

УДК 621.1.016 7 (075.8)

## ТЕХНОЛОГИЯ РЕАБИЛИТАЦИИ СТВОЛОВ ДЫМОВЫХ ТРУБ С УТИЛИЗАЦИЕЙ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

Акельев В.Д., к.т.н., доцент, Золотарёва И.М., Черванёва Е.А.  
Белорусский национальный технический университет

e-mail: marichshuk@yandex.ru

*Статья посвящена тепло-массо-коррозионной технологии реабилитации металлических, железобетонных, кирпичных и т. д. стволов дымовых труб, отличающаяся от известных тем, что монтаж реабилитационной (стеклопластиковой) трубы выполняется не «снизу вверх», а «сверху вниз». Предложенная схема термо-массозащиты внутренней поверхности с утилизацией химически активных компонентов дымовых газов путем конденсации может использоваться для минимизации загрязнения окружающей среды.*

*In the article heat-mass-corrosion technology of metallic, ferroconcrete, brick chimneys rehabilitation analyzed. The elaborated rehabilitation technology differs from others by assembling of rehabilitation (glass-fibro-plastic) chimney realizes not as usually «from below to upwards», but «from above to down». The interior surface heat-mass-protection accompanied with chemically active components of smoke gases utilization by condensation can used for minimization of environment pollution*

(Поступила в редакцию 24 мая 2012 г.)

### ВВЕДЕНИЕ

Промышленная безопасность представляет собой комплекс проблем, решаемых специалистами разного профиля, в том числе и строительной теплофизики. Влияние научно-технического прогресса определяет внедрение новых технологий и новых отделочных материалов в строительстве, что особенно актуально для Республики Беларусь, пережившую трагедию на ЧАЭС.

Исследованиям процессов низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева котельных агрегатов, посвящен целый ряд теоретических и практических работ, к ним следует отнести исследования Стрихи И.И., А.К. Внукова, В.Ш. Магадеева, Р.А. Петросяна, А.Ф. Гаврилова и других. В них представлены результаты исследований образования коррозионных агентов в продуктах сгорания серосодержащих топлив, образование по газовому тракту паровых котлов серной кислоты с поверхностями нагрева с учетом их температурного режима и состояния загрязнения [1, 2].

При защите внутренней поверхности железобетонных труб от влияния агрессивных компонентов дымовых газов используются различные строительные материалы, большинство из которых малоэффективно при повышенной влажности. Конденсация водяных паров в стволе трубы происходит вследствие падения температуры удаляемых дымовых газов ниже «температуры точки росы», уменьшения объемов отводимых газов, замены сжигаемого топлива или снижения проектной мощности завода [3].

Обоснованный выбор материалов низкотемпературных поверхностей нагрева и футеровок дымовых труб зависит от агрессивности дымовых газов, одним из показателей которой, является содержание в них серного ангидрида. Известны исследования, в результате которых установлена связь режимов сжигания топлива с процессами коррозии и загрязнения хвостовых поверхностей нагрева. В то же время кислотная точка росы дымовых газов, определяемая по методу Джонсона, не позволяет установить начало процесса конденсации серной кислоты из дымовых газов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Имеется дымовая труба, ствол которой выполнен из кирпича в виде кладки с вертикальными колодцами, разбитой по вертикали регулярно горизонтальными поясами из армированного полимерсиликатобетона, защищенного изнутри и снаружи ствола кирпичной кладкой, а полости колодцев заполнены полимерсиликатобетоном, расположенные по наружному контуру колодцы армированы вертикальными каркасами, имеющими связь с арматурой поясов. Недостатками этой конструкции являются: незащищенность от воздействия агрессивного конденсата швов защитного слоя кирпичной кладки; большая масса защитного слоя.

Наиболее близкой по технической сущности к разработанной конструкции, предлагаемой к рассмотрению, является труба, содержащая наружную трубу и внутренний составной металлический газоотводящий ствол, секции которого выполнены с возможностью входа и размещения друг в друге по принципу «матрешки» и подвешены относительно друг друга и относительно верхней части наружной трубы, причем все комплекты секций расположены последовательно по высоте трубы, а для установки верхних секций на внутренней поверхности наружной трубы предусмотрены опорные элементы.

Недостатками такой трубы являются: необходимость антикоррозионного покрытия внутреннего металлического газоотводящего ствола; образование завихрений потока уходящих газов в местах соединения секций; сложность в изготовлении телескопической конструкции; большая масса металлического газоотводящего ствола. Невозможно выполнение монтажа без остановки технологического процесса при реконструкции дымовых труб.

При терморевитации внутренних поверхностей, между ними и стеклопластиковыми трубами образуется замкнутое ограниченное пространство, в котором имеет место свободная конвекция, теплообмен, зависящие от геометрических и теплофизических характеристик дымовых газов.

Задача, решаемая в данной работе, заключается в обеспечении защиты внутренней поверхности дымовой трубы от воздействия конденсата, образующегося в верхней части трубы при достижении дымовыми газами температуры точки росы. Это достигается тем, что в дымовой трубе, содержащей наружную оболочку и внутренний газоотводящий ствол, последний выполнен из коррозионно-стойкого материала в виде цилиндра, высота которого составляет  $1/3$  высоты наружной трубы, и расположен в ее верхней части, при этом в торцах цилиндра загерметизировано пространство между наружной трубой и газоотводящим стволом, кроме того, шероховатость внутренней поверхности газоотводящего ствола в 10 раз меньше шероховатости внутренней поверхности наружной трубы.

При проведении реконструкции действующей дымовой трубы, отводящей газы от установок, сжигающих топливо, газоотводящий ствол монтируется методом «сверху-вниз», для чего на оголовке трубы устраивается раструб и газоотводящий ствол вставляется через него, а в нижней части опирается через поворотные сегменты на несущие элементы дымовой трубы. После установки газоотводящего ствола раструб убирается, ствол фиксируется кольцом из пластины толщиной более 5 мм и закрепляется с помощью шпонок. Пространство между наружной поверхностью газоотводящего ствола и внутренней поверхностью дымовой трубы заполняется по торцам газоотводящего ствола воздухонепроницаемым материалом.

Измерение температурных полей внешних поверхностей дымовых труб цементного завода в г. п. Красносельск Волковысского района, показали, что, вследствие фильтрации и диффузии компонентов дымовых газов через материалы и горизонтальные кольцевые сопряжения конструктивных элементов ствола, температуры внешних поверхностей железобетонной трубы на 3-5 °С выше рассчитанных для многослойной цилиндрической стенки при стационарном тепловом режиме. С увеличением расстояния от входа газов в дымовую трубу температура внешней поверхности уменьшается либо по экспоненциальной, либо и линейной зависимости. Градиенты температур на внутренних поверхностях кислотоупорного кирпича уменьшаются от 0,2 до 0,4 °С/м с увеличением расстояния от входа дымовых газов в трубу и

зависят от скоростей, температур газов, наружного воздуха. Конвективные коэффициенты теплоотдачи у внутренних поверхностей ствола дымовой трубы зависят от скорости, температур дымовых газов и равны 8,20-11,3 Вт/(м<sup>2</sup> К), а радиационные – 7,40-14,33 Вт/(м<sup>2</sup> К). Коэффициенты теплоотдачи у внешней поверхности ствола дымовой трубы, рассчитанные в соответствии со схемами поперечного и продольного обтекания одиночно-расположенного вертикального цилиндра при различных внешних диаметрах, температурах и скоростях наружного воздуха при стационарном тепловом режиме были равны 10,20-34,0 Вт/(м<sup>2</sup> К).

Анализ тепловлажностных расчетов терморемонтируемой конструкции (железобетон, полиэтиленовая пленка, стеклоткань, сетка-рабица и цементно-песчаный раствор, мешковина в цементном растворе, слои краски) показали, что сопротивление теплопередаче увеличится на 1-4 %. При его реализации в течение какого-то интервала времени, например, 1-5 лет, внешние проявления фильтрации дымовых газов через неплотности будут устранены, но при этом процесс диффузии водяных паров через теплоизоляционные и конструктивные материалы будет продолжаться в радиальном (до полиэтиленовой пленки) и вертикальном направлениях. С целью избежания конденсации водяного пара следует использовать пленки с большими коэффициентами паропроницаемости (диффузии) для водяных паров [4].

Расчеты максимально-возможных и действительных парциальных давлений водяных паров в стволе дымовой трубы (железобетон, утеплитель из минеральной ваты, кислотоупорный кирпич) при различных ее геометрических размерах показали, что в утеплителе, железобетоне вероятно конденсация водяных паров. При этом тепловлажностные анализы терморемонтируемой конструкции (железобетон, полиэтиленовая пленка, стеклоткань, сетка-рабица, цементно-песчаный раствор, мешковина в цементном растворе, слои краски) показали, что в ней вероятно конденсация водяных паров.

Температуры удаляемых дымовых газов зависят от градиентов температур в футеровке и железобетоне [5]. Вследствие нагревания, охлаждения материалов стен дымовой трубы (переходные тепловые режимы) возможны деформации тепловых напряжений, в футеровке, железобетоне. Перепады температур зависят от времени (года, суток). В большинстве случаев повышение температуры приводит к квазистационарному режиму, либо режиму с гармоническими колебаниями. Иногда (пожары в воздухонагревателях, сгорание отложений в газоходах и дымовых трубах) возникают перепады температур способствующие «тепловым ударам». При тепловом воздействии на внутренней поверхности футеровки возможны кольцевые и осевые напряжения сжатия в железобетонном стволе – растягивающие кольцевые и осевые напряжения в условиях свободной деформации.

Увеличение долговечности и улучшение внешнего вида поверхности дымовых труб возможно при соблюдении проектных режимов эксплуатации завода и регулярных наблюдениях за их техническим состоянием.

В соответствии с методиками тепловых расчетов дымовых труб [6] температуры удаляемых дымовых газов зависят от перепадов температур по толщине футеровки и железобетона. Вследствие нагревания или охлаждения материалов стенки дымовой трубы (переходные тепловые режимы) возможно появление разрушающих тепловых напряжений, в первую очередь в футеровке, а затем железобетоне. Интервалы времени при скачке температур изменяются от нескольких минут до нескольких часов в сутки.

Расчеты при нестационарных режимах (температура дымовых газов 115±75 °С, наружного воздуха – 25 °С) показали, что температуры поверхностей кислотоупорного кирпича, у дымовых газов, изменяются от 115 до 175 °С, а внешней – от 45 до 65 °С. Температура внутренней поверхности железобетонного ствола изменялась от 23,1 до 29,8 °С, при наружных температурах до -23 °С [7].

Из аналитико-литературных исследований следует, что продолжительность функционирования футеровки в нестационарном режиме и переход к стационарному состоянию вероятен через 6 часов при повышении температуры до 160 °С и 4 часов при их увеличении до 190 °С.

Большинство способов тепломассореабилитации дымовых труб предусматривают периодические ремонтные работы с остановками заводского производства. Газоотводящие стволы из углеродистой стали имеют ограниченный срок службы и требуют наличия теплоизоляции. Более долговечны конструкции из нержавеющей стали, но их стоимость велика. Уязвимыми участками для коррозии являются сварные швы поверхности контактов с элементами конструкции из разнородных материалов (ребра жесткости, подвески, крепеж, штыри). Более эффективными и долговечными материалами являются композитные материалы на основе стеклопластика, позволяющие создать герметичную газоплотную и невосприимчивую к агрессивному воздействию газов и конденсатов экранную конструкцию у внутренней поверхности дымовой трубы.

Реконструкция дымовой трубы возможна при монтаже внутри железобетонной, металлической, кирпичной и др. оболочек стеклопластиковых газоотводящих стволов, при которых исключается воздействие агрессивных отводимых газов и конденсата на термозащитный и несущий ствол дымовой трубы, уменьшаются термонапряженные воздействия в железобетоне несущего ствола трубы вследствие наличия ограниченного газоздушного цилиндрического контура между стеклопластиковым стволом и термозащитной оболочкой трубы.

Расчеты показали, что объемы удаляемых дымовых газов из цилиндрического стеклопластикового ствола вследствие малых коэффициентов гидравлических сопротивлений на трение по сравнению с термозащитными оболочками больше относительно объемов в газах с железобетонной футерованной трубы при тех же диаметрах устья. Это позволяет уменьшить диаметр устанавливаемого газоотводящего стеклопластикового ствола.

По сравнению с другими, включая и металлические газоотводящие стволы, стеклопластиковый имеет существенные преимущества: например, его плотность меньше плотности стали в 10 раз, она не требует защиты от коррозии, теплоизоляции наружной поверхности, ремонтно пригоден, не требует специально обученного персонала по ремонту и специальному обслуживанию. Коррозионная и атмосферостойкость стеклопластикового экрана обеспечивают продолжительность его эксплуатации до 50 лет без капитального ремонта в любых климатических условиях, обладает прочностью близкой к прочности углеродистой стали, при малой теплопроводности и не значительном термическом расширении. Пример терморееабилитированных дымовых труб с газоотводящими стволами из стеклопластика приведен ниже.

Деформация ствола, выполненная из различных материалов происходит вследствие вымывания свободной извести из них: периодические увлажнения, замораживание, с вероятностью образования льда на наружной поверхности трубы, может привести к деструктивным изменениям.

Увеличение долговечности и улучшение внешнего вида поверхности дымовых труб возможно при соблюдении проектных режимов эксплуатации завода и регулярных наблюдениях за их техническим состоянием.

Предлагаемая тепломассокоррозионная реабилитация стволов железобетонных труб заводов различного назначения основана на реализации монтажа стеклопластиковых труб с толщиной стенки до 3-5 мм, масса которой не превышает 3000 кг [8].

Масса стеклопластиковой трубы в зависимости от ее длины рассчитывается по формуле:

$$m = f \cdot h \cdot \rho = \left( \frac{\pi d_2^2}{4} - \frac{\pi d_1^2}{4} \right) \cdot h \cdot \rho = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) \cdot h \cdot \rho,$$

где  $f$  – средняя площадь кольцевого сечения стеклопластиковой терморееабилитационной трубы;

$h$  – высота (длина) стеклопластиковой трубы;

$\rho$  – плотность материала стеклопластиковой трубы;

$d_1, d_2$  – средние внутренний и наружный диаметры стеклопластиковой трубы.

Отличие рекомендуемого варианта от известных заключается в том, что монтаж терморезабилитационного трубопровода выполняется не снизу вверх, а сверху вниз, преимущество которого состоит в следующем:

– монтаж цилиндрической, химически «стойкой» оболочки может быть выполнен в течение 1-2 часов, т. е. более чем в тысячу раз быстрее, чем «снизу – вверх»;

– при скорости наружного воздуха до 0,5-1,0 м/с возможен монтаж терморезабилитационного стеклопластикового трубопровода длиной более 40 м с использованием, например, вертолета Ми-17;

– реализация вышеизложенного предполагает выполнение следующих операций: терморезабилитационный газопровод монтируется вблизи терморезабилитируемой дымовой трубы из участков трубопроводов, длина которых зависит от технологического оборудования завода стеклопластиковых трубопроводов; герметизируются торцевые зазоры между звеньями труб при их вертикальном расположении (согласовывается с заводом-изготовителем этих труб (звеньев)).

На расстоянии 15-25 м от устья дымовой трубы в ее стене выполняются не менее 4 отверстий, в которые монтируются (в соответствии с технологическими ГОСТами) двутавры швеллеры, уголки длина которых от внутренней поверхности ствола равна  $d + 0,02$  м, где  $d$  – внутренний диаметр торца дымовой трубы, которые образуют основание ствола из стеклопластиковой трубы.

Монтаж экранирующего ствола «сверху – вниз» корректируется 2-4 тросами, укрепленными в стене стеклопластикового трубопровода с использованием лебедки или вручную.

Схема терморезабилитируемой дымовой трубы показана на рис. 1, а герметизации кольцевого зазора между внутренней поверхностью железобетонной стенки и внешней поверхностью стеклопластиковой трубы на рис. 2.

Для исключения попадания дымовых газов в пространстве между внешней поверхностью стеклопластиковой трубы и поверхностью ствола должно быть выполнено герметичное кольцевое уплотнение из цементно-песчаного (или аналогичного) раствора толщиной 0,15 м по высоте.

Монтаж стеклопластиковой защитной трубы, масса которой до 3000 кг может быть выполнен Фрунзенским районным государственным авиационным аварийно-спасательным учреждением «Авиация» Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь.

Расчет температуры выполнялся для дымовой трубы (Республика Беларусь, Волковыск, длина 70 м), через которую транспортируется газ с температурой на входе  $t_{\infty,1} = 180$  °С и на выходе  $t_{\infty,2} = 160$  °С. Расчетная высота трубы состоит из 7 секций длиной 10 м различного диаметра. Конструкция стены включает 3 слоя: внутренний – кирпич толщиной  $\delta_1 = 0,12$  м,  $\lambda_1 = 0,81$  Вт/мК; второй – минеральная вата  $\delta_2 = 0,05$  м,  $\lambda_2 = 0,051$  Вт/мК; третий – железобетон  $\delta_3 = 0,2$  м,  $\lambda_3 = 2,04$  Вт/мК. Температура наружного воздуха  $t_{\infty,2} = -28$  °С. Коэффициент теплоотдачи у внутренней поверхности трубы  $\alpha_{\infty,1} = 10-25$  Вт/(м<sup>2</sup>К), а у внешней –  $\alpha_{\infty,2} = 15-35$  Вт/(м<sup>2</sup>К). Рассчитывались температуры внутренней и наружной поверхностей трубы для каждой секции. Для средних значений коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_{\infty,1} = 17,5$  Вт/(м<sup>2</sup>К),  $\alpha_{\infty,2} = 25$  Вт/(м<sup>2</sup>К). Разность температур газа на входе и выходе из трубы составляла 20 °С. Учитывалось падение температуры в каждой секции, и в расчете принималась средняя ( $t_1$ ) между температурами на входе и выходе из секции. Площади поверхности секций внутренней  $F_1$ , внешней  $F_2$  и средней  $\bar{F}$  (значения  $r_1, r_2, r_4$  равны  $r_3$ ), (см. табл. 1)

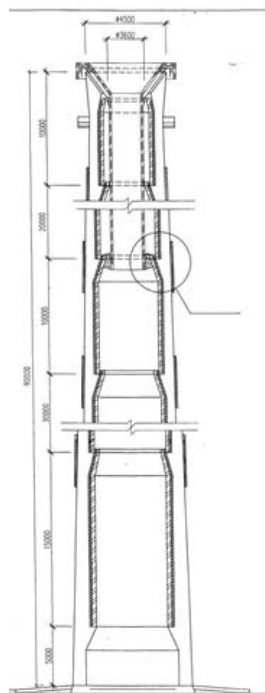
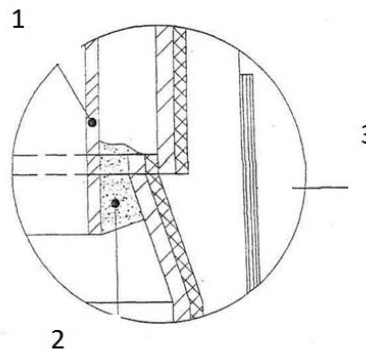


Рисунок 1 – Схема терморевалируемой дымовой трубы



1 – стенка стекло-пластиковой трубы;  
2 – газонепроницаемый материал;  
3 – стенка терморевалируемой трубы

Рисунок 2 – Схема герметизации кольцевого зазора между внутренней поверхностью железобетонной стенки и внешней поверхностью стеклопластиковой трубы

$$F_1 = 2\pi r_1 l; \quad F_2 = 2\pi r_4 l; \quad \bar{F} = \frac{F_1 + F_2}{2}. \quad (1)$$

Таблица 1 – Результаты расчета температур внутренней поверхности дымовой трубы

Параметры сечения	1	2	3	4	5	6	7
$r_1$	3,04	2,97	2,79	2,61	2,43	2,23	2,03
$r_2$	3,16	3,09	2,91	2,73	2,55	2,35	2,15
$r_3$	3,21	3,14	2,96	2,78	2,60	2,40	2,20
$r_4$	3,41	3,34	3,16	2,98	2,80	2,60	2,40
$F_1$	190,91	186,52	175,21	163,91	152,60	140,04	127,48
$F_2$	214,15	209,75	198,45	187,14	175,84	163,28	150,72
$\bar{F}$	202,53	198,13	186,83	175,53	164,22	151,66	139,10
$t_0$	178,50	175,50	172,50	169,50	166,50	163,76	161,25

Так как  $2r/S \gg 0,1$ , расчет может выполняться как для плоской, так и для цилиндрической стенки. Для плоской стенки нами использовались формулы:

$$t_{0,1} = \left( \frac{\alpha_1 F_1}{\alpha_2 F_2} + \frac{\alpha_1 F_1 \delta}{\lambda \bar{F}} \right) t_1 + \frac{t_2}{\left( 1 + \frac{\alpha_1 F_1}{\alpha_2 F_2} + \frac{\alpha_1 F_1 \delta}{\lambda \bar{F}} \right)}; \quad (2)$$

$$t_{0,2} = \left( \frac{\alpha_2 F_2}{\alpha_1 F_1} + \frac{\alpha_2 F_2 \delta}{\lambda F} \right) t_2 + \frac{t_1}{\left( 1 + \frac{\alpha_2 F_2}{\alpha_1 F_1} + \frac{\alpha_2 F_2 \delta}{\lambda F} \right)}. \quad (3)$$

Так как стена цилиндрическая, многослойная, поэтому ее эквивалентный коэффициент теплопроводности рассчитывался по формуле:

$$\lambda_{эк} = \frac{\sum_{i=1}^n \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}. \quad (4)$$

Температуры внешней и внутренней поверхностей трубы рассчитывались по формулам и для цилиндрической, и для плоской стенок.

Оценка температур поверхностей цилиндрической стены выполнялась по формулам 5 и 6 (табл. 2):

$$t_{0,1} = \left( \frac{\alpha_1 F_1}{\alpha_2 F_2} + \frac{\alpha_1 F_1}{2\pi l \lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} \right) t_1 + \frac{t_2}{\left( 1 + \frac{\alpha_1 F_1}{\alpha_2 F_2} + \frac{\alpha_1 F_1}{2\pi l \lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} \right)}; \quad (5)$$

$$t_{0,2} = \left( \frac{\alpha_2 F_2}{\alpha_1 F_1} + \frac{\alpha_2 F_2}{2\pi l \lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} \right) t_2 + \frac{t_1}{\left( 1 + \frac{\alpha_2 F_2}{\alpha_1 F_1} + \frac{\alpha_2 F_2}{2\pi l \lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} \right)}. \quad (6)$$

Таблица 2 – Температуры внутренних и внешних поверхностей дымовой трубы

Температуры	№ секции						
	1	2	3	4	5	6	7
$t_{0,1}$	169,04	166,17	163,27	160,37	157,47	154,79	152,34
$t_{0,2}$	-22,10	-22,19	-22,30	-22,40	-22,51	-22,62	-22,72

Результаты расчетов обработаны и представлены в виде графических зависимостей между коэффициентами теплодачи от скорости потоков и расходов газа при различных диаметрах труб и температурах (рис. 3, 4).

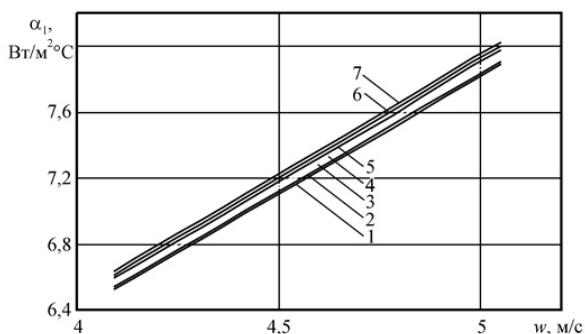
Недостатком этой конструкции является то, что в ней не предусматриваются мероприятия по сбору и удалению конденсата, образовавшегося на внутренней поверхности стеклопластикового ствола, что приводит к его стеканию и дальнейшему испарению в нижней части дымовой трубы, а количество загрязняющих веществ, выбрасываемых в окружающую среду, остается неизменным.

Задача, решаемая с использованием схемы, представленной на рис. 5, заключается в обеспечении сбора и удаления конденсата, который образуется на внутренней поверхности стеклопластиковой трубы.

Для этого в дымовой трубе, содержащей наружную трубу и внутренний газоотводящий ствол из коррозионностойкого материала в виде цилиндра, высота которого составляет 0,33 высоты наружной трубы, расположенного у ее оголовка, при этом пространство между наружной трубой и нижним торцом внутреннего газоотводящего ствола заполняется газоне-

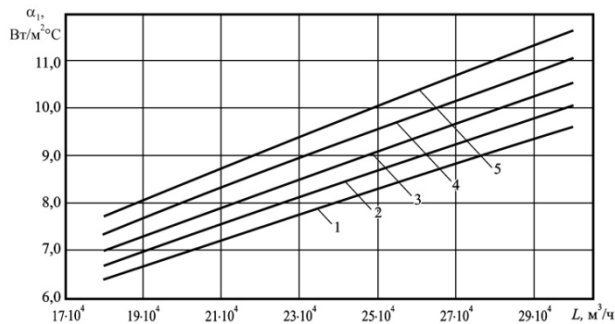
проницаемым материалам, толщиной 0,08 м. Под нижним торцом внутреннего газоотводящего ствола закреплен кольцевой поддон для сбора конденсата, сообщающийся с системой дренирования.

Схема предлагаемого способа терморевитации показана на рис. 6, где 1 – дымовая труба, 2 – наружная труба, 3 – газоотводящий ствол из коррозионностойкого материала, который закреплен в верхней части к оголовку 4 дымовой трубы 1, с помощью фиксирующего кольца 5 и шпонок 6, а в нижней части установлен на поворотные сегменты 7, с помощью которых нагрузка от газоотводящего ствола 3 передается на несущие элементы дымовой трубы 1. Пространство между наружной поверхностью газоотводящего ствола 3 внутренней поверхностью наружной трубы 2 заполнено воздухонепроницаемым материалом 8 по торцам газоотводящего ствола 3. В стенке наружной трубы 2 на уровне нижней части внутреннего газоотводящего ствола 3 выполнены отверстия 9 для притока наружного воздуха, а на уровне верхней части отверстия 10 для его удаления из пространства, заключенного между стенкой наружной трубы 2 и внутренней поверхностью газоотводящего ствола 3. Под нижним торцом внутреннего ствола 3 закреплен кольцевой поддон 11 для сбора конденсата, присоединенный к системе дренирования (на чертеже не показана система). Наружный воздух, обтекая внутренний газоотводящий ствол 3 у внешней поверхности, тем самым, вызывая конденсацию дымовых газов. Образовавшийся конденсат, содержащий загрязняющие вещества, стекает вниз по внутренней поверхности газоотводящего ствола 3 в кольцевой поддон 11. В холодный период года, когда температура внутренней поверхности равна температуре «точки росы» без организации притока наружного воздуха, приточные отверстия 9 и вытяжные отверстия 10 в наружной трубе 2 закрываются.



$L=185\ 000\ \text{м}^3/\text{ч}$  (1 –  $t=190\ \text{°C}$ ;  
2 –  $t=185\ \text{°C}$ ; 3 –  $t=180\ \text{°C}$ ;  
4 –  $t=175\ \text{°C}$ ; 5 –  $t=170\ \text{°C}$ ;  
6 –  $t=165\ \text{°C}$ ; 7 –  $t=160\ \text{°C}$ );

**Рисунок 3 – Коэффициенты теплоотдачи у внутренней поверхности трубы в зависимости от скорости потоков газов**



1 -  $d=3,6\text{м}$ ; 2 -  $d=3,7\text{м}$ ;  
3 -  $d=3,8\text{м}$ ; 4 -  $d=3,9\text{м}$ ; 5 -  $d=4\text{м}$

**Рисунок 4 – Коэффициенты теплоотдачи в зависимости от расхода газов**

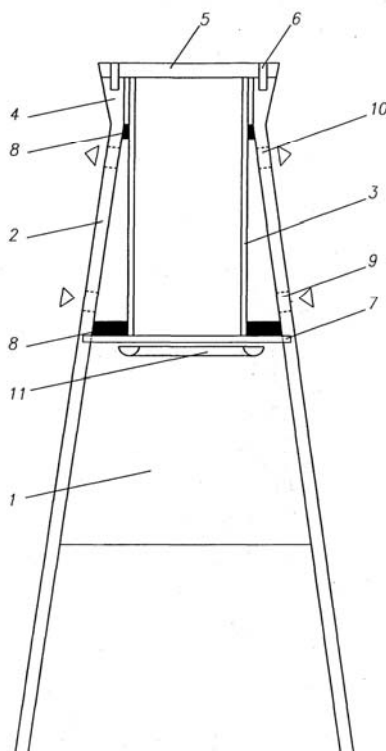
Таким образом, дымовые газы, содержащие загрязняющие вещества, движутся вверх по стволу дымовой трубы и, достигая высоты на которой установлен внутренний газоотводящий ствол, конденсируются. Образовавшийся конденсат стекает по внутренней поверхности газоотводящего ствола в кольцевой поддон, присоединенный к системе дренирования, а загрязняющие вещества, содержащиеся в конденсате, не попадают в окружающую среду.

## ВЫВОДЫ

Разработана тепло- массо- коррозионная технология ревитации стволов дымовых труб (из металла, железобетона, кирпича и т. д.), которая отличается от известных тем, что



монтаж реабилитационной трубы выполняется не «снизу вверх», а «сверху вниз», а также с использованием предложенной схемы с утилизацией химически активных компонентов дымовых газов [6, 9].



**Рисунок 5 – Схема тепловой реабилитации дымовой трубы по средствам конденсации паров на внутренней поверхности коррозионностойкого ствола**

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стриха, И.И Низкотемпературная коррозия и экологоэкономические показатели котельных установок тепловых электростанций/ И.И. Стриха// Минск : НИГП «БелТЭИ», 1998 г.
2. Стриха, И.И Повышение эффективности энергоиспользования в системах воздухообеспечения промышленных предприятий / И.И. Стриха // Энергоэффективность. – 2008. – № 12. – С. 18–19.
3. Техническая термодинамика : учеб. для студентов строит. и энергет. специальностей: в 2 ч. / Б.М. Хрусталёв, А.П. Несенчук, В.Н. Романюк, В.Д. Акельев. – Минск : Технопринт, 2004. – Ч. 1. – 486 с.
4. Тепло- и массообмен: учеб. пособие для студентов учреждений, обеспечивающих получение высш. образования по строит., энергет. и машиностроит. специальностям: в 2 ч. / Б.М. Хрусталёв, А.П. Несенчук, В.И. Тимошпольский, В.Д. Акельев, В.А. Седнин, В.М. Копко, А.В. Нерезько. – Минск : Белорус. нац. техн. ун-т, 2007. – Ч. 1. – 606 с.
5. Системы производства и распределения энергоносителей промышленных предприятий: учеб. для студентов энергет. и строит. специальностей учреждений, обеспечивающих получение высш. образования: в 2 ч. / Б.М. Хрусталёв, В.А. Седнин, В.Д. Акельев, В.Н. Романюк, А.В. Нерезько, В.М. Копко, А.П. Несенчук ; под ред. А.П. Несенчука. – Минск : Технопринт, 2005. – Ч. 1. – 544 с.
6. Дымовая труба: пат. на полезную модель ВУ 4172 U 4172 Респ. Беларусь, МПК (2006) E 04H 12/00 / Б.М. Хрусталёв, С.Н. Леонович, В.Д. Акельев, В.Д. Сизов, Н.Д. Байлук; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № ГР 20070513; заявл. 11.07.07; опубл. 07.11.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 2. – С. 205.

7. Тепло- и массообмен: учеб. пособие для студентов учреждений, обеспечивающих получение высш. образования по строит., энергет. и машиностроит. специальностям: в 2 ч. / Б.М. Хрусталёв, А.П. Несенчук, В.И. Тимошпольский, В.Д. Акельев, В.А. Седнин, В.М. Копко, А.В. Нерезько. – Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2007. – Ч. 2. – 273 с.
8. Акельев, В.Д. Тепло- и массообмен в ограниченных пространствах строительных конструкций и сооружений / В.Д. Акельев; под общ. ред. А.П. Несенчука. – Минск : Белорус. нац. техн. ун-т, 2010. – 316 с.
9. Дымовая труба: пат. на полезную модель ВУ 8376 U 2012.06.30 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) Е 04Н 12/00 / Б.М. Хрусталёв, В.Д. Акельев, Крень В.В.; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № ГР 20111068; заявл. 28.12.11; опубл. 04.03.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 2. – С. 205.