Технологии ликвидации источников химической опасности

УДК 661.666.4:66.074.2 DOI: 10.25514/CHS.2020.2.18015

Модернизация систем улавливания и аспирации производства пылящего технического углерода

П. С. Васильев✉, Е. Г. Баклаушева

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»,
г. Волгоград, Россия, e-mail: nestorvv@mail.ru

Поступила в редакцию: 08.10.2020 г., после доработки: 06.12.2020 г., принята в печать: 14.12.2020

Аннотация – Статья посвящена актуальной проблеме совершенствования пылеулавливающего оборудования, используемого в процессе производства технического углерода. Технический углерод (ТУ) широко применяется в резинотехнической и других видах промышленности, производится путем пиролиза в виде аэрозоля, эффективное улавливание которого представляет сложную задачу. Рассмотрены вопросы несовершенства аппаратурно-технологического оформления существующих производств пылящего ТУ аппаратами циклонного типа, отмечены тенденции и перспективы развития альтернативных производственных процессов и пылеулавливающего оборудования. С целью оптимального выбора конструкции пылеуловителя для систем улавливания ТУ представлен вариант решения задачи с использованием аппаратов со встречными закрученными потоками (ВЗП). Приведены основные расчетные зависимости для определения эффективности улавливания циклонов и аппаратов ВЗП, выполнено сравнительное математическое моделирование их работы и проанализированы полученные результаты. Результаты расчетов показывают, что использование в производстве ТУ группы из двух аппаратов ВЗП вместо применяемого в настоящее время аппарата циклонного типа позволит существенно повысить общую эффективность улавливания (92% против ~64%), снизить на 20–30% нагрузку на системы доулавливания и аспирации, уменьшить металлоемкость и гидравлическое сопротивление, повысить эксплуатационную надежность. Это приведет к увеличению экономичности производства при одновременном повышении его безопасности и экологичности.

Ключевые слова: технический углерод, пылеуловитель, эффективность улавливания пыли, циклон, аппарат со встречными закрученными потоками.

Technologies for elimination of chemical hazards

УДК 661.666.4:66.074.2 DOI: 10.25514/CHS.2020.2.18015

Modernization of capture and aspiration systems in production of dusty carbon black

Piotr S. Vasilyev✉, and Elizaveta G. Baklausheva

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Volgograd State Technical University”, Volgograd, Russia, e-mail: nestorvv@mail.ru

Received: October 8, 2020, Revised: December 6, 2020, Accepted: December 14, 2020

Abstract – The article deals with addressing an actual problem of improving the dust collection equipment used in carbon black production. Carbon black (CB), widely used in rubber and other industries, is produced by pyrolysis in the form of an aerosol, however, its efficient capturing is considered as a difficult engineering problem. The issues of imperfection of the current equipment and technological design for capturing dusty CB by cyclone devices are discussed, and trends and prospects for the development of alternative production processes and dust collection equipment are reviewed. For the purpose of optimal choice of the design of the dust collector for the systems for CB capturing, a decision version of the problem is proposed using devices with counter-swirling flows (CSF). The principal calculated dependencies for determining the efficiency of CB capturing by cyclones versus CSF apparatuses are presented, a comparative mathematical modeling of their performance is carried out and the results are analyzed. The results of calculations show that the use of a group of two CSF devices in the production of CB instead of the currently applied cyclone type apparatus would result in significant increase in the overall capturing efficiency (92% versus ~64%), decrease in the load on the post-collection and aspiration systems by 20–30%, reduction of metal consumption and hydraulic resistance, and improvement of operational reliability. This will lead to an increase in the cost-effectiveness of the CB production with simultaneous improvements in its safety and environmental friendliness.

Keywords: carbon black, dust collector, dust collection efficiency, cyclone, device with counter swirling flows.

ВВЕДЕНИЕ

Технический углерод – высокодисперсный продукт (размер частиц 10–150 нм, удельная поверхность 5–150 м^2/г), который широко используется в качестве усиливающего наполнителя при производстве резин для значительного улучшения их физико-химических свойств, в качестве черного пигмента в производстве типографских красок и других лакокрасочных материалов, а также в качестве наполнителя пластмасс и оболочек кабелей для придания им специальных свойств [1–3].

Ежегодно в мире производится около 13 млн т технического углерода, а его рынок стабильно сохраняет многолетние темпы роста до 3–4% в год, благодаря увеличению мирового спроса, особенно в шинной индустрии, строительном и промышленном секторах [4].

Более 96% производимого технического углерода получают печным способом путем пиролиза жидкого углеводородного сырья. Целевой продукт из образовавшегося в результате аэрозоля технического углерода, как правило, улавливают либо с помощью фильтров, либо с помощью центробежных пылеуловителей, в роли которых часто выступают аппараты циклонного типа, например, хорошо зарекомендовавший себя в течение длительного времени циклон-концентратор СК-ЦН-34 конструкции АО «НИИОГАЗ» (Россия) [1, 2].

Аналогичные ему центробежные пылеуловители в эталонных условиях работы обеспечивают эффективность улавливания до 80–90%. Однако эти значения поддерживаются только при колебаниях производительности по запыленному газу в пределах 0,9–1,1 от своего номинального значения. Кроме того, такие аппараты очень чувствительны к подсосам газов – при подсосе

через пылевой бункер всего 15% газов от их поступающего количества эффективность улавливания сводится к нулю.

В реальных условиях работы производительность по запыленному газу может колебаться в пределах 0,5–1,5 от своего номинального значения. Кроме того, для исключения налипания технического углерода на металлические поверхности технологических аппаратов, их корпуса обогревают дымовыми газами, что приводит к появлению температурных деформаций в элементах конструкций пылеуловителей и, соответственно, возникновению неплотности их соединений с технологическими трубопроводами и подсосам газов. В результате этого эффективность улавливания центробежных пылеуловителей составляет в среднем 60–75%, что говорит об их невысокой эксплуатационной надежности [2, 3].

Данное обстоятельство обуславливает наличие на заводах технического углерода (ЗТУ) эффективных и высоконагруженных систем доулавливания и аспирации, весьма дорогих в обслуживании и занимающих значительные производственные площади. При этом некоторые заводы в системах основного улавливания вообще не используют центробежные пылеуловители, отдавая предпочтение более громоздким фильтрам, например Ярославский ЗТУ, а также ряд зарубежных ЗТУ [2].

В последние годы все большее распространение приобретает пиролиз углеводородного сырья в изотермических условиях в среде инертного газа, что исключает влияние на образование и рост сажевых зародышей вторичных процессов, таких как окисление и газификация. Изотермический пиролиз способствует образованию более дисперсных частиц технического углерода с узким распределением по размерам, близким к монодисперсному, обладающих лучшими усиливающими свойствами [2, 5].

В то же время следует отметить, что технический углерод относится к веществам 3-го класса опасности по ГОСТ 12.1.005-88 [6]. Также имеются данные о канцерогенных свойствах технического углерода при его воздействии на органы дыхания. По оценкам Международного агентства по изучению рака (МАИР) технический углерод, возможно, является канцерогенным веществом для человека и по этой причине отнесен к группе 2В по классификации канцерогенных веществ [7, 8].

Указанные выше обстоятельства подтверждают актуальность проблемы модернизации систем улавливания технического углерода, поиск решения которой и представляет цель настоящей работы. Выбор оптимальной конструкции пылеуловителя будет способствовать снижению нагрузки на системы аспирации, повышая тем самым безопасность и эффективность производства технического углерода.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА АППАРАТОВ СО ВСТРЕЧНЫМИ ЗАКРУЧЕННЫМИ ПОТОКАМИ

Одним из прогрессивных аэродинамических способов интенсификации процессов улавливания высокодисперсной пыли и повышения эффективности работы пылеуловителей является применение закрученных газовых потоков в

вихревых аппаратах, промышленное использование которых началось в 50-е годы прошлого века [9, 10].

В 1953 г. Е. Шуафлер и Х. Ценнек запатентовали вихревую камеру для отделения твердых и жидких аэрозольных частиц с помощью вспомогательного закручивающего потока газа. В 1963 г. Х. Клейном были опубликованы результаты исследований опытного образца вихревого пылеулавливающего аппарата, имеющего диаметр 200 мм. При этом автором в качестве исходной была принята модель Е. Шуафлера [11].

Особый класс вихревых пылеуловителей представлен аппаратами со встречными закрученными потоками (ВЗП), получившими в настоящее время значительное распространение. В России аппараты ВЗП с 70-х годов прошлого века весьма широко применяются [11–13]:

1) для улавливания пыли (в том числе волокнистой и слипающейся) в системах пневмотранспорта и аспирации в химической и смежных с ней отраслях промышленности;

2) для очистки дымовых газов от золы и улавливания высокодисперсной пыли в энергетических установках;

3) для проведения тепломассообменных процессов (сушки, грануляции и др.) в различных отраслях промышленности, в том числе в криогенной технике.

Главное преимущество аппаратов ВЗП состоит в высокой эффективности улавливания высокодисперсной пыли. По этой причине, несмотря на сложную конструкцию аппаратов ВЗП, их применение оправдано при улавливании пыли с большим содержанием тонкой фракции [12].

Оптимальный выбор конструкции пылеуловителя систем основного улавливания технического углерода возможен только при известном дисперсном составе его аэрозоля, поступающего на очистку. Из реактора пиролиза аэрозоль вначале проходит через воздухоподогреватель и газоохладитель, используемые для рекуперативного нагрева технологических агентов, в результате чего его дисперсный состав значительно меняется [1, 2].

На рис. 1 приведен усредненный на основании литературных данных [1, 9] дисперсный состав аэрозоля технического углерода марки N550, согласно стандарту ASTM D1765, перед циклоном-концентратором, медианный диаметр частиц этой марки равен d_m = 9 мкм.

Анализ рисунка 1 показывает, что лучшей альтернативой циклонам могут стать аппараты ВЗП, разделительная способность которых достигает 0,4 мкм, а эффективность улавливания частиц размером больше 5 мкм составляет 100%, что позволяет достичь их окупаемости за 3–6 месяцев эксплуатации. Кроме того, их применение значительно уменьшает потери целевого продукта [14].

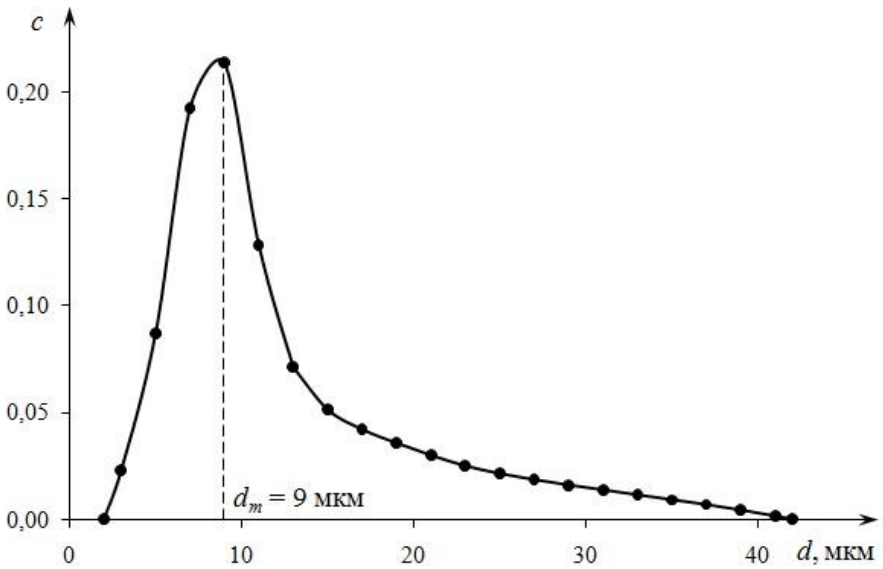

Рис. 1. Дифференциальная кривая распределения по размерам частиц аэрозоля технического углерода марки N550 перед циклоном-концентратором (*c* – плотность распределения частиц (относительная массовая концентрация)), построенная по данным [1, 9].

Fig. 1. Differential particle size distribution curve for N550 grade carbon black aerosol before cyclone concentrator (*c* – particle distribution density (relative mass concentration)) plotted according to [1, 9].

На рисунке 2 приведена принципиальная схема аппарата ВЗП [15].

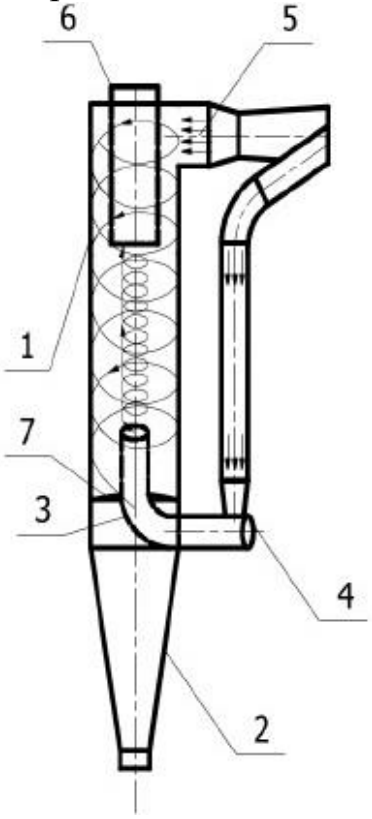

Рис. 2. Принципиальная схема аппарата ВЗП [15]:
1 – корпус; 2 – пылевой бункер; 3 – завихритель первичного потока; 4 – входной патрубок первичного потока; 5 – завихритель вторичного потока; 6 – выходной патрубок.

Fig. 2.Schematic diagram of CSF device [15]:

1 – housing; 2 – dust hopper; 3 – primary flow swirler; 4 – primary flow inlet; 5 – secondary flow swirler; 6 – outlet branch pipe.

Перед входом в аппарат запыленный газ разделяется на первичный и вторичный потоки. Первичный поток подается в нижнюю часть аппарата, закручивается завихрителем и, двигаясь вверх, подвергается воздействию вторичного потока. Вторичный газовый поток подается в верхнюю часть аппарата и также закручивается завихрителем в том же правлении. Под действием центробежных сил взвешенные в первичном потоке частицы отбрасываются к периферии, а оттуда – во вторичный вихревой поток, направляющих их вниз в кольцевое межтрубное пространство, снабженное отбойной шайбой, обеспечивающей безвозвратный спуск пыли в бункер. При этом вторичный газовый поток в ходе обтекания первичного постепенно полностью проникает в него, повышая тем самым эффективность улавливания. Очищенный газ удаляется из аппарата через коаксиальный патрубок [9].

Более подробно с существующими конструкциями аппаратов ВЗП можно ознакомиться в [10–13].

По сравнению с противоточными циклонами аппараты ВЗП обладают рядом достоинств [12–15]:

1) большей эффективностью улавливания высокодисперсных пылей – 92–98% (против 80–90%), что сравнимо с тканевыми фильтрами и мокрыми пылеуловителями;

2) меньшей чувствительностью эффективности улавливания к колебаниям производительности по запыленному газу в пределах 0,50–1,15 от своего номинального значения и подсосу газов, что объясняется определяющим влиянием на эффективность улавливания параметров вторичного газового потока, при сохранении которых остается неизменной окружная скорость закручивания потока запыленного газа;

3) меньшей чувствительностью эффективности улавливания к колебаниям концентрации пыли в очищаемом газе в пределах 1–500 г/м^3;

4) меньшим гидравлическим сопротивлением при одинаковой эффективности улавливания;

5) возможностью регулирования процесса улавливания за счет изменения соотношения расходов первичного и вторичного газовых потоков;

6) возможностью компоновать группы из параллельно работающих аппаратов при отсутствии необходимости равномерного распределения нагрузки между ними;

7) минимальным износом внутренней поверхности корпуса аппарата, что связано с особенностями движения газовых потоков;

8) компактностью – значительно меньшими габаритными размерами и удельной массой при равной производительности по запыленному газу;

9) не требуют специальной квалификации обслуживающего персонала.

Таким образом, аппараты ВЗП являются на сегодняшний день самыми совершенными с технологической точки зрения вихревыми пылеуловителями для целевого улавливания технического углерода, обладающими высокой эксплуатационной надежностью.

Для подтверждения корректности выбора аппаратов ВЗП для решения поставленной задачи воспользуемся методами математического моделирования

и проведем сравнительный расчет предлагаемого аппарата и традиционно используемого аппарата циклонного типа.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА

В качестве объекта сравнения был выбран широко используемый для целевого улавливания технического углерода циклон-концентратор СК-ЦН-34 с производительностью по запыленному газу (аэрозолю) 60000 м^3/ч по следующим исходным данным:
температура газа t = 255°С;
плотность газа ρ = 0,84 кг/м^3;
вязкость газа μ = 26,3·10^{-6} Па·с;
плотность частиц пыли ρ_m = 1800 кг/м^3;
дисперсный состав пыли – согласно рисунку 1;
начальная концентрация пыли в газе (на входе в пылеуловитель) $C_н$ = 500 г/м^3;
требуемая степень очистки η >90%.

Расчет аппарата ВЗП проводился по усовершенствованной авторами настоящей работы методике Э.Ф. Шургальского и Н.В. Даниленко [9]. Разработанная нами методика дополнительно позволяет, во-первых, аналитически рассчитывать группу аппаратов ВЗП, а, во-вторых, численно определять фракционную (локальную) эффективность улавливания первичного и вторичного газовых потоков на основании исходной дифференциальной кривой распределения частиц по размерам (рисунок 1). Общая эффективность улавливания определялась в зависимости от эффективностей улавливания первичного и вторичного газовых потоков:

$$\eta = 100 \cdot \left(\frac{Q_1}{Q} \cdot \eta_1 + \frac{Q_2}{Q} \cdot \eta_2 \right), \tag{1}$$

где Q – расход запыленного газа;
Q_1 – расход первичного газового потока;
Q_2 – расход вторичного газового потока;
η_1 – эффективность улавливания первичного газового потока рассчитывалась следующим образом:

$$\eta_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} c_i \cdot \left(R_1^2 - r_{1i}^2\right)}{R_1^2 - r_{вып}^2}, \tag{2}$$

где c_i – текущая координата дифференциальной кривой распределения частиц по размерам (рисунок 1);
n – число фракций (количеству точек на кривой рисунка 1);
R_1 – радиус входного патрубка первичного газового потока;
$r_{вып}$ – радиус вытеснителя (конструктивный элемент завихрителя);
r_{1i} – текущий радиус кольцевого участка площади ввода первичного газового потока, соответствующий диаметру улавливаемых частиц пыли d_{1i}:

$$d_{1i} = \frac{7{,}52 \cdot R^3 \cdot k}{Q \cdot R_0} \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot Q_2 \cdot \ln\left[\left(R_0/r_{1i}\right)^2 \cdot \left(1+\alpha\right)\right] \cdot K_{1i}}{\rho_m \cdot H \cdot \ln\left(1+\alpha\right) \cdot \ln\left[\left(R_0/r_{1i}\right)^2\right]}}, \tag{3}$$

где R – радиус аппарата;

k – число аппаратов в группе;

$R_0 = \left(1 - 0{,}19 \cdot \frac{Q_1}{Q_2}\right) \cdot R$ – радиус разделения газовых потоков;

H – высота рабочей зоны аппарата;

α – отношение проходного сечения патрубка вторичного газового потока к проходному сечению патрубка первичного газового потока;

$K_{1i} = f\left(\frac{Q_1}{Q_2}; R; R_0; r_{1i}\right)$ – текущее значение поправочного коэффициента для первичного газового потока [9];

η_2 – эффективность улавливания вторичного газового потока рассчитывалась следующим образом:

$$\eta_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} c_i \cdot \left(R^2 - r_{2i}^2\right)}{R^2 - r_{вых}^2}, \tag{4}$$

где $r_{вых}$ – радиус выходного патрубка;

r_{2i} – текущий радиус кольцевого участка площади ввода вторичного газового потока, соответствующий диаметру улавливаемых частиц пыли d_{2i}:

$$d_{2i} = \frac{4{,}95 \cdot R^3 \cdot k}{Q} \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot Q_2 \cdot \left\{R_0 \cdot \ln\left[(R - R_ш)/(R - r_{2i})\right] - 1{,}15 \cdot (R - R_0)\right\} \cdot K_{2i}}{\rho_m \cdot H \cdot \left(R^2 - R_0^2\right) \cdot R_0 \cdot \ln\left[(R - R_ш)/(R - r_{2i})\right]}}, \tag{5}$$

где $R_ш = 0{,}925 \cdot R$ – радиус отбойной шайбы;

$K_{2i} = f\left(\frac{Q_1}{Q_2}; R; R_ш; r_{2i}\right)$ – текущее значение поправочного коэффициента для вторичного газового потока [9].

Номинальный диаметр гарантированно (с вероятностью 100%) уловленных в аппарате ВЗП частиц определялся следующим образом:

$$d_0 = \max\{d_{1i}; d_{2i}\} \tag{6}$$

при подстановке $r_{1i} = r_{выт}$ в уравнение (3) и $r_{2i} = r_{вых}$ – в уравнение (5).

Расчет циклона проводился по стандартной методике [9]. При этом общая эффективность улавливания определялась как интегральная функция нормального распределения $\Phi(x)$, так как частицы аэрозоля технического углерода распределены по размерам в соответствии с логарифмически нормальным законом (рисунок 1):

$$\eta = 50 \cdot [1 \pm \Phi(x)], \tag{7}$$

где x – параметр интегральной функции нормального распределения:

$$x = \frac{\lg\left(d_m / d_{\eta=50}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma + \lg^2 \sigma_\eta}}, \tag{8}$$

где $d_{\eta=50}$ – диаметр частиц пыли, улавливаемых с эффективностью 50%, приведенный к рабочим условиям;

σ – стандартное отклонение состава пыли (определялось по рисунку 1);

σ_η – стандартное отклонение степени очистки.

Номинальный диаметр гарантированно (с вероятностью 100%) уловленных в циклоне частиц определялся численно, исходя из равенства:

$$\eta = \sum_{i=1}^{n} c_i \cdot \eta_i \ , \qquad (9)$$

где η_i – фракционная (локальная) эффективность улавливания.

Значения оптимальных скоростей запыленного газа в рабочих зонах аппаратов выбирались как рекомендуемые: для циклона СК-ЦН-34 – 1,7 м/с; для аппарата ВЗП – 10 м/с [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим результаты проведенных модельных расчетов для двух вариантов систем пылеулавливания с производительность 60000 м^3/ч по аэрозолю технического углерода марки N550: 1) группы из двух параллельно работающих аппаратов ВЗП; 2) аппарата циклонного типа.

Группа из двух аппаратов ВЗП

Группа из двух параллельно работающих аппаратов ВЗП-1000×2 с общим пылевым бункером, действительная скорость газа в рабочей зоне которых составила 10,62 м/с (что укладывается в рекомендуемый диапазон 5–12 м/с [9]).

Дифференциальная кривая распределения по размерам уловленных частиц аэрозоля приведена на рисунке 3.

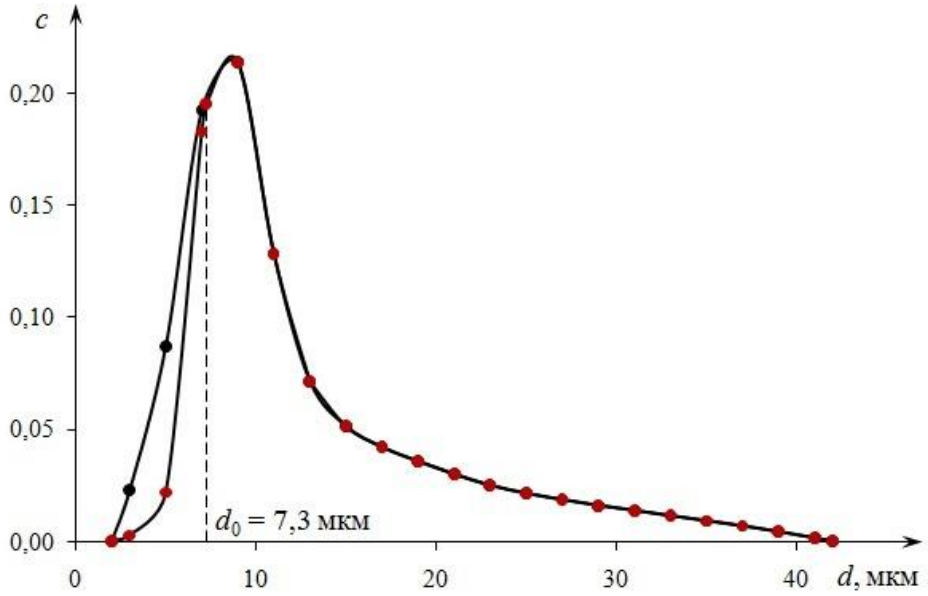

Рис. 3. Дифференциальные кривые распределения по размерам частиц аэрозоля технического углерода марки N550 исходного (черные точки) и конечного (красные точки) составов, уловленных в группе из двух аппаратов ВЗП-1000×2 (*c* – плотность распределения частиц (относительная массовая концентрация)).

Fig. 3. Differential particle size distribution curves for N550 grade carbon black aerosol of initial (black dots) and final (red dots) compositions caught in assembly of two devices CSF-1000×2 (*c* – particle distribution density (relative mass concentration)).

Область на рисунке 3, заключенная между дифференциальной кривой исходного состава частиц аэрозоля (обозначена черными точками) и кривой его конечного состава на выходе из группы аппаратов ВЗП (обозначена красными

точками), соответствует совсем небольшой доле частиц, которые не удалось уловить в пылеуловителе. Область под кривой конечного состава частиц аэрозоля, ограниченная справа по оси абсцисс значением номинального диаметра (пунктирная линия), соответствует доле частиц, частично уловленных в группе аппаратов ВЗП с определенной вероятностью (ее значение можно определить как отношение ординат кривых конечного состава к исходному).

Общая эффективность улавливания технического углерода марки N550, рассчитанная по уравнению (1), составила 92,0%. Конечная концентрация частиц пыли в аэрозоле (на выходе из пылеуловителя) равна $C_к$ = 40 г/м^3. Номинальный диаметр гарантированно (с вероятностью 100%) уловленных частиц, определенный по формуле (6), составил d_0 = 7,3 мкм.

Значение гидравлического сопротивления группы из двух параллельно работающих аппаратов ВЗП-1000×2, с учетом действительной скорости газа в их рабочей зоне, равно 2,2 кПа.

Масса группы их двух аппаратов ВЗП-1000×2 вместе с общим пылевым бункером равна 3,6 т (одного аппарата без бункера 1,2 т) [16].

Аппарат циклонного типа

Циклон СК-ЦН-34-3600, действительная скорость газа в рабочей зоне которого равна 1,64 м/с (что, из-за округления расчетного значения диаметра циклона, равного 3534 мм, до стандартного типоразмера – 3600 мм, отличается от рекомендуемого значения 1,7 м/с на 4% при допустимом отклонении в 15% [9]).

Дифференциальная кривая распределения по размерам частиц аэрозоля, уловленных в указанном аппарате, приведена на рисунке 4.

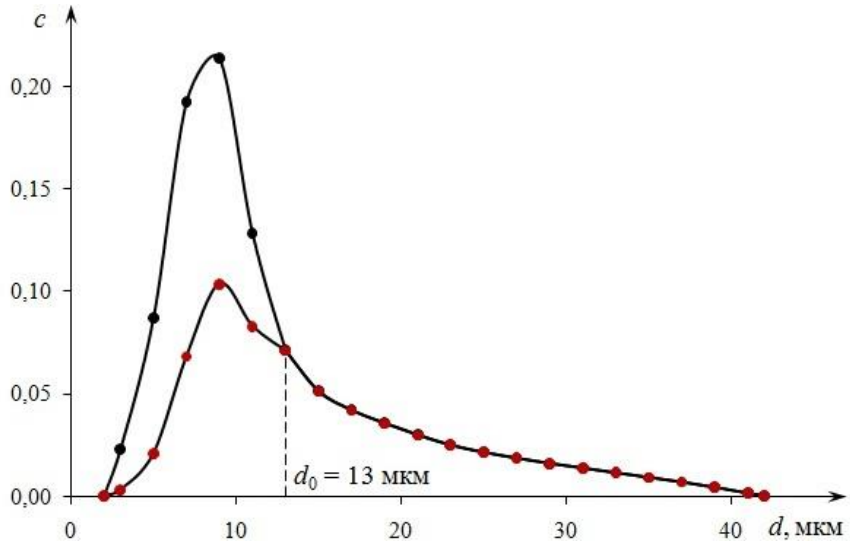

Рис. 4. Дифференциальная кривая распределения по размерам частиц аэрозоля технического углерода марки N550 исходного (черные точки) и конечного (красные точки) составов, уловленных в циклоне СК-ЦН-34-3600 (*c* – плотность распределения частиц (относительная массовая концентрация)).

Fig. 4. Differential particle size distribution curves for N550 grade carbon black aerosol of initial (black dots) and final (red dots) compositions caught in the cyclone SC-CN-34-3600 (*c* – particle distribution density (relative mass concentration)).

Общая эффективность улавливания технического углерода марки N550, рассчитанная по уравнению (7), составила 63,6%. Конечная концентрация частиц пыли в аэрозоле (на выходе из пылеуловителя) равна $C_к$ = 182 г/м^3. Номинальный диаметр гарантированно (с вероятностью 100%) уловленных частиц, определенный по формуле (9), составил d_0 = 13 мкм.

Значение гидравлического сопротивления циклона СК-ЦН-34-3600, с учетом действительной скорости газа в его рабочей зоне, равно 1,2 кПа.

Масса циклона СК-ЦН-34-3600 вместе с пылевым бункером равна 10,1 т (без бункера 8,9 т) [17].

Результаты расчета показывают, что при прочих равных условиях эффективность улавливания частиц аэрозоля технического углерода марки N550 в группе из двух аппаратов ВЗП-1000×2 на 28,4% выше эффективности улавливания в циклоне СК-ЦН-34-3600. При этом группа аппаратов ВЗП обеспечивают гарантированное улавливание частиц аэрозоля размером 7,3 мкм, в то время как циклон способен гарантированно задерживать только частицы размером 13 мкм.

Важно, что металлоемкость группы из двух аппаратов ВЗП-1000×2 в 2,8 раза меньше металлоемкости циклона СК-ЦН-34-3600, что говорит об экономической эффективности первой в части капитальных затрат.

Необходимо также отметить, что гидравлическое сопротивление группы из двух аппаратов ВЗП-1000×2 в 1,8 раза больше гидравлического сопротивления циклона СК-ЦН-34-3600. Данное обстоятельство говорит о необходимости дополнительной установки воздуходувки перед группой аппаратов ВЗП для обеспечения ее нормальной работы, что несколько увеличивает эксплуатационные затраты при прямом сравнении пылеуловителей друг с другом. Однако при этом необходимо иметь в виду, что в сравнении с циклоном действительная скорость газа в рабочей зоне аппаратов ВЗП в 6,5 раз больше.

При этом, говоря об экономической эффективности, необходимо иметь в виду следующее важное обстоятельство. Повышение на 28,4% эффективности улавливания в группе из двух аппаратов ВЗП-1000×2 по сравнению с циклоном СК-ЦН-34-3600 будет способствовать снижению примерно на эту же величину нагрузки на системы доулавливания и особенно аспирации. Поэтому, несмотря на почти вдвое большие эксплуатационные затраты для группы аппаратов ВЗП, общая экономическая эффективность всего производства технического углерода в целом однозначно будет выше по сравнению с использованием в качестве основного пылеуловителя циклона.

В качестве сравнения на рисунке 5 приведен график зависимости эффективности улавливания от производительности по аэрозолю технического углерода марки N550 для двух типов рассматриваемых конструкций пылеуловителей.

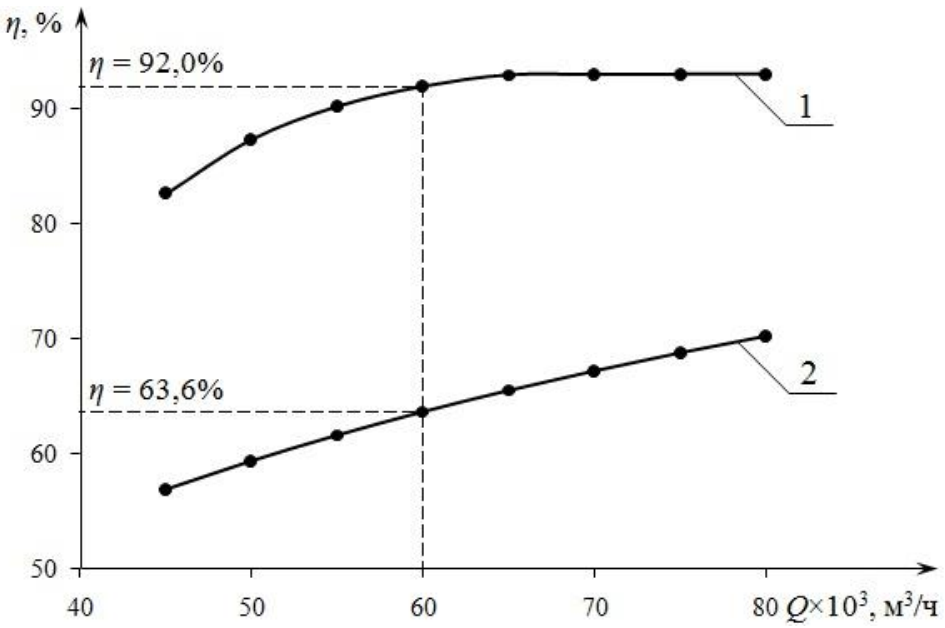

Рис. 5. Сравнение зависимостей эффективности улавливания от производительности по аэрозолю технического углерода марки N550 как функция $\eta = f(Q)$ для аппаратов двух типов: 1 – ВЗП-1000×2; 2 – СК-ЦН-34-3600.

Fig. 5. Comparison of efficiency dependence on capacity of capturing of N550 grade carbon black aerosol by devices of two types as a function $\eta = f(Q)$: 1 – CSF-1000×2; 2 – SC-CN-34-3600.

Рисунок 5 наглядно демонстрирует, что аппараты ВЗП обладают большей устойчивостью к колебаниям производительности по сравнению с циклонами, что позволяет им поддерживать высокую эффективность улавливания высокодисперсных частиц аэрозоля технического углерода (более 88–92%) в широком диапазоне по производительности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что модернизацию систем улавливания и аспирации технического углерода целесообразно проводить путем замены основного пылеуловителя, циклона или фильтра, на аппарат (группу аппаратов) ВЗП, обеспечивающий существенно более высокую эффективность улавливания высокодисперсных частиц. Так, для исходного дисперсного состава частиц аэрозоля технического углерода марки N550 (d_m = 9 мкм) применение циклона-концентратора СК-ЦН-34-3600 обеспечивает эффективность улавливания 63,6% (d_0 = 13 мкм), а применение группы из двух аппаратов ВЗП-1000×2 – 92% (d_0 = 7,3 мкм).

Это позволит, во-первых, на 20–30% снизить нагрузку на системы доулавливания и особенно аспирации, во-вторых, уменьшить металлоемкость и энергетические затраты на производство, т.е. снизить капитальные и эксплуатационные затраты, повысив экономичность производства, а, в-третьих, повысить его безопасность и экологичность.

В отличие от других пылеуловителей аппараты ВЗП обладают рядом важных достоинств – низкой чувствительностью эффективности улавливания к колебаниям производительности, концентрации пыли и подсосам газов, что

свидетельствует об их высокой эксплуатационной надежности в процессах целевого улавливания технического углерода.

Таким образом, результаты математического моделирования работы аппаратов ВЗП в сравнении с аппаратами циклонного типа подтверждают, что выбор в их пользу является научно обоснованным и оптимальным с технологической точки зрения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Омск Карбон Групп.

ACKNOWLEDGEMENT
The work was carried out with financial support of Omsk Carbon Group.

Список литературы:

1. Шопин В.М. Дисс. … д-ра техн. наук. Омск: ИППУ СО РАН, 2014.
2. Ивановский В.И. (2004). *Технический углерод: Процессы и аппараты*. Омск: ОАО «Техуглерод».
3. Орлов В.Ю., Комаров А.М., Ляпина Л.А. (2002). *Производство и использование технического углерода для резин*. Ярославль: Издательство Александр Рутман.
4. Гюльмисарян Т.Г., Левенберг И.П. (2018). Технический углерод в предстоящие годы. *Технологии нефти и газа,* 3(116), 3 - 8.
5. Шурупов С.В. (2009). Закономерности образования дисперсного углерода при изотермическом пиролизе углеводородного сырья. *Газохимия,* 9, 64 - 72.
6. ГОСТ 7885-86. Углерод технический для производства резины. Технические условия.
7. Baan R.A. (2007). Carcinogenic hazards from inhaled carbon black, titanium dioxide, and talc not containing asbestos or asbestiform fibers: recent evaluations by an IARC Monographs Working Group. *Inhalation Technology, International Forum for Respiratory Research, 19*, 213 - 228. https://doi.org/10.1080/08958370701497903
8. Niranjan R., Thakur A.K. (2017). The toxicological mechanisms of environmental soot (black carbon) and carbon black: focus on oxidative stress and inflammatory pathways. *Front. Immunol., 8*, 763. https://doi.org/10.3389/fimmu.2017.00763
9. Тимонин А.С. (2019). *Инженерно-экологический справочник.* Том 1. М.; Вологда: Инфра-Инженерия.
10. Красовицкий Ю.В., Николаев В.И., Пигловский Н.В., Федорова М.Н. (2010). Конструкции, расчет и аэродинамическая оптимизация вихревых пылеуловителей в производстве строительных материалов. *Строительные материалы,* 5, 84 - 87.
11. Сергина Н.М., Абдулджалил М.С.А., Абрамова Л.М. (2015). Пылеуловители со встречными закрученными потоками в системах очистки пылевых выбросов в производстве строительных материалов. *Инженерный вестник Дона,* 3(37), 104. http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3218 (дата обращения 20.10.2020).
12. Мисюля Д.И., Кузьмин В.В., Марков В.А. (2012). Сравнительный анализ технических характеристик циклонных пылеуловителей. *Трубы БГТУ. Химия и технология неорганических веществ,* 3, 154 - 163.
13. Сажин Б.С., Сажина М.Б., Сажин В.Б., Апарушкина М.А., Османов З.Н., Кушпанов Э.Р., Песковой В.В. (2012). Анализ гидродинамических особенностей вихревых аппаратов с целью уточнения области их рационального применения. *Успехи в химии и химической технологии, 26*(1), 99 - 103.
14. Ляндзберг А.Р., Латкин А.С. (2004). *Вихревые теплообменники и конденсация в закрученном потоке*. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ.
15. Нестеров В.А. Дисс. … канд. техн. наук. Бийск: БТИ АлтГТУ, 2014.

16. Газоочистительное оборудование. Циклоны. http://www.tverclima.ru/produktsiya/vzp (дата обращения 11.12.2019).
17. Циклон СК-ЦН-34. https://venttehnica.ru/ciklony_sk-cn-34 (дата обращения 20.09.2020 г.).

References:

1. Shopin, V.M. (2014). *Creation and application of processes and devices for capturing target products in production of carbon black* (Ph.D. dissertation). Omsk: Institute of Hydrocarbons Processing of the Siberian Branch of the RAS (in Russ.).
2. Ivanovsky, V.I. (2004). *Carbon black: Processes and devices*. Omsk: JSC “Carbon black” (in Russ.).
3. Orlov, V.Yu., Komarov, A.M., & Lyapina, L.A. (2002). *Production and use of carbon black for rubbers*. Yaroslavl: Publishing house Alexander Rutman (in Russ.).
4. Gyulmisaryan, T.G., & Levenberg, I.P. (2018). Technical carbon in the coming years. *Tekhnologii nefti i gaza = Oil and Gas Technologies,* 3(116), 3 - 8 (in Russ.).
5. Shurupov, C.V. (2009). Regularities of the formation of dispersed carbon during isothermal pyrolysis of hydrocarbon raw materials. *Gazokhimiya = Gas Chemistry,* 9, 64 - 72 (in Russ.).
6. GOST (State Standard) 7885-86. Technical carbon for rubber production. Specifications (in Russ.).
7. Baan, R.A. (2007). Carcinogenic hazards from inhaled carbon black, titanium dioxide, and talc not containing asbestos or asbestiform fibers: recent evaluations by an IARC Monographs Working Group. *Inhalation Technology, International Forum for Respiratory Research, 19,* 213 - 228. https://doi.org/10.1080/08958370701497903
8. Niranjan, R., &Thakur, A.K. (2017). The toxicological mechanisms of environmental soot (black carbon) and carbon black: focus on oxidative stress and inflammatory pathways. *Front. Immunol., 8,* 763. https://doi.org/10.3389/fimmu.2017.00763
9. Timonin, A.S. (2019). *Environmental engineering directory.* Vol. 1. M.; Vologda: Infra-Inzheneriya (in Russ.).
10. Krasovitsky, Yu.V., Nikolaev, V.I., Piglovsky, N.V., & Fedorova, M.N. (2010). Design, calculation and aerodynamic optimization of vortex dust collectors in the production of building materials. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials,* 5, 84 - 87 (in Russ.).
11. Sergina, N.M., Abduldzhalil, M.S.A., & Abramova, L.M. (2015). Dust collectors with counter swirling flows in dust emission treatment systems in building materials production. *Inzhenernyi Vestnik Dona = Engineering Journal of Don,* 3(37), 104 (in Russ.). http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3218 (accessed 20.10.2020).
12. Misyulya, D.I., Kuzmin, V.V., & Markov, V.A. (2012). Comparative analysis of the technical characteristics of cyclone dust collectors. *Truby BGTU. Khimiya i Tekhnologiya Neorganicheskikh Veshchestv = Proceedings of BSTU. Chemistry and Technology of Inorganic Substances, 3,* 154 - 163 (in Russ.).
13. Sazhin, B.S., Sazhina, M.B., Sazhin, V.B., Aparushkina, M.A., Osmanov, Z.N., Kushpanov, E.R., & Peskova, V.V. (2012). Analysis of the hydrodynamic features of vortex devices in order to clarify the area of their rational use. *Uspekhii v khimii i khimicheskoi tekhnologii = Advances in Chemistry and Chemical Technology, 26*(1), 99 - 103 (in Russ.).
14. Lyandzberg, A.R., & Latkin, A.S. (2004). *Vortex heat exchangers and swirling condensation*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatka State Technical University (in Russ.).
15. Nesterov, V.A. (2014). *Improving the efficiency of inertial gas cleaning equipment by applying high-intensity ultrasonic fields* (Ph.D. dissertation). Biysk: Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (in Russ.).
16. Gas cleaning equipment. Cyclones. http://www.tverclima.ru/produktsiya/vzp (accessed 11.12.2019).
17. Cyclone SC-CN-34. https://venttehnica.ru/ciklony_sk-cn-34 (accessed 20.09.2020).