



## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ В СИСТЕМАХ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ТЕРРИТОРИИ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

М. С. Харитонов, канд. техн. наук, доц.,  
e-mail: maksim.haritonov@klgtu.ru  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный  
технический университет»

В. И. Шульган, студент гр. 16-ЭЭ,  
e-mail: st.kalcifer@mail.ru  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный  
технический университет»

В статье дан анализ и рассмотрены основные энергетические показатели методов производства электрической энергии из древесных отходов. Представлены результаты оценки объемов и распределения производства древесных отходов на территории Калининградской области. Изложены результаты оценки энергетического потенциала древесных отходов по основным районам лесозаготовок. Выполнен расчет установленной мощности генерирующего оборудования с учетом доступных топливных ресурсов и энергетических характеристик термохимических процессов получения энергии из древесины в контексте использования в системах распределенной генерации в увязке с центрами электрических нагрузок. Дана оценка количественных показателей выработки электрической и тепловой энергии для перспективных с точки зрения развития биоэнергетики районов Калининградской области.

***Ключевые слова:** биоэнергетика, распределенная энергетика, твердые древесные отходы, электроэнергетика, тенденции развития, технология переработки, потенциал биомассы*

### ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития распределенной генерации на основе возобновляемых источников энергии основывается на использовании широкого спектра местных энергетических ресурсов. В районах с низким ветропотенциалом и недостаточной инсоляцией активно используется потенциал биоэнергетики, в частности, твердой биомассы древесного происхождения. Так, в электроэнергетическом секторе Евросоюза общий вклад биоэнергетики в производство электроэнергии в странах ЕС составляет 5,6 % [1].

Мировой опыт показывает, что отходы, образующиеся в процессе вырубki и обработки древесины, можно использовать для производства энергии непосредственно в местах их выработки. Для этого на предприятиях лесной промышленности необходимо сооружать установки утилизации древесных отходов.

На отечественном рынке представлено оборудование, позволяющее осуществить любой из трех широко применяемых термохимических процессов получения энергии из древесины: прямое сжигание, быстрый пиролиз или газификацию [2]. Выбор технологии осуществляется в зависимости от поставленной цели.

Сжигание древесных отходов, главным образом, применяется для получения тепловой энергии при малых капиталовложениях за счет невысокой сложности оборудования [3].

Быстрый пиролиз по капиталовложениям превосходит сжигание, но является более эффективным и экологичным, позволяет получить высокоэнергоемкие угольные брикеты. На

данный момент в России производятся комплектные пиролизные установки малой мощности, однако имеется перспектива разработки более производительных систем [4, 5].

Газификация - передовая технология, позволяющая полностью обеспечить предприятия электроэнергией. Однако установки газификации дорогостоящие и предъявляют высокие требования к качеству сырья, что в совокупности с ограниченным предложением установок российского производства является преградой на пути их внедрения в системы распределенной генерации [6-8].

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования – энергетический потенциал биомассы древесного происхождения на территории Калининградской области. Объем лесозаготовки в регионе в 2018 г. составил 186 тыс. м<sup>3</sup> [9]. В действующем лесном плане [10] на период 2019-2028 гг. заложены показатели лесозаготовки в объеме 500-540 тыс. м<sup>3</sup> ежегодно при полном освоении плана. Анализ плана за период 2009-2018 гг. показал, что плановые объемы были выполнены на 37%. Такую же величину выполнения можно ожидать и в 2019-2028 гг. По данным лесного плана была составлена карта лесничеств с обозначением планируемых и ожидаемых объемов лесозаготовки в них на 2025 г. (рис. 1).

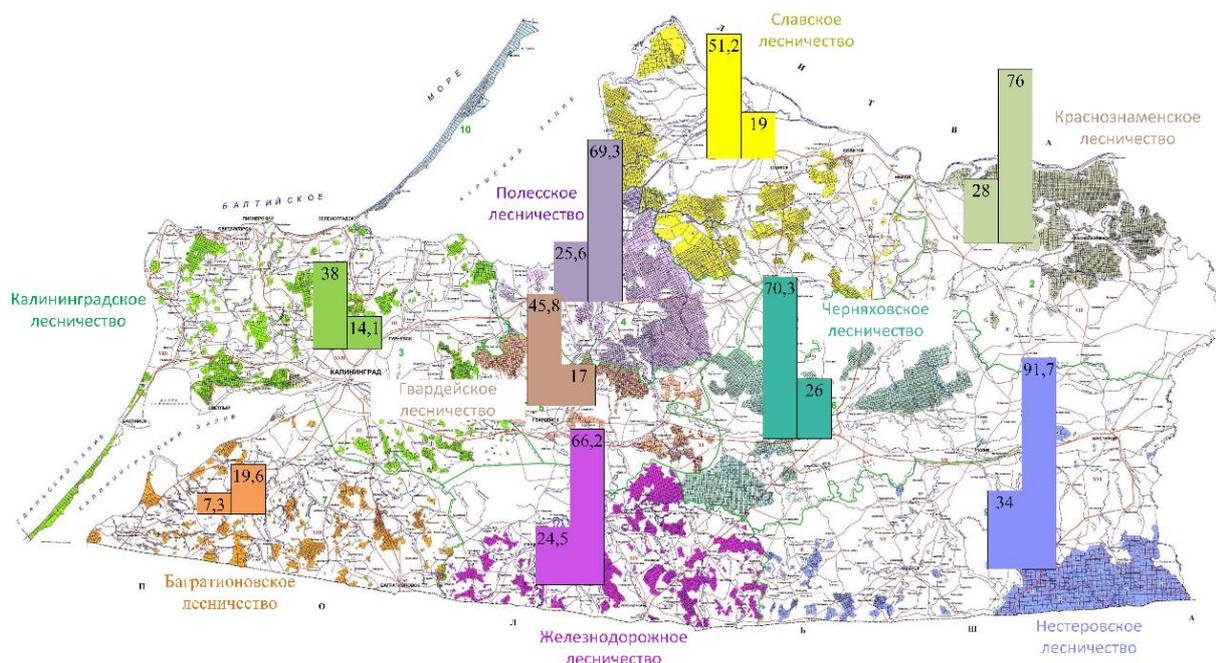


Рисунок 1 – Карта лесничеств Калининградской области с указанием величины запланированной и ожидаемой лесодобычи, тыс. м<sup>3</sup>

На карте и в лесном плане учтены только объемы вырубki лесов, по которым определяется ориентировочное количество древесных отходов. Фактически после вырубki древесины проходит еще несколько стадий обработки, в результате которых образуется дополнительное количество отходов.

## ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является оценка возможности использования древесных отходов для производства электроэнергии в системах распределенной генерации на территории Калининградской области. Для достижения поставленной цели требуется оценка объемов производства древесных отходов как попутного продукта лесной промышленности. Анализ источников сырья необходимо производить с позиции использования в системах распределенной генерации в увязке с центрами электрических нагрузок, электросетевой и транспортной инфраструктурой. Вторая задача заключается в расчете установленной мощности генери-

рующего оборудования с учетом доступных топливных ресурсов и энергетических характеристик термохимических процессов получения энергии из древесины.

Заключительный этап исследования – определение количественных показателей выработки электрической и тепловой (при использовании когенерации) энергии для перспективных с точки зрения развития биоэнергетики районов Калининградской области.

Поставленные задачи являются актуальными в соответствии с Энергетической стратегией России [11] в контексте развития распределенной генерации и создания условий для расширения производства электрической энергии на основе возобновляемых источников.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных задач применены общелогические научные методы анализа, синтеза и обобщения, а также специальные теоретические методы для расчета энергетических характеристик технологических процессов преобразования энергии древесной биомассы в электрическую с использованием газопоршневых установок (ГПУ).

Интенсивность производства древесных отходов зависит от особенностей технологического процесса производства и в расчете на один час определяется по выражению (1):

$$V_{\text{отх}} = V_{\text{л}} \cdot \frac{K_{\text{отх}}}{n}, \quad (1)$$

где  $V_{\text{отх}}$  – объем образования древесных отходов, м<sup>3</sup>/с;  
 $V_{\text{л}}$  – объем лесозаготовки, м<sup>3</sup>/год;  
 $K_{\text{отх}}$  – доля отходов при деревообработке, %;  
 $n$  – число секунд в году, с.

Тепловая и электрическая мощности, получаемые при использовании технологии прямого сжигания древесных отходов, могут быть вычислены по (2) и (3) соответственно:

$$N_{\text{тепл}} = V_{\text{отх}} \cdot \rho \cdot J \cdot \eta_{\text{тепл}}, \quad (2)$$

$$P_{\text{электр}} = V_{\text{отх}} \cdot \rho \cdot J \cdot \eta_{\text{электр}}, \quad (3)$$

где  $N_{\text{тепл}}$  – тепловая мощность, МВт;  
 $P_{\text{электр}}$  – электрическая мощность, МВт;  
 $\rho$  – плотность древесных отходов, кг/м<sup>3</sup>;  
 $J$  – удельная теплота сгорания влажных древесных отходов МДж/кг;  
 $\eta_{\text{тепл}}$  – тепловой КПД цикла, %;  
 $\eta_{\text{электр}}$  – электрический КПД цикла, %.

В случае технологии быстрого пиролиза при комбинированном использовании продуктов пиролиза тепловая и электрическая энергия определяется по (4) и (5):

$$N_{\text{тепл}} = V_{\text{отх}} \cdot \rho \cdot [(B_{\text{ж}} \cdot J_{\text{ж}}) + (B_{\text{тв}} \cdot J_{\text{тв}})] \cdot \eta_{\text{тепл}}, \quad (4)$$

$$P_{\text{электр}} = V_{\text{отх}} \cdot \rho \cdot [(B_{\text{ж}} \cdot J_{\text{ж}}) + (B_{\text{тв}} \cdot J_{\text{тв}})] \cdot \eta_{\text{электр}}, \quad (5)$$

где  $B_{\text{ж}}$  – выход жидких продуктов пиролиза, % от массы отходов;  
 $J_{\text{ж}}$  – удельная теплота сгорания жидких продуктов пиролиза, МДж/кг;  
 $B_{\text{тв}}$  – выход твердых продуктов пиролиза, % от массы отходов;  
 $J_{\text{тв}}$  – удельная теплота сгорания твердых продуктов пиролиза, МДж/кг.

Технология газификации требует предварительной сушки древесных отходов, что учитывается в выражениях для определения электрической и тепловой энергии (6) и (7):

$$P_{\text{электр}} = \frac{V_{\text{отх}} \cdot \rho \cdot G}{R} \cdot (1 - C)(1 - \eta_{\text{с.н.}})(1 - \eta_{\text{г}}), \quad (6)$$

$$N_{\text{тепл}} = P_{\text{электр}} \cdot K_{\text{с}} \cdot E, \quad (7)$$

где  $G$  – выход газа при газификации, н.м<sup>3</sup>/кг;  
 $R$  – удельный расход топлива ГПУ, н.м<sup>3</sup>/МВт·с;  
 $C$  – коэффициент, учитывающий потерю массы отходами при сушке, %;  
 $\eta_{\text{с.н.}}$  – потери на собственные нужды ГПУ, % от мощности станции;  
 $\eta_{\text{г}}$  – потери на собственные нужды газификатора, % от мощности станции;  
 $K_{\text{с}}$  – коэффициент, учитывающий потери тепловой мощности на сушку, %;  
 $E$  – коэффициент связи тепловой и электрической мощности ГПУ.

Результаты расчетов по выражениям (1–7) в значительной степени зависят от выбора соответствующих коэффициентов по тепловой и электрической части. В ходе анализа источников [3, 5, 8, 12-15] были определены коэффициенты, соответствующие исследуемым технологическим схемам и характеристикам древесных отходов, производимых на территории Калининградской области (табл. 1).

Таблица 1 – Значения коэффициентов, принятые для исследования энергетического потенциала

Параметр	$K_{\text{отх}}$	$\eta_{\text{тепл}}$	$\eta_{\text{электр}}$	$B_{\text{ж}}$	$B_{\text{тв}}$	$C$	$\eta_{\text{с.н.}}$	$\eta_{\text{г}}$	$K_{\text{с}}$
Значение, %	30	50	20	55	25	30	5	1,5	80

Продолжение таблицы 1

Параметр	$\rho$	$G$	$R$	$J$	$J_{\text{ж}}$	$J_{\text{тв}}$	$n$	$E$
Значение	250	0,833	0,061	10	15	33	$31,536 \cdot 10^6$	1,125
Единицы измерения	кг/м <sup>3</sup>	н.м <sup>3</sup> /кг	н.м <sup>3</sup> /МВт·с	МДж/кг			с	-

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поскольку древесные отходы являются попутным продуктом лесной промышленности, то объемы их производства зависят от объемов и обрабатываемого материала и эффективности процессов обработки. Проведенный анализ показывает, что в зависимости от стадии и особенностей производственного цикла выход древесных отходов, пригодных для энергетического использования, может существенно различаться (табл. 2) [16].

Таблица 2 – Процентная доля отходов по видам деревообрабатывающих производств

Вид производства	Доля выхода, %		
	продукция	отходы	распыл
Лесозаготовки и лесное хозяйство	63-80	20-37	-
Лесопиление и механическая обработка древесины	45-55	38-48	7
Плитное производство	85-90	5-10	5
Фанерное производство	40-50	42-52	8
Комбинированное производство	65-70	22-27	8
Лесохимическое производство	62-68	35-38	-

Данные табл. 2 соответствуют отдельным стадиям переработки древесины, поэтому доли выхода рассчитываются по объемам древесины на входе конкретного производства, а не по объемам первичного ресурса. Однако с позиции оценки энергопотенциала древесных отходов на основе анализа объема лесозаготовок необходимо оперировать данными по фор-

мированию отходов в долях от первичного ресурса. В результате обработки данных табл. 2 были получены энергетические диаграммы процесса переработки древесины от стадии лесозаготовки до конечной продукции (рис. 2). Диаграммы построены для случаев минимального и максимального выхода древесных отходов на каждом этапе производства.

Следует отметить, что с учетом строгой последовательности этапов обработки древесины определяющее влияние на образование отходов оказывает стадия лесозаготовки. Так, для варианта максимальных потерь ввиду существенно меньшего выхода продукции после лесозаготовки доля отходов на последующих стадиях относительно первичного ресурса оказывается меньше, чем для варианта минимальных потерь.

Таким образом, суммарный выход древесных отходов на всех стадиях производства, учитывая распыл при обработке, может составлять более 80% от исходного объема заготавливаемой древесины (рис. 2), что подтверждает значительные объемы и перспективность применения данного вида отходов для производства электроэнергии вместо открытого сжигания или складирования.

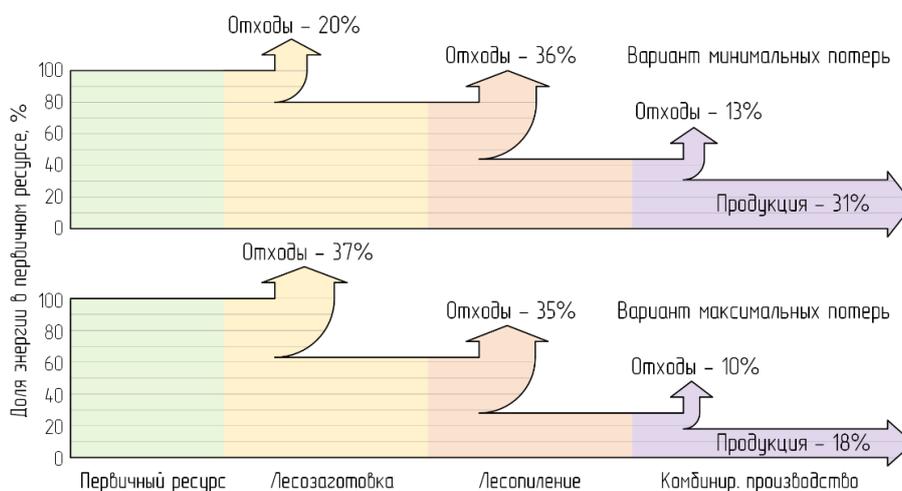


Рисунок 2 – Доля отходов в процессе производства продукции лесной промышленностью

На основе анализа данных об объемах лесозаготовки по лесничествам Калининградской области [9] с использованием выражений (1-7) были рассчитаны ориентировочные мощности электростанций при условии использования местных ресурсов (древесных отходов) с учетом особенностей технологического процесса преобразования энергии биомассы древесного происхождения и ее энергетических характеристик (табл. 3) [3, 8, 16, 17].

Таблица 3 – Ориентировочная мощность возможных к установке ТЭЦ по лесничествам

Наименование лесничества	Количество отходов в час в м <sup>3</sup>	Мощность электрическая/тепловая, МВт		
		Сжигание	Быстрый пиролиз	Газификация
Нестеровское	1,16	0,16/0,40	0,27/0,67	0,72/0,65
Краснознаменское	0,96	0,13/0,33	0,22/0,55	0,59/0,54
Черняховское	0,89	0,12/0,31	0,20/0,51	0,55/0,50
Полесское	0,88	0,12/0,30	0,20/0,50	0,54/0,49
Железнодорожное	0,84	0,12/0,29	0,19/0,48	0,52/0,47
Славское	0,65	0,09/0,23	0,15/0,37	0,40/0,36
Гвардейское	0,58	0,08/0,20	0,13/0,33	0,36/0,32
Калининградское	0,48	0,07/0,17	0,11/0,28	0,30/0,27
Багратионовское	0,25	0,03/0,09	0,06/0,14	0,16/0,14

Анализируя данные табл. 3, можно сделать вывод о перспективности использования древесных отходов для производства электрической энергии в случае применения современных технологий. Мини-ТЭЦ на древесных отходах могут сооружаться непосредственно на

деревообрабатывающих предприятиях, обеспечивая их тепло- и электроснабжение по принципу распределенной генерации. При должной организации поставки древесных отходов подобные станции могут быть размещены вблизи центров электрических и тепловых нагрузок непосредственно в населенных пунктах региона.

По данным [9, 17] с учетом планов муниципальных образований Калининградской области была составлена обобщенная карта с указанием наиболее перспективных населенных пунктов для размещения ТЭЦ на древесных отходах (рис. 3).

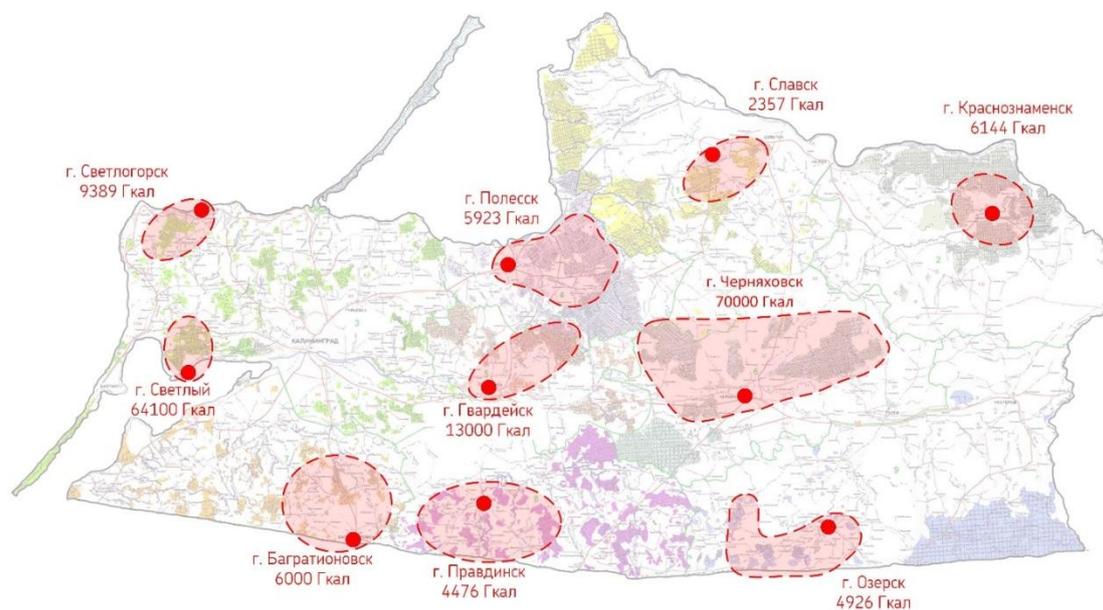


Рисунок 3 – Возможные районы сооружения мини-ТЭЦ на карте Калининградской области

На карте указан годовой объем отпуска тепловой энергии [1] в рассматриваемых городах и зоны транспортировки древесных отходов. Сооружение мини-ТЭЦ в указанных районах позволит разгрузить местные котельные, утилизировать древесные отходы и выработать электроэнергию для местного потребителя. Также ТЭЦ на древесных отходах могут внести вклад в развитие территорий, где отсутствует возможность отопления посредством природного газа, таких как пос. Илюшино, Садовое, Фурмановка и Ясная поляна в районе Нестеровского лесничества [18]. Данный перечень районов не является исчерпывающим, поскольку широкая номенклатура мощностей установок позволяет подобрать оптимальное решение для любого количества отходов.

В табл. 4 на примере Черняховского, Гвардейского и Краснознаменского городских округов дана оценка возможных объемов производства тепловой и электрической энергии при использовании древесных отходов в качестве топлива для ТЭЦ с различными технологическими схемами (сжигание/пиролиз/газификация).

Таблица 4 – Доля древесных отходов в выработке электрической и тепловой энергии

Городской округ	Черняховский	Гвардейский	Краснознаменский
1	2	3	4
Площадь, км <sup>2</sup>	1285,75	784	1280,5
Население, чел.	48819	29126	12000
Ежегодный спрос на тепловую энергию, тыс. Гкал	80,6	29	7
Производство тепловой энергии из древесных отходов, тыс. Гкал	2,3 / 3,8 / 3,8	1,5 / 2,5 / 2,4	2,5 / 4,1 / 4,0

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4
Доля древесных отходов в обеспече-	2,9 / 4,7 / 4,7	5,2 / 8,6 / 8,33	35,5 / 59,2 / 58,1

нии производства тепловой энергии, %			
Ежегодный спрос на электрическую энергию, млн. кВт*ч	166,44	99,86	27,16
Производство электрической энергии из древесных отходов, тыс. кВт*ч	1,1 / 1,8 / 4,8	0,7 / 1,1 / 3,2	1,1 / 1,9 / 5,2
Доля древесных отходов в обеспечении производства электрической энергии, %	0,6 / 1,1 / 2,9	0,7 / 1,1 / 3,2	4,2 / 7,1 / 19,0

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что в Калининградской области имеется доступный для освоения энергетический потенциал древесных отходов. Однако его реализация посредством электростанций средней мощности затруднена ввиду территориальной разобщенности районов производства древесных отходов. Применение установок малой мощности в режиме когенерации является более перспективным как для предприятий лесной промышленности, так и населенных пунктов, расположенных вблизи районов лесозаготовок.

Объемы производства электрической и тепловой энергии в значительной степени зависят от применяемого термохимического процесса получения энергии из древесины: прямое сжигание, быстрый пиролиз или газификация. Выполненные расчеты показывают, что при наиболее эффективном методе газификации не обеспечивается полное электро- и тепло-снабжение районных центров при расчетных показателях производства древесных отходов. Однако установки малой мощности могут применяться для замены менее эффективных котельных, обеспечивая расширение производства электрической энергии на основе возобновляемых источников.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. European bioenergy day: What is the EU-28 Bioenergy Consumption? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.europeanbioenergyday.eu/bioenergy-facts/bioenergy-in-europe/what-is-the-eu28-bioenergy-consumption/> (дата обращения: 20.11.2019).
2. Попель, О. С. Энергия биомассы / О. С. Попель // Энергия: экономика, техника, экология. – 2016. – № 11. – С. 2-11.
3. Головков, С. И. Энергетическое использование древесных отходов / С. И. Головков, И. Ф. Коперин, В. И. Найденов. – Москва: Лесная промышленность, 1987. – С. 20-21.
4. Энергетическое использование жидких продуктов быстрого пиролиза древесины / С. А. Забелкин [и др.] // Лесной вестник. – 2010. - № 4. – С. 79-83.
5. Технология быстрого пиролиза [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://energolesprom.ru/tehnologiya/> (дата обращения: 18.03.2020).
6. Газификация древесных отходов / Р. Г. Сафин [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. - № 8. – С. – 108-111.
7. Газификация древесины и сельскохозяйственных отходов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://c-a-m.narod.ru/techno/wood\\_gasification\\_theory.html](http://c-a-m.narod.ru/techno/wood_gasification_theory.html) (дата обращения: 18.03.2020).
8. Лямин, В. А. Газификация древесины / В. А. Лямин. – Москва: Лесная промышленность, 1967. – С. 19-36.
9. Схема и программа перспективного развития Калининградской области на 2020-2024 годы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://infrastruktura.gov39.ru/upload/%D0%A1%D0%98%D0%9F%D0%A0%20%D0%9A%D0%9E%202020-2024.pdf.pdf> (дата обращения: 18.03.2020).
10. Лесной план Калининградской области [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://minprirody.gov39.ru/docs/1758/> (дата обращения: 20.03.2020).
11. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/902187046> (дата обращения: 25.03.2020).

12. Свойства первичных видов древесного топлива и топливной древесины [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.termowood.ru/hdo.html> (дата обращения: 25.04.2020).

13. Таблица плотности щепы и опилок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tehnopost.kiev.ua/drova/17-tablitsa-plotnosti-schepyi.html> (дата обращения: 25.04.2020).

14. Переработка древесной щепы, опилок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://energolesprom.ru/stati/pererabotka-drevesnoy-schepu-opilok/> (дата обращения: 25.04.2020).

15. Генераторная станция с двигателем GazEcos на поршневой базе Трансмашхолдинг [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.gazecos.ru/kz2\\_25.html](https://www.gazecos.ru/kz2_25.html) (дата обращения: 25.04.2020).

16. Мохирев, А. П. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса, как фактор устойчивого природопользования / А. П. Мохирев, Ю. А. Безруких, С. О. Медведев // Инженерный вестник Дона. –2015. – № 2-2 (36). – С. 81.

17. Муниципальные образования Калининградской области [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gov39.ru/vlast/muni/> (дата обращения: 18.03.2020).

18. Генеральный план муниципального образования «Илюшинское сельское поселение» Нестеровского района Калининградской области [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://gov39.ru/vlast/agency/aggradostroenie/zip/territory/ilyushinskoe-sp/01\\_ilush\\_sp\\_potp.pdf](https://gov39.ru/vlast/agency/aggradostroenie/zip/territory/ilyushinskoe-sp/01_ilush_sp_potp.pdf) (дата обращения: 18.03.2020)

## PROSPECTS OF WOOD WASTE BASED DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS IN THE KALININGRAD REGION

M. S. Kharitonov, Dr.Sc.(eng.), associate professor  
e-mail: [maksim.haritonov@klgtu.ru](mailto:maksim.haritonov@klgtu.ru)  
Kaliningrad State Technical University

V. I. Shulgan, student  
e-mail: [st.kalcifer@mail.ru](mailto:st.kalcifer@mail.ru)  
Kaliningrad State Technical University

The paper considers fundamental energy indicators of the methods for the electric energy production from the wood waste. The results of the assessment of are presented. The authors provide the assessment of volumes and distribution of wood waste production in the Kaliningrad region. The installed capacity of generating equipment was calculated taking into account available fuel resources and energy characteristics of thermochemical processes of energy production from wood in the context of distributed generation systems. The quantitative indicators of the electric and thermal energy production are estimated for areas of the Kaliningrad Region that have potential for the bioenergy development.

**Key words:** *bioenergy, distributed generation, solid wood waste, electric power industry, development trends, processing technology, biomass potential*