

СОВМЕСТНОЕ СЖИГАНИЕ КАМЕННОГО УГЛЯ С БИОТОПЛИВОМ

Древесина и побочные продукты ее обработки и переработки являются возобновляемым источником энергии с нейтральным уровнем эмиссии углерода и могут быть эффективно использованы в решении энергетических проблем. Совместное сжигание каменных углей и биомассы является самым низкостратным способом сокращения выбросов парниковых газов на угольных электростанциях. В данной работе представлены результаты расчетного анализа совместного сжигания каменного угля и биотоплив (биоугля и древесных опилок) в котлоагрегатах ПК-10, модернизированных на низкоэмиссионную вихревую технологию сжигания.

Котельная установка, топливо, биоуголь, эмиссия вредных веществ, топка, потери тепла.

Wood and byproducts of wood processing are renewable energy sources which are carbon-neutral and may be effectively used in solving of energy problems. Co-combustion of coals and biomass is the low-cost way to reduce emissions of greenhouse gases by coal-fired power plants. This paper presents the results of the design analysis of co-firing of coal and biofuels (biocoal and sawdust) in the steam boiler PK-10, upgraded to low-emission swirl combustion technology.

Boiler plant, fuel, biocoal, emission of harmful substances, furnace, heat losses.

Введение

Мировое потребление каменного угля составляет около 7,0 млрд т в год и продолжает расти. Широкое использование углей вызывает загрязнение атмосферы оксидами серы и азота, бенз(а)пиреном, твердыми частицами, а их вклад в выбросы углекислого газа, вызывающего «парниковый» эффект, составляет более 40 %.

Побочные продукты, образующиеся на всех этапах технологических процессов обработки и переработки древесины, могут быть промышленно использованы в различных направлениях без нарушения экологического равновесия. В индустриально развитых странах для уменьшения воздействия «парниковых» газов на климат планеты активно поощряется замена ископаемых топлив биотопливом. Одним из перспективных направлений данного процесса является совместное сжигание углей и твердых видов топлива из растительной биомассы.

В Европе и Северной Америке на ТЭС, где основным видом топлива является уголь, все чаще используют для совместного сжигания биомассу, в основном древесные и биоугольные гранулы, что способствует развитию биотопливного рынка. Примерно половина из ежегодно производимых в мире гранул используется на ТЭС для выработки электроэнергии.

Торрефикация твердой биомассы основывается на ее термической обработке без доступа воздуха при температурах 250–330 °С. В результате данного процесса получают биоуголь, который может использоваться в порошкообразном виде или для производства пеллет и брикетов. Процесс торрефикации позволяет максимально приблизить свойства биомассы к свойствам энергетического угля. Разная степень термической обработки приводит к разному выходу и разной теплотворной способности готового продукта. Теоретически теплотворная способность торрефиката составляет от 18 до 31 МДж/кг (теплотворная способность древесного угля). Использовать

в качестве энергетического топлива древесный уголь, как правило, не имеет смысла, так как при его производстве теряется слишком много исходной энергии биомассы и топливо получается слишком дорогим. Поэтому при проведении торрефикации стараются найти оптимальный режим, который позволяет добиться наивысшей теплотворной способности при наименьшей потере исходной энергии.

Торрефицированные гранулы обладают хорошей сыпучестью и прочностью, не пылят при перевозке, гидрофобны, подчиняются тем же законам измельчения, что и угли. Высокая энергетическая плотность определяет экономическую обоснованность их транспортировки на большие расстояния. По всем параметрам торрефицированные гранулы превосходят древесные пеллеты. Замена ими угля не приводит к снижению производительности котлов и не требует модернизации системы топливоприготовления.

Станционная энергетика нашей страны, как и других промышленно развитых стран, базируется на преимущественном использовании схемы прямооточного пылеугольного факела различной модификации, которая позволила успешно решить многие проблемы энергетики и обеспечить ее современный уровень. Однако повышенная взрывоопасность систем пылеприготовления, эмиссия значительных количеств вредных веществ в высокотемпературной зоне горения, шлакование поверхностей нагрева заставляют искать новые решения в котельно-топочной технике.

Основная часть

Одним из направлений комплексного повышения технико-экономических и экологических показателей работы котлов является их перевод на низкоэмиссионную вихревую технологию сжигания. Основные принципы построения вихревого топочного процесса изложены в работах В.В. Померанцева и его школы [3], [5]–[7] и были промышленно под-

тверждены при модернизации более семидесяти котлоагрегатов в РФ, Польше, США и Чехии.

Все низкоэмиссионные топочные устройства должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) обеспечивать низкотемпературный топочный процесс;
- 2) допускать рассредоточенную подачу топлива и воздуха;
- 3) обеспечивать высокую экономичность при малых избытках воздуха;
- 4) допускать ввод сорбентов для обеспечения сероочистки дымовых газов [2]–[4].

Низкоэмиссионная вихревая технология, сохраняя принципы традиционного пылеугольного сжигания, за счет более эффективной аэродинамики топочного процесса обеспечивает выполнение всех ранее указанных требований, кроме этого, невысокие затраты на ее реализацию позволяют получить период окупаемости не более двух лет, а в некоторых случаях – несколько месяцев. Низкоэмиссионные вихревые топки имеют две зоны горения: вихревую низкотемпературную, занимающую нижнюю часть топки и традиционную прямоточную часть, располагающуюся выше горелочных устройств. Аэродинамику вихревой зоны определяет взаимодействие двух потоков – горелочного и нижнего дутья. В результате сепарации топлива из горелочных струй в нижнюю вихревую зону устройство нижнего дутья превращается в своеобразную горелку, зона действия которой распространяется на всю ширину топочной камеры. Вращательное движение газовых потоков обеспечивает многократную принудительную циркуляцию топливных частиц в вихревой зоне, увеличивая тем самым время их пребывания в топке. Распределение горения топлива по всему объему топки, активная внутри топочная циркуляция газовых потоков выравнивают температурные и тепловые поля, повышая коэффициент тепловой эффективности топочных экранов. Наличие вихревой зоны с многократной циркуляцией в ней топливных частиц обеспечивает выгорание топлива угрубленного помола и даже немолотого топлива, а также снижает требования к его качеству.

Интенсивная загрузка вихревой зоны топливом, отсепарированным из горелочных струй, позволяет поддерживать избыток воздуха в данной зоне ниже стехиометрического. Пониженный уровень температур и малые избытки воздуха обеспечивают низкую генерацию оксидов азота, а зоны с полувосстановительной средой способствуют распаду уже образовавшихся оксидов. На всех модернизированных котлоагрегатах эмиссия оксидов азота при сжигании каменных углей не превышала 170 г/ГДж [2], [4].

Таким образом, вихревая технология низкоэмиссионного сжигания реализует схему ступенчатого горения топлива, широко применяемую в мировой практике, но обладает рядом существенных особенностей:

- конструкция горелочных устройств предполагает минимальный объем реконструкции и не требует применения специальной автоматики;
- хорошее перемешивание топлива и окислителя в нижней вихревой зоне и в зоне дожигания позволяет обеспечить экономичную работу котлов с более низкими, чем до модернизации, значениями коэффициента избытка воздуха на выходе из топки ($\alpha_r = 1,12 \dots 1,15$) без увеличения эмиссии оксида углерода.

Положительный опыт эксплуатации модернизированных котлоагрегатов позволил выполнить реконструкцию трех котлов ПК-10 Северодвинской ТЭЦ-1 (СТЭЦ-1) на низкоэмиссионную технологию сжигания углей [5], [6]. Данные котлы имеют естественную циркуляцию, П-образную компоновку с призматической топкой размерами по осям труб 7600×9785 мм, с твердым шлакоудалением (рис. 1). Паропроизводительность котла – 220 т/ч, давление перегретого пара 10 МПа, температура 540 °С и температура питательной воды 215 °С.

В шлаковом бункере размещается устройство нижнего дутья, состоящее из сопла и дефлектора. Струя воздуха из сопла поступает на нижнюю кромку дефлектора, двигаясь вдоль которого меняет свое направление и выходит в одной полутопке вдоль фронтального, а в другой вдоль заднего ската холодной воронки (рис. 1).

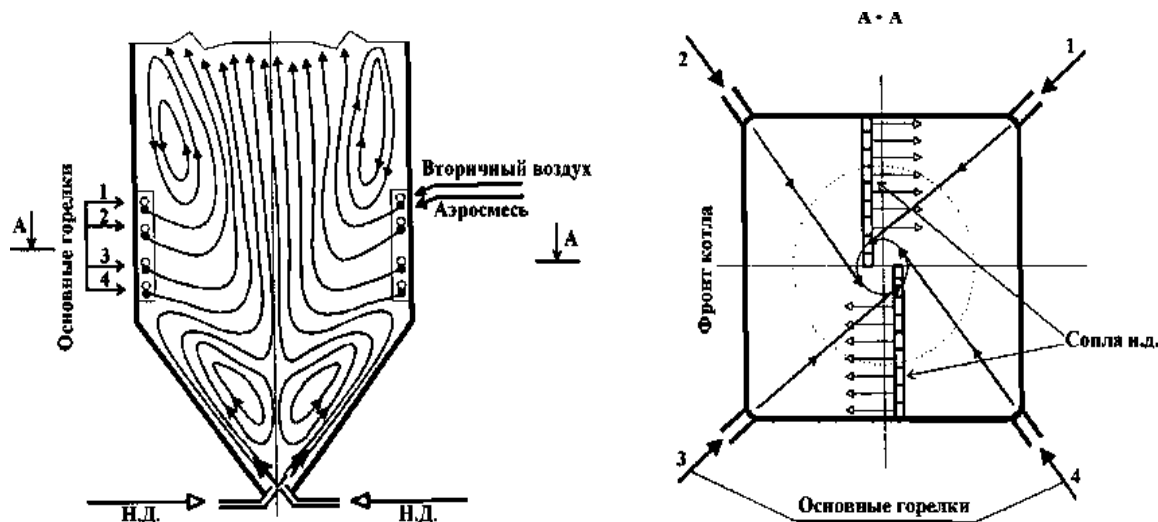


Рис. 1. Организация низкоэмиссионного вихревого сжигания

Горелки расположены в существующих амбразурах. Под соплами вторичного воздуха в четыре яруса размещаются сопла аэросмеси, имеющие индивидуальный наклон в нижнюю часть топки. Все элементы горелочного блока расположены на одной вертикальной оси и направлены тангенциально к воображаемой окружности диаметром 1 м в центре топки.

Котлоагрегаты оборудованы индивидуальными замкнутыми системами пылеприготовления с шаровыми барабанными мельницами, промежуточными пылевыми бункерами, центробежными сепараторами, циклонами, мельничными вентиляторами и др.

Исследование гранулометрического состава угольной пыли показало, что средние значения коэффициента полидисперсности и коэффициента, характеризующего тонкость гранулометрического состава, составляют: $n = 0,794$; $b = 0,048$.

На текущий момент совместное сжигание каменных углей и биомассы является самым низкзатратным способом сокращения выбросов парниковых газов на угольных ТЭС, а низкоэмиссионная вихревая технология сжигания значительно расширяет его возможности.

Для оценки эффективности совместного сжигания каменного угля и биомассы были выполнены тепловые, аэродинамические и технико-экономические расчеты котла ПК-10 СТЭЦ-1 для номинальной нагрузки. Несмотря на то, что станция получает каменные угли трех месторождений, в расчеты были заложены характеристики интинского угля, так как уголь данного месторождения относится к наиболее трудносжигаемым и низкокалорийным в условиях СТЭЦ-1. При этом рассматривались два варианта: первый – совместное сжигание каменного и биоугля; второй – каменного угля и древесных опилок. При использовании опилок в качестве добавки к интинскому длиннопламенному углю для каждого котлоагрегата дополнительно монтируется бункер и питатель сырого топлива, эжекторная система с разводкой около котла на две линии, идущие к встречно-смешенным, наклоненным вниз топкам под углом 20° горелкам, расположенным на боковых экранах.

Элементный состав и низшая теплота сгорания имели следующие значения: уголь – влажность $W^r = 11,0\%$; зольность $A^r = 25,4\%$; $C^r = 47,7\%$; $H^r = 3,2\%$; $S^r_{\text{оп+к}} = 2,6\%$; $N^r = 1,3\%$; $O^r = 8,8\%$; теплотворная способность $Q^r_i = 18,31$ МДж/кг; выход летучих веществ на горючую массу $V^{\text{daf}} = 40\%$; биоуголь – $W^r = 4,0\%$; $A^r = 1,61\%$; $C^r = 57,6\%$; $H^r = 6,72\%$; $N^r = 0,53\%$; $O^r = 29,54\%$; $Q^r_i = 22,21$ МДж/кг; $V^{\text{daf}} = 65\%$; опилки ели – $W^r = 50,0\%$; $A^r = 0,54\%$; $C^r = 25,71\%$; $H^r = 3,75\%$; $N^r = 0,17\%$; $O^r = 19,83\%$; $Q^r_i = 8,04$ МДж/кг; $V^{\text{daf}} = 85,40\%$.

Тепловые расчеты котлоагрегата при совместном сжигании интинского угля и биомассы выполнялись при разной доле биомассы по тепловыделению. При прямом совместном сжигании, предполагающем одновременную подготовку, измельчение и подачу угля и биоугля в топочную камеру котла, доля торрефицированной биомассы по тепловыделению составляла: $q_1 = 0; 30; 50; 70\%$.

При совместном сжигании угля и опилок ели обеспечивается индивидуальная подготовка и подача угля и биомассы. Доля биомассы по тепловыделению составляла: $q_1 = 0; 10; 20; 30\%$. Реализованная низкоэмиссионная вихревая технология сжигания не требует дополнительного измельчения опилок. Исследование гранулометрического состава еловых опилок показало, что $n = 1,541$; $b = 7,5 \cdot 10^{-6}$. Таким образом, древесное топливо имеет более однородный и более крупнодисперсный состав, чем каменный уголь, прошедший измельчение в системе пылеприготовления с шаровыми барабанными мельницами.

Тепловые расчеты котлоагрегата на совместное сжигание угля и биотоплива выполнялись по методике [8] с учетом кратности циркуляции топливных частиц в вихревой зоне, особенностей установки горелочных устройств, гранулометрического состава топлива и снижения загрязнения поверхностей нагрева [1].

При увеличении доли биоугля влажность и зольность топливной смеси снижаются, а теплотворная способность повышается (рис. 2а). Сжигание такой смеси позволяет снизить потери тепла с уходящими газами (q_2) и полный расход топливной смеси (B), а также обеспечить повышение КПД брутто котлоагрегата до $\eta_{\text{ка}} = 92,0\%$. Условия теплообмена и характеризующий их критерий Стентона изменяются незначительно.

Замещение каменного угля торрефицированной биомассой позволяет значительно снизить выбросы углекислого газа. Для СТЭЦ-1 при среднегодовой нагрузке котлоагрегатов 75% от номинальной и тепловой доле биоугля в топливной смеси 70% снижение выбросов углекислого газа составит более 1 млн 630 тыс. т в год. Однако для этого потребуется закупка 1799844 т биоугля. Учитывая, что рынок биоугля в РФ только в начале своего формирования, так как в 2015 г. ОАО «Бионет» был запущен первый в стране (в Архангельской области) завод по производству торрефицированных гранул из гидролизного лигнина проектной мощностью 150 тыс. т в год. Исходя из транспортной логистики, возможным потребителем данной продукции могла бы быть СТЭЦ-1. При этом средняя доля биоугля по тепловыделению в топливной смеси с учетом теплотехнических характеристик торрефицированных гранул из гидролизного лигнина и проектной мощности завода составила бы $5,6\%$ ($4,84\%$ массовая доля).

Совместно сжигание каменного угля и торрефицированной биомассы позволит также уменьшить валовые выбросы твердых частиц и сернистого газа. При тепловой доле биоугля 70% это снижение составит соответственно в 2,75 и 3,43 раза.

Анализ совместного сжигания интинского угля и древесных опилок показал, что при увеличении доли биотоплива влажность топливной смеси повышается, а зольность и теплотворная способность снижаются (рис. 2б). Сжигание такой смеси увеличивает потери тепла с уходящими газами и полный расход топливной смеси.

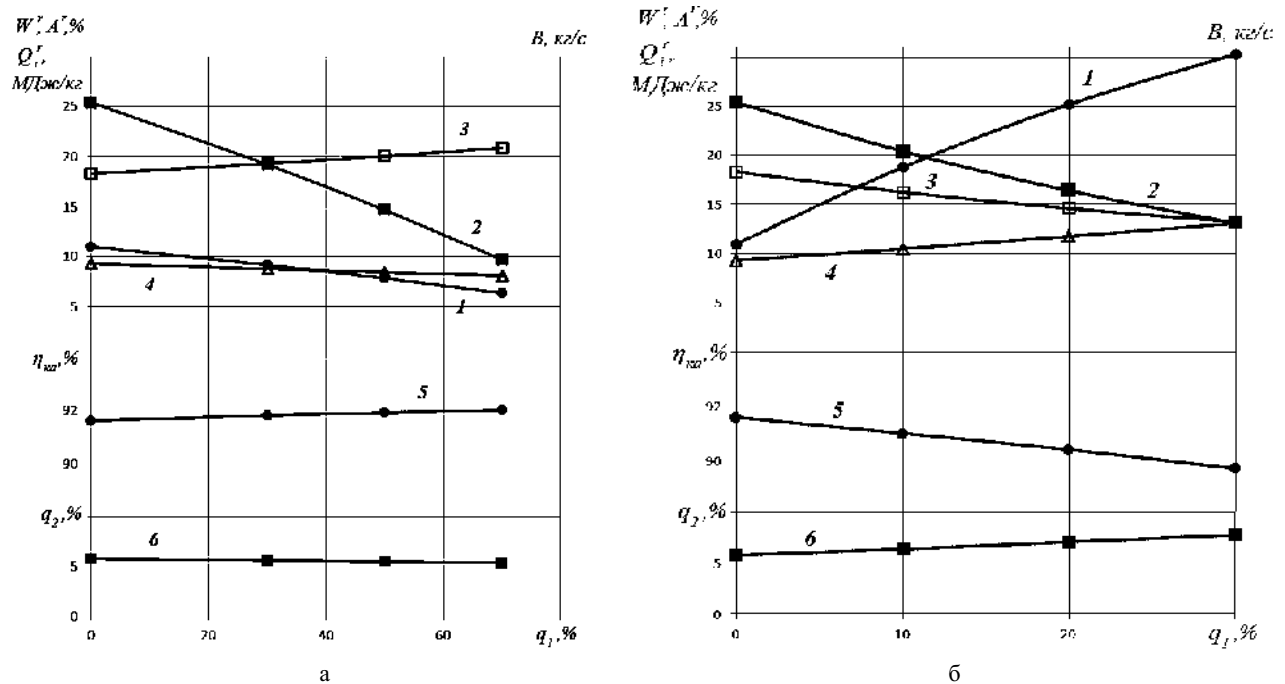


Рис. 2. Влияние доли биоугля (а) и опилок (б) в топливной смеси на ее теплотехнические характеристики и показатели работы котла: 1 – W^r ; 2 – A^r ; 3 – Q_{tr}^r ; 4 – B ; 5 – $\eta_{ка}$; 6 – q_2

Снижение КПД брутто котлоагрегата при тепловой доле древесных опилок 30 % составляет около 2 % (рис. 26). Условия теплообмена меняются, при этом теоретическая температура горения снижается почти на 200 °С, а значения критерия Стентона с 0,565 до 0,48. Дополнительное моделирование топочного процесса котла ПК-10 показало, что увеличение тепловой доли древесных опилок до 30 % (49,4 % массовая доля) вызывает опасность «завала» дефлекторного устройства нижнего дутья. Поэтому с позиции надежной и экономичной работы котлоагрегата следует ограничить долю опилок по тепловыделению в топливной смеси 20 % (36,3 % массовая доля). Для СТЭЦ-1 при среднегодовой нагрузке котлоагрегатов 75 % от номинальной и тепловой доле древесных опилок в топливной смеси 20 % снижение выбросов углекислого газа составит более 440 тыс. т в год. Однако для этого потребуется закупка 607383 т древесных опилок.

Частичное замещение каменного угля древесными опилками позволит уменьшить валовые выбросы твердых частиц и сернистого газа. При тепловой доле опилок 20 % это снижение составит соответственно в 1,34 и 1,40 раза. Однако увеличивается расход энергии на тягу, что вызовет необходимость замены дымососов.

Выводы:

1. Совместное сжигание каменных углей и биомассы является самым низкзатратным способом сокращения выбросов парниковых газов на угольных электростанциях, а низкоэмиссионная вихревая технология сжигания значительно расширяет его возможности, обеспечивая наиболее эффективное обеспечение энергетических потребностей.
2. Расчетный анализ показал возможность эффективного прямого совместного сжигания каменного

угля и биоугля в топочных камерах котлоагрегатов ПК-10 СТЭЦ-1 без внесения изменений в систему топливоприготовления. Совместное сжигание каменных углей и торрефицированных гранул из гидролизного лигнина ОАО «Бионет» (проектная мощность 150 тыс. т в год) на СТЭЦ-1 позволит снизить выбросы углекислого газа более чем на 130 тыс. т в год. Кроме этого, появляется возможность существенного уменьшения валовых выбросов твердых частиц и сернистого газа.

3. Расчетные и экспериментальные исследования показали возможность эффективного совместного сжигания каменного угля и древесных опилок, с тепловой долей в смеси до 20 %, в топочных камерах котлоагрегатов ПК-10, модернизированных на низкоэмиссионную вихревую технологию сжигания. При этом котлоагрегат дополнительно оснащается бункером и питателем сырого топлива, системой подачи немолотых опилок в горелочные устройства, расположенные на боковых экранах, также проводится замена дымососа. Совместное сжигание каменных углей и древесных опилок в условиях СТЭЦ-1 создает возможность снижения выбросов углекислого газа на 440 тыс. т в год, а также уменьшения валовых выбросов твердых частиц и сернистого газа соответственно в 1,34 и 1,40 раза.

Литература

1. Любов В.К. Поверочный расчет котельных агрегатов. Архангельск, 2004. 160 с.
2. Любов В.К., Дьячков В.А., Финкер Ф.З., Кубышкин И.Б. Влияние схемы организации топочного процесса на степень очистки газов в электрофильтрах // Повышение эффективности энергетических систем и оборудования: Сб. науч. тр. к 70-летию АГТУ. Архангельск, 1999. С. 100–105.

3. Любов В.К., Любова С.В. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив. Архангельск, 2010. 496 с.

4. Любов В.К., Финкер Ф.З., Кубышкин И.Б. Повышение эффективности сжигания углей // Повышение эффективности теплообменных процессов и систем: Материалы III международной научно-технической конфер. Вологда. 2002. С. 125–131.

5. Пат. 2067724 Российская Федерация. Низкоэмиссионная вихревая топка / Финкер Ф.З., Ахмедов Д.Б., Кубышкин И.Б. и др., патентообладатель МГВП «Политехэнерго». – № 94045164/06, заявл. 29.12.1994; опубл. 10.10.1996.

6. Пат. 2154234 Российская Федерация. Топка / Финкер Ф.З., Кубышкин И.Б., Бахтинов Ю.П., патентообладатель МГВП «Политехэнерго». № 99109062/06, заявл. 23.04.1999; опубл. 10.08.2000.

7. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. и др. Основы практической теории горения. Л., 1986. 312 с.

8. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). М., 1973. 296 с.

References

1. Liubov V.K. *Poverochnyi raschet kotel'nykh agregatov* [Checking calculation of boilers]. Arkhangel'sk, 2004. 160 p.
2. Liubov V.K., D'iachkov V.A., Finker F.Z., Kubyshekin I.B. *Vliianie skhemy organizatsii topochного protsessа na stepen' ochistki gazov v elektrofil'trah* [Influence of schemes of

the furnace process to the degree of gas cleaning in electrostatic precipitators]. *Povyshenie effektivnosti energeticheskikh sistem i oborudovaniia: Sb. nauch. tr. k 70-letiiu AGTU* [Improving the efficiency of energy systems and equipment: Coll. scientific. tr. the 70th anniversary ASTU]. Arkhangel'sk, 1999. pp. 100–105.

3. Liubov V.K., Liubova S.V. *Povyshenie effektivnosti energeticheskogo ispol'zovaniia biotopliv* [Improving the efficiency of energy use of biofuels]. Arkhangel'sk, 2010. 496 p.

4. Liubov V.K., Finker F.Z., Kubyshekin I.B. *Povyshenie effektivnosti szhiganiia uglei* [Improving the efficiency of coal combustion]. *Povyshenie effektivnosti teploobmennyykh protsessov i sistem: Materialy III mezhduнародnoy nauchno-tekhnicheskoi konferencii* [Improving the efficiency of heat exchange processes and systems: Materials III International Scientific and Technical Conference]. Vologda, 2002, pp. 125–131.

5. Finker F.Z., Akhmedov D.B., Kubyshekin I.B. *Rossiiskaia Federatsiia. Nizkoemissionnaia vikhrevaia topka* [Low-emission swirl burner]. Patent RF, no. 2067724.

6. Finker F.Z., Kubyshekin I.B., Bakhtinov Yu.P. *Topka* [Furnace]. Patent RF, no. 2154234.

7. Pomerantsev V.V., Arefev K.M., Akhmedov D.B. *at al. Osnovy prakticheskoi teorii gorenii* [Basics of practical combustion theory]. Leningrad, 1986, 312 p.

8. *Teplovoi raschet kotel'nykh agregatov (normativnyi metod)* [Thermal design of boiler units (standard method)]. Moscow, 1973, 296 p.

УДК 536.2

С.Ю. Осипов

Тверской государственный технический университет,

Ю.Р. Осипов, Д.А. Богданов

Вологодский государственный университет

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ТЕРМООБРАБОТКИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ХИМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ

Разнообразные отрасли промышленности и сельского хозяйства предъявляют высокие требования к антикоррозионной защите деталей машин и аппаратов. Для сопоставления химической стойкости обкладок, вулканизованных различными способами, проведены эксперименты после термообработки покрытий в котле, в принудительном потоке воздуха (конвективная вулканизация) и в псевдооживленном инертном теплоносителе.

Химическую стойкость эластомеров оценивали по степени набухания образцов (по массе после нахождения их в коррозионных средах), по изменению внешнего вида и физико-механических показателей после набухания.

Вулканизация, охлаждение, технологические режимы, теплообмен, гуммировочные покрытия, термообработка, эластомерные покрытия.

Diverse industrial and agricultural sectors place high demands on corrosion protection of machine parts and devices. To compare the chemical resistance of coating, vulcanized in a variety of ways, the experiments were carried out after heat treatment of coatings in the boiler, in a forced flow of air (convective vulcanization) and fluidized inert heat carrier.

Chemical resistance of elastomers were evaluated by the degree of swelling of the samples (by mass after finding them in corrosive environments), by the change of the appearance and physical-mechanical properties after swelling.

Curing, cooling, technological modes, heat exchange, gummed cover, heat treatment, elastomeric coverings.

Введение

Из существующих способов защиты поверхностей гуммирование занимает особое положение, ибо резина обладает целым комплексом технически полезных свойств: стойкостью к воздействию агрессивных сред, эластичностью, вибростойкостью, способностью выдерживать мощные гидродинамиче-

ские удары, водо- и газонепроницаемостью, тепло- и морозостойкостью [4], [7]–[10].

Вулканизация покрытий является завершающим и наиболее ответственным процессом во всем цикле работ по гуммированию любого металлического объекта, сопровождающимся большими затратами энергии и особенно нуждающимся в совершенство-