

УДК 630

**АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ЦЕПОЧЕК ПРЕДПРИЯТИЙ ЛЕСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ****Маганов Иван Александрович***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петрозаводский государственный университет»,  
г. Петрозаводск, Россия***Тихонов Евгений Андрьянович***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петрозаводский государственный университет»,  
г. Петрозаводск, Россия***Сюнёв Владимир Сергеевич***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петрозаводский государственный университет»,  
г. Петрозаводск, Россия***Куницкая Ольга Анатольевна***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Арктический государственный агротехнологический университет»,  
г. Якутск, Россия, ola.ola07@mail.ru*

**Аннотация:** Для выполнения работ на лесных терминалах требуются источники энергии к технологическому оборудованию. Применение для этих целей различного рода генераторов, двигателей внутреннего сгорания и вала отбора мощности является не самым дешёвым способом. В качестве альтернативы в статье рассматриваются разнообразные варианты преобразования биотоплива в механическую энергию, в том числе и при помощи двигателя внешнего сгорания, работающего на щепе, которая вырабатывается во время лесозаготовительных работ.

**Ключевые слова:** лесная промышленность, утилизация отходов, биотопливо, двигатель внешнего сгорания.

**ANALYSIS OF THE ENERGY BALANCE OF FOREST INDUSTRY  
TECHNOLOGY CHAINS****Maganov Ivan A.***Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia***Tikhonov Evgeny A.***Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia***Syunev Vladimir S.***Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia*

**Kunitskaya Olga A.***Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education**Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, Russia, ola.ola07@mail.ru*

**Abstract:** For forest terminals, energy sources are required for process equipment. The use of different types of generators, internal combustion engines and a power take shaft is not the cheapest way to do this. As an alternative, the article discusses a variety of options for converting biofuels into mechanical energy, including the use of an external combustion engine powered by chips generated during logging.

**Keywords:** Forest industry, waste management, biofuels, external combustion engine.

**Введение.** Целью данной работы являлся поиск экономически целесообразного применения лесосечных отходов, в частности щепы, в качестве энергоносителя для привода машин и оборудования в условиях верхних складов, лесных терминалов и деревообрабатывающих предприятий.

Результатом работы лесозаготовительного сектора являются сортименты, доставленные на лесоперерабатывающее предприятие. При этом различные технологии обуславливают появление сортиментов на различных этапах производственного цикла. Признаком, по которому классифицируются технологические процессы лесосечных работ, является вид вывозимой с лесосеки древесины. На сегодняшний момент, древесина с лесосек может вывозиться в следующих формах: целые деревья, полудеревья, хлысты, сортименты и щепа. В целом в Российской Федерации, наиболее распространенной является технология лесосечных работ с вывозкой сортиментов [1-3]. Это объясняется, прежде всего, истощенностью и снижением качественных характеристик древостоев в освоенных и многонаселенных регионах страны, ухудшением уровня концентрации лесосечного фонда, развитием дорожно-транспортной сети лесоперерабатывающей инфраструктуры, вовлечением в эксплуатацию низкобонитетных, малоценных лесонасаждений и различных видов выборочных рубок, а также лесными пожарами [4-16].

**Материалы и методы.** Для расчётов экономических показателей в качестве опытной была принята барабанная дробилка Pezzolato РТН 30.70 MOTOR [17]. Данная дробилка обладает заявленной производительностью 18 м<sup>3</sup>/час, при мощности – 128 кВт (привод осуществляется дизельным двигателем).

Рассмотрим приведенные выше технологии с точки зрения этапов, при выполнении которых появляется биотопливо – порубочные остатки (см. таблицу 1).

Таблица 1

**Ресурсный анализ технологических процессов**

Группа	№ тех. процесса	Операции, выполняемые на лесосеке	Вид трелюемого леса	Операции, выполняемые на верхнем складе или погрузочном пункте	Вид вывозимого леса
Хлыстовая	1	В-Фп	Д	П	Д
	2	В-Фп	Д	Ос-П	Х
		<b>ПО</b>			
	3	В-Ос-Фп	Х	П	Х
		<b>ПО</b>			
Полудеревьям и	4	В-Дл-Фп	Пд	П	Пд
	5	В-Фп	Д	Дл-П	Пд
Сортиментная	6	В-Ос-Фп	Х	Р-П	С
		<b>ПО</b>		<b>ПО</b>	
	7	В-Фп	Д	Ос-Р-П	С
		<b>ПО</b>			
	8	В-Ос-Р-Фп	С	П	С
		<b>ПО</b>			
	9	В-Ос-Р-Фп-П	—	—	С
		<b>ПО</b>			

Условные обозначения, приведенные в таблице 1: В – валка деревьев; Ос – очистка деревьев от сучьев; Р – раскряжевка; Фп – формирование пакета; П – погрузка на лесовозный транспорт; Дл – деление деревьев; Пд – полудеревья; Пр – продольная распиловка; Ок – окорка; Рщ – рубка в щепу; Д – деревья; Х – хлысты; С – сортименты; Щ<sub>тех</sub> – щепы технологическая; Щ<sub>топ</sub> – щепы топливная; Пм – пиломатериалы; ПО – порубочные остатки.

Исходя из таблицы 1, технологические процессы лесозаготовки полудеревьями в дальнейшем рассматриваться не будут.

Рассмотрим технологический процесс №2. Порубочные остатки, появляющиеся на верхнем складе нерационально использовать для укрепления волоков. Следовательно, их можно использовать для отопления объектов погрузочного пункта. При этом использовать ПО в виде дров достаточно затруднительно и потребует значительного ручного труда. Рубка ПО в топливную щепу и дальнейшее использование для отопления позволит сократить издержки и обеспечить повышение энергетической устойчивости и повышения автономности верхнего склада. Однако, процесс рубки в щепу достаточно энергоемкий, что

значительно снижает экономический эффект от внедрения дополнительной операции в технологический процесс. Одним из вариантов решения данной проблемы является применение в качестве топлива для рубительных машин – щепы, производимой самими машинами. Это возможно, если в качестве источника механической энергии, либо для генерации электроэнергии, будет использоваться двигатель с внешним подводом тепла, способный работать на биотопливе.

Аналогичная ситуация складывается с технологическим процессом №7, где на верхнем складе порубочные остатки образуются от очистки от сучьев и раскряжевке (балансы и последний рез).

В технологическом процессе №3 порубочные остатки образуются на лесосеке, что несколько затрудняет их использование в качестве биотоплива. Часть их может использоваться для укрепления волоков. Остальная часть, при организации сбора, может быть использована для получения топливной щепы.

Аналогичная ситуация складывается с технологическими процессами №8 и 9, с той лишь разницей, что порубочных остатков тут будет больше, так как помимо очистки от сучьев на лесосеке осуществляется раскряжевка и остаются последний рез и балансы.

Технологический процесс №6 является комбинацией процессов №2 и №3. Единственное отличие – это источник появления порубочных остатков на верхнем складе: №2 – очистка от сучьев, №6 – раскряжевка.

Технологический процесс №7 является наиболее подходящим для использования порубочных остатков в качестве биотоплива для производства топливной щепы. Так как очистка от сучьев и раскряжевка происходят на верхнем складе, то их осуществляют без постоянного перемещения технологического оборудования (как в случаях с выполнением этих операций на лесосеке), что позволяет изначально сконцентрировать местонахождение порубочных остатков и организовать их переработку в топливную щепу более эффективно. При этом приводы сучкорезных и раскряжевочных машин также можно обеспечить от двигателей внешнего сгорания.

Далее приведем таблицу 2 с дополнительными технологическими операциями и продуктами.

Таблица 2

**Ресурсный анализ технологических процессов**

Группа	№ тех. процесса	Операции, выполняемые на лесосеке	Вид трелюемого леса	Операции, выполняемые на верхнем складе или погрузочном пункте	Вид вывозимого леса
Хлыстовая	2	В-Фп	Д	Ос-П, Рщ-П	Х, Щ <sub>топ</sub>
				ПО	

Сортиментная	3	В-Ос-Фп, Рщ	Х, Щ <sub>топ</sub>	П	Х, Щ <sub>топ</sub>
		ПО			
	6	В-Ос-Фп, Рщ	Х, Щ <sub>топ</sub>	Р-П, Рщ-П	С, Щ <sub>топ</sub>
		ПО		ПО	
	7	В-Фп	Д	Ос-Р-П, Рщ-П	С, Щ <sub>топ</sub>
				ПО	
	8	В-Ос-Р-Фп, Рщ	С, Щ <sub>топ</sub>	П	С, Щ <sub>топ</sub>
		ПО			
	9	В-Ос-Р-Фп-П, Рщ-П	—	—	С, Щ <sub>топ</sub>
		ПО			

Наиболее эффективное применение глубокой переработки с получением топливной щепы будет в технологическом процессе №7, так как весь объем отходов образуется на верхнем складе, где нет необходимости дополнительного сбора и локализации в месте переработки.

В таблице 3 более широко представлены технологические процессы, обеспечивающие получение конечного продукта в условиях лесосеки или верхнего склада.

Таблица 3

**Технологические процессы с углубленной обработкой древесины**

Группа	№ тех. процесса	Операции, выполняемые на лесосеке	Вид трельюемого леса	Операции, выполняемые на верхнем складе или погрузочном пункте	Вид вывозимого леса
С углубленной обработкой	1	В-Рщ	Щ <sub>топ</sub>	П	Щ <sub>топ</sub>
	2	В-Фп	Д	Рщ-П	Щ <sub>топ</sub>
	3	В-Ос-Ок-Р-Фп	С	Рщ-П	Щ <sub>тех</sub>
	4	В-Ос-Ок-Р-Фп	С	Рщ-Бр-П	Тг
	5	В-Ос-Р-Фп	С	Пр-П	Пм
	6	В-Ос-Р-Фп	С	Р-Рс-П	Пл
	7	В-Фп	Д	Ос-ПД-П	Эм
	8	В-Ос-Ок-Р-Фп	С	Проп-П	Сп

Условные обозначения, приведенные в таблице 4: В – валка деревьев; Ос – очистка деревьев от сучьев; Р – раскряжевка; Фп – формирование пакета; П – погрузка на лесовозный транспорт; Пр – продольная распиловка; Ок – окорка; Рщ – рубка в щепу; Д – деревья; С – сортименты; Щ<sub>тех</sub> – щепы технологическая; Щ<sub>топ</sub> – щепы топливная; Пм – пиломатериалы; Пл – колотые поленья; Рс – раскальвание; Проп-П – пропитка пиломатериалов; Сп – сортименты пропитанные; Бр – брикетирование; Тг – топливные гранулы; ПД – паровая дистилляция; ЭМ – эфирные масла.

Технологический процесс №2, приведенный в таблице 3 практически идентичен технологическому процессу №7 из таблицы 3. Однако, процесс №7 является более универсальным, так как позволяет получать более широкий спектр продукции, в зависимости от текущей потребности.

В рамках данной работы наибольший интерес представляют технологические процессы №1...6. Их объединяет необходимость наличия механической энергии, необходимой для переработки различных видов древесины в различные продукты, которую можно получить, используя часть получаемой продукции (№1...4) либо отходы распиловки (№5). При этом эффективность использования отходов распиловки будет напрямую зависеть от объемов производства пиломатериалов.

Из множества вариантов технологических процессов, в которых для получения продукции можно использовать двигатели с внешним подводом тепла, необходимо определить наиболее применимые в текущих условиях лесозаготовки в Российской Федерации.

Степень распространения технологических процессов и систем машин для лесосечных работ в РФ представлена в таблице 4.

Таблица 4

**Объемы применения технологий в общем объеме лесозаготовок [9]**

№	Технологические операции основных лесосечных работ	Система машин	Доля в общем объеме, %
Хлыстовая заготовка			
1	В-Ос-Фп + трелевка +П	БП+БП+ТТ	9
2	В-Фп + трелевка + Ос-П	ВПМ+ТТ+МОС	17
ИТОГО:			26
Сортиментная заготовка			
1	В-Ос-Фп + трелевка + Р-П	БП+БП+ТТ+БП	45
2	В-Фп + трелевка + Ос+Р-П	БП+ТТ+МОСР	1
3	В-Ос-Р-Фп + трелевка + П	харвестер + форвадер	20
4	В-Ос-Р-Фп + трелевка + П	БП+БП+БП + форвадер	5
5	В-Фп + трелевка + Ос+Р-П	ВПМ + ТТ + МОСР	3
ИТОГО:			74

Условные обозначения: БП – бензиномоторная пила; ТТ – трелевочный трактор; ВПМ – валочно-пакетирующая машина; МОСР – самоходная сучкорезная машина; МОСР – самоходная сучкорезно-раскряжевая машина (процессор)

В Северо-западном регионе России распределение технологических процессов представлено в таблице 5 [9].

Таблица 5

**Объемы лесозаготовок по технологиям в Северо-западном регионе**

№	Основные технологические операции	Основное лесозаготовительное оборудование	Доля в общем объеме, %
Хлыстовая заготовка			
1	В-Ос-Фп + трелевка + П	БП+БП+ТТ	42
2	В-Фп + трелевка + Ос-П	ВПМ+ТТ+МОС	18
ИТОГО:			60
Сортиментная заготовка			
1	В-Ос-Фп + трелевка + Р-П	БП+БП+ТТ+БП	19
2	В-Фп + трелевка + Ос+Р-П	БП+ТТ+МОСР	1
3	В-Ос-Р-Фп + трелевка + П	харвестер + форвадер	14
4	В-Ос-Р-Фп + трелевка + П	БП+БП+БП + форвадер	4
5	В-Фп + трелевка + Ос+Р-П	ВПМ + ТТ + МОСР	2
ИТОГО:			40

Таким образом, ресурсный анализ показывает, что применение двигателей с внешним подводом тепла в качестве источников механической и электрической энергии будет наиболее эффективным при хлыстовой технологии лесозаготовок. Так как все биотопливо будет образовываться на верхнем складе, где его использование будет более удобным, чем на лесосеке.

Также, при сортиментной заготовке (по европейской терминологии), подразумевающей трелевку деревьев (таблица 3, технологический процесс №7) использование порубочных остатков в качестве биотоплива для привода технологических машин на верхнем складе будет наиболее эффективно.

**Результаты.** Для оценки нижнего предела применимости рубительных машин, работающих на отходах лесозаготовки, проанализируем минимальные объемы древесины, которые необходимо заготавливать доставлять на верхний склад или лесной терминал в смену.

Доля отходов при лесозаготовке может варьироваться в зависимости от бонитета и применяемой технологии и составлять от 20 до 37% [18].

Выполним расчет требуемого объема заготовки в смену. Результаты расчета приведены в таблице 6.

Таблица 6

**Расчет минимального объема заготовки в смену**

Параметр	Значение	
Исходные данные		
Производительность рубительной машины, м <sup>3</sup> /час	18	18
Доля отходов при лесозаготовке, %	20	37
Расход щепы на привод рубительной машины, %	12	12
Расчет		

Параметр	Значение	
Объем отходов, м <sup>3</sup> /смена	144	144
Требуемый объем заготовки, м <sup>3</sup> /смена	720	389
Расход щепы на привод рубительной машины, м <sup>3</sup> /час	2,16	2,16
Выход щепы, м <sup>3</sup> /смена	126,7	126,7

Как видно из таблицы, минимальные объемы заготовки древесины для применения на верхнем складе или лесном терминале рубительной машины, работающей на отходах лесозаготовки, должны быть не менее 720 м<sup>3</sup> в смену, если брать в расчет минимальный процент отходов. Такие объемы вполне могут выполнить 3-4 современных харвестера, в зависимости от компетентности и степени заинтересованности операторов [19].

При этом ежемесячно образуется почти 130 м<sup>3</sup> топливной щепы, которая может использоваться для отопления производственных и бытовых построек или для привода любого технологического оборудования.

Лесоперерабатывающий сектор можно условно разделить на две большие группы производств:

- Производство пиломатериалов и изделий из них:
  - производство пиломатериалов;
  - мебельные производства;
  - деревянное домостроение.
- Производство продукции на основе измельченной древесины:
  - целлюлозно-бумажная промышленность и лесная химия;
  - производство древесных плит;
  - фанерное производство;
  - производство биотоплива.

Рассмотрим технологические процессы данных производств на предмет ресурсно-энергетического баланса.

Как уже было показано выше на всех типах производств, где подразумевается рубка древесины в щепу, применение для привода рубительных машин и генераторов электроэнергии двигателей с внешним подводом тепла может быть целесообразным, если стоимость щепы, использованной для привода рубительной машины, будет ниже стоимости затраченной электроэнергии.

Для расчета примем наименьший расход щепы для привода технологической машины. Исходные данные и результаты расчета представлены в таблице 7.

Таблица 7

**Расчет экономических показателей энергозатрат**

Параметр	Значение
Стоимость щепы, руб./м <sup>3</sup>	450
Производительность машины, куб/час	180
Мощность машины, кВт	246,4
Цена электричества, руб./кВт	6
Расход на привод, %	0,035
Расход щепы на привод, м <sup>3</sup>	6,30
Стоимость щепы, руб.	2835
Стоимость электричества, руб.	1478

Как видно из таблицы, даже при условии минимальной влажности, стоимость израсходованной на привод щепы, выше, чем стоимость израсходованной электроэнергии.

Таким образом, внедрение двигателей с внешним подводом тепла, в качестве источника механической энергии для привода рубительных машин, в технологические циклы производства технологической или топливной щепы – нецелесообразно.

Рассмотрим объемы энергетических ресурсов, образующихся на технологических линиях по производству домокомплектов из оцилиндрованного бревна.

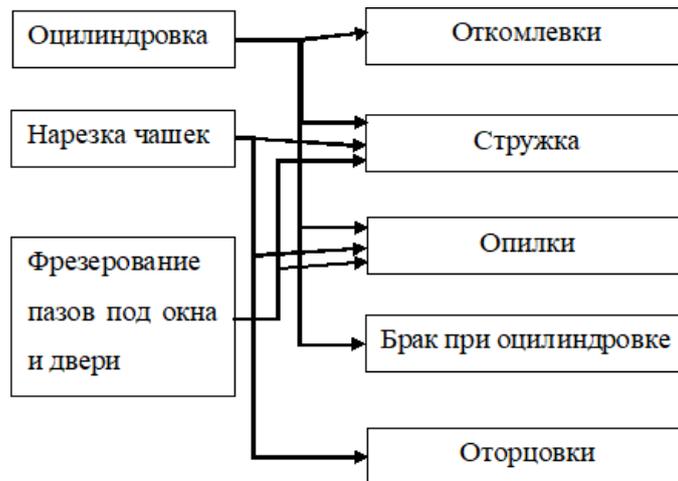
В зависимости от формы отходов, образующихся на различных этапах технологического цикла, можно выделить следующие группы энергетических ресурсов: оторцовки, откомлевки, стружка, опилки, брак (бревна с браком после оцилиндровки).

На рисунке 1 приведена схема источников формирования объемов энергетических ресурсов и пути их дальнейшего использования.

В таблице 8 приведены средние значения объемов энергетических ресурсов, приходящихся на бревна различных диаметров, доступных для производства некоторых видов продукции энергетического назначения [20].

Как видно из таблицы, в зависимости от диаметра бревна, от 46 до 65% объема бревна уходит в отходы, которые можно использовать в качестве биотоплива. К тому же объем отходов, из которых можно получить щепу (комлевые части, оторцовки и брак), составляет от 5 до 10%.

Таким образом, при наличии достаточных объемов производства на предприятии, внедрение двигателей с внешним подводом тепла, в качестве источника механической энергии для привода рубительных машин и электрогенераторов является целесообразным.



**Рисунок 1.** Технологическая схема образования отходов при производстве оцилиндрованного бревна

Таблица 8

**Средние значения объемов энергетических ресурсов, приходящихся на одно бревно**

Диаметр оцилиндрованного бревна, м	Для топливной щепы, %	Для брикетов, %	Для пеллет, %	Для дров, %
0,17	10,51	54,74	54,74	10,51
0,19	5,28	43,97	43,97	5,28
0,23	2,32	43,74	43,74	2,32

При производстве пиломатериалов возникают те же объемы отходов, что и при производстве оцилиндрованного бревна. Стоит отметить, что объемы стружки и опилок увеличиваются. Также, появляется дополнительный объем реек, которые также можно использовать как биотопливо.

При производстве фанеры и мебели, также присутствуют древесные отходы. Но, их объем недостаточен для полноценного внедрения двигателей с внешним подводом тепла.

В настоящее время, можно выделить несколько технологий преобразования внутренней энергии биотоплива в механическую энергию:

- двигатели внутреннего сгорания (далее – ДВС), работающие на генераторном газе;
- машины, работающие по циклу Ренкина;
- машины, работающие по циклу Стирлинга.

В таблице 9 представлены технологические схемы работы различных машин, работающих на представленных выше принципах.

Газогенераторные установки получили широкое распространение в автомобильной технике в первой половине и середине XX века [21]. В дальнейшем, их использование пошло на спад и сейчас автомобили с газогенераторами в мире практически не применяются.

В современных условиях, когда ценовая доступность углеводородного топлива все больше снижается, применение газогенераторного автотранспорта в промышленности, в условиях доступности и сравнительно низкой стоимости биотоплива, вновь становится актуальным [22]. Соответственно, стационарное исполнение силовых установок электрогенераторов и технологического оборудования в лесной промышленности является так же перспективным.

Так как в финальном преобразовании внутренней энергии генераторного газа в механическую энергию применяется ДВС, то основной интерес представляет непосредственно система генерации и подготовки газа. На сегодня, освоены 3 основные модификации промышленных процессов газификации биотоплива: прямой процесс газификации; обращенный процесс газификации; поперечный процесс газификации.

Принципиальные схемы газогенерации представлены на рисунках 2...4.

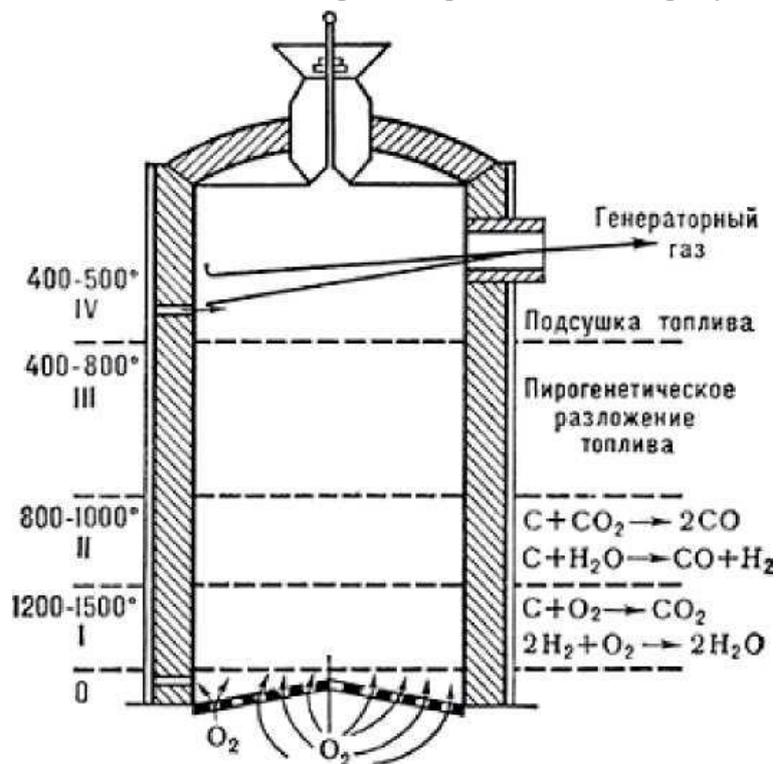


Рисунок 2. Схема прямого процесса газификации

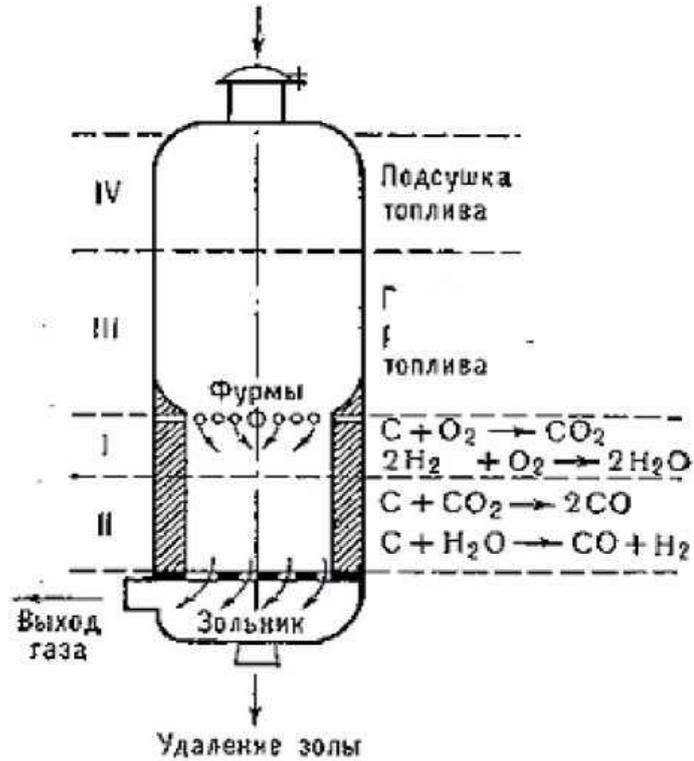
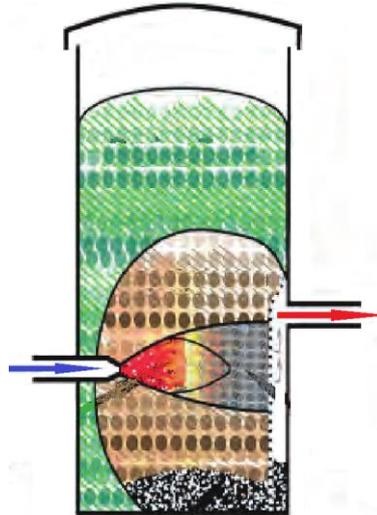


Рисунок 3. Схема обращенного процесса газификации

Таблица 9

**Технологические схемы преобразования внутренней энергии биотоплива в механическую энергию**

Технология преобразования	Тип машины	Высвобождение внутренней энергии биотоплива	Подготовка рабочего тела		Преобразование внутренней энергии рабочего тела в механическую энергию		Параметризация первичной механической энергии	Конечный результат
			Очистка генераторного газа от паров посторонних веществ	Очистка генераторного газа от твердых включений	Нагнетание генераторного газа в ресивер	Подача генераторного газа в ДВС		
ДВС, работающий на генераторном газе	Газо-генератор	Пиролиз	Очистка генераторного газа от паров посторонних веществ	Очистка генераторного газа от твердых включений	Нагнетание генераторного газа в ресивер	Подача генераторного газа в ДВС	Преобразование частоты вращения	Механическая энергия
Машины, работающие по циклу Ренкина	Поршневая паровая машина	Сжигание	Генерация перегретого пара под давлением		Подача пара в рабочие цилиндры и золотниковую систему		-	Механическая энергия
	Винтовая паровая машина	Сжигание	Генерация перегретого пара под давлением		Подача пара в винтовую пару		Преобразование частоты вращения	Механическая энергия
	Паровая турбина	Сжигание	Генерация перегретого пара под давлением		Подача пара на лопатки турбины		Преобразование частоты вращения	Механическая энергия
Машины, работающие по циклу Стирлинга	Двигатель Стирлинга	Сжигание	-		Нагрев рабочего тела в горячей части двигателя		-	Механическая энергия



**Рисунок 4.** Схема поперечного процесса газификации

Генераторы прямого процесса (рисунок 2) не могут широко применяться в лесопромышленном комплексе, так как доступное биотопливо – отходы лесозаготовки имеют высокую влажность и большое количество смол. Для использования такой схемы генерации потребуются сложные дополнительные устройства для тонкой очистки получаемого газа. Прямая газификация используется лишь в том случае, когда используется бессмольное топливо, как например кокс, древесный уголь, антрацит и другие.

Обращенный процесс газогенерации гораздо более пригоден для применения в условиях лесной промышленности. Он позволяет газифицировать топлива с высоким содержанием смол, а также осуществлять дозагрузку газогенератора топливом без остановки процесса, без необходимости применения сложных загрузочных приспособлений. Подача воздуха в различных конструкциях генераторов этого типа производится через щель, фурмы и/или центральную трубку. Отвод газа обеспечивается, как правило, через колосниковую решетку.

Газогенераторы с горизонтальным процессом используются преимущественно в целях максимальной экономии места. Единственное отличие их от генераторов прямого процесса заключается в том, что газ проходит через слой топлива по горизонтальному направлению. Для работы со смолистыми топливами они не предназначены, что также ограничивает их применение в лесной промышленности.

В независимости от типа процесса газификации полученный газ требуется очищать. Как правило, это происходит в 2 этапа [23]: удаление паров посторонних веществ и удаление твердых частиц.

Далее необходимо повысить давление газа в ресивере и только потом подать в ДВС.

В настоящее время в России серийно выпускаются газогенерирующие установки электрической мощностью 30-330 кВт. Стоимость подобного оборудования достаточно высока и широкое применение оно получило в военно-промышленном комплексе.

В целом, КПД получения механической энергии посредством газогенерации достаточно невысок, и не превышает 15% [24]. Одна из причин низкого КПД – это энергозатраты непосредственно на процесс пиролиза (до 10%) и потери с уходящими продуктами горения (до 28,5%) [25].

С точки зрения капитальных затрат, стоимость 1 кВт газогенерирующей установки уменьшается с ростом мощности, см. рисунок 5 [25].

Как видно из графика, стоимость 1 кВт падает при росте мощности. Так как мощности технологического оборудования, применяемого в лесной промышленности, не превышают 850 кВт, то экономическая целесообразность применения газогенераторных установок для индивидуального привода оборудования представляется сомнительной. Более рациональным будет применение подобных установок как единых электрогенерирующих мощностей лесных терминалов и верхних складов.

Машины, работающие по циклу Ренкина, можно разделить на 3 основных типа: поршневые паровые машины; винтовые паровые машины; паровые турбины.

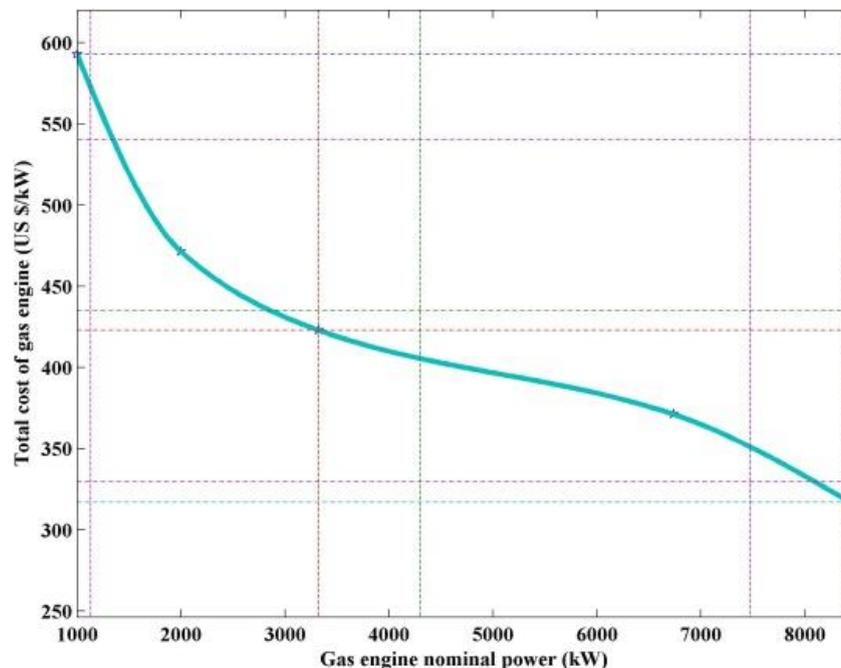


Рисунок 5. Изменение инвестиционной стоимости газогенераторных установок относительно их номинальной мощности

Поршневые паровые машины в настоящее время не имеют широкого распространения, хотя разработка современных паровых машин для паропоршневых электростанций велась в Колледже космического машиностроения и технологии Финансово-технологической академии (ККМТ ФТА) в рамках «Программы модернизации электроэнергетики России на период до 2020 года» [26, 27]. Результата в виде внедренных в производство и эксплуатацию изделий пока нет.

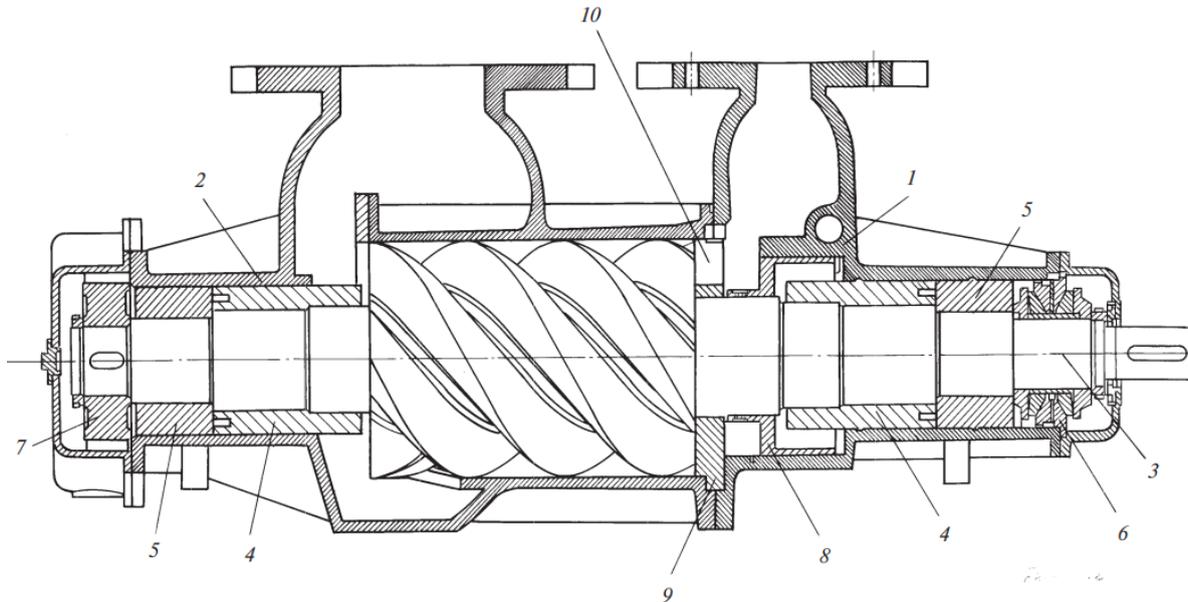
Основным недостатком паровых машин является необходимость парового котла – оборудования, работающего под высоким давлением. Согласно №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», оборудование, работающее при давлении свыше 0,07 МПа и температуре более 115 С° имеет IV класс опасности. Отсюда вытекают требования к зоне отчуждения и квалификации эксплуатирующего персонала. Современные паровые котлы имеют трубчатую конструкцию и являются взрывобезопасными.

Далее, сгенерированный пар под высоким давлением подается в цилиндры машины, приводы в движение кривошипно-ползунную группу. Несомненным преимуществом поршневой паровой машины является то, что крутящий момент не зависит от частоты вращения коленчатого вала. Это означает, что необходимости в трансмиссии и коробке переключения передач нет. Кинематические характеристики машины регулируются давлением и расходом пара.

КПД современных поршневых паровых машин достаточно низок и не превышает 25% [28].

Паровые турбины достаточно широко применяются для генерации электроэнергии. Из-за высоких частот вращения, непосредственное использование механической энергии затруднено. Обязательно требуется применение скоростной механической трансмиссии. В целом, КПД паротурбинных машин выше поршневых и достигает 46% [29]. Однако, если рассматривать мощности менее 1,0 МВт, то паропоршневые электроагрегаты имеют в 1,2–1,5 раза меньший удельный расход пара, по сравнению с паротурбинными. Расход топлива у мини-ТЭЦ на основе современных паропоршневых установок в 1,3–1,5 раза меньший, чем у паротурбинных мини-ТЭЦ [33].

В настоящее время промышленностью серийно выпускаются винтовые паровые машины (ПВМ) [30]. Наиболее эффективные исполнения при мощностях от 150 до 1500 кВт. В этом диапазоне мощностей КПД ПВМ превосходит как паропоршневые, так и паротурбинные установки [31]. Рабочие давления пара у ПВМ меньше чем у паротурбинных установок, а конструкция значительно проще конструкции паропоршневых машин (см. рисунок 6) [32].



**Рисунок 6.** Конструкция ПВМ-2000

1 — корпус высокого давления; 2 — корпус низкого давления; винтовые роторы; 3 — ведущий винтовой ротор; 4 — торцовые уплотнения; 5 — опорные подшипники; 6 — упорные подшипники; 7 — синхронизирующие шестерни; 8 — разгрузочные газодинамические поршни; 9 — центрирующее днище; 10 — впускное окно

Для применения в условиях лесопромышленного комплекса ПВМ подходят лучше всего исходя из диапазона мощностей наиболее высокого КПД. Однако необходимость использования парового котла затрудняет эксплуатацию паровых машин в условиях лесных терминалов и верхних складов вне зависимости от типа машины.

Двигатели, работающие по циклу Стирлинга, обладают наиболее простой схемой работы. Внутренняя энергия биотоплива преобразуется в тепловую энергию, которая передается рабочему телу в горячей части двигателя и сразу преобразуется в механическую энергию вращения коленчатого вала.

Основные преимущества двигателей Стирлинга – простота конструкции, отсутствие систем, работающих под высоким давлением, отсутствие необходимости дополнительных технологических этапов подготовки рабочего тела. Одним из основных достоинств является применение в качестве рабочего тела атмосферного воздуха. Хотя, более эффективно двигатели Стирлинга работают с использованием газов из малоатомных молекул (водород, гелий) или диссоциирующих газов [33], их использование затруднено проблемами в области герметизации рабочего тела из-за высокой проникающей способности малоатомных газовых сред и компенсации утечек. В целом, использование атмосферного воздуха является наиболее рациональным в виду повсеместной доступности данного ресурса.

При этом КПД современных установок на базе двигателя Стирлинга достигает 26% [34].

Проанализируем преимущества и недостатки описанных выше технологий при применении в условиях лесных терминалов и верхних складов. При анализе не учитывалась степень готовности технологии к промышленному применению. Результаты анализа представлены в таблице 10.

Таблица 10

**SWOT-анализ технологий преобразования внутренней энергии биотоплива в механическую энергию**

Технология преобразования	Уровень безопасности	Техническая сложность	Требуемая квалификация эксплуатирующего персонала	КПД, %
Газогенератор	Средний	Высокая	Средняя	15
Поршневая паровая машина	Низкий	Высокая	Высокая	25
Винтовая паровая машина	Низкий	Низкая	Высокая	44
Паровая турбина	Низкий	Средняя	Высокая	46
Двигатель Стирлинга	Высокий	Низкая	Низкая	26

В данном случае КПД не является решающим показателем, так как речь идет об утилизации отходов лесозаготовки и данное топливо «условно» бесплатное.

В целом, исходя из таблицы видно, что установки преобразования внутренней энергии биотоплива в механическую энергию на базе двигателей, работающих по циклу Стирлинга, является перспективным для внедрения в лесную промышленность для эксплуатации в условиях лесных терминалов и верхних складов.

**Обсуждение и заключение.**

1. Ресурсно-энергетический анализ различных технологических процессов лесозаготовок показывает достаточное количество биотоплива, которое может быть использовано для получения механической и электрической энергии в условиях верхних складов и лесных терминалов.

2. Применение двигателей с внешним подводом тепла для привода рубительных машин и электрогенераторов в условиях верхних складов и лесных терминалов является перспективным.

3. Наиболее подходящими технологическими процессами для внедрения двигателей с внешним подводом тепла являются технология заготовки хлыстов

(при трелевке деревьев) и заготовка сортиментов (при очистке от сучьев и распиловке на верхнем складе).

4. Минимальный объем заготовки в смену должен быть не менее 720 м<sup>3</sup> в смену, при минимальной доле отходов лесозаготовки и не менее 390 м<sup>3</sup> в смену, при максимальной доле отходов.

5. Внедрение глубокой переработки древесины в условиях верхних складов и лесных терминалов с применением двигателей с внешним подводом тепла в качестве источников механической и электрической энергии является целесообразным.

6. Внедрение двигателей с внешним подводом тепла для привода рубительных машин в условиях лесоперерабатывающих предприятий, использующих в технологическом процессе измельченную древесину, экономически является нецелесообразным.

7. Использование в качестве энергетической машины, для преобразования внутренней энергии биотоплива на основе отходов лесозаготовки в механическую энергию для использования в условиях лесных терминалов и верхних складов ДВС, работающий на генераторном газе, или паровой машины является нецелесообразным

8. В качестве энергетической машины, для преобразования внутренней энергии биотоплива, на основе отходов лесозаготовки, в механическую энергию для использования в условиях лесных терминалов и верхних складов является машина, работающая по циклу Стирлинга.

### Список литературы

1. Тамби А.А., Григорьев И.В., Давтян А.Б., Помигуев А.В., Калита О.Н., Григорьев В.И. Технологическая интеграция лесопромышленных предприятий // Деревообрабатывающая промышленность. 2021. № 1. С. 26-37.
2. Воронов Р.В., Марков О.Б., Григорьев И.В., Давтян А.Б. Математическая модель модульного принципа подбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 5 (371). С. 125-134.
3. Григорьев И.В. Направления совершенствования харвестерных головок // Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы Шестой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. Петрозаводск, 2020. С. 45-47.
4. Grigorieva O.I., Runova E.M., Alyabyev A., Hertz E., Voronova A.M., Ivanov V., Shadrina S., Grigorev I.V. Influence of different forest management techniques on the quality of wood // Journal of Renewable Materials. 2021. Т. 9. № 12. С. 2175-2188.

5. Григорьева О.И. Особенности естественного лесовосстановления в условиях криолитозоны // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6. № 4 (40). С. 25-29.
6. Григорьева О.И., Григорьев М.Ф., Григорьев И.В. Анализ естественного лесовозобновления в Алексеевском участковом лесничестве Республики Саха (Якутия) // FOREST ENGINEERING. Материалы научно-практической конференции с международным участием. 2018. С. 72-75.
7. Григорьев И.В. Опыт сотрудничества Якутской ГСХА с производителями и дилерами машин и оборудования лесного комплекса // Повышение эффективности лесного комплекса. материалы Шестой Все-российской национальной научно-практической конференции с международным участием. Петрозаводск, 2020. С. 47-48.
8. Григорьев И.В., Войнаш С.А. Повышение эффективности подготовки операторов лесных машин // Лесозэксплуатация и комплексное использование древесины. Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск, 2020. С. 62-66.
9. Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В. Средооадающие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации. Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Санкт-Петербургская гос. лесотехническая акад. им. С. М. Кирова". Санкт-Петербург, 2008. – 175 с.
10. Григорьев И.В., Рудов С.Е. Перспективы создания транспортных средств для лесозаготовительного производства в арктической зоне // Лесозэксплуатация и комплексное использование древесины. Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск, 2021. С. 70-74.
11. Григорьев И.В., Зорин М.В., Рудов М.Е. Современные способы укрепления временных лесовозных дорог и трелевочных волоков // Управление земельными ресурсами, землеустройство, кадастр, геодезия и картография. Проблемы и перспективы развития. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 255-летию Землеустройству Якутии и Году науки и технологий. Якутск, 2021. С. 278-285.
12. Григорьев И.В., Заровняев Т.Д. Способы повышения работоспособности трелевочных волоков на слабонесущих почвогрунтах // Эколого-экономические и технологические аспекты устойчивого развития Республики Беларусь и Российской Федерации. сборник статей III Международной научно-технической конференции: в 3 т.. Минск, 2021. С. 240-243.

13. Тихонов И.И., Григорьев И.В. Технологический процесс лесосечных работ при вывозке древесины полудеревьями. Материалы шестой всероссийской научно-технической конференции «Вузовская наука - региону». Вологда: ВоГТУ, 2008. - Т.1. - С.188-189.
14. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Чураков А.А. Эффективные технологии и системы машин для малообъемных заготовок древесины // Энергия: экономика, техника, экология. 2018. № 2. С. 61-66.
15. Григорьев И.В., Чураков А.А. Совершенствование конструкции активного полуприцепа форвардера на базе сельскохозяйственного колесного трактора // Транспортные и транспортно-технологические системы. Материалы Международной научно-технической конференции. Отв. ред. Н. С. Захаров. 2018. С. 84-88.
16. Григорьев И.В., Винокуров С.Л. Сравнение вариантов систем машин для малообъемных лесозаготовок // Вестник АГАТУ. 2021. № 3 (3). С. 51-62.
17. РТН 30.70 MOTOR. Лесной элемент. [В Интернете] [Цитировано: 27.10.2021] <https://leselement.ru/catalog/drobilki-drevesiny/drobilki-drevesiny-pezzolato/barabannye-drobilki-pezzolato/pth-30-70-motor/>.
18. Дитрих В.И., Андрияс А.А., Пережилин А.И., Корпачев В.П. Оценка объемов и возможные пути использования отходов лесозаготовок на примере Красноярского края // Хвойные бореальной зоны. – 2010. – Т. 27. – № 3-4. – С. 346-351.
19. Григорьева О.И., Григорьев И.В. Повышение эффективности кадрового обеспечения лесного комплекса Российской Федерации // Архитектура университетского образования: построение единого пространства знаний. сборник трудов IV Национальной научно-методической конференции с международным участием. 2020. С. 123-130.
20. Будник П.В. Характеристика энергетических ресурсов, образующихся при оцилиндровке бревен // Инновации в промышленности и в социальной сфере : материалы 3-ей традиционной республиканской научно-практической конференции, Петрозаводск, 11–12. ноября 2016 года / Петрозаводский государственный университет. – Петрозаводск: ООО "Verso", 2016. – С. 22-23.
21. Тарасов В.Г. Использование газогенераторных установок на автомобилях в годы Великой Отечественной войны // Научный вестник Вольского военного института материального обеспечения: военно-научный журнал. – 2009. – № 2(24). – С. 217-220.
22. Андреев Р.Е. Газогенераторные автомобили и рациональность их использования в современных условиях // Транспортные и транспортно-технологические системы : материалы международной научно-технической

- конференции, Тюмень, 20 апреля 2017 года. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2017. – С. 14-16.
23. Sepehr Sanaye, Navid Khakраay, Ata Chitsaz, Thermo-economic and environmental multi-objective optimization of a novel arranged biomass-fueled gas engine and backpressure steam turbine combined system for pulp and paper mills., Sustainable Energy Technologies and Assessments, Volume 40, 2020, 100778, ISSN 2213-1388, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100778>.
  24. В-КИП. Газотурбогенератор ГТГ-100К. [В Интернете] [Цитировано: 28.10.2021] <https://v-kip.com/gazoturbogenerator-gtg-100k>.
  25. Узиков Г.Н., Раббимов Р.Т., Давланов Х.А. Моделирование и расчет теплового баланса пиролизной установки для получения альтернативного топлива из биомассы // Молодой ученый. — 2014. — № 18 (77). — С. 306-312.
  26. Catalogue of CHP technologies, US Environmental Protection Agency, February, 2015.
  27. Трохин И.С. Паровые поршневые машины нового поколения // Академия энергетики. – 2013. – № 4(54). – С. 50-52.
  28. Жигалов В.А. Паровая машина вновь востребована // Ползуновский альманах. – 2004. – № 2. – С. 204-206.
  29. Разуваев А.В. Анализ эффективности паропоршневой энергетической установки // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2016. – Т. 16. – № 9. – С. 56-59.
  30. Трохин И.С. Эффективность паровых поршневых мини-ТЭЦ по сравнению с паротурбинными // Вестник ВИЭСХ. – 2012. – № 4(9). – С. 26-30.
  31. ООО "Промышленные компоненты КАМАЗ". [В Интернете] [Цитировано: 28.10.2021] <http://wintoo.ru/docs/ru/presentation.pdf>.
  32. Березин С.Р., Носков А.Н., Щеглов Г.А. Определение показателей рабочего процесса паровой винтовой машины // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2016. – № 1(670). – С. 50-56.
  33. Кукис В.С., Куколев М.И., Костин А.И. Перспективы улучшения характеристик двигателей Стирлинга // Двигателестроение. – 2012. – № 3(249). – С. 3-6.
  34. Соколов А.П., Герасимов Ю.Ю. Функциональная логистика лесозаготовительного предприятия. Петрозаводск : Издательство ПетрГУ, 2013. – 84 с.