

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО РАСЧЁТА ТОПКИ СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННОГО КОТЛА

Кристина Геннадьевна Живаева, Сергей Николаевич Смородин,
Владимир Николаевич Белоусов

Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета
промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

© Живаева К. Г., Смородин С. Н., Белоусов В. Н., 2026

Автор-корреспондент: К. Г. Живаева, e-mail: zhivaeva_k@bk.ru

АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются особенности теплового расчёта топки содорегенерационного котла (СРК), являющегося ключевым элементом технологической цепи регенерации химикатов в целлюлозно-бумажной промышленности. Уточнение параметров теплового расчёта СРК имеет важное значение при проектировании новых и реконструкции действующих котлов. Авторами предложен усовершенствованный вариант методики расчёта, основанный на сочетании действующих методик расчета топок котлов и данных практических и экспериментальных исследований, выполненных на действующих промышленных установках. В работе подробно рассмотрены закономерности протекания тепловых процессов при сжигании чёрного щёлока. Особое внимание уделено оценке радиационных характеристик среды, определению коэффициентов поглощения и излучения газовой фазы и взвешенных частиц. Рекомендованы зависимости для определения коэффициента поглощения топочной среды, параметра M , учитывающего влияние на интенсивность теплообмена относительного уровня расположения горелок, степени забалластированности топочных газов и других факторов, коэффициента загрязнения, учитывающего его термическое сопротивление, и коэффициента тепловой эффективности экранов. Данная методика учитывает сочетание факельного и слоевого сжигания щёлока в топке СРК, ступенчатую подачу воздуха в топку, а также рекомендации по расчету теплообмена в топке. Проведённые поверочные расчёты топок СРК, выполненные по данной методике, показали хорошее согласование с эксплуатационными наблюдениями и литературными источниками, что подтверждает достоверность и практическую применимость разработанной методики. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации содорегенерационных котлов. Работа направлена на повышение энергетической эффективности и экологической устойчивости целлюлозно-бумажных производств.

Ключевые слова: регенерация, чёрный щёлок, диспергирование, подсушка, пиролиз, коксование, критерий поглотительной способности, коэффициент поглощения лучей, коэффициент тепловой эффективности, температура газов

Для цитирования: Живаева К. Г., Смородин С. Н., Белоусов В. Н. Особенности теплового расчёта топки содорегенерационного котла // Технология и энергетика. 2026. № 1 (1). С. 111–116. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_1_1_111-116

FEATURES OF THE THERMAL DESIGN OF A SODA RECOVERY BOILER FURNACE

Kristina Gennadyevna Zhivaeva, Sergey Nikolaevich Smorodin,
Vladimir Nikolaevich Belousov

Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: K. G. Zhivaeva, e-mail: zhivaeva@bk.ru

ABSTRACT

The article discusses the features of thermal calculation of the furnace of a soda recovery boiler (SRB), which is a key element of the technological chain for the regeneration of chemicals in the pulp and paper industry. Accurate



determination of the thermal calculation parameters for a soda-recovery boiler is essential for both new design and retrofit projects. An improved calculation methodology is proposed, based on a combination of existing boiler furnace design methods and data from practical and experimental studies conducted on operational industrial plants. This study provides a detailed examination of the patterns governing thermal processes during black liquor combustion. Special focus is placed on assessing the radiative characteristics of the medium and on determining the absorption and emission coefficients for both the gas phase and suspended particles. Correlations are recommended for determining: the absorption coefficient of the furnace medium; the M-parameter, which accounts for the influence on heat transfer intensity of the relative burner level, the degree of ballasting of the furnace gases, and other factors; the fouling factor, which accounts for its thermal resistance; and the screen thermal efficiency coefficient. The developed method takes into consideration: the combined flame and bed combustion of black liquor in the SRK furnace; the implementation of staged air supply; and the established guidelines for furnace heat transfer calculation. The verification calculations of SRK furnaces performed using this methodology showed good agreement with operational data and literature sources, confirming the reliability and practical applicability of the developed method. The obtained results can be used in the design and modernization of soda-recovery boilers. This work is aimed at improving the energy efficiency and environmental sustainability of pulp and paper mills.

Keywords: regeneration, black liquor, dispersion, partial drying, pyrolysis, charring, absorption capacity criterion, radiation absorption coefficient, thermal efficiency coefficient, flue gas temperature

For citation: Zhivaeva K. G., Smorodin S. N., Belousov V. N. (2026) Features of thermal calculation of the furnace of a soda recovery boiler, *Technology and Energy*, vol. 1, no. 1, pp. –. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_1_1_111-116

ВВЕДЕНИЕ

Содорегенерационный котёл — это энерготехнологический котёл, основной задачей которого является высокоэффективная регенерация химикатов при условии экономичного сжигания щёлока. В связи с этим схема организации топочного процесса основана на сочетании факельного и слоевого способов сжигания, то есть в объёме топки и на поде в слое огарка.

Впрыскивание чёрного щёлока с использованием специальных форсунок, расположенных на высоте 5–7 м, производится в объём топочной камеры. Диспергирование (распыливание) щёлока должно соответствовать принципу факельно-слоевого сжигания. Размеры капель должны быть достаточно крупными, чтобы они не выносились из топки потоком дымовых газов. Вместе с тем, каплям щёлока необходимо высохнуть за время пребывания в топочном объёме и иметь влажность 3–5% при падении в «подушку» огарка. Распыл щёлока оказывает существенное влияние на топочный процесс, а также в значительной мере определяет условия сушки и формирование горящего слоя огарка на поду. Ухудшение распыла и образование струй щёлока приводит к снижению эффективности процесса горения, уменьшению температуры в топке, росту «подушки» огарка, забиванию первичных воздушных сопел. Слишком тонкое диспергирование щёлока ускоряет сушку и выгорание капель в объёме, увеличивает механический унос, затрудняет формирование «подушки» огарка.

Процессы, происходящие в топке при сжигании чёрного щёлока, условно делятся на три стадии [4].

Первая стадия — подсушка щёлока под действием горячих топочных газов — осуществляется после впрыскивания щёлока в топку. Одновременно с подсушкой щёлока происходит взаимодействие щёлока с кислыми компонентами дымовых газов.

Вторая стадия — пиролиз и коксование органической части щёлока — начинается в объёме топочной камеры при влажности меньше 15%. При пиролизе выделяется значительное количество летучих органических веществ, в том числе и соединений восстановленной серы (сероводород H_2S , метилмеркаптан CH_3SH , диметилсульфид $(CH_3)_2S$ и др.). С удалением остатков влаги скорость пиролиза органической части щёлока увеличивается, и к началу третьей стадии примерно половина начального количества углерода присутствует в виде кокса.

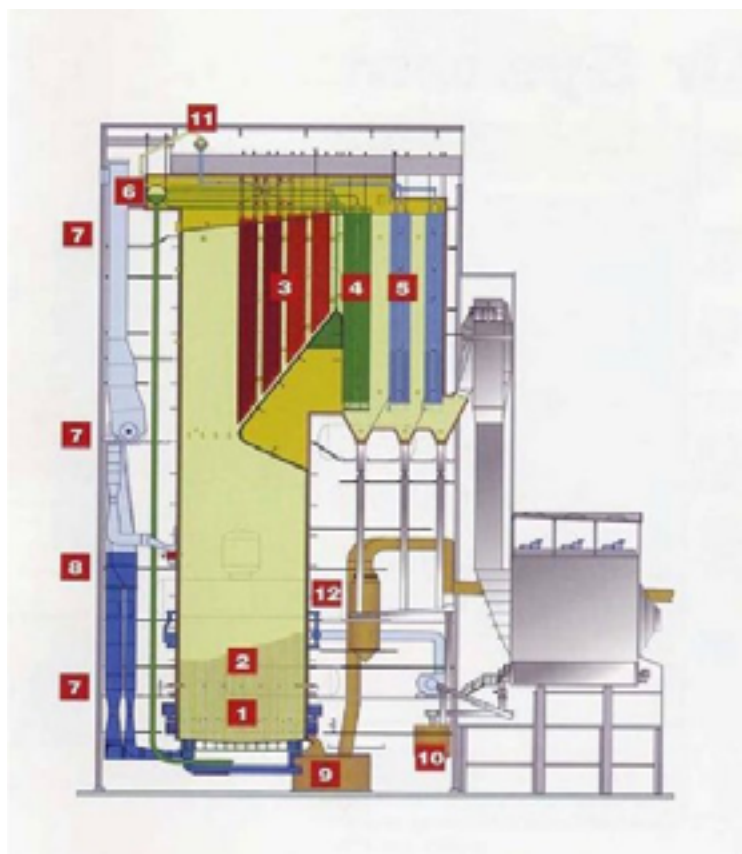
Во время **третьей стадии** на поду топки происходит выжигание кокса и расплавление всех оставшихся минеральных солей. В этой стадии осуществляется восстановление сульфата натрия, добавляемого в щёлок для возмещения производственных потерь химикатов. Расплавленные минеральные соли по лёткам выводятся в бак-растворитель плава.

Восстановление сульфата требует соответствующей восстановительной атмосферы, в связи с чем в нижнюю часть топочной камеры подаётся только часть воздуха, необходимого для горения (до 60%). Остальной воздух вводится в среднюю часть топки, где формируется окислительная зона, необходимая для дожигания летучих органических соединений, образующихся в процессе пиролиза.



Рисунок 1. Основные компоненты содорегенерационного котла: 1 — нижняя часть топки с отверстиями для первичного воздуха и расположенными по вертикали отверстиями для вторичного воздуха; а также с пусковыми горелками; 2 — средняя и верхняя часть топки с распылительными щелочовыми форсунками и расположенными по вертикали отверстиями для третичного воздуха; 3 — размещенные с большими промежутками тангенциальные пароперегреватели панельного типа; 4 — вертикальная противоточная парогенерирующая секция; 5 — вертикальные экономайзеры из оребренных труб; 6 — паровой барабан; 7 — вентиляторы воздуха для горения и воздухоподогреды; 8 — воздухоподогреватели; 9 — бак-растворитель; 10 — мешальный чан; 11 — конденсатор пресной воды; 12 — бак питательной воды

Figure 1. Main components of a soda recovery boiler: 1 — lower part of the furnace with primary air ports and vertically arranged secondary air ports, as well as start-up burners; 2 — middle and upper sections of the furnace, equipped with black liquor spray nozzles and vertically arranged tertiary air ports; 3 — tangentially oriented panel superheaters, positioned with significant intervals between them; 4 — vertical counterflow steam-generating section; 5 — vertical finned-tube economizers; 6 — steam drum; 7 — combustion air fans and air ducts; 8 — air heaters; 9 — dissolving tank; 10 — blending tank; 11 — fresh water condenser; 12 — feedwater tank



Исходя из стадийности и ступенчатости процесса сгорания и регенерации щёлока во всех агрегатах, принята следующая схема организации топочного процесса:

- Воздух подводится ступенчато.
- Процесс горения протекает в основном в активной зоне топочного объема, расположенной в пределах от пода топки до уровня форсунок. При этом движение распыленного топлива и воздуха оказывается противоточным: капли щёлока падают вниз навстречу восходящему потоку воздуха и продуктов сгорания.
- При испарении влаги из капель образуются хлопья сухого щёлока. Наиболее мелкие частицы уносятся газовоздушным потоком в верхнюю часть топочной камеры и далее в газоходы котла. Более крупные частицы падают на под и сгорают в нижней части топки и в слое огарка.

Теоретическая температура горения щёлока и стабильность факела зависят в основном

от температуры воздуха, влажности щёлока и коэффициента избытка воздуха. В большинстве современных агрегатов коэффициент избытка воздуха в активной зоне топочного объема близок к единице, а температура воздуха, поступающего в топку, находится в пределах 130–180 °С. Влажность щёлока перед форсунками в современных СРК порядка 25–30 % [2, 4].

Сложность организации топочного процесса вызывает проблемы при проектировании топок СРК. В настоящее время отсутствуют утверждённые методики выполнения подобных расчётов. Рекомендуемая методика расчета топок паровых котлов [1], к сожалению, не учитывает сочетания слоевого и камерного сжигания, что имеет место в топках СРК.

Поэтому, авторами предлагается вариант расчёта топки СРК, основанный на теоретических и экспериментальных исследованиях [3].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основной радиационной характеристикой продуктов сгорания служит критерий поглощательной способности (критерий Бугера):

$$Bu = kps, \quad (1)$$

где k — коэффициент поглощения топочной среды, $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$, рассчитывается по температуре и составу газов на выходе из топки. При его определении



учитывается излучение трехатомных газов и водяных паров (RO_2 , H_2O) и взвешенных в их потоке частиц сажи, летучей золы и кокса;

p — давление в топочной камере, МПа;

s — эффективная толщина излучающего слоя, м.

При расчёте критерия Bu принимается, что при сжигании основными излучающими компонентами являются газообразные продукты сгорания (RO_2 , H_2O), взвешенные в их потоке сажевые частицы, и взвешенные в их потоке частицы золы. Относительное заполнение топочной камеры светящимся пламенем (частицами сажи) характеризуется коэффициентом m .

При сжигании щёлока в газоплотных котлах $m=0,3$; для негазоплотных котлов $m=0,6$ [1].

Расчёт проводится по формуле:

$$k = k_e + m \cdot k_c + k_{\text{эл}} \cdot \mu_{\text{эл}}, 1/(\text{м} \cdot \text{МПа}). \quad (2)$$

Коэффициент поглощения лучей газовой фазой продуктов сгорания (RO_2 , H_2O):

$$k_g = \left(\frac{7,8 + 16r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{10 \cdot p \cdot r_n \cdot s}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,37 \cdot 10^{-3} \cdot T_m'') \cdot r_n, 1/(\text{м} \cdot \text{МПа}), \quad (3)$$

где $r_n = r_{\text{RO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}}$ — суммарная объёмная доля трехатомных газов и водяных паров в продуктах сгорания; T_m'' — температура газов на выходе из топки, К.

Коэффициент поглощения лучей частицами сажи:

$$k_c = \frac{1,2}{1 + \alpha_m^2} \cdot \left(\frac{C^r}{H^r} \right)^{0,4} \cdot (1,6 \cdot 10^{-3} \cdot T_m'' - 0,5), 1/(\text{м} \cdot \text{МПа}), \quad (4)$$

где α_m^2 — коэффициент избытка воздуха на выходе из топки;

T_m'' — температура газов на выходе из топки, К;

C^r/H^r — соотношение углерода и водорода в рабочей массе топлива.

Коэффициент поглощения лучей частицами золы:

$$k_{\text{эл}} \cdot \mu_{\text{эл}} = \frac{10^4 \cdot A_{\text{эл}}}{\sqrt[3]{(T_m'')^2}} \cdot \frac{\mu_{\text{эл}}}{1 + 1,2 \mu_{\text{эл}} \cdot S}, 1/(\text{м} \cdot \text{МПа}), \quad (5)$$

где $\mu_{\text{эл}}$ — концентрация золы в продуктах сгорания, кг/кг.

Коэффициент $A_{\text{эл}}$ для топок с жидким шлакоудалением принимается для щёлока равным 0,85 [1].

Методика расчёта суммарного теплообмена в топке базируется на приложении теории подобия к топочному процессу. Основными параметрами, определяющими безразмерную температуру газов на выходе из топки, являются критерий радиационного теплообмена

Больцмана (Bo) и критерий поглощательной способности Бугера (Bu). Вид функциональной зависимости, связывающий между собой эти параметры, установлен на основании опытных данных по теплообмену в топках энергетических котлов [1, 5].

Учёт влияния на теплообмен неізотермичности температурного поля топки и эффекта рассеяния излучения обеспечивается использованием эффективного значения критерия Bu' [1].

Эффективное значение критерия Бугера Bu' определяется по формуле:

$$Bu' = 1,6 \cdot \ln \left(\frac{1,4 Bu^2 + Bu + 2}{1,4 Bu^2 - Bu + 2} \right). \quad (6)$$

Безразмерная температура газов на выходе из топочной камеры:

$$\theta_m'' = \frac{T_m''}{T_a} = \frac{Bo^{0,3}}{MBu'^{0,3} + Bo^{0,6}}, \quad (7)$$

где T_a — адиабатическая температура горения топлива, К; M — параметр, учитывающий влияние относительного уровня расположения горелок, степени забалластированности топочных газов и других факторов на интенсивность теплообмена.

Формула справедлива в области значений $\theta_m'' \leq 0,9$.

Критерий Bo рассчитывается по формуле:

$$Bo = \frac{\phi B_p (Vc)_{cp}}{\sigma_0 \Psi_{cp} F_{cm} T_a^3}, \quad (8)$$

где B_p — расчетный расход топлива, кг/с;

F_{cm} — поверхность стен топки, м;

$(Vc)_{cp}$ — средняя суммарная теплоёмкость продуктов сгорания 1 кг топлива в интервале температур (кДж/(кг·К));

Ψ_{cp} — среднее значение коэффициента тепловой эффективности экранов;

ϕ — коэффициент сохранения тепла;

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-11}$ кВт/(м²·К⁴) — коэффициент излучения абсолютно чёрного тела.

Для топок СРК параметр M целесообразно рассчитывать по формуле как для слоевых топок ($x_s=0$), но с учётом ступенчатого сжигания топлива, когда учитывается зависимость температуры газов на выходе из топки от доли третичного воздуха $g_{\text{тр.в}}$

$$M = 0,46(1 + \rho)(1 - 0,45 g_{\text{тр.в}}) \sqrt[3]{\frac{V_z}{V_{N_2}^0 + V_{\text{RO}_2}}}, \quad (9)$$



где $\rho = \frac{R}{F_{cm}}$ — соотношение между поверхностью R зеркала горения (слоя) и поверхностью стен топки F_{cm} .

Коэффициент тепловой эффективности экранов равен произведению углового коэффициента экрана x на коэффициент ξ , учитывающий тепловое сопротивление загрязнения или закрытие изоляцией

$$\Psi = x \cdot \xi.$$

Коэффициент ξ , учитывающий снижение тепловосприимчивости экрана при его загрязнении, рекомендуется принимать равным 0,35 (И. Ш. Глейзер принимает 0,282 [2]).

Температура газов на выходе из топки определяется по формуле

$$t_m'' = \frac{T_a}{M \cdot Bu^{0,3} \left(\frac{5,67 \cdot 10^{-11} \Psi_{cp} \cdot F_{cm} \cdot T_a^3}{\phi \cdot B_p \cdot V_{cp}} \right)^{0,6}} - 273. \quad (10)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотренная методика была использована при выполнении тепловых расчетов содорегенерационных котлов, работающих в условиях действующих предприятий. Расчетные значения температуры продуктов сгорания на выходе из топок данных агрегатов были сравнены с производственными данными. Результаты сравнения представлены в таблице 1.

Сравнение результатов с эксплуатационными данными действующих котлов показало расхождение не более 3,5%, что свидетельствует о высокой достоверности разработанной методики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показал опыт выполнения поверочных расчетов действующих котлов, расчетные значения температуры газов на выходе из топки, полученные по данной методике, с достаточной точностью соответствуют реальным значениям температуры.

Проведённые исследования позволили выявить и систематизировать особенности теплового расчёта топки содорегенерационного котла (СРК), отличающие его от существующей методики расчета энергетических и промышленных котлов. Основная специфика методики связана с многостадийным характером сжигания чёрного шёлока, сочетанием факельного и слоевого способов сжигания, а также с наличием в топочном объёме взвешенных частиц кокса, золы и сажи, существенно влияющих на радиационно-конвективный теплообмен.

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований температуры газов на выходе из топки

Table 1. Results of experimental studies of the flue gas temperature at the furnace outlet

Предприятие, тип СРК	Температура газов на выходе из топки, °С	
	Измерение	Расчет
АО Усть-Илимский ЛПК		
СРК 1400	897	924
СРК 1932	932	948
АО Братский ЛПК		
СРК 1750, ст. № 12	897	906
СРК 3000, ст. № 14	980	1013
Байкальский ЦБК		
СРК 380	921	942
АО Сегежский ЦБК		
СРК 770	1023	1012
СРК 625	986	1005

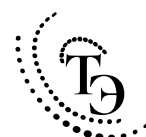
Предложенная методика может быть использована в качестве основы для разработки инженерных программ для расчёта и оптимизации тепловых процессов в содорегенерационных котлах.

Список литературы

1. Тепловой расчёт котлов (Нормативный метод). Изд. 3-е, перераб. и доп. СПб.: НПО ЦКТИ, 2016. 127 с.
2. Глейзер И. Ш. Котлы энерготехнологических и тепловых электростанций. М.: Книга, 2010. 245 с.
3. Смородин С. Н. Исследование топочных процессов при сжигании сульфатного щелока в вихревой топке содорегенерационного котлоагрегата с целью повышения ее эффективности: дис.... канд. техн. наук. СПб., 2000. 112 с.
4. Смородин С. Н., Иванов А. Н., Белоусов В. Н. Сдорегенерационные котлоагрегаты: учебное пособие. СПб.: СПбГТУРП, 2010. 164 с.
5. Henrion L., et al. A detailed experimental and modeling comparison of molecular radiative heat transfer // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Vol. 189. Pp. 123–136. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2022.123136.

References

1. Thermal Calculation of Boilers (Regulatory Method). 3rd ed., revised and supplemented. St. Petersburg: NPO TsKTI, 2016. 127 p.
2. Gleyzer I. Sh. Boilers of Energy-Technological and Thermal Power Plants. Moscow: Kniga, 2010. 245 p.
3. Smorodin S. N. Study of Furnace Processes During the Combustion of Sulfate Liquor in a Swirl Furnace of a Soda Recovery Boiler Unit to Improve Its Efficiency: PhD Dissertation (Engineering). St. Petersburg, 2000. 112 p.



4. Smorodin S. N., Ivanov A. N., Belousov V. N. Soda Recovery Boiler Units: Textbook. St. Petersburg: SPbGTURP, 2010. 164 p.
5. Henrion L., et al. A detailed experimental and modeling comparison of molecular radiative heat transfer. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Vol. 189. Pp. 123–136. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2022.123136.

■ Информация об авторах

Живаева Кристина Геннадьевна, аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; e-mail: aleksandrisakevik@gmail.com, e-mail zhivaeva_k@bk.ru.

Сморodin Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики Высшей школы технологии и энергетики

Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; e-mail: pte.gturp@mail.ru.

Белouсов Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; e-mail: pte.gturp@mail.ru.

■ Information about the authors

Zhivaeva Kristina Gennadyevna, PhD student of the Department of Industrial Thermal Power Engineering Productions of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; e-mail: aleksandrisakevik@gmail.com, e-mail: zhivaeva_k@bk.ru.

Smorodin Sergey Nikolaevich, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial Heat Power Engineering, Higher School of Technology and

Power Engineering, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Russia, Saint Petersburg, 4 Ivan Chernykh St.; e-mail: pte.gturp@mail.ru.

Belousov Vladimir Nikolaevich, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial Heat Power Engineering, Higher School of Technology and Power Engineering, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Russia, Saint Petersburg, 4 Ivan Chernykh St.; e-mail: pte.gturp@mail.ru.

