

С.П. Еронько /д.т.н./, М.Ю. Ткачёв /к.т.н./, Б.И. Стародубцев

ГОУ ВПО "Донецкий национальный технический университет" (г. Донецк, ДНР)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОУЛТСОСА КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА С ВРАЩАЮЩИМСЯ КОРПУСОМ

Представлены новые технические решения, заложенные в конструкцию, системы эвакуации дыма и газа для разработанного мини-плавильного агрегата с вращающимся корпусом. Изготовлена конструкция безопасного вентилятора позволяющая повысить эффективность работы комплекса газоочистки и исключить попадания продуктов сгорания в окружающее пространство. Проведены лабораторные испытания данного устройства, которые выявили преимущества при внедрении его в производственный процесс.

Ключевые слова: *кислородный конвертер, газоочистка, эффект Коанда, эвакуация пыли и газов, безопасной вентилятор, дымосос радиального типа.*

Постановка проблемы

Любой сталеплавильный процесс сопровождается интенсивным выделением газа, содержащим большое количество мелкодисперсной пыли. Как известно, в состав конвертерных газов, образующихся при выплавке стали по классической технологии, входит до 85% СО. При этом конструктивное исполнение системы газоочистки кислородного конвертера зависит от того, используется ли в дальнейшем в качестве топлива содержащаяся в отходящей газовой смеси окись углерода. Поэтому существует две схемы отвода газа от конвертера, одна из которых предполагает предварительное дожигание СО в камине (вертикальном или наклонном газоходе), охлаждения, очистку от пыли и выброс в атмосферу продуктов сгорания. Вторая схема обеспечивает охлаждение, очистку отводимых от плавильного агрегата газов и подачу их в специальные ёмкости (газгольдеры) с последующим использованием в качестве топлива [1]. Ни одна из указанных схем не отвечает условиям процесса выплавки стали в конвертере с корпусом, вращающимся относительно своей продольной оси, наклонённой под углом 17-25° к горизонтальной плоскости. К особенностям такого сталеплавильного процесса следует отнести полное сгорание СО в рабочем пространстве агрегата, а также наличие нескольких подвижных сопряжений элементов системы газоотсоса, непосредственно примыкающих к его горловине и вызывающих значительную утечку неочищенных газов в окружающую среду.

Цель (задачи) исследований

Одной из задач, подлежащих решению при создании усовершенствованного кислородного конвертера с вращающимся корпусом для переработки некачественной шихты и металлсодержащих отходов, является модернизация его системы газоотвода. Для достижения поставленной цели нужны новые технические решения, способствующие повышению эффективности эвакуации конверторных газов, при которой бы устранялся их выход в окружающее пространство через зазоры между подвижно сопрягаемыми элементами системы газохода [2].

Анализ последних исследований и публикаций

Результаты выполненного литературного обзора [3,4] и проведенных патентных исследований [5,6] свидетельствуют о том, что в поисках альтернативы радиальным и осевым вентиляторам, имеющим уже 180 летнюю историю, за рубежом активизированы экспериментальные и теоретические изыскания, связанные с созданием вентиляторных устройств, обеспечивающих направленное движение газовых потоков без применения рабочих колёс с закреплёнными лопатками. Речь идёт о так называемых безлопастных вентиляторах, принцип действия которых основана на эффекте Коанда.

Первенство в практической реализации безлопастного вентилятора принадлежит британцу Джеймсу Дайсону, предложившему использовать в вентиляторной системе пустотелое кольцо с продольным сечением, схожим с профилем самолётного крыла, при этом на внутренней его поверхности по всему периметру расположена щель зазором 0,5...5 мм. Через эту щель с помощью турбины, размещённой в основании вентилятора, с огромной скоростью вытесняется воздух, поток которого плавно огибает внутренний аэродинамический профиль и создаёт в центре кольца область разряжения, благодаря чему воздушная масса втягивается с периферии и сливается с первичным потоком, образуя струю, выталкивающую вперёд из кольца увеличивающую объём воздуха на выходе в 10...20 раз. Средством для создания потока воздуха через сопло вентилятора Дайсона может быть не только турбина, но и компрессор. Однако следует отметить то обстоятельство, что при изготовлении кольцевого сопла со сложной конфигурацией профиля затруднительно выдержать жёсткие допуски на размеры, в связи с чем его диаметр не превышает 600 мм, т.е. такая вентиляторная система нашла применение пока только в быту. В связи с этим для использования безлопастного вентилятора в промышленных установках газоотсоса, когда диаметр его сопла может достигать 2-х метров, необходимо иное конструктивное исполнение узла сопла вентиляторной системы такого типа.

Основной материал исследований

На кафедре механического оборудования заводов чёрной металлургии Донецкого национального технического университета в 2014 году начаты работы по проектированию безлопастного вентилятора и изучению возможности его использования в системах газоотсоса в условиях сталеплавильного производства. В результате была предложена и запатентована [7] новая конструктивная схема (рис. 1) сопловой части вентилятора предусматривающая её формирование из комплекса полых сегментов 4, имеющих контур внешней поверхности, аналогичный форме продольного сечения полого кольца вентиляторной системы Дайсона. Данные сегменты размещены на кольцевой оправке с возможностью относительного поворота на определённый угол в радиальной плоскости, а их полости сообщаются посредством гибких трубок 3 с воздухораспределительным коллектором 2, выполненным в виде тора. На входе горловины выполненными кольцевыми сегментами 4, размещён завихритель потока, включающий полые сегменты 5 с щелевыми соплами и внутренней поверхностью Коанда, закреплённые последовательно по окружности на несущей скобе в полости, перпендикулярной продольной оси горловины, при этом полости сегментов 5 посредством трубопроводов 7 сообщаются с полостью 2-й торообразной воздухораспределительной камеры 6. Обе распределительные камеры снабжены патрубками 1 и 8 для подключения их к источнику сжатого воздуха.

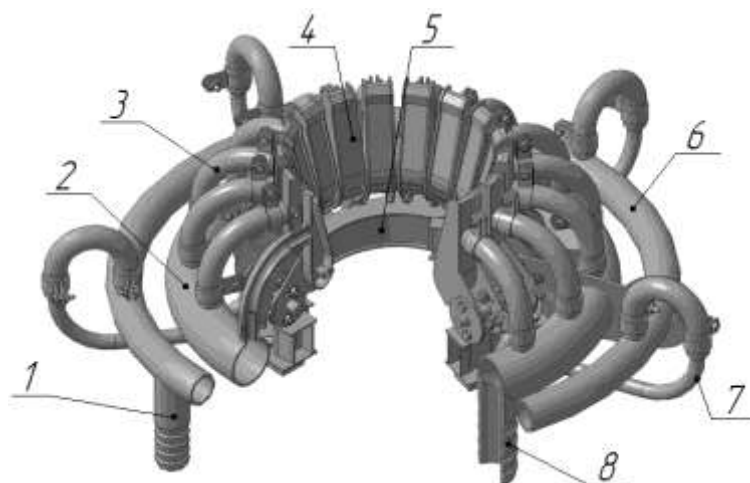


Рисунок 1 – 3D модель безлопастного вентилятора

Отсутствие на данный момент теории расчёта вновь созданного узла безлопастного вентилятора предопределило необходимость проведения лабораторных исследований на физических моделях с целью получения исходной информации для проверки возможности его встраивания в модернизируемую систему газоотсоса кислородного конвертера с вращающимся корпусом.

В ходе модельных исследований в качестве оценочных критериев эффективности функционирования безлопастного вентилятора приняли расходные и скоростные характеристики газовых потоков, возбуждаемых с его помощью. Лабораторные эксперименты проводили в три этапа. Вначале по методике, подробно освещённой в работе [8], получили информацию о достигаемых значениях коэффициента умножающего эффекта, под которым в специальной литературе считают отношения объёмного расхода газовой смеси на выходе из горловины вентилятора к объёму воздуха, подаваемого в единицу времени в его полые сегменты. Для этого с использованием плоской прозрачной модели, включавшей два сегмента вентилятора с конструктивными параметрами (рис. 2): $\alpha = 15^\circ$, $\beta = 25^\circ$, $\gamma = 45^\circ$, $\delta = 0,7$ мм, $B = 50$ мм, $d = 85-205$ мм в полости которых под избыточным давлением в пределах 50–150 кПа компрессором с заданным расходом, контролируемым с помощью ротаметра, подавали воздух и с использованием специального зонда измеряли скорость формировавшегося на выходе из горловины плоской модели вентиляторной системы газовой воздушного потока.

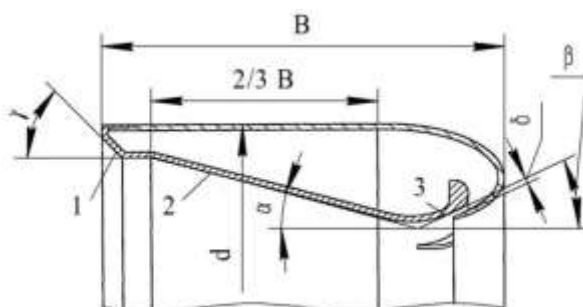


Рисунок 2 – Основные геометрические параметры профиля сегмента модели вентилятора:
1 – скошенная поверхность; 2 – диффузор; 3 – поверхность Коанда

Его визуализация на тёмном фоне обеспечивали светлым дымом, поступавшим из генератора, расположенного ниже модели. Измерительный зонд включал тензорезисторный

преобразователь – упругую пластину с наклеенными фольговыми датчиками, консольно закреплённую одним своим концом в цилиндрическом стеклянном баллончике, а вторым концом связанную с рычагом, несущим приёмный элемент в виде диска диаметром 10 мм. Зонд позволял преобразовать значение динамического давления, действующего на его приёмный диск со стороны газовой воздушного потока, в аналоговый сигнал, пропорциональный плотности и скорости во второй степени движущейся среды. Для обеспечения контроля в режиме реального времени записи регистрируемого сигнала и последующего анализа его формы и значения в измерительную систему входили также усилитель переменного тока, аналого-цифровой преобразователь и ЭВМ с печатающим устройством. По результатам измерений, погрешность которых по данным статистической обработки не превышала 5%, были построены поля скоростей (v , м/с), зафиксированных в поперечном сечении газовой воздушных потоков на выходе из горловины плоской модели исследуемого вентилятора (рис. 3) и дающих возможность рассчитать осреднённые значения обеспечиваемых ею объёмных расходов. Отношение этих значений и соответствующих им показаний ротаметра о расходе рабочей газовой смеси, подававшейся в полые сегменты модели вентилятора, позволили определить обеспечиваемый ею коэффициент умножающего эффекта (данные таблицы). Значение этого коэффициента, находящееся в пределах 3,6 – 10,5, в значительной мере зависит от давления воздуха, поступающего в полости сегментов с поверхностью Коанда.

Таблица – Скоростные и расходные характеристики работы плоской модели безлопастного вентилятора

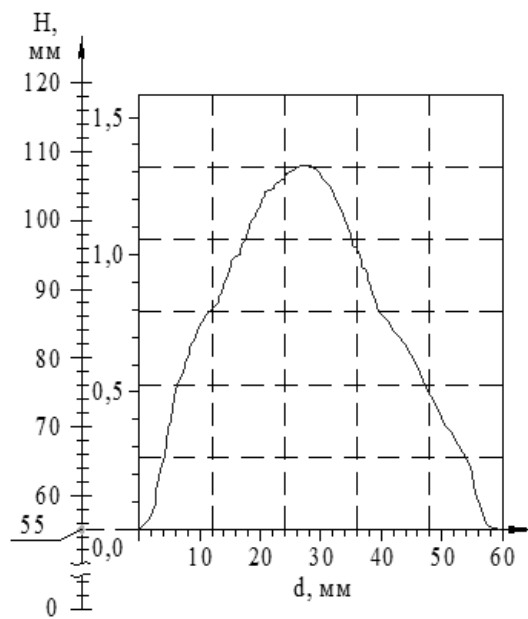
Значение параметров работы модели вентилятора		Осреднённая скорость потока эвакуируемой газовой воздушной смеси, м/с	Объёмная производительность модели вентилятора, л/мин	Значение коэффициента умножающего эффекта вентилятора
Давление воздуха, кПа	Расход воздуха, л/мин			
50	8	0,8	28,8	3,6
	10	1,1	39,6	3,9
	12	1,3	46,8	3,9
100	8	1,4	50,4	6,3
	10	1,8	64,8	6,5
	12	2,2	79,2	6,6
150	8	2,3	82,8	10,4
	10	2,9	104,4	10,4
	12	3,5	126	10,5

На втором этапе экспериментальных исследований проводили стендовое испытание опытного образца безлопастного вентилятора, изготовленного с учётом рациональных значений его конструктивных параметров, проверенных на плоской физической модели. Во время тестирования работы новой вентиляторной системы с использованием скоростной видео съёмки осуществили фиксацию картин развития газодинамических процессов,

протекающих в зоне размещения безлопастного вентилятора, находящегося на различном удалении от источника дыма. Для этого вентилятор предварительно закрепили на трёх вертикальных стойках над раздвоенным щелевым соплом, формирующим расходящиеся под заданным углом два направленных потока дыма, поступавшего от специального генератора, включавшего заполненную тлеющими древесными опилками металлическую гильзу и дымосос радиального типа. Угол отклонения от вертикальных потоков дыма, истекавших из щелевых сопел, был подобран с учётом геометрических параметров вентилятора с таким расчётом, чтобы дымовые струи не имели прямого попадания в его горловину. Благодаря этому моделировались неблагоприятные начальные условия работы вентиляторной системы (фото на рис. 4 а). После запуска вентилятора отработывали различные режимы его функционирования, предусматривающие эвакуацию дыма при отключённом завихрителе потоков (фото на рис. 4 б) и его задействовании (фото на рис 4 в).

Анализ просмотренных в динамике и в режиме «стоп-кадр» видеозаписей, полученных для всего диапазона измерений удалённости вентилятора от источника дыма (раздвоенного щелевого сопла), свидетельствует о том, что максимальная эффективность функционирования системы безлопастного вентилятора обеспечивается в случае одновременной работы её узлов возбуждения и завихрения газоздушных потоков при определённом соотношении объёмов воздуха, подаваемых в единицу времени в полости элементов, образующих указанные узлы. В частности, для тестируемого безлопастного вентилятора соотношение объёмных расходов воздуха, подаваемого к узлам возбуждения и завихрения газовых (дымовых) потоков, составило 3 к 2. При данном соотношении зафиксированы максимальные значения коэффициента умножающего эффекта, составлявшие 10-15.

На третьем этапе модельных исследований провели серию экспериментов с целью подтверждения возможности применения безлопастного вентилятора в модернизированной системе газоотсоса конвертера с вращающимся корпусом. В соответствии с её структурной схемой, приведенной на рисунке 5, в ней наряду с центробежным дымососом 11 предусмотрено использование дополнительного вентилятора безлопастного типа 7. При этом дымосос, установленный непосредственно перед дымовой трубой 12, обеспечивает прокачку отводимых от кислородного конвертера 1 газов через аккумулятор тепла 8, скруббер 9 и рукавный фильтр 10. А безлопастной вентилятор 7, размещённый над вертикальным воздушным холодильником 5 и охватывающий его выходной носок 6, предназначен для создания дополнительной тяги в газоходе, исключаяющей попадание в окружающее пространство газопылевой смеси через зазор между горловиной конвертера и примыкающего к ней колпака 2, а также через отверстие в его верхней торцевой части для ввода в полость плавильного агрегата наклонной кислородной фурмы 4, закреплённой на ходовой тележке 3 и совершающей качательное движение во время реализации технологического процесса.

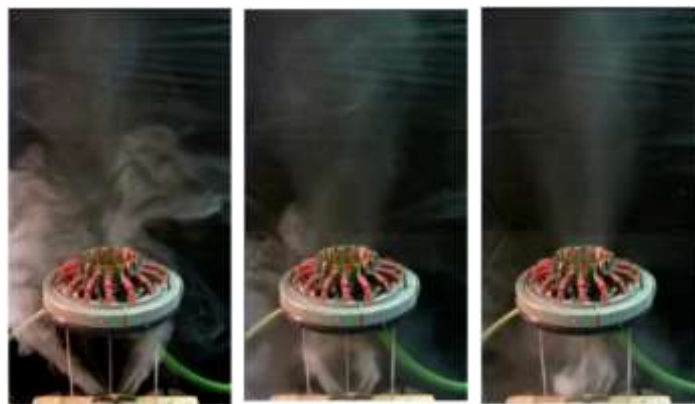


а



б

Рисунок 3 – Поля скоростей газозвдушного потока на различном удалении от выхода горловины плоской модели вентиляторной системы (а) и его визуализированная картина в зоне формирования (б) при давлении и объёмном расходе энергоносителя 8 л/мин и 50 кПа



а

б

в

Рисунок 4 – Характерные картины потоков дыма, наблюдавшиеся при различных режимах функционирования безлопастного вентилятора

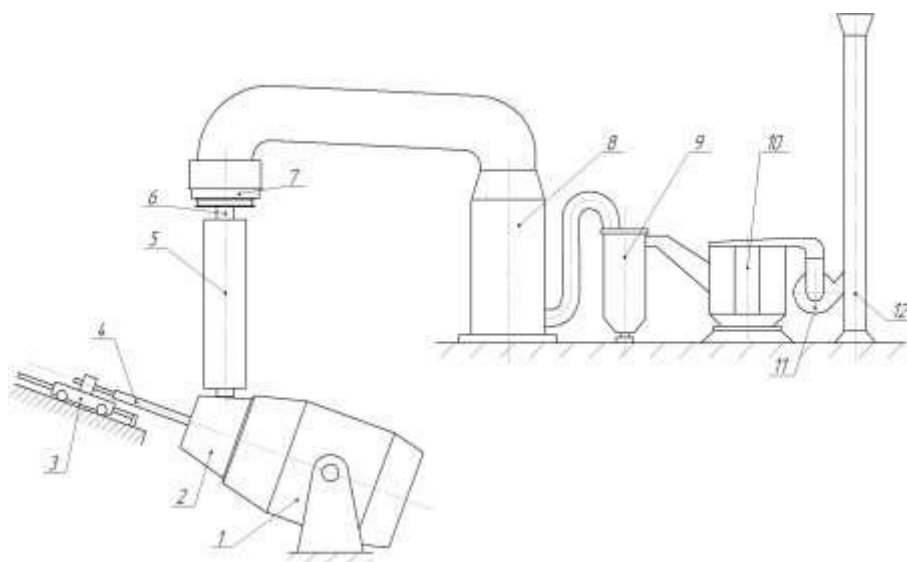


Рисунок 5 – Структурная схема модернизированной системы газоотсоса кислородного конвертера с вращающимся корпусом

С целью проверки правильности принятых конструктивных решений ещё на стадии проектирования, качественной и количественной оценки эффективности функционирования перспективного образца системы, обеспечивающей отвод газа от кислородного конвертера, изготовили в масштабе 1:10 модельный комплекс оборудования (фото на рис. 6), состав и последовательность размещения структурных элементов которого в точности соответствует ранее приведённой схеме.



Рисунок 6 – Общий вид модельного комплекса системы газоотсоса

Известно, что в процессе выплавки стали в конвертере с корпусом, вращающимся относительно наклонной продольной оси, происходит полное дожигание CO и CO_2 . При

этом расход кислорода должен составлять 60 м^3 кислорода на 1 т чугуна, а объём конвертерного газа в м^3 за время плавки может быть выражен формулой, приведённой в работе [1],

$$V_{\text{кз}} = 18,66 \cdot (C_1 - C_2) \cdot G$$

где C_1 и C_2 – содержание углерода в металле в начале и конце продувки, %;

G – масса садки конвертера, т.

Для условной работы 10-тонного конвертера с продолжительностью продувки чугуна кислородом 30 мин система газоотсоса должна обеспечивать удаление $0,4 \text{ м}^3$ газовой смеси в секунду, поскольку линейный масштаб уменьшения модели 10-тонного конвертера составляет $m_c=10$, то секундный объём отсасываемых из неё газов, должен быть меньше в 10^3 раз, по сравнению с натуральным образцом плавильного агрегата, т.е. $0,4 \text{ л/с}$.

Для указанной производительности рассчитали и изготовили модель центробежного дымососа, приводимого в действие электродвигателем постоянного тока с регулируемой частотой вращения вала. Затем с использованием жидкостного манометра, подключаемого к всасываемому патрубку дымососа, и газового расходомера, размещённого на его выхлопном патрубке, провели серию измерений, результаты которых позволили получить характеристику, устанавливающую связь между разряжением P_B и производительностью Q при заданном числе оборотов рабочего колеса. В характеристике вентилятора имеются две особые точки, одна из которых соответствует его холостому ходу (а), а другая холостому ходу (б). Первая точка имеет координаты $P_B=P_{B \text{ max}}$ и $Q=0$, а это означает, что вся энергия, сообщаемая приводным двигателем рабочему колесу, расходуется на создание разрежения во всасывающем патрубке в случае полного перекрытия его сечения. Вторая точка с координатами $P_B=0$ и $Q=Q_{\text{max}}$ характерна для самостоятельной работы вентилятора, т.е. без подключения его к сети или устройству. В этом режиме функционирования вентилятора вся энергия, подводимая к его рабочему колесу, затрачивается на перемещение газовой среды и компенсацию потерь при её прохождении через сам вентилятор. Естественно, что все возможные варианты работы вентилятора на газоотсос будут определяться положением линии $P_B=f(Q)$, построенной по координатам промежуточных точек. С учётом того, что планом эксперимента предусматривалась возможность регулирования работы модели дымососа, были получены значения, по которым построили графики, соответствующие двум скоростям вращения её колеса (рис. 7). Поскольку исследуемая система состоит из вентилятора и сети, которую он обслуживает, приведённые на этом рисунке зависимости дополнены характеристикой, устанавливающей связь между аэродинамическим сопротивлением модели сети и расходом газа в ней, т.е. $\Delta P_{\Sigma}=f(Q)$. Характеристика модели сети учитывает все виды сопротивления на пути движения газового потока от горловины модели конвертера до всасывающего патрубка модели дымососа. В соответствии с планом эксперимента предполагалось изменение характеристики сети за счёт увеличения гидравлического сопротивления модели рукавного фильтра посредством применения в нём тканей с различной газопропускной способностью, благодаря чему можно имитировать работу системы газоотсоса в процессе накопления пыли на поверхностях матерчатых рукавов.

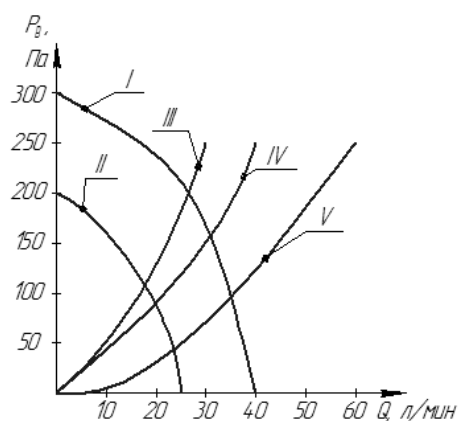


Рисунок 7 – Полученные характеристики моделей дымососа (I,II) и обслуживаемой им сети (III, IV, V)

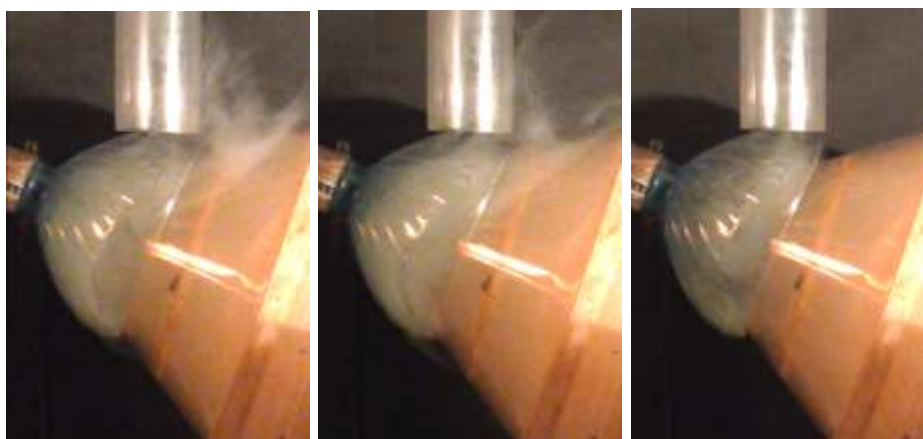
В ходе физического моделирования работы предложенной системы газоотсоса в полость кислородного конвертера через наклонную фурму с указанным расходом, контролировавшимся ротаметром, с помощью специального насоса закачивали дым, позволяющий визуализировать картину распределения газовых потоков вблизи горловины модели сталеплавильного агрегата, интенсивность и траектории которых давали возможность качественно оценить эффективность эвакуации газов по предлагаемой схеме с использованием безлопастного вентилятора в комплексе с дымососом (центробежным вентилятором).

Для последующего сравнительного анализа во время симуляции процессов, протекающих в каналах элементов моделируемой системы эвакуации газов, с помощью видеокамеры осуществляли скоростную видеосъемку картин распределения потоков светлого дыма, наблюдавшихся через прозрачные стенки горловины модели конвертера, примыкающего к ней колпака и вертикально установленного воздушного холодильника.

Во время проведения видеосъемки имитировали несколько вариантов функционирования исследуемой системы, предполагающих реализацию процесса эвакуации дыма при раздельной и совместной работе дымососа и безлопастного вентилятора.

Количество (объем) газа, образующегося в разные периоды плавки стали в кислородном конвертере, напрямую зависит от скорости выгорания углерода, т.е. является переменным, поэтому производительность дымососа должна быть равной или несколько больше максимальной интенсивности выделения газовой фазы в полости плавильного агрегата. При этом по ходу ведения технологического процесса, когда суммарный объем образующихся газов и дыма резко уменьшается, прибегают к снижению производительности дымососа. Наиболее экономичным способом регулирования объема отсасываемого газа, как известно считают тот, который предусматривает ступенчатое изменение скорости вращения рабочего колеса дымососа. В связи с этим вначале осуществляли проверку функционирования модельного комплекса в условиях, когда в его работе был задействован только центробежный вентилятор.

Просмотр отснятого видеоматериала в динамике и режиме «стоп-кадр» позволил установить главные особенности развития и движения потоков газа вблизи имевшихся зазоров в сочленениях элементов дымохода, а также в местах резкого изменения направления его канала. На рисунке 8 приведены характерные картины потоков дыма, наблюдавшиеся вблизи зазора между горловиной модели конвертера и пристыкованного к ней колпака.



а

б

в

Рисунок 8 – Характерные картины распределения потоков дыма вблизи горловины модели конвертера при имитации процесса газоотсоса с использованием центробежного и безлопастного вентиляторов

Результаты визуального контроля свидетельствуют о том, что несмотря на экономичность, способ регулирования производительности дымососа путём ступенчатого изменения числа оборотов его колеса не обеспечивает гибкой подстройки системы газоотсоса к изменяющимся условиям работы. Так при резком увеличении количества выделяющегося дыма, когда производительность дымососа оказывалась недостаточной и в окружающее пространство через зазоры попадали и газы (рис. 8 а), перевод вентилятора на большую скорость вызывал различный эффект в зависимости от характеристики обслуживаемой сети. Если её рукавный фильтр имел повышенное гидравлическое сопротивление, дымосос не обеспечивал требуемого разрежения в полости колпака, состыкованного с горловиной модели конвертера, и через зазор между ними часть дыма всё же попадала за пределы дымохода (рис. 8 б). При пониженном гидравлическом сопротивлении модели рукавного фильтра, поле увеличения скорости вращения колеса дымососа, наблюдался подсос воздуха через существующие зазоры в газоотводящий тракт (рис. 8 в), что также является нежелательным последствием.

Поэтому заключительный этап модельных исследований был связан с изучением возможности использования безлопастного вентилятора в качестве дополнительного средства, позволяющего при работе в комплексе с дымососом обеспечить режим функционирования системы эвакуации конвертерных газов и дыма, при котором в наибольшей мере исключается их попадание в окружающую среду без надлежащей очистки. На основании результатов серии экспериментов, проводившихся при различных комбинациях значений параметров, влияющих на эффективность газоотсоса из рабочего пространства модели кислородного мини-конвертера, корпус которого во время реализации сталеплавильного процесса совершает вращение относительно своей продольной оси, наклонённой под углом 16-20° к горизонтальной плоскости, были выданы практические рекомендации относительно режимов работы и порядка включения в неё центробежного дымососа и безлопастного вентилятора, входящих в состав модернизированной системы эвакуации и очистки конвертерных газов.

Во время проведения процесса плавления металла количество газа, просасываемого дымососом в единицу времени, изменяется по ходу продувки. Кроме того, водоохлаждаемый

колпак и горловина конвертера могут занимать различное относительное положение при выполнении требуемых технологических операций. При продувке ванны с переменной интенсивностью кислородом колпак примыкает к горловине, а верхняя часть камина коаксиально расположенная относительно сопла безлопастного вентилятора, заведена в отверстие газохода. Отсос конвертерных газов и дыма осуществляет дымосос, скорость вращения рабочего колеса которого должна быть такой, чтобы исключались выход газа через зазоры в окружающую среду или наоборот подсос воздуха в систему.

В ходе проведения скачивания шлака или его газодинамической отсечки при выпуске металла в разливочный ковш камин (рис. 9) должен быть опущен в нижнее положение, в котором его верхняя часть будет выведена из отверстия газохода и в него с помощью запущенного безлопастного вентилятора закачивают попавший из конвертера в окружающее пространство газ. При одновременной работе дымососа и безлопастного вентилятора их производительности должны быть одинаковыми, что достигается посредством регулирования числа оборотов колеса центробежного вентилятора и объема воздуха, подаваемого в единицу времени к узлам формирования и завихрения потоков безлопастного вентилятора.

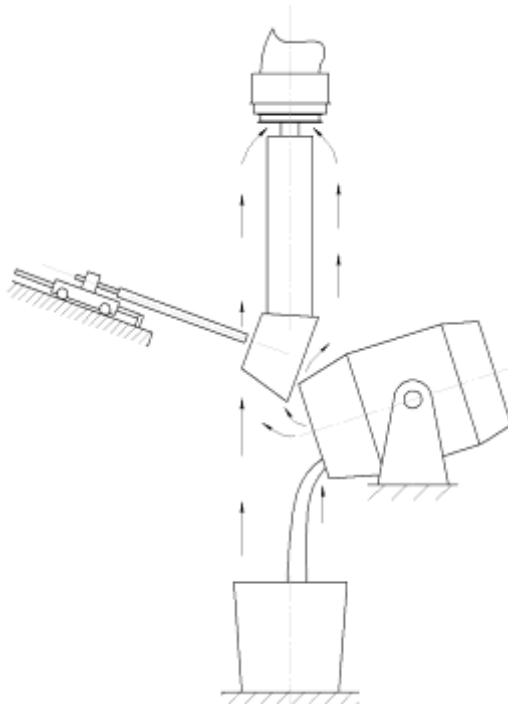


Рисунок 9 – Траектория движения газовых потоков во время слива металла из конвертера в ковш при одновременной работе безлопастного вентилятора и дымососа

Благодаря такому порядку совместной работы дымососа и безлопастного вентилятора можно в значительной мере сократить объем вредных выбросов в окружающее пространство в тех случаях, когда горловина корпуса кислородного конвертера не состыкована с колпаком и направлена вниз во время проведения соответствующих технологических операций, так как газ и дым, образуются как в рабочем пространстве плавильного агрегата, так и в полости разливочного ковша, будут засасываться в канал дымохода благодаря эффекту торнадо, развиваемым узлом завихрителя потоков вентиляторной системы, размещенной над камином.

Выводы

Таким образом, качественные и количественные показатели эффективности функционирования модели модернизированной системы газоотсоса кислородного ковертера с вращающимся корпусом дают возможность ещё на этапе конструкторно-технологической проработки нового технологического решения исключить нерациональные варианты схем компоновки структурных блоков, обеспечивающих направленную циркуляцию выбросов газа и дыма.

В дальнейших исследованиях такой системы газоотсоса следует изучить вопрос о влиянии на её надёжность пылевых частиц, находящихся в отсасываемых газах и способных вызвать интенсивный абразивный износ металлических поверхностей полых сегментов узлов формирования и завихрения потоков безлопастного вентилятора.

Список литературы

1. Бойченко Б.М., Охотский В.Б., Харламин П.С. Конверторное производство стали: теория, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология. – Днепропетровск: РВА «Днепро-ВАЛ», 2006. – 454с.
2. Еронько С.П., Климович Н.А. Перспективы и проблематика создания мини-агрегата для переработки некачественной шихты и металлосодержащих отходов. // Чёрная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация» - 2016. №5. – С. 26 – 31.
3. Miozzi m., Lalli F., Pomano G.P. Experimental investigation of a free-surface turbulent jet with Coanda effects / Experiments in Fluids. – 2010. – Vol. 49, Issue 1. – P. 341 – 353.
4. Dragan V. A new mathematical model for high thickness Coanda effect wall jets / Review o the Air Force Academy. – 2013. – Issue 1(23). – P. 23 – 28.
5. Патент 2458254 РФ, F04D25/08. Вентилятор / Гэммак П.Д., Николас Ф., Симмондз К.Д.; Дайсон Текнолоджи Лимитед (GB); №201012706/06, заявлено 10.10.2011; опубл. 10.08.2012.
6. Патент 2484383 РФ, F24F1/02. Вентилятор / Николас Ф., Симмондз К.Д.; Дайсон Текнолоджи Лимитед (GB); №2011128308/12, заявлено 27.01.2013; опубл. 10.06.2013.
7. Патент 2630443 РФ, МПК F24F 7/00. Узел безлопастного вентилятора эвакуации газопылевых выбросов из промышленных агрегатов / Е.Н. Смирнов, С.П. Еронько, М.Ю. Ткачёв и др.; заявлено 23.05.2016, опубл. 07.09.2017. Бюл. №25.
8. Исследование на физической модели возможности использования принципа вентилятора Дайсона в системах газоотсоса металлургических агрегатов / С.П. Еронько, М.Ю. Ткачёв, А.С. Сосонкин и др. // Металлургические процессы и оборудование. – 2014. - №2 – С. 51 – 59.
9. Еронько С.П., Ткачёв М.Ю., Стародубцев Б.И. Моделирование газоотсоса от плавильных агрегатов с использованием безлопастных вентиляторов // Вестник института гражданской защиты Донбасса: научный журнал. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – Выпуск 3(3). – С. 15 – 19.