3,5–4,5 МПа для того, чтобы можно было проводить дальнейшие технологические операции [94].

2.3. Конструкции шнековых прессов и их рабочие органы

Как показал анализ существующих конструкций фрезформовочных машин, лучшим с точки зрения простоты конструкции и качества получаемого результата является шнековый формователь. В настоящее время в промышленности наиболее широкое применение получили одношнековые прессы, в качестве определяющих параметров которых принимаются диаметр шнека D и отношение длины рабочей части шнека к его диаметру L/D . Модели отечественных одношнековых прессов универсального назначения для переработки термопластов изготавливаются с отношением длины рабочей части шнека к диаметру L/D , равным 20, 25 и 30. Для специальных шнековых машин отношение L/D может быть увеличено до 35 или 40. Наибольшее распространение получили машины с отношением L/D , равным 20 и 25, однако в последнее время намечается тенденция к увеличению отношения L/D до 30–35, что в совокупности с увеличением угловой скорости шнека приводит к существенному повышению производительности шнековых машин (прессов) [77]. Шнековые механизмы востребованы в производствах для получения формованной продукции из различного сырья.

Одношнековые варианты получили более широкое распространение по сравнению с двухшнековыми в связи с надежностью и простотой конструкции, уменьшенными нагрузками на подшипники передачи и привода, а также невысокой стоимостью и проверенной технологией. В одношнековом варианте исполнения весь канал шнека заполнен материалом, поэтому возникают более благоприятные условия для формования, чем в двухшнековом экструдере [78].

В шнековых прессах одновременно сочетаются несколько функций: транспортирование материала, его резание, перетирание, раздавливание, сжатие, гомогенизация и формование, которые осуществляются при продвижении торфа от загрузочной воронки к формующему мундштуку. В результате подобных механических воздействий переработанный торф принимает такие свойства, как аморфность и пластичность, а после формования и сушки у него появляются прочность и высокая плотность. При этом торф, как и любой другой материал, попавший в загрузочную воронку шнекового пресса, постепенно продвигаясь по напорной трубе к

мундштуку, тщательно перемешивается, приобретает все большую однородность по дисперсности и влаге [95]. Производительность, необходимая мощность, удельный расход энергии и качество готового кускового торфа зависят (при прочих равных условиях) от степени переработки торфомассы [96, 97].

Конструкцию шнекового пресса фрезформовочной машины условно можно разделить на три зоны (рис. 2.1): загрузки, сжатия и формования.

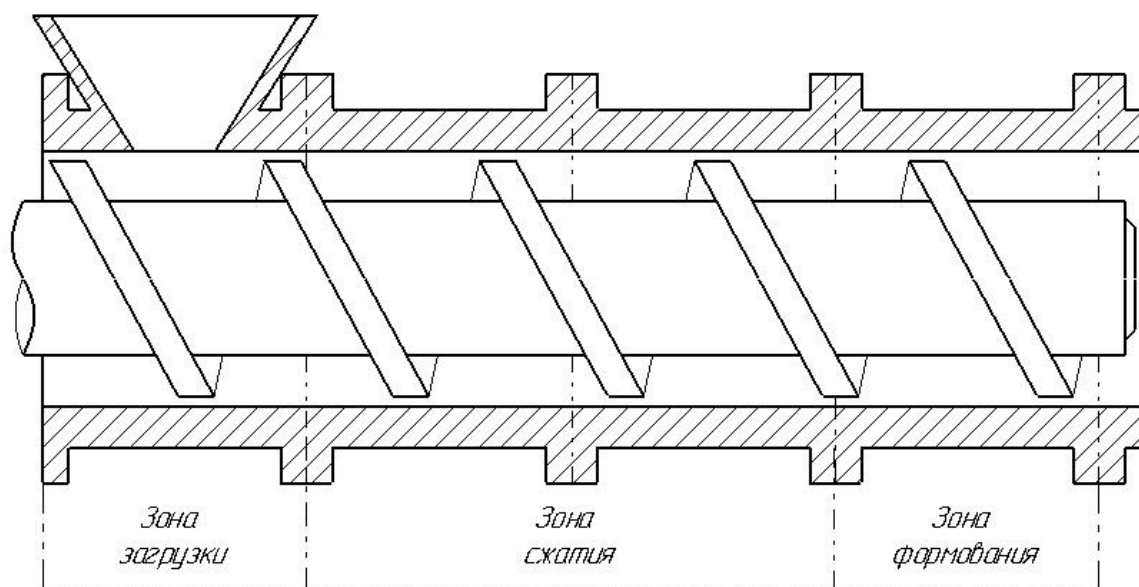


Рис. 2.1. Конструкция шнекового пресса фрезформовочной машины

Прочность формуемого материала (по данным источника [78]) начинает интенсивно расти в зоне загрузки, и этот процесс продолжается до определенной точки в зоне формования, а затем происходит затухание. Наибольший рост плотности материала наблюдается именно в зоне формования. Как правило, после шнека устанавливаются формующие мундштуки различной формы и диаметра, где происходит уплотнение и окончательное формирование кускового торфа.

Расположение мундштуков на фрезформовочной машине, как уже было отмечено в предыдущей главе, может быть осевое и радиальное (рис. 2.2).

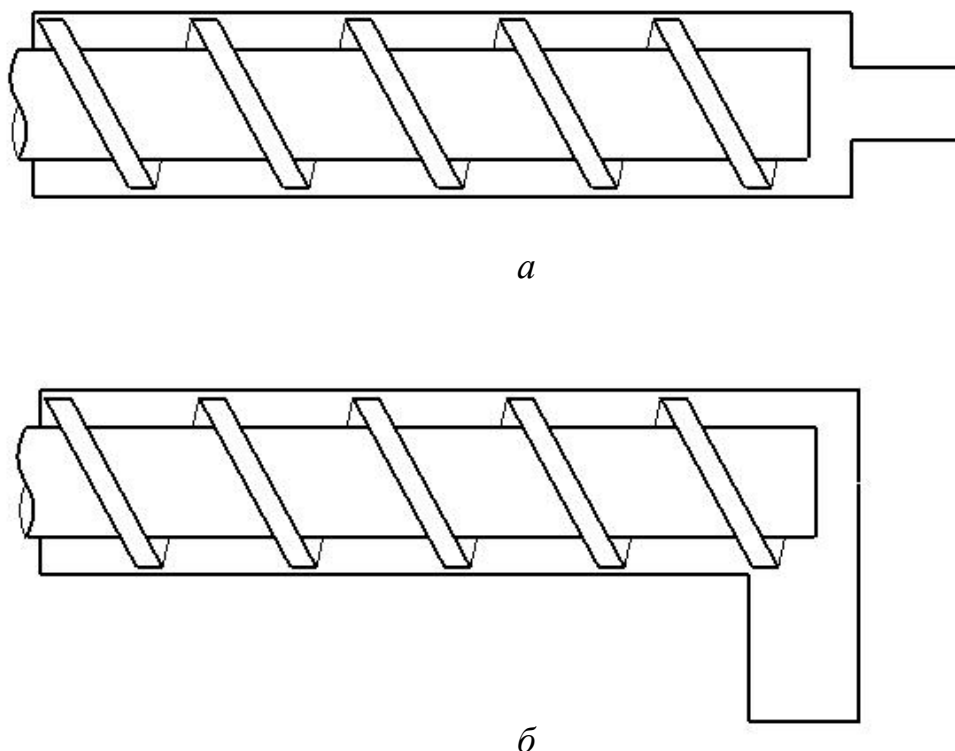


Рис. 2.2. Варианты расположения мундштуков фрезформовочной машины: осевое (а); радиальное (б)

Согласно формуле Ф.А. Опейко, напор, развиваемый шнеком [19, 98]:

$$\sigma = 4\pi \left(1 - \frac{2R}{3S}\right) \frac{L}{S} \tau, \quad (2.2)$$

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

По данным многочисленных исследований, зависимость напора, развиваемого шнеком, от шага витков шнека имеет параболическую форму с характерным экстремумом. Таким образом, максимальный напор может быть достигнут при условии

$$\frac{d\sigma}{dS} = 0. \quad (2.3)$$

Продифференцировав формулу (2.2) и приравняв производную к нулю, получим

$$\frac{d\sigma}{dS} = \left(-4\pi \frac{L}{S^2} + \frac{8 \cdot 2}{3} \pi \frac{L \cdot R}{S^3}\right) \tau = 0. \quad (2.4)$$

Из выражения (2.4) Ф.А. Опейко получил оптимальное соотношение радиуса R и шага S витков шнека:

$$S = \frac{4}{3} R. \quad (2.5)$$

На практике [12, 77, 78, 84] шаг витков шнека принимается в пределах от $\frac{1}{2}$ до $\frac{2}{3}$ его наружного диаметра $D_{ш}$. Следует также отметить, что, несмотря на значительное удорожание конструкции, очень хорошие результаты достигаются при использовании шнеков с переменным шагом [84]. В зоне загрузки, где наиболее выражены свойства транспортирования, оптимальным считается шаг витков $0,8D_{ш}$, а в зоне формования, где наибольшая осевая нагрузка приходится на витки, оптимальным считается шаг $0,5D_{ш}$.

Подставляя выражение (2.5) в формулу (2.2), получаем максимальный напор, развиваемый шнеком:

$$\sigma_{max} = 4\pi \frac{L}{\frac{4}{3}R} \left(1 - \frac{2R}{\frac{4}{3}R}\right) \tau = 4\pi \left(1 - \frac{6}{12}\right) \frac{3L}{4R} \tau = 2\pi \frac{3L}{4R} \tau = \frac{3}{2} \pi \tau \frac{L}{R} = \frac{3\pi\tau L}{D_{ш}} \cdot \quad (2.6)$$

Профессором С.Г. Солоповым в 1946 году для определения потерь напора в шнековых формующих устройствах стилочных машин был впервые применен гидродинамический метод, который показал адекватность реальным условиям при расхождении с опытными данными в пределах точности инженерных расчетов [99].

По мнению С.Г. Солопова, за основу проектирования формующего аппарата можно принять положения, разработанные для гидромеханики жидких и газообразных тел. Для движения жидкости или газа по трубопроводу необходимо оптимальное давление, чтобы преодолеть динамические и статические потери. Первые возникают от придания телу необходимой скорости, а вторые – от наличия местных сопротивлений по длине трубопровода [99].

Сопротивление формующего аппарата с радиальным расположением мундштука складывается:

- из сопротивления от трения в напорном шнеке;
- сопротивления повороту потока на 90° ;
- сопротивления от сужения в мундштуке.

Сопротивление формующего аппарата с осевым расположением мундштука складывается:

- из сопротивления от трения в напорном шнеке;
- сопротивления от сужения в мундштуке [99].

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

$$\sigma = \sigma_l + \sum \sigma_m + \sigma_v, \quad (2.7)$$

где σ_l – потери напора, создаваемого по длине трубопровода; σ_v – напор, необходимый для придания скорости торфомассе при выходе из мундштука.

Местные потери напора (с учетом формулы Вейсбаха [100]):

$$\sigma_M = \zeta_1 \frac{v^2 \rho g}{2g} = \zeta_1 \frac{v^2 \rho}{2}, \text{ Па}, \quad (2.8)$$

где ζ_1 – коэффициент местного сопротивления (в данном случае коэффициент сопротивления сужению); v – средняя скорость движения торфомассы после местного сопротивления (т.е. в мундштуке), м/с; ρ – средняя плотность торфомассы, кг/м³.

Потери напора, создаваемого по длине трубопровода, согласно формуле Дарси – Вейсбаха:

$$\sigma_l = \lambda \frac{l v^2 \rho}{d^2}, \text{ Па}, \quad (2.9)$$

где λ – коэффициент трения вязкопластичной среды о поверхность мундштука (или коэффициент Дарси); l – длина мундштука, м; d – диаметр мундштука, м [100].

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

$$\sigma_v = \frac{v^2 \rho}{2}, \text{ Па}, \quad (2.10)$$

где v – средняя скорость движения торфомассы как в мундштуке, так и при выходе из мундштука, м/с [100, 101].

Здесь необходимо сделать замечание: скорости движения торфомассы при входе в мундштук, в мундштуке и при выходе из него на самом деле различаются. Поскольку это различие несущественное, нами принято допущение об их равенстве средней скорости движения торфомассы.

Таким образом, общее уравнение потерь напора, развиваемого шнеком, следующее:

$$\sigma = \sigma_l + \sum \sigma_M + \sigma_v = \lambda \frac{l v^2 \rho}{d^2} + \frac{v^2 \rho}{2} \sum \zeta + \frac{v^2 \rho}{2} = \frac{v^2 \rho}{2} (\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta + 1), \text{ Па}, \quad (2.11)$$

где $\sum \zeta$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений на всем пути торфомассы.

Математическая модель определения напора для осевого расположения мундштука с сужением примундштучной части будет иметь вид

$$\sigma = \frac{3\pi\tau L}{D_{ш}} = \frac{v^2 \rho}{2} (\lambda \frac{l}{d} + \zeta_1 + 1), \text{ Па}. \quad (2.12)$$

В случае радиального расположения мундштука местные потери напора будут складываться из потерь напора на поворот потока торфомассы на 90° и потерь напора на сужение мундштука:

$$\sum \sigma_M = \sigma_{пов} + \sigma_{суж} = \zeta_2 \frac{v^2 \rho}{2} + \zeta_1 \frac{v^2 \rho}{2} = \frac{v^2 \rho}{2} (\zeta_2 + \zeta_1), \quad (2.13)$$

где ζ_2 – коэффициент сопротивления повороту; $\sigma_{пов}$ – потери напора на повороте потока; $\sigma_{суж}$ – потери напора от сужения.

В таком случае общее уравнение потери напора примет следующий вид:

$$\sigma = \sigma_l + \sum \sigma_m + \sigma_v = \sigma_l + \sigma_{пов} + \sigma_{суж} + \sigma_v = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2 \rho}{2} + \zeta_2 \frac{v^2 \rho}{2} + \zeta_1 \frac{v^2 \rho}{2} + \frac{v^2 \rho}{2} = \frac{v^2 \rho}{2} (\lambda \frac{l}{d} + \zeta_1 + \zeta_2 + 1). \quad (2.14)$$

Математическая модель определения напора для радиального расположения мундштука с сужением примундштучной части будет иметь вид

$$\sigma = \frac{3\pi\tau L}{D_{ш}} = \frac{v^2 \rho}{2} (\lambda \frac{l}{d} + \zeta_1 + \zeta_2 + 1), \text{ Па.} \quad (2.15)$$

Анализ уравнений (2.11) и (2.14) показывает, что в любом случае потери напора выше в шнековом прессе с радиальным расположением мундштука.

Тангенциальное напряжение на внутренней поверхности кожуха τ и коэффициент трения вязкопластичной среды (торфомассы) о внутреннюю поверхность мундштука λ 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 у различных степеней переработки [19].

Переходная зона между мундштуком и напорной частью шнека может иметь форму резкого, постепенного и плавного сужения (рис. 2.3) [100].

В случае любого сужения коэффициент местного сопротивления

$$\zeta_1 = \xi \left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right), \quad (2.16)$$

где S_1 – площадь живого сечения напорной трубы шнека; S_2 – площадь живого сечения мундштука; ξ – коэффициент смягчения сужения.

Для резкого сужения (рис. 2.3а) коэффициент смягчения сужения равен 0,5. В случае постепенного сужения (рис. 2.3б) величина коэффициента смягчения сужения зависит от центрального угла сужения β , определяется по экспериментальному графику (рис. 2.4), причем минимальные потери напора наблюдаются в случае $\beta = 40\text{--}60^\circ$ при коэффициенте смягчения сужения $\xi = 0,1$. При плавном сужении (рис. 2.3в) величина ξ находится в зависимости от отношения r/d (r – радиус скругления боковых стенок). Коэффициент смягчения сужения ξ достигает минимума ($\xi = 0,03$) при $r/d = 0,2$, а затем остается практически постоянным (рис. 2.5) [100].

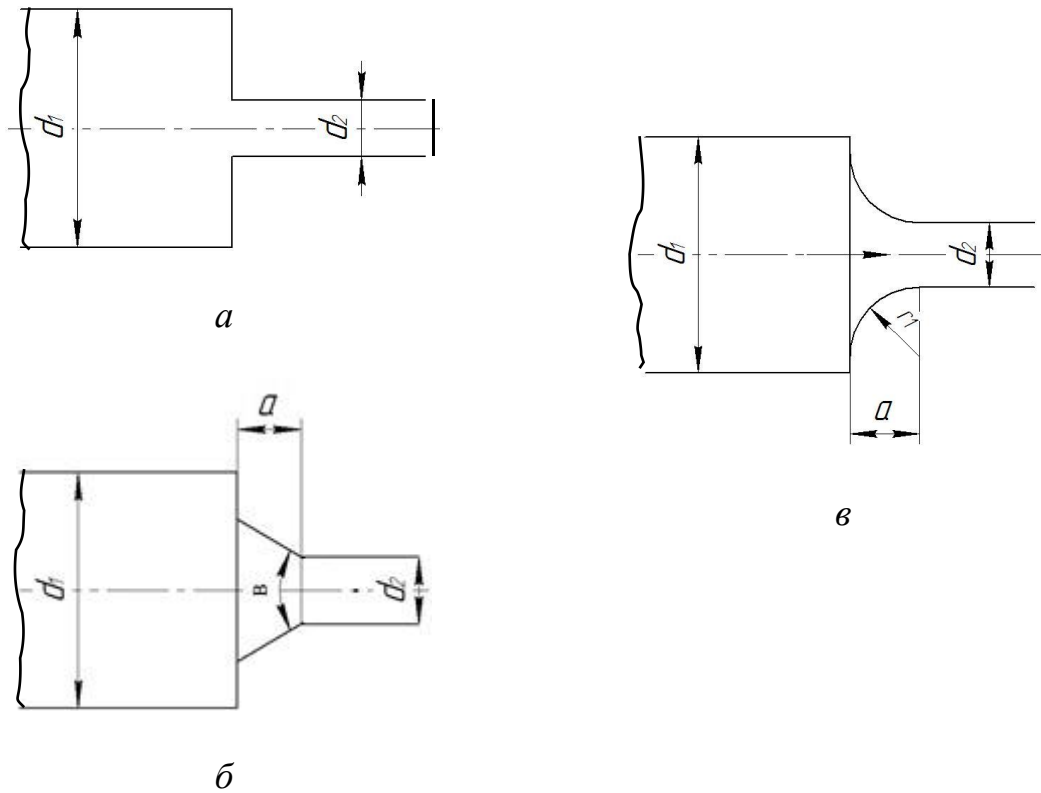


Рис. 2.3. Варианты переходной части напорной трубы и мундштука:
 резкое сужение (а); постепенное (б); плавное (в);
 d_1 – внутренний диаметр трубы шнекового пресса;
 d_2 – диаметр мундштука

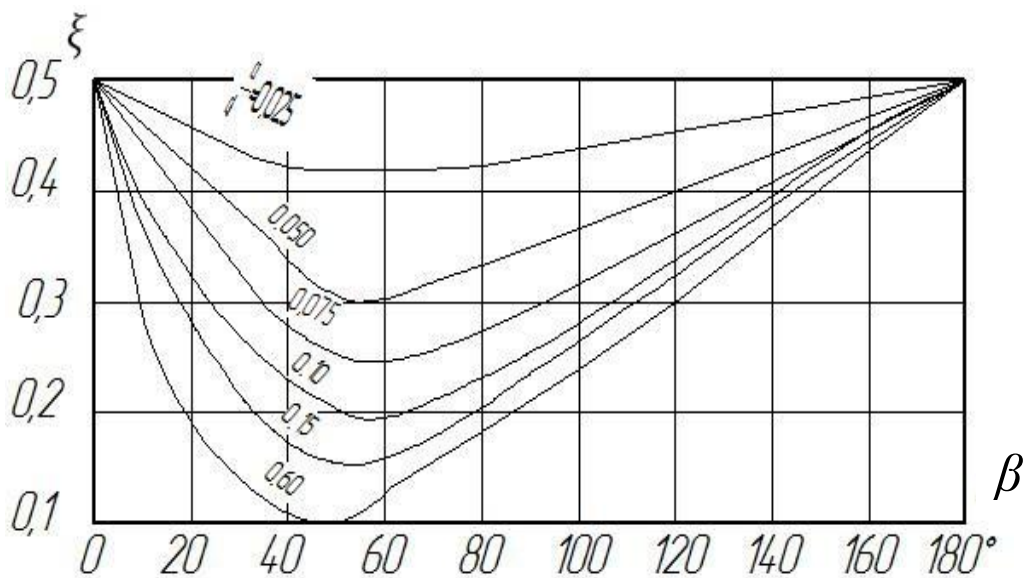


Рис. 2.4. Экспериментально полученная зависимость коэффициента смягчения сопротивления ξ от центрального угла сужения β в случае постепенного сужения для круглых цилиндрических труб

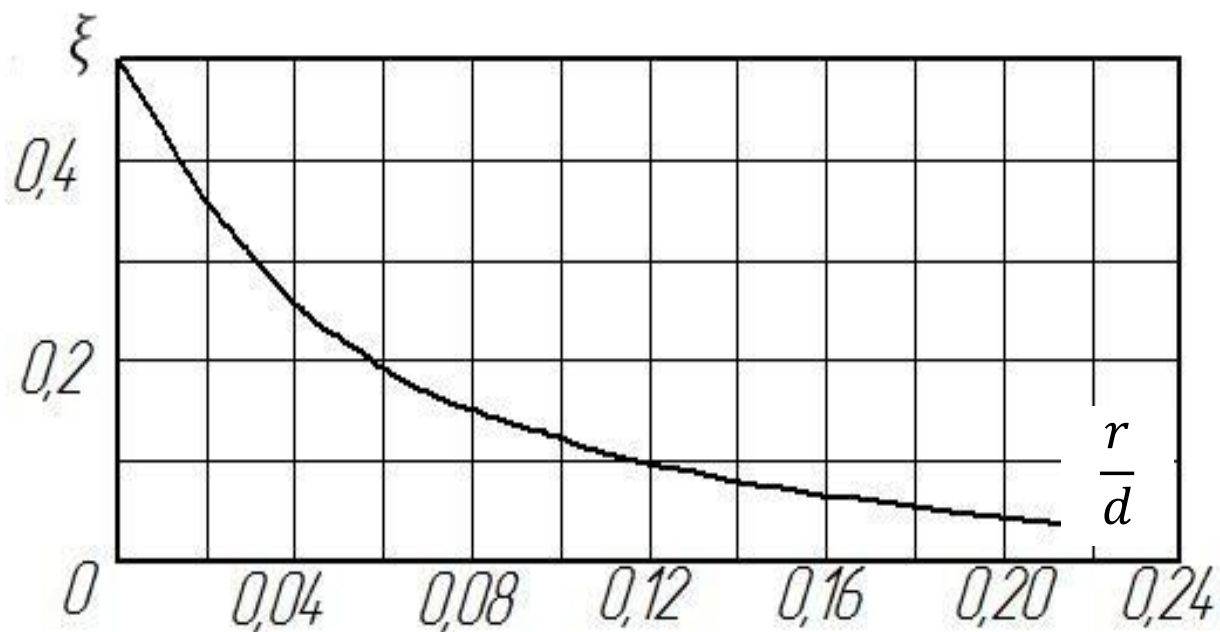


Рис. 2.5. Экспериментально полученная зависимость коэффициента смягчения сопротивления ξ от отношения r/d в случае плавного сужения для круглых цилиндрических труб

По форме плавного перехода примундштучной части различают мундштуки сферического и тороидального сечения (рис. 2.6а, б).

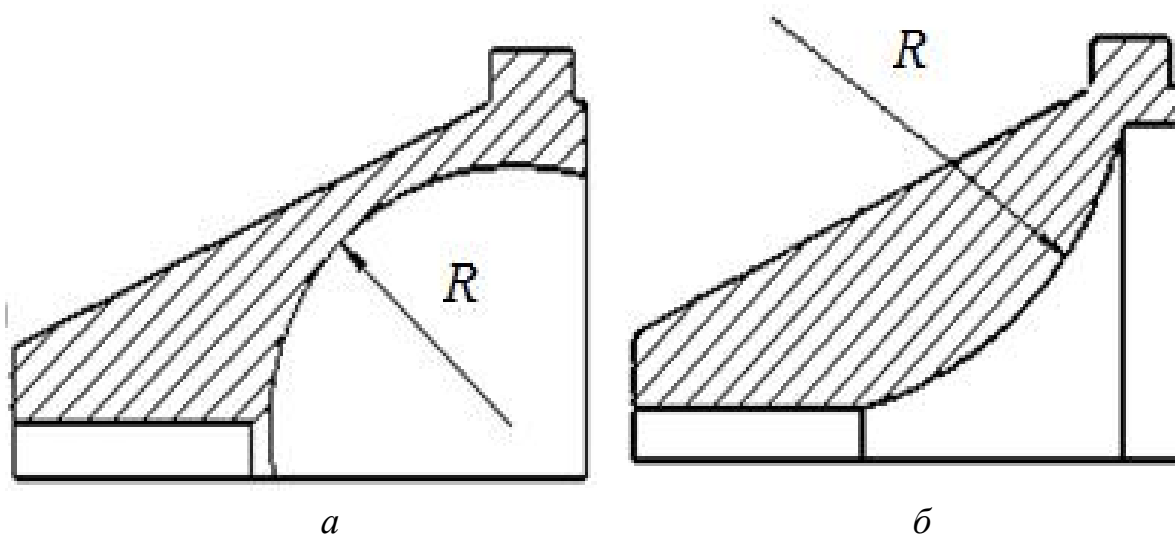


Рис. 2.6. Варианты исполнения плавного перехода примундштучной части фрезеровочной машины: сферическое (а); тороидальное (б)

По экспериментальным данным [102], тороидальная форма плавного перехода примундштучной части в мундштук обеспечивает минимальную

энергоёмкость процесса прессования. С другой стороны, тороидальная форма описывается радиусом окружности и является той же сферой. Кроме того, применение переходной примундштучной части пресса тороидального сечения может улучшить качество формируемой торфомассы. Одновременно с этим будет происходить снижение угловой и линейной скоростей движения торфомассы, что может негативно сказаться на производительности машины в целом. Следует отметить, что изготовление сферических и тороидальных переходов намного увеличит стоимость машины. В связи с этим наиболее рациональным решением следует считать применение конических (постепенных) переходов.

Оптимальная длина мундштука l исследована в работах В.И. Цветкова и В.К. Фомина [56, 65]. Данными авторами отмечено, что для улучшения качества формирования мундштука должен работать полной длиной. Было экспериментально установлено, что при скорости истечения торфомассы до 2 м/с оптимальной является длина мундштука $l = 3-4d$, где d – внутренний диаметр мундштука.

Любые сопротивления, кроме потерь напора по длине, уменьшают рабочую длину мундштука. Их вид напрямую определяет характер движения и линии тока торфомассы в мундштуке (рис. 2.7).

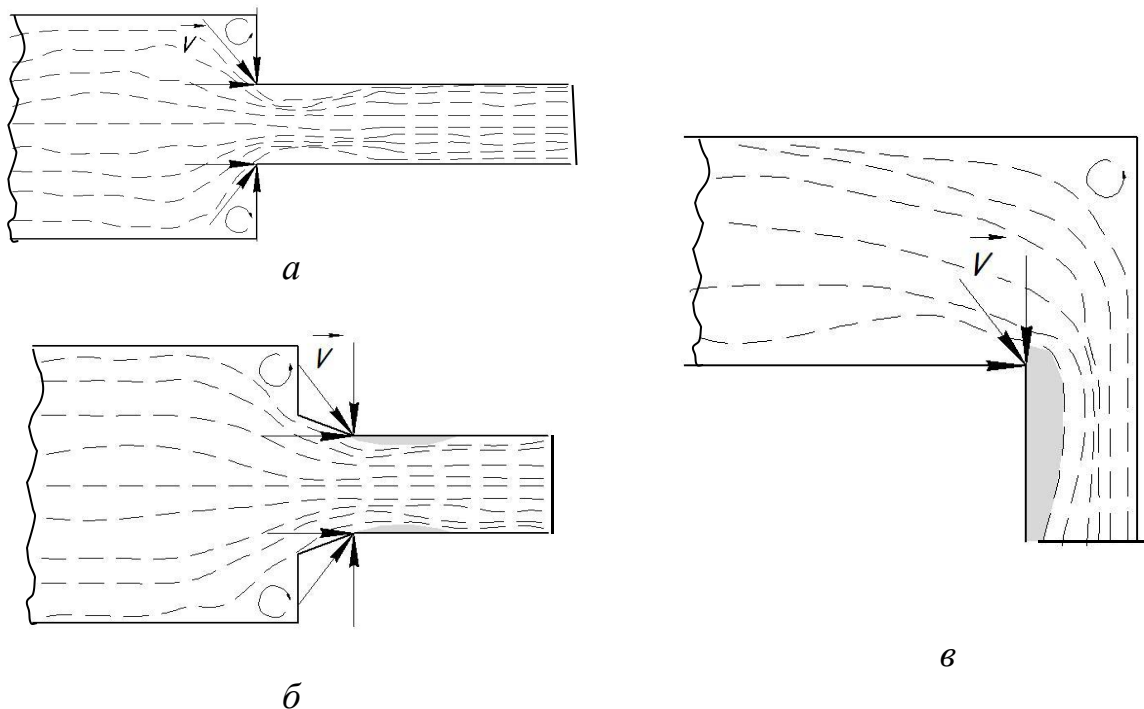


Рис. 2.7. Траектория движения частиц (линии тока торфомассы) в зависимости от расположения мундштука: осевое расположение с резким сужением (а); осевое расположение с постепенным сужением (б); радиальное расположение с резким сужением (в)

В зависимости от варианта расположения мундштука (осевого или радиального) меняется физика процесса истечения торфомассы. Как видно из рис. 2.7, мундштук работает большей длиной при плавном переходе из напорной трубы. При любом сужении (см. рис. 2.7) в начальном участке мундштука формируются зоны с пониженной плотностью и давлением торфомассы, а в торцевых внутренних углах напорной трубы создаются зоны завихрения и налипания торфомассы. Максимальные потери рабочей длины мундштука наблюдаются в случае поворота на 90° , т.е. в случае радиального расположения мундштука, при коэффициенте сопротивления для мундштука круглого сечения $\zeta = 1,1$ [100].

Формование обеспечивается сопротивлением по длине мундштука, а все местные сопротивления снижают напор. Любое сужение (или поворот) снижает рабочую длину (зону действия) мундштука и увеличивает местные сопротивления. Таким образом, наиболее рациональным с точки зрения простоты исполнения, обеспечения качества формования и минимума энергозатрат является осевое расположение мундштука (или мундштуков (рис. 2.8)) с коническим переходом от напорной трубы к мундштуку при центральном угле сужения $\beta = 40\text{--}60^\circ$.

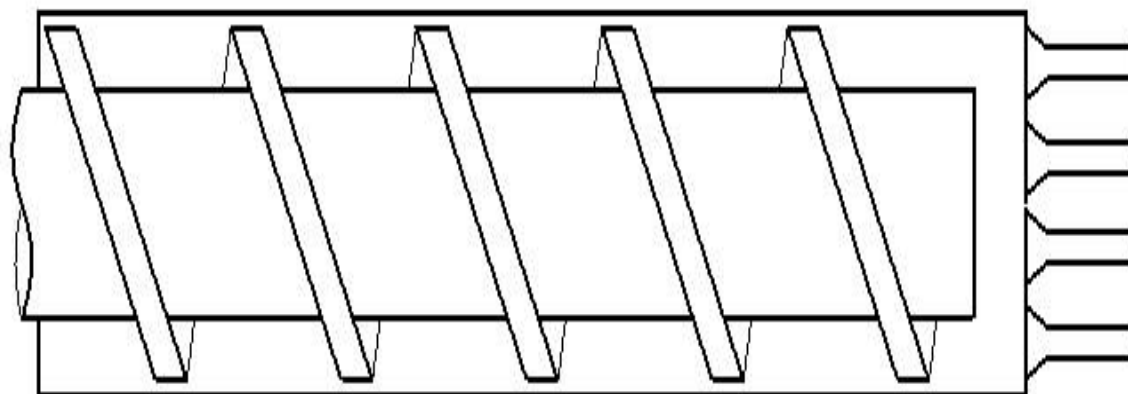


Рис. 2.8. Конструктивное исполнение постепенного перехода примундштучной части многопоточных мундштуков осевого расположения фрезформовочной машины для добычи кускового торфа

Фрезформовочные машины для стилки кускового торфа внаброс с осевым расположением многопоточных мундштуков и постепенным (коническим) переходом примундштучной части в мундштуки (см. рис. 2.8) обеспечат сокращение потерь напора при производстве кускового торфа, а соответственно, снизят энергоемкость процесса формования.

2.4. Выводы по главе

1. С точки зрения обеспечения качества формования лучшим является верховой торф с начальным содержанием влаги 82–84 % и степенью разложения 25–35 %.

2. Плотность кускового торфа на стадии кондиционной влаги при отсутствии микродефектов и трещин после формования и сушки должна составлять 750–1 100 кг/м³.

3. Прочность на изгиб кускового торфа должна составлять не менее 3,5–4,5 МПа для обеспечения возможности проведения дальнейших технологических операций.

4. Выведены аналитические модели, устанавливающие характер изменения максимального напора, создаваемого формующим шнеком при осевом и радиальном расположении мундштука.

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

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШНЕКОВОГО ПРЕССА ДЛЯ ФОРМОВАНИЯ КУСКОВОГО ТОРФА

3.1. Задачи экспериментального исследования

Поскольку в настоящее время в России ведутся работы над проектированием различных модификаций фрезформовочных машин, данное экспериментальное исследование представляется актуальным. Его задачами являются:

отработка методики оценки энергетических параметров формования в связи с физическими и геометрическими параметрами формующего агрегата;

нахождение зависимости между энергоемкостью формования и качественно-количественными характеристиками продукции;

отработка методики оценки прочностных характеристик кускового торфа;

определение связи плотности и прочности кускового торфа, полученного методом формования шнековым прессом;

изыскание способов снижения энергоемкости диспергирования и формования торфа без потери куском прочностных характеристик (с помощью подбора рациональных параметров и режимов работы агрегата).

3.2. Описание опытной лабораторной установки, методика проведения исследований

Выше уже отмечалось, что доля проанализированных работ, посвященных проблематике повышения качества кускового торфа за счет внедрения инноваций, модернизации техники и ее эксплуатации в рациональных режимах, составляет всего 18 %. Недостаточно изученными на сегодняшний день остаются вопросы о режимах формования: скорости вращения, шаге витков шнека, соотношении площадей живого сечения напорной трубы и мундштука.

Для решения вышеуказанных вопросов был проведен лабораторный эксперимент по формованию комплексного верхового торфа со степенью разложения $R = 25\text{--}30\%$ при среднем содержании влаги $w = 83,44\%$ [97, 103–105]. Содержание влаги определялось по стандартной методике путем высушивания навески торфа с помощью анализатора влажности (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Определение влаги исходного сырья прибором ЭЛВИЗ 2С

Поскольку в фрезеровочной машине во время экскавации из залежи торф перед попаданием в шнековый пресс измельчается, опытные образцы торфяного сырья были предварительно измельчены дополнительным диспергированием с отсевом древесных включений. Формование проводилось на лабораторной установке (рис. 3.2), схема которой представлена на рис. 3.3 [106].



Рис. 3.2. Лабораторный шнековый пресс

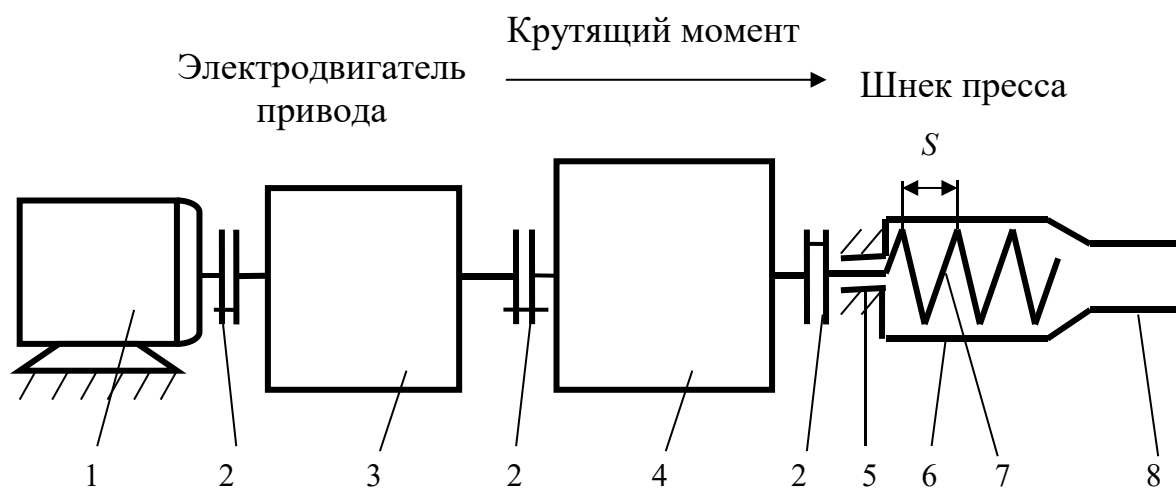


Рис. 3.3. Схема лабораторного шнекового прессы:

- 1 – электродвигатель; 2 – муфта соединительная; 3 – коробка передач;
 4 – редуктор цилиндрический; 5 – опорные подшипники шнека;
 6 – напорная труба (цилиндрический корпус); 7 – шнек;
 8 – цилиндрический мундштук

Асинхронный электродвигатель переменного тока мощностью 10 кВт с частотой вращения ротора 1 480 об/мин, пятискоростная коробка передач и цилиндрический редуктор с передаточным отношением $i_{ред} = 4,25$ позволяли изменять частоту вращения шнека от 55,81 до 429,86 об/мин (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Общее передаточное отношение привода лабораторного шнекового пресса $i_{общ}$ и число оборотов винта n_v , об/мин, при различных включенных передачах (1–5) на коробке передач с передаточным отношением i_n

Параметры	$i_1 = 6,24$	$i_2 = 3,32$	$i_3 = 1,90$	$i_4 = 1,0$	$i_5 = 0,81$	$i_{ох} = 6,70^*$
$i_{общ}$	26,520	14,110	8,075	4,250	3,443	28,475
n_v , об/мин	55,81	104,89	183,28	348,24	429,86	51,98

Примечание. * – литеры ОХ обозначают передаточные отношения и частоту вращения шнека при реверсном включении привода.

Лабораторный шнековый пресс был укомплектован тремя мундштуками с внутренним диаметром 52, 60 и 92 мм и двумя шнеками с шагом витков $S = 50$ и 110 мм (рис. 3.4).

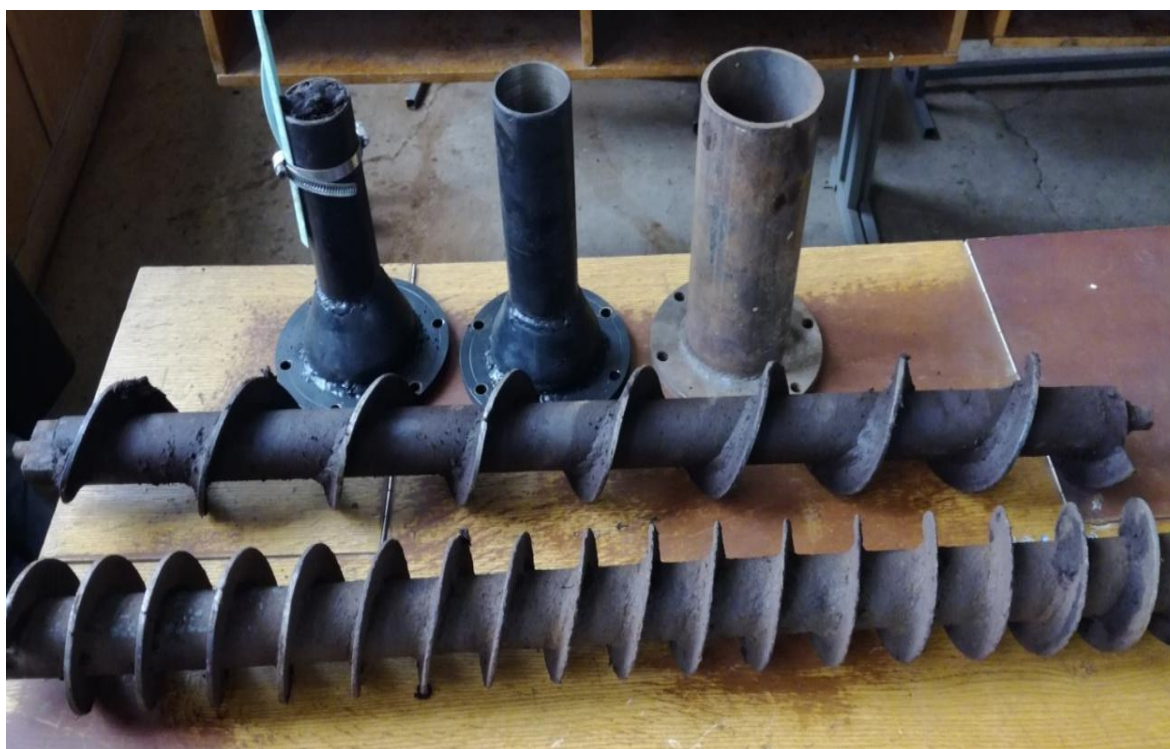


Рис. 3.4. Сменные мундштуки и шнеки для пресса

В ходе экспериментов проводилось исследование работы шнекового пресса в холостом и нагруженном состояниях на 5 режимах, соответствующих 5 различным скоростям в коробке передач. Вычисление мощности, необходимой для привода пресса на холостом ходу и под нагрузкой (N_{xx} и N , Вт, соответственно), производилось по зависимостям:

$$N_{xx} = 3UI_{xx}\cos\varphi; \quad (3.1)$$

$$N = 3UI\cos\varphi, \quad (3.2)$$

где U – напряжение в одной из фаз электродвигателя, В; I – сила тока в одной из фаз электродвигателя, А; $\cos\varphi$ – коэффициент мощности асинхронного двигателя, равный отношению активной мощности N , кВт, необходимой для совершения им полезной работы и преодоления механических потерь, к полной мощности N_3 , потребляемой электродвигателем из сети, кВт·А (для установленного на шнековом прессе двигателя $\cos\varphi = 0,88$).

Фиксация силы тока и напряжения производилась по блоку контрольных приборов (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Блок контрольных приборов

Полезная мощность N_p , Вт, определялась как разница полной мощности и мощности холостого хода:

$$N_p = N - N_{xx}. \quad (3.3)$$

Скорость выхода формованного торфа из мундштука v , м/с, оценивалась по прикрепленному к мундштуку шаблону длиной $L = 0,15$ м и секундомеру (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Процесс формования торфа

Производительность пресса Q , м³/с, рассчитывалась по формуле

$$Q = v \frac{\pi d^2}{4}, \quad (3.4)$$

где d – внутренний диаметр установленного мундштука, м.

Энергоемкость процесса диспергирования и формования A , Дж/м³, определялась по зависимости

$$A = \frac{N_{\pi}}{Q}. \quad (3.5)$$

После формования на различных режимах куски торфа были промаркированы, разложены в специальные кюветы и подвергнуты сушке в мягком теневом режиме в помещении (без прямого солнечного света) на протяжении 25 суток (рис. 3.7), т.е. до достижения среднего равновесного содержания влаги $w = 23,12$ %. Концентрация влаги

измеряется анализатором влажности для последующей оценки плотности и прочности торфа. Известно, что максимальная прочность кускового торфа наблюдается при объеме влаги, равном 20–30 % [94]. Контроль содержания влаги происходил через 1–2 суток.

Все опыты были проведены с пятикратной повторяемостью.



Рис. 3.7. Сушка кускового торфа в мягком режиме до достижения среднего равновесного содержания влаги

3.3. Оценка результатов расчета энергоёмкости производства кускового торфа

После проведенных расчетов и их анализа с отсевом промахов (см. прилож. А) были получены графические зависимости средней (по 5 опытам) энергоёмкости от частоты вращения шнека при различных

установленных мундштуках диаметром d и шнеках с шагом витком S (рис. 3.8, 3.9).

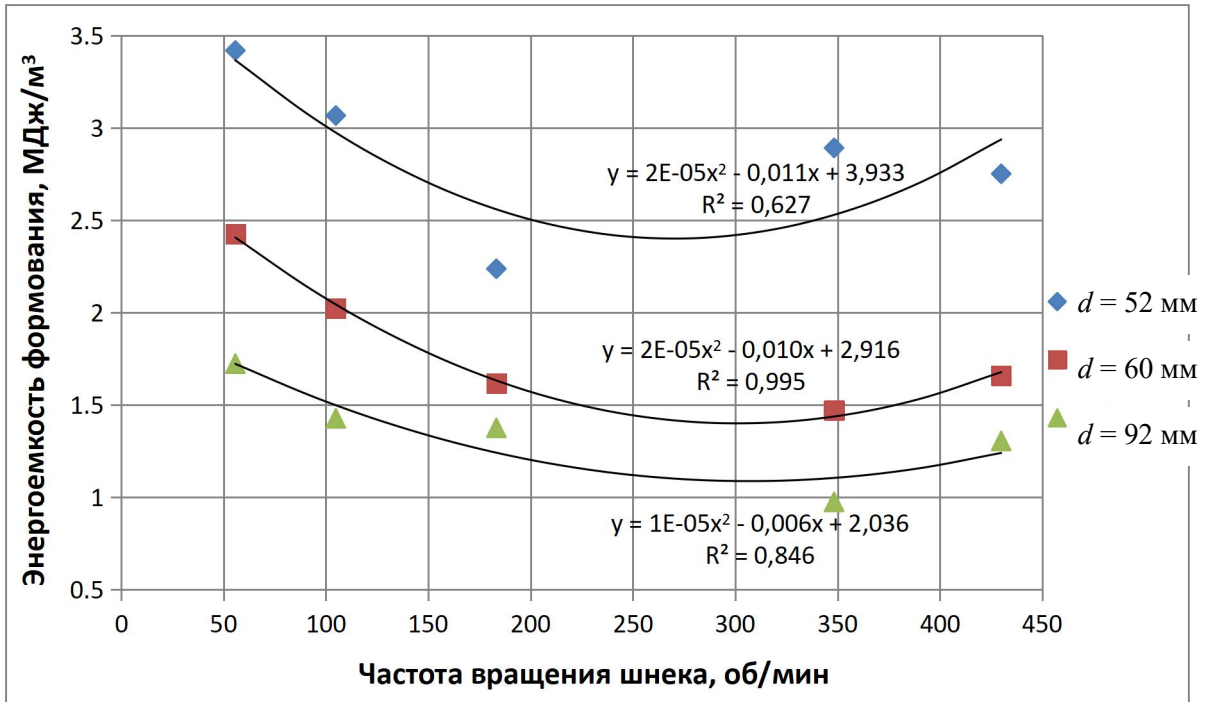


Рис. 3.8. Зависимость энергоемкости формирования от частоты вращения шнека с шагом витков $S = 110 \text{ мм}$ и от диаметра мундштука d

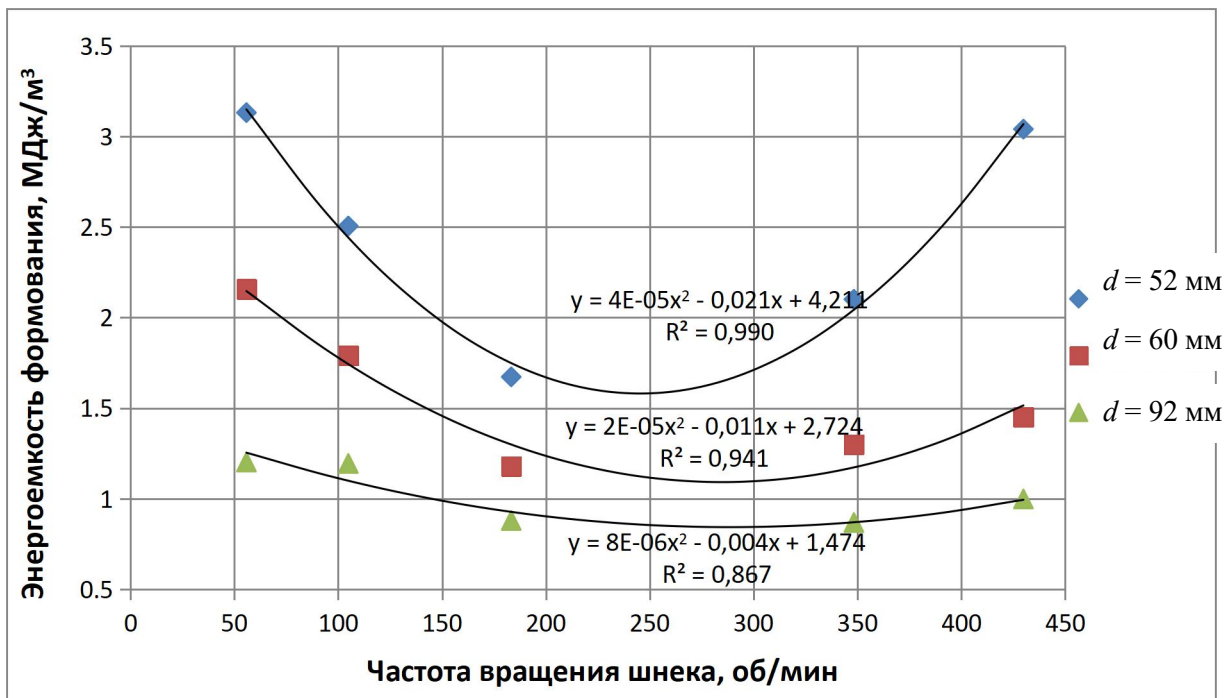


Рис. 3.9. Зависимость энергоемкости формирования от частоты вращения шнека с шагом витков $S = 50 \text{ мм}$ и от диаметра мундштука d

Для всех представленных зависимостей получены уравнения регрессии с коэффициентами детерминации R^2 .

По имеющимся данным для более удобного анализа построены зависимости энергоёмкости от частоты вращения шнека для различных диаметров установленных мундштуков при изменении шага витков шнека S (рис. 3.10–3.12).

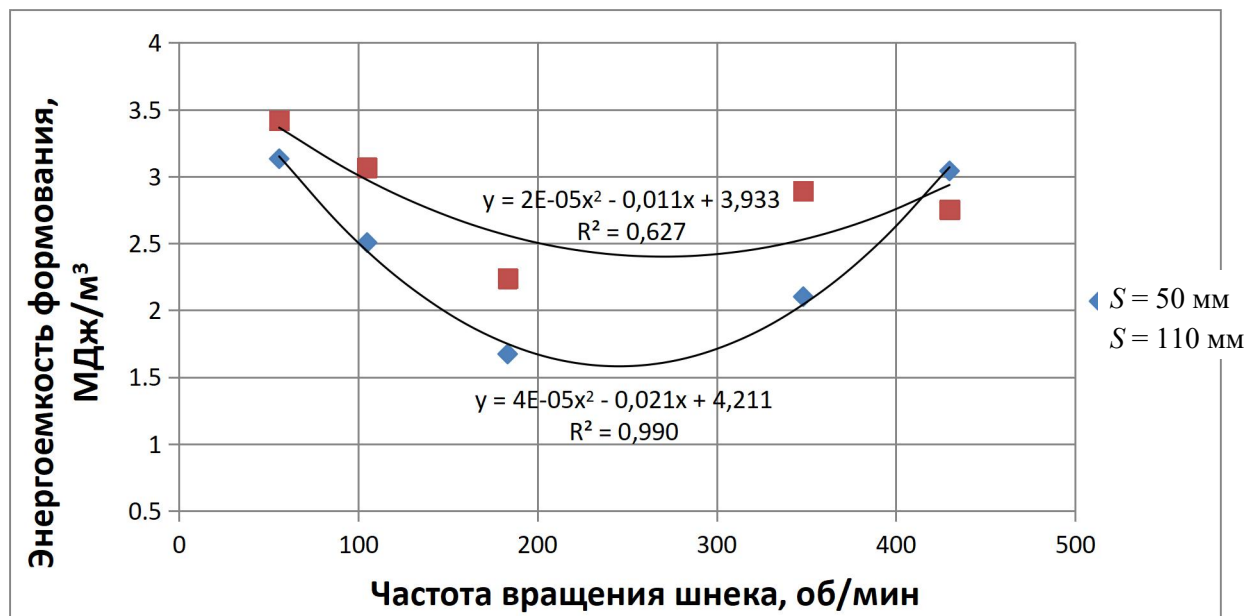


Рис. 3.10. Зависимость энергоёмкости формирования от частоты вращения шнека при диаметре мундштука $d = 52$ мм

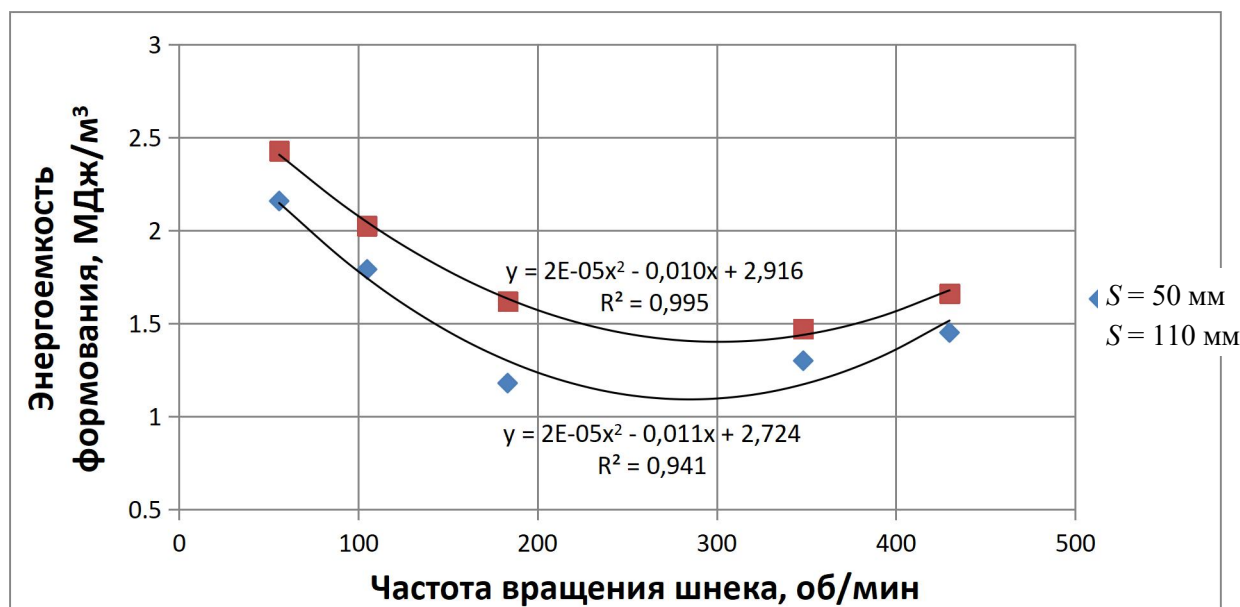


Рис. 3.11. Зависимость энергоёмкости формирования от частоты вращения шнека при диаметре мундштука $d = 60$ мм

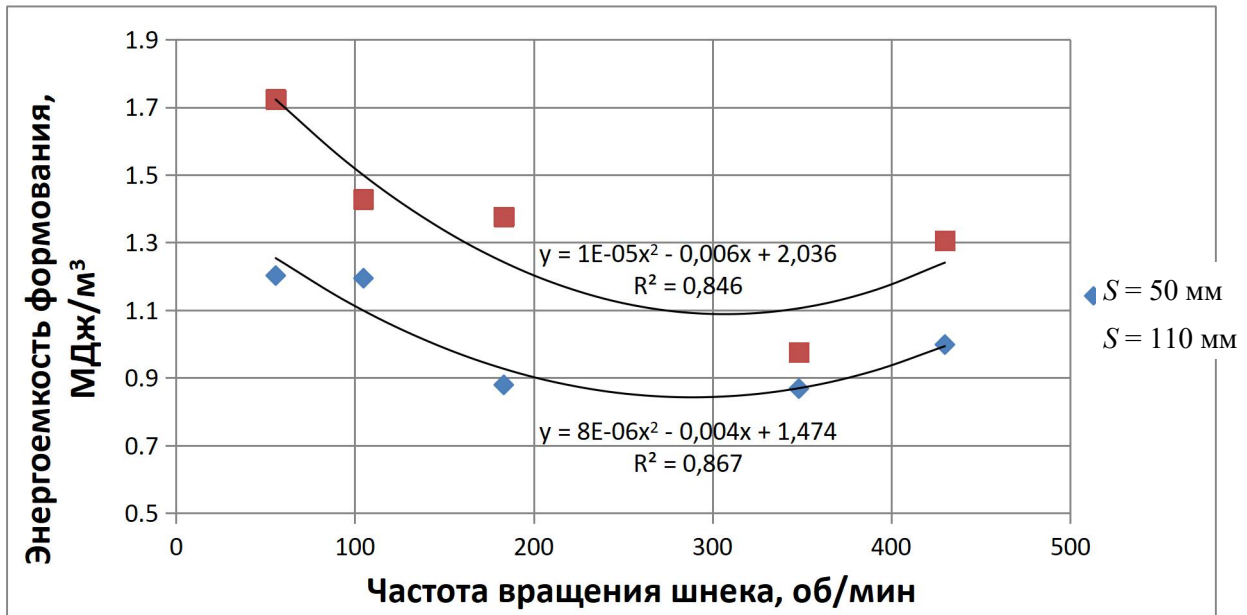


Рис. 3.12. Зависимость энергоемкости формования от частоты вращения шнека при диаметре мундштука $d = 92$ мм

Как видно из рис. 3.8–3.12, энергоемкость формования напрямую 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/м³. Минимальное ее значение во всех экспериментах приходится на диапазон скорости вращения шнека 220–320 об/мин, причем во всех случаях энергоемкость формования при использовании шнека с шагом витков $S = 110$ мм выше, чем при использовании шнека с шагом витков $S = 50$ мм.

Для оценки сходства или различия статистических показателей зависимостей (см. рис. 3.8, 3.9), которые подвержены влиянию случайных факторов, обусловленных разными значениями шага витков шнека ($S = 110$ мм и $S = 50$ мм), применялся метод проверки статистических гипотез [107, 108]. На начальном этапе была выдвинута нулевая гипотеза, состоящая в предположении, что генеральные средние исследованных зависимостей совпадают. При этом энергоемкость определяется общим для двух случаев набором факторов. Критериями сравнения служила статистика $|\tilde{v}|$ с учетом объемов выборок n_{110} и n_{50} , параметра c и числа степеней свободы f_{110} и f_{50} :

$$|\tilde{v}| = \frac{|\bar{A}_{110} - \bar{A}_{50}|}{\sqrt{\frac{1}{n_{110}}D_{110} + \frac{1}{n_{50}}D_{50}}}; \quad (3.6)$$

$$c = \frac{\frac{1}{n_{110}}D_{110}}{\frac{1}{n_{110}}D_{110} + \frac{1}{n_{50}}D_{50}}; \quad (3.7)$$

$$f_{110} = n_{110} - 1; \quad (3.8)$$

$$f_{50} = n_{50} - 1, \quad (3.9)$$

где \bar{A}_{110} и \bar{A}_{50} – средние значения энергоёмкости по двум выборкам; D_{110} и D_{50} – несмещённые оценки дисперсий по двум выборкам:

$$D_{110} = \frac{\sum (A_{i110} - \bar{A}_{110})^2}{f_{110}}; \quad (3.10)$$

$$D_{50} = \frac{\sum (A_{j50} - \bar{A}_{50})^2}{f_{50}}, \quad (3.11)$$

где A_{i110} и A_{j50} – точечные значения энергоёмкости при формировании шнеками с шагом витков 110 и 50 мм соответственно.

Сравнению были подвергнуты выборки значений энергоёмкости, полученные при формировании с мундштуками внутренним диаметром 52, 60 и 92 мм и шнеками с шагом витков 110 и 50 мм. В этом случае $n_{110} = n_{50} = 5$; $f_{110} = f_{50} = 4$. Расчёт статистических характеристик выборок сведён в табл. 3.2–3.4.

Таблица 3.2

Статистические характеристики энергоёмкости
формования торфа мундштуком диаметром $d = 52$ мм
и шнеками с шагом витков $S = 110$ и 50 мм

$A_{i110}, \text{МДж/м}^3$	$A_{i110} - \bar{A}_{110}$	$(A_{i110} - \bar{A}_{110})^2$
3,418 6	0,545 504	0,297 575
3,066 81	0,193 714	0,037 525
2,237 27	-0,635 826	0,404 274
2,891 43	0,018 334	0,000 336
2,751 37	-0,121 726	0,014 817
$\sum A_{110} = 14,365 48; \bar{A}_{110} = 2,873 096$		$\sum (A_{i110} - \bar{A}_{110})^2 = 0,754 527$
$D_{110} = 0,188 63$		
$A_{j50}, \text{МДж/м}^3$	$A_{j50} - \bar{A}_{50}$	$(A_{j50} - \bar{A}_{50})^2$
3,132 86	0,641 934	0,412 079
2,506 19	0,015 264	0,000 233
1,672 56	-0,818 366	0,669 723
2,101 32	-0,389 606	0,151 793
3,041 7	0,550 774	0,303 352
$\sum A_{50} = 12,454 63; \bar{A}_{50} = 2,490 926$		$\sum (A_{j50} - \bar{A}_{50})^2 = 1,537 18$
$D_{50} = 0,384 295$		

Таблица 3.3

Статистические характеристики энергоёмкости формирования торфа мундштуком диаметром $d = 60$ мм и шнеками с шагом витков $S = 110$ и 50 мм

$A_{i110}, \text{МДж/м}^3$	$A_{i110} - \bar{A}_{110}$	$(A_{i110} - \bar{A}_{110})^2$
2,426 71	0,586 904	0,344 456
2,023 81	0,184 004	0,033 857
1,618 18	-0,221 626	0,049 118
1,470 85	-0,368 956	0,136 129
1,659 48	-0,180 326	0,032 517
$\sum A_{110} = 9,199\ 03; \bar{A}_{110} = 1,839\ 806$		$\sum (A_{i110} - \bar{A}_{110})^2 = 0,596\ 077$
$D_{110} = 0,149\ 019$		
$A_{j50}, \text{МДж/м}^3$	$A_{j50} - \bar{A}_{50}$	$(A_{j50} - \bar{A}_{50})^2$
2,157 52	0,582 396	0,339 185
1,790 09	0,214 966	0,046 210
1,178 64	-0,396 484	0,157 200
1,299 05	-0,276 074	0,076 217
1,450 32	-0,124 804	0,015 576
$\sum A_{50} = 7,875\ 62; \bar{A}_{50} = 1,575\ 124$		$\sum (A_{j50} - \bar{A}_{50})^2 = 0,634\ 388$
$D_{50} = 0,158\ 597$		

Таблица 3.4

Статистические характеристики энергоёмкости формирования торфа мундштуком диаметром $d = 92$ мм и шнеками с шагом витков $S = 110$ и 50 мм

$A_{i110}, \text{МДж/м}^3$	$A_{i110} - \bar{A}_{110}$	$(A_{i110} - \bar{A}_{110})^2$
1,723 79	0,361 98	0,131 03
1,427 98	0,066 17	0,004 38
1,376 37	0,014 56	0,000 21
0,975 57	-0,386 24	0,149 18
1,305 347	-0,056 46	0,003 18
$\sum A_{110} = 6,809\ 057; \bar{A}_{110} = 1,361\ 81$		$\sum (A_{i110} - \bar{A}_{110})^2 = 0,287\ 98$
$D_{110} = 0,071\ 995$		
$A_{j50}, \text{МДж/м}^3$	$A_{j50} - \bar{A}_{50}$	$(A_{j50} - \bar{A}_{50})^2$
1,202 12	0,173 88	0,030 23
1,194 26	0,166 02	0,027 56
0,878 953	-0,149 287	0,022 29
0,867 83	-0,160 41	0,025 73
0,998 03	-0,030 21	0,000 91
$\sum A_{50} = 5,141\ 193; \bar{A}_{50} = 1,028\ 24$		$\sum (A_{j50} - \bar{A}_{50})^2 = 0,106\ 72$
$D_{50} = 0,026\ 68$		

Расчет статистики $|\tilde{v}|$ и параметра c по зависимостям (3.6) и (3.7) для всех рассмотренных случаев приведен в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Расчет статистики $|\tilde{v}|$ и параметра c
для метода проверки статистических гипотез

Параметры	Диаметр формующего мундштука d , мм		
	52	60	92
Статистика $ \tilde{v} $	1,129 03	1,067 1	2,374 5
Параметр c	0,329 24	0,484 43	0,729 6

Состоятельность нулевой гипотезы на уровне значимости $\alpha = 0,05$ проверяется сравнением рассчитанного значения статистики $|\tilde{v}|$ с ее табличным значением $|v|(c; f_{110}; f_{50}; \alpha)$. Если табличное значение статистики превышает рассчитанное по формуле (3.6), то нулевая гипотеза принимается [107]. В рассматриваемых случаях для мундштука диаметром:

$$52 \text{ мм: } |v|(c; f_{110}; f_{50}; \alpha) = |v|(0,329 \ 2; 4; 4; 0,95) \approx 2,39;$$

$$60 \text{ мм: } |v|(c; f_{110}; f_{50}; \alpha) = |v|(0,484 \ 43; 4; 4; 0,95) \approx 2,33;$$

$$92 \text{ мм: } |v|(c; f_{110}; f_{50}; \alpha) = |v|(0,729 \ 6; 4; 4; 0,95) \approx 2,45.$$

Поскольку во всех случаях табличные значения статистики выше рассчитанных, нулевая гипотеза принимается.

Таким образом, можно считать, что на энергоемкость формования кускового торфа различными шнеками с шагом витков 110 и 50 мм влияют одни и те же факторы, а сравниваемые средние являются оценками одной и той же генеральной средней.

3.4. Оценка плотности формованной торфяной продукции

Поскольку в задачи исследования входило нахождение параметров режима формования с минимальной энергоемкостью при сохранении куском качественных показателей, то по окончании сушки и контроля содержания влаги с помощью анализатора влажности (рис. 3.13) объемным методом (с использованием цифрового штангенциркуля с точностью 0,01 мм (рис. 3.14) и электронных весов с точностью 0,1 г (рис. 3.15)) была произведена оценка плотности кусков, полученных на различных режимах.



Рис. 3.13. Контроль среднего содержания влаги высушенного кускового торфа



Рис. 3.14. Измерение образцов кускового торфа цифровым штангенциркулем ШЦЦ 1-150-0,01



Рис. 3.15. Взвешивание образцов кускового торфа на весах АСОМ JW-1

Оценка плотности кусков при среднем содержании влаги, составляющем 23,12 % (см. прилож. Б), показала, что в зависимости от числа оборотов шнека плотность меняется по логарифмическому закону (рис. 3.16, 3.17). Высшей плотностью среди сравниваемых обладают куски, сформованные с использованием мундштука, внутренний диаметр которого $d = 52$ мм; низшей – куски, сформованные с использованием мундштука, внутренний диаметр которого $d = 92$ мм.

Для всех представленных зависимостей получены уравнения регрессии с коэффициентами детерминации R^2 .

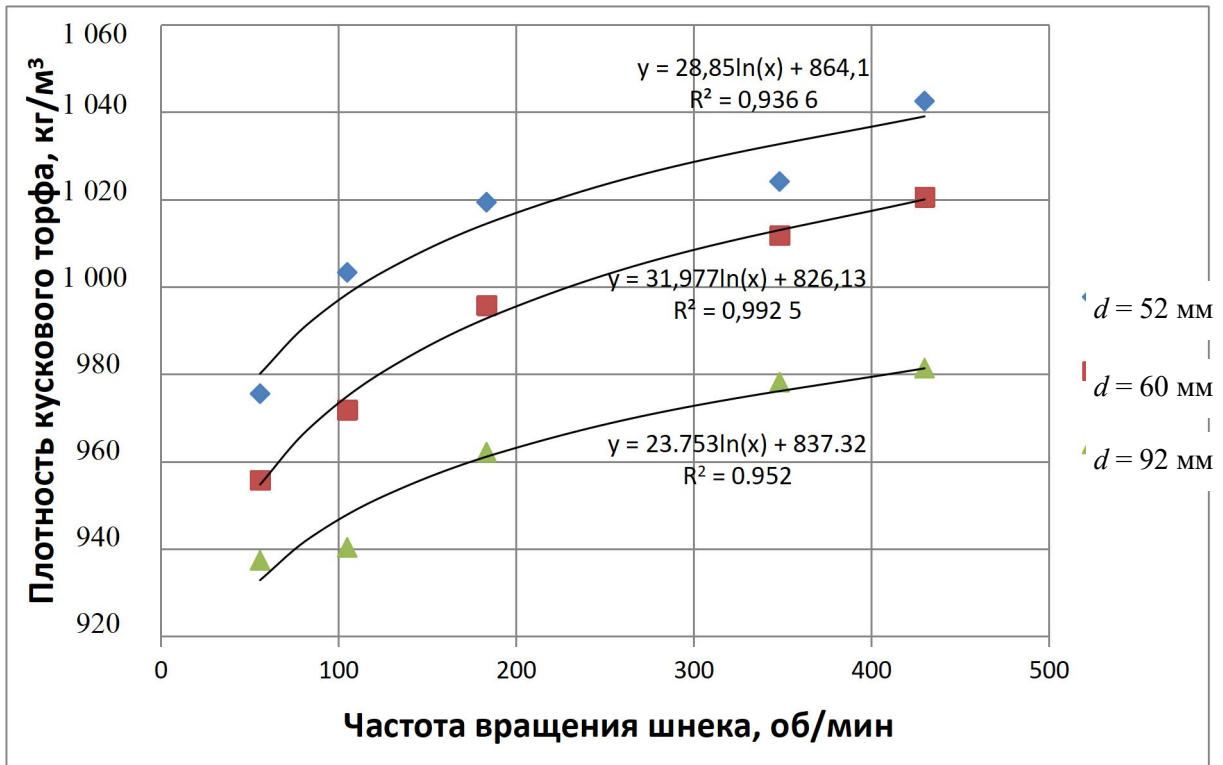


Рис. 3.16. Зависимость плотности кускового торфа от частоты вращения шнека с шагом витков $S = 110$ мм

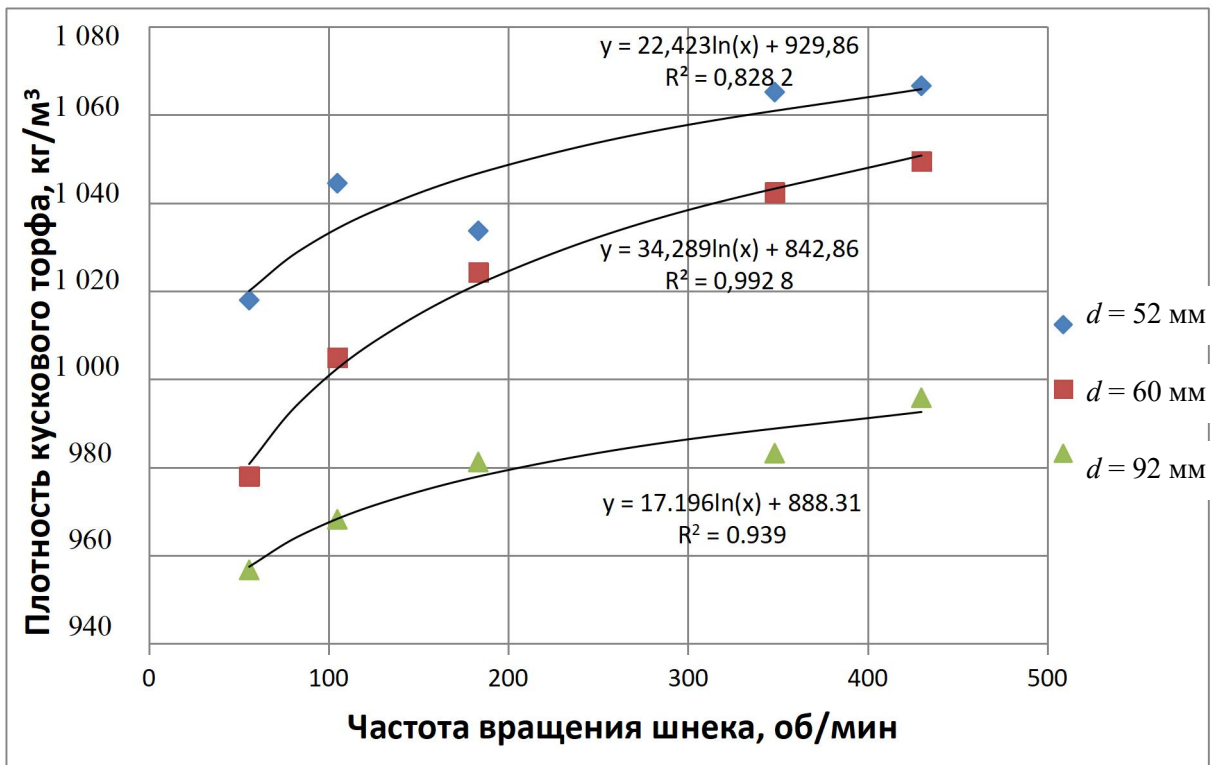


Рис. 3.17. Зависимость плотности кускового торфа от частоты вращения шнека с шагом витков $S = 50$ мм

Среди прочих способов управления энергоемкостью и плотностью (т.е. качеством) в производственном процессе проще изменять количество и размеры мундштуков. Если учитывать, что напор создается шнеком еще в напорной части трубы и продолжается в мундштуке, испытывая противодействие, то для описания степени уплотнения торфа в иных условиях и использования метода геометрического подобия можно предложить ввести понятие «коэффициент напора k_H ». Этот коэффициент представляет собой отношение площадей живого сечения напорной трубы и живого сечения мундштука:

$$k_H = \frac{D^2 - d_{BH}^2}{md^2}, \quad (3.12)$$

где D – внутренний диаметр напорной трубы; d_{BH} – 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, $d_{BH} = 49$ мм. В этом случае коэффициенты напора k_H для мундштуков диаметром 52, 60 и 92 мм составили 2,96, 2,22 и 0,95 соответственно.

Если учитывать, что минимальная энергоемкость формования наблюдается при скорости вращения шнека 220–320 об/мин, то для скорости 270 об/мин можно построить график зависимости конечной плотности кускового торфа от энергоемкости формования (рис. 3.18).

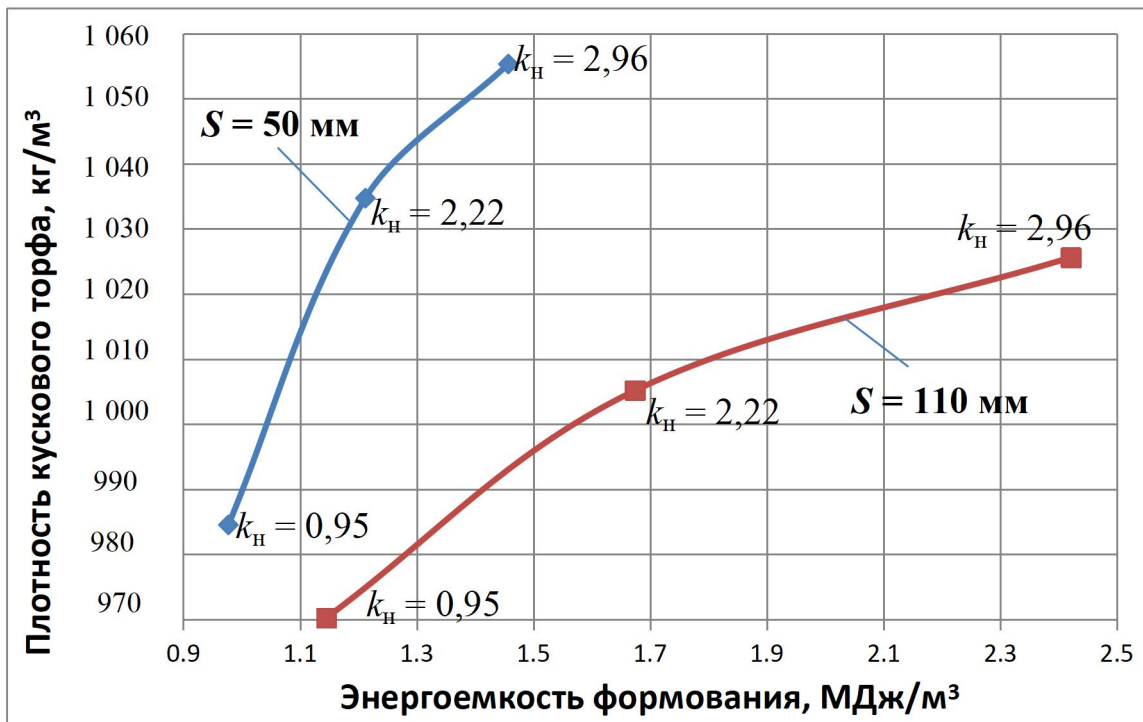


Рис. 3.18. Зависимость плотности кускового торфа от энергоемкости формования при скорости вращения шнека $n = 270$ об/мин

Как следует из полученной зависимости (см. рис. 3.18), интенсивность роста плотности куска при увеличении энергоемкости заметно падает при изменении k_n с 2,22 до 2,96. Однако уже при $k_n = 2,22$ плотность кускового торфа получается выше, чем кондиционная. В связи с этим формование при $k_n = 2,22$ можно считать рациональным режимом.

Большая плотность сформованных кусков соответствует большей частоте вращения и меньшему шагу витков шнека (см. рис. 3.16, 3.17). Очевидно, что меньшая энергоемкость и большая плотность кусков, достигаемые при использовании шнека с шагом витков 50 мм, способствуют работе машины в более рациональном режиме.

Плотность кусков, полученная в ходе экспериментов после всех режимов формования и сушки, превышает плотность, которую можно достигнуть для данного вида торфа в полевых условиях (до 900 кг/м³ [6, 94]). Это можно объяснить мягким режимом сушки и ручным управлением всем процессом. Вместе с тем следует отметить, что наиболее рациональным режимом представляется частота вращения шнека $n = 220\text{--}320$ об/мин при коэффициенте напора $k_n = 2,22$ и шаге витков шнека $S = 0,5D$.

3.5. Определение прочности кускового торфа

Прочность кускового торфа как никакая другая характеристика дает представление о его качестве и сохранности в процессе производства и транспортирования. В настоящее время получили распространение два способа оценки прочности формованной торфяной продукции: определение механической прочности кускового торфа или брикета во вращающемся барабане путем испытания на крошимость кусков, обуславливающую, соответственно, относительную механическую прочность; испытание формованного торфа на изгиб на гидравлическом прессе [93, 109].

Поскольку большинство операций по производству кускового торфа после его формования (ворочка, валкование, переукаладка валков, уборка) связано с изгибными деформациями куска, испытания на изгиб можно назвать более информативными. Использование гидравлического пресса не позволяет исключить из испытаний на прочность динамические нагрузки, неизбежно возникающие в случае его ручного привода, и обеспечить возможность регулирования скорости движения штока гидроцилиндра (для предотвращения удара) в случае гидропривода. Кроме того, весьма неточна оценка разрушающей нагрузки по давлению жидкости в системе.

С целью минимизации влияния на испытания вышеуказанных факторов и обеспечения возможности оперативного контроля качества

продукции разработана и создана конструкция стенда для испытания образцов на прочность. У нее есть ручной многоступенчатый привод, преобразующий вращательное движение штурвала в поступательное конического наконечника (рис. 3.19) [110–113].

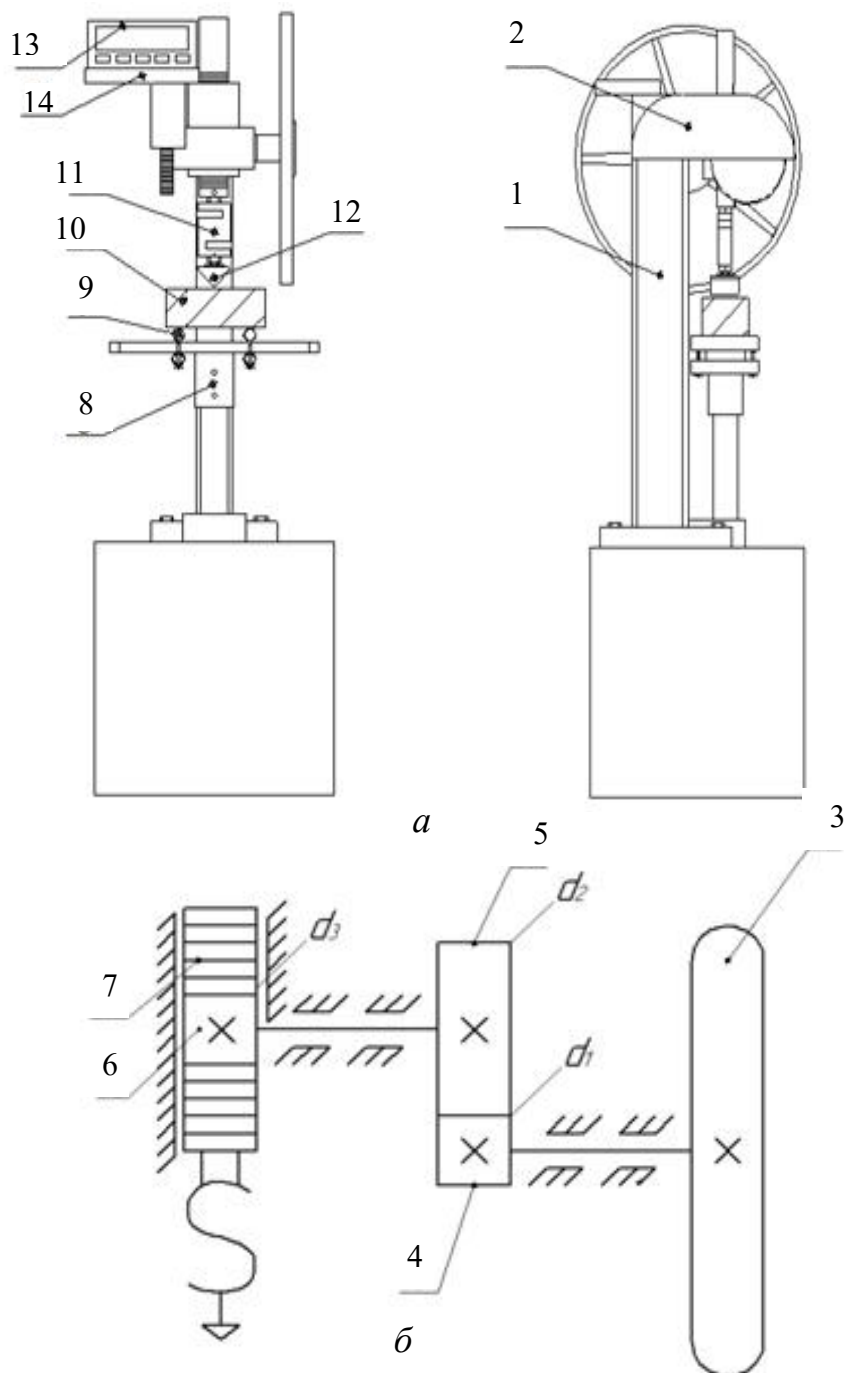


Рис. 3.19. Устройство (а) и кинематическая схема стенда (б) для реализации разрушающей нагрузки и контроля изгибной прочности формованной торфяной продукции

Стенд для реализации и измерения разрушающей нагрузки (см. рис. 3.19) включает станину 1, кожух 2, закрывающий механический привод, который включает штурвал 3 диаметром 430 мм, соединенный через шестерню 4, зубчатое колесо 5 и шестерню 6 с вертикально расположенной зубчатой рейкой 7, столик 8 с установочными опорами 9 для крепления испытываемого образца 10, а также узел измерения разрушающей нагрузки. Узел измерения нагрузки выполнен в виде тензометрической S-образной скобы 11 с коническим наконечником 12 и закреплен на зубчатой рейке 7. Тензометрическая скоба 11 соединена с цифровым динамометром ДОУ-3-1И 13, установленным на столике 14 и имеющим верхний предел измерений 1 кН.

Стенд работает следующим образом. Испытываемый образец брикета или кускового торфа 10 располагают на установочные опоры 9 столика 8 и вращают штурвал 3, приводящий в движение механический привод, в результате чего перемещается зубчатая рейка 7 с установленной на ней тензометрической скобой 11 и коническим наконечником 12. В результате конический наконечник 12 внедряется в испытываемый образец 10, происходит деформирование тензометрической скобы 11. При этом электрический сигнал поступает от скобы 11 в цифровой динамометр 13 по кабелю. Цифровой динамометр 13 работает в двух режимах: дискретной фиксации нагрузки и фиксации максимального усилия. При втором варианте динамометр 13 запоминает максимальную нагрузку, действующую на конический наконечник 12 при разрушении образца, и отражает ее на цифровом дисплее.

Конструкция механического привода с многоступенчатым зубчатым зацеплением позволяет обеспечить плавное создание разрушающей нагрузки с коэффициентом усиления до 500, в результате чего отпадает необходимость приложения больших усилий к штурвалу. Таким образом, при ручном воздействии на обечайку штурвала с силой 10 Н разрушающая нагрузка, создаваемая устройством, составляет около 5 000 Н.

Выполнение установочных опор регулирующимися позволяет проводить испытания образцов различной формы и размеров (длиной испытываемой части – от 75 до 300 мм, а шириной и высотой – от 1 до 130 мм). Исполнение поверхности базирующих установочных опор и конического наконечника в виде поверхностей с радиусом постоянной кривизны дает возможность избавиться от концентраторов напряжений, снижает риск скалывания и развития трещин, а следовательно, повышает качество получаемых результатов.

Силовая схема создания нагрузки стендом и эпюра изгибающих моментов представлены на рис. 3.20.

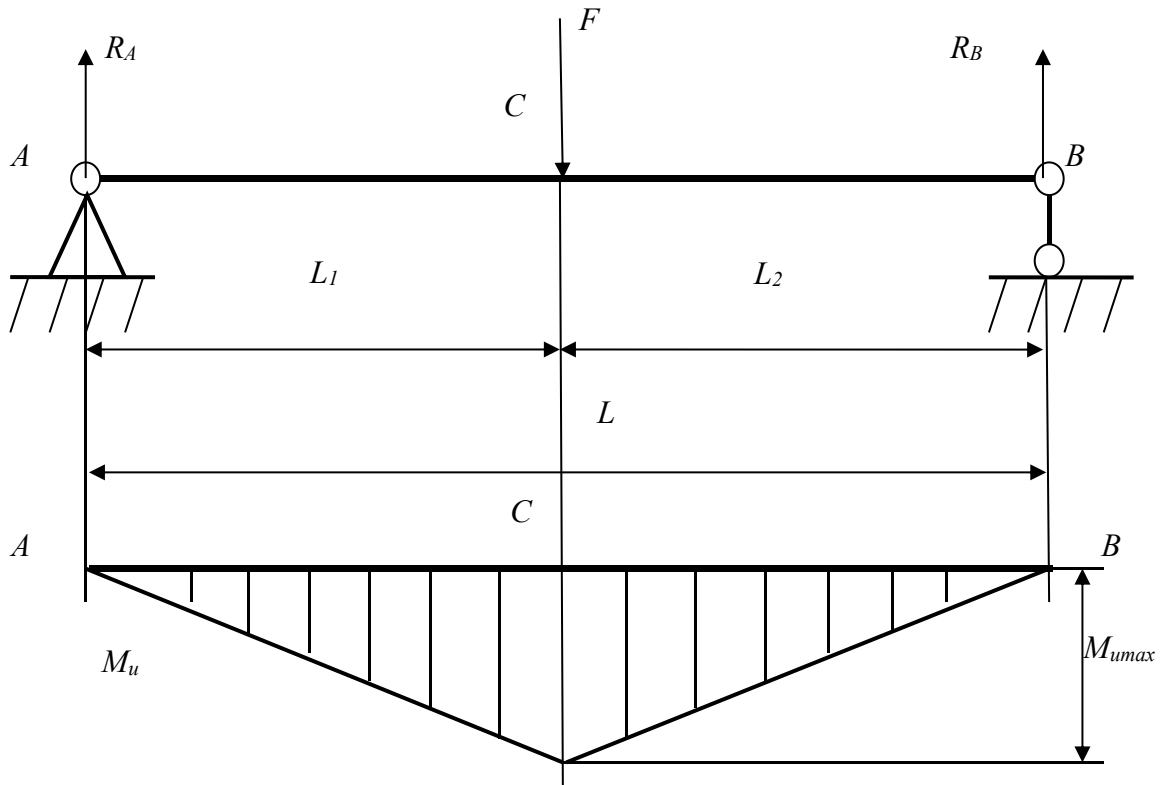


Рис. 3.20. Силовая схема создания нагрузки и эпюра изгибающих моментов

Приложенная в центре испытываемого на изгиб образца нагрузка F (Н) вызывает равные реакции установочных опор при условии равенства расстояний L_1 и L_2 (м):

$$R_A = R_B = \frac{1}{2}F. \quad (3.13)$$

Изгибающий момент (Н·м), действующий по всей длине образца, имеет максимальное значение в точке C (точке приложения нагрузки) и определяется по формуле

$$M_{umax} = R_A \frac{L}{2} = \frac{1}{2}F \frac{L}{2} = \frac{FL}{4}. \quad (3.14)$$

Прочность образца на изгиб (Па) в наиболее нагруженной точке может быть определена как отношение максимального изгибающего момента, действующего в сечении, к моменту сопротивления образца изгибу W_x (м^3):

$$\sigma_u = \frac{M_{umax}}{W_x}. \quad (3.15)$$

Зная, что момент сопротивления круглого образца определяется по зависимости

$$W_{xкр} = \frac{\pi d_o^3}{32}, \quad (3.16)$$

где d_o – наружный диаметр образца (м),

а момент сопротивления прямоугольного образца определяется по формуле

$$W_{xnp} = \frac{bh^2}{6}, \quad (3.17)$$

где b и h – ширина и высота сечения образца (м) соответственно [114]. С учетом зависимостей (3.16) и (3.17) можно получить конечные формулы вычисления изгибающих напряжений σ_{ukp} и σ_{unp} для круглых и прямоугольных образцов формованной торфяной продукции:

$$\sigma_{ukp} = \frac{8FL}{\pi d_0^3}; \quad (3.18)$$

$$\sigma_{unp} = \frac{1,5FL}{bh^2}. \quad (3.19)$$

В формулах (3.18) и (3.19) учитываются расстояние между установочными опорами (L) и форма сечения кускового торфа или брикета.

Таким образом, для испытания образцов формованной торфяной продукции на прочность с помощью описанного выше стенда следует:

измерить геометрические характеристики сечения испытываемого образца;

выставить необходимое расстояние между установочными опорами; включить цифровой динамометр и, дав ему прогреться в течение 10 минут, обнулить показания, перевести в режим фиксации максимального значения разрушающей нагрузки;

поместить на установочные опоры стенда испытываемый образец; штурвалом подвести конический наконечник стенда к образцу; медленно вращая штурвал, довести нагрузку до максимального значения, при которой образец разрушается;

занести в журнал наблюдений зафиксированное на цифровом динамометре значение максимальной нагрузки F ;

определить по формулам (3.18) и (3.19) прочность образца;

эксперимент повторить 5–6 раз на однотипных образцах для достижения корректных результатов.

Известно, что кусковой торф набирает максимальную прочность при содержании влаги в интервале 20–30 % (4–6 МПа) [11, 74, 94]. Таким образом, после формования при различных режимах [97, 103–105] и сушки в мягком теневом режиме при температуре $t = 17–21$ °С (начиная от среднего содержания влаги $w = 83,44$ % и заканчивая средним равновесным содержанием влаги $w = 23,12$ %) на протяжении 25 суток наравне с определением плотности объемно-весовым методом (см. п. 3.4) была определена прочность кусков на разработанном стенде (рис. 3.21) по методике, приведенной в вышеуказанном перечне (см. прилож. В).



Рис. 3.21. Испытание на изгибную прочность образцов кускового торфа круглого сечения

В ходе проведения работ авторы столкнулись с проблемой, которая заключалась в том, что для разрушения некоторых образцов кускового торфа требуется нагрузка, превышающая 1 кН. Данную нагрузку способна обеспечить металлоконструкция стенда (стенд рассчитан на создание разрушающей нагрузки до 5 кН), но не способны выдержать приборы тензометрирования, а именно датчик в виде тензометрической *S*-образной скобы и системный блок цифрового динамометра. В связи с этим была поставлена задача расширения пределов измерения разрушающей нагрузки с помощью имеющегося в наличии оборудования.

В основе функционирования цифрового динамометра с тензометрической скобой лежит закон Гука, а сама система характеризуется неким коэффициентом упругости, являющимся коэффициентом пропорциональности между нагрузкой и деформацией. Отсюда следует вывод, что для измерения большей нагрузки необходимо повысить коэффициент упругости тензометрической скобы. При этом на дисплее системного блока будет отражаться не истинная нагрузка, а

относительная (заниженная вследствие увеличения упругости системы). Соотношение между истинной и относительной нагрузкой в таких случаях определяется тарировочным графиком.

Задача повышения упругости тензоскобы решена путем подгонки и монтажа в скобу дополнительных металлических проставок, изготовленных из гаек М14 [115]. Подгонка высоты гаек обеспечивала их установку без зазора между телом и хвостовиками скобы (рис. 3.22).



Рис. 3.22. Установка в тело тензоскобы дополнительных металлических проставок, изготовленных из гаек М14

Для повышения точности системы торцы гаек отшлифовали и отполировали. В результате при больших нагрузках, создаваемых стендом, деформация скобы была меньшей, и, как следствие, относительная нагрузка, отображенная на дисплее системного блока, также была меньшей.

Данную конструкцию можно назвать «зажатой» скобой [116, 117].

Для построения тарировочного графика разработана методика нагружения штурвала стенда одинаковыми калиброванными грузами при свободном и зажатом положении тензоскобы. В этом случае наконечник динамометра упирался в жесткий и практически недеформируемый при таких нагрузках металлический диск (рис. 3.23).



Рис. 3.23. Процесс тарировки тензоскобы методом навешивания калиброванных грузов на штурвал стенда

С дисплея цифрового динамометра снимались показания нагрузки, создаваемой стендом от одинаковых калиброванных грузов при свободном и зажатом состоянии тензоскобы.

Как видно из рис. 3.23, плечо силы, создающей момент на стенде, выбрано максимальным (грузы подвешивались к периферии штурвала) для увеличения точности при последующем воспроизводстве результатов экспериментов.

По итогам проведенного дополнительного исследования построен тарировочный график зависимости истинной нагрузки F от относительной F_0 (заниженной) вследствие зажатия тензоскобы. Такой график справедлив для цифрового динамометра ДОУ-3-1И (рис. 3.24). Данные графика воспроизводились при трехкратной повторяемости опытов.

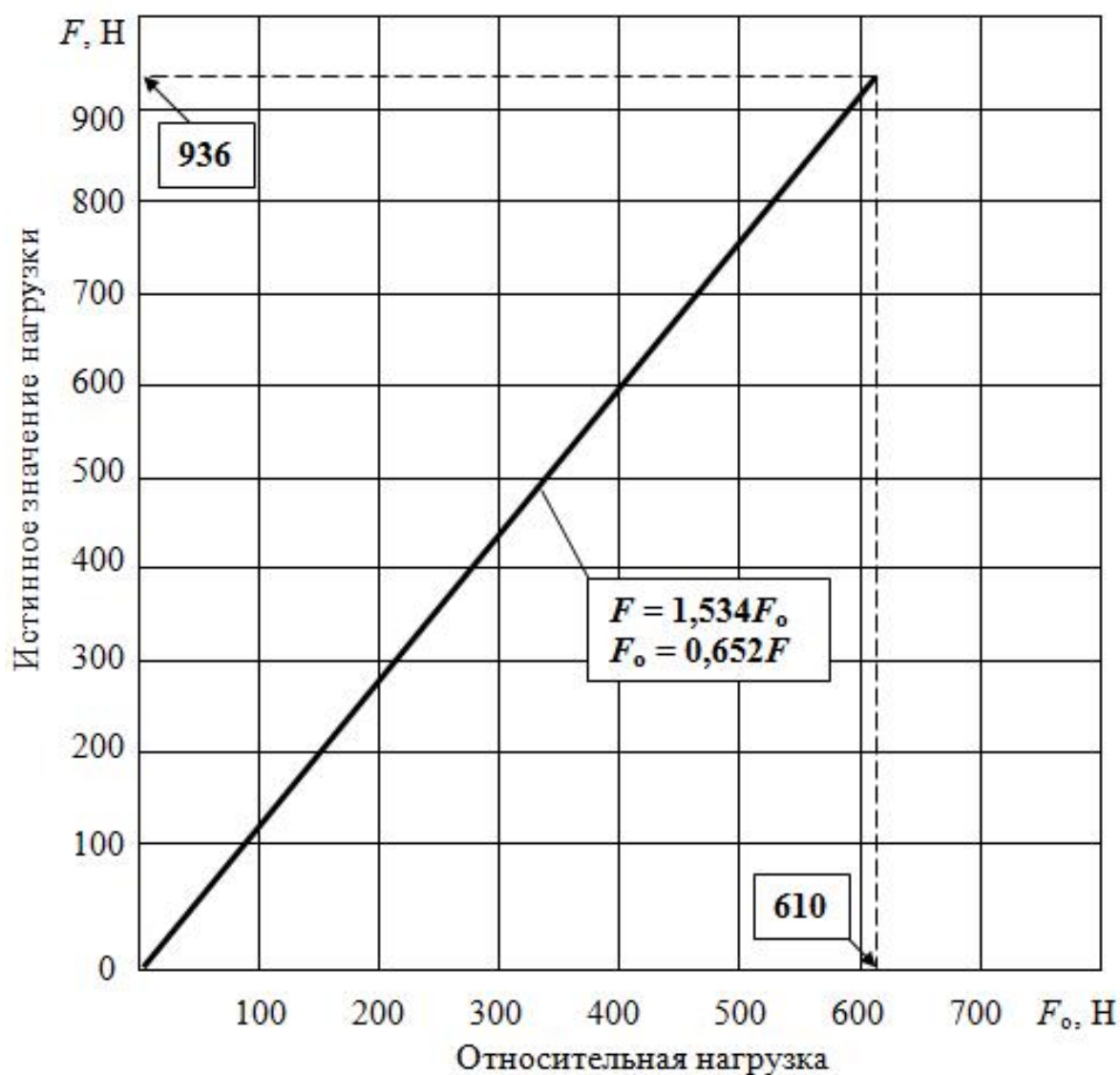


Рис. 3.24. Тарировочный график

Пользуясь указанным графиком (см. рис. 3.24) и тарировочными уравнениями, помещенными на поле графика, можно легко переводить значения относительной нагрузки при состоянии зажатой тензометрической скобы в истинное значение при ее свободном состоянии.

Анализ тарировочных уравнений показал, что описанным методом можно расширить пределы измерения цифрового динамометра ДОУ-3-1И более чем на 50 % (а точнее – на 53,44 %) [115, 116], т.е. максимальная разрушающая нагрузка, которую возможно зафиксировать с помощью цифрового динамометра стенда, составляет уже не 1, а 1,5 кН. Такого расширения границ измерения разрушающей нагрузки оказалось вполне достаточно для испытания на изгибную прочность всех образцов кускового торфа.

В ходе стандартной статистической обработки данных получены логарифмические кривые (рис. 3.25, 3.26), вид которых весьма близок к зависимостям, установленным для плотности куска (см. п. 3.4).

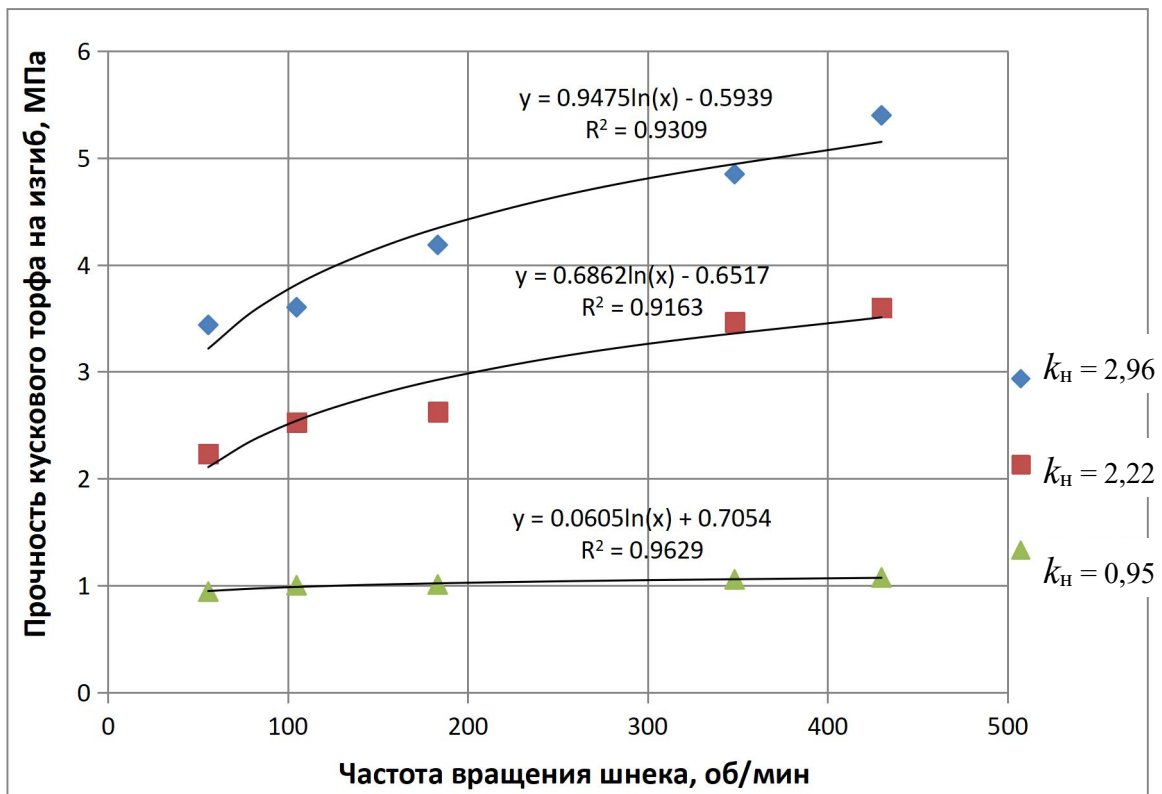


Рис. 3.25. Зависимость прочности кускового торфа от частоты вращения шнека при формировании прессом с шагом витков $S = 110$ мм для коэффициентов напора k_H

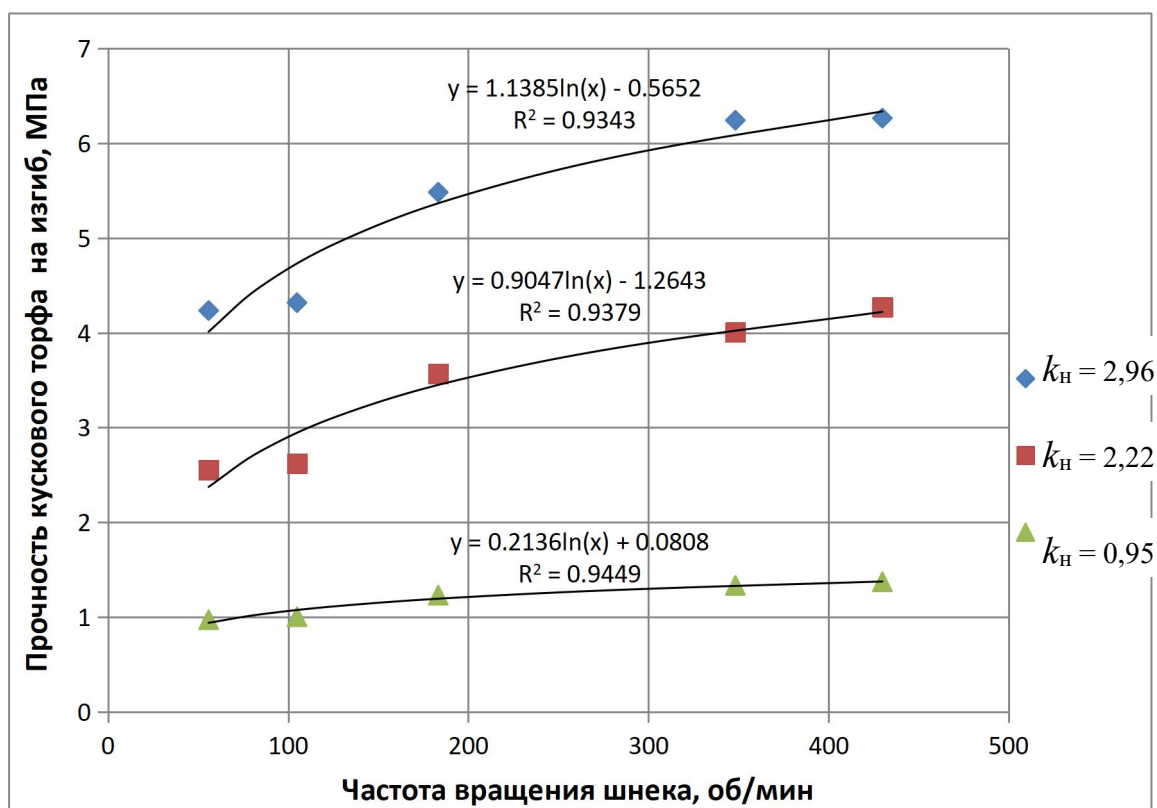


Рис. 3.26. Зависимость прочности кускового торфа от частоты вращения шнека при формовании прессом с шагом витков $S = 50$ мм для коэффициентов напора k_H

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 различных коэффициентов напора, реализованных в ходе проведенного исследования (рис. 3.27).

Как следует из полученной зависимости (рис. 3.27), интенсивность роста прочности куска при увеличении энергоёмкости падает при изменении k_H от 2,22 до 2,96. Однако уже при $k_H = 2,22$ прочность куска достигает необходимых значений по требованиям, в связи с чем дальнейшее повышение прочности, связанное с повышенными затратами энергии, является нецелесообразным. Таким образом, формование при $k_H = 2,22$ можно считать рациональным режимом.

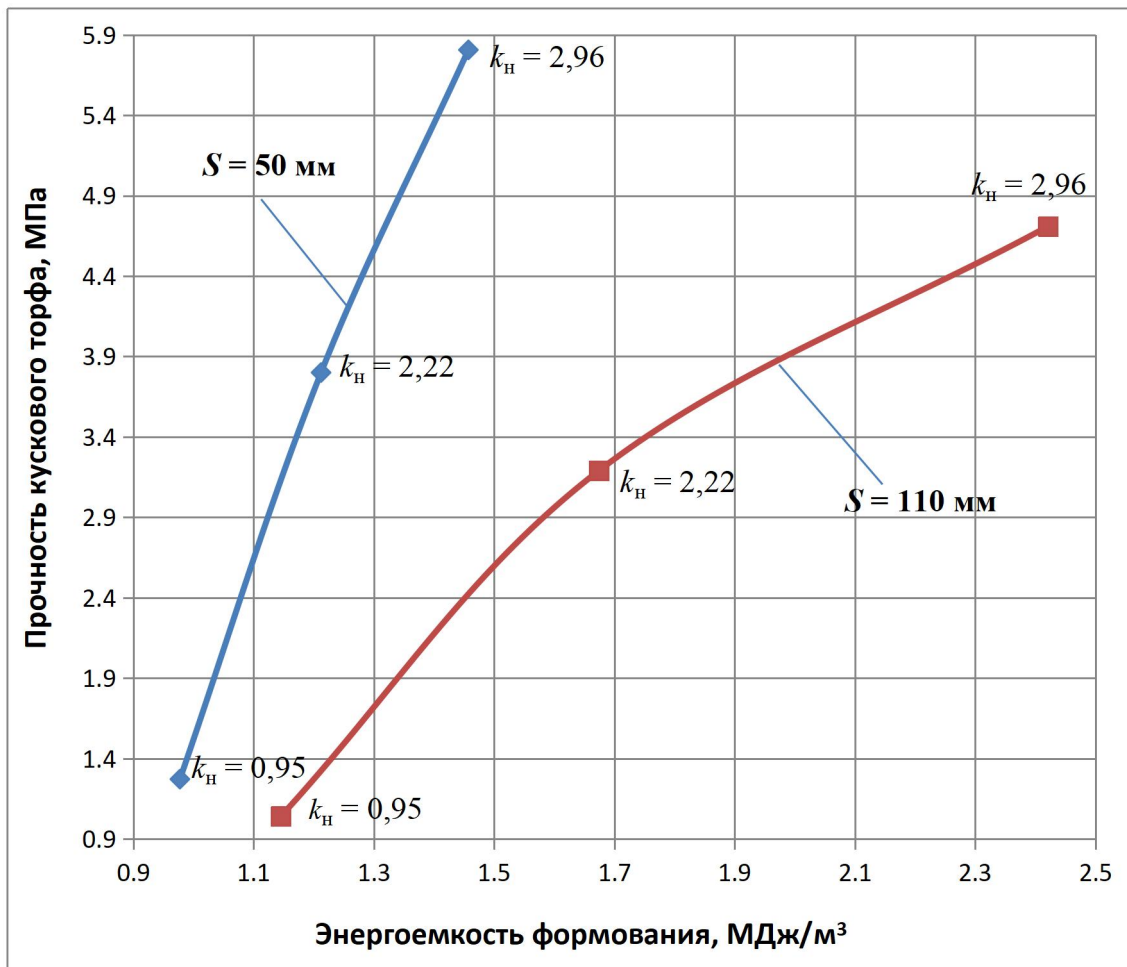


Рис. 3.27. Зависимость прочности на изгиб высушенного кускового торфа от энергоемкости формования при частоте вращения шнека $n = 270$ об/мин для различных коэффициентов напора k_n

Представленные результаты оценки прочности кускового торфа согласуются с известными ранее данными [74, 94], но получены с меньшими затратами, поскольку в ходе испытания применялось ручное механическое оборудование. При этом закругленные края испытательного узла станда обеспечивали во время испытаний разрушение при «чистом» изгибе, а не изгибе со скалыванием через образование трещин. Это является чрезвычайно важным обстоятельством, поскольку позволяет создавать режимы нагружения, близкие к существующим в реальных условиях.

Так как формы кривых зависимостей прочности от энергоемкости очень схожи с зависимостями плотности от энергоемкости (см. п. 3.3 [97, 103–105]), вполне естественно, что при наличии подобной особенности необходимо выявить корреляционную связь между прочностью кускового торфа на изгиб и его плотностью, что и было сделано авторами настоящей монографии.

3.6. О корреляционной связи плотности и прочности кускового торфа на изгиб

Причинно-следственные связи между свойствами торфа, а также между свойствами торфа и технологическими показателями торфяного производства выявляются, как правило, с помощью корреляционно-регрессионного анализа. При этом стоит подчеркнуть, что статистические методы корреляции и регрессии не вскрывают причину и следствие, а дают представление о тесноте связи и взаимном проникновении факторов, обуславливающих изменение параметров состояния системы. Началом анализа можно считать имеющееся предположение о наличии связи. Предметом анализа являются зависимости между величинами, осложненные действием во многом случайных факторов, часть из которых может остаться вне поля зрения исследователя. В отличие от функциональных связей, однозначно выражающих зависимость функции от аргумента, корреляционные связи отражают распределения результивного признака (отклика) от факториального признака (фактора). Задачей корреляционного анализа является установление факта наличия связи и степени ее тесноты [107].

Схожесть форм кривых, полученных на рис. 3.16, 3.17 и 3.25, 3.26, позволяет сделать предположение о тесной связи прочности на изгиб и плотности кускового торфа, в результате которой зависимость между плотностью и прочностью кускового торфа на изгиб можно было бы аппроксимировать прямыми линиями. Для проверки этого предположения был произведен корреляционный анализ [107, 119] с расчетом коэффициентов корреляции

$$r_{\sigma_H\rho} = \frac{\sum (\rho - \bar{\rho})(\sigma_H - \bar{\sigma}_H)}{\sqrt{\sum (\rho - \bar{\rho})^2 \sum (\sigma_H - \bar{\sigma}_H)^2}}, \quad (3.20)$$

где ρ и σ – точечные значения плотности и прочности на изгиб; $\bar{\rho}$ и $\bar{\sigma}$ – их средние значения в объеме выборки из $n = 5$ серий опытов.

Ошибка коэффициента корреляции при числе опытов $n < 100$

$$m_r = \sqrt{\frac{(1 - r_{\sigma_H\rho}^2)}{f}}, \quad (3.21)$$

где $f = n - 2$ – число степеней свободы.

Коэффициент корреляции является значимым в первом приближении, если

$$t_r = \frac{|r_{\sigma_H\rho}|}{m_r} > 3. \quad (3.22)$$

Все расчеты сведены в табл. 3.6 и 3.7.

Более строгое заключение о значимости коэффициента корреляции получено путем его сравнения с критическим $r_{кр}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $f = 3$ ($r_{кр} = 0,88$) [107].

Таблица 3.6

Расчет коэффициентов корреляции плотности и прочности на изгиб кускового торфа при формовании шнеком с шагом витков $S = 110$ мм

ρ , кг/м ³	σ_H , МПа	$\rho - \bar{\rho}$	$\sigma_H - \bar{\sigma}_H$	$(\rho - \bar{\rho})^2$	$(\sigma_H - \bar{\sigma}_H)^2$	$(\rho - \bar{\rho}) \times (\sigma_H - \bar{\sigma}_H)$
$d = 52$ мм; $k_H = 2,96$						
975,54	3,438 6	-37,44	-0,857	1 401,753 6	0,734 4	32,086 1
1 003,31	3,603 7	-9,67	-0,691 9	93,508 9	0,478 7	6,690 7
1 019,38	4,186 9	6,4	-0,108 7	40,96	0,011 8	-0,695 7
1 024,12	4,849 6	11,14	0,554	124,099 6	0,306 9	6,171 6
1 042,54	5,399 3	29,56	1,103 7	873,793 6	1,218 2	32,625 4
$\sum \rho =$ $= 5 064,89;$ $\bar{\rho} =$ $= 1 012,98$	$\sum \sigma_H =$ $= 21,478 1;$ $\bar{\sigma}_H =$ $= 4,295 6$	-	-	$\sum (\rho - \bar{\rho})^2 =$ $= 2 534,115 7$	$\sum (\sigma_H - \bar{\sigma}_H)^2 =$ $= 2,75$	$\sum (\rho - \bar{\rho}) \times$ $\times (\sigma_H - \bar{\sigma}_H) =$ $= 76,878 1$
$r_{\sigma_H \rho} = \frac{76,878 1}{\sqrt{2 534,115 7 \cdot 2,75}} = 0,921; m_r = \sqrt{\frac{(1-0,921^2)}{5-2}} = 0,224 9; t_r = \frac{ 0,921 }{0,224 9} = 4,095; r_{кр} = 0,88$						
$d = 60$ мм; $k_H = 2,22$						
955,75	2,232 3	-35,39	-0,557 2	1 252,593 6	0,310 5	19,719 3
971,85	2,527 1	-19,29	-0,262 4	372,181 3	0,068 9	5,061 7
995,77	2,125 6	4,628	-0,663 9	21,418 4	0,440 8	-3,072 5
1 011,77	3,464 4	20,628	0,674 9	425,514 4	0,455 5	13,921 8
1 020,57	3,598	29,428	0,808 5	866,007 2	0,653 7	23,792 5
$\sum \rho =$ $= 4 955,71;$ $\bar{\rho} =$ $= 991,142$	$\sum \sigma_H =$ $= 13,9474;$ $\bar{\sigma}_H =$ $= 2,789 5$	-	-	$\sum (\rho - \bar{\rho})^2 =$ $= 2 937,714 9$	$\sum (\sigma_H - \bar{\sigma}_H)^2 =$ $= 1,929 4$	$\sum (\rho - \bar{\rho}) \times$ $\times (\sigma_H - \bar{\sigma}_H) =$ $= 59,422 8$
$r_{\sigma_H \rho} = \frac{59,422 8}{\sqrt{2 937,714 9 \cdot 1,929 4}} = 0,789; m_r = \sqrt{\frac{(1-0,789^2)}{5-2}} = 0,355; t_r = \frac{ 0,789 }{0,355} = 2,227; r_{кр} = 0,88$						
$d = 92$ мм; $k_H = 0,95$						
937,39	0,942 8	-21,50	-0,074 7	462,336	0,005 6	1,606 1
940,35	1,002 1	-18,54	-0,015 1	343,805 8	0,000 2	0,279 9
962,15	1,009 7	3,258	-0,007 8	10,614 6	0,000 06	-0,025 4
978,18	1,057 4	19,288	0,039 9	372,026 9	0,001 6	0,769 6
981,39	1,075 5	22,498	0,058	506,16	0,003 4	1,304 9
$\sum \rho =$ $= 4 799,46;$	$\sum \sigma =$ $= 5,087 5;$	-	-	$\sum (\rho - \bar{\rho})^2 =$ $= 1 694,943$	$\sum (\sigma_H - \bar{\sigma}_H)^2$	$\sum (\rho - \bar{\rho}) \times$

$\bar{\rho} =$ = 958,892	$\bar{\sigma}_H =$ = 1,017 5				= = 0,010 86	$\times (\sigma_H - \bar{\sigma}_H) =$ = 3,935 1
$r_{\sigma_H \rho} = \frac{3,935 1}{\sqrt{1 694,943 \cdot 0,010 86}} = 0,917; m_r = \sqrt{\frac{(1-0,917^2)}{5-2}} = 0,23; t_r = \frac{ 0,917 }{0,23} = 3,987; r_{kp} = 0,88$						

Таблица 3.7

Расчет коэффициентов корреляции плотности и прочности на изгиб
кускового торфа при формовании шнеком с шагом витков $S = 50$ мм

$\rho, \text{кг/м}^3$	$\sigma_H, \text{МПа}$	$\rho - \bar{\rho}$	$\sigma_H - \bar{\sigma}_H$	$(\rho - \bar{\rho})^2$	$(\sigma_H - \bar{\sigma}_H)^2$	$(\rho - \bar{\rho}) \times$ $(\sigma_H - \bar{\sigma}_H)$
$d = 52 \text{ мм}; k_H = 2,96$						
1 017,96	4,235 4	-27,61	-1,074 5	762,312 1	1,154 6	29,666 9
1 044,48	4,318 6	-1,09	-0,991 3	1,188 1	0,982 7	1,080 5
1 033,67	5,484 8	-11,9	0,174 9	141,61	0,030 6	-2,081 3
1 065,17	6,244 3	19,60	0,934 4	384,16	0,873 1	18,314 2
1 066,59	6,266 6	21,02	0,956 7	441,840 4	0,915 3	20,109 8
$\sum \rho =$ = 5 225,87; $\bar{\rho} =$ = 1 045,57	$\sum \sigma_H =$ = 26,549 7; $\bar{\sigma}_H =$ = 5,309 9	-	-	$\sum (\rho - \bar{\rho})^2 =$ = 1 731,110 6	$\sum (\sigma_H - \bar{\sigma}_H)^2 =$ = 3,956 3	$\sum (\rho - \bar{\rho}) \times$ $\times (\sigma_H - \bar{\sigma}_H) =$ = 67,090 1
$r_{\sigma_H \rho} = \frac{67,090 1}{\sqrt{1 731,110 6 \cdot 3,956 3}} = 0,811; m_r = \sqrt{\frac{(1-0,811^2)}{5-2}} = 0,337 8; t_r = \frac{ 0,811 }{0,337 8} = 2,4; r_{kp} = 0,88$						
$d = 60 \text{ мм}; k_H = 2,22$						
978,02	2,552 6	-41,79	-0,851 6	1 746,404 1	0,725 2	35,588 4
1 004,92	2,619 7	-14,89	-0,784 5	221,712 1	0,615 4	11,681 2
1 024,24	3,567 0	4,43	0,162 8	19,624 9	0,026 5	0,721 2
1 042,42	4,007 3	22,61	0,603 1	511,212 1	0,363 7	13,636 1
1 049,44	4,274 6	29,63	0,870 4	877,936 9	0,757 6	25,790 0
$\sum \rho =$ = 5 099,04; $\bar{\rho} =$ = 1 019,81	$\sum \sigma_H =$ = 17,021 2; $\bar{\sigma}_H =$ = 3,404 2	-	-	$\sum (\rho - \bar{\rho})^2 =$ = 3 376,890 1	$\sum (\sigma_H - \bar{\sigma}_H)^2 =$ = 2,488 4	$\sum (\rho - \bar{\rho}) \times$ $\times (\sigma_H - \bar{\sigma}_H) =$ = 87,416 9
$r_{\sigma_H \rho} = \frac{87,4169}{\sqrt{3 376,890 1 \cdot 2,488 4}} = 0,954; m_r = \sqrt{\frac{(1-0,954^2)}{5-2}} = 0,173; t_r = \frac{ 0,954 }{0,173} = 5,511; r_{kp} = 0,88$						
$d = 92 \text{ мм}; k_H = 0,95$						
956,75	0,972 3	-20,3	-0,210 5	412,09	0,0443	4,273 2
968,22	1,003 5	-8,83	-0,179 3	77,968 9	0,032 1	1,583 2
981,23	1,231 9	4,18	0,049 1	17,472 4	0,002 4	0,205 2
983,23	1,334 2	6,18	0,151 4	38,192 4	0,022 9	0,935 7
995,82	1,372 1	18,77	0,189 3	352,312 9	0,035 8	3,553 2

$\sum \rho =$ = 4 885,25; $\bar{\rho} =$ = 977,05	$\sum \sigma_H =$ = 5,914; $\bar{\sigma}_H =$ = 1,182 8	-	-	$\sum (\rho - \bar{\rho})^2 =$ = 898,036 6	$\sum (\sigma_H - \bar{\sigma}_H)^2 =$ = 0,137 5	$\sum (\rho - \bar{\rho}) \times$ $\times (\sigma_H - \bar{\sigma}_H) =$ = 10,549 6
$r_{\sigma_H \rho} = \frac{10,549 6}{\sqrt{898,036 6 \cdot 0,137 5}} = 0,949$; $m_r = \sqrt{\frac{(1-0,949^2)}{5-2}} = 0,182$; $t_r = \frac{ 0,949 }{0,182} = 5,214$; $r_{кр} = 0,88$						

Рассчитанные коэффициенты корреляции в двух случаях, когда $|r| > 0,7$, говорят о сильной связи, а в четырех случаях ($|r| > 0,9$) из шести – о практически функциональной связи [107, 108, 119] между плотностью и прочностью на изгиб кускового торфа, позволяющей аппроксимировать их взаимные зависимости прямыми линиями (рис. 3.28, 3.29).

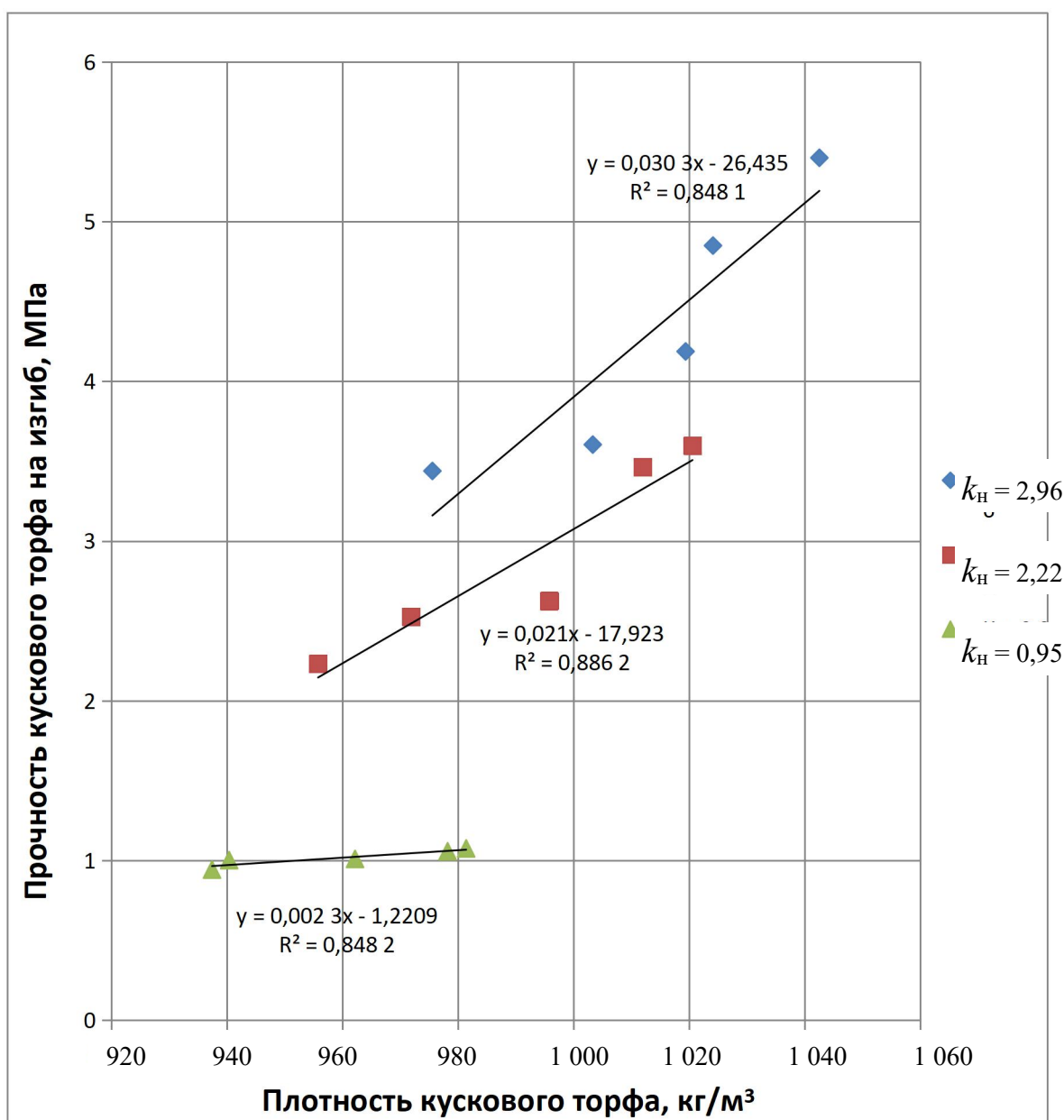


Рис. 3.28. Зависимость прочности на изгиб от плотности кускового торфа при различных коэффициентах напора и шаге витков шнека $S = 110$ мм

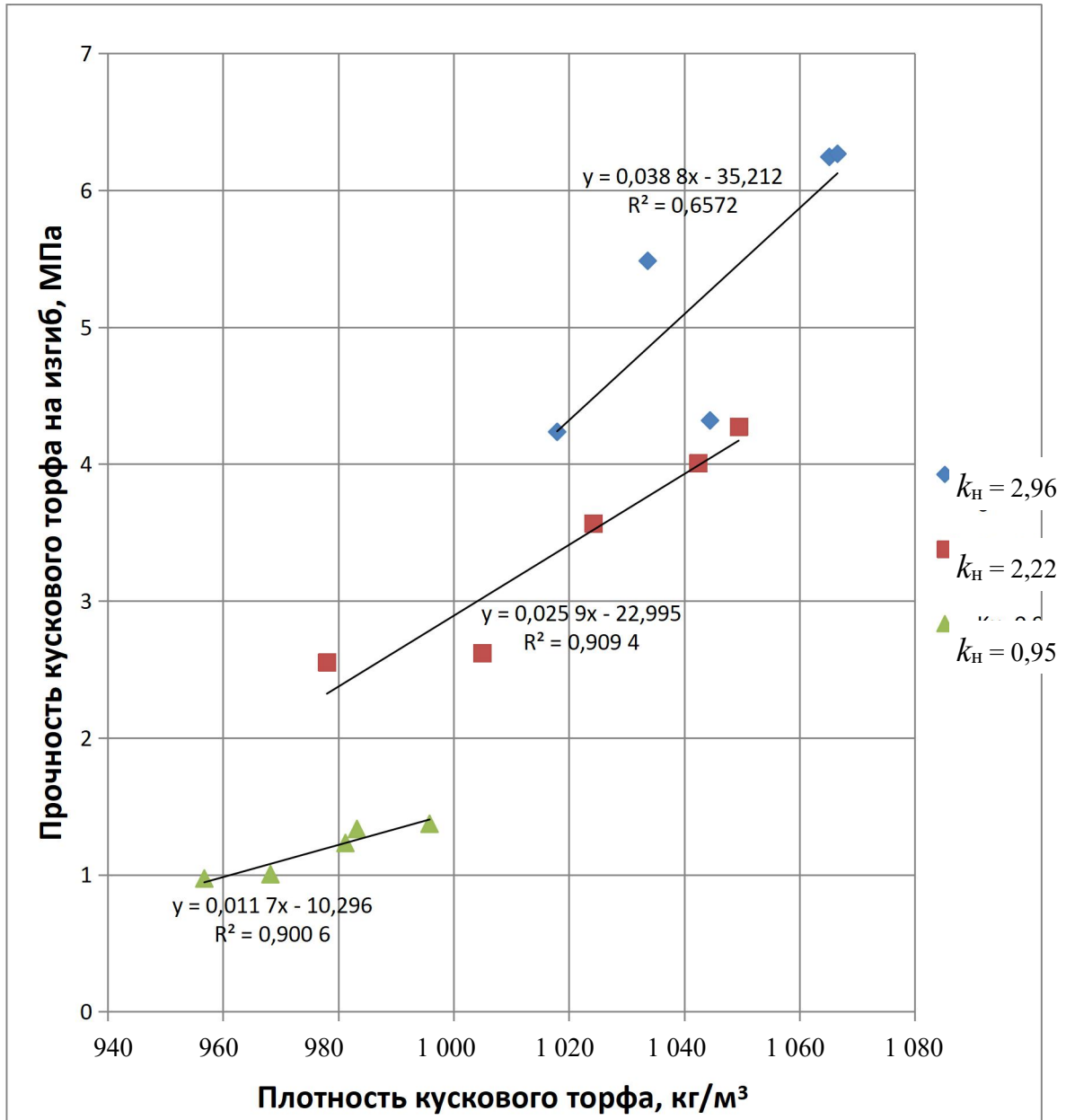


Рис. 3.29. Зависимость прочности на изгиб от плотности кускового торфа при различных коэффициентах напора и шаге витков шнека $S = 50$ мм

Как было отмечено выше, для задач сохранения формы куска в полевых условиях [120] главной механической характеристикой является прочность на изгиб. При сжигании торфа в топках стоит цель обеспечения

необходимой теплотворной способности, которая достигается в первую очередь за счет плотности. Таким образом, зная один из параметров и пользуясь вышеприведенными математическими моделями, можно с высокой вероятностью на уровне значимости $\alpha = 0,05$ определить другой параметр, что весьма полезно и актуально при ограниченности времени.

Полученные зависимости (см. рис. 3.28, 3.29) согласуются с результатами работы [68], в которой исследовалась зависимость прочности кускового торфа на сжатие от плотности скелета. На рис. 3.30 представлен полученный авторами график зависимости кубического корня из прочности формованного торфа на сжатие от плотности скелета образцов.

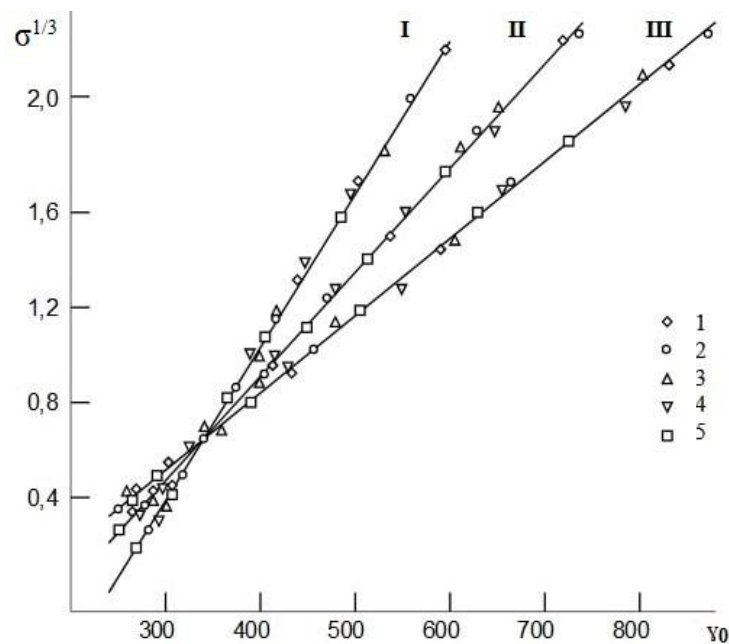


Рис. 3.30. Зависимость кубического корня из прочности на сжатие (МПа) от плотности скелета образцов формованного торфа круглого сечения длиной $1,5d$ и диаметрами d : 1 – 14; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 5 – 50 мм; I – верховой; II – переходный; III – низинный торф

Таким образом, можно сделать вывод, что общая тенденция зависимости прочности кускового торфа от плотности – линейная.

3.7. Полный факторный эксперимент по определению зависимости энергоемкости формования кускового торфа от коэффициента напора и скорости вращения шнека

В результатах проведенного эксперимента по формованию кускового торфа шнековым прессом, представленных в п. 3.2 и 3.3, а также в работах [97, 103–105, 110, 111, 113, 115–119, 121], выявлен ряд трендовых зависимостей энергоемкости формования от скорости вращения шнека и

диаметра формующего мундштука. Определена зона наименьшей энергоемкости при формовании, находящаяся в границах скорости вращения шнека 22–320 об/мин. Установлено, что интенсивность изменения удельных энергозатрат выше при формовании с мундштуком меньшего диаметра и что б о льшая энергоемкость в исследованной зоне при прочих равных условиях соответствует использованию шнека с б о льшим шагом. Наиболее рациональным режимом представляется частота вращения шнека $n = 220\text{--}320$ об/мин при $k_n = 2,22$ и шаге витков шнека $S = 50$ мм (т.е. равном половине диаметра шнека D). Кроме того, с использованием метода проверки статистических гипотез доказано, что на энергоемкость формования кускового торфа при различных режимах шнеками с шагом витков 110 и 50 мм влияет один и тот же набор факторов.

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 k_n и числом оборотов шнека, следует найти функцию отклика, которая представляет собой зависимость 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), метод которого достаточно полно изложен в работах [107, 108]. В результате получена математическая модель вида

$$A = f(k_n; n). \quad (3.23)$$

Обработка результатов проводилась для экспериментов, в которых применялся шнек с шагом витков 50 мм. При учете характера полученных зависимостей все поле экспериментальной зависимости для повышения точности функции отклика разбито на две области: от минимальной до средней частоты вращения шнека и от средней до максимальной [121].

Для двух факторов уравнение регрессии без членов высшего порядка имеет вид

$$A = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2, \quad (3.24)$$

где b_0 – свободный член; X_1, X_2 – кодированные значения факторов; b_1, b_2 – коэффициенты уравнения регрессии при соответствующих X_i , характеризующих влияние данного фактора на функцию отклика; b_{12} – коэффициент уравнения регрессии, свидетельствующий о двойном взаимодействии факторов [107].

Первая область экспериментальной зависимости энергоемкости A_1 (МДж/м³) от коэффициента напора и частоты вращения шнека имеет зону значений исследуемого параметра, ограниченную минимальной и средней частотой вращения шнека n_1 :

$$k_H = [k_H^{min}; k_H^{max}] = [0,95; 2,96];$$

$$n_1 = [n_1^{min}; n_1^{max}] = [55,81; 183,28] \text{ об/мин.}$$

Центр плана эксперимента:

$$k_H^0 = \frac{k_H^{max} + k_H^{min}}{2} = \frac{2,96 + 0,95}{2} = 1,955; \quad (3.25)$$

$$n_1^0 = \frac{n_1^{max} + n_1^{min}}{2} = \frac{183,28 + 55,81}{2} = 119,545 \text{ об/мин.} \quad (3.26)$$

Интервал варьирования факторов:

$$\Delta k_H = \pm \frac{k_H^{max} - k_H^{min}}{2} = \pm \frac{2,96 - 0,95}{2} = \pm 1,005; \quad (3.27)$$

$$\Delta n_1 = \pm \frac{n_1^{max} - n_1^{min}}{2} = \pm \frac{183,28 - 55,81}{2} = \pm 63,735 \text{ об/мин.} \quad (3.28)$$

Кодированные значения факторов:

$$X_1^{min} = \frac{k_H^{min} - k_H^0}{\Delta k_H} = -1; \quad (3.29)$$

$$X_1^{max} = \frac{k_H^{max} - k_H^0}{\Delta k_H} = +1; \quad (3.30)$$

$$X_1 = \frac{k_H - 1,955}{1,005}; \quad (3.31)$$

$$X_2^{min} = \frac{n_1^{min} - n_1^0}{\Delta n_1} = -1; \quad (3.32)$$

$$X_2^{max} = \frac{n_1^{max} - n_1^0}{\Delta n_1} = +1; \quad (3.33)$$

$$X_2 = \frac{n_1 - 119,545}{63,735}. \quad (3.34)$$

Матрица планирования эксперимента для первой области, построенная на основе экспериментальных данных (см. п. 3.3) [97, 103–105], представлена в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Матрица планирования эксперимента
для первого поля зависимости энергоемкости формования
от k_H и частоты вращения шнека

Фактор	Уровень			Шаг варьирования				
	-1	0	+1					
k_H	0,95	1,955	2,96	1,005				
n_1	55,81	119,545	183,28	63,735				
Номер варианта	Планирование				Выход			Расчет
	X_0	X_1	X_2	$X_1 X_2$	$A_j^{(1)}$	$A_j^{(2)}$	$A_j^{(3)}$	
1	+	-	-	+	1,104 35	1,312 8	1,189 21	1,202 12
2	+	+	-	-	3,456 7	3,087 4	2,854 48	3,132 86
3	+	-	+	-	0,798 9	0,874 3	0,963 659	0,878 953
4	+	+	+	+	1,708 4	1,583 6	1,725 68	1,672 56

Для упрощения записи в матрице планирования вместо +1 и -1 уровни кодированных факторов обозначены как «+» и «-». 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) также взято из журнала проведения эксперимента и материалов работ [97, 103–105].

Расчет коэффициентов уравнения (3.24) регрессии b_k ведется по формуле [107]

$$b_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{A}_j X_{ij}, \quad (3.35)$$

где N – номер серии опытов (для двухуровневого двухфакторного плана $N = 4$); i и j – номера строк и столбцов в матрице планирования.

Таким образом,

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{1}{4} (1,202\ 12 + 3,132\ 86 + 0,878\ 953 + 1,672\ 56) = 1,721\ 62; \\ b_1 &= \frac{1}{4} (-1,202\ 12 + 3,132\ 86 - 0,878\ 953 + 1,672\ 56) = 0,681\ 09; \\ b_2 &= \frac{1}{4} (-1,202\ 12 - 3,132\ 86 + 0,878\ 953 + 1,672\ 56) = -0,445\ 87; \\ b_{12} &= \frac{1}{4} (1,202\ 12 - 3,132\ 86 - 0,878\ 953 + 1,672\ 56) = -0,284\ 28. \end{aligned}$$

При подстановке найденных коэффициентов b_k в уравнение регрессии (3.24) для кодированных значений факторов $|X_1| \leq 1$ и $|X_2| \leq 1$ имеем

$$A_1 = 1,72162 + 0,68109X_1 - 0,44587X_2 - 0,28428X_1X_2. \quad (3.36)$$

Данное уравнение можно представить в натуральном виде путем замены в нем кодированных переменных (3.31) и (3.34):

$$\begin{aligned} A_1 &= 1,721\ 62 + 0,681\ 09 \left(\frac{k_H - 1,955}{1,005} \right) - 0,445\ 87 \left(\frac{n_1 - 119,545}{63,735} \right) - \\ &\quad - 0,28428 \left(\frac{k_H - 1,955}{1,005} \right) \left(\frac{n_1 - 119,545}{63,735} \right). \end{aligned} \quad (3.37)$$

После упрощения уравнение (3.36) преобразуется:

$$A_1 = 0,1957\ 7 + 1,208\ 27k_H + 0,001\ 68n_1 - 0,004\ 44k_H n_1. \quad (3.38)$$

Полученное уравнение, как было отмечено выше, справедливо для первой области экспериментально полученной зависимости, для которой частота вращения шнека изменяется от минимальной до средней.

Вторая область экспериментальной зависимости энергоемкости A_2 (МДж/м³) от коэффициента напора и частоты вращения шнека имеет зону значений исследуемого параметра, ограниченную средней и максимальной частотами вращения шнека n_2 :

$$\begin{aligned} k_H &= [k_H^{min}; k_H^{max}] = [0,95; 2,96]; \\ n_2 &= [n_2^{min}; n_2^{max}] = [183,28; 429,86] \text{ об/мин.} \end{aligned}$$

Центр плана эксперимента

$$n_2^0 = \frac{n_2^{max} + n_2^{min}}{2} = \frac{429,86 + 183,28}{2} = 306,57 \text{ об/мин.} \quad (3.39)$$

Интервал варьирования фактора

$$n_2 = \pm \frac{n_2^{max} - n_2^{min}}{2} = \pm \frac{429,86 - 183,28}{2} = \pm 123,29 \text{ об/мин.} \quad (3.40)$$

Кодированное значение фактора:

$$X_2^{min} = \frac{n_2^{min} - n_2^0}{\Delta n_2} = -1; \quad (3.41)$$

$$X_2^{max} = \frac{n_2^{max} - n_2^0}{\Delta n_2} = +1; \quad (3.42)$$

$$X_2 = \frac{n_2 - 306,57}{123,29} \quad (3.43)$$

Для кодирования фактора X_1 справедливы формулы (3.29)–(3.31), полученные ранее для первого поля экспериментальной зависимости.

Матрица планирования эксперимента для второй области, построенная на основе экспериментальных данных (см. п. 3.3), представлена в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Матрица планирования эксперимента
для второго поля зависимости энергоемкости формования
от коэффициента напора и частоты вращения шнека

Фактор	Уровень			Шаг варьирования				
	-1	0	+1					
k_H	0,95	1,955	2,96	1,005				
n_2	183,28	306,57	429,86	123,29				
Номер вариан- та	Планирование				Выход			Расчет
	X_0	X_1	X_2	X_1X_2	$A_j^{(1)}$	$A_j^{(2)}$	$A_j^{(3)}$	
1	+	-	-	+	0,856 7	0,931 2	0,848 96	0,878 953
2	+	+	-	-	1,723 56	1,607 4	1,686 72	1,672 56
3	+	-	+	-	1,026 74	0,945 7	1,021 65	0,998 03
4	+	+	+	+	2,965 5	2,884 27	3,275 33	3,041 7

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) также взято из журнала проведения эксперимента и материалов работ [97, 103–105].

Расчет коэффициентов уравнения (3.24) регрессии b_k ведется по формуле (3.34) [107]:

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{1}{4}(0,878\ 953 + 1,672\ 56 + 0,998\ 03 + 3,041\ 7) = 1,647\ 81; \\ b_1 &= \frac{1}{4}(-0,878\ 953 + 1,672\ 56 - 0,998\ 03 + 3,041\ 7) = 0,709\ 32; \\ b_2 &= \frac{1}{4}(-0,878\ 953 - 1,672\ 56 + 0,998\ 03 + 3,041\ 7) = 0,372\ 05; \\ b_{12} &= \frac{1}{4}(0,878\ 953 - 1,672\ 56 - 0,998\ 03 + 3,041\ 7) = 0,312\ 52. \end{aligned}$$

При подстановке найденных коэффициентов b_k в уравнение регрессии (3.24) для кодированных значений факторов $|X_1| \leq 1$ и $|X_2| \leq 1$ имеем

$$A_2 = 1,647\ 81 + 0,709\ 32X_1 + 0,372\ 05X_2 + 0,312\ 52X_1X_2. \quad (3.44)$$

Данное уравнение можно представить в натуральном виде путем замены в нем кодированных переменных (3.31) и (3.43):

$$\begin{aligned} A_2 &= 1,647\ 81 + 0,709\ 32 \left(\frac{k_H - 1,955}{1,005} \right) + 0,372\ 05 \left(\frac{n_2 - 306,57}{123,29} \right) + \\ &+ 0,312\ 52 \left(\frac{k_H - 1,955}{1,005} \right) \left(\frac{n_2 - 306,57}{123,29} \right). \end{aligned} \quad (3.45)$$

После упрощения уравнение (3.44) преобразуется:

$$A_2 = 0,854\ 53 - 0,067\ 46k_H - 0,001\ 91n_2 + 0,002\ 52k_H n_2. \quad (3.46)$$

Полученное уравнение справедливо в отношении второй области экспериментально полученной зависимости, для которой частота вращения шнека изменяется от средней до максимальной.

Таким образом, для двух областей зависимости энергоемкости формования от коэффициента напора и частоты вращения формующего шнека методом планирования эксперимента составлены математические модели (3.38) и (3.46).

Следующим необходимым этапом является статистическая оценка значимости коэффициентов уравнений регрессии по методике, подробно изложенной в источниках [107, 108].

Построчные дисперсии рассчитываются на основе матрицы планирования:

$$D(\bar{A}_j) = \frac{1}{m-1} \sum_{q=1}^m \left(\bar{A}_j - A_j^{(q)} \right)^2, \quad (3.47)$$

где m – число повторений опытов при одном и том же j ($m = 3$); q – номер результата опыта ($q = 1-3$).

Дисперсия воспроизводимости рассчитывается как средняя арифметическая из построчных дисперсий всех N вариантов опытов:

$$D(A) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N D(\bar{A}_j). \quad (3.48)$$

Дисперсия среднего значения

$$D(\bar{A}) = \frac{1}{m} D(A). \quad (3.49)$$

Дисперсия коэффициентов регрессии

$$D(b_k) = \frac{1}{N} D(\bar{A}). \quad (3.50)$$

Ошибка коэффициентов регрессии

$$\sigma(b_k) = \sqrt{D(b_k)}. \quad (3.51)$$

Оценка значимости коэффициентов регрессии производится на основе неравенства

$$|b_k| > \sigma(b_k) t_p(f), \quad (3.52)$$

где $t_p(f) = 2,31$ – коэффициент Стьюдента для достоверности $P = 95\%$ и числа степеней свободы $f = N(m-1) = 8$ [107].

Если выполняется неравенство (3.52), то коэффициенты регрессии значимы на уровне достоверности $P = 95\%$.

Для результатов планирования экспериментов в первой области (см. табл. 3.8) определены:

построчные дисперсии:

$$D_1(\bar{A}_j) = \frac{1}{2} [(1,202\ 12 - 1,104\ 35)^2 + (1,202\ 12 - 1,312\ 8)^2 + (1,202\ 12 - 1,189\ 21)^2] = 0,010\ 94;$$

$$D_2(\bar{A}_j) = \frac{1}{2} [(3,132\ 86 - 3,456\ 7)^2 + (3,132\ 86 - 3,087\ 4)^2 + (3,132\ 86 - 2,854\ 48)^2] = 0,092\ 22;$$

$$D_3(\bar{A}_j) = \frac{1}{2} [(0,878\ 95 - 0,798\ 9)^2 + (0,878\ 95 - 0,874\ 3)^2 + (0,878\ 95 - 0,963\ 659)^2] = 0,006\ 81;$$

$$D_4(\bar{A}_j) = \frac{1}{2} [(1,672\ 56 - 1,708\ 4)^2 + (1,672\ 56 - 1,583\ 6)^2 + (1,672\ 56 - 1,725\ 68)^2] = 0,006\ 01;$$

дисперсия воспроизводимости

$$D(A) = \frac{1}{4} (0,010\ 94 + 0,092\ 22 + 0,006\ 81 + 0,006\ 01) = 0,029;$$

дисперсия среднего значения

$$D(\bar{A}) = \frac{1}{3} \cdot 0,029 = 0,009\ 67;$$

дисперсия коэффициентов регрессии

$$D(b_k) = \frac{1}{4} \cdot 0,009\ 67 = 0,002\ 42;$$

ошибка коэффициентов регрессии

$$\sigma(b_k) = \sqrt{0,002\ 42} = 0,049\ 19.$$

Для того чтобы коэффициенты регрессии были значимыми на уровне достоверности $P = 95\%$, должно выполняться неравенство

$$|b_k| > \sigma(b_k) t_p(f) = 0,049\ 19 \cdot 2,31 = 0,113\ 63.$$

Тогда

$$|b_0| = 1,721\ 62 > 0,113\ 63 \text{ – значим;}$$

$$|b_1| = 0,681\ 09 > 0,113\ 63 - \text{значим};$$

$$|b_2| = 0,445\ 87 > 0,113\ 63 - \text{значим};$$

$$|b_{12}| = 0,284\ 28 > 0,113\ 63 - \text{значим}.$$

Таким образом, в выражении (3.38) все коэффициенты регрессии являются значимыми на уровне достоверности $P = 95\ %$.

Для результатов планирования экспериментов во второй области (см. табл. 3.9) определены:

построчные дисперсии:

$$D_1(\bar{A}_j) = \frac{1}{2}[(0,878\ 953 - 0,856\ 7)^2 + (0,878\ 953 - 0,931\ 2)^2 + (0,878\ 953 - 0,848\ 96)^2] = 0,002\ 07;$$

$$D_2(\bar{A}_j) = \frac{1}{2}[(1,672\ 56 - 1,723\ 56)^2 + (1,672\ 56 - 1,607\ 4)^2 + (1,672\ 56 - 1,686\ 72)^2] = 0,003\ 53;$$

$$D_3(\bar{A}_j) = \frac{1}{2}[(0,998\ 03 - 1,026\ 74)^2 + (0,998\ 03 - 0,945\ 7)^2 + (0,998\ 03 - 1,021\ 65)^2] = 0,002\ 06;$$

$$D_4(\bar{A}_j) = \frac{1}{2}[(3,041\ 7 - 2,965\ 5)^2 + (3,041\ 7 - 2,884\ 27)^2 + (3,041\ 7 - 3,275\ 33)^2] = 0,042\ 59;$$

дисперсия воспроизводимости

$$D(A) = \frac{1}{4}(0,002\ 07 + 0,003\ 53 + 0,002\ 06 + 0,042\ 59) = 0,012\ 56;$$

дисперсия среднего значения

$$D(\bar{A}) = \frac{1}{3} \cdot 0,012\ 56 = 0,004\ 19;$$

дисперсия коэффициентов регрессии

$$D(b_k) = \frac{1}{4} \cdot 0,004\ 19 = 0,001\ 05;$$

ошибка коэффициентов регрессии

$$\sigma(b_k) = \sqrt{0,001\ 05} = 0,032\ 4.$$

Для того чтобы коэффициенты регрессии были значимы на уровне достоверности $P = 95\ %$, должно выполняться неравенство

$$|b_k| > (b_k)t_p(f) = 0,032\ 4 \cdot 2,31 = 0,074\ 8.$$

Тогда

$$|b_0| = 1,647\ 81 > 0,074\ 8 - \text{значим};$$

$$|b_1| = 0,709\ 32 > 0,074\ 8 - \text{значим};$$

$$|b_2| = 0,372\ 05 > 0,074\ 8 - \text{значим};$$

$$|b_{12}| = 0,312\ 52 > 0,074\ 8 - \text{значим}.$$

Таким образом, в выражении (3.46) все коэффициенты регрессии являются значимыми на уровне достоверности $P = 95\ %$.

Производство кускового торфа должно осуществляться с наименьшими энергозатратами [94]. Расчет энергоемкости формования кускового торфа не только в процессе его производства, но и на стадии проектирования машин и процессов позволит оптимизировать затраты и ресурсы, а также создавать машины, работающие в рациональных режимах [5, 122], что особенно актуально при организации добычи торфа в северных районах России [20, 123].

3.8. Выводы по главе

1. Энергоемкость при формовании торфа напрямую зависит от трех параметров формующего агрегата: частоты вращения, шага витков шнека, соотношения площадей живого сечения напорной трубы и мундштука.

2. Для всех исследованных режимов существует некий минимум энергоемкости при формовании, приходящийся на область 220–320 об/мин шнека. Данный факт можно объяснить следующим. Энергоемкость – это не затраченная энергия, а отношение полезной мощности к производительности, т.е. удельная характеристика. 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 необходимой мощности, в результате чего повышается энергоемкость процесса, что способствует, соответственно, повышению износа рабочих частей пресса [77].

3. Во всех проведенных опытах энергоемкость процесса изменялась от 0,88 до 3,42 МДж/м³.

4. Интенсивность изменения удельных энергозатрат выше при установке мундштука меньшего диаметра. По мере увеличения диаметра интенсивность изменения удельных энергозатрат падает.

5. Большая сила тока в приводном двигателе (следовательно, и необходимая мощность на формование) соответствует установленному мундштуку меньшего диаметра. Большая энергоемкость в исследованной зоне при прочих равных условиях соответствует использованию шнека с большим шагом, что объясняется большей нагрузкой на виток и большей производительностью механизма. Большая плотность сформованных кусков соответствует большей частоте вращения и меньшему шагу витков шнека. Очевидно, что меньшая энергоемкость и большая плотность кусков, достигаемая при использовании шнека с шагом витков 50 мм, способствуют работе машины в более рациональном режиме.

Следовательно, шаг витков шнека должен быть близок к половине наружного диаметра шнека.

6. Исследовано воздействие параметров формования торфа на конечную плотность высушенной продукции. Как следует из полученной зависимости, интенсивность роста плотности куска при увеличении энергоемкости заметно падает при изменении k_n с 2,22 до 2,96. В связи с этим формование при $k_n = 2,22$ можно считать рациональным режимом.

7. Разработан и создан стенд для проверки прочности на изгиб формованной торфяной продукции. Отработана методика его применения. Результаты испытания на прочность сформованных кусков торфа показали, что максимальная прочность свойственна кускам, полученным в режиме формования с параметрами: скорость вращения шнека $n = 220\text{--}320$ об/мин, шаг витков шнека $S = 50$ мм (равен половине наружного диаметра шнека D). Поскольку при неизменном росте энергоемкости с уменьшением диаметра мундштука интенсивность роста прочности начинает падать со значения коэффициента напора $k_n = 2,22$, формование с таким коэффициентом можно считать рациональным режимом работы.

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

9. Получены математические модели, описывающие зависимость энергоемкости формования кускового торфа от коэффициента напора и частоты вращения шнека для двух областей скорости вращения шнека. Оценка значимости коэффициентов полученных уравнений регрессии показала, что все они являются значимыми на уровне достоверности $P = 95$ %. Анализ значений коэффициентов в уравнениях регрессии показывает, что коэффициент напора сильнее влияет на энергоемкость, чем частота вращения шнека.

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ КУСКОВОГО ТОРФА КАК ЗАМЕНИТЕЛЯ ДАЛЬНЕПРИВОЗНЫХ ТОПЛИВ

4.1. Кусковое торфяное топливо, получаемое при освоении арктических территорий

Программа комплексного развития арктических территорий, простирающихся от Архангельской области до Дальнего Востока и островов Северного Ледовитого океана, подразумевает создание российского оборонного щита вдоль всего побережья. Здесь будут строиться военные базы, полигоны, военные городки и учебные центры

[124–126]. Как видно из появляющихся в центральной печати и электронной сети Интернет сообщений, в настоящий момент программа реализуется, причем весьма успешно. Ряд военных баз и городков, построенных на побережье Северного Ледовитого океана, – яркое тому подтверждение.

Поставленная Президентом и Правительством Российской Федерации задача освоения северных арктических территорий и островов, принадлежащих России, требует детальной проработки коммунально-бытовых вопросов жизнеобеспечения военнослужащих и обслуживающего персонала, в частности вопросов, связанных с отоплением жилья, приготовлением пищи и др. Известно, что снабжение поселений жидким топливом (бензином, дизельным топливом и т.д.) влечет за собой огромные затраты на доставку топлива морским и воздушным транспортом, приводит к скоплению в прибрежной полосе многочисленной тары. (Совсем недавно газеты сообщали о том, что около 50 000 бочек были вывезены и утилизированы в «пожарном» режиме (рис. 4.1) [127]. В целом же засоренность арктического побережья проржавевшим металлоломом, среди которого больше всего бочек из-под нефтяного топлива, оценивается экспертами в 65 000 т [125].) Кроме того, имеют место колоссальные затраты на само топливо, так как цена его, по сравнению с остальными видами, весьма высока. Указанные виды топлива взрывопожароопасны как в процессе транспортирования, так и в процессе эксплуатации.



Рис. 4.1. Погрузка, вывоз и утилизация бочек

В целях экологической безопасности и значительного сокращения затрат представляется правильным применять более дешевое, простое в доставке, безопасное (обладающее меньшим удельным весом и зольностью), а также более эффективное в данных условиях торфяное топливо с большой теплотворной способностью. Оно пригодно даже для больших ТЭЦ. Так, например, кусковой торф имеет теплотворную способность при сжигании 3 200 ккал/кг, торфяной брикет – 4 200 ккал/кг, а фрезерный торф – 2 650 ккал/кг. Сравнительная теплотворная способность различных видов топлива представлена в табл. 4.1. Она составлена по материалам многочисленных источников.

Таблица 4.1

Теплотворная способность различных видов топлива

Вид топлива	Теплотворная способность топлива		Эквивалент
	Ккал/кг	МДж/кг	
Условное топливо	7 000	29,31	1,0
Метан	7 000	29,31	1,0
Донецкий уголь	5 044,43–7 215,53	21,12–30,21	0,72–1,03
Донецкий антрацит	6 515,72–7 494,98	27,28–31,38	0,93–1,07
Природный газ	4 179,80–5 015,76	17,50–21,00	0,60–0,72
Мазут	9 527,56–10 857,93	39,89–45,46	1,36–1,55
Бензин	10 506,83–11 278,30	43,99–47,22	1,50–1,61
Керосин	10 506,83–10 998,85	43,99–46,05	1,50–1,57
Дрова березовые (влажность 25–30 %)	2 980	12,48	0,43
Торф фрезерный (влажность 40 %)	2 650	11,10	0,38
Торф кусковой (влажность 33 %)	3 200	13,40	0,46
Торфяной брикет (влажность 16 %)	4 200	17,58	0,60

Из всех перечисленных видов торфяного топлива наиболее уместным в арктических условиях при отоплении и использовании для хозяйственных нужд военных баз и городков представляется кусковой торф. Он добывается в полевых условиях и не требует каких-либо дополнительных производственных площадей. Это легкое (плотность в навалe около 500 кг/м³) и безопасное топливо при перевозке его любым видом транспорта. Доставлять кусковой торф можно транспортными вертолетами (используя возвратную тару, изготовленную из легкого материала, например стеклопастика) по принципу и подобию морских контейнеров, а также осуществляя разгрузку беспосадочным методом. Отсутствие необходимости в посадке транспорта во много раз обезопасит сами полеты, поскольку известно, что большая часть аварийных случаев происходит не во время полетов, а во время взлета и посадки. Обилие речных артерий, впадающих в Северный Ледовитый океан, позволит

беспрепятственно доставлять торфяное топливо во время летней навигации к побережью, создавать необходимые долгосрочные запасы.

По мере осуществления разведки местности исследователи могли бы перейти к добыче торфа на местах, поскольку торфяные болота располагаются в России во всех климатических зонах. Колоссальное их количество сосредоточено и в прилегающих районах [128, 129]. Так, например, разведанные и оцененные по состоянию на 2014 год запасы торфа для Дальневосточного, Северо-западного и Сибирского федеральных округов составляют:

- в Камчатской области – 4 407,6 млн т;
- Сахалинской – 1 077,2 млн т;
- Магаданской – 74,4 млн т;
- Амурской – 1 590,5 млн т;
- Архангельской – 3 933,7 млн т;
- Мурманской – 882,3 млн т;
- Хабаровском крае – 1 213,3 млн т;
- Приморском – 197,1 млн т;
- Красноярском – 3 761,8 млн т;
- Республике Саха – 28,1 млн т;
- Республике Карелии – 2 347,5 млн т;
- Республике Коми – 7 562,4 млн т.

Следует отметить, что производственные опыты по добыче кускового торфа в условиях Крайнего Севера (г. Нарьян-Мар) уже проводились отечественными учеными и производственниками. Опыты показали абсолютную возможность добычи кускового топливного торфа в условиях Крайнего Севера послойно-поверхностным способом. В центральной части России такой способ оправдан для производства фрезерного торфа. Кусковой же торф добывается либо методом стилки (из карьера), либо фрезформовочным методом. Районы Крайнего Севера характеризуются наличием вечной мерзлоты с постепенным оттаиванием в летний период. Оттаивание мерзлоты по состоянию на 1 сентября (любого года) наблюдалось на глубину не более 0,5 м. Поскольку начинать сезон добычи кускового торфа необходимо не 1 сентября, а гораздо раньше, учеными был предложен послойно-поверхностный способ. Для этого разработали и создали фрезформовочную машину КДН-2 (комбайн добывающий навесной) (см. рис. 1.16), которая при максимальной глубине фрезерования 150 мм и рабочей скорости до 0,492 км/ч имела производительность 2,16 т воздушно-сухого торфа за час чистой работы [20].

Запасы торфа извлекаются открытым способом с поверхности, не требуют подземных разработок и строительства шахт. За сезон короткого лета протяженностью около одного месяца можно осуществить полный

цикл производства кускового торфа и около 10 циклов производства фрезерного торфа, пригодного к последующему брикетированию в заводских условиях. Сильные ветры, свойственные северным территориям, способствовали бы ускорению процессов естественной сушки торфа [6].

Сжигание кускового торфа, как и любого другого подобного топлива, для отопления и приготовления пищи производится в твердотопливных топках печей и котлов теплопроизводительностью от 0,3 до 5 МВт. Такие печи уже активно используются в российской армии. Низкое содержание серы и азота в выбросах, а также небольшая начальная зольность торфяного топлива делают его привлекательным и в экологическом отношении.

Разведанные запасы торфа в России составляют более 175,6 млрд т [6]. При этом торфяные болота и, естественно, торф обладают свойством возобновления, или естественного прироста, которое отмечено даже на законодательном уровне. Ежегодный прирост торфа по России составляет около 250 млн т. На основании Федерального закона № 268-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (в части, касающейся Федерального закона «Об электроэнергетике») торф может считаться полноправным заменителем всех видов теплоэнергетического топлива.

Для разработки торфяных месторождений используется специальная техника и применяются технологии, приспособление которых под конкретные географические условия производства является важной задачей ученых и инженеров.

Тверской государственный технический университет, выступающий правопреемником Московского торфяного института, с начала своего основания ведет работы в области технологии и комплексной механизации торфяного производства. В его составе есть высококвалифицированные кадры, работающие на кафедрах, связанных с обеспечением добычи и переработки торфа. Специалисты ТвГТУ готовы:

- произвести разведку конкретных месторождений и обосновать возможность их разработки;

- детально проработать схему доставки торфяного топлива на горные, степные, островные и другие труднодоступные места;

- создать технологическую схему сжигания торфяного топлива;

- в случае организации добычи торфа в северных районах разработать технологическую схему производства торфа, рекомендовать необходимую для этого технику, разработать систему складирования и хранения топлива [123].

Непозволительно использовать дорогое, труднодоступное и опасное нефтяное топливо, в то время как его противоположность вполне доступна для добычи.

4.2. Особенности и актуальность проблемы транспортирования добытого кускового торфа

Транспортные операции в торфяной промышленности занимали и занимают значительное место, и правильный выбор вида транспорта, средств механизации и погрузочно-разгрузочных работ позволяет наиболее экономно расходовать материальные и трудовые ресурсы. Главным критерием применения того или иного вида транспорта является его экономическая целесообразность.

Достаточно долгое время (до начала 2000-х гг.) основным видом транспорта для перевозки миллионов тонн торфа и торфяной продукции были железные дороги узкой колеи (750 мм). Они также являлись транспортными артериями, связывающими целые административные районы. Развитие торфяной промышленности было тесно связано с созданием широкой сети железных дорог, таких как Шатурская, Чернораменская, Комсомольская, Ново-Оршинская и др. [130].

Основными причинами относительно высокой себестоимости транспортирования торфа по железной дороге узкой колеи являются следующие особенности: небольшая плотность торфа (отсюда необходимость большого количества вагонов); наличие большого количества складочных единиц на полях добычи (отсюда необходимость частой перекладки временных путей для погрузки); наличие грузового и порожнего направлений движения; значительные эксплуатационные затраты при необходимости перегрузки (вагонопрокидыватель и др.), а также значительные затраты на содержание парка вагонов, тепловозов и самих железнодорожных сетей.

К преимуществам железнодорожного транспорта узкой колеи следует отнести возможность укладки временных путей для погрузки непосредственно на торфяное основание и возможность буксирования тепловозом сразу большого количества вагонов.

Если затраты на содержание и эксплуатацию железных дорог и железнодорожных составов узкой колеи не подкрепляются необходимым грузооборотом или большим объемом перевозимой товарной торфяной продукции, то этот вид транспорта может до минимума снизить рентабельность или вообще сделать предприятие убыточным.

Применение автомобильного транспорта на пневмоколесном ходу упрощает перевозочный процесс. При этом иногда из него исключаются перегрузочные операции, уменьшаются потери торфа при транспортировании и сокращается продолжительность доставки [130]. Однако себестоимость перевозок торфа автотранспортом нередко достигает себестоимости производства торфа [131, 132]. В частности, требуется сооружение на территории торфопредприятий автодорог, позволяющих производить движение автотранспорта не только в зимний

период, но и в другие сезоны, а также использовать на этих перевозках специализированный автотранспорт, конструкция которого дает возможность при минимальном удельном давлении под колесами перевозить максимальные объемы грузов небольшой плотности. При отсутствии специальных дорог вывозка торфа автотранспортом возможна только в зимнее время, т.е. в период промерзания торфяной залежи.

Самыми распространенными типами автомобильных дорог на торфопредприятиях СССР были дороги на хворостяном основании с подсыпкой слоя гравия толщиной 10–15 см и последующей трамбовкой; гравийно-грунтовые дороги, стабилизированные сланцевой золой; облегченные автодороги с покрытием из дренирующего грунта. Все вышеперечисленные типы дорог предполагают использование в своем составе щебня, который в настоящее время является довольно дорогим материалом.

Современное состояние торфяной промышленности характеризуется резким снижением темпов как добычи, так и транспортирования торфа, что объясняется временным снижением потребности в торфе и продуктах его переработки. Содержание многокилометровой сети железных дорог и железнодорожных составов узкой колеи на большинстве предприятий становится настолько дорогим, что «съедает» всю прибыль производственных участков, полученную на добыче торфа, поэтому большая часть торфа (а иногда и весь добытый торф) вывозится автотранспортом. Для этого применяются технологии строительства быстровозводимых дорог, сборно-разборных дорожных покрытий, намораживания дорог зимой. Часто строительство таких автомобильных дорог производится на месте и вместо узкоколейных железных дорог. Использование специального транспорта – торфовозов (на базе автомобилей КамАЗ и МАЗ) и прицепов для грузов с низкой насыпной плотностью (с объемом кузова до 80 м³) – позволяет существенно уменьшить затраты на перевозку торфа. Таким образом, вывозку торфа с полей автотранспортом (или с применением пневматического колесного хода) можно считать проблемой важной и актуальной.

Если учитывать сезонность характера работ по добыче торфа и низкую занятость населения поселков при торфопредприятиях, то целесообразно именно торфопредприятиям заниматься транспортированием торфа во внесезонное время без привлечения посреднических услуг, при этом максимально используя свои возможности и задействуя собственную технику.

4.3. Оптимизация транспортных работ при организации доставки кускового торфа

В основе оптимизации транспортных работ, связанных с доставкой кускового торфа, лежит поиск решения по минимизации их стоимости.

Поскольку работы по вывозке топливного торфа с производственных участков и доставке его к конечным потребителям можно трактовать как многошаговую (многоэтапную) задачу, то поиск оптимального решения по способу транспортирования может быть найден пошаговым определением затрат в сочетании с методом динамического программирования. Принцип оптимальности динамического программирования, сформулированный американским математиком Р. Беллманом и носящий его имя, гласит: «оптимальное поведение обладает тем свойством, что, каковы бы ни были первоначальное состояние и решение в начальный момент, последующие решения должны составлять оптимальное поведение относительно состояния, полученного в результате первоначального решения» [133]. Следовательно, результат многоэтапного процесса может быть оптимальным лишь в том случае, если является оптимальным результат каждого этапа.

Принцип оптимальности Беллмана может быть записан в виде рекуррентного соотношения [107, 133]

$$f_{n-i}(x_i) = \max(\min) \{R_{i+1}(x_i, x_{i+1}) + f_{n-(i+1)}(x_{i+1})\}, \quad (4.1)$$

где x_i, x_{i+1} – решение (управление), выбранное на i -м шаге (дуга из x_i в x_{i+1}); $x_i = (x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(m)})$ – состояние системы на i -м шаге; R_i – эффект, достигаемый на i -м шаге; f_{n-i} – оптимальное значение эффекта, достигаемого за $n-i$ шагов; n – число шагов (этапов).

Чтобы определить оптимальное решение, пользуясь формулой (4.1) (например, в задаче по минимизации затрат на перевозку), необходимо [107]:

1. Записать функциональное уравнение для последнего состояния процесса (для $i = n - 1$):

$$f_1(x_{n-1}) = \min_{(x_{n-1}, x_n)} \{R_n(x_{n-1}, x_n) + f_0(x_n)\}. \quad (4.2)$$

2. Найти $R_n(x_{n-1}, x_n)$ из дискретного набора его значений при некоторых фиксированных x_{n-1}, x_n (так как всегда начальное условие принимают $f_0(x_n) = 0$, то $f_1(x_{n-1}) = \min \{R_n(x_{n-1}, x_n)\}$. В результате первого шага известно решение x_{n-1}, x_n и значение $f_1(x_{n-1})$.

3. Уменьшить значение i на единицу и записать соответствующее уравнение (4.1).

4. Найти условно-оптимальное решение на основе выражения (4.1). При $i = 0$ расчет условно-оптимальных значений заканчивается, так как найдено оптимальное решение для первого состояния процесса.

5. Вычислить оптимальное решение задачи для каждого шага процесса, двигаясь от конца расчетов к началу.

Данный принцип может быть применим полностью только к задачам, в условиях которых присутствуют лишь последовательные этапы. Например, из пункта 1 требуется перевезти груз в пункт 2, из пункта 2 – в

пункт 3, из пункта 3 – в пункт 4 и т.д. Однако на практике чаще встречаются ситуации, когда с целью исключения погрузочно-разгрузочных работ или по другим причинам груз возможно перевезти из пункта 1 в пункт 3, минуя пункт 2. При этом затраты на перевозку из пункта 1 в пункт 3 могут быть больше или меньше суммарных затрат на перевозку из пункта 1 в пункт 2 и из пункта 2 в пункт 3. В этом случае одного метода Беллмана с определением минимальных затрат на предыдущем этапе недостаточно, так что решение об оптимизации необходимо принимать еще и на основании полного и всестороннего пошагового определения анализа затрат на последовательных этапах. В общем виде схема возможной доставки топливного торфа с производственных участков торфопредприятия к конечному потребителю различными видами транспорта показана на рис. 4.2. Виды транспорта здесь обозначены определенными буквами: М, Т, МЗ, Ш, У. Пункт 1 – пункт погрузки топливного торфа на производственном участке торфопредприятия; пункты 2 и 3 – перегрузочные площадки торфопредприятия, оборудованные на суходоле; пункты 4 и 5 – склады с запасом топлива, расположенные на территории, например, энергетической станции или какого-либо другого крупного потребителя топлива; 6 – бункер разгрузочного корпуса энергетической станции. Пункты 2, 3 и 4, 5 не объединены из-за существенной разницы в подъездных путях и проведении погрузочно-разгрузочных работ, которая вынуждает специалистов размещать эти площадки в разных местах. Использование грузового автотранспорта в зимний период обусловлено подготовкой автодорог методом намораживания [130].

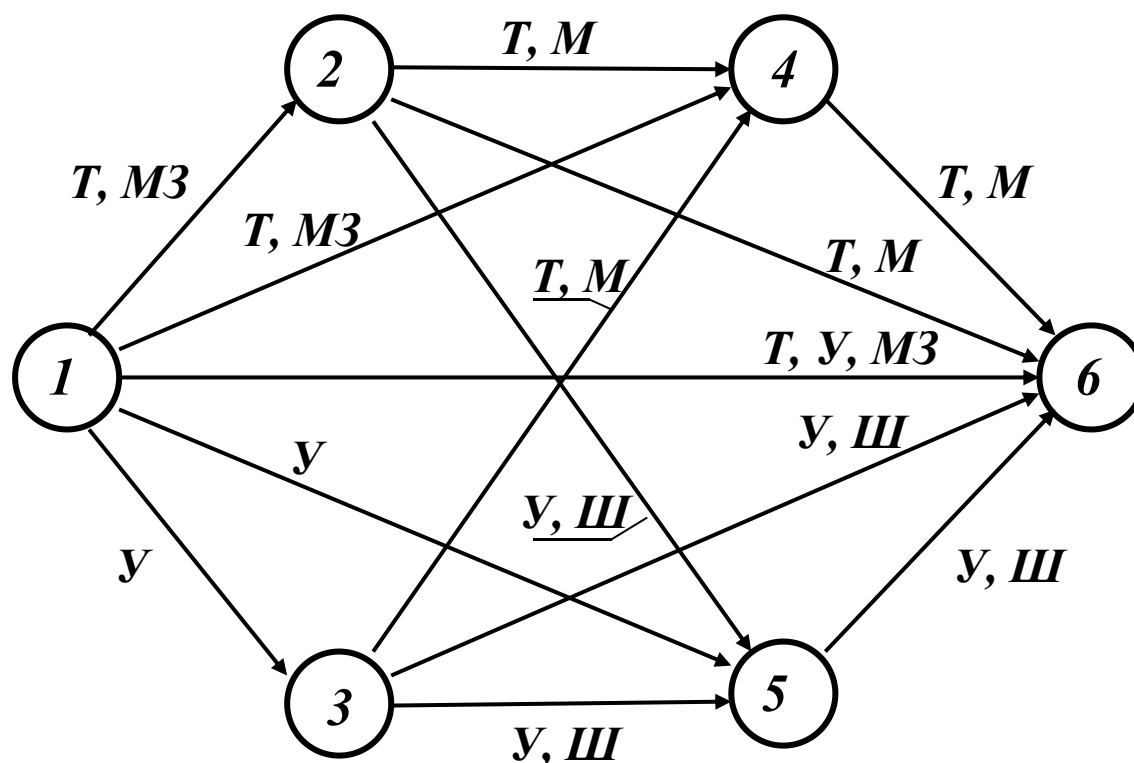


Рис. 4.2. Схема возможной доставки топливного кускового торфа с производственных участков торфопредприятия к конечному потребителю различными видами транспорта:
M – грузовой автомобиль; *У* – железнодорожный вагон узкой колеи;
T – трактор с прицепом; *Ш* – железнодорожный вагон широкой колеи;
MЗ – грузовой автомобиль в зимний период

Для наглядности метода оптимизации транспортных затрат проиллюстрируем такую транспортную задачу примером.

Пусть транспортные затраты на доставку топливного кускового торфа из начального пункта в конечный (см. рис. 4.2) составляют некую стоимость, выраженную в условных единицах (табл. 4.2). При этом для удобства будем считать, что стоимость погрузочно-разгрузочных работ включена в общую стоимость транспортных работ на каждом этапе. Пронумеруем этапы от конечной вершины сети к начальной. Так, $n = 1$ для переходов $(4-5) \rightarrow 6$; $n = 2$ для переходов $(2-3) \rightarrow (4-5-6)$; $n = 3$ для переходов $1 \rightarrow (2-3-4-5-6)$.

Таблица 4.2

Пример оценки стоимости транспортных работ

Пункт отправления	Пункт прибытия	Стоимость транспортных затрат в условных единицах
1	2	1
2	4	3
4	6	3
1	3	1
3	5	5
5	2	6
1	4	3
1	5	5
2	6	5
2	5	6
3	4	5
3	6	6
1	6	6

Рассмотрим последний этап при $n = 1$ и вычислим для него значение функции (4.1):

$$f_1(4_6) = x_{4,6} + f_0(6) = 3 + 0 = 3;$$

$$f_1(5_6) = x_{5,6} + f_0(6) = 2 + 0 = 2.$$

Оптимальный маршрут на последнем этапе

$$f_1(x_1) = \min_{x_{n-1}, x_n} \{3; 2\} = 2,$$

т.е. из пункта 5 в пункт 6.

На втором этапе ($n = 2$) рассматриваются все маршруты до пункта 6, а затем из них выбирается маршрут с наименьшими затратами:

$$f_2(x_n) = \min_{x_1, x_2} \{R(x_1, x_2) + f_1(x_1)\},$$

или в цифрах:

$$f_2(2_4) = x_{2,4} + f_1(4) = 3 + 3 = 6;$$

$$f_2(2_6) = x_{2,6} + f_0(6) = 5 + 0 = 5;$$

$$f_2(2_5) = x_{2,5} + f_1(5) = 5 + 2 = 7.$$

Минимальные затраты на втором этапе при транспортировании торфа из пункта 2 ожидаются на переходе 2–6 [$f_2(2_6) = 5$].

$$f_2(3_5) = x_{3,5} + f_1(5) = 5 + 2 = 7;$$

$$f_2(3_6) = x_{3,6} + f_0(6) = 6 + 0 = 6;$$

$$f_2(3_4) = x_{3,4} + f_1(4) = 5 + 3 = 8.$$

Минимальные затраты на втором этапе при транспортировании торфа из пункта 3 ожидаются на переходе 3–6 [$f_2(3_6) = 6$].

Оптимальный маршрут на предпоследнем этапе

$$f_2(x_n) = \min_{x_{n-1}, x_n} \{6; 5; 7; 7; 6; 8\} = f_2(2_6) = 5,$$

т.е. из пункта 2 в пункт 6.

На первом этапе ($n = 3$) рассматриваются все возможные варианты доставки из пункта 1:

$$f_3(1_2) = x_{1,2} + f_2(2_6) = 1 + 5 = 6;$$

$$f_3(1_4) = x_{1,4} + f_1(4_6) = 3 + 3 = 6;$$

$$f_3(1_6) = x_{1,6} + f_0(6) = 6 + 0 = 6;$$

$$f_3(1_5) = x_{1,5} + f_1(5_6) = 5 + 2 = 7;$$

$$f_3(1_3) = x_{1,3} + f_2(3_6) = 1 + 6 = 7.$$

Варианты доставки с переходами 1–2–5–6, 1–4–6 и 1–6 являются оптимальными и равноценными по затратам, а выбор конкретного пути доставки торфа должен определяться материально-технической базой, особенностями и расположением торфопредприятия.

Анализ схемы доставки торфа (см. рис. 4.2) позволяет оценить процентное соотношение возможностей выполнения работ тем или иным видом транспорта. Так, из 13 возможных переходов (100 %) 7 переходов (54 %) могут быть выполнены с применением тракторов с прицепами и железнодорожных составов узкой колеи; 4 перехода (31 %) – с применением грузового автотранспорта и железнодорожных составов широкой колеи; 3 перехода (23 %) – с применением грузового автотранспорта зимой при использовании технологии намораживания автодорог.

Поскольку в нынешних реалиях сокращаются объемы перевозок железнодорожным транспортом узкой колеи из-за высоких затрат на содержание и обслуживание, первое место по универсальности применения занимают колесные тракторы с прицепами. Благодаря повышенной проходимости (по сравнению с грузовыми автомобилями)

они вывозят добытый торф непосредственно с производственных участков. Тракторные прицепы, используемые на вывозке кускового торфа, могут быть задействованы с технологической схемы уборки фрезерного торфа из наращиваемых валков (так называемая схема с отдельной уборкой). Коэффициент использования техники в этом случае значительно увеличивается, поскольку тракторы и прицепы не простаивают в межсезонное время, а круглогодично вовлечены в производство и сбыт.

В качестве рекомендуемых моделей прицепов, применимых для вывоза торфа и имеющих право выхода на дороги общего пользования, можно назвать, например, ПТС-20 грузоподъемностью 15 т и объемом кузова с наращенными бортами до 25 м³, а также JSON-8520.1 грузоподъемностью 20 т и объемом кузова с наращенными бортами до 30 м³ (рис. 4.3) производства ООО ПК «Агромастер» (Татарстан) [130].



Рис. 4.3. Тракторный прицеп JSON-8520.1

Оба прицепа самосвального типа с автоматическим открытием заднего борта при опрокидывании кузова.

Не стоит забывать и о прицепах, которые могут быть использованы на внутримассивных перевозках. К таким стоит отнести финский двухосный JPV-45 с объемом 45 м³ (рис. 4.4), сдвоенный JPV-50 с суммарным объемом 50 м³ (рис. 4.5) [134] и российский спроектированный прицеп с объемом кузова 25 м³ (рис. 4.6) [135].



Рис. 4.4. Двухосный приводной прицеп JPV-45 для внутримассивных перевозок



Рис. 4.5. Сдвоенный приводной торфяной прицеп JPV-50 для внутримассивных перевозок



Рис. 4.6. Торфяной прицеп ППТ-25,2 для внутримассивных перевозок

Следует отметить, что у приводных прицепов для увеличения проходимости вращаются либо передние колеса (JPV-45), либо колеса переднего прицепа (JPV-50). В обоих случаях крутящий момент поступает к колесам прицепа от вала отбора мощности трактора, работающего в «зависимом режиме» (от вторичного вала коробки перемены передач) через трансмиссию, смонтированную на раме самого прицепа [136]. Прицеп ППТ-25,2 является ведомым, бесприводным [137].

4.4. Основы инвестиционного анализа при оценке транспортных работ по организации доставки кускового торфа

В Советском Союзе одним из основных показателей при оценке эффективности торфяного производства служила фондоотдача (ФО) [138]. Ее можно определить по формуле

$$FO = \frac{P}{C}, \quad (4.3)$$

где P – производительность техники в натуральных или стоимостных единицах; C – цена техники.

Достижение высокой фондоотдачи – это обеспечение высокого уровня эффективности производства, снижение себестоимости продукции, повышение рентабельности производства. Показатель фондоотдачи может быть выражен в натуральной и стоимостной формах, причем выражение его в стоимостной форме способствует более адекватной сопоставимости результатов расчетов. Некоторые данные о динамике фондоотдачи по производственным объединениям торфяной промышленности РСФСР за 1965–1977 гг. приведены в табл. 4.3 [138].

Таблица 4.3

Динамика фондоотдачи по производственным объединениям торфяной промышленности РСФСР за 1965–1977 гг.

Производственное объединение	Год				
	1965	1970	1972	1975	1977
«Росторф»	0,448	0,580	0,574	0,500	0,444
«Ленторф»	0,469	0,504	0,506	0,478	0,357
«Владимирторф»	0,404	0,596	0,530	0,477	0,496
«Ивановоторф»	0,397	0,703	0,700	0,610	0,630
«Калининторф»	0,393	0,560	0,629	0,510	0,393
«Шатурторф»	0,571	0,636	0,580	0,473	0,408
«Смоленскторф»	0,590	0,728	0,584	0,553	0,386
«Свердловскторф»	0,443	0,413	0,442	0,366	0,410
«Ижевскторф»	0,510	0,580	0,630	0,632	0,766

Анализ формулы (4.3) позволяет определить рост фондоотдачи как функцию от роста производительности и уменьшения цены оборудования, занятого в производстве. Резервы роста общей производительности определяются увеличением производительности труда, коэффициента сменности оборудования, производительности собственно оборудования, коэффициента интенсивной нагрузки оборудования. Кроме того, с точки зрения фондоотдачи большое значение имеет соотношение роста стоимости и производительности техники. Прогрессивны такие изменения в технике производства, когда рост стоимости техники отстает от роста ее производительности. Только в этом случае новая техника будет способствовать повышению фондоотдачи.

В условиях экономической свободы торфодобывающих предприятий и изменяющейся покупательной способности отечественного рубля показатель фондоотдачи имеет значение скорее иллюстративное, чем оценочное [139]. Изменились схемы инвестирования, сбыта, производство торфяной продукции тоже изменилось. Свернули деятельность ранее дотируемые предприятия, ограничили выпуск продукции до необходимого предприятия, оставшиеся на плаву. Появились новые виды торфяной продукции. Цена на топливный кусковой торф соизмеряется с ценой на другие виды топлива, и лишь только после этого принимается решение о работе на том или ином виде топлива. Инвестирование в какой-либо проект осуществляется лишь в том случае, когда он (в том числе и транспортирование торфа) выгоден.

В современной научной литературе исследованию проблемы выбора оптимального варианта капиталовложений уделено немало внимания. Методические рекомендации зарубежных организаций (например, методики ЮНИДО, Всемирного банка, ЕБРР), разработки отечественных ученых и госорганов РФ [139, 140] нацелены на необходимость единообразного подхода к оценке различных инвестиционных проектов.

При всем многообразии распространенных в настоящее время методик анализа эффективности инвестиций в реальном секторе экономики, в частности в торфяной отрасли горной промышленности, нет рекомендаций по применимости тех или иных показателей оценки. Оценка экономической эффективности по любому показателю имеет как положительные, так и отрицательные стороны, а также специфические условия и возможности ее применения на практике.

Среди существующих современных методик оценки экономической эффективности инвестиционного проекта следует выделить классические методы экономического анализа (балансовый, корреляционно-регрессионный, графический, сравнения, простых и сложных процентов, дисконтирования и др.), а также конкретно-аналитические приемы исследования (расчет абсолютных, относительных и средних величин, детализация показателей на составляющие, сводки и группировки).

Торфяная отрасль России характеризуется резко выраженной сезонностью основных работ по добыче торфа и невысокой рентабельностью, позволяющей, как правило, однократно производить лишь долгосрочные инвестиции, поэтому методика оценки экономической эффективности тех или иных инвестиционных программ в торфодобывающей отрасли должна учитывать конкретные условия.

Проведенный анализ возможных показателей и методик оценки экономической эффективности инвестиций в торфодобывающей отрасли позволил выделить показатели, в комплексе наиболее полно оценивающие состояние дел и перспективы развития торфяного предприятия. Это минимум приведенных затрат Z_{min} , коэффициент сравнительной экономической эффективности $K_э$, чистая текущая стоимость NPV , внутренняя норма доходности IRR , срок окупаемости инвестиций PP .

Широко распространенный ранее в практике российских предприятий показатель минимума приведенных затрат представляет собой сумму текущих затрат и капиталовложений, приведенных к одинаковой размерности в соответствии с нормативным показателем эффективности. Данный показатель рассчитывается по формуле [78]

$$Z_{min} = C + E_n K, \quad (4.4)$$

где C – годовые текущие затраты; E_n – нормативный показатель эффективности капиталовложений; K – единовременные капиталовложения.

Под нормативным показателем эффективности в различных литературных источниках [139, 140] рекомендуется понимать либо значение цены инвестированного в проект капитала, либо минимально приемлемую ставку рентабельности, установленную в рамках инвестиционной политики конкретной организации (предприятия).

Минимум приведенных затрат особенно актуален и показателен, когда единовременные капиталовложения происходят в начальный период ($t = 0$), а величина C постоянна из года в год и инвестиции осуществляются в основные фонды с неопределенно длительным сроком их эксплуатации. Основное правило использования данного показателя в инвестиционном анализе: из списка взаимоисключающих инвестиций, не имеющих явно выраженных финансовых результатов (невысокую рентабельность), целесообразно принимать проект с минимальными приведенными затратами.

В качестве примера рассмотрим вывозку кускового торфа из штабелей на полях торфодобывающего предприятия двумя способами. Первый вариант – 4 трактора с прицепами емкостью кузова по 30 м^3 , второй – один грузовой автомобиль с прицепом общей емкостью 50 м^3 . При этом следует отметить, что колесный трактор и прицеп в сезон торфодобычи вовлечены в основное производство, вывозка же торфа осуществляется в неблагоприятные по погодным условиям дни и вне

сезона, в связи с чем стоимость трактора с прицепом относится к затратам на производство торфа. Грузовой автомобиль не вовлечен в основное производство, и стоимость его целиком относится к затратам на транспортирование торфа. Будем считать, что нормативный показатель эффективности капиталовложений для данного предприятия установлен в размере 15 %. Необходимо найти наиболее экономичный вариант вложения средств [130].

Методика расчетов и сами расчеты приведенных затрат по двум альтернативным вариантам доставки представлены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Пример расчета приведенных затрат на вывозку кускового торфа для двух альтернативных вариантов

Показатели	Вариант № 1	Вариант № 2
1. Единовременные капиталовложения, тыс. рублей	100	4 000
2. Текущие затраты (расходы на электроэнергию, топливо, техническое обслуживание и эксплуатацию оборудования), тыс. рублей	2 000	700
3. Приведенные затраты на оборудование, тыс. рублей (строка 1 + строка 2/0,15)	13 433,33	8 666,67
4. Производительность оборудования, т/смену	84	52,5
5. Коэффициент приведения затрат к одинаковому объему транспорта	$84 : 84 = 1$	$84 : 52,5 = 1,6$
6. Приведенные затраты с учетом коэффициента приведения к одинаковому объему транспорта, тыс. рублей (строка 3 × строка 5)	13 433,33	13 866,67

Требуются некоторые пояснения для понимания специфики транспортных работ (см. табл. 4.4). Трактор, в отличие от грузового автомобиля, может двигаться лишь с меньшей на 40–60 % средней скоростью, поэтому за смену каждый трактор совершает только два рейса, а грузовой автомобиль – три. Производительность транспорта взята с учетом насыпной плотности торфа в кузове 350 кг/м^3 . Единовременные капиталовложения по варианту № 1 не включают затраты на приобретение тракторов с прицепами, но предусматривают затраты, необходимые для осуществления выхода колесных тракторов с прицепами на дороги с твердым покрытием (построение стационарной мойки и т.д.).

Из данных табл. 4.4 следует, что вариант № 2 менее экономичный в эксплуатации. Общая сумма экономии финансовых средств при вложении капитала по варианту № 1 составит 433,34 тыс. рублей ($13 866,67 - 13 433,33 = 433,34$).

Как видно из примера, основными факторами, влияющими на показатели эффективности производства в сравниваемых вариантах, являются емкости кузовов техники на пневмоколесном ходу и удаленность конечного потребителя от штабелей на полях добычи торфа, которая определяет, в свою очередь, количество рейсов техники в смену.

Другой (не менее распространенный) показатель, используемый в инвестиционной практике отечественных промышленных компаний, – коэффициент сравнительной экономической эффективности ($K_э$) [140]. Его можно выразить по формуле

$$K_э = (C_1 - C_2) / (K_2 - K_1), \quad (4.5)$$

где C_1 и C_2 – себестоимости продукции до и после осуществления капитальных вложений; K_1 и K_2 – объем капиталовложений по старым и планируемым к вводу активам.

Показатель удобно использовать для обоснования инвестиционных мероприятий по замене изношенного и морально устаревшего оборудования (K_1) более производительным (K_2), а также для сравнения различных вариантов производства по эффективности. Так, с помощью данного коэффициента легко оценить сравнительную эффективность вывозки кускового торфа различными способами. Предполагается, что при этом себестоимость вывозки торфа одним транспортом (C_2) будет меньше, чем другим (C_1), а $K_1 < K_2$.

Для принятия оптимальных инвестиционных решений, согласованных с положениями инвестиционной политики предприятия, значение $K_э$ сравнивается с нормативной величиной эффективности. При этом, как правило, нормативный коэффициент эффективности долгосрочных инвестиций меньше или равен коэффициенту сравнительной экономической эффективности:

$$E_H \leq K_э. \quad (4.6)$$

Если существует проблема выбора взаимоисключающих проектов, принимается вариант с наибольшим $K_э$, превышающим норматив.

Чистая текущая стоимость (чистый приведенный эффект, Net Present Value, NPV) – сумма текущих стоимостей всех спрогнозированных с учетом дисконтирования денежных потоков.

Метод чистой текущей стоимости (NPV) состоит в следующем:

1. Определяется текущая стоимость затрат (I_0), т.е. решается вопрос о том, сколько инвестиций необходимо зарезервировать для проекта.

2. Рассчитывается текущая стоимость будущих денежных поступлений от проекта, для чего доходы за каждый год CF (кеш-флоу) приводятся к текущей дате. Под CF понимается чистый денежный поток (доход за вычетом всех затрат, налогов, заработной платы).

Результаты расчетов показывают, сколько средств нужно было бы вложить сейчас для получения запланированных доходов, если бы ставка доходов была равна барьерной ставке r (для инвестора – ставке процента в банке, паевом инвестиционном фонде, для предприятия – цене совокупного капитала). Подытожив текущую стоимость доходов за все годы, получают общую текущую стоимость доходов от проекта (PV) за время t [141]

$$PV = \sum_{t=0}^n PV_t = \sum_{t=0}^n CF_t / (1+r)^t \cdot \quad (4.7)$$

3. Текущая стоимость инвестиционных затрат (I_0) сравнивается с текущей стоимостью доходов (PV). Разность между ними составляет чистую текущую стоимость доходов (NPV):

$$NPV = PV - I_0. \quad (4.8)$$

Если капитальные вложения осуществляются в несколько этапов, то расчет показателя NPV проводят по формуле [141]

$$NPV = \sum_{t=1}^n CF_t / (1+r)^t - \sum_{t=0}^n I_t / (1+r)^t, \quad (4.9)$$

где CF_t – приток чистых денежных средств за период t ; I_t – сумма инвестиций в t -м периоде; r – барьерная ставка (ставка дисконтирования); n – суммарное число периодов инвестирования.

NPV показывает чистые доходы или чистые убытки инвестора от вложения денег в проект по сравнению с хранением их в банке. Если $NPV > 0$, то можно считать, что инвестиция преумножит богатство предприятия или инвестора, поэтому ее следует осуществить. Если $NPV < 0$, то доходы от инвестиции недостаточно высоки, чтобы компенсировать риск, присущий данному проекту, и инвестиционное предложение должно быть отклонено.

При оценке эффективности инвестиций в транспортирование кускового топливного торфа NPV определяет, есть ли смысл вкладывать средства в развитие транспортных операций или лучше положить деньги в банк под определенные проценты и поручить эти операции посреднику.

Рассмотрим пример подсчета NPV . Пусть требуется определить чистую текущую стоимость за четыре года ($n = 4$) при одноэтапном инвестировании денег в колесный трактор с прицепом для вывозки торфа. Размер инвестиций – 1 500 000 рублей. Планируемые доходы (чистый денежный поток) от инвестиций на первом году – 570 000 рублей, на втором – 430 000 рублей, на третьем – 550 000 рублей, на четвертом – 600 000 рублей. Размер барьерной ставки $r = 9\%$ [130].

Рассчитаем денежные потоки в виде текущих стоимостей:

$$PV_1 = 570\,000 / (1 + 0,09)^1 = 522\,935,78 \text{ рубля};$$

$$PV_2 = 430\,000 / (1 + 0,09)^2 = 361\,922,40 \text{ рубля};$$

$$PV_3 = 550\,000 / (1 + 0,09)^3 = 424\,700,91 \text{ рубля};$$

$$PV_4 = 600\,000 / (1 + 0,09)^4 = 425\,055,13 \text{ рубля}.$$

$NPV = (522\,935,78 + 361\,922,4 + 424\,700,91 + 425\,055,13) - 1\,500\,000 = 234\,614,22$ рубля.

Чистая текущая стоимость (или превышение уровня доходов за счет вкладывания денег в покупку трактора с прицепом, а не за счет размещения денег в банке) в данных условиях составляет 234 614,22 рубля.

Внутренняя норма доходности (внутренний коэффициент окупаемости, Internal Rate of Return (*IRR*)) – норма прибыли, порожденная инвестицией. Это та норма прибыли (барьерная ставка, ставка дисконтирования), при которой чистая текущая стоимость инвестиций равна нулю (иными словами, ставка, при которой дисконтированные доходы от проекта равны инвестиционным затратам). Внутренняя норма доходности определяет максимально приемлемую ставку дисконта. При такой ставке можно инвестировать средства без каких-либо потерь для собственника [139, 141]:

$$IRR = r, \text{ при котором } NPV = f(r) = 0. \quad (4.10)$$

Значение ставки находят из уравнения

$$NPV(IRR) = \sum_{t=0}^n CF_t / (1+IRR)^t - \sum_{t=0}^n I_t / (1+IRR)^t = 0, \quad (4.11)$$

где CF_t – приток денежных средств в период t ; I_t – сумма инвестиций (затраты) в t -м периоде; n – суммарное число периодов; $t = 0, 1, 2, \dots, n$.

Экономический смысл данного показателя заключается в том, что он показывает ожидаемую норму доходности (рентабельность инвестиций), или, иными словами, максимально допустимый уровень инвестиционных затрат на оцениваемый проект. *IRR* должен быть выше средневзвешенной цены инвестиционных ресурсов *CC*:

$$IRR > CC. \quad (4.12)$$

Если это условие выполняется, инвестор может принять проект. В противном случае он должен быть отклонен.

Достоинства показателя заключаются в том, что, кроме определения уровня рентабельности инвестиций, есть возможность сравнивать проекты разного масштаба и разной длительности. При этом нет возможности определить, сколько денег инвестиция принесет в абсолютных значениях (например, в рублях).

Для примера воспользуемся условиями предыдущей задачи и рассмотрим расчет внутренней нормы доходности от одноэтапных инвестиций в трактор с прицепом для вывозки кускового торфа за четыре года ($n = 4$). Размер инвестиций – 1 500 000 рублей. Планируемые доходы (чистый денежный поток) от инвестиций на первом году – 570 000 рублей, на втором – 430 000 рублей, на третьем – 550 000 рублей, на четвертом – 600 000 рублей [130].

Решим задачу без применения специальных программ, используя метод последовательного приближения. Подбираем барьерные ставки (ставки дисконтирования) так, чтобы найти минимальное значение *NPV* по

модулю, и затем проводим аппроксимацию. Для наглядности решения проблемы схематически строим график $NPV = f(r)$.

Рассчитаем NPV_a для барьерной ставки $r_a = 14\%$ и NPV_b для барьерной ставки $r_b = 18\%$.

$$PV_{a1} = 570\,000 / (1 + 0,14)^1 = 500\,000,00 \text{ рубля};$$

$$PV_{a2} = 430\,000 / (1 + 0,14)^2 = 330\,871,04 \text{ рубля};$$

$$PV_{a3} = 550\,000 / (1 + 0,14)^3 = 371\,234,33 \text{ рубля};$$

$$PV_{a4} = 600\,000 / (1 + 0,14)^4 = 355\,248,17 \text{ рубля};$$

$$NPV_a = (500\,000,00 + 330\,871,04 + 371\,234,33 + 355\,248,17) - 1\,500\,000 = 573\,53,54 \text{ рубля};$$

$$PV_{b1} = 570\,000 / (1 + 0,18)^1 = 483\,050,85 \text{ рубля};$$

$$PV_{b2} = 430\,000 / (1 + 0,18)^2 = 308\,819,30 \text{ рубля};$$

$$PV_{b3} = 550\,000 / (1 + 0,18)^3 = 334\,746,98 \text{ рубля};$$

$$PV_{b4} = 600\,000 / (1 + 0,18)^4 = 309\,473,33 \text{ рубля};$$

$$NPV_b = (483\,050,85 + 308\,819,30 + 334\,746,98 + 309\,473,33) - 1\,500\,000 = -63\,909,54 \text{ рубля}.$$

Схематически график зависимости $NPV = f(r)$ изображен на рис. 4.7.

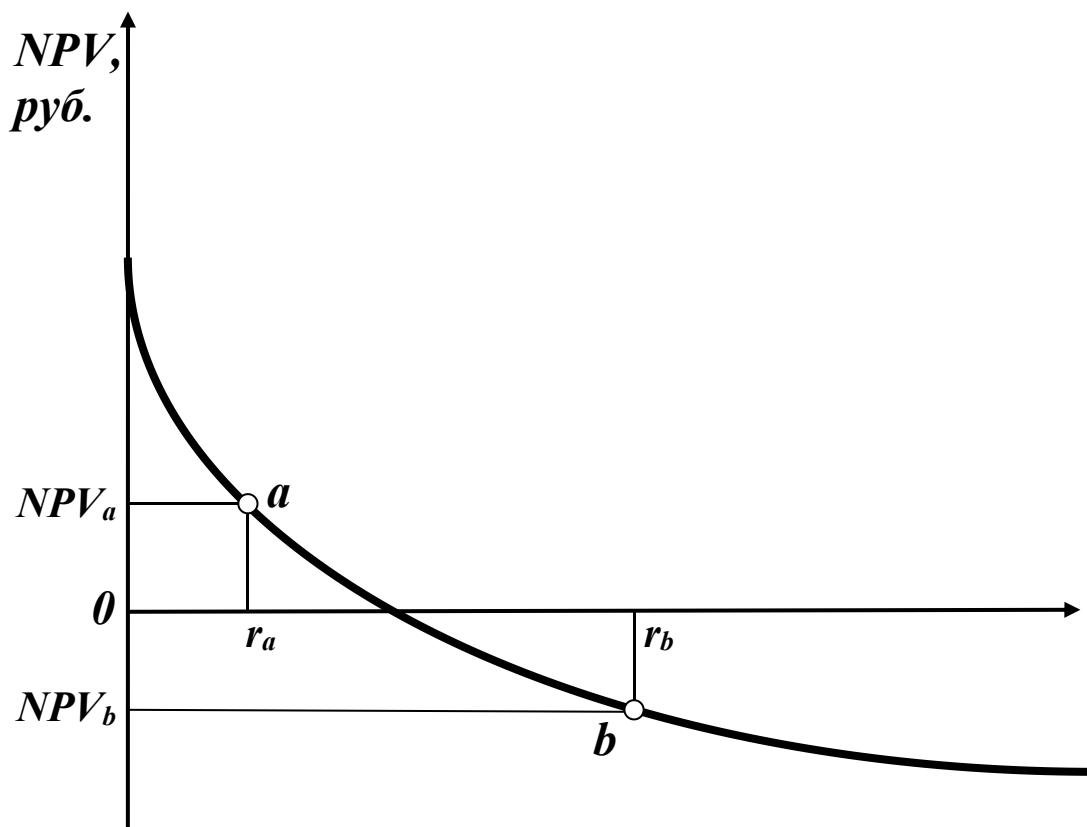


Рис. 4.7. Определение IRR методом последовательного приближения

Делаем условное предположение, что на участке от точки a до точки b функция $NPV = f(r)$ прямолинейна, и используем формулу для аппроксимации на участке прямой:

$$IRR = r_a + (r_b - r_a) \times NPV_a / (NPV_a - NPV_b). \quad (4.13)$$

Получим

$$IRR = 14 + (18 - 14) \times 57\,353,54 / (57\,353,54 - (-63\,909,54)) = 15,89 \%$$

Таким образом, внутренний коэффициент окупаемости для условий этой задачи равен 15,89 %.

Следует отметить, что формула (4.13) справедлива, если выполняются условия $r_a < IRR < r_b$ и $NPV_a > 0 > NPV_b$. Точность расчетов определяется допущением о прямом участке функции между точками a и b и зависит от разрыва между r_a и r_b .

Срок окупаемости инвестиций (Payback Period (PP)) – это время, в течение которого доходы от инвестиций становятся равны первоначальному вложению (т.е. период, необходимый для того, чтобы средства, вложенные в проект, полностью вернулись). Вместе с чистой текущей стоимостью NPV и внутренней нормой доходности IRR PP используется как инструмент оценки целесообразности и эффективности инвестиций. Этот показатель весьма актуален для стран с неустойчивой финансовой системой. Кроме того, он нужен в тех случаях, когда возмещение инвестиционных расходов является первостепенной задачей.

Общая формула для расчета срока окупаемости инвестиций [141]

$$T_{ок} = n, \text{ при котором } \sum_{t=1}^n CF_t > I_0, \quad (4.14)$$

где $T_{ок}$ – срок окупаемости инвестиций; n – число этапов инвестиций; CF_t – приток чистых денежных средств за время t ; I_0 – величина исходных инвестиций в нулевой период.

В зависимости от поставленной цели возможно вычисление срока окупаемости инвестиций с различной точностью.

Рассмотрим пример расчета срока окупаемости инвестиций, используя условия предыдущих задач. Размер одноэтапных инвестиций составляет 1 500 000 рублей. Планируемые доходы (чистый денежный поток) от инвестиций на первом году – 570 000 рублей, на втором – 430 000 рублей, на третьем – 550 000 рублей, на четвертом – 600 000 рублей.

Определим период, по истечении которого инвестиции окупаются.

Сумма доходов за первый и второй годы: $570\,000 + 430\,000 = 1\,000\,000$ рублей, что меньше размера инвестиций (1 500 000 рублей), следовательно, инвестиции за два года не окупятся. Сумма доходов за три года: $1\,000\,000 + 550\,000 = 1\,550\,000$ рублей, что уже больше первоначальных инвестиций. Таким образом, полностью инвестиции должны окупиться в течение третьего года работы.

Предположим, что поток денежных средств поступает равномерно в течение всего периода. Тогда можно вычислить остаток от третьего года:

$$\text{Остаток} = (1 - (1\,550\,000 - 1\,500\,000) / 550\,000) = 0,91 \text{ года.}$$

Делаем вывод, что инвестиции полностью окупятся за 2,91 года. Тут следует отметить, что окупаемость не учитывает временной стоимости денег. Этот показатель позволяет узнать, пренебрегая влиянием дисконтирования, сколько потребуется времени, чтобы инвестиции принесли столько же денежных средств, сколько пришлось вложить.

Каждый из рассмотренных показателей, взятый в отдельности, дает достаточно поверхностное представление о происходящих финансово-экономических процессах. Лишь оценивание этих процессов по всем пяти рассмотренным показателям может дать исчерпывающую и достоверную информацию о необходимости, выгоды и полезности инвестиций.

4.5. Некоторые экономические аспекты, касающиеся транспортирования кускового торфа

Основы инвестиционного анализа позволили установить, что главным экономическим показателем, определяющим прибыльность (выгодность) инвестиций, является чистый денежный поток – кеш-флоу. Именно от ожидаемого денежного потока зависят показатели NPV , PP , IRR . Главным фактором, определяющим чистый денежный поток, выступает отпускная цена на торфяную продукцию. Причем если торфопредприятие самостоятельно занимается вывозом продукции, то это цена до конечного потребителя с учетом транспортных расходов предприятия, а если предприятие передает всю продукцию на своей территории оптовому покупателю, то это цена торфа, убранного на территории предприятия в штабель. Поскольку собственно производство кускового торфа является сезонной работой, а вредные влияния сезонности работ, связанные с простоями, необходимо устранять, есть смысл именно торфопредприятиям заниматься вывозом торфа, используя свою технику. Таким образом, можно записать, что

$$ЦТ_k = ЦТ_u + ЦТ_p, \quad (4.15)$$

где $ЦТ_k$ – конечная цена торфа, находящегося у потребителя; $ЦТ_u$ – цена торфа, убранного в штабель и находящегося на территории торфопредприятия; $ЦТ_p$ – цена транспортирования торфа от торфопредприятия до конечного потребителя с учетом разгрузочно-погрузочных работ.

В эпоху социалистической экономики России цена любого товара ($ЦТ$) определялась как

$$ЦТ = СС + П, \quad (4.16)$$

где $СС$ – себестоимость производства товара с учетом всех затрат и накладных расходов; $П$ – прибыль предприятия.

В современных условиях цена товара – это лишь результат договорных рыночных взаимоотношений между продавцом и покупателем. Есть даже примеры, когда продавец, чтобы «запустить» рынок, продает товар по цене ниже себестоимости. Потолочную цену товара определяет цена аналогичного товара в этом же регионе, что порождает конкуренцию.

В случае с торфяным топливом для адекватного определения его потолочной цены необходимо принимать во внимание цену основного топлива (мазута, газа, угля и т.д.), сложившуюся в регионе, с учетом их разной теплотворной способности при сжигании. Для этого используется специальный термин – «условное топливо». Условным называется топливо, теплота сгорания 1 кг которого равна 7 000 ккал. Для перевода любого натурального топлива в условное необходимо воспользоваться коэффициентами перевода по теплотворной способности $K_{\text{млт}}$, утвержденными Постановлением Госкомстата РФ № 46 от 23.06.1999 «Об утверждении "Методологических положений по расчету топливно-энергетического баланса Российской Федерации в соответствии с международной практикой"». Выдержки из этого документа приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Значения коэффициентов перерасчета в условное топливо

Виды топлива и энергии	Единица измерения	Коэффициент перерасчета в условное топливо $K_{\text{млт}}$
Кокс металлургический	т	0,990
Газ горючий природный (естественный)	тыс. м ³	1,154
Газ горючий коксовый (искусственный)	тыс. м ³	0,579
Мазут топочный	т	1,370
Торф фрезерный ($w = 40 \%$)	т	0,340
Газ нефтеперерабатывающих предприятий	тыс. м ³	1,500
Уголь каменный	т	0,768
Уголь бурый	т	0,467
Торф кусковой ($w = 33 \%$)	т	0,410

Таким образом,

$$ЦT_{\text{млт}} = ЦT \times K_{\text{уз}}/K_{\text{млт}}, \quad (4.17)$$

где $ЦT_{\text{млт}}$ – цена топлива в переводе на условные единицы (тут); $ЦT$ – цена топлива; $K_{\text{уз}}$ – коэффициент увеличения затрат при смене топлива.

Из табл. 4.5 видно, что цена газа в переводе на тонны условного топлива ниже цены натурального газа, а цена фрезерного торфа выше цены натурального фрезерного торфа. Это объясняется разной теплотворной способностью газа и торфа.

В каждом регионе выработаны свои условия поставки сверхлимитного основного топлива. Сверхлимитным считается топливо,

которое поставляется сверх утвержденного годового лимита и необходимо, как правило, энерговырабатывающим предприятиям в момент прохождения зимних пиковых нагрузок (январь–февраль), когда не хватает лимитного топлива. Цена сверхлимитного основного топлива $ЦТ_{сл}$ отличается от цены лимитного топлива $ЦТ_{л}$:

$$ЦТ_{сл} = ЦТ_{л} \times K_{сл}, \quad (4.18)$$

где $K_{сл}$ – коэффициент поставки сверхлимитного топлива (для Тверской области в последние годы $K_{сл} = 1,4–1,5$).

Рассмотрим пример, показывающий методику определения потолочной цены кускового топливного торфа. Пусть основным топливом энерговырабатывающего предприятия служит лимитный газ, поставляемый по цене 5 000 рублей за 1 тыс. м³. Договорной коэффициент поставки сверхлимитного газа $K_{сл} = 1,5$. Требуется определить потолочную цену кускового торфа 33%-й влажности, поставляемого торфо-предприятием без убытков, с учетом того, что себестоимость торфа, включающая транспортные расходы, составляет 2 517 рублей за тонну, а коэффициент увеличения затрат при сжигании кускового торфа вместо газа составляет $K_{уз} = 1,05$.

1. Цена на лимитный газ в переводе на условное топливо:

$$ЦГ_{тут\ лим} = ЦГ \times K_{уз} / K_{тут\ газ} = 5\,000 \times 1/1,154 = 4\,332,76 \text{ рублей/тут.}$$

2. Возможная потолочная цена кускового торфа при замене им лимитного газа:

$$ЦТ = ЦГ_{тут\ лим} \times K_{тут\ торф} / K_{уз} = 4\,332,76 \times 0,41/1,05 = 1\,691,84 \text{ рублей/т.}$$

Поставка торфа по указанной цене невозможна, так как по условиям задачи требуется соблюдать безубыточность производства торфа. Данная цена ниже себестоимости производства торфа, поэтому поставки торфа неосуществимы.

3. Цена на сверхлимитный газ в переводе на условное топливо:

$$ЦГ_{тут\ с/лим} = ЦГ_{тут\ лим} \times K_{сл} = 4\,332,76 \times 1,5 = 6\,499,14 \text{ рублей/тут.}$$

4. Возможная потолочная цена фрезерного торфа при замене им сверхлимитного газа:

$$ЦТ = ЦГ_{тут\ с/лим} \times K_{тут\ торф} / K_{уз} = 6\,499,14 \times 0,41/1,05 = 2\,537,76 \text{ рублей/т.}$$

Поставка торфа по указанной цене возможна. Это решение соответствует безубыточным условиям работы, но из всего поставляемого газа торф заменит только сверхлимитный газ, поэтому объемы производства торфа необходимо скорректировать согласно данным условиям.

По содержанию и решению задачи необходимо сделать два замечания. Первое: для экономической привлекательности предложения цена на торф должна быть ниже потолочной, иначе нет никакого экономического смысла перенастраивать сжигающее оборудование на другой вид топлива. Второе: при поставке торфа влажностью не 33 %, а выше или ниже действует (в

соответствии с договорами) специальная шкала скидок и добавок к цене за качество [94], что должно быть учтено в расчетах.

При комплексном анализе всего производственного цикла (от добычи торфа до доставки его на склад потребителя) и при знании потолочной цены на торфяную продукцию можно планировать производственные расходы и просчитывать различные варианты поставки торфа «от обратного» [142, 143].

Потребность торфопредприятий в грузовых автомобилях или тракторных прицепах для вывоза торфа может быть подсчитана по формуле [94]

$$N = Mtk_1 / mTnk_2k_3, \quad (4.19)$$

где M – масса торфа, подлежащая вывозке, т; T – валовое время работы транспортных средств за год в одну смену, ч; n – коэффициент сменности работы; m – грузоподъемность транспортной единицы, т; t – продолжительность рейса, ч; $k_1 = 1,1–1,2$ – коэффициент увеличения времени рейса; $k_2 = 0,6–1,0$ – коэффициент использования грузоподъемности; k_3 – коэффициент использования парка.

Время одного рейса транспортного средства

$$t = 2L/v + \Delta t, \quad (4.20)$$

где L – расстояние перевозки, км; v – средняя скорость движения, км/ч; $\Delta t = 0,15–0,4$ ч – время простоя при загрузке/разгрузке и маневрах на один рейс.

Учитывая формулу (4.20) и зная, что средние скорости при перевозке торфа тракторным поездом составляют 30 км/ч, автомобилем – 50 км/ч, а также предполагая, что время разгрузки и загрузки одинаково и составляет около 0,3 часа, можно оценить сравнительную эффективность по количеству рейсов за 8-часовую смену при перевозке торфа автомобилем и трактором на расстояние 10–50 км. Данные расчетов содержатся в табл. 4.6 и отражены на рис. 4.8. Кроме перечисленных данных, в табл. 4.6 и на рис. 4.9 показано изменение коэффициента относительной эффективности перевозок грузовым автомобилем в зависимости от расстояния между объектами.

Таблица 4.6

Пример расчета показателей эффективности транспортных операций по перевозке кускового торфа

Параметры эффективности транспортных операций	Расстояние перевозки L , км				
	10	20	30	40	50
Количество рейсов автомобиля в смену n_a	8	5,7	4,44	3,64	3,08
Количество рейсов трактора в смену n_m	6,3	4,15	3,08	2,45	2,02
Коэффициент относительной эффективности перевозок грузовым автомобилем $K_{зо} = n_a/n_m$	1,27	1,37	1,44	1,49	1,51

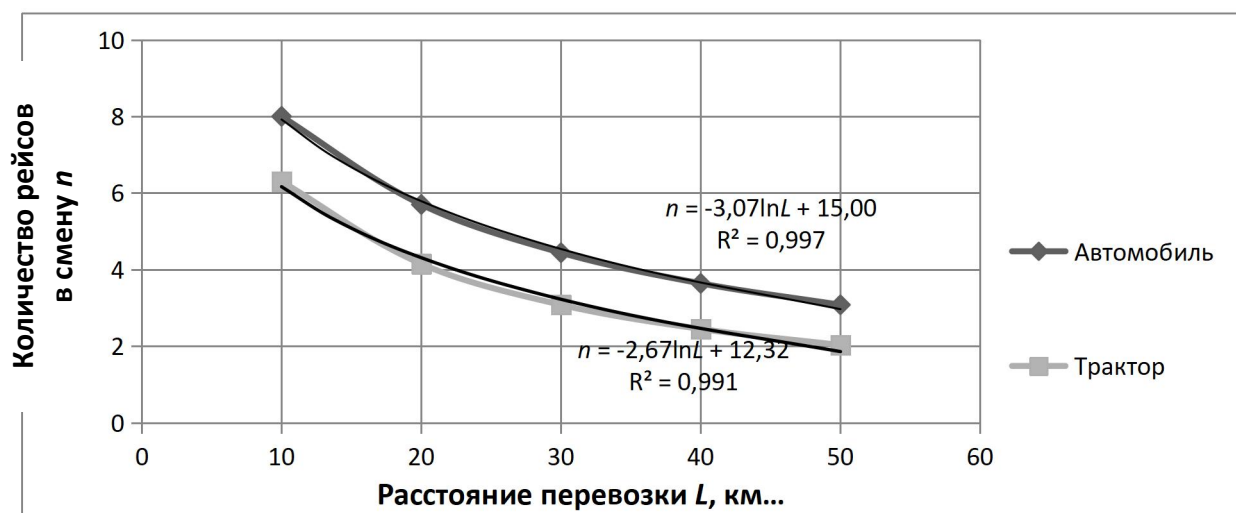


Рис. 4.8. Зависимость количества рейсов в смену n грузовым автомобилем и трактором при перевозке торфа от расстояния перевозки L

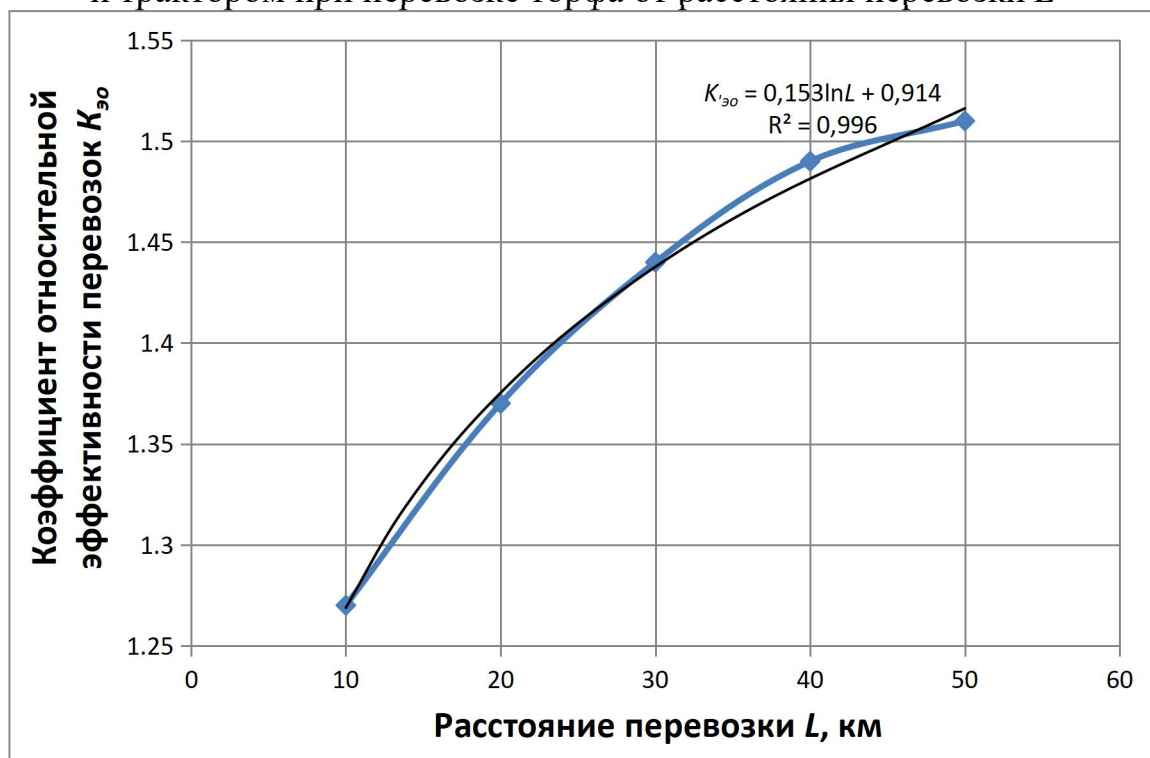


Рис. 4.9. Зависимость коэффициента относительной эффективности перевозок торфа грузовым автомобилем от расстояния между объектами

Полученные зависимости аппроксимированы логарифмическими функциями с высокими коэффициентами детерминации ($R^2 > 0,99$), свидетельствующими о явной функциональной связи между исследуемыми параметрами.

Нетрудно заметить, что, умножив количество рейсов в смену на массу перевезенного торфа, можно получить производительность транспортных работ грузового автомобиля и тракторного поезда.

Как и следовало ожидать, на всем диапазоне расстояний автомобиль совершает большее количество рейсов, причем при увеличении расстояния между поставщиком и потребителем с 10 до 50 км относительная эффективность применения автомобиля (или отношение числа рейсов автомобиля к числу рейсов трактора) увеличивается с 1,27 до 1,52. Однако решение о применении того или иного вида транспорта должно следовать из всех экономических предпосылок, изложенных выше [130, 143].

4.6. Тракторы, рекомендуемые к использованию в качестве тягачей машин для добычи кускового торфа

Обобщение и анализ данных, полученных из различных интернет-источников, промышленных каталогов и информационных листов, научных и производственных отчетов о добыче кускового торфа фрезформовочным методом, позволили выявить следующие модели рекомендуемых тракторов для привода торфяных машин: BELARUS-1221 [144] и BELARUS-1523 [144–146] производства Минского тракторного завода, БТЗ-251К/252К производства Брянского тракторного завода [147] и гусеничный болотоходный трактор серии 90ТГ производства НПО «Агромаш» [148].

Указанные модели отвечают основным требованиям к тракторам для торфяной промышленности и энергетическим характеристикам соответствующих торфяных машин для работы в составе машинно-тракторных агрегатов. Описания конструкций и фотографии тракторов приведены ниже.

Колесные тракторы BELARUS-1221 (рис. 4.10) [144] представляют семейство универсально-пропашных тракторов тягового класса 3 т.с. Благодаря энергонасыщенности они с большим успехом применяются во время тяжелых сельскохозяйственных работ, при строительстве дорог и аэропортов, в качестве базового агрегата в коммунальном хозяйстве, на транспортных работах.



Рис. 4.10. Трактор BELARUS-1221

На тракторе установлены 6-цилиндровый 4-тактный дизельный двигатель с непосредственным впрыском и турбонаддувом водяного охлаждения Д-260.2 Turbo [145] (мощность двигателя – 96 кВт), а также механическая 6-диапазонная ступенчатая синхронизированная муфтами коробка передач.

Вал отбора мощности – задний, двухскоростной (540 и 1 000 об/мин). Имеются независимый и синхронный режимы включения, механическая система управления.

Автоматическая фрикционная блокировка дифференциала с гидроприводом имеет три режима: выключено, автоматическое включение и выключение, включено принудительно.

Задний мост – с коническим дифференциалом закрытого типа и планетарной конечной передачей. Передний ведущий мост – соосный, балочного типа, с самоблокирующимся дифференциалом повышенного трения, планетарными колесными редукторами и двухопорными поворотными цапфами. Фрикционная муфта с электрогидравлическим управлением позволяет включать передний мост под нагрузкой и обеспечивает три режима работы: включен автоматически (при буксовании задних колес); включен постоянно; выключен.

Рулевое управление – гидрообъемное (с насосом-дозатором и двумя гидроцилиндрами в рулевой трапеции).

Основные и стояночные тормоза – механические, сухие, дисковые. Привод тормозов – гидростатический, отдельный. Привод тормозов прицепов – пневматический, заблокированный с тормозами трактора (по заказу – двухпроводной).

Система электрооборудования снабжена генераторной установкой мощностью 1 000 Вт с выпрямленным напряжением 14 В. Пусковая система – со стартером мощностью 6 кВт и напряжением 24 В, пусковое приспособление – с аэрозольной легковоспламеняющейся жидкостью.

Кабина соответствует требованиям безопасности. Имеются фильтрация и подогрев подаваемого в салон воздуха; открывающиеся боковые и задние окна, люк крыши; электроочистители лобового и заднего стекол, омыватель лобового стекла; возможность оборудования реверсивным постом управления; модернизированный щиток приборов, электронное информационное табло.

В стандартной комплектации поставляются передние и задние рабочие фары, четыре пары выводов гидросистемы и вывод безнапорного слива.

По заказу потребителей поставляются ходоуменьшитель, передние балластные грузы, маятниковое прицепное устройство, реверсивный пост управления, проставки для сдваивания задних колес, пневматическая одно- или двухпроводная система (в соответствии со стандартами ISO и СЕЕ/ЕСС); регулируемое по высоте буксирное устройство; передний мост балочного типа (колея 1 600–1 900 мм); радиооборудование (магнитола); переднее навесное устройство, передний вал отбора мощности [145].

Колесные тракторы BELARUS-1523 (рис. 4.11) являются еще одним представителем энергонасыщенного семейства тракторов тягового класса 3 т.с. На тракторах устанавливается 6-цилиндровый 4-тактный дизельный двигатель водяного охлаждения с турбонаддувом и непосредственным впрыском топлива Д-260.1 Turbo (мощность двигателя – 109 кВт).

Коробка передач – механическая, ступенчатая, синхронизированная, 6-диапазонная. Переключение передач осуществляется синхронизированными муфтами. Муфта сцепления – сухая, двухдисковая, постоянно замкнутая.



Рис. 4.11. Трактор BELARUS-1523 [146]

Вал отбора мощности – двухскоростной (540 и 1 000 об/мин), располагается сзади, имеет независимое и синхронное включение, гидромеханическую систему управления.

Автоматическая блокировка дифференциала является фрикционной с гидроприводом. Она имеет три режима работы: выключено, автоматическое включение и выключение, включено принудительно.

Задний мост – с коническим дифференциалом закрытого типа и планетарной конечной передачей. Передний ведущий мост – балочного типа, соосный, с самоблокирующимся дифференциалом повышенного трения, планетарными колесными редукторами и двухопорными поворотными цапфами. Фрикционная муфта с электрогидравлическим управлением позволяет включать мост под нагрузкой и обеспечивает три режима работы: включен автоматически (при буксовании задних колес); включен постоянно; выключен.

Основные и стояночные тормоза – механического типа, сухие, дисковые. Привод рабочих тормозов – гидравлический, отдельный. Привод тормозов прицепов – пневматический, заблокированный с управлением тормозами трактора.

Система электрооборудования снабжена генераторной установкой мощностью 1 000 Вт с выпрямленным напряжением 14 В. Пусковая

система со стартером мощностью 6 кВт и напряжением 24 В, пусковое приспособление с аэрозольной легковоспламеняющейся жидкостью.

Кабина соответствует требованиям безопасности. Имеются фильтрация и подогрев подаваемого в салон воздуха; открывающиеся боковые и задние окна, люк в крыше; электроочистители лобового и заднего стекол, омыватель лобового стекла; модернизированный щиток приборов с электронным цифровым дисплеем.

В стандартной комплектации поставляются четыре пары выводов гидросистемы и вывод безнапорного слива, пневматическая однопроводная система, регулируемое по высоте буксирное устройство, маятниковое прицепное устройство, поперечина буксирного устройства.

По заказу потребителей поставляются ходоуменьшитель, балластные грузы, реверсивный пост управления, проставки для сдваивания задних колес, четыре передние и четыре задние рабочие фары, сигнальные фонари автопоезда, радиооборудование (магнитола), переднее навесное устройство, автоматическая сцепка, передний вал отбора мощности [146].

Тракторы БТЗ-251К/252К (рис. 4.12) [147] тягового класса 4 т·с оснащены двигателем ЯМЗ-65655 мощностью 130 кВт, имеют гидромеханическую коробку передач, переключаемую без разрыва потока мощности в пределах каждого диапазона, и сухую однодисковую муфту сцепления.



Рис. 4.12. Трактор БТЗ-251К

Вал отбора мощности располагается сзади и имеет две скорости при независимом приводе – 540 и 1 000 об/мин.

При колесной базе 2 860 мм и колее 1 860 мм трактор обладает весьма малым радиусом поворота 6,7 м за счет интегральной

(складываемой) компоновки и поворота частей шарнирно-сочлененной рамы относительно друг друга с использованием гидрообъемного привода. В целом можно сказать, что это успешная модификация знаменитого трактора Т-150К.

Постоянный привод на все колеса позволяет тракторам эффективно работать в условиях распутицы и бездорожья. Гидрообъемное рулевое управление исключает передачу вибраций и «реакции дороги» оператору.

Тракторы оборудованы двухместной безопасной каркасной кабиной, двухцилиндровой гидравлической навесной системой и имеют возможность транспортировать прицепы грузоподъемностью 20 т.

Рабочие остановочные тормоза – колодочного типа, с пневмоприводом на каждое колесо, стояночный тормоз – ленточный, с пневмопружинным цилиндром.

В системе электрооборудования установлены два спаренных аккумулятора суммарным напряжением 24 В и емкостью по 190 А·ч каждый.

По заказу потребителей тракторы оборудуются кондиционером и автоматической системой регулирования навески [147].

Гусеничные болотоходные тракторы Агромаш-90ТГ [148] оснащаются двигателем А-41СИ-02 мощностью 73,5 кВт и относятся к тяговому классу 3 т·с (рис. 4.13) [148].



Рис. 4.13. Гусеничный болотоходный трактор Агромаш-90ТГ

У тракторов есть механическая трансмиссия с 7-ступенчатой коробкой передач, ленточными тормозами и отдельно-агрегатной гидронавесной системой. Расположенный сзади вал отбора мощности имеет независимый привод и частоту вращения 540 об/мин.

При базе 1 612 мм, колее 1 570 мм и дорожном просвете 370 мм трактор обеспечивает невысокое давление на грунт (до 50 кПа) благодаря стальным гусеницам шириной 670 мм [148].

4.7. Выводы по главе

1. Показана возможность добычи торфа фрезформовочным методом в арктических условиях. Отмечено, что вместо глубинного щелевого фрезерования, хорошо известного в центральных районах России, для условий вечной мерзлоты гораздо более подходящей является послойно-поверхностная добыча по мере оттаивания верхних слоев залежи.

2. Представлена основанная на принципе Беллмана методика оптимизации транспортных работ при доставке кускового торфа потребителям различными видами транспорта. Показано, что при прочих равных условиях для ликвидации ярко выраженной сезонности работ предприятиям, добывающим торф, имеет смысл самим заниматься вывозкой продукции с полей добычи, используя для этого тракторы с прицепами. Рекомендованы современные виды прицепов для вывозки торфа.

3. На основе инвестиционного анализа рекомендованы показатели, в комплексе определяющие выгодность операций по доставке кускового торфа потребителям. Это минимум приведенных затрат Z_{min} , коэффициент сравнительной экономической эффективности K_s , чистая текущая стоимость NPV , внутренняя норма доходности IRR , срок окупаемости инвестиций PP . Представлена методика их расчета.

4. Представлена методика оценки эффективности перехода с основного топлива (газа, мазута, дров) на торфяное. Методика учитывает различную теплотворную способность этих топлив. Показан пример сравнительной оценки эффективности транспортирования торфа грузовым автомобилем и трактором с прицепом. Отмечены преимущества последнего.

5. Рекомендованы тракторы для агрегатирования современных фрезформовочных машин, используемых при добыче кускового торфа. Это BELARUS-1221, BELARUS-1523, БТЗ-251К/252К и Агромаш-90ТГ. Представлены их краткие технические характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии представлено решение научной задачи, заключающееся в установлении закономерностей изменения энергоемкости формования при производстве кускового торфа, а также в разработке

математических моделей, которые описывают зависимость энергоемкости формования от коэффициента напора и частоты вращения шнека, позволяют обосновывать рациональные параметры и режимы работы фрезформовочной машины. Показана недооцененная роль кускового торфа в энергетике России и рассмотрена возможность его добычи в арктических условиях.

Основные результаты работы:

1. Обобщение научных работ по теме позволило выявить наилучшие характеристики торфяного сырья для добычи кускового торфа: тип торфа – верховой, степень разложения $R = 20\text{--}35\%$, содержание влаги $w = 82\text{--}84\%$.

2. Получена аналитическая зависимость, устанавливающая характер изменения напора, создаваемого шнеком формующего агрегата, при различных конструктивных особенностях мундштуков. 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. Для определения прочности на изгиб формованной торфяной продукции разработаны устройство и методика, 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, имеющего кондиционную влагу, 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.

Результаты проведенного исследования неоднократно озвучивались на международных и всероссийских научных конференциях (МИСиС (г. Москва), ТулГТУ (г. Тула), УГГУ (г. Екатеринбург) и др.). На основе материалов опубликовано 22 работы ([97, 103–105, 110–112, 115–119, 121, 123, 149–156]), в том числе 7 – в изданиях,

входящих в наукометрические базы WoS и Scopus, 2 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций; получен 1 патент на изобретение [112]. В 2020 году в диссертационном совете НИТУ МИСиС была защищена кандидатская диссертация [157, 158], впоследствии ставшая основой настоящей монографии.

В дальнейшем будут проводиться большие исследования, посвященные производству торфяных топливных пеллет (топливных гранул) в полевых условиях торфодобывающего предприятия с проработкой технологии производства, режимов сушки и конструкции шнекового механизма, производящего формование методом «продавливания» через специальные фильеры наконечника. Бесспорно, в качестве коммунально-бытового топлива кусковой торф вполне выгоден и перспективен, особенно для использования в отопительно-варочных печах или промышленных котлах с большим объемом загрузки. Однако для небольших котлов индивидуального жилищного фонда применение кускового торфа будет сдерживаться из-за ограниченной возможности автоматической подачи топлива. Полевое производство пеллет могло бы сильно сократить потребности населения в топливе для котлов с системой автоматической подачи, тем более что системы автоматической подачи древесных пеллет в котлы уже существуют и отлично зарекомендовали себя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Торф: возгорание торфа, тушение торфяников и торфокомпозиаты / Л.Б. Хорошавин [и др.]. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2013. 256 с.

2. Михайлов А.В. Развитие глобального рынка торфа // Труды Инсторфа. 2018. № 18 (71). С. 3–7.

3. Торфодобывающая промышленность России: проблемы возрождения и перспективы развития / Г.А. Александров [и др.] // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2016. № 8 (341). С. 32–43.

4. Панов В.В., Мисников О.С. Современные тенденции развития торфяной отрасли России // Труды Инсторфа. 2015. № 11 (64). С. 3–12.

5. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 5. С. 105–117.

6. Яблонев А.Л. Проектирование торфодобывающих предприятий: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ, 2016. 164 с.

7. Технология и комплексная механизация разработки торфяных месторождений: учебное пособие для вузов / А.Е. Афанасьев [и др.]. М.: Недра, 1987. 311 с.

8. Антонов В.Я., Копенкин В.Д. Технология и комплексная механизация торфяного производства: учебное пособие для вузов. М.: Недра, 1983. 287 с.

9. Справочник механика торфяного предприятия / Б.Н. Соколов [и др.]. М.: Недра, 1990. 365 с.

10. Беляков В.А., Мисников О.С. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. Добыча кускового торфа и сапропеля: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ, 2016. 168 с.

11. Мисников О.С., Беляков В.А., Шамбер О.В. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. Добыча кускового торфа и сапропеля: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ, 2011. 168 с.

12. Торфяные машины и комплексы: учебное пособие для вузов / С.Г. Солопов [и др.]. М.: Недра, 1981. 416 с.

13. Селеннов В.Г., Петров Ю.О., Юрков В.М. Нереализованные разработки института // Торф и бизнес. 2006. № 3 (5). С. 23–27.

14. Семенский Е.П. Технология послойного способа добычи кускового торфа // Труды Московского торфяного института. Вып. 4. М.: Госэнергоиздат, 1956. С. 86–102.

15. Фомин В.К. Научные основы технологии и комплексной механизации производства формованного торфа: дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.05. Калинин: КПИ, 1989. 50 с.

16. Костюк Н.С., Яцевич Н.С. Производство мелкокусового торфа. Минск: Наука и техника, 1975. 136 с.

17. Солодухо Н.М. Фрезформовочный способ добычи торфа. Минск: Наука и техника, 1980. 96 с.

18. Копенкин В.Д., Копенкина Л.В., Самсонов Л.Н. Развитие техники добычи кускового торфа // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 1. С. 297–301.

19. Опейко Ф.А. Торфяные машины Минск: Высшая школа, 1968. 408 с.

20. Евсеев В.Н., Кужман Г.Г., Соколов А.А. Добыча торфяного топлива на крайнем севере. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. 48 с.

21. Соколов А.А., Евсеев В.Н. Добыча торфа на топливо в районе Крайнего Севера // Торфяная промышленность. 1958. № 4. С. 21–26.

22. Соколов А.А., Евсеев В.Н. Добыча торфа в районе Крайнего Севера // Научные доклады высшей школы. Горное дело. М.: Советская наука, 1958. С. 46–51.

23. Машина МТК-1,6 для добычи кускового торфа. URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/33288/Mashina_MTK_1_6_dlya_dobychi_kuskovogo_torfa.pdf. (дата обращения: 15.03.2019).

24. Могилевэнерго. URL: <http://erm.mogilev.energo.by/ru-ru/> (дата обращения: 12.03.2018).

25. Торф машины. Оборудование для добывания и обработки торфа. URL: http://peat-machine.at.ua/index/dobycha_kusk_torfa_pk_1sl_c5_pk_1sl_r12_pk_1sl_w60/0-62 (дата обращения: 17.03.2019).

26. Семенский Е.П. Качество кускового торфа в зависимости от вида строения торфяной залежи и переработки торфа-сырца: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05.15.05 – технология и комплексная механизация торфяного производства. М., 1941. 16 с.

27. Семенский Е.П. Сопоставление некоторых физических свойств торфа с его дисперсностью // Торфяная промышленность. 1953. № 7. С. 21–24.

28. Семенский Е.П. Прочность торфяных кирпичей // Торфяное дело. 1934. № 2. С. 19–22.

29. Воларович М.П., Кулакова Н.Н., Самарина К.И. О влиянии различных факторов на пластично-вязкие свойства торфомассы (о вязкости и пластичности дисперсных систем) // Коллоидный журнал. 1935. Т. 3. № 2. С. 163–168.

30. Воларович М.П., Гроздовский Г.Я. О движении материала в шнековом механизме // Торфяная промышленность. 1948. № 6. С. 10–15.

31. Воларович М.П., Чураев Н.В. Исследование степени дисперсности торфа // Коллоидный журнал. 1955. Т. 17. Вып. 3. С. 200–206.

32. Корчунов С.С. Зависимость механической прочности торфа и других грубодисперсных систем от влажности // Торфяная промышленность. 1948. № 3. С. 16–17.

33. Раковский Е.В., Ривкина Х.И. О природе механической прочности кускового торфа // Торфяная промышленность. 1950. № 1. С. 29–30.

34. Кривошеин М.С. Формование торфяной массы пониженной влажности: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05.15.05 – технология и комплексная механизация торфяного производства. Минск, 1954. 16 с.

35. Перов Н.П. Исследование прочности мелкокускового торфа: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05.15.05 – технология и комплексная механизация торфяного производства. Минск, 1955. 10 с.

36. Солопов С.Г. Влияние дисперсности на структуру и физико-механические свойства торфа в связи с задачей получения качественного кускового топлива из залежей с пониженной влажностью // Труды МТИ. М.-Л.: ГЭИ. 1958. Вып. VIII. С. 16–17.

37. Солопов С.Г. Физико-технические основы получения формованного торфяного брикета (мелкокускового топлива) // Торфяная промышленность. 1971. № 11. С. 14–17.

38. Солопов С.Г. Технологические принципы производства качественного топлива при разработке торфяных месторождений эксплуатационной влажности // Научные доклады высшей школы. Горное дело. 1958. № 1. С. 41–49.

39. Песков В.Г. Экспериментальное исследование торфо-перерабатывающих спирально-конусных прессов: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05.15.05 – технология и комплексная механизация торфяного производства. М., 1958. 17 с.

40. Лопотко М.З. Исследование процесса валкования мелкокускового торфа лопастным валкователем: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05.15.05 – технология и комплексная механизация торфяного производства. Минск, 1958. 12 с.

41. Нажесткин Б.П. Исследование вибрирования торфяной массы пониженной влажности при ее формовании для получения мелкокускового топлива повышенного качества: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05.15.05 – технология и комплексная механизация торфяного производства. Калинин, 1960. 16 с.

42. Чураев Н.В. Водные свойства структуры и процессы переноса влаги в торфе: дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.05. Калинин, 1961. 580 с.

43. Евсеев В.Н. Исследование вопросов промышленной добычи кускового торфяного топлива на Крайнем Севере в зоне вечной мерзлоты: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.05. Калинин, 1961. 139 с.

44. Копенкин В.Д. Исследование закономерностей в дисперсном составе торфа и связи его физико-механических свойств с показателем дисперсности: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05.15.05 – технология и комплексная механизация торфяного производства. Калинин, 1964. 22 с.

45. Фомин В.К. Исследование процесса диспергирования и формования торфа различными механизмами и расчет их основных параметров: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.05. Калинин, 1965. 132 с.

46. Опейко Ф.А. Степень переработки торфа // Труды Инсторфа АН БССР. 1951. Вып. I. С. 46–52.

47. Цветков В.И. Исследование процессов гранулирования торфомассы и расчет основных параметров формирующих механизмов: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук:

05.15.05 – технология и комплексная механизация торфяного производства. Калинин, 1967. 21 с.

48. Лиштван И.И. Исследование физико-химической природы торфа и процессов структурообразования в торфяных системах: дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.05. Калинин, 1969. 644 с.

49. Сергеев Ф.Г. Исследование водопоглонительных свойств мелкокусового торфа и торфяной подстилки: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05.15.05 – технология и комплексная механизация торфяного производства. Калинин, 1970. 23 с.

50. Слыш В.М. К вопросу оценки перерабатывающей способности торфяных машин // Технология торфяного производства и торфяные машины. Минск: Высшая школа, 1973. Вып. 2. С. 180–183.

51. Вирысов Г.П. Влияние влажности на процесс диспергирования торфа // Технология торфяного производства и торфяные машины. Минск: Высшая школа. 1973. Вып. 2. С. 20–22.

52. Суворов В.И. Исследование пористой структуры кускованного торфа в связи с регулированием его физико-механических свойств: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05.15.05 – технология и комплексная механизация торфяного производства. Калинин, 1975. 26 с.

53. Гревцев Н.В. Обоснование технологии досушки кускового торфа в штабелях при естественном и принудительном воздухообмене: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05.15.05 – технология и комплексная механизация торфяного производства. Калинин, 1983. 16 с.

54. Воронков Б.Б. Повышение качества кускового топливного торфа путем улучшения структурно-механических свойств исходного сырья: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05.15.05 – технология и комплексная механизация торфяного производства. Калинин, 1985. 20 с.

55. Шамбер О.В., Гамаюнов С.Н., Большаков М.П. Совершенствование сушки кускового торфа // Машины и технологии торфяного производства. Калинин: КГУ, 1988. С. 17–19.

56. Цветков В.И. Исследование процесса уплотнения торфяной массы в зависимости от давления // Машины и технологии торфяного производства. Калинин: КГУ, 1988. С. 70–73.

57. Афанасьев А.Е., Гамаюнов С.Н. Взаимосвязь прочностных и структурных характеристик кускового торфа // Машины и технологии торфяного производства. Калинин: КГУ, 1988. С. 14–17.

58. Фомин В.К. Влияние влагосодержания компонентов состава смеси формуемой торфомассы на качество кускового торфа // Результаты исследований по физике и химии торфа и их использование. Тезисы докладов VI Научно-техн. конф. по физикохимии торфа. Калинин: КПИ, 1989. С. 45.

59. Копенкина Л.В. Развитие техники добычи кускового торфа в СССР (1917–1985): автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 07.00.10 – история науки и техники. М., 1989. 18 с.

60. Афанасьев А.Е., Шамбер О.В., Большаков В.П. Эффективность сушки кускового торфа в однослойном расстиле на сетках // Технология и комплексная механизация торфяного производства. Калинин: КПИ, 1989. С. 4–9.

61. Шамбер О.В. Сушка и основные характеристики кусков, сформованных из торфяных смесей // Технология и комплексная механизация торфяного производства. Тверь: ТвеПИ, 1991. С. 69–73.

62. Гамаюнов С.Н. Закономерности упрочнения структуры кускового торфа в процессе сушки // Технология и комплексная механизация торфяного производства. Тверь: ТвеПИ, 1991. С. 73–77.

63. Кусковой торф – конкурентоспособное коммунально-бытовое топливо для Твери и Тверской области / А.Е. Афанасьев [и др.] // Технология и комплексная механизация торфяного производства. Тверь: ТГТУ, 1997. С. 17–22.

64. Фомин К.В. Оценка зависимости изменчивости физико-механических свойств торфяной залежи // Технология и комплексная механизация торфяного производства. Тверь: ТГТУ, 1997. С. 166–168.

65. Фомин К.В. Постановка задачи выбора оптимальных параметров машин по добыче кускового торфа // Технология и комплексная механизация торфяного производства. Тверь: ТГТУ, 1997. С. 168–171.

66. Самсонов Л.Н., Снегирев Д.В., Горбунова Т.А. К вопросу об обновлении технологии производства кускового торфа // Развитие механики торфа и научных основ создания машин и оборудования торфяного производства: материалы научно-техн. конф., посвященной 100-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, д.т.н., профессора Солопова С.Г. Тверь: ТГТУ, 2001. С. 41–43.

67. Афанасьев А.Е., Пухова О.В. Влияние степени переработки и влаги на прочность формованного торфа // Развитие механики торфа и научных основ создания машин и оборудования торфяного производства: материалы научно-техн. конф., посвященной 100-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, д.т.н., профессора Солопова С.Г. Тверь: ТГТУ, 2001. С. 58–62.

68. Гамаюнов Н.И., Гамаюнов С.Н. Усадка и прочность формованного торфа // Проблемы природопользования и инженерной экологии. Тверь: ТГТУ, 2007. С. 73–84.

69. Зюзин Б.Ф., Фомин Д.С. О влиянии физико-механических свойств исходного торфа на процесс механического диспергирования // Труды Инсторфа. 2016. № 7 (60). С. 49–52.

70. Горячев В.И., Михеев И.И., Кузнецова Т.П. Целесообразность использования торфяного топлива для теплоснабжения общеобразовательных учреждений Тверской области // Промышленная энергетика. 2003. № 9. С. 14–15.

71. Технологический комплекс по производству кускового топливного торфа: пат. 116496 Рос. Федерация / Горячев В.И., Зайцев В.С., Зюзин Б.Ф., Казичев И.Н.; заявл. 10.01.2012; опубл. 27.05.2012, Бюл. № 15. 2 с.

72. Горячев В.И., Зюзин Б.Ф., Казичев И.Н. Комбинированная технология производства кускового топлива из фрезерного торфа // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 6. С. 39–44.

73. Технологический комплекс производства кускового топливного торфа с комбинированной сушкой / В.И. Горячев [и др.] // Труды Инсторфа. 2016. № 13 (66). С. 28–32.

74. Терентьев А.А., Суворов В.И. Структура и свойства формованной торфяной продукции: монография. Тверь: Созвездие, 2004. 136 с.

75. Воларович М.П., Гамаюнов Н.И., Лиштван И.И. Изучение механизма сушки и процессов структурообразования в торфяных системах // Физико-химическая механика дисперсных систем. Минск: ФР БССР, 1966. С. 351–355.

76. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 471 с.

77. Автоматизированное проектирование и расчет шнековых машин: монография / М.В. Соколов [и др.]. М.: Машиностроение-1, 2004. 248 с.

78. Разработка конструкции шнека типового пресс-экструдера / Д.В. Тимофеева [и др.] // Вестник ОГУ. 2014. № 9 (170). С. 220–225.

79. Григорьев В.И. Шнековый пресс с системой очистки внутренней поверхности корпуса для формования глиняного кирпича: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05.02.13 – машины, агрегаты и процессы (строительство). Белгород, 2010. 20 с.

80. Гудзенко М. Влияние некоторых технологических параметров маслопресса на его качественные и технические показатели // MOTROL. Commission of Motorization and Energeticin Agriculture. 2013. Vol. 15. № 3. Pp. 142–149.

81. Перельман Г.В. Моделирование и оптимизация процесса экструзии цилиндрических заготовок из пластифицированных шихт порошковых и композиционных материалов на шнековых прессах. Теория и процессы формования и спекания порошковых материалов // ПМиФП. Известия вузов. 2013. № 1. С. 27–33.

82. Закиров М.Ф. Исследование влияния шага шнека на мощность привода питателя малогабаритного шнекороторного снегоочистителя // Интеллектуальные системы в производстве. 2015. № 2 (26). С. 56–57.

83. Разработка методики расчета нагрузок на шнек и энергозатрат шнековых прессов / М.С. Татарьянц [и др.] // Science Rise. 2015. № 6/2(11). Pp. 80–84.

84. Припоров И.Е. Обоснование винтовой поверхности шнека переменного шага пресс-экструдера // Известия Оренбургского гос. аграрного ун-та. Серия «Технические науки». 2017. № 1 (63). С. 67–70.

85. Физико-химические основы технологии торфяного производства / И.И. Лиштван [и др.]. Минск: Наука и техника, 1983. 231 с.

86. Требования к торфяному сырью для производства окускованного топлива / А.В. Михайлов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 4. С. 59–63.

87. ГОСТ Р 51062-2011 Торф кусковой топливный для коммунально-бытовых нужд. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2011. 11 с.

88. Чистый И.Н. Производство гранулированного торфа. Минск: Наука и техника, 1980. 144 с.

89. Зюзин Б.Ф. Влияние механической переработки на качество кускового торфа // Труды Инсторфа. 2010. № 1 (54). С. 52–55.

90. Иванов В.А., Новикова А.С. Зависимость дисперсности торфа от производительности // Труды Инсторфа. 2017. № 15 (68). С. 18–21.

91. Воронков Б.Б. Формуемость торфомассы, ее нижний теоретический и практический пределы по влажности // Технология и комплексная механизация торфяного производства. Тверь: ТГТУ, 1996. С. 56–57.

92. Физика и химия торфа: уч. пособие для вузов / И.И. Лиштван [и др.]. М.: Недра, 1989. 304 с.

93. Семенский Е.П. Технический анализ торфа. М.: Недра, 1966. 232 с.

94. Справочник по торфу / А.В. Лазарев [и др.]. М.: Недра, 1982. 760 с.

95. Singh R.K., Das A. Analysis of Separation Response of Kelsey Centrifugal Jigin Processing Fine Coal // Fuel Processing Technology. 2013. Vol. 115. P. 71–78.

96. Горячев В.И., Михеев В.И. Поле стилки и сушки кускового топливного торфа на минеральном грунте // Вестник ТвГТУ. Серия «Технические науки». 2016. № 1 (29). С. 80–82.

97. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Определение энергоемкости процесса формования кускового торфа // Вестник ТвГТУ. Серия «Технические науки». 2019. № 1 (1). С. 36–45.

98. Самсонов Л.Н., Сеницын В.Ф. Торфяные машины и комплексы. Тверь: ТГТУ, 2001. Ч. 3. 140 с.

99. Солопов С.Г. Аэродинамический метод оценки конструкций формовальных аппаратов для пластинного торфа // Торфяная промышленность. 1946. № 1. С. 30–32.

100. Чугаев Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости). Л.: Энергия, 1971. 552 с.

101. Лапшев Н.Н. Гидравлика. М.: Академия, 2008. 272 с.

102. Епифанцев К.В., Михайлов А.В., Гладких А.В. Производство кускового торфа, экструдирование, форма заходной и калибрующей части фильеры матрицы, метод дискретных элементов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 3. С. 212–219.

103. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Экспериментальное обоснование рациональных режимов производства кускового торфа // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 2. С. 163–171.

104. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Обоснование параметров шнекового пресса для добычи кускового торфа // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: материалы XVII Междун. научно-техн. конф. «Чтения памяти В.Р. Кубачека» / под общ. ред. Ю.А. Лагуновой. Екатеринбург: УГГУ, 2019. С. 172–175.

105. Yablonev A., Guseva A. Justification of Screw Press Rational Parameters and its Working Modes during Sod Peat Extraction by Milling-forming Method // E3S Web of Conferences. Electronic Edition. 2019. Vol. 105. P. 01033.

106. Яблонев А.Л. Торфяные машины, их эксплуатация и ремонт: лабораторный практикум. Тверь: ТвГТУ, 2019. 112 с.

107. Богатов Б.А., Копенкин В.Д. Математические методы в торфяном производстве. М.: Недра, 1991. 240 с.

108. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 480 с.

109. Булышко М.Г., Иванов В.Н., Сарматов М.И. Брикетирование торфа. М.: Госэнергоиздат, 1962. 303 с.

110. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Определение прочности на изгиб формованной торфяной продукции // Вестник ТвГТУ. Серия «Технические науки». 2019. № 3 (3). С. 47–55.

111. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Методика и оборудование для испытания на прочность кускового торфа // Горное оборудование и электромеханика. 2018. № 6 (140). С. 26–33.

112. Устройство для создания и измерения разрушающей нагрузки: пат. 2696070 Рос. Федерация. / Яблонев А.Л., Гусева А.М., Жуков Н.М.; заявл. 07.12.2018; опубл. 30.07.2019, Бюл. № 22. 9 с.

113. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Механическое оборудование для испытания на прочность кускового торфа // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: материалы XVIII Междун. научно-техн. конф. «Чтения памяти В.Р. Кубачека», в год памяти и славы горняков, к 75-летию Победы в Великой Отечественной войне / под общ. ред. Ю.А. Лагуновой. Екатеринбург: УГГУ, 2020. С. 84–87.

114. Степин П.А. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1988. 367 с.

115. Яблонев А.Л., Гусева А.М. О возможности расширения границ создания и измерения разрушающей нагрузки при использовании механического стенда с цифровым динамометром и тензоскобой // Вестник ТвГТУ. Серия «Технические науки». 2020. № 2 (2). С. 65–70.

116. Yablonev A., Guseva A. Method of Expanding Measurement Limits of Digital Dynamometer in Testing Strength of Moulded Peat // E3S Web of Conferences. Electronic Edition. 2020. Vol. 174. P. 01035.

117. Гусева А.М., Яблонев А.Л. Оценка рациональных режимов производства кускового торфа фрезформовочной машиной по показателям плотности и прочности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 3. С. 87–95.

118. Яблонев А.Л., Гусева А.М., Щербакова Д.М. Обоснование рациональных конструкций шнековых прессов фрезформовочных машин для добычи кускового торфа // Вестник ТвГТУ. Серия «Технические науки». 2019. № 4 (4). С. 63–72.

119. Яблонев А.Л., Гусева А.М. О корреляционной связи плотности и прочности на изгиб кускового торфа, получаемого в

процессе формования шнековым прессом // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 1. С. 62–65.

120. Kremcheev E.A., Kremcheeva D.A. Technological Approaches to Reducing the Loss of Peat Raw Materials in Fields with Hydrological // Indian Journal of Science and Technology. 2016. Vol. 9. № 12. P. 89525.

121. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Полный факторный эксперимент по определению зависимости энергоемкости формования кускового торфа от коэффициента напора и скорости вращения шнека // Вестник ТвГТУ. Серия «Технические науки». 2019. № 2 (2). С. 51–60.

122. Misnikov O.S. Basic Technologies and Equipment Used for Peat Deposits Development in Foreign Countries // Web of Conferences «III-d International Innovative Mining Symposium». 2018. Vol. 41. P. 01046.

123. Яблонев А.Л., Гусева А.М., Жуков Н.М. Добыча и использование кускового торфяного топлива для арктических условий // Труды Инсторфа. 2018. № 17 (70). С. 46–49.

124. Аванов А. На островах Северного Ледовитого океана завершено обустройство российских военных баз. URL: <http://mbsz.ru/?p=22848> (дата обращения: 09.05.2018).

125. Минобороны обустроило четыре военных базы в Северном Ледовитом океане. URL: <http://www.interfax.ru/russia/484489> (дата обращения: 09.05.2018).

126. Русский бросок на Север. URL: <https://topwar.ru/44870-russkiy-brosok-na-sever.html> (дата обращения: 09.05.2018).

127. Президенту доложили о вывозе 50 тыс. ржавых бочек с арктических островов. URL: <https://topwar.ru/112268-prezidentu-dolozhili-o-vyvoze-50-tys-rzhavyh-bochek-s-arkticheskikh-ostrovov.html> (дата обращения: 09.05.2018).

128. Евзеров В.Я. Торфяные месторождения Мурманской области // Вестник ВГУ. Серия «Геология». 2012. № 2. С. 153–157.

129. Запивалов Н.П. Торфяные ресурсы Сибири – нетронутые богатства под ногами // ЭКО. 2011. № 8. С. 104–112.

130. Яблонев А.Л. Пневматический колесный ход и особенности его взаимодействия с торфяной залежью. Тверь: ТвГТУ, 2011. 168 с.

131. Транспорт на торфяных предприятиях / В.А. Грачев [и др.]. М.: Недра, 1977. 221 с.

132. Яблонев А.Л., Пухова О.В. Особенности транспорта торфа к конечному потребителю в г. Твери // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 1. С. 34–35.

133. Цлаф Л.Я. Вариационное исчисление и интегральные уравнения. М.: Наука, 1970. 192 с.

134. Turpeen kasittelytekniikan ammattilainen. URL: <http://www.raiselift.fi/en/products/com.html> (дата обращения: 29.11.2022).

135. Greenmash. URL: <http://greenmash.ru/pricer-dlya-perevozki-torfa-ppt-25-2/> (дата обращения: 29.11.2022).

136. Яблонев А.Л., Дорогов О.В. Расчет сдвоенного приводного пневмоколесного прицепа для перевозки фрезерного торфа // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 6. С. 154–157.

137. Яблонев А.Л., Дорогов О.В. Обоснование параметров пневмоколесного хода пассивных прицепных машин для транспортирования фрезерного торфа // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 7. С. 174–177.

138. Александров Г.А., Калачев Ю.В. Повышение эффективности торфяного производства. М.: Недра, 1980. 152 с.

139. Ендовицкий Д.А. Инвестиционный анализ в реальном секторе экономики. М.: Финансы и статистика, 2003. 354 с.

140. Кольцова И.В., Рябых Д.А. Практика финансовой диагностики и оценки проектов. М. – СПб. – Киев: Альт-Инвест, 2007. 416 с.

141. Царев В.В. Оценка экономической эффективности инвестиций. СПб.: Питер, 2004. 464 с.

142. Яблонев А.Л. Некоторые экономические аспекты, касающиеся проблемы транспорта торфа // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2011. № 3. С. 48–51.

143. Яблонев А.Л. Определение потолочной цены на торфяное топливо с учетом транспортных расходов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 4. С. 379–381.

144. Современные тракторы: справочное пособие / А.Н. Лукьянчиков [и др.]. Тверь: ТГТУ, 2010. 104 с.

145. BELARUS. URL: http://www.belarus-tractor.com/catalog/belarus-1221/belarus-1221t_2/ (дата обращения: 29.11.2022).

146. BELARUS. URL: <http://www.belarus-tractor.com/catalog/belarus-1523/belarus-1523/> (дата обращения: 29.11.2022).

147. БТЗ – Брянский завод тракторов. URL: <https://btz-agro.ru/products/tractors/wheel-tractors/btz-251k/> (дата обращения: 29.11.2022).

148. Агромаш. URL: <https://agrotech-21.ru/products/tractor-agromash-90tg-swamp/> (дата обращения: 01.12.2022).

149. Гусева А.М., Муталибов Ш.Г. Перспективы добычи кускового торфа в условиях Крайнего Севера // Проблемы и перспективы устойчивого развития торфяного дела в России: материалы Междун. научно-практ. конф. Тверь: ТвГТУ, 2018. С. 44–48.

150. Гусева А.М., Яблонев А.Л. Энергетические перспективы производства и использования кускового торфа // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы XVI Междун. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики / под общ. ред. Р.А. Ковалева. Тула: ТулГУ, 2020. С. 268–272.

151. Яблонев А.Л., Гусева А.М., Жуков Н.М. Стенд для определения прочности на изгиб формованной торфяной продукции // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. 2021. № 14. С. 31–37.

152. Гусева А.М., Яблонев А.Л. Оборудование и методика определения качества кускового торфа // Труды Инсторфа. 2021. № 24 (77). С. 34–38.

153. Яблонев А.Л., Мисников О.С., Гусева А.М. Обоснование рациональных параметров и режимов работы перерабатывающего и формующего пресса машин для добычи кускового торфа // Горный журнал. 2021. № 6. С. 51–56.

154. Guseva A.M. Estimation of Rational Modes and Regimes of Production of Sod Peat with Milling-forming Machine by Quality Indicators // E3S Web of Conferences. The Second Interregional Conference. Kemerovo. 2021. P. 01023.

155. Гусева А.М., Яблонев А.Л. Обоснование рациональных параметров и режимов производства кускового торфа по показателям качества // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XIX Междун. научно-техн. конф., проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург: УГГУ, 2021. С. 40–43.

156. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Анализ параметров и режимов работы формующего агрегата машин для добычи кускового торфа с позиции обеспечения качества получаемого продукта // Горный журнал. 2022. № 5. С. 52–57.

157. Гусева А.М. Обоснование рациональных параметров и режимов работы шнекового пресса фрезформовочной машины для добычи кускового торфа: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. М., 2019. 145 с.

158. Гусева А.М. Обоснование рациональных параметров и режимов работы шнекового пресса фрезформовочной машины для добычи кускового торфа: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05.05.06 – горные машины. М., 2019. 24 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Таблица А1. Определение энергоемкости формования торфа
шнековым прессом с шагом витков шнека $S = 110$ мм

d , мм	n , об/мин	U , В	\bar{I} , А	$\overline{N_{xx}}$, кВт	\bar{N} , кВт	$\overline{N_{пр}}$, кВт	\bar{Q} , м ³ /с	\bar{A} , МДж/м ³
52	55,81	230	8,15	4,736 2	4,948 7	0,212 5	0,000 062 16	3,418 6
	104,86		8,2	4,736 2	4,979 04	0,242 8	0,000 079 17	3,066 81
	183,28		8,3	4,796 9	5,039 8	0,242 9	0,000 108 57	2,237 27
	348,24		8,7	4,827 2	5,282 6	0,455 4	0,000 157 5	2,891 43
	429,86		9,1	4,888	5,525 3	0,637 3	0,000 231 63	2,751 37
60	55,81	230	8,1	4,736 2	4,918 3	0,181 2	0,000 075 04	2,426 71
	104,86		8,15	4,736 2	4,948 7	0,212 5	0,000 105	2,023 81
	183,28		8,25	4,796 9	5,009 4	0,212 5	0,000 131 32	1,618 18
	348,24		8,5	4,827 2	5,161 2	0,334	0,000 227 08	1,470 85
	429,86		8,9	4,888	5,404 1	0,516 1	0,000 311	1,659 48
92	55,81	230	8,0	4,736 2	4,857 6	0,121 4	0,000 070 426	1,723 79
	104,86		8,05	4,736 2	4,888	0,151 8	0,000 106 304	1,427 98
	183,28		8,15	4,796 9	4,948 7	0,151 8	0,000 110 29	1,376 37
	348,24		8,3	4,827 2	5,039 8	0,212 6	0,000 217 923	0,975 57
	429,86		8,6	4,888	5,221 9	0,333 9	0,000 255 794	1,305 347

Таблица А2. Определение энергоемкости формования торфа
шнековым прессом с шагом витков шнека $S = 50$ мм

d , мм	n , об/мин	U , В	\bar{I} , А	$\overline{N_{xx}}$, кВт	\bar{N} , кВт	$\overline{N_{пр}}$, кВт	\bar{Q} , м ³ /с	\bar{A} , МДж/м ³
52	55,81	230	8,05	4,736 2	4,888	0,151 8	0,000 048	3,132 86
	104,86		8,1	4,736 2	4,918 3	0,182 1	0,000 726 6	2,506 19
	183,28		8,15	4,796 9	4,966 9	0,170	0,000 101 64	1,672 56
	348,24		8,45	4,827 2	5,130 8	0,303 6	0,000 144 82	2,101 32
	429,86		9,0	4,888	5,464 8	0,576 8	0,000 189 63	3,041 7
60	55,81	230	8,0	4,736 2	4,858	0,121 8	0,000 056 5	2,157 52
	104,86		8,05	4,736 2	4,888	0,151 8	0,000 084 8	1,790 09
	183,28		8,1	4,796 9	4,918 3	0,121 4	0,000 103	1,178 64
	348,24		8,4	4,827 2	5,100	0,272 8	0,000 21	1,299 05
	429,86		8,8	4,888	5,343 4	0,455 4	0,000 314	1,450 32
92	55,81	230	7,9	4,736 2	4,796 9	0,060 7	0,000 050 494	1,202 12
	104,86		8,0	4,736 2	4,857 6	0,121 4	0,000 101 653	1,194 26
	183,28		8,05	4,796 9	4,888	0,091 1	0,000 103 646	0,878 953
	348,24		8,1	4,827 2	4,918 3	0,091 1	0,000 104 975	0,867 83
	429,86		8,3	4,888	5,039 8	0,151 8	0,000 152 1	0,998 03

Приложение Б

Таблица Б1. Определение плотности кускового торфа при формовании шнековым прессом с шагом витков шнека $S = 110$ мм

d , мм	n , об/мин	\bar{m} , г	\bar{d}_o , мм	\bar{l}_o , мм	$\bar{V} \cdot 10^5$, м ³	$\bar{\rho}$, кг/м ³
52	55,81	49,8	36,48	48,79	5,10	975,54
	104,86	52,3	36,50	49,79	5,21	1 003,31
	183,28	52,2	36,12	49,97	5,12	1 019,38
	348,24	29,1	32,88	33,45	2,84	1 024,12
	429,86	34,5	31,00	43,85	3,31	1 042,54
60	55,81	53,9	39,23	46,66	5,64	955,75
	104,86	58,7	39,24	49,94	6,04	971,85
	183,28	59,9	39,70	48,63	6,02	995,77
	348,24	65,5	40,44	50,37	6,47	1 011,77
	429,86	64,7	40,02	50,40	6,34	1 020,57
92	55,81	128,8	64,08	42,60	13,74	937,39
	104,86	153,4	62,66	52,89	16,31	940,35
	183,28	107,8	61,18	38,10	11,20	962,15
	348,24	124	60,18	44,58	12,68	978,18
	429,86	105,3	58,58	39,81	10,73	981,39

Таблица Б2. Определение плотности кускового торфа при формовании шнековым прессом с шагом витков шнека $S = 50$ мм

d , мм	n , об/мин	\bar{m} , г	\bar{d}_o , мм	\bar{l}_o , мм	$\bar{V} \cdot 10^5$, м ³	$\bar{\rho}$, кг/м ³
52	55,81	38,9	31,8	48,10	3,82	1 017,96
	104,86	41,3	32,36	48,03	3,95	1 044,48
	183,28	38,8	32,48	45,26	3,75	1 033,67
	348,24	42,3	32,47	47,94	3,97	1 065,17
	429,86	44,7	33,06	48,81	4,19	1 066,59
60	55,81	49,9	37,62	45,88	5,10	978,02
	104,86	51,2	36,77	47,93	5,09	1 004,92
	183,28	60,35	38,95	49,43	5,89	1 024,24
	348,24	64,12	38,38	53,16	6,15	1 042,42
	429,86	68,6	39,45	53,50	6,54	1 049,44
92	55,81	142,88	63,5	47,14	14,93	956,75
	104,86	146,6	65,52	44,90	15,14	968,22
	183,28	126,2	66,38	37,16	12,86	981,23
	348,24	141,7	65,04	43,37	14,41	983,23
	429,86	127,98	64,94	38,80	12,85	995,82

Примечание. В таблицах прилож. Б введены дополнительные обозначения: \bar{m} – средняя масса куса, г; \bar{d}_o – средний диаметр куса, мм; \bar{l}_o – средняя длина куса, мм; \bar{V} – средний объем куса, м³.

Приложение В

Таблица В1. Определение прочности на изгиб кускового торфа,
полученного при формировании шнековым прессом
с шагом витков шнека $S = 110$ мм

d , мм	n , об/мин	\bar{d}_o , мм	L , мм	\bar{F} , кН	$\bar{\sigma}$, МПа
52	55,81	36,48	110	0,596	3,438 6
	104,86	36,50		0,625 6	3,603 7
	183,28	36,12		0,704 4	4,186 9
	348,24	32,88		0,615 4	4,849 6
	429,86	31,00		0,574 2	5,399 3
60	55,81	39,23	110	0,481 1	2,232 3
	104,86	39,24		0,545 1	2,527 1
	183,28	39,70		0,586 5	2,625 6
	348,24	40,44		0,818	3,464 4
	429,86	40,02		0,823 3	3,598 0
92	55,81	64,08	90	1,082 4	0,942 8
	104,86	62,66		1,075 7	1,002 1
	183,28	61,18		1,008 9	1,009 7
	348,24	60,18		1,005 6	1,057 4
	429,86	58,58		0,943 4	1,075 5

Таблица В2. Определение прочности на изгиб кускового торфа,
полученного при формировании шнековым прессом
с шагом витков шнека $S = 50$ мм

d , мм	n , об/мин	\bar{d}_o , мм	L , мм	\bar{F} , кН	$\bar{\sigma}$, МПа
52	55,81	31,8	110	0,486 231 4	4,235 4
	104,86	32,36		0,522 439 2	4,318 6
	183,28	32,48		0,670 928 2	5,484 8
	348,24	32,47		0,763 128 8	6,244 3
	429,86	33,06		0,808 365 4	6,266 6
60	55,81	37,62	110	0,485 183 9	2,552 6
	104,86	36,77		0,464 925 2	2,619 6
	183,28	38,95		0,752 476 1	3,567 0
	348,24	38,38		0,808 786 6	4,007 3
	429,86	39,45		0,936 922 6	4,274 6
92	55,81	63,5	90	1,086 272 6	0,972 3
	104,86	65,52		1,231 562 4	1,003 5
	183,28	66,38		1,572 188 4	1,231 9
	348,24	65,04		1,601 695 3	1,334 2
	429,86	64,94		1,639 607 9	1,372 1

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	5
1.1. Основы технологии производства кускового торфа методом щелевого фрезерования.....	5
1.2. Существующие конструкции фрезформовочных машин	12
1.3. Анализ технического уровня конструкций отечественных и зарубежных фрезформовочных машин.....	30
1.4. Существующие результаты исследований по вопросу производства кускового торфа фрезформовочным методом.....	32
1.5. Цель и задачи исследования.....	45
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К СЫРЬЮ, ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ И ПАРАМЕТРАМ ШНЕКОВОГО ПРЕССА.....	46
2.1. Требования к исходному сырью.....	46
2.2. Требования к готовой продукции.....	50
2.3. Конструкции шнековых прессов и их рабочие органы.....	52
2.4. Выводы по главе	62
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШНЕКОВОГО ПРЕССА ДЛЯ ФОРМОВАНИЯ КУСКОВОГО ТОРФА.....	62
3.1. Задачи экспериментального исследования.....	62
3.2. Описание опытной лабораторной установки, методика проведения исследований.....	63
3.3. Оценка результатов расчета энергоемкости производства кускового торфа.....	68
3.4. Оценка плотности формованной торфяной продукции.....	74
3.5. Определение прочности кускового торфа.....	79
3.6. О корреляционной связи плотности и прочности кускового торфа на изгиб.....	91

3.7. Полный факторный эксперимент по определению зависимости энергоемкости формования кускового торфа от коэффициента напора и скорости вращения шнека.....	96
3.8. Выводы по главе	104
4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ КУСКОВОГО ТОРФА КАК ЗАМЕНИТЕЛЯ ДАЛЬНЕПРИВОЗНЫХ ТОПЛИВ.....	105
4.1. Кусковое торфяное топливо, получаемое при освоении арктических территорий.....	105
4.2. Особенности и актуальность проблемы транспортирования добытого кускового торфа.....	109
4.3. Оптимизация транспортных работ при организации доставки кускового торфа.....	111
4.4. Основы инвестиционного анализа при оценке транспортных работ по организации доставки кускового торфа.....	118
4.5. Некоторые экономические аспекты, касающиеся транспортирования кускового торфа.....	127
4.6. Тракторы, рекомендуемые к использованию в качестве тягачей машин для добычи кускового торфа.....	131
4.7. Выводы по главе.....	137
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	138
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	140
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	155
Приложение А.....	155
Приложение Б.....	156
Приложение В.....	157

Анна Михайловна Гусева
Александр Львович Яблонев

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

Монография

Редактор С.В. Борисов
Корректор Ю.Ф. Воробьева

Подписано в печать 22.02.2023

Формат 60×84/16

Физ. печ. л. 10

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 9,8

Заказ № 7

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 8,7

С – 7

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, 22