

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫБРОСОВ САЖЕВЫХ ЧАСТИЦ КОТЕЛЬНЫМИ УСТАНОВКАМИ

Количество сажевых частиц, содержащихся в отработанных дымовых газах энергетических установок, является критерием эффективности организации топочного процесса. Многие топочные и горелочные устройства, применяемые в настоящее время, имеют недостаточную энергетическую и экологическую эффективность, что приводит к нерациональному использованию энергетических ресурсов и значительному загрязнению окружающей среды. Это особенно сильно сказывается на экологической обстановке Арктических территорий. В статье обобщены результаты экспериментальных исследований выбросов сажевых частиц от котельных установок широкого диапазона мощности при сжигании различных органических топлив.

Котельная установка, топливо, вредные вещества, выбросы сажевых частиц, топка, горелка, система автоматики, золоуловитель, техническое состояние.

The amount of black carbon contained in the exhaust flue gas of energy installations, is the criterion of efficiency of the organization of the furnace process. Many combustion and burner devices, currently used, have insufficient energetic and environmental efficiency, which leads to inefficient use of energy resources and significant environmental pollution. This particularly affects the environmental situation of the Arctic territories. The paper summarizes the results of experimental studies of emissions of black carbon from a wide range of power of boiler installations when burning different organic fuels.

Boiler installation, fuel, harmful substances, emissions of black carbon, furnace, burner, automation system, ash collector, technical condition.

Введение.

Энергетические установки, обеспечивающие развитие нашей цивилизации, являются, к сожалению, одними из основных загрязнителей атмосферы оксидами серы и азота, бенз(а)пиреном, твердыми частицами, включая сажевые, а их вклад в выбросы диоксида углерода, вызывающего «парниковый» эффект, можно признать основным.

Количество сажевых частиц, содержащихся в отработанных дымовых газах энергетических установок, является критерием эффективности организации топочного процесса. Однако многие топочные и горелочные устройства, применяемые в настоящее время, имеют недостаточную энергетическую и экологическую эффективность, что приводит к нерациональному использованию энергетических ресурсов и значительному загрязнению окружающей среды, что особенно сильно сказывается на экологической обстановке Арктических территорий.

Сажа – дисперсный углеродный продукт неполного сгорания или термораспада углеводородов, состоящий из частиц различной формы, черного цвета, средний размер которых составляет 0,1...3,5 мкм. Сажевые частицы играют заметную роль в жизни современного общества. С одной стороны, они являются одним из загрязнителей атмосферы при горении углеводородных топлив. Учитывая что, углеводородное сырье как источник энергии в ближайшем будущем сохранит за собой лидирующую роль, оптимизация процессов горения с целью уменьшения вредных выбросов энергетическими установками остается актуальной задачей. Одновременно сажа

является основным механизмом преобразования тепловой энергии горения в электромагнитное излучение, и это полезное свойство, хотя и потеряло свое значение в быту, остается важным в некоторых технологических процессах (производство стекла).

Основная часть.

Сажа является крупнотоннажным химическим продуктом (мировое производство более 10 млн т/год) и широко используется как наполнитель для модификации механических, электрических и оптических свойств материалов в производстве эластомеров, красителей, сухих источников электропитания и т. д. Около 90 % всего мирового производства сажи (технического углерода) используется в шинной и резинотехнической промышленности. Изучение механизма образования сажи является важной научной проблемой, на основе которого можно существенно сократить затраты при проектировании и оптимизации энергетических и технологических установок на основе горения, неполного горения и пиролиза углеводородов, и как результат, сократить затраты на производство целевых продуктов и уменьшить негативную нагрузку на окружающую среду от результатов жизнедеятельности общества.

Эмиссия сажевых частиц может приводить к значительным потерям топлива: до 15 % с механической неполнотой сгорания, отложения сажи на поверхностях нагрева вызывают перерасход топлива (при толщине отложений 1,5 мм перерасход топлива составляет 4,5 %). Сажа является мощным канцерогеном, являясь вредным веществом 2 класса с мак-

симально разовой ПДК $0,15 \text{ мг/м}^3$, и как дисперсионная пыль разносится ветрами на тысячи километров. Она обладает во много раз более мощным (в 680 раз) негативным фактором, чем углекислый газ.

Сажевые частицы не взаимодействуют с кислородом атмосферного воздуха и поэтому удаляются только за счет коагуляции и осаждения, которые идут очень медленно. Исходя из этого, для сохранения чистоты окружающей среды необходим жесткий контроль за полнотой сжигания топлива.

Анализ результатов экспериментальных замеров концентрации взвешенных частиц с использованием метода внешней фильтрации при изокINETических условиях отбора газовых проб из продуктов сгорания теплогенерирующих установок с определением содержания сажевых частиц по методике [8] позволил сделать следующие выводы:

1. Одним из направлений оптимизации топливного баланса Архангельской области является увеличение в нем доли местных топлив и побочных продуктов лесозаготовки и лесопереработки. За период с 2007 по 2013 гг. доля древесного топлива и древесных отходов в топливном балансе коммунальной энергетики увеличилась с 18 до 37 %. При сжигании древесного топлива уровень выбросов сажевых частиц определяется качеством биотоплива, конструкцией топочного устройства и способом сжигания, степенью и уровнем настройки системы автоматики режимов работы, а также техническим состоянием и качеством обслуживания теплогенерирующих установок.

Применение полностью автоматизированных водогрейных котлов (Arimax Bio Energu) мощностью $0,7...1,5 \text{ МВт}$, работающих на гранулированном древесном топливе с двухступенчатой схемой сжигания, после дополнительной настройки системы автоматики позволило обеспечить высокую полноту выгорания топлива [3] и стабильно низкие значения выбросов сажевых частиц (коэффициенты выбросов сажи $\text{PM}_{2,5}$ составили $0,521...0,966 \text{ г/ГДж}$, табл.). Значения коэффициентов пересчета на сажевые частицы $\text{PM}_{2,5}$ определялись по данным [9]. Максимально достигнутой КПД брутто водогрейных котлов мощностью $1,5 \text{ МВт}$ составил 90,4 %, что соответствует эффективности работы мазутных котлов, находящихся в хорошем техническом состоянии [3], [4]. Для обеспечения стабильно высоких технико-экономических и экологических показателей данных котлов необходимо обеспечить контроль качественных показателей древесных гранул, в том числе на содержание пылевых частиц.

Водогрейные котлоагрегаты мощностью $5,8 \text{ МВт}$ (Global/G-500), работающие на древесных отходах (щепа+опилок = 50 + 50 %) при трехступенчатой схеме сжигания, после устранения основных недостатков, выявленных в ходе комплексного энергетического обследования [7], имеют уровень выбросов сажевых частиц $1,71...32,09 \text{ г/ГДж}$, при этом расчетные коэффициенты выбросов сажи размером $\text{PM}_{2,5}$ составили $0,239...4,493 \text{ г/ГДж}$ (см. таблицу). Для водогрейных котлов меньшей мощности

($1,0...1,5 \text{ МВт}$), с более низким уровнем автоматизации, работающих на древесных отходах, коэффициенты выбросов сажи $\text{PM}_{2,5}$ изменялись в диапазоне $0,444...11,059 \text{ г/ГДж}$.

Приведенные результаты по выбросам сажевых частиц получены на теплогенерирующих установках, возраст которых не превышает шести лет, однако во многих регионах РФ находится в эксплуатации большой парк старых физически изношенных и морально устаревших котлов с ручным обслуживанием, работающих на «сырых» дровах. Так, для секционных чугунных водогрейных котлов с ручным обслуживанием («Универсал», «Тула», «Энергия» и др.), переведенных с угля на сжигание сырых дров, характерно наличие больших присосов холодного воздуха через неплотности обмуровки, отсутствие регулирующих устройств и контрольно-измерительных приборов, большие избытки воздуха и недостаточная высота топочных камер для сжигания длиннофакельного древесного топлива. Исходя из этого, их работа характеризуется низкими технико-экономическими и экологическими показателями [1]. Работа стальных водогрейных котлов с ручным обслуживанием мощностью до $1,16 \text{ МВт}$ при сжигании сырых дров, также характеризуется низкими технико-экономическими и экологическими показателями [2], что связано, в первую очередь, с высокой степенью экранирования топочных камер и их непригодностью для сжигания сырых дров, а также низким уровнем ручного обслуживания. Для данных котлов следует ожидать коэффициенты выбросов сажи $\text{PM}_{2,5}$ в диапазоне $11...25 \text{ г/ГДж}$. В дальнейшем требуется экспериментальная проверка данного предположения.

2. Доля каменных углей, импортируемых в Архангельскую область из других регионов РФ, в топливном балансе коммунальной энергетики за период с 2007 по 2013 гг. снизилась с 37 до 28 %. При сжигании каменных углей уровень выбросов сажевых частиц определяется качеством топлива, конструкцией топочного устройства и способом сжигания, степенью совершенства и уровнем настройки системы автоматики, типом газоочистных устройств, а также техническим состоянием и качеством обслуживания теплогенерирующих установок.

Для котлоагрегатов со слоевым сжиганием (типа КЕ и ДКВр), оборудованных механизированными системами подачи угля и батарейными циклонами для очистки уходящих продуктов сгорания, коэффициенты выбросов сажи $\text{PM}_{2,5}$ при сжигании высокореакционных каменных углей составили $3,45...6,48 \text{ г/ГДж}$ (см. таблицу).

Для стальных водогрейных котлов со слоевым сжиганием мощностью $1,86 \text{ МВт}$ и менее, оборудованных шурующей планкой и инерционными золоуловителями для очистки уходящих продуктов сгорания, а также паровых котлов с ручной подачей угля мощностью $1,05 \text{ МВт}$ коэффициенты выбросов сажи $\text{PM}_{2,5}$ при сжигании высокореакционных каменных углей составили $2,14...9,45 \text{ г/ГДж}$ (см. таблицу).

Таблица

Результаты исследования эмиссии сажевых частиц

Тип котельной установки (номинальная мощность, МВт)	Вид топлива (нагрузка котла, %)	Наличие золоуловителя	Удельный выброс сажи, г/кг топлива		Коэффициент выброса сажи, г/ГДж	
			частицы PM _{2,5}	суммарный	частицы PM _{2,5}	суммарный
Arimax Bio Energy (0.74)	Пеллеты (22)	Мультициклон НЕКМС-3×3	0,017	0,121	0,966	6,90
Arimax Bio Energy (1.5)	Пеллеты (56)	Мультициклон НЕКМС-3×3	0,017	0,120	0,955	6,82
Arimax Bio Energy (1.5)	Пеллеты (50)	Мультициклон НЕКМС-3×3	0,009	0,065	0,521	3,72
Arimax Bio Energy (1.5)	Пеллеты (44)	Мультициклон НЕКМС-3×3	0,017	0,118	0,939	6,71
Global/G-500 (5.8)	Древесные отходы (60)	Мультициклон МС-25	0,042	0,303	4,493	32,09
Global/G-500 (5.8)	Древесные отходы (60)	Мультициклон МС-25	0,002	0,016	0,239	1,71
Global/G-500 (5.8)	Древесные отходы (60)	Мультициклон МС-25	0,010	0,070	1,046	7,47
КВУ-1000 А25-10 (1.0)	Древесные отходы (60)	ЦН-11-930 20-10	0,004	0,030	0,444	3,17
КВУ-1000 А25-10 (1.0)	Древесные отходы (60)	ЦН-11-930 20-10	0,008	0,060	0,888	6,34
КВУТ-1500 40-11 (1.5)	Древесные отходы (60)	ЦН-11-1105 40-11	0,104	0,745	11,059	78,99
КЕ-10/14 (6,6)	Каменный уголь (70)	БЦ-2-5×(4+2)	0,071	1,773	3,453	86,33
КЕ-10/14 (6,6)	Каменный уголь (70)	БЦ-2-5×(4+2)	0,133	3,325	6,478	161,96
КВ-1,6-95ШП (1,86)	Каменный уголь (50)	Есть	0,194	4,846	9,442	236,04
КВ-1,6-95ШП (1,86)	Каменный уголь (75)	Есть	0,064	1,612	3,141	78,52
Е-1,6-1,4 Р (1,05)	Каменный уголь (50)	Есть	0,044	1,100	2,14	53,58
Судовой двухтопочный (1,51)	Каменный уголь (60)	Нет	0,534	13,345	26	650
Е-220-100 (160)	Каменный уголь (77)	Мокрого типа с коагулятором Вентури	0,00517	0,0517	0,25	2,50
Е-220-100 (160)	Каменный уголь (100)	Мокрого типа с коагулятором Вентури	0,0217	0,217	1,05	10,50
Е-160-100 (128)	Каменный уголь (100)	Мокрого типа МП-ВТИ	0,0174	0,174	0,840	8,400
ДКВР 4/13 (2,9)	Мазут (70)	Нет	0,207	2,074	5,284	52,94
ДКВР 4/13 (2,9)	Мазут (80)	Нет	0,216	2,163	5,514	55,23
ICI CALDAIE GX 4000 (4,0)	Мазут (65)	Нет	0,051	0,513	1,302	13,10
Riello 5000 (5,0)	Отработанное масло (40)	Нет	0,005	0,048	0,120	1,200
Riello 5000 (5,0)	Отработанное масло (40)	Нет	0,019	0,192	0,48	4,798
Е-420-140 (320)	Мазут (90)	Нет	0,004	0,0437	0,110	1,099
Е-500-140 (380)	Мазут (75)	Нет	0,0041	0,0412	0,104	1,038

Секционные чугунные водогрейные котлы с ручным обслуживанием, рассчитанные на сжигание сортированных (с максимальным размером кусков не более 50 мм и содержанием мелочи не более 20 %) относительно сухих углей ($W_t^r \leq 9\%$) с зольностью на сухую массу не превышающей 18 % вынуждены преимущественно работать на рядовых углях с большим содержанием мелких фракций, минеральных приме-

сей и влаги. Работа данных котлов при сжигании углей низкого качества, наличии больших присосов холодного воздуха через неплотности обмуровки, отсутствии регулирующих устройств и контрольно-измерительных приборов, характеризуется низкими энергоэкологическими показателями [1], [6]. Для данных котлов при условии наличия инерционных золоуловителей следует ожидать коэффициенты вы-

бросов сажи РМ 2,5 в диапазоне 9...17 г/ГДж. В дальнейшем требуется экспериментальная проверка данного предположения.

Работа жаротрубно-дымогарных котлов (судовые двухтопочные и однотопочные) с ручным обслуживанием при сжигании рядовых высокорекреационных каменных углей с большим содержанием мелких фракций характеризуется низкими энергоэкологическими показателями [1], [4] и сопровождается большими выбросами вредных веществ, в том числе и сажевых частиц. Коэффициент выбросов сажи РМ 2,5 для судового двухтопочного котла, не оборудованного золоуловителем, составил 26 г/ГДж (см. таблицу).

Эксплуатация котлоагрегатов крупной стационарной энергетики ведется в соответствии с действующими нормативными документами и разработанными «Режимными картами», что позволяет обеспечить приемлемые технико-экономические и экологические показатели, отвечающие степени их физического износа. Результаты экспериментальных замеров, выполненных на паровых котлах высокого давления номинальной мощностью от 128 до 160 МВт, оборудованных угловыми щелевыми горелками с тангенциальной компоновкой, показали, что коэффициенты выбросов сажи РМ 2,5 при сжигании высокорекреационных каменных углей изменялись в диапазоне 0,25...1,05 г/ГДж (см. таблицу). Необходимо отметить, что данные котлоагрегаты оборудованы золоуловителями мокрого типа. На котлах номинальной мощностью 160 МВт установлены коагуляторы Вентури, а система пылеприготовления оборудована шаровыми барабанными мельницами с промежуточным бункером готовой угольной пыли. Котлоагрегаты номинальной мощностью 128 МВт оснащены мокрорпруктовыми золоуловителями МП-ВТИ и оборудованы индивидуальными замкнутыми пылесистемами с молотковыми мельницами. Золоуловители мокрого типа имели достаточно высокую степень очистки продуктов сгорания (до 96,5 %) и обеспечивали частичное улавливание мелких сажевых частиц. На котлоагрегатах подобного типа, но оборудованных сухими золоуловителями инерционного типа, выбросы сажевых частиц будут иметь более высокие значения.

3. После перестройки экономики страны традиционно в энергетику Архангельской области поступали высокосернистые «тяжелые» мазуты. Снижение доли высокосернистых мазутов в топливном балансе коммунальной энергетики за период с 2007 по 2013 гг. с 16 до 5% благоприятно сказалось на экологической обстановке. При сжигании жидких топлив уровень выбросов сажевых частиц определяется качеством топлива, конструкцией топочного и горелочного устройств, режимом сжигания, степенью совершенства и уровнем настройки системы автоматики, а также техническим состоянием и качеством обслуживания теплогенерирующих установок.

Эксплуатация котлоагрегатов (ДКВр и др.), сжигающих высокосернистый топочный мазут марки 100 и оборудованных горелками с двухзонной пода-

чей воздуха, характеризуется повышенным уровнем образования сажевых частиц, что связано с:

- пониженной температурой и повышенной вязкостью мазута перед горелочными устройствами, что не позволяет обеспечить требуемое качество распыла топлива; наличие большого количества крупных капель приводит к диффузионному горению, при взаимодействии факела с поверхностями нагрева или обмуровкой происходит обрыв цепных реакций горения и образуется мазутный кокс [6];

- наличием больших присосов холодного воздуха через неплотности обмуровки, которые снижают уровень температур в топке и создают условия для образования сажевых частиц;

- коксованием головки форсунки, которое обычно вызвано неправильным расположением форсунки в горелке или горелки в амбразуре, или неправильным, а также некачественным выполнением последней [6];

- пульсациями мазутного факела, которые могут возникать вследствие поступления обводненного топлива, его недостаточного подогрева, загрязнения фильтров и сопел форсунок, шлакования амбразур, отложений на лопатках воздухонаправляющего аппарата или их коробления и ряда других нарушений режима горения [5], [6];

- отсутствием должного внимания к тарировке форсунок и контролю длины мазутного факела;

- эксплуатационных условиях не уделяется должного внимания поддержанию стабильного давления мазута перед горелочными устройствами, а для повышения однородности распыла подается насыщенный пар, что способствует образованию сажевых частиц.

Экспериментальные исследования показали, что коэффициенты выбросов сажи РМ 2,5 при сжигании высокосернистого мазута марки 100 в котлах (ДКВр и др.) составили 1,302...5,514 г/ГДж. Эксплуатация котлов (Riello 5000), работающих на отработанном масле (см. таблицу), характеризуется значениями коэффициентов выброса сажи РМ 2,5 от 0,12 до 0,48 г/ГДж. Оптимизация режимов горения позволит обеспечить снижение выбросов сажевых частиц при сжигании отработанного масла.

Эксплуатация котлоагрегатов крупной стационарной энергетики, работающих на высокосернистом топочном мазуте, ведется в соответствии с действующими нормативными документами и разработанными «Режимными картами», что позволяет обеспечить приемлемые технико-экономические и экологические показатели, отвечающие степени их физического износа. Результаты экспериментальных замеров, выполненные на паровых котлоагрегатах высокого давления номинальной мощностью от 320 до 380 МВт, показали высокую полноту выгорания топочного мазута, при этом значения коэффициентов выброса сажи РМ 2,5 составляли 0,104...0,110 г/ГДж.

4. Приход природного газа на объекты энергетики Архангельской области оказал существенное положительное влияние на экологическую ситуацию в регионе за счет значительного снижения выбросов

оксидов серы и азота, бенз(а)пирена, твердых частиц и др.

На объектах крупной станционной энергетики была проведена большая работа по подготовке основного и вспомогательного оборудования к переходу на сжигание природного газа, а также выполнены пуско-наладочные работы и разработаны «Режимные карты». Перевод объектов крупной станционной энергетики на сжигание природного газа позволил практически исключить выбросы сажевых частиц. Экспериментальные замеры, выполненные по методике [8], дают результаты в пределах погрешности данной методики.

На объектах малой энергетики Архангельской области для использования природного газа были преимущественно смонтированы новые котельные с современными теплогенерирующими установками, что позволило обеспечить эффективное сжигание газа. Поэтому выбросы сажевых частиц для данных энергоустановок можно не учитывать, так как экспериментальные замеры, выполненные по методике [8], дают результаты в пределах погрешности данной методики. Увеличение доли природного газа в топливном балансе коммунальной энергетики за период с 2007 по 2013 гг. с 25 до 29 % благоприятно сказалось на экологической обстановке.

Выводы.

Структура топливного баланса Архангельской области в 2013 г. имела следующий вид: природный газ – 40 %, каменные угли – 19 %, мазут – 17 %, древесное топливо – 14 % и дизельное топливо – 10 %.

Повышение эффективности работы объектов топливно-энергетического комплекса и уменьшение его негативного влияния на окружающую среду является актуальной проблемой для многих регионов РФ. Возможны два пути решения этой проблемы. Первый путь – демонтаж старого физически изношенного и морально устаревшего оборудования и установка нового. Реализация данного направления часто требует значительных капитальных вложений, которых нет у большинства предприятий.

Второй путь – повышение эффективности работы существующего оборудования за счет проведения капитального ремонта, модернизации и выполнения режимно-наладочных работ; причем модернизацию оборудования целесообразно проводить в период капитального ремонта. Реализация второго направления обычно дает меньший эффект, чем первого, зато требует меньших затрат, и, как правило, может быть осуществлена собственными силами предприятия в короткий срок. Практика показывает, что только за счет малой модернизации и повышения культуры эксплуатации в промышленных и отопительных котельных можно обеспечить экономию топлива в размере 15...25 % [6].

К мероприятиям, повышающим культуру эксплуатации и малой модернизации, относятся: периодическое проведение режимно-наладочных испытаний; повышение экономичности работы топочных устройств путем снижения химического и механиче-

ского недожога, уменьшения коэффициента избытка воздуха в топке; систематический надзор за плотностью газового и воздушного трактов; повышение эффективности работы конвективных поверхностей нагрева; снижение сопротивления газозадушного тракта; оптимальное распределение нагрузки между установленными котлами; теплоизоляция горячих поверхностей; внедрение наиболее экономичных способов регулирования производительности тягодутьевых машин и насосного оборудования.

Архангельская область, как и многие другие регионы РФ, располагает огромным потенциалом энергосбережения, который должен реализовываться во всех элементах систем энергоснабжения: энергоисточник, системы транспортировки и распределения энергии и энергопотребители. Любое повышение энергоэффективности в элементах данной системы позволит уменьшить выбросы сажи пропорционально снижению потребления топлива.

Вовлечение в энергетический баланс региона вместо углей и мазута неиспользуемых отходов лесозаготовки и деревообработки, годовой объем которых составляет 2,7 млн пл. м³, на базе современного полностью автоматизированного теплогенерирующего оборудования открывает большие дополнительные возможности по снижению выбросов вредных веществ, в том числе и сажи.

Литература

1. Любов, В. К. Модернизация объектов коммунальной энергетики / В. К. Любов, А. Н. Попов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2011. – №2. – Т. 2. – С. 5–9.
2. Любов, В. К. Модернизация отопительных котельных / В. К. Любов, А. Н. Попов, О. Д. Мюллер // Труды XIV Минского международного форума по тепломасообмену – НАН Беларуси. – Мн., 2012. – С. 303–305.
3. Любов, В. К. Исследование эффективности работы отопительных котельных / В. К. Любов, А. Ю. Романов // Изв. вузов. Лесн. журнал. – 2011. – №3. – С. 142–151.
4. Любов, В. К. Исследование эффективности сжигания дров в стальных водогрейных котлах / В. К. Любов, А. Н. Попов, О. Д. Мюллер // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – №2(48). – Т. 2. – С. 16–21.
5. Любов, В. К. Повышение эффективности сжигания высокосернистых мазутов в топках котлоагрегатов / В. К. Любов, А. Ю. Романов // Вестник Архангельского государственного техн. ун-та. Сер.: Энергетика. Вып. 63. – Архангельск, 2006. – С. 18–25.
6. Любов, В. К. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив: Учеб. пособие / В. К. Любов, С. В. Любова. – Архангельск, 2010.
7. Любов, В. К. Энергетическое обследование водогрейных котлоагрегатов, сжигающих биотопливо / В. К. Любов, А. Н. Попов // Энергетика и энергоэффективность в условиях геостратегического развития и освоения Арктического региона: Материалы I Международной научно-практической конференции. – Архангельск, 2011. – С. 114–119.
8. Методика измерения массовой концентрации сажи в промышленных выбросах и в воздухе рабочей зон. – Ярославль, 2005.

9. Borchsenius, H. Black carbon emissions from the district heating sector in the Barents region / H. Borchsenius,

D. Borgnes // NORSK ENERGI, Ministry of environment of Norway Project name: RUS-11/0060. – 2013.

УДК 536.2

С. Ю. Осипов

Тверской государственный технический университет,

Ю. Р. Осипов

Вологодский государственный университет,

С. А. Шлыков

Вологодский институт права и экономики ФСИН России

ВЛИЯНИЕ ПОСЛЕВУЛКАНИЗАЦИОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исследовано влияние послевулканизационного охлаждения на формирование свойств эластомерных композиционных покрытий: распределение вулканизирующего агента по слоям покрытия, химическую стойкость и адгезионную прочность. Получены зависимости качественных показателей при охлаждении покрытий и различных способах термообработки. Доказано улучшение всех основных эксплуатационных характеристик покрытий.

Вулканизация, теплообмен, охлаждение, вулканизирующий агент, химическая стойкость, адгезия, композиционный материал.

The paper deals with studying the cooling effect on the properties of the elastomeric composite coatings after vulcanization: distribution of vulcanization agent for coating layers, chemical resistance and adhesion strength. The researchers received the dependence of the quality indicators when cooling coatings with different methods of heat treatment. Improvement of all operating characteristics of coatings is proved.

Vulcanization, heat exchange, cooling, the vulcanizing agent, chemical firmness, adhesion, composite material.

Введение.

Применение эластомерных композиционных материалов является эффективным способом защиты металлических поверхностей от разрушающего воздействия окружающей среды вследствие того, что они обладают целым комплексом технически полезных свойств: способностью выдерживать мощные гидродинамические удары, водо- и газонепроницаемостью, тепло- и морозостойкостью и др. Обычно нагрев производят до тех пор, пока не будет достигнута минимальная степень вулканизации, при которой возможно снимать давление, не опасаясь пористости и расслоения покрытия. Целесообразность дальнейшего нагрева изделия до достижения более высоких степеней вулканизации решается в зависимости от требуемого комплекса свойств изделия и возможности последующей довулканизации после извлечения его из вулканизационного оборудования. Очевидно, что охлажденное на оборудовании изделие не будет значительно довулканизовываться на воздухе. Однако, охлаждение на оборудовании неэкономично, приводит к удлинению производственного процесса и повышению непроизводительных затрат тепла и должно, по возможности, сокращаться или полностью исключаться. Охлаждение изделия за счет теплообмена с холодной водой, обладающей более высоким коэффициентом теплоотдачи, чем воздух, применяется, когда оно неравномерно по толщине, но нагревается теплоносителями одних

параметров, и имеется опасность перевулканизации более нагретых тонких участков при длительном охлаждении на воздухе. Поэтому актуальной при производстве химического оборудования с эластомерным покрытием является проблема разработки способов и устройств для его охлаждения. Проведена оценка динамики процесса охлаждения покрытий, скорости и степени вулканизации по содержанию свободной серы, интенсивности поглощения гамма-излучения и изменению физико-механических свойств, функционально связанных с пределом набухания, сопротивлением разрыву, расслаиванию и т. д.

Основная часть.

Влияние охлаждения на распределение свободной серы по слоям покрытий. Композиционные покрытия, изготовленные из резиновых смесей на основе различных каучуков, подвергались охлаждению после вулканизации в псевдоожигенном инертном теплоносителе, в вулканизационном котле при температуре 413...428 К и методом простой конвекции [1]–[5]. В процессе вулканизации происходит плавление серы ($T = 392$ К), которая первоначально образует маленькие капельки, исчезающие по мере течения процесса. Это исчезновение серы обуславливается растворением и химическим взаимодействием ее с каучуком. Растворимость серы в разных эластомерах различна и увеличивается с повышени-