



КОНЦЕПЦИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ В ЦБП

Луканин П.В., Казаков В.Г., Зверев Л.О.

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, г. Санкт-Петербург, Россия
mail@gturp.spb.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Разработка и реализация комплекса теоретических и практических рекомендаций по созданию научно обоснованных тепловых схем технологических процессов производства целлюлозы и бумаги, интенсификации теплообменных процессов при экономном расходовании энергоресурсов. *МЕТОДЫ.* Предложен метод термодинамического анализа на основе приращения эксергий в процессе взаимодействия тепловых потоков, позволяющий оценить энергетическую эффективность как отдельных аппаратов ЦБП, так и всего технологического потока; математическая зависимость между эксергетическим КПД технологических элементов и эксергетическим КПД сложной тепловой схемы; принципиальная схема теплорекуперационной установки сушильной части БДМ с замкнутым циклом воздуха, подаваемого на сушку. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Проведены термодинамические исследования по оценке энергетической эффективности оборудования ЦБП, получена зависимость коэффициента преобразования ТНУ от термодинамических свойств рабочих тел. Подробно рассмотрен процесс получения сульфатной целлюлозы. Показана низкая энергетическая эффективность существующей схемы, эксергетический КПД - 48%. Основная доля затраченной эксергии (71% от подведенной в схему) относится к процессу в СРК). Предложена схема гидрохимической переработки древесной технологической щепы, в которой отсутствуют СРК, вращающаяся печь обжига известняка. Снижаются риски от загрязнений воздушного и водного бассейнов. Приведены основные направления повышения энергоэффективности получения лигносульфонатов при сульфитном производстве целлюлозы. *ОБСУЖДЕНИЕ.* Дальнейшее развитие энергоэффективных технологий производства целлюлозы можно прогнозировать на основе применения флюидных технологий – сверхкритического водяного окисления (СКВО). Положительные результаты исследований в области химии воды при сверхкритических параметрах дают основание прогнозировать успех в направлении разработки энергоэффективной технологии получения целлюлозы при воздействии на технологическую щепу водой при субкритических и сверхкритических параметрах. Процесс производства бумаги и картона является сложным физико-химическим и термовлажностным процессом. Термодинамическими исследованиями установлен низкий эксергетический КПД сушильной части БДМ, который определяется неэффективной работой теплорекуперационной установки. Этим и определяется большой подвод пара низкого давления с ТЭЦ. Показаны основные направления по совершенствованию тепловой схемы сушильной части БДМ. Рассмотрены вопросы когенерации в целлюлозно-бумажной промышленности. Значительное внимание уделено экологической безопасности энергоэффективных технологий. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* В настоящей работе приведены основные направления по повышению энергетической эффективности основных технологических процессов получения продукции целлюлозно-бумажных предприятий. На основании анализа эксергетического КПД отдельных элементов оборудования и в целом технологических схем выявлены «узкие» места и предложены мероприятия по их совершенствованию.

Ключевые слова: энергосбережение; энергетическая эффективность; эксергетический КПД; целлюлоза; технологические процессы; экологические процессы.

Для цитирования: Луканин П.В., Казаков В.Г., Зверев Л.О. Концепция модернизации энерготехнологических комплексов в ЦБП // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 4. С. 178-191. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-178-191.

CONCEPT OF PPI ENERGY TECHNOLOGY COMPLEX UPGRADING

PV. Lukanin, VG. Kazakov, LO. Zverev

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Saint Petersburg, Russia

mail@gturp.spb.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Development and implementation of a set of theoretical and practical recommendations for creating scientifically founded heat flow diagrams for pulp and paper processes, intensifying heat exchanging processes under the economical use of energy resources. *METHODS.* The method of thermodynamic analysis on the basis of exergy increments in the process of interaction of heat flows is proposed, it allows evaluating the energy efficiency of both individual PPI units and the entire process flow; mathematical relationship between exergy efficiency of process elements and that of a complex heat flow diagram; schematic diagram of a heat recuperator of PBM drying section with a closed loop for the air delivered to drying. *RESULTS.* Thermodynamic analysis was made to evaluate energy efficiency of PPI equipment; the relationship between conversion factor of thermal pumping plant and thermodynamic properties of actuating media was obtained. Sulfate pulp production was considered in detail. The low energy efficiency of the existing process flow diagram is shown, with its exergy efficiency being equal to 48%. A main share of the consumed exergy (71% of the incoming one) relates to the recovery boiler processes. The process flow diagram consisting of hydrochemical pulpchips processing is suggested. The recovery boiler and rotary-type lime kiln are removed from that flow diagram. Risks of air and water basins pollution fall. The main ways for increasing energy efficiency of lignosulfonates production at sulfite pulp plants are mentioned. *DISCUSSION.* Further development of energy efficient pulp technologies can be forecasted on the basis of application of fluid technologies such as supercritical water oxidation (SCWO). The positive results of research in water chemistry under supercritical parameters give promise to predict success in developing the energy efficient pulp technology by exposing pulpchips to water at the subcritical and supercritical parameters. Paper and board production relates to the complex physical–chemical and heat-wet processes. The thermodynamic studies allowed determining low exergy efficiency of a drying section of paper and board machine that is because of inefficient operation of the heat recuperation unit. This circumstance is responsible for the bulk supply of low pressure steam from a heat and power plant. The main ways for improving the heat flow diagram of PBM drying section are shown. Cogeneration issues in the pulp and paper industry are considered. The essential attention is given to environmental safety of energy efficient technologies. *CONCLUSION.* The paper presents main ways for increasing energy efficiency of basic production processes at pulp and paper enterprises. Based on the analysis of exergy efficiency of individual equipment elements and the entire process flow diagrams bottlenecks were revealed and measures for their removal were suggested.

Key words: energy saving; energy efficiency; exergy efficiency; pulp; processes; environmental processes.

For citation: PV. Lukanin, VG. Kazakov, LO. Zverev. Concept of ppi energy technology complex upgrading. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(4):178-191. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-178-191.

Введение и литературный обзор

Главными целями основных положений «Энергетической стратегии России на период до 2030 г.», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации № 1715-Р, является определение путей и условий наиболее эффективного использования энергетических ресурсов, формирование роли энергии как основного фактора, определяющего повышение качества жизни населения.

В Указе Президента РФ № 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики» поставлен вопрос о повышении энергоэффективности и сформулирована целевая задача – снизить энергоёмкость валового внутреннего продукта (ВВП) на 40 % по сравнению с 2007 годом.

ЦБП является одной из самых энергоёмких отраслей промышленности. В структуре себестоимости производства целлюлозы 50 % затрат составляет исходное сырьё и примерно 40 % – энергозатраты. В себестоимости переработки технологической щепы для получения

целлюлозы статья энергозатрат составляет более 80 %, при этом стоимость древесины и энергетических затрат непрерывно растет. Заводы по выпуску целлюлозы уже сейчас работают на уровне рентабельности. На процессы снижения стоимости древесины и энергии влиять невозможно – они регулируются рынком. Работы, направленные на существенное снижение удельного расхода древесины в процессе производства, отсутствуют.

В таком же состоянии находится производство бумаги и картона. Это производство является крупным потребителем теплоты пара низкого давления. На производство отдельных видов бумаги расходуется до 20 ГДж/т.

Следует отметить не только большой удельный вес энергозатрат в себестоимости целлюлозы и бумаги, но и непрерывный рост цен на энергетическую составляющую.

В сложившихся условиях основным путем заметного повышения рентабельности процесса получения целлюлозы и бумаги является снижение энергетических затрат в технологических потоках целлюлозно-бумажного производства, что становится актуальной задачей на современном этапе.

Рациональное потребление топливно-энергетических ресурсов, отвечающее требованию времени должно рассматриваться с позиций энергосбережения, соответствовать высокой энергоэффективности, экологическому обеспечению технологических процессов при минимизации отвода в окружающую среду вредных газов.

Целлюлозно-бумажная промышленность (ЦБП) относится к энергоемким отраслям промышленности. Основной продукцией предприятий ЦБП являются: сульфатная и сульфитная целлюлоза, бумага и картон. Производство сульфатной целлюлозы в нашей стране является определяющим и составляет около 90%, по сульфитному способу получают до 10% целлюлозы [1]. В себестоимости производство целлюлозы 50% затрат составляет исходное сырье и примерно 40% - энергозатраты. В целом технология производства сульфатной целлюлозы отвечает современному уровню лучших заводов зарубежных фирм [2]. Она построена на принципах ресурсо- и энергосбережения.

Получение энергии из продуктов переработки черного щелока практически полностью обеспечивает собственные нужды производства [3]. Избыточная, против необходимой для производства целлюлозы энергия отводится из процесса для обеспечения тепло и электроснабжения жилых массивов.

Следует отметить, что энергозатратными, капиталоемкими и экологически опасными являются аппаратно-технологические схемы регенерации химикатов в содорегенерационных котлах (СРК), печах декарбонизации, выпарных станциях и варочных котлах [1].

За последние 50 лет в стране не построено ни одного крупного комбината. Поэтому изыскание способов снижения потребления энергоресурсов является приоритетной задачей модернизации целлюлозного производства. Научно обоснованный подход к разработке технологий теплоты в процессах производства целлюлозы основывается на термодинамическом (эксергетическом) исследовании технологических процессов. Согласно теории эксергетического анализа [4], эксергетические потери представляют величину пропорциональную расходу топлива для функционирования рассматриваемого технологического процесса, а эксергетический КПД – относительная характеристика термодинамического совершенства технологического процесса.

Ю.О. Лахтиков отмечает, что, в то время как практически все российские ЦБК являются энергопотребляющими, в мире уже есть много комбинатов, не только не использующих покупные энергоносители, но и производящих значительное количество энергии на продажу. Так, в августе 2017 года компания *Metsa* завершила крупнейший инвестиционный проект в ЛПК Финляндии, стоимостью 1,2 Млрд. Евро, в г. Энекоски запустила новый целлюлозный завод. Завод производит 1,3 млн. т целлюлозы, а также талловое масло, скипидар, лигнин, твердое биотопливо на основе коры. Кроме того, он производит 1,8 ТВтч электроэнергии (2,5% всей электроэнергии в стране) исключительно из отходов основного производства. Завод генерирует в 2,4 раза больше электроэнергии, чем потребляет [5].

Е.С. Алексеев, А.Ю. Алентьев, А.С. Белова подчеркивают, что дальнейшее развитие энергоэффективных технологий производства целлюлозы можно прогнозировать на основе применения флюидных технологий [6].

Научная значимость.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- доказана эффективность предлагаемых энергосберегающих технологий производства целлюлозы и бумаги;
- применительно к целлюлозно-бумажной промышленности предложено решение научно-технической проблемы по экономии энергетических ресурсов, охране окружающей среды и диверсификации технологических процессов целлюлозно-бумажного производства;
- изложены общие подходы к энергосбережению в ЦБП с учетом наилучших доступных технологий;
- раскрыты основные причины, позволяющие с большей степенью достоверности оценить энергетическую эффективность как отдельных видов оборудования, так и в целом сложных технологических систем целлюлозно-бумажного производства;
- изучено влияние режимных параметров оборудования ЦБП на критерий оптимальности, что позволило повысить энергетическую эффективность варочного оборудования, выпарных установок, СРК, обжиговых печей декарбонизации извести, сушильной части БДМ.

Практическая значимость

Значение полученных результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- разработаны технологии энергосбережения в ЦБП;
- определены основные направления энергетической эффективности производства сульфатной и сульфитной целлюлозы.
- создана методология оценки эффективности работы оборудования ЦБП, в том числе с учетом энергосберегающих технологий.
- представлены новые технологические схемы энергосберегающих и экологически безопасных технологий получения продукции ЦБП.

Материалы и методы

На основе обследования целого ряда производств целлюлозы установлено, что технологический процесс получения сульфатной целлюлозы характеризуется низким (48%) эксергетическим КПД. Такой низкий эксергетический КПД определяется, прежде всего, высокой степенью необратимости процессов выпаривания воды из раствора и теплопередачи от продуктов сгорания к черному щелоку в СРК.

В направлении уменьшения эксергетических потерь ведутся интенсивные исследования за рубежом [7]. К ним следует отнести, например, работы [8] по выводу СРК из технологического процесса с заменой его автоклавным гидрохимическим процессом. К другим техническим решениям следует отнести повышение концентрации раствора черного щелока перед СРК. Нами предложен [9] способ глубокого охлаждения паросодержащих дымовых газов после СРК с передачей теплоты на выпаривание слабого черного щелока.

Возможность реализации такого инновационного технического решения определяется следующими соображениями. Как известно, СРК выполняет технологическую и энергетическую функцию в установке энерготехнологического комплекса производства целлюлозы. Технологическая функция состоит в регенерации щелочей, энергетическая – в получении пара давлением 6-7 МПа.

Одним из основных технологических процессов производства сульфатной целлюлозы (рис.1) является варка технологической щепы с получением черного щелока в варочных котлах. Современная энерготехнологическая установка не ограничивается варочными котлами. Она дополнена контурами регенерации химикатов (натриевых, сульфидных и сульфатных), а также извести. В контур регенерации натриевых щелоков включен СРК в котором получают плав. Плав растворяют слабым белым щелоком. После разделения жидкой и твердой фаз суспензию обрабатывают раствором оксида кальция: раствор натриевых солей возвращают в варочный котел, а известняк – во вращающуюся известерегенерационную печь для обжига при температуре 1250 °С. Обожженный известняк направляют на каустизацию зеленого щелока.

Для замыкания цикла по раствору в энерготехнологическую установку включена выпарная установка. Энергетические и капитальные затраты, а также экологическая безопасность процесса производства сульфатной целлюлозы определяется не только основным технологическим процессом- варкой технологической щепы в варочном котле, но

и циклами регенерации химикатов. Именно вспомогательные процессы и определяют энергозатраты, капитальные затраты и экологическую опасность процессов в энерготехнологической установке производства целлюлозы.

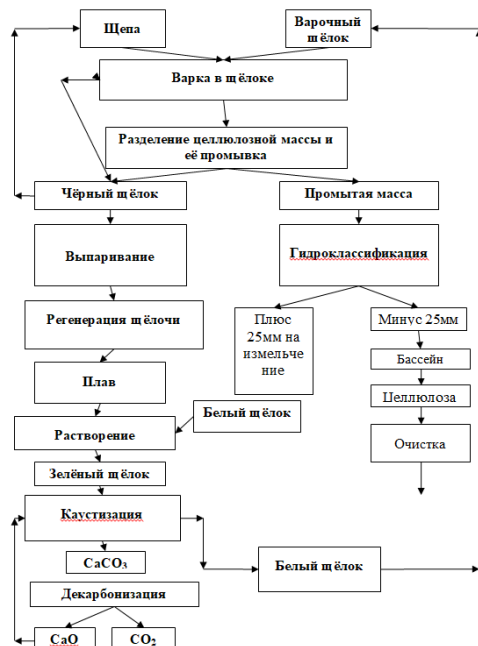


Рис. 1. Принципиальная схема производства сульфатной целлюлозы Fig. 1. Schematic diagram of sulfate pulp production

В предложенной энерготехнологической установке (рис.2) [9] отсутствуют такие составляющие с высокими капитальными затратами как, СРК, вращающаяся печь обжига известняка. Снижаются риски от загрязнений воздушного и водного бассейнов.

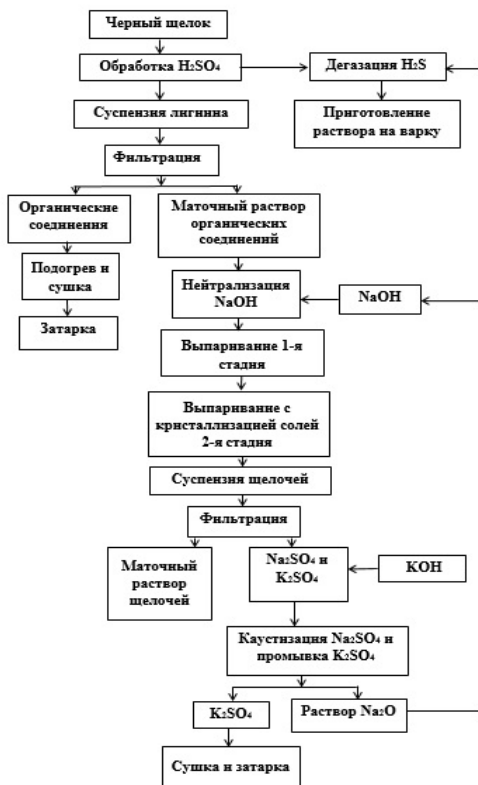


Рис. 2. Схема гидрохимической переработки древесной технологической щепы Fig. 2. Hydrochemical pulps processing diagram

В основе предложенной технологии лежит установленная в эксперименте возможность [9] вывода лигнин-углеводного комплекса из слабого черного щелока путем его обработки серной кислотой с последующим выпариванием раствора с кристаллизацией натриевых солей.

Сульфат натрия из этой смеси, в количестве необходимом для варки технологической щепы, восстанавливают до сульфида натрия. При этом в качестве топлива может быть использованы органические соединения, адсорбированные содосульфатной смесью при ее кристаллизации в выпарной батарее. Содосульфатную смесь растворяют в воде, раствор каустизируют и далее перерабатывают по принятой технологии. Частично [10] лигнин может быть выведен из раствора черного щелока при его карбонизации. Дальнейшее выделение лигнина и его структурных соединений возможно при кристаллизации в процессе выпаривания на развитой поверхности соды и сульфата натрия путем адсорбции. Остаток лигнина в маточном растворе натриевых солей после выпаривания возвращается на карбонизацию.

Переработкой черного щелока на лигнин и др. органические соединения получается экологически чистое топливо с высокой (в сравнении с черным щелоком) теплотой сгорания. В предлагаемой технологии лигнин может быть использован не только в качестве энергетического топлива, но и как ценного химического сырья.

Итак, по предлагаемому способу огнетехнические процессы в СРК заменяют гидрохимическими с получением натриевых солей и топлива на основе лигнина.

Водяной пар, получаемый в результате подготовленного к сжиганию лигнина, генерируется в обычном энергетическом котле. Продукты сгорания, как полученные от переработки возобновляемых источников энергии, согласно Киотского протокола и Парижского соглашения, являются экологически безопасными с точки зрения отвода парниковых газов в окружающую среду.

Варка технологической щепы. Термодинамическими исследованиями установлено, что эксергетический КПД этого технологического процесса низок и составляет 70%. Решение этой проблемы во многом определяются успехами в области гидродинамики волокнистых суспензий. Положительные результаты исследований в этом направлении позволяют:

- организовать процесс варки по однопоточной схеме;
- осуществить высокую степень регенерации теплоты (с КПД 90-95%) суспензии сваренной технологической щепы. Теплота используется для нагрева исходной суспензии технологической щепы в противоточном теплообменнике или теплообменнике смешанного тока. Такая регенерация теплоты позволит сократить расход пара от внешнего источника на порядок;
- модернизировать аппаратурно-технологическую схему варки технологической щепы. Модернизация заключается в том, чтобы исключить эксплуатационно-сложную, энергетически не эффективную схему варки технологической щепы на непрерывно действующую однопоточную компактную автоклавную установку. В такой установке упрощается управление технологическим процессом с прогнозируемым получением выходных параметров.

Выпаривание черного щелока. Выпаривание черного щелока, с точки зрения степени термодинамического совершенства, в целом, отвечает $\eta = 82\%$ современным требованиям. Между тем следует заметить, что этот технологический процесс занимает первое место по подводу пара низкого давления с ТЭЦ в технологической цепочке производства целлюлозы и соответствует 1,5 т/т целлюлозы. Поэтому изыскание способов снижения расхода пара в этот процесс приобретает особую значимость [10].

Снижение расхода пара с ТЭЦ на выпаривание черного щелока реализуется по следующим основным направлениям:

- использование для выпаривания вторичных энергетических ресурсов. К вторичным энергетическим ресурсам следует отнести, прежде всего, паросодержащие дымовые газы СРК, корьевых котлов, а также дымовые газы технологических печей и энергетических котлов с глубоким (до 50°C) их охлаждением. Только использование теплоты газов СРК и корьевых котлов позволит сократить расход пара на выпаривание черного щелока на 30% - 50%;
- оптимизация параметров работы выпарных батарей. Как показали исследования по оптимизации числа ступеней выпаривания (по технико-экономическому критерию), их оптимальное количество, при существующей конъюнктуре цен на энергию составляет 8 -10 ступеней против 6-7 принятых в настоящее время. Это техническое решение позволит сократить расход пара с ТЭЦ еще на 30%;

- применение тепловых насосов. В последнее время в зарубежной практике выпаривания стали широко применять тепловые насосы как эжекционного типа, так и прямого компримирования. Введение в тепловую схему выпаривания тепловых насосов не только эффективно позволяет использовать теплоту с низким потенциалом, но и в ряде случаев исключается отвод материальных и тепловых потоков в окружающую среду, что позволяет обеспечить экологическую безопасность процесса выпаривания от тепловых и химических загрязнений.

Основной проблемой процесса выпаривания существующих выпарных батарей является низкая их производительность. На большинстве целлюлозных заводов производительность выпарных батарей составляет 70% и ниже от проектной производительности.

Проведенный энергетический аудит выпарных батарей ряда целлюлозных заводов позволил установить основные причины их низкой производительности:

- интенсивное образование накипи сложного химического и фазового состава теплообменных поверхностей выпарных аппаратов и регенеративных теплообменников выпарных батарей. Решение этой проблемы возможно путем использования [11, 12] ингибиторов накипеобразования, подготовки растворов к выпариванию путем перевода накипеобразующих компонентов в менее растворимые соединения, например, в фосфаты кальция. В ряде случаев эффективными могут оказаться физические методы воздействия [13, 14] на раствор, например, электрическими или магнитными полями;

- наличие неконденсируемых газов и летучих компонентов во вторичном паре. Эти газы не только создают термическое сопротивление в процессе теплопередачи. Часть из органических соединений способны к полимеризации на наружных теплообменных поверхностях, создавая твердые отложения с низкой теплопроводностью;

- в литературе мало уделяется внимание стабильной работе регенеративных теплообменников выпарных установок. Между тем именно от их эффективной работы зависит вентиляция корпусов выпарных аппаратов от неконденсирующихся газов и во многом определяется удельный расход пара на выпаривание раствора и производительность выпарных батарей. На практике частично или полностью регенеративные подогреватели выводятся из работы. Устранение этого недостатка мы видим в замене регенеративных подогревателей рекуперативного типа теплообменниками [15] смешения. В этом случае некоторое дополнительное разбавление раствора полностью окупается интенсификацией работы подогревателей и выпарных установок.

Большинство отечественных выпарных станций целлюлозных заводов укомплектованы выпарными аппаратами с восходящей пленкой или аппаратами с естественной циркуляцией. В таких аппаратах создаются условия для образования накипи вплоть до полной забивки выпарных аппаратов. Для успешного решения этой проблемы целесообразно выпарные аппараты такого типа реконструировать в современные аппараты с падающей пленкой, что замедляет образования накипи и проблемы забивки кипяtilльных труб. Часто используются выпарные батареи противоточного типа, что приводит к снижению их производительности.

- большой унос капель раствора с вторичным паром из сепараторов выпарных батарей. Вопросам очистки вторичного пара также уделяется не достаточно внимания. Между тем тенденция роста производительности выпарных батарей единичной мощности и экологические требования к чистоте конденсата остро ставят задачу тонкой очистки вторичного пара. Здесь можно рекомендовать жалюзийные и циклонные брызгоуловители.

Успешное решение этих проблем позволит не только достигнуть проектной производительности выпарных батарей, но и существенно ее превзойти.

Декарбонизация известняка. В существующем способе декарбонизации известняка процесс ведут во вращающихся печах на природном газе или мазуте. Выбор вращающейся печи обусловлен тем, что при вращении печи материал окатывается. Грануляция материала обеспечивает равномерный прогрев и уменьшение потерь с уносом.

Исследованиями установлено, что процесс декарбонизации характеризуется низким эксергетическим КПД (37%). Причиной этого является низкая степень регенерации теплоты прокаленной извести и дымовых газов. Для повышения эксергетического КПД печи предлагается освоить нагрев исходного материала (CaCO_3) в циклонных теплообменниках путем охлаждения дымовых газов. Прокаленный материал охлаждается в циклонных холодильниках, нагревая воздух, который подают на горение в печь. При такой схеме регенерации теплоты расход топлива может быть снижен на 25 – 30%. При этом производительность печи может быть увеличена вдвое.

Аналог аппаратурно-технологической схемы разработан немецкой фирмой «Klockner-Humboldt» для кальцинации глинозема.

Заметим, что для карбонизации раствора черного щелока при выводе СРК из схемы, вращающаяся печь – единственный концентрированный источник CO_2 . В связи с этим решается проблема исключения отвода в окружающую среду парниковых газов.

При получении сульфитной целлюлозы одним из продуктов переработки являются технические лигносульфонаты. До недавнего времени потребительский спрос на лигносульфонаты удовлетворялся жидкими концентратами сульфитных целлюлозных заводов. Падение спроса на жидкие концентраты и эксплуатационные осложнения при выпаривании привели к идее получения сухих продуктов. С этой целью в эксплуатацию введены установки по сушке жидких концентратов до сухих веществ, в распылительных сушилках. Эксплуатационная устойчивость работы распылительных сушилок определила требования к исходному раствору для сушки. В результате концентрация раствора после выпаривания снизилась до 38,5% против 50% по а.с.в. Снижение концентрации раствора после выпаривания с учетом получения сухих веществ привели к существенному увеличению энергетической составляющей в себестоимости получения лигносульфонатов.

Решение этой проблемы мы видим в следующих направлениях: освоение вместо распылительных сушилок – грануляторов кипящего слоя [16]. Эти аппараты менее чувствительны к концентрации исходного раствора. Перед этими сушилками можно выпаривать растворы до концентрации 50% а.с.в. и более, разработка внепечного процесса кристаллизации и грануляции получения сухих лигносульфонатов.

Производство бумаги и картона. Процесс производства бумаги и картона является сложным физико-химическим и термовлажностным процессом.

В 60-х годах прошлого века проф. П.А. Жучковым были разработаны основы теории сушки волокнистых материалов и методы расчета многоцилиндровых кондуктивно-конвективных сушильных установок бумаго- и картоноделательных машин (БКДМ).

Термодинамическими исследованиями установлен низкий эксергетический КПД сушильной части БКДМ при больших величинах термически взаимодействующих материальных потоках. Этим и определяется большой подвод пара низкого давления с ТЭЦ.

Процесс в сушильной части условно можно разделить на три части: сушка полотна, водоотделение, рекуперация паровоздушной смеси.

Проведенный термодинамический анализ позволил установить, что низкий эксергетический КПД сушильной части определяется неэффективной работой теплорекуперационной установки.

В качестве основных направлений по совершенствованию тепловой схемы сушильной части БКДМ можно рекомендовать:

1. Повышение эксергетического КПД рекуперативной установки.
2. Оптимизация параметров сушильного воздуха.
3. Снижение влажности бумажного полотна, поступающего на сушку.
4. Создание автономных систем вентиляции и кондиционирования БДМ и общеобменной вентиляции.
5. Применение тепловых насосов с целью повышения энергетической эффективности тепловой схемы сушильной части БДМ, а также для установления необходимых графиков сушки при автономной работе группы цилиндров.

Обсуждение результатов

Приведенные результаты показывают необходимость внедрения принципиально новых технологий производства основных видов целлюлозно-бумажной продукции. Эти технологии должны отвечать требованиям экологической безопасности иметь высокую энергетическую эффективность.

Энерготехнологические комплексы на основе флюидных технологий

Дальнейшее развитие энергоэффективных технологий производства целлюлозы можно прогнозировать на основе применения флюидных технологий – сверхкритического водяного окисления (СКВО). В настоящее время проведены достаточно основательные исследования на влияние воды при сверхкритических параметров на целлюлозу и лигнин.

А.А. Лунин и А.А. Галкин отмечают, что при газификации лигнина и целлюлозы в воде при $T=623\text{ K}$ и $p=25\text{ МПа}$ образуется водород, метан и углекислый газ. Состав газа и его количество сильно зависят от содержания лигнина. Вероятно, целлюлоза является донором для гидрирования лигнина, что приводит к изменению состава образующегося газа в зависимости от соотношения лигнин/целлюлоза. Вблизи критической точки скорость гидролиза целлюлозы резко возрастает (более чем на порядок). Поэтому в сверхкритической воде вывод продуктов гидролиза значительно выше чем в

субкритической. При температурах и давлениях ниже параметров критической точки процессы разложения сахаров преобладают над процессами разложения целлюлозы. Следовательно, варьируя температуру и давление можно получить из целлюлозы сахара (в сверхкритической воде) либо осуществить глубокую деструкцию отходов этого полимера (в субкритической воде).

Положительные результаты исследований в области химии воды при сверхкритических параметрах дают основание прогнозировать успех в направлении разработки энергоэффективной технологии получения целлюлозы при воздействии на технологическую щепу водой при субкритических и сверхкритических параметрах [17,18]. В технологии, основанной на применении воды при критических параметрах отсутствуют процессы и оборудование, определяющие высокие энергозатраты, экологическую опасность и высокие капитальные вложения: варка технологической щепы, выпаривание черного щелока, обжиг известняка. Отсутствуют также процессы получения зеленого щелока и каустизация. Варка технологической щепы заменена на процесс окисления лигнин-углеводного комплекса (химическое обогащение технологической щепы по целлюлозе). Предполагается, что на вход в технологический процесс производства целлюлозы поступает древесина со степенью сухости 80%, а на выходе - белая целлюлоза, газ с высокой теплотой сгорания и вода. Газ от окисления лигнин-углеводного комплекса, обогащенный водородом и метаном перерабатывается на теплоту и электроэнергию по парогазовому циклу. Заметим, что такой процесс можно организовать без потребления теплоты от внешнего источника. Компенсация потерь от необратимости осуществляется путем экзотермических реакций при окислении лигнин-углеводного комплекса. Заметим, что скорость реакции окисления в условиях СКВО составляет несколько десятков секунд, против существующего процесса варки технологической щепы 3-4 часа. Последнее определяет стоимость оборудования для изготовления химического реактора на сверхкритические параметры.

Когенерация в целлюлозно - бумажной промышленности.

Когенерация - это совместный процесс производства электрической и тепловой энергии внутри одного устройства - когенерационной установки (мини ТЭЦ, КГУ). Экономия топлива при выработке энергии в когенерационном цикле может достигать до 40% по сравнению с раздельным производством того же количества электроэнергии и при использовании теплоты от специального горелочного устройства.

Для технологических автономных установок малой мощности разрабатываются мини-ТЭЦ на основе газопоршневого двигателя и паровой турбины малой мощности. Для установок большой мощности газопоршневой двигатель заменен на газовую турбину.

Термодинамическая эффективность процесса когенерации состоит в том, что такой процесс организуется при большем эксергетическом КПД в сравнении с раздельной выработкой теплоты и электроэнергии. Повышение эксергетического КПД связано с снижением величины необратимости тепловых процессов. Так, например, котел генерирует водяной пар давлением 1,0 МПа. Технологическому потребителю требуется пар давлением 0,15 МПа. Снижение потенциала достигается путем установки редуционно-охладительной установки (РОУ). Здесь РОУ - источник эксергетических потерь, возникающих при дросселировании водяного пара, а, следовательно, перерасхода топлива. При когенерации при направлении водяного пара в турбину необратимость от дросселирования отсутствует. Ликвидация этой необратимости позволит в паровой турбине выработать дополнительное количество электроэнергии. Еще больший эффект достигается при установке газопоршневого двигателя или газовой турбины. Низкий эксергетический КПД паровых котлов (45 -50%) определяется большой величиной необратимости процесса теплообмена между дымовыми газами и получаемым водяным паром. Снижение этой необратимости возможно путем повышения температуры газов, образующихся при сгорании топлива, выработке электроэнергии в газовой турбине, последующей выработке дополнительной электроэнергии и получения теплоты в паровой турбине.

В настоящее время направление когенерации является одним из приоритетных направлений в мире. Когенерационные установки характеризуются следующими дополнительными преимуществами наряду с дешевой электрической- и тепловой энергией (по сравнению с покупаемой из сети): близостью к потребителю, отсутствием необходимости в дорогостоящих ЛЭП и подстанциях, экологической безопасностью, мобильностью, легкостью монтажа и многими другими факторами.

Малая энергетика является не только альтернативой централизованной системе - она становится основой для быстрого развития вновь осваиваемых районов, открывающихся новых производств и расширения существующих. Очень часто из-за изношенности

оборудования существующих электросетей затруднено подключение новых промышленных потребителей, а иногда и просто экономически нецелесообразно (в случае большого удаления потребителя от ЛЭП). В результате, применение автономных энергоисточников с комбинированным производством электрической и тепловой энергии обеспечивает определенный энергетический резерв в централизованной системе.

Экологическая безопасность энергоэффективных технологий. Требования к организации энергоэффективных технологических процессов во многом совпадают с требованиями их экологической безопасности. Эти требования, как минимум, связаны с уменьшением количества удельных взаимодействующих материальных и тепловых потоков при высокой регенерации теплоты. С позиций экологической безопасности выполнение этих требований обуславливает уменьшение или исключение отвода материальных и тепловых потоков в окружающую среду.

Основная концепция создания экологической безопасности теплоиспользующих процессов включает:

- создание замкнутых циклов по материальным потокам с обеспечением минимума вывода их в окружающую среду. При этом отводимые тепловые потоки характеризуются температурой близкой к температуре окружающей среды;
- уменьшение взаимодействующих материальных тепловых потоков в процессе теплопередачи;
- обеспечение малоотходных процессов путем вывода из материальных взаимодействующих потоков продуктов, имеющих повышенный потребительский спрос;
- снижение или исключение парниковых и других газов, отводимых в окружающую среду, получаемых в процессе переработки древесной технологической щепы на целлюлозу.

Экологическая безопасность энергоэффективных технологий должна обеспечивать чистоту водного и воздушного бассейнов.

В производстве целлюлозы источниками загрязнений водного бассейна являются промывные воды, конденсат водяного пара вакуумных корпусов выпарных аппаратов и др. Решение этой проблемы мы видим в создании замкнутых циклов. Для сведения материального баланса по воде, необходимо применить комплекс мероприятий, включающих процессы выпаривания, диафрагменные, ионообменные технологии. Целевая задача по решению проблемы охраны водного бассейна – полное прекращение вывода жидких продуктов в окружающую среду. При решении этой проблемы возникают задачи по выводу примесей из растворов для исключения их накопления, некоторые из этих примесей должны быть дополнительно переработаны на продукты, имеющие потребительский спрос.

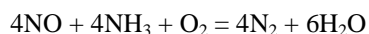
В производстве целлюлозы особое внимание следует уделить выводу из процесса лигнина и др. органических примесей. Проблема вывода лигнина из раствора является центральной как с точки зрения создания энергоэффективных технологий (вывод из технологической цепочки СРК), так и с позиций глубокой переработки древесины. Полученные продукты глубокой переработки по цене должны конкурировать с одной стороны с лигнином как топливом, с другой стороны эти продукты по стоимости должны быть конкурентоспособны с аналогичными продуктами, полученными по другим технологиям. При успешном решении задач по переработке лигнина на целевые продукты, этот процесс будет перманентным с непрерывным замещением лигнина как топлива, лигнином как химическим сырьем. Второй проблемой является вывод из раствора натриевых солей при гидрохимическом способе регенерации щелочей.

Основными источниками загрязнения воздушного бассейна в производстве целлюлозы являются варочные процессы, процессы выпаривания, процессы в СРК и энергетических паровых котлах. К основным продуктам целлюлозного производства, загрязняющим окружающую среду воздушного бассейна, следует отнести: метилмеркаптан, диметилдисульфид, сероводород, монооксид азота, углерода, парниковые газы. Источником всех серосодержащих газов является сульфид натрия. Для исключения «дурно пахнущих» газов предлагается разработать способы, обеспечивающие удаление сульфида натрия их раствора черного щелока до выпаривания. Это возможно осуществить как химико-технологическими приемами, так и аппаратурно-технологическими способами. Первое направление основано на основе связывания в менее растворимое, чем сульфид натрия, соединение с выводом из процесса новой фазы и регенерации из нее серы. Второе направление связано с аппаратурным направлением процесса переработки раствора после варки и в процессе выпаривания. Практическая реализация этого направления возможна путем обработки раствора воздухом или воздушно-паровой смесью в кавитационно-

вихревых аппаратах. В этих аппаратах генерируется озон, являющийся сильным окислителем.

В паровых котлах одним из вредных компонентов в дымовых газах является монооксид азота. Доведение до норм СНиП этого вида загрязнений предлагается путем:

- освоения в котельных агрегатах горелочных устройств, разработанных специалистами университета;
- введением в высокотемпературную зону потока дымовых газов (950 – 1100 °С) котла, по способу ВТИ, аммиачной воды или карбомида. При этом протекает реакция восстановления:



По-видимому, целесообразно использовать оба метода одновременно. Что касается монооксида углерода, то его доведение до норм СНиП достигается правильным проведением процесса горения топлива.

В настоящее время большое внимание уделяется снижению выбросов парниковых газов в окружающую среду. Следует отметить, что в излагаемой концепции энергоэффективных технологий процесса производства переработки древесной технологической щепы на целлюлозу практически парниковые газы отсутствуют. Такое заключение можно сделать из следующих соображений. В предлагаемой технологии СРК отсутствует, а, следовательно, и связанные с ним загрязнения. Печь декарбонизации является концентрированным источником CO₂, который полностью потребляется в технологическом процессе при карбонизации черного щелока. Кроме того, работа печи обжига известняка предполагается на лигнине или тарифицированном угле в качестве топлива, т.е. на возобновляемом источнике сырья.

В сульфитном способе производства целлюлозы с точки зрения экологической безопасности процессов представляет интерес разработка способов внепечного получения сухих технических лигносульфонатов.

В производстве бумаги и картона по экологическому обеспечению технологического процесса сушки следует выделить освоение автономных замкнутых циркуляционных потоков воздуха в системах общеобменной вентиляции и кондиционирования.

В циркуляционном контуре БДМ сушильный воздух перед поступлением в сушильную часть машины очищается от волокна с возвращением его в процесс. В условиях эффективного использования энергии, при развитой схеме регенерации теплоты, вывод паровоздушной смеси в окружающую среду сведен к минимуму.

Заключение

Приведены основные направления по повышению энергетической эффективности основных технологических процессов получения продукции целлюлозно-бумажных предприятий.

Показана низкая энергетическая эффективность существующей схемы получения сульфатной целлюлозы, эксергетический КПД - 48%. Основная доля затраченной эксергии (71% от подведенной в схему) относится к процессу в СРК).

Предложена гидрохимический способ переработки древесной технологической щепы с получением сульфатной целлюлозы с высоким значением эксергетического КПД (90%), в котором отсутствуют СРК, вращающаяся печь обжига известняка.

Приведены основные направления повышения энергоэффективности получения лигносульфонатов при сульфитном производстве целлюлозы.

Дальнейшее развитие энергоэффективных технологий производства целлюлозы можно прогнозировать на основе применения флюидных технологий – сверхкритического водяного окисления (СКВО).

Процесс производства бумаги и картона является сложным физико-химическим и термовлажностным процессом.

Показаны основные направления по совершенствованию тепловой схемы сушильной части БКДМ.

Рассмотрены вопросы когенерации в целлюлозно - бумажной промышленности.

Значительное внимание уделено экологической безопасности энергоэффективных технологий.

Литература

1. Луканин П.В. Проблемы энергосбережения на целлюлозно-бумажных предприятиях России // IV научно-техническая конференция «Леса России: политика,

промышленность, наука, образование», Санкт-Петербург, 22-25 мая 2019: тезисы докладов. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. С.304-306.

2. Луканин П. В. Оценка энергетической эффективности производства сульфатной целлюлозы методом приращения эксергий / П.В. Луканин// Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. № 2. С. 3-11.

3. Луканин П.В. Особенности сжигания биотоплива и их взаимосвязь с упруго-релаксационными свойствами исходного сырья и его химическим составом / П.В. Луканин, О.В. Федорова, А.А. Пекарец, Э.Л. Аким// Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти профессора В.И. Комарова (Архангельск, 9–11 сентября 2021 г.) / Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2021. С. 383-388.

4. Казаков В.Г., Луканин П.В., Смирнова О.С. Упрощенный метод определения эксергетического КПД сложной тепловой схемы технологического процесса//Промышленная энергетика. 2010. №1. С. 38-41.

5. Лахтиков Ю.О. Проблемы развития биоэнергетики на предприятиях ЦБП // Биотопливный Конгресс.19-20 марта 2019, СПб.

6. Сверхкритические флюиды в химии / Е. С. Алексеев, А. Ю. Алентьев, А. С. Белова [и др.] // Успехи химии. 2020. Т. 89. № 12. С. 1337-1427.

7. Hansen E., Panwar R., Vlosky R. The Global Forest Sektor: Chenges. Practices and Prospects // Taylor & Francis Group (NY); 2017.

8. Song A. A filler distribution factor and its relationships with the critical properties of mineral-filled paper//BioResources/ 2018. V.13. №3. P.6631-6641.

9. Казаков В.Г., Луканин П.В., Смирнова О.С. Технология теплоты в процессе производства лигносульфонатов // Промышленная энергетика. 2012. №7. С.35 – 39.

10. Alen R., Sjöström E., Vaskikari P. Carbon dioxide precipitation of lignin from alkaline pulping liquors // Cellulose Chemistry and Technology.- 1985.-V. 19.- № 5.-P.c. 537-541.

11. Nimish D., Morrish K. CFD Analysis of Fluid Flowing Through a Heat Exchanger Tube Having a Twisted Tape with a Centrally Placed Semi- Circular Groove// International Journal of Science and Research. 2017. V.6. № 6.p.2200-2207.

12. Spitzer D.P. Chamberlain Q, Franz C., Lewellyn M., and Qi Dai, “MAX HT™ sodalite scale inhibitor: plant experience and impact on the process”, Light Metals 2008 (Edited by David H. De Young, The Minerals, Metals & Materials Society, 2008), 57-62.

13. Казаков В.Г., Луканин П.В., Смирнова О.С. Эксергетический анализ технологии производства сульфатной целлюлозы // Промышленная энергетика. 2011. №7.С.37-42.

14. Патент № 2651412 Российская Федерация, МПК D21C 3/02 (2006.01). Способ упаривания щелоков в производстве целлюлозы: № 2017122502: заявл.26.06.2017: опубл.19.04.2018 / Луканин П.В., Казаков В.Г., Федорова О.В., Субботина К.О.; заявитель ГОУВПО СПбГУПТД. 6 с.

15. Патент №2670855 Российская Федерация, МПК D21C 3/02 (2006/01). Способ варки технологической щепы в производстве целлюлозы: №2017122501: заявл. 26.06.2017: опубл.25.10.2018 / Луканин П.В., Казаков В.Г., Федорова О.В., Субботина К.О.; заявитель ФГБОУВО СПбГУПТД. 2с.

16. Казаков В.Г., Луканин П.В., Смирнова О.С. Технология теплоты в гидрохимическом способе регенерации химикатов производства сульфатной целлюлозы// Промышленная энергетика. 2011. №7. С.44-48.

17. Казаков В.Г., Луканин П.В., Громова Е.Н. Вертикальный варочный котел. Патент на полезную модель № 208723. 11.01.2022.

18. Казаков В.Г., Луканин П.В. Громова Е.Н. Способ получения целлюлозы. Патент на изобретение № 2771348. 29.04.2022.

Авторы публикации

Луканин Павел Владимирович – к.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, первый проректор, директор Высшей й школы технологии и энергетики, email: lukanin@gturp.spb.ru,

Зверев Леонид Олегович – Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, студент. email: zverevleonid28@mail.ru

Казаков Владимир Григорьевич – д.т.н., старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, профессор кафедры Промышленной теплоэнергетики, email: k64089@yandex.ru

References

1. Lukanin PV. *Energy saving problems at Russia's pulp and paper enterprise*. IV Scientific and technical conference «Forests of Russia: Politics, Industry, Science», Saint Petersburg, May 22-25, 2019: abstracts of reports. Saint Petersburg: POLITEKCH-PRESS. 2019; 304-306.
2. Lukanin PV. Assessment of energy efficiency of sulfate pulp production with the method of exergy increments. *News of Higher Educational Institutions. Energy Problems*. 2020; 2, 3-11.
3. Lukanin PV, Fiodorova OV., Pekaretz A.A., et al. Biofuel burning features and their interrelationship with relaxational-elastic properties of raw material and its chemical composition. *Problems of Mechanics of Pulp and Paper Materials: Proceedings of VI International scientific and technical conference in commemoration of Professor V.I. Komarov (Arkhangelsk, September 9-11, 2021) / Lomonosov Northern (Arctic) Federal University*. Arkhangelsk: NARFU, 2021. 383-388.
4. Kazakov VG, Lukanin PV, Smirnova. A simplified method for determining the exergy efficiency of a complex thermal process flow diagram. *Industrial Energy*. 2010; 1, 38 - 41.
5. Lakhtikov YuO. *Problems of Bioenergy Development at PPI Enterprises*. Biofuel Congress, March 19-20, 2019, SPb.
6. Alekseev ES, Alent'ev AYU., AS. Belova, et al. Sverxkriticheskie fluidy v khimii. *Uspehi khimii*. 2020. T. 89. № 12. pp 1337-1427.
7. Hansen E, Panwar R, Vlosky R. The Global Forest Sector: Changes, Practices and Prospects. *Taylor & Francis Group* (NY); 2017.
8. Song AA filler distribution factor and its relationship with the critical properties of mineral-filled paper. *BioResources*. 2018. V.13. №3. P.6631-6641.
9. Kazakov VG, Lukanin PV, Smirnova OS. Heat technology in the lignosulfonates production. *Industrial Energy*. 2012; 7, 35-39.
10. Alen R, Sjöström E, Vaskikari P. Carbon dioxide precipitation of lignin from alkaline pulping liquors. *Cellulose Chemistry and Technology*. 1985;19(5):537-541.
11. Nimish D, Morrish K. CFD Analysis of Fluid Flowing Through a Heat Exchanger Tube Having a Twisted Tape with a Centrally Placed Semi-Circular Groove. *International Journal of Science and Research*. 2017;6(6):pp.2200-2207.
12. Spitzer DP, Chamberlain Q, Franz C., Lewellyn M., and Qi Dai, MAX HTTM sodalite scale inhibitor: plant experience and impact on the process, *Light Metals 2008* (Edited by David H. De Young, The Minerals, Metals & Materials Society, 2008), 57-62.
13. Kazakov VG, Lukanin PV, Smirnova OS. Exergy analysis of sulfate pulp technology. *Industrial Energy*. 2011; 7, 37 - 42.
14. Patent № 2651412 the Russian Federation, MPK D21C 3/02 (2006.01). *The Method for evaporation of liquors in pulp production*: № 2017122502: decl. 26.06.2017: publ. 19.04.2018 / Lukanin PV, Kazakov VG, Fiodorova OV, Subbotina KO. declarant FSBEIHE SPbSUITD. 6pp.
15. Patent № 2670855 the Russian Federation, MPK D21C 3/02 (2006.01). *The method of pulpchips cooking in pulp production*: № 2017122501: decl. 26.06.2017: publ. 25.10.2018 / Lukanin PV, Kazakov VG, Fiodorova OV, Subbotina KO. declarant FSBEIHE SPbSUITD. 2p.
16. Kazakov V.G., Lukanin P.V., Smirnova O.S. Heat technology at the hydrochemical recovery of chemicals in sulfate pulp production. *Industrial Energy*. 2011; 7, 44-48.
17. Kazakov VG., Lukanin PV., Gromova EN. *Vertical digester*. Patent for useful model № 208723. 11.01.2022.
18. Kazakov VG., Lukanin PV, Gromova EN. *Method for producing pulp*. Patent for an invention № 2771348. 29.04.2022.

Authors of the publication

Pavel V. Lukanin – PhD in Engineering, Professor, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. First Vice Rector; Higher School of Technology and Energy. Director. e-mail: lukanin@gturp.spb.ru.

Leonid O. Zverev – Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; Institute of Energy and Automation, e-mail: zverevleonid28@mail.ru.

Vladimir G. Kazakov – D.Sc. in Engineering, Senior Researcher, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; Professor, Department of Industrial Heat-and-Power Engineering. email: k64089@yandex.ru.

Получено ***22.06.2022 г.***

Отредактировано ***24.06.2022 г.***

Принято ***06.07.2022 г.***