

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем переработки углеводородов Сибирского отделения
Российской академии наук

На правах рукописи

ДМИТРИЕВ КОНСТАНТИН ИГОРЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО
УГЛЕРОДА ИЗ АЭРОЗОЛЬНОГО ПОТОКА В СЛОЕ УГЛЕРОДНЫХ
ГРАНУЛ**

Специальность: 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: к.т.н. Шопин В.М.

Омск – 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	5
ВВЕДЕНИЕ	9
ГЛАВА I. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ КОАГУЛЯЦИИ И ОСАЖДЕНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ	15
1.1 Технический углерод	15
1.2 Коагуляция аэрозолей	19
1.2.1 Теоретические основы процесса коагуляции аэрозолей	19
1.2.2 Математические модели процесса коагуляции аэрозолей	22
1.2.3 Практическое применение процесса коагуляции аэрозолей	24
1.2.4 Механизмы коагуляции аэрозолей технического углерода	25
1.3 Теоретические основы процесса фильтрации дисперсных сред	26
1.3.1 Фильтрация с образованием осадка на поверхности фильтровальной перегородки	27
1.3.2 Фильтрация с постепенным закупориванием пор фильтровальной перегородки	28
1.3.3 Фильтрация аэрозольных потоков	30
1.4 Современные технологические процессы осаждения технического углерода из аэрозольного потока	33
1.5 Теоретические основы процесса фильтрации аэрозолей в зернистом слое	41
1.5.1 Механизмы осаждения аэрозоля в зернистых фильтрах	41
1.5.2 Основные параметры процесса фильтрации аэрозоля в стационарном зернистом слое	43
1.5.3 Теоретические расчёты фильтров со слоем гранул	46
1.6 Конструкции зернистых фильтров	48
1.6.1 Регенерация запылённого фильтрующего слоя	49

1.7	Применение различных конструкций зернистых фильтров	50
1.7.1	Некоторые особенности процессов и аппаратов фильтрации аэрозолей в различных областях промышленности	50
1.7.2	Осаждение аэрозолей технического углерода в опытно-промышленных установках фильтра со слоем гранул	52
1.8	Выводы по главе I	55
ГЛАВА II. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ		57
2.1	Определение весовой концентрации агрегатов дисперсного углерода в аэрозольном потоке методом внешней фильтрации	57
2.2	Определение дисперсного состава аэрозольных агрегатов в потоке	59
2.3	Изучение коагуляции дисперсного углерода при движении в аэрозольном потоке	66
2.4	Исследование процесса осаждения аэрозоля дисперсного углерода в слое углеродных гранул и процесса регенерации слоя	70
2.5	Выводы по главе II	76
ГЛАВА III. ИССЛЕДОВАНИЕ КОАГУЛЯЦИИ ДИСПЕРСНОГО УГЛЕРОДА И ЕГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ АЭРОЗОЛЬНОГО ПОТОКА В СЛОЕ УГЛЕРОДНЫХ ГРАНУЛ		77
3.1	Основные объекты исследований	77
3.2	Исследование процесса коагуляции дисперсного углерода	80
3.3	Исследование особенностей процесса осаждения аэрозоля дисперсного углерода в слое углеродных гранул	85
3.3.1	Получение аэрозоля в лабораторных условиях	85
3.3.2	Определение оптимальных характеристик фильтрующего слоя углеродных гранул	86
3.3.3	Экспериментальные исследования пылеемкости слоя углеродных гранул	91
3.3.4	Определение проникающей способности агрегатов дисперсного	

углерода в слой гранул	93
3.3.5 Изучение слоя агрегатов частиц дисперсного углерода, осажденного на поверхности гранул	103
3.3.6 Эффективность регенерации фильтрующего слоя углеродных гранул	107
3.3.7 Результаты исследований процессов осаждения аэрозоля дисперсного углерода в слое углеродных гранул	108
3.4 Выводы по главе III	109
ГЛАВА IV. СОЗДАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ ЗЕРНИСТОГО ФИЛЬТРА СО СЛОЕМ УГЛЕРОДНЫХ ГРАНУЛ	112
4.1 Проектирование опытной установки зернистого фильтра со слоем углеродных гранул	112
4.2 Исследования процессов коагуляции и осаждения аэрозоля дисперсного углерода в опытной установке зернистого фильтра со слоем углеродных гранул	116
4.2.1 Программа исследований	116
4.2.2 Исследование процесса коагуляции аэрозоля в опытно-промышленных условиях	120
4.2.3 Исследование процесса осаждения дисперсного углерода из аэрозольного потока в условиях опытной установки	124
4.2.4 Материальный баланс опытной установки зернистого фильтра	128
4.3 Выводы по главе IV	130
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	131
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	133
ПРИЛОЖЕНИЕ	148

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- Ar – критерий Архимеда;
- a – изменение массы контрольного фильтра, г;
- B – показания микроманометра, мм;
- C – коэффициент пропорциональности;
- D – диаметр газохода, м;
- d – размер гранул слоя, м;
- d_3 – эквивалентный диаметр гранул слоя, м;
- d_n – диаметр наконечника заборной трубки, м;
- $erfl$ – табулированный интеграл;
- F – площадь поверхности фильтрации, м²;
- f – удельная поверхность гранул слоя, м²/м³;
- g – ускорение свободного падения, м/с²;
- H – высота фильтрующего слоя, м;
- i – порядковый номер точки измерения при определении поля скоростей потока;
- K – коэффициент пневмометрической трубки;
- K_k – константа кинематической коагуляции, м³/с;
- K_C – константа коагуляции по уравнению Смолуховского, м³/с;
- $K_{mб}$ – константа турбулентной коагуляции, м³/с;
- $K_{гр}$ – константа градиентной коагуляции, м³/с;
- $K_{ПС}$ – коэффициент пылевого сопротивления слоя, Па;
- k_a – осаждение за счёт распределения потока аэрозоля;
- k_b – инерционное осаждение;
- k_d – диффузионное осаждение;
- k_e – электрическое осаждение;
- k_g – гравитационное осаждение;
- k_z – осаждение за счёт эффекта зацепления;

L – расстояние между точками отбора проб на участке газохода, м;
 l_i – расстояние от внутренней стенки газохода до ближайшей точки измерения на данном кольце, м;
 l_k – длина капилляров фильтрующей перегородки, м;
 m – порозность слоя осаждённых дисперсных агрегатов;
 m_ϕ – увеличение массы фильтра (привес), г;
 $m_{яч.}$ – масса слоя аэрозольных агрегатов дисперсного углерода в ячейке, г;
 N – число параллельных капилляров фильтрующей перегородки;
 n – счётная концентрация частиц в аэрозоле после коагуляции, $1/\text{м}^3$;
 n_k – число условных колец по сечению газохода;
 n_o – счётная концентрация частиц в аэрозоле в начальный момент, $1/\text{м}^3$;
 P_D – динамический напор, мм.вд.ст.;
 P_B – барометрическое давление, мм. рт. ст.;
 ΔP – избыточное давление (разряжение) в газоходе, Па;
 ΔP_0 – аэродинамическое сопротивление чистого незапылённого слоя, Па.
 ΔP_1 – аэродинамическое сопротивление слоя после регенерации, Па,
 ΔP_2 – аэродинамическое сопротивление слоя перед регенерацией, Па,
 $\Delta P_{нач}$ – начальное сопротивление фильтрующей перегородки, Па
 ρ_e – плотность дисперсионной среды, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 ρ_{ep} – истинная плотность материала гранул фильтрующего слоя, $\text{кг}/\text{м}^3$.
 $\rho_{ист}$ – истинная плотность материала аэрозольных частиц, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 $\rho_{сл.}$ – насыпная плотность слоя гранул, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 $\rho_{н.ос.}$ – насыпная плотность слоя осаждённых дисперсных частиц, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 ρ_m – кажущаяся плотность агрегатов частиц в аэрозольном потоке, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 $R_{общ}$ – общее сопротивление фильтрующей перегородки, $1/\text{м}$;
 $R_{ос}$ – сопротивление осадка на фильтровальной перегородке, $1/\text{м}$;
 $R_{ф.п.}$ – сопротивление фильтрующей перегородки, $1/\text{м}$;
 r – размер агрегатов частиц, м;
 r_k – радиус капилляров фильтрующей перегородки, м;
 r_o – удельное объёмное сопротивление осадка, $\text{м}/\text{Н}$;

t – температура аэрозоля, $^{\circ}\text{C}$;
 T – абсолютная температура аэрозоля, K ;
 V_{ϕ} – объём фильтрата, м^3 ;
 V – объёмный расход газа в рабочих условиях, $\text{м}^3/\text{ч}$;
 V_0 – объёмный расход аэрозоля, при (н.у.), $\text{м}^3/\text{ч}$;
 V_p – объёмный расход газов регенерации, $\text{м}^3/\text{ч}$;
 $V_{\text{яч.}}$ – объём ячейки, м^3 ;
 W – скорость аэрозольного потока, $\text{м}/\text{с}$;
 W_s – относительная скорость движения частицы и агрегата, $\text{м}/\text{с}$;
 $W_{\text{кр}}$ – критическая скорость начала псевдооживления слоя, $\text{м}/\text{с}$;
 $W_{\text{Э}}$ – скорость осаждения потока в пространстве между гранулами слоя, $\text{м}/\text{с}$;
 w – скорость процесса осаждения, $\text{м}/\text{с}$;
 x – порядковый номер условного кольца по сечению газотока;
 x_0 – отношение объёма осадка к объёму фильтрата;
 C – весовая концентрация агрегатов частиц в аэрозоле при (н.у.), $\text{г}/\text{м}^3$;
 $C_{\text{вх}}$ – весовая концентрация аэрозольных агрегатов на входе в фильтр при (н.у.), $\text{г}/\text{м}^3$;
 $C_{\text{вых}}$ – весовая концентрация аэрозольных агрегатов на выходе из фильтра при (н.у.), $\text{г}/\text{м}^3$;
 β_G – ядро (скорость) гравитационной коагуляции;
 β_S – ядро (скорость) градиентной коагуляции;
 β_B – ядро (скорость) броуновской коагуляции;
 β_T – ядро (скорость) турбулентной коагуляции;
 β_{TB} – аддитивное ядро (скорость) коагуляции по механизмам турбулентной и броуновской коагуляции;
 β_{TBSG} – аддитивное ядро (скорость) коагуляции по механизмам турбулентной, броуновской, градиентной и гравитационной коагуляции;
 γ – коэффициент кинематической вязкости дисперсионной среды, $\text{м}^2/\text{с}$;
 δ_{50} – медианный размер, мкм ;
 ε – доля свободного объёма фильтрующего слоя, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

ε_k – коэффициент извилистости каналов фильтрующей среды;
 η – эффективность процесса осаждения, %;
 η_e – вероятность эффективного столкновения частиц и агрегатов;
 λ – коэффициент сопротивления слоя;
 μ – коэффициент динамической вязкости дисперсионной среды, Па×с;
 ν – скорость движения условного фронта частиц в слое гранул, м/с;
 τ_k – время коагуляции, с;
 τ_ϕ – время осаждения, с;
 τ_p – время регенерации слоя, с;
 ψ – коэффициент измерительной трубки микроманометра;
 σ – дисперсия;
 Π – пылеемкость, г/м³.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Очистка газов от взвешенных высокодисперсных твёрдых частиц в различных отраслях промышленности является чрезвычайно актуальной. Это обусловлено как решением экологических задач, так и экономикой производства, когда достигается не только очистка газовых выбросов от аэрозольных частиц вредных веществ, но также улавливание ценных целевых продуктов из аэрозольных потоков.

Процесс получения различных марок дисперсного углерода протекает с образованием огромного объёма аэрозоля и одной из основных технологических операций в производстве технического углерода является эффективное выделение из аэрозольного потока целевого продукта.

В России, как и в мировой практике, выделение целевого продукта из аэрозольного потока в производстве технического углерода осуществляют в стеклотканевых рукавных фильтрах. Основными недостатками данной технологии являются:

- высокая металлоёмкость аппаратов;
- низкая надёжность процесса осаждения, так как при выходе из строя хотя бы одного из нескольких тысяч фильтрующих элементов рукавного фильтра резко снижается эффективность процесса осаждения частиц из аэрозольного потока, что приводит к потерям целевого продукта и загрязнению окружающей среды;
- высокая стоимость фильтрующих рукавов и сложность их замены.

Аэрозоль технического углерода представляет собой сложную дисперсную систему, состоящую из полидисперсных агрегатов, взвешенных в газовой среде. Дисперсионной средой являются взрывоопасные газы процесса образования технического углерода, содержащие оксид и диоксид углерода, оксид и диоксид азота, водород, сероводород, сероуглерод, диоксид серы и большое количество водяных паров. При превышении концентрации кислорода выше 2% возникает вероятность взрыва

технологического оборудования. С точки зрения взрывобезопасности невозможно использование в промышленном производстве высокоактивных марок технического углерода процесса электростатического осаждения аэрозоля в электрофильтре.

Одним из направлений решения изложенных проблем технологии выделения целевого продукта из аэрозольного потока в производстве технического углерода является создание эффективного технологического процесса осаждения аэрозоля дисперсного углерода в зернистом фильтре со слоем гранул. Фильтры со слоем не имеют недостатков электрофильтров и рукавных тканевых фильтров они обеспечивают высокую надёжность процесса осаждения, имеют механизированную замену фильтрующего материала и взрывобезопасны.

Известны работы как российских авторов Красовицкого Ю.В. [1-6], Самохвалова Н.М. [7-13], так и зарубежных Quevedo J., Guo-hua Yang [14] по исследованию процессов осаждения аэрозолей в фильтрах со стационарным слоем гранул. Однако в них недостаточно внимания уделено исследованиям особенностей коагуляции аэрозолей и взаимодействия аэрозольных агрегатов и элементов фильтрующего слоя.

Основным недостатком известных конструкций зернистых фильтров является сложность регенерации фильтрующего слоя, что приводит к высокому аэродинамическому сопротивлению вследствие накопления аэрозольных агрегатов в поровом пространстве слоя. Регенерация фильтрующего слоя может быть эффективной при псевдооживлении очищенным газом. Однако достичь высокой эффективности регенерации слоя можно лишь при условии применения специальных газораспределяющих устройств и фильтрующих гранулообразных углеродных материалов с низкой насыпной плотностью.

Цель работы. Создание эффективного технологического процесса осаждения дисперсного углерода из аэрозольного потока в стационарном слое углеродных гранул.

Поставленные в работе задачи. Анализ известных механизмов коагуляции аэрозолей технического углерода и недостатков технологических приёмов его осаждения из аэрозольных потоков позволил определить основные задачи данной работы:

- исследовать коагуляцию аэрозолей различного по физико-химическим свойствам технического углерода и установить влияние свойств углеродного материала на интенсивность процесса коагуляции аэрозоля;
- экспериментальным путём получить кинетические кривые процесса осаждения аэрозолей различного по физико-химическим свойствам технического углерода в фильтрующем слое углеродных гранул;
- установить оптимальные характеристики фильтрующего слоя и технологические параметры процесса осаждения аэрозоля технического углерода в фильтрующем слое углеродных гранул и процесса регенерации слоя;
- проверить в опытных условиях получения технического углерода установленные технологические параметры процесса осаждения аэрозоля и регенерации фильтрующего слоя углеродных гранул.

В работе систематизированы и обобщены результаты научных исследований, проводимых в Учреждении Российской академии наук Институте проблем переработки углеводородов Сибирского отделения РАН в рамках двух проектов фундаментальных исследований по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ и государственного контракта № 02.523.12.3005 от 06.08.2007г.

В рамках проекта 5.2.1.17 – «Развитие научных основ конструирования и методов синтеза структурно - организованных углеродных наносистем, в том числе модифицированных гетероатомами, как базы для разработки технологий получения функциональных углеродных материалов с заданными свойствами» (2007-2009г) автором данной работы проведены исследования процесса коагуляции дисперсного углерода в аэрозольном потоке с целью подготовки его к осаждению, а также установлены оптимальные параметры

процесса эффективного осаждения аэрозольного потока в слое углеродных гранул.

В рамках проекта V.37.2.3 – «Синтез функциональных наноструктурированных материалов на основе наноглобулярного углерода для адсорбции и катализа» (2010-2012г) автором данной работы проведены исследования кинетики процесса осаждения в фильтрующем слое углеродных гранул аэрозолей различного по физико-химическим свойствам технического углерода.

В рамках государственного контракта № 02.523.12.3005 от 06.08.2007г была создана и испытана в реальном процессе получения технического углерода опытная установка осаждения аэрозоля в слое углеродных гранул.

Научная новизна:

1. Впервые показано, что высокие значения структурности дисперсного углерода по абсорбции дибутилфталата (выше $100 \text{ см}^3/100\text{г}$) и суммарного содержания линейных и разветвленных форм агрегатов дисперсного углерода (выше 85%) способствуют увеличению констант процесса коагуляции аэрозоля. Установлено, что зависимость между константой коагуляции аэрозоля и показателем суммарного содержания линейных и разветвлённых форм первичных агрегатов в техническом углероде является линейной.

2. Впервые установлено, что различие в процессах проникновения аэрозольных агрегатов в слой углеродных гранул при осаждении аэрозолей технического углерода связано с их размером и кажущейся плотностью. Чем ниже значения кажущейся плотности аэрозольных агрегатов технического углерода, тем выше их проникающая способность в объём слоя гранул. Аэрозоли технического углерода с крупными агрегатами высокой кажущейся плотности при осаждении образуют на поверхности гранул плотный слой из осаждённых агрегатов технического углерода, который является высокоэффективной фильтрующей средой.

3. Определены оптимальные характеристики фильтрующего слоя углеродных гранул: гранулометрический состав 0,7-1,0 мм, насыпная плотность не более 400 кг/м³ и высота не менее 170 мм, при которых обеспечивается высокая эффективность процесса осаждения аэрозоля 99,1 – 99,4% и остаточная концентрация агрегатов технического углерода в очищенных газах 30-40 мг/м³.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты испытаний технологического процесса осаждения дисперсного углерода в лабораторных и опытно-промышленных условиях доказывают перспективность использования в промышленном производстве технического углерода процесса осаждения аэрозоля в стационарном слое углеродных гранул.

2. В процессе осаждения аэрозоля дисперсного углерода с различными физико-химическими свойствами в стационарном слое углеродных гранул проникающая способность аэрозольных агрегатов в фильтрующую среду зависит от размера и кажущейся плотности агрегатов.

3. Скорость коагуляции аэрозоля дисперсного углерода зависит от физико-химических свойств технического углерода, что выражается во влиянии показателя структурности и суммарного содержания линейных и разветвлённых форм первичных агрегатов технического углерода на константу процесса коагуляции аэрозоля.

Практическая ценность работы. Получены исходные данные для проектирования опытного образца фильтра со слоем углеродных гранул. Создана опытная установка и процесс осаждения аэрозоля технического углерода в слое углеродных гранул. Опытная установка успешно прошла испытания в реальном процессе получения технического углерода и рекомендована для опытно-промышленной отработки и промышленной реализации (Государственный контракт № 02.523.12.3005 от 06.08.2007г).

(Акт предварительных испытаний процесса фильтрации высокодисперсных аэрозолей в опытной установке мощностью 10 000 м³/ч с использованием углеродного материала АКМ-УФ от 26.09.2008г (Приложение III)).

(Акт государственных приёмочных испытаний технологического процесса и опытной установки фильтрации высокодисперсных аэрозолей с использованием углеродного материала АКМ-УФ (Приложение IV)).

Апробация работы.

Основные результаты диссертации были представлены на конференциях и выставках:

- Международной научно-практической конференции: «Химия-XXI век: новые технологии, новые продукты», Кемерово-2006.
- Всероссийской научной молодёжной школе-конференции: «Химия под знаком Сигма», Омск-2008.
- VII международной научно-технической конференции: «Динамика систем, механизмов и машин», Омск-2009.
- Всероссийской научной молодёжной школе-конференции: «Химия под знаком Сигма», Омск-2010.
- Выставке сибирского промышленно-инновационного форума: «Промтехэкспо-2010», Омск-2010.
- Выставке X Московского международного салона инноваций и инвестиций, Москва-2010 (Диплом и Золотая медаль).

Публикации: Основное содержание работы опубликовано в 3 статьях в научно-технических журналах, в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах, а также 4 тезисах докладов в материалах конференций и 1 патенте.

Структура работы: Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка используемой литературы, включающего 130 источников. Работа изложена на 158 страницах машинописного текста, содержит 53 рисунка, 28 таблиц и приложение на 10 страницах.

ГЛАВА I. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ КОАГУЛЯЦИИ И ОСАЖДЕНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ

В данной главе проведён анализ научно-исследовательских и прикладных работ посвященных изучению процессов коагуляции и осаждения аэрозолей. Выявлены основные проблемы и недостатки существующих методов осаждения аэрозолей и рассмотрены возможные варианты их решений.

1.1 Технический углерод

Для начала рассмотрим, особенности технического углерода, который выступает в качестве объекта исследований в данной работе, в чём основные различия аэрозолей дисперсного углерода и аэрозолей других материалов.

Техническим углеродом называется продукт, полученный при пиролизе газообразного или жидкого углеводородного сырья. Основное применение технический углерод нашёл, как усиливающий наполнитель в промышленном производстве шин. Специальные высокодисперсные электропроводные марки технического углерода используются в химических источниках тока, кабельной промышленности, для производства изоляционных композитов на основе пластмасс, в качестве чёрного пигмента при производстве лакокрасочной продукции, в изделиях оборонного назначения. Технический углерод – это продукт, обладающий определённым набором физико-химических свойств, чем он качественно отличается от сажи, образующейся например, при сгорании топлива в дизельном агрегате. Практически во всех разновидностях технического углерода содержится 90-99% углерода; 0,3-0,5% водорода; 0,1-10% кислорода, присутствуют также перешедшие из углеводородного сырья сера в количестве 0,1-0,7% и минеральные вещества 0,5%.

По своей структуре технический углерод сходен с графитом, только обладает двухмерной упорядоченностью. Данные, полученные методом дифракции рентгеновских лучей показывают, что технический углерод состоит из хорошо развитых графитовых плоскостей, расположенных приблизительно параллельно друг другу, но смещенных по отношению к смежным слоям [15]. Несколько графитовых плоскостей образуют кристаллиты, из которых состоят первичные частицы технического углерода. Первичная частица технического углерода по форме стремится к шару, размеры частиц для разных марок составляют от 9 до 250 нм [16]. Несколько первичных частиц, связанных между собой прочными химическими связями, образуют первичную структуру технического углерода – агрегат (рис. 1.1).

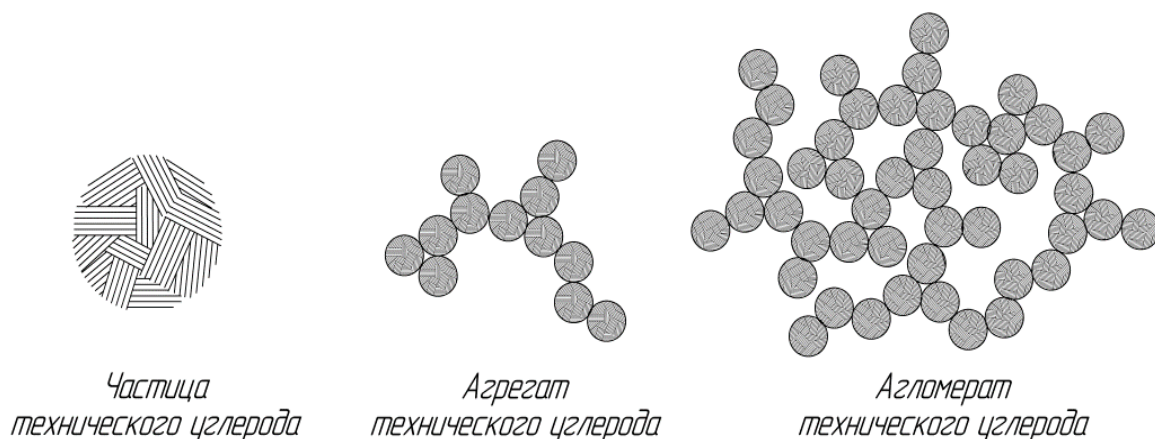


Рис. 1.1 – Структурные единицы технического углерода

Агрегаты технического углерода различаются по количеству первичных частиц в агрегате и по форме бывают сфероидальные, разветвлённые, линейные и эллипсоидальные. Количество частиц и форма агрегата определяет одно из наиболее важных физико-химических свойств технического углерода – структурность. Структурность технического углерода определяют по абсорбции дибутилфталата – при анализе масляное вещество заполняет пустоты внутри агрегата, чем разветвлённой структура агрегата, тем больше мл дибутилфталата абсорбируется в 100г навески технического углерода. Все марки технического углерода в зависимости от показателя абсорбции дибутилфталата можно разделить на

высокоструктурные более 100 мл/100г, на среднеструктурные от 80 до 100 мл/100г и низкоструктурные ниже 80 мл/100г [15].

При получении технического углерода происходит образование вторичной и третичной структуры – агломератов. Агломерат представляет собой совокупность агрегатов, соединенных между собой слабыми физическими связями (например, силами Ван дер Ваальса).

Одним из важных показателей физико-химических свойств технического углерода является удельная адсорбционная поверхность, этот показатель непосредственно связан с пористостью первичных частиц технического углерода. Показатель удельной адсорбционной поверхности является критерием, определяющим усиливающие способности технического углерода в композите. Чем выше удельная поверхность частиц, тем лучше технический углерод связывается с молекулой каучука и усиливает композит. Удельная поверхность определяется по адсорбции азота (метод БЭТ), цетилтриметиламмония бромиды или фенола. В зависимости от показателя удельной поверхности и соответственно усиливающей способности, технический углерод подразделяют на высокоактивный, активный, среднеактивный и малоактивный.

По способу получения технический углерод разделяется на: термический, канальный и печной. Термический технический углерод получают в аппарате с предварительно нагретой до 1600⁰С насадкой за счёт разложения природного газа без доступа воздуха. Первичные частицы характеризуются крупными размерами от 250 нм и шаровидной формой, могут индивидуально присутствовать в образце или образуют агрегаты из 2-5 сросшихся частиц. Канальный технический углерод получают из природного газа непосредственно в горящем пламени, а процесс образования завершается введением в пламя охлаждённой поверхности, на которой происходит осаждение частиц технического углерода. Канальные марки технического углерода характеризуются наиболее низкими размерами первичных агрегатов. Печной технический углерод, наиболее широко

применяемый в промышленности, получают в реакторе, где происходит термическое разложение углеводородного сырья и из гетерогенной фазы происходит конденсация углеродсодержащего зародыша и образование первичной частицы. В качестве углеводородного сырья применяется в основном смесь на 70-80% состоящая из тяжелых полиароматических компонентов коксохимического и 20-30% нефтяного происхождения. Существуют экспериментальные работы по получению в лабораторных условиях печного технического углерода из индивидуальных ароматических углеводородов, например, бензола, нафталина, и т.д. [17].

Все разновидности технического углерода разделяют по маркам.

Стандартной системой классификации, принятой всеми мировыми производителями и потребителями технического углерода, является ASTM D1765-03 [15]. Существует отечественная классификация по стандарту СТ СЭВ 3766-82. Согласно данной классификации каждая марка технического углерода имеет пять индексов. Первый буквенный индекс обозначает способ производства технического углерода П – печной, К – канальный, Т – термический. Последующие индексы характеризуют физико-химические свойства данной марки технического углерода: второй индекс – среднеарифметический размер первичных частиц, третий индекс – удельная адсорбционная поверхность с учётом шероховатости частиц, четвертый индекс – структурность и пятый индекс характеризует специальные свойства технического углерода. Каждому цифровому индексу, изменяемому от 0 до 9 соответствует свой диапазон значений [18]. Расшифруем марку технического углерода П 267–Э – «П» - получен печным способом, «2» - с размером первичных частиц 10-20 нм, «6» - с удельной адсорбционной поверхностью 140-160 м²/г, и «7» - абсорбцией ДБФ 160-180 мл/100г, «Э» - электропроводный.

Процесс получения технического углерода реализуется не иначе, как через образование огромного объёма высокотемпературного аэрозоля и

одной из основных технологических операций в производстве целевого продукта является эффективное выделение его из аэрозольного потока.

При производстве печного технического углерода, образующиеся аэрозольные потоки характеризуются высокой температурой до 300⁰С, наличием водяных паров, что связано с условиями образования, и высокой полидисперсностью частиц. Дисперсионной средой являются отходящие газы процесса образования, содержащие окись углерода, углекислый газ, водород, сероводород, сероуглерод, сернистый ангидрит, азот и его окислы.

На поверхности частиц печного технического углерода находится различные функциональные группировки. В основном они представлены кислородосодержащими группами: карбоксильные, лактонные, фенольные, хиноидные и рядом других групп: альдегидными, ангидридными, лактоновыми [15].

1.2 Коагуляция аэрозолей

1.2.1 Теоретические основы процесса коагуляции аэрозолей

Теоретическим основам процесса коагуляции, а также устойчивости различных дисперсных систем посвящён целый раздел коллоидной химии.

Под коагуляцией понимается процесс укрупнения частиц любой дисперсной системы, который может протекать, как самопроизвольно, что связано со стремлением системы к состоянию равновесия, так и принудительно, что связано с наличием какого-либо внешнего фактора, воздействующего на дисперсную систему.

Коагуляция это комплекс взаимодействий между частицами обусловленный различными силами отталкивания и притяжения, а именно:

- силы электростатического отталкивания;
- силы притяжения Ван дер Ваальса;
- силы всемирного тяготения.

Основной величиной, характеризующей процесс, является константа скорости коагуляции (K). Впервые, понятие константы коагуляции было введено Смолуховским и Зигмонди, при рассмотрении процесса укрупнения частиц золя. В исследуемую дисперсную систему добавлялся раствор электролита, который вызывал уменьшение толщины двойного электрического слоя и тем самым снижал силы отталкивания между частицами системы, что интенсифицировало процесс слияния частиц. С помощью оптического ультрамикроскопа определялась счётная концентрация частиц золя в течение определённого периода времени, уменьшение числа частиц системы, свидетельствовало о протекании процесса коагуляции. На основании результатов эксперимента строились кинетические кривые процесса (Рис. 1.2) и было выведено уравнение для определения величины константы коагуляции:

$$\frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} = K\tau_k, \quad (1.1)$$

где n_0 , n – концентрация частиц в аэрозоле в начальный момент времени и по истечению времени τ_k , $1/\text{м}^3$; K – константа коагуляции, $\text{м}^3/\text{с}$; τ_k – время коагуляции, с.

На кинетической кривой константа коагуляции определялась, как тангенс угла α наклона кривой к оси абсцисс [19] (рис. 1.2.).

Механизм процесса слияния по Смолуховскому происходит за счёт диффузионного движения частиц. При добавлении электролита у частиц образуются сферы притяжения с радиусом (R), коагуляция происходит при попадании в сферу притяжения частицы центра другой частицы, в этом случае протекает процесс слияния и образования агрегата.

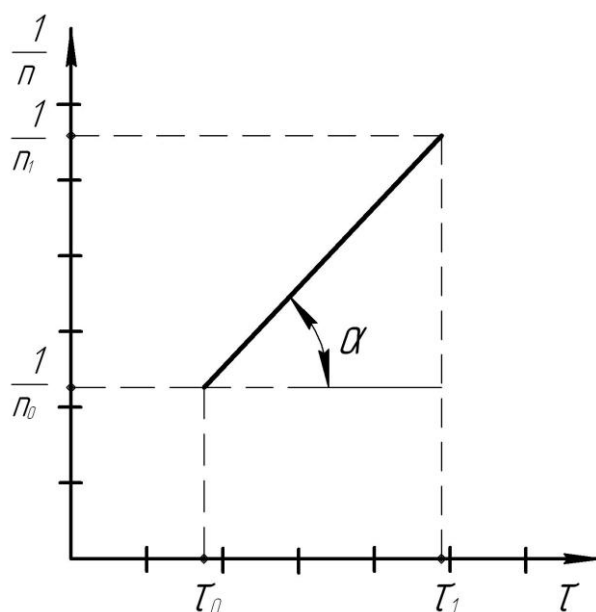


Рис. 1.2 – Кинетическая кривая процесса коагуляции

В настоящее время для определения расчётных кинетических кривых процесса коагуляции и распределения частиц по размерам в дисперсных системах по истечению определённого промежутка времени используются сложные системы дифференциальных уравнений. Большая часть уравнений системы по типу являются уравнениями Смолуховского, учитывающие изменение концентраций различных частиц, а также уравнения, учитывающие факторы дисперсной системы: температуру, плотность дисперсионной среды, вероятность эффективного столкновения частиц. Для решения системы дифференциальных уравнений применяются математические интегральные методы Рунге-Кутты и Монте-Карло [20-21].

Рассмотрим известные механизмы коагуляции аэрозолей.

- Броуновская коагуляция – протекает под действием теплового (броуновского) движения частиц. В тепловое движение вовлекается наиболее мелкие частицы аэрозольной системы.
- Градиентная коагуляция – протекает при наличии высоких градиентов скорости в аэрозольном потоке.
- Турбулентная коагуляция – наличие в аэрозольном потоке турбулентных пульсаций.

- Кинематическая коагуляция – агрегация частиц аэрозоля, протекает при движении частиц различного размера с различной скоростью.
- Акустическая коагуляция – укрупнение частиц аэрозоля за счёт воздействия внешних звуковых и ультразвуковых колебаний.

1.2.2 Математические модели процесса коагуляции аэрозолей

Из литературных источников известны научно-исследовательские работы, посвященные математическому описанию различных механизмов процесса коагуляции аэрозолей [22-26]. Практически все математические модели различных механизмов коагуляции это сложные системы дифференциальных уравнений, учитывающие множество параметров дисперсной системы. Однако для каждого механизма коагуляции в системе существует набор определённых уравнений, характеризующих именно данный механизм.

Для математической модели градиентной коагуляции, характерно уравнение Талбота, учитывающее относительное изменение скоростей частиц, которое обычно проявляется при движении аэрозольного потока в газоходе, в пристенной области и связано с градиентом потока [27].

При турбулентной коагуляции движение твёрдых частиц в потоке отличается особой сложностью, это обусловлено беспорядочными турбулентными пульсациями среды и связанными с ними колебательными движениями частиц и их турбулентной диффузией [28]. Для описания процесса используют систему дифференциальных уравнений на основе уравнения одномерного движения сферических частиц выведенного Бассе, Буссинеском и Озееном с соответствующими допущениями. Однако, как показывает экспериментальный материал в реальных условиях поведение дисперсных систем при турбулентном режиме отличается от идеального. Наличие турбулентных пульсаций потока, а также различного рода

взаимодействий между частицами приводит к отклонению траектории движения частиц системы от расчётных траекторий [28].

Данные математические модели учитывают коагуляцию по отдельным механизмам, независимым друг от друга. В реальных же условиях при движении аэрозольного потока в газоходе, частицы коагулируют по механизмам броуновской, турбулентной, градиентной коагуляции и кинематической коагуляции.

Аддитивная математическая модель, учитывающая механизмы броуновской и турбулентной коагуляции выглядит следующим образом:

$$\beta_{TB} = (\beta_T^2 + \beta_B^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.3),$$

где β_{TB} – аддитивное ядро (скорость) коагуляции по двум механизмам, β_T – ядро турбулентной коагуляции, β_B – ядро броуновской коагуляции [29].

Аддитивная математическая модель, учитывающая механизмы броуновской, турбулентной, градиентной и гравитационной коагуляции выглядит следующим образом:

$$\beta_{TBSG} = ((\beta_{TB})^2 + (\beta_S)^2 + (\beta_G)^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.4),$$

где β_{TBSG} – аддитивное ядро (скорость) коагуляции по четырём механизмам, β_S – ядро градиентной коагуляции, β_G – ядро гравитационной коагуляции [30].

Очень важны работы, связанные с математическим описанием коагуляции частиц при гравитационном осаждении атмосферных аэрозолей. Математические модели коагуляции при гравитационном осаждении позволяют посчитать дисперсный состав, время жизни атмосферного аэрозоля содержащего например, частицы золы или сажи [31].

В качестве физико-математической модели процесса гравитационной коагуляции используется нелинейное интегро-дифференциальное уравнение на основе уравнения Смолуховского, решаемое методом Галеркина и Кранка-Николсона [32].

1.2.3 Практическое применение процесса коагуляции аэрозолей

Процесс коагуляции играет важную практическую роль при выделении из аэрозольных потоков ценных целевых продуктов. С помощью внешних воздействий на аэрозольные потоки можно проводить предварительную коагуляцию аэрозоля, что способствует более эффективному процессу выделения готового продукта. Из литературных источников известны практические применения различных внешних воздействий на аэрозольные потоки с целью их эффективного осаждения. При производстве фосфатов на аэрозольный поток перед осаждением в циклонном аппарате с целью укрупнения частиц пыли подвергается воздействию звуковой волны с давлением, изменяемым в диапазоне 130-145 дБ, частотой колебаний 900-2000 Гц и временем воздействия 1,5-2,5 с [33].

В последнее время акустическую коагуляцию предлагают использовать для очистки нефти от твёрдых примесей в зонах насосов для предотвращения их выхода из строя, для осаждения тумана в районах аэропорта [34].

Для рассеивания плотных аэрозольных систем (пыли, дыма) с помощью введения в них униполярно заряженного жидкокапельного аэрозоля. Эффект быстрого рассеивания связан с ускорением процессов коагуляции частиц пыли и дыма, их укрупнением и электростатическим отталкиванием образующихся заряженных агломератов [35].

В литейном производстве завода «Чирчиксельмаш» перед очисткой аспирационных выбросов от электросталеплавильных печей в пылеулавливающем центробежном аппарате пылевой поток подвергали предварительной коагуляции пароконденсационным методом. Суть метода заключается в подаче водяного пара в аэрозольный поток, что интенсифицирует процессы кинематической коагуляции. Процесс предварительной коагуляции повышает эффективность осаждения в центробежном аппарате на 18-20% [37].

При улавливании железнорудной и золошлаковой пыли в центробежных циклонах типа ЦН-15-300Л, аэрозольные потоки обрабатываются коагулянтами двух типов. Первый тип коагулянтов жидкости на основе ПАВ увеличивает эффективность осаждения в циклонном аппарате с 68% до 86,8%. Коагулянты второго типа твердые сыпучие материалы [37].

Существуют аппараты для проведения процесса предварительного укрупнения частиц – коагуляторы. В них происходит искусственное завихрение аэрозольного потока его турбулизация, в результате увеличивается количество эффективных столкновений между частицами в потоке, что способствует образованию более крупных агрегатов и их последующего эффективного осаждения. Известны примеры применения коагуляторов для предварительного укрупнения волокнистых частиц, предложен технологический расчёт коагулятора, показано, что данный аппарат позволит не только повысить эффективность последующего осаждения, но, и позволит существенно снизить габаритные размеры осадительных камер [38].

1.2.4 Механизмы коагуляция аэрозолей технического углерода

Рассмотрим влияние процессов коагуляции частиц и агрегатов технического углерода при его получении. В литературе известно множество работ, посвященных рассмотрению процесса образования частиц сажи в диффузионном пламени горения различных газов (этилена, ацетилена). Для описания кинетической модели процесса применяется дифференциальное уравнение на основе уравнения Смолуховского. Константа коагуляции составляет $\approx 1,0 \times 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$ [39-40].

В условиях получения печного технического углерода аэрозольный поток проходит ряд стадий, на каждой из них протекает процесс коагуляции, характеризующийся своими кинетическими особенностями.

На стадии образования зародыша технического углерода активно протекают процессы поверхностного роста и коагуляции с образованием частиц размером до 50 нм [41]. На данном этапе получения технического углерода коагуляция протекает в основном под действием броуновского движения частиц, это связано с двумя факторами интенсифицирующих диффузионные процессы: высокая температура образования (1400-1550⁰С) печного технического углерода, а также низкий размер частиц 1-50 нм аэрозольного потока, которые интенсивно увлекаются диффузионным течением.

Константа коагуляции в данных условиях определённая по уравнению Смолуховского составляет $5-7 \times 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$ [42].

На стадии охлаждения аэрозольного потока технического углерода в него в распыленном виде подаётся охлаждающая вода, что активизирует процессы кинематической коагуляции. В данных условиях константа кинематической коагуляции составляет $1,0 \times 10^{-15} \text{ м}^3/\text{с}$ [42].

На многих отечественных заводах по выпуску технического углерода используются технологические схемы выделения целевого продукта, имеющие в своём составе коагуляторы. Это цилиндрический аппарат, в котором расположены лопасти для завихрения аэрозольного потока.

Известны научно-исследовательские работы по интенсификации процессов коагуляции агрегатов технического углерода путём введения в аэрозольный поток пара [43].

1.3 Теоретические основы процесса фильтрации дисперсных сред

В основном под процессом фильтрации понимается очистка жидкостных и газовых потоков от содержащихся в них твёрдых частиц путём пропускания их через пористые среды (ткань, слой зернистого материала, мембрана). При очистке потоков от твёрдых взвешенных частиц

применяются пористые фильтровальные перегородки со средними размерами пор, значительно превышающими размеры твёрдых частиц.

Из теории фильтрации суспензий известно два типа кинетических закономерностей протекания процесса. Процесс фильтрации с образованием осадка наблюдается в условиях, когда суспензия содержит частицы, размеры которых больше, чем средний размер пор фильтровального материала в этом случае частицы оседают на поверхности перегородки, при этом образуется слой осадка. В условиях, когда средний диаметр частиц суспензий меньше диаметра поровых каналов фильтрующего материала частицы проникают в объём пор фильтрующей перегородки, уменьшая их эффективное сечение – процесс фильтрации с постепенным закупориванием пор.

На практике при фильтрации различных дисперсных систем протекают более сложные процессы, сочетающие в себе характерные особенности процессов фильтрования с закупориванием пор и образованием осадка [44].

1.3.1 Фильтрация с образованием осадка на поверхности фильтровальной перегородки

Основное уравнение для процесса фильтрации с образованием осадка на поверхности фильтровальной перегородки выводится из закона Дарси:

$$\frac{V}{F \tau_{\phi}} = \frac{\Delta P}{\mu R_{\text{общ}}} \quad (1.5),$$

где F – поверхность фильтрации, м^2 ; τ_{ϕ} – время фильтрации, с;

μ – коэффициент динамической вязкости дисперсионной среды, $\text{Па} \times \text{с}$;

$R_{\text{общ}}$ – общее сопротивление фильтрующей перегородки, $1/\text{м}$.

Величина $W = \frac{V}{F \tau_{\phi}}$ представляет собой скорость фильтрации, м/с . Общее

сопротивление фильтрующей перегородки складывается из сопротивления слоя осадка, образующегося в процессе фильтрации и сопротивления чистой фильтрующей перегородки:

$$R_{общ} = R_{ос} + R_{ф.п.} \quad (1.6)$$

Уравнение фильтрации с образованием осадка на фильтрующей перегородке при постоянной скорости фильтрации [44]:

$$\Delta P = \mu r_o x_o W^2 \tau_\phi + \mu R_{ф.п.} W \quad (1.7),$$

где r_o – удельное объёмное сопротивление осадка, м/Н; x_o – отношение объёма осадка к объёму фильтрата.

1.3.2 Фильтрация с закупориванием пор фильтровальной перегородки

Различают несколько видов фильтрации с закупориванием пор фильтрующей перегородки: фильтрация с полным закупориванием пор, фильтрация с постепенным закупориванием пор и фильтрация промежуточного вида.

Под фильтрацией с полным закупориванием пор подразумевается процесс фильтрации, в котором каждая пора перегородки закупоривается одной твёрдой частицей. Данный процесс характеризуется резким ростом общего сопротивления системы и на практике встречается очень редко.

В случае процесса фильтрации с постепенным закупориванием пор фильтрующую перегородку рассматривают согласно идеализированной капиллярной модели Гагена-Пуазейля, как систему параллельных N капилляров радиусом r_k и длиной l_k . В процессе фильтрации твёрдые частицы проникают внутрь капилляра, благодаря различным механизмам осаждаются в нём, образуя слой осадка, уменьшающий эффективный радиус капилляра. С течением времени слой осадка в капилляре увеличивается, и поровый канал постепенно закупоривается.

Фильтрация промежуточного вида наблюдается, когда скорость роста общего сопротивления системы в процессе меньше, чем для фильтрации с постепенным закупориванием пор, но больше, чем для фильтрации с образованием осадка [44, 1-2].

Для процесса фильтрации с постепенным закупориванием пор, протекающего при постоянной скорости, когда радиус капилляра r_k уменьшается до размера r и общее сопротивление системы изменяется от $\Delta P_{нач}$ до ΔP применимо уравнение Гагена-Пуазейля [44]:

$$W = \frac{\pi \Delta P_{нач} N r_k^4}{8 \mu l_k} = \frac{\pi \Delta P N r^4}{8 \mu l_k} \quad (1.8)$$

Общее сопротивление системы при фильтрации с постепенным закупориванием пор фильтрующей перегородки при постоянной скорости:

$$\Delta P = \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{1}{\Delta P_{нач}}} - \frac{x_o \tau_\phi}{\pi l_k} \sqrt{\frac{W \pi}{8 N \mu l_k}} \right)^2} \quad (1.9)$$

Чтобы отнести рассматриваемый процесс фильтрования к одному из существующих видов строится графическая зависимость с двумя переменными. Для каждого вида фильтрования существует уравнение, которое в определенных условиях даёт на графике прямую линию, т.е. функция, состоящая из двух переменных и величин, которые в данных условиях остаются постоянными.

Уравнения для различных видов процесса фильтрования и координаты для изображения графической зависимости представлены в таблице 1.1.

Если графическое изображение построенное на основе экспериментальных данных является прямой линией, то можно утверждать, что рассматриваемый процесс относится к соответствующему виду фильтрования.

Таблица 1.1

Различные виды процесса фильтрации

№ п/п	Вид процесса	Уравнение	Координаты	Примечание
1	С полным закупориванием пор	$W = W_{нач} - k' q$	$q - W$	$W_{нач}$ – начальная скорость фильтрования, м/с; q – объём фильтрата, полученного с 1 м ² поверхности фильтрования, л/м; k, k', k'', k''' – постоянные величины определяются опытным путём
2	С постепенным закупориванием пор	$\frac{k}{2} \tau_\phi = \frac{\tau}{q} - \frac{1}{W_{нач}}$	$\tau_\phi - \frac{\tau_\phi}{q}$	
3	Промежуточный	$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_{нач}} + k'' \tau_\phi$	$\tau_\phi - \frac{1}{W}$	
4	С образованием осадка	$\frac{k'''}{2} q = \frac{\tau_\phi}{q} - \frac{1}{W_{нач}}$	$q - \frac{\tau_\phi}{q}$	
Процесс при постоянной скорости				
5	С постепенным закупориванием пор	$C \tau_\phi = \left(\frac{1}{\Delta P_{нач}}\right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{1}{\Delta P}\right)^{\frac{1}{2}} \tau_\phi - \left[\left(\frac{1}{\Delta P_{нач}}\right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{1}{\Delta P}\right)^{\frac{1}{2}}\right]$		С - постоянная величина определяется опытным путём

1.3.3 Фильтрация аэрозольных потоков

При фильтрации аэрозольных потоков протекают такие же процессы, что при фильтрации суспензий. В качестве фильтровальной перегородки применяют ткани на основе синтетических волокон, пористую керамику, зернистые слои

Рассмотрим непосредственно процесс осаждения дисперсных частиц аэрозольного потока на волокна тканевой фильтровальной перегородки. Волокна фильтровальной ткани представляют собой многослойную решетку, через которую проходит аэрозольный поток. При движении аэрозольного потока через фильтровальную ткань дисперсные частицы за счёт различных механизмов осаждения (инерционное осаждение, зацепление) осаждаются на волокнах. Высокая эффективность осаждения дисперсных частиц достигается в результате наличия в фильтровальной ткани множества последовательно расположенных на пути запылённого газового потока

волокон. В процессе осаждения, дисперсные частицы накапливаются между волокнами, тем самым, закупоривая поровые каналы фильтровальной ткани. В результате на поверхности фильтровальной ткани образуется слой из дисперсных частиц осаждаемого аэрозольного потока, так называемый первичный слой (автофильтр), который в свою очередь является высокоэффективной фильтрующей средой. Первичный слой практически полностью улавливает дисперсные частицы из аэрозольного потока, при этом дисперсные частицы осаждаются непосредственно в нём и не проникают внутрь фильтровальной ткани [45].

Чаще всего в промышленности для осаждения аэрозольных потоков используются рукавные фильтры, где в качестве фильтровальной перегородки используются тканевые волокнистые материалы. Для низкотемпературных процессов фильтрации до 150⁰С используются полиэфирные нетканые материалы, для высокотемпературных процессов 150-300⁰С используется стекловолокно. Во многих промышленных процессах, осаждаемый аэрозольный поток, обладает ярко выраженными кислотными или щелочными свойствами, поэтому используемые для осаждения фильтровальные материалы, должны быть химически стойкими к агрессивным средам. Для этого материалы обрабатывают специальными составами для придания им гидрофобных, антиабразивных свойств и для увеличения сопротивления кислотам и щелочам.

В цементной промышленности для выделения целевого продукта из аэрозольного потока применяются полиэфирные нетканые материалы с поверхностным покрытием на основе тефлона, которое повышает химическую стойкость материала, а для высокотемпературных процессов применяется стеклоткань, пропитанная трёхкомпонентным составом, состоящим из смеси силиконовых масел, графита и тефлона [46].

На металлургических предприятиях, чаще всего востребованы высокотемпературные методы очистки и поэтому фильтровальные рукава

изготовлены из термостойких волокон оксалон, армос, метаарамид, полифениленсульфид, полиимид [47].

На зарубежных предприятиях цементной промышленности, применяются фильтровальные полотна с нанесенной на их поверхность микропористой плёнки из политетрафторэтилена PTFE-мембраны. Мембрана способна задерживать частицы с размером менее 1 мкм, характеризуется химической стойкостью и термостойкостью (возможно применение до 260⁰С). Гладкая водонепроницаемая поверхность мембраны обеспечивает лёгкость регенерации фильтровального рукава и высокую эффективность процесса очистки до 99,99% [48]. В России проводят исследования в направлении создания на поверхности фильтровальных полотен мембранных покрытий на основе фторсодержащих препаратов. На фильтрполотна типа «Акрофит-Т» и «Рунит» наносятся полимерные мембраны позволяющие увеличить показатель устойчивости к истиранию, уменьшить поглотительную способность по воде и снизить максимальный условный диаметр пор. Данная продукция может быть востребована в металлургической, горнорудной, цементной и других отраслях промышленности [49]. Отрицательным фактором нанесения мембранного покрытия на фильтровальное полотно является снижение воздухопроницаемости материала и, чтобы обеспечить ту же производительность установки при полной замене фильтровальных рукавов на мембранные необходимо увеличивать размеры технологического оборудования. В промышленном производстве технического углерода для осаждения аэрозольного потока применяются рукавные фильтры со стеклотканевыми рукавами. Процесс осаждения аэрозоля технического углерода характеризуется высокой температурой (до 300⁰С), наличием агрессивной среды, в зависимости от марки технического углерода она может быть, как кислотной, так и щелочной, а также наличием водяных паров. Фильтровальные рукава изготавливают из стеклотканей марки ТСФТ-4П-СФБМ (пропитана композицией сульфатбисэтилендиамин меди) или

ТСФТ-4П- СГФ (пропитана силикон-графит-фторовой эмульсией).

На зарубежных заводах по производству технического углерода используются рукавные фильтры с мембранными фильтровальными рукавами Gore-Tex [50]. Мембранное покрытие обеспечивает высокую эффективность осаждения дисперсного углерода из аэрозольного потока в первоначальный момент времени, когда на поверхности фильтровальной ткани ещё не сформировался слой из осаждённых агрегатов технического углерода, а также увеличивает срок службы фильтровальных рукавов. Низкий показатель воздухопроницаемости материала приводит к увеличению габаритов технологического оборудования установки осаждения технического углерода. Ещё одним недостатком применения рукавов с мембранным покрытием в производстве технического углерода является их высокая стоимость по сравнению со стеклотканевыми рукавами.

1.4 Современные технологические процессы осаждения технического углерода из аэрозольного потока

Известно несколько способов осаждения технического углерода из аэрозольных потоков: осаждение аэрозоля в пенных аппаратах, в электрофильтрах и тканевых рукавных фильтрах. Первые два способа обладали рядом существенных недостатков.

При осаждении аэрозоля в пенном аппарате эффективность процесса зависела от свойств поверхности технического углерода. Для марок технического углерода с гидрофобной поверхностью, практически не смачиваемой водой, данный способ осаждения не применим из-за низкой эффективности процесса.

Недостаток способа электростатического осаждения аэрозоля технического углерода был связан с наличием в осаждаемом аэрозоле водяных паров. При снижении температуры в электрофильтре протекали процессы конденсации, в результате между электродами возникал пробивной

разряд, что приводило к частым поломкам оборудования и аварийным ситуациям. При производстве активных и полуактивных марок технического углерода, когда дисперсионной средой являются взрывоопасные отходящие газы процесса получения, приходилось жёстко контролировать концентрацию кислорода в электрофилтре. При превышении концентрации кислорода выше 2% возникала вероятность взрыва технологического оборудования. К тому же для таких марок технического углерода характерна высокая дисперсность аэрозольных частиц. Даже при низких скоростях движения аэрозольного потока в электрофилтре эффективность осаждения частиц дисперсного углерода не превышала 95%.

В настоящее время электрофилтры используют в промышленности при улавливании пыли углерода [51-54], но на предприятиях по производству технического углерода применяются только для улавливания малоактивных марок.

В 60-х годах прошлого века, благодаря освоению отечественной промышленностью выпуска фильтровальной стеклоткани, устойчивой к влажным газам и высокой температуре (до 300 °C), новые заводы по производству технического углерода оснащались рукавными филтрами [55].

На отечественных заводах по производству технического углерода для выделения целевого продукта из аэрозольного потока применяются две технологические схемы:

- с предварительным осаждением аэрозоля в циклоне-концентраторе и последующей филтрацией аэрозоля в стеклотканевом филтре с рабочей поверхностью 5000 м²;
- с предварительной коагуляцией дисперсного углерода в центробежных коагуляторах и последующей филтрацией аэрозоля в стеклотканевом рукавном филтре с рабочей поверхностью 10000 м² [56].

Технологическая схема процесса филтрации аэрозоля технического углерода в рукавном филтре с предварительным осаждением в циклоне-концентраторе представлена на (рис.1.3).

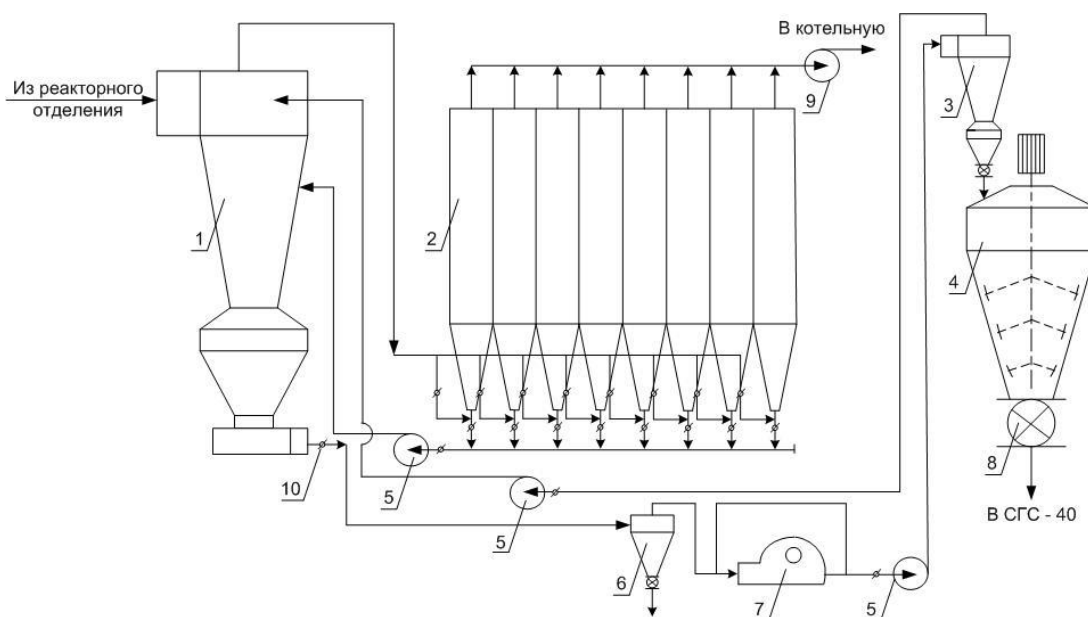


Рис. 1.3 – Принципиальная технологическая схема фильтрации аэрозоля технического углерода в рукавном фильтре с предварительным осаждением в циклоне-концентраторе

1 – циклон-концентратор; 2 – рукавный фильтр, 3 – циклон газотранспорта, 4 – мешалка уплотнитель, 5 – турбовоздуходувка; 6 – инерционная ловушка; 7 – микроизмельчитель; 8 – шлюзовой питатель; 9 – мельничный вентилятор; 10 – дроссельная заслонка.

В процессе предварительного осаждения в циклоне-концентраторе (1) из аэрозольного потока выделяют до 90% целевого продукта [57-58]. Производительность установки с такой технологической схемой отделения улавливания составляет до 15 тыс. тонн технического углерода в год.

На (рис.1.4) изображена технологическая схема, состоящая из рукавного фильтра с общей фильтрующей поверхностью 10000 м² и предварительной коагуляцией аэрозольного потока в коагуляторе.

Предварительная коагуляция аэрозоля осуществляется в специальном устройстве центробежного типа – коагуляторе, который конструктивно представляет собой цилиндрический аппарат с расположенными в нём лопатками для завихрения аэрозольного потока. Выходной патрубок коагулятора расположен на распределительном коллекторе, который

непосредственно связан с бункером рукавного фильтра, для подачи укрупнённых агрегатов технического углерода на фильтрацию.

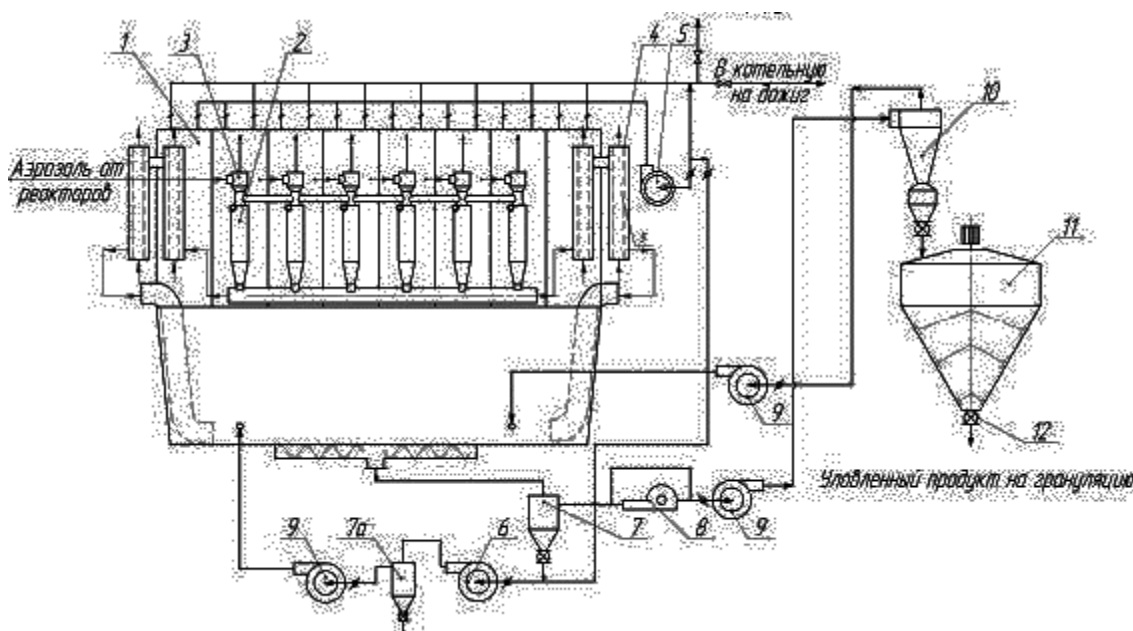


Рис. 1.4 – Принципиальная технологическая схема осаждения технического углерода в рукавном фильтре с предварительной коагуляцией

1 – рукавный фильтр; 2 – коагулятор; 3 – механический затвор; 4 – газоохладитель; 5 – вентилятор обратной продувки; 6 – вентилятор; 7, 7а – ловушка инерционная; 8 – микроизмельчитель; 9 – турбовоздуходувка; 10 – циклон СК-ЦН-34 диаметром 1400 мм; 11 – уплотнитель; 12 – питатель шлюзовой.

Рукавный фильтр представляет собой аппарат, состоящий из следующих основных узлов: коллектора с коагуляторами, двух газоохладителей, бункера с винтовым конвейером для вывода уловленного технического углерода, камеры осаждения технического углерода, разделенной на 8 секций, в которых размещены фильтровальные рукава, коллектора очищенного газа и системы обратной продувки, включающей вентилятор и коллектор с дроссельными заслонками.

Камера фильтрации представляет собой прямоугольную конструкцию, разделенную внутренними стенками на восемь секций. Внутри секций расположены фильтровальные рукава из стеклоткани с промежуточными кольцами в количестве 720 шт. Диаметр рукавов 130 мм, длина 3700 мм и

4700 мм. Низ рукава с помощью вшитого в него пружинного кольца закрепляется в отверстии рукавной плиты, а верхний конец рукава, с помощью кольца, закрепляется на специальной тарелке и подвешивается к подпружиненному крюку. Снизу к раме фильтра приваривается общий для восьми секций бункер. В нижней части бункера расположен винтовой конвейер.

Коллекторы – очищенного газа и обратной продувки – представляют собой трубопроводы с отводами к каждой секции. На отводах коллекторов устанавливаются дроссельные заслонки с пневматическим приводом. Вентилятор обратной продувки устанавливается на нулевой отметке с торца фильтра.

Аэрозоль технического углерода, полученный в реакторе, охлаждённый до температуры 300 °С через механический затвор аксиально подаётся в коагулятор. Для интенсификации процесса предварительной коагуляции, дополнительно в основной аэрозольный поток радиально вводится коагулянт – аэрозоль с более крупными агрегатами технического углерода. Непосредственно под входным патрубком во внутренней полости коагулятора расположено 6 лопаток с углом наклона 45°, основная цель, которых задать вращение аэрозольному потоку коагулянта. В нижней части коагулятора расположены три лопатки под углом 120° друг к другу. Концы лопаток загнуты по радиусу на 60° для смещения основного потока аэрозоля к стенке коагулятора [59].

Из коагуляторов аэрозольный поток поступает в коллектор, который для равномерного распределения аэрозольного потока по бункеру фильтра введён в него с двух сторон. Крупные агрегаты и агломераты технического углерода под действием силы тяжести оседают в бункер, а аэрозольный поток направляется на осаждение в секции фильтра. Агрегаты технического углерода осаждаются на внутренней поверхности фильтровального рукава и в порах стеклоткани, создавая при этом слой осадка (рис.1.5), а очищенный

газ удаляется в коллектор очищенного газа мельничным вентилятором через гидрозатвор подаётся в котельную или на установку дожига газов.

Фильтровальный стеклотканевый рукав

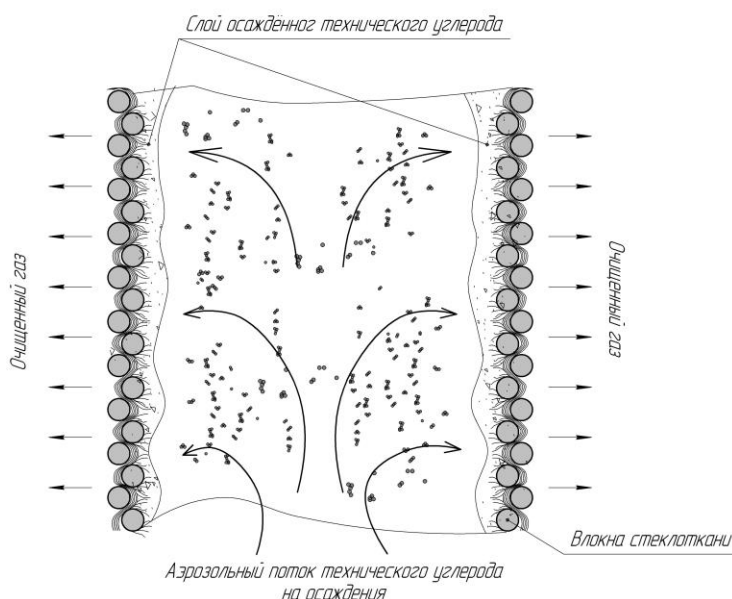


Рис.1.5 – Процесс осаждения аэрозольного потока технического углерода в стеклотканевом рукаве

В результате накопления осадка из агрегатов технического углерода на поверхности стеклоткани значительно растёт аэродинамическое сопротивление системы и через определённые промежутки времени проводят регенерацию фильтрующих рукавов. Регенерация фильтрующей поверхности осуществляется путём продувки рукавов очищенным газом в направлении обратном аэрозольному потоку. Газ для продувки рукавов забирается вентилятором из коллектора очищенного газа.

В процессе регенерации, слой осадка технического углерода разрушается и удаляется с поверхности рукава, попадая в бункер фильтра, откуда винтовым конвейером выгружается в систему газотранспорта. Регенерацию фильтрующей поверхности проводят периодически: в семи секциях осуществляют процесс фильтрации аэрозоля, в одной из секций – процесс регенерации [60-61].

Уловленный в рукавном фильтре технический углерод системой прямого газотранспорта подаётся в отделение обработки. В системе прямого

газотранспорта, для очистки технического углерода от посторонних включений, устанавливается инерционная ловушка, после которой аэрозольный поток технического углерода разделяется на две равноценные технологические линии обработки и упаковки [56].

Аналогичные технологические схемы отделения улавливания применяются и на зарубежных предприятиях по производству технического углерода. В литературе [62] описана установка рукавного фильтра с предварительным осаждением аэрозольного потока в слое технического углерода. Рукавный фильтр имеет общий бункер, из которого технический углерод выгружается винтовым конвейером таким образом, чтобы в бункере фильтра всегда находился слой определённой высоты (рис.1.6).

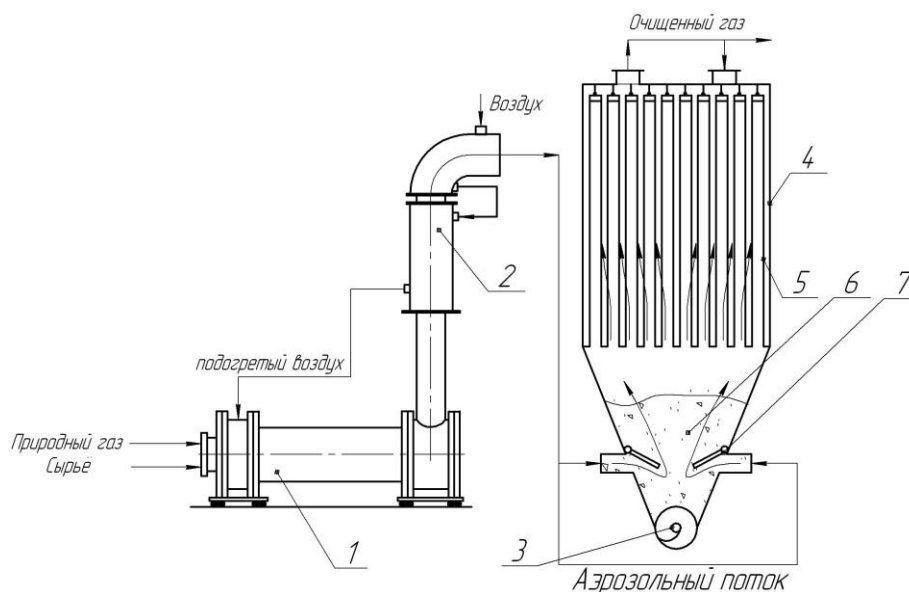


Рис. 1.6 – Принципиальная технологическая схема процесса осаждения технического углерода

- 1 – реактор получения; 2 – теплообменник; 3 – винтовой конвейер; 4 – рукавный фильтр; 5 – фильтровальный рукав; 6 – слой уловленного технического углерода; 7 – клапан подачи аэрозольного потока

Снизу по периметру бункера расположены клапаны, через которые происходит подача в фильтр аэрозольного потока. Клапаны расположены таким образом, чтобы более равномерно распределить аэрозольный поток по бункеру фильтра. Фильтр разделён на восемь секций, где расположены фильтровальные рукава.

Аэрозольный поток от реакторов получения через теплообменник направляется в общий бункер фильтра непосредственно в слой уловленного технического углерода, где из аэрозольного потока осаждаются основная часть частиц и агрегатов.

Аэрозольный поток, прошедший через слой технического углерода направляется на тонкую очистку в фильтровальные рукава. Регенерацию фильтрующих элементов проводят через определенные промежутки времени, последовательно в каждой секции фильтра. Выгрузка уловленного технического углерода осуществляется винтовым конвейером, частота оборотов которого регулируется в зависимости от высоты слоя в бункере фильтра. Выгружаемый из фильтра технический углерод системой газового транспорта направляется в отделение обработки. Существенным недостатком данной технологической схемы в сравнении с отечественной является сложность в поддержании определённой высоты слоя уловленного технического углерода в бункере фильтра.

К общим недостаткам использования технологии осаждения технического углерода, основанной на тканевых или мембранных рукавных фильтрах, можно отнести следующее. Во-первых, вследствие высокой концентрации технического углерода на входе в фильтр, рукава и детали для подвески рукавов должны быть высокого качества. При выходе из строя хотя бы одного из 6-ти тысяч фильтрующих элементов резко повышается концентрация технического углерода на выходе из фильтра и снижается эффективность процесса осаждения. Для замены вышедшего из строя элемента, необходимо останавливать всю установку получения технического углерода, что влечёт к дополнительным трудо- и энергозатратам и потерям целевого продукта. Во-вторых, это дороговизна фильтрующего материала и трудоёмкость процесса замены рукавов. На отечественных предприятиях по производству технического углерода процесс замены не механизирован.

Установки создаются в огромных зданиях для исключения конденсации водяного пара, содержание которого в аэрозольных потоках производства технического углерода достигает 30%.

Данными недостатками не обладают зернистые фильтры, которые могут быть применены для извлечения целевого продукта в производстве технического углерода, если в качестве фильтрующего слоя использовать гранулы технического углерода.

1.5 Теоретические основы процесса осаждения аэрозоля в зернистом слое

1.5.1 Механизмы осаждения аэрозоля в зернистых фильтрах

При осаждении аэрозоля в слое гранул, структура которого обладает специфическими фильтрующими свойствами, газовый поток разделяется на множество элементарных потоков, которые обтекают элементы слоя.

Движение аэрозольных частиц увлекаемых с элементарным потоком, обтекают гранулы слоя, обусловлено силами, которые определяются из энергии движущейся частицы, а также из гравитационных и электрических полей. Эффективность осаждения определяется результирующей силой, которая обеспечивает прочный контакт гранулы слоя с частицей аэрозольного потока.

В зависимости от действующих параметров слоя гранул и аэрозоля, а также скорости фильтрации, процесс осаждения протекает по одному или нескольким механизмам. Отсюда следует, что эффективность осаждения может быть описана следующей функцией [63, 55]:

$$\eta = f(k_b, k_z, k_g, k_d, k_e, k_a) \quad (1.10)$$

где k_b – инерционное осаждение; k_z – осаждение за счёт эффекта зацепления; k_g – гравитационное осаждение; k_d – диффузионное осаждение; k_e – электрическое осаждение; k_a – осаждение за счёт распределения потока аэрозоля.

Поэтому эффективность осаждения зависит от групп параметров отдельных механизмов.

Для объяснения физических величин, определяющих параметр k , рассмотрим обтекание сферического элемента слоя потоком аэрозоля (см рис.1.7).

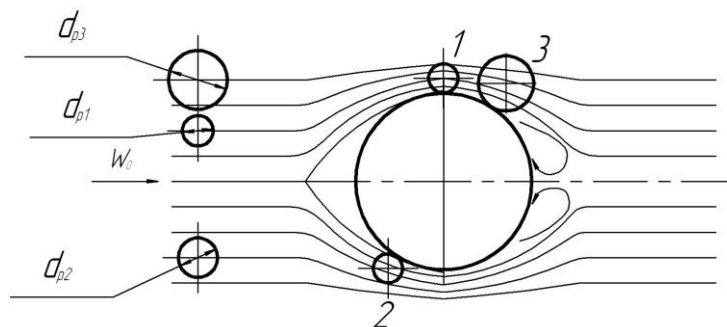


Рис.1.7 – Механизмы осаждения

В потоке аэрозоля частицы следуют по линиям тока, огибающим гранулы препятствия, подвергаясь действию сил инерции и броуновской диффузии, что служит причиной их смещения с линии тока и может привести к осаждению на гранулах. Частицы, движущиеся в непосредственной близости от поверхности гранул, могут просто зацепиться из-за своих геометрических размеров. Кроме того, возможно действие на частицы аэрозоля внешних гравитационных и электрических сил. Возможны следующие механизмы осаждения частиц аэрозоля на гранулах слоя:

1. Эффект касания (зацепления) – возникает, когда линии тока газов, с которыми движутся частицы, проходят над поверхностью гранулы на расстоянии равном радиусу частицы или ближе. Осаждение, обусловленное эффектом зацепления, не зависит от плотности частиц и скорости движения, а увеличивается с размером частиц аэрозольного потока.

2. Инерционное столкновение – происходит, когда масса частицы или скорость её движения настолько незначительны, что она не может следовать полностью вместе с газовым потоком по линии тока, которая резко искривляется, огибая гранулы слоя. Частица, стремясь по инерции

продолжить своё движение по прямолинейной траектории, осаждается на гранулу. Известно, что инерционное осаждение увеличивается с размером и плотностью частиц аэрозольного потока и скоростью движения.

3. Броуновское, или тепловое движение высокодисперсных частиц аэрозольного потока, результатом которого является столкновение частиц друг с другом и с поверхностью гранул. Чем меньше размеры аэрозольных частиц, тем интенсивнее они смещаются с линии тока и больше вероятность их осаждения на поверхности гранул.

4. Гравитационное осаждение – происходит в результате вертикального смещения частиц с линии тока под действием силы тяжести во время прохождения через слой гранул. Гравитационное осаждение уменьшается с увеличением скорости потока и растёт с размером и плотностью частиц аэрозольного потока.

5. Электрическое осаждение – происходит в результате взаимодействия зарядов на частицах [64-65].

Рассмотренные механизмы осаждения приводят к эффективным соударениям между частицами аэрозольного потока или гранулами слоя. Частица на поверхности зерна или другой частицы удерживается за счёт сил адгезии.

1.5.2 Основные параметры процесса фильтрации аэрозоля в стационарном зернистом слое

Основные величины, характеризующие работу фильтра со слоем гранул являются: аэродинамическое сопротивление (ΔP), пылеемкость (II) и эффективность процесса осаждения (η). Все три величины взаимосвязаны между собой и зависят от характеристик слоя и параметров осаждаемого аэрозольного потока: гранулометрического состава фильтрующего слоя, поперечного сечения, высоты слоя, извилистости и длины поровых каналов.

Для определения аэродинамического сопротивления слоя гранул, использовали уравнение потерь давления в поровых каналах с учётом скорости потока и эквивалентного диаметра для каналов не круглого сечения [66]:

$$\Delta P = \frac{\lambda H f \rho w^2}{8\varepsilon^3}, \text{ Па} \quad (1.11),$$

где λ – коэффициент сопротивления слоя; H – высота слоя; f – удельная поверхность частиц слоя, $\text{м}^2/\text{м}^3$; w_0 – скорость в поперечном сечении слоя, $\text{м}/\text{с}$; ρ – плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; ε – доля свободного объёма, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Теоретическая формула применима к расчёту аэродинамического сопротивления незапылённого слоя гранул, когда структура слоя при протекании процесса не меняется. В реальном процессе осаждения аэрозоля происходит непрерывное изменение геометрической структуры слоя, вследствие накопления в поровых каналах дисперсных частиц аэрозоля.

При исследовании осаждения аэрозоля клинкерной пыли была установлена эмпирическая формула зависимости аэродинамического сопротивления от характеристик слоя [64]:

$$\Delta P = 100w^{1,5} \times C_{\text{ex}}^{0,203} \times H^{0,743} \times \delta_{50}^{-0,378} \times d^{-0,746} \times \tau_{\phi}^{-0,008}, \text{ Па} \quad (1.12),$$

где C_{ex} – входная концентрация аэрозольного потока, $\text{г}/\text{м}^3$; δ_{50} – медианный размер частиц и агрегатов аэрозольного потока, мкм ; d – размер гранул слоя, мм ; τ_{ϕ} – время осаждения, мин . Очевидно, что уравнение в полной мере может характеризовать процесс осаждения аэрозоля в слое гранул лишь клинкерной пыли. Известно еще несколько расчётных эмпирических формул для определения аэродинамического сопротивления слоя. При изучении осаждения аэрозоля дисперсного углерода в слое гранул была получена следующая эмпирическая зависимость [67]:

$$\Delta P = 46,5w^{1,5} \times C_{\text{ex}}^{0,2} \times H^{0,74} \times \delta_{50}^{-0,08} \times d^{-0,34} \times \tau_{\phi}^{0,6}, \text{ Па} \quad (1.13).$$

Под пылеемкостью фильтра со слоем гранул понимают массу или объём пыли, отложившейся в фильтрующем элементе при увеличении его аэродинамического сопротивления на заданную величину [11].

Расчетная формула пылеемкости фильтра со слоем гранул имеет вид:

$$П = \frac{w(C_{\text{вх}} - C_{\text{вых}})\tau_{\phi}}{H}, \text{ г/м}^3 \quad (1.14),$$

где $C_{\text{вых}}$ – концентрация аэрозольных частиц на выходе из слоя, г/м³;

Экспериментально установлено, что величина пылеемкости зависит от характеристик пористой среды и размера частиц и агрегатов осаждаемого аэрозоля.

Эффективность процесса осаждения одна из важнейших величин характеризующая степень очистки аэрозольного потока. Различают фракционную эффективность процесса – степень осаждения отдельного узкого диапазона размеров частиц и общую эффективность процесса. Общая эффективность процесса рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}} \times 100\% \quad (1.15).$$

Увеличение аэродинамического сопротивления в ходе процесса осаждения сопровождается ростом степени очистки. В работе [68] приведены результаты лабораторных и промышленных испытаний фильтра со слоем гранул, подтверждающие связь между, эффективностью процесса (η) и аэродинамическим сопротивлением (ΔP), которая может быть описана вероятностным законом:

$$\eta = 0,5(1 + \text{erf}\lambda), \quad \lambda = \frac{C\delta\sqrt{\Delta P}}{\mu} \sqrt{\frac{C_{\text{вх}}\rho_{\text{уст}}}{\rho_{\text{зр}}(1 - \varepsilon)}} \quad (1.16),$$

где $\text{erf}\lambda$ – табулированный интеграл: $\text{erf}\lambda = \frac{2}{\pi} \int_0^{\lambda} e^{-\lambda^2} d\lambda$ (его значение определяется по справочникам); C – коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментальным путём; $\rho_{\text{уст}}$, $\rho_{\text{зр}}$ – соответственно плотность вещества аэрозольных частиц и гранул фильтрующего слоя, кг/м³.

1.5.3 Теоретические расчёты фильтров со слоем гранул

Для определения параметров процесса осаждения аэрозолей в фильтрах со слоем гранул предлагается применять номограммы. Они просты в использовании и позволяют за короткие сроки определить основные технологические параметры процесса. Впервые номограммы были составлены на основе результатов эксперимента по осаждению аэрозоля пыли мергеля и известняка в фильтре со слоем гранул [66]. Аэродинамическое сопротивление слоя гранул исследовалось на лабораторной установке в зависимости от скорости осаждения, диаметра гранул и высоты слоя. В результате обработки данных исследований, с целью упрощения расчётов, была составлена номограмма (рис. 1.8).

С целью упрощения пояснений, порядок расчёта на номограмме отображается указательными стрелками. Данная диаграмма не применима для проектирования фильтра со слоем гранул.

Основными исходными данными, для расчёта режима работы фильтра, являются количество осаждаемого аэрозоля и концентрация твердой фазы в нём, по которой устанавливается газовая нагрузка и на основании её выбирается тип и количество секций фильтра, для данного расчёта используется номограмма (рис. 1.9).

По заданной начальной запылённости потока, можно определить все необходимые при проектировании фильтра со слоем гранул параметры: газовую нагрузку, время осаждения, пылеемкость слоя, а также концентрацию на выходе из слоя [69-73, 66, 12, 3-5].

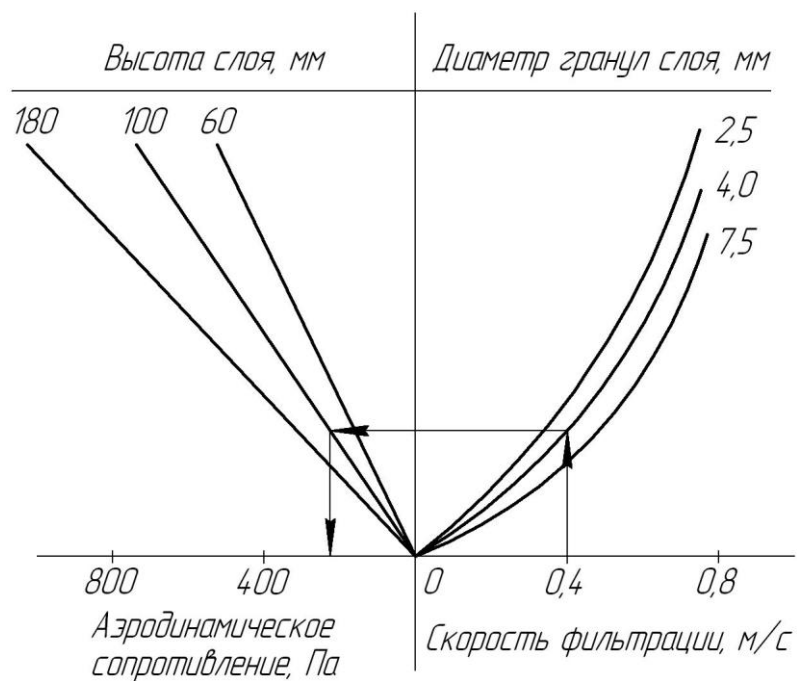


Рис.1.8 – Номограмма процесса осаждения пыли мергеля и известняка

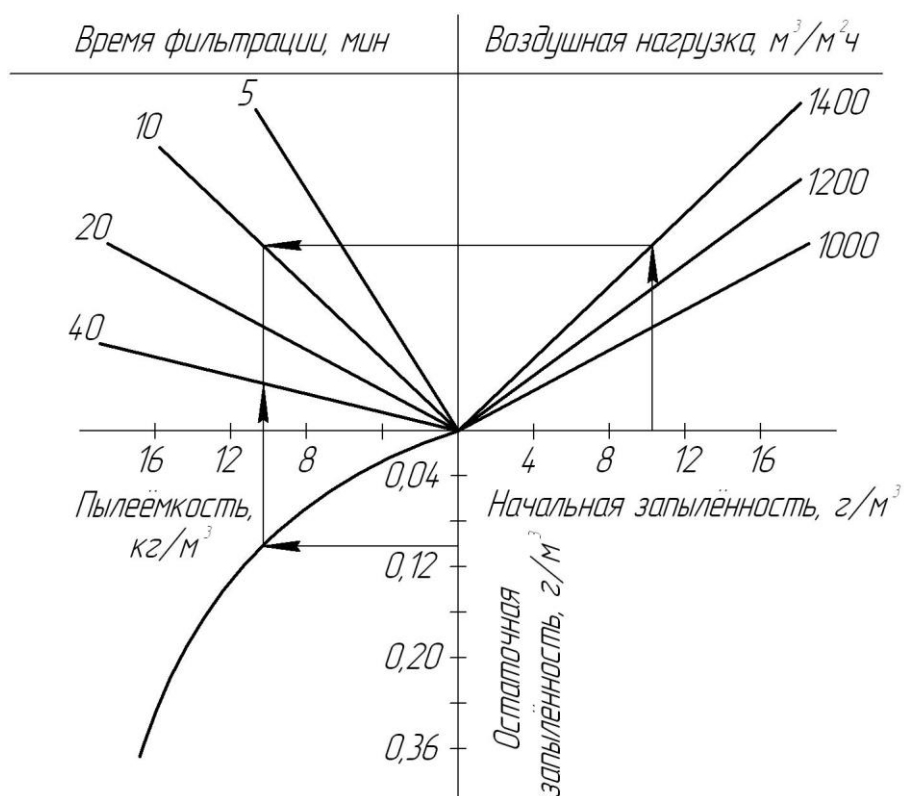


Рис. 1.9 – Номограмма определения основных параметров процесса осаждения аэрозоля

1.6 Конструкции зернистых фильтров

В настоящее время, практически все технологические процессы осаждения аэрозолей, основаны на рукавных тканевых фильтрах, фильтры со слоем гранул применяются редко. Тем не менее, фильтры со слоем гранул перспективны для внедрения в различных процессах очистки газов и имеют ряд преимуществ по сравнению с рукавными тканевыми фильтрами: они обладают высокой надёжностью процесса осаждения аэрозоля, возможностью применения для очистки высокотемпературных газов, низким аэродинамическим сопротивлением системы, высокой эффективностью процесса. У них ниже удельная металлоемкость, что позволяет проектировать установки в открытом исполнении.

Различают несколько типов конструкций фильтров со слоем гранул: фильтры со связанной структурой слоя и насыпные фильтры со слоем гранул.

Фильтры со связанной структурой слоя представляют собой жесткие фильтрующие перегородки, состоящие из прочно связанных между собой зерен или гранул материала. Жесткие стеклянные перегородки, получаемые спеканием различных фракций измельченного кварцевого песка, перегородки из пористых металлов, полученные прессованием порошков из углеродистой и коррозионно-стойких марок сталей, керамические фильтровальные перегородки, изготовленные из измельченного кварца или шамота в основном применяются для тонкой очистки газовых сред [74 - 77].

Насыпные фильтры со слоем гранул бывают со стационарным неподвижным слоем и с подвижным фильтрующим слоем [13]. В зависимости от способа регенерации фильтрующей среды, фильтры со стационарным слоем различают с импульсной продувкой и механическим ворошением слоя или вибровстряхиванием. Продувка фильтрующего слоя может быть интенсивной и неинтенсивной. К интенсивной продувке относят струйную и импульсную продувку при скоростях псевдоожижения и уноса

слоя. Неинтенсивная продувка проводится при скорости потока близкой к скорости осаждения [6].

1.6.1 Регенерация запылённого фильтрующего слоя

Существует несколько способов регенерации фильтрующего слоя, наиболее эффективным и менее трудоёмким является продувка с псевдоожижением. Процесс осуществляется путём подачи очищенного газа или воздуха в обратном направлении движения потока аэрозоля. Слой гранул, при малых скоростях газового потока, направленного снизу вверх, остаётся неподвижным, но при достаточно больших скоростях потока, гранулы, свободно взвешенные в нём, образуют псевдоожиженный слой.

Если скорость газового потока (ожижающего агента) превышает минимальную величину, необходимую для возникновения псевдоожиженного слоя, то либо последний продолжает расширяться за счёт увеличения среднего расстояния между гранулами, либо избыток ожижающего агента проходит через слой гранул в виде пузырей, образуя двухфазную систему.

При псевдоожижении наблюдается резкое отличие в поведении различных зернистых материалов: некоторые из них легко переходят в псевдоожиженное состояние, другие же совершенно не способны к псевдоожижению. Образованию хорошо псевдоожиженных систем благоприятствуют следующие характеристики слоя гранул и ожижающего агента [78-81]:

- низкая плотность и малые размеры гранул;
- узкий гранулометрический состав слоя;
- близость формы гранул к сферической;
- высокая плотность ожижающего агента.

Эффективность процесса регенерации зависит и от равномерности распределения ожижающего агента по сечению слоя, что предъявляет особые

требования к распределительным устройствам. В идеальном случае распределительные устройства должны иметь пористую структуру, чтобы ожижающий агент поступал через множество мелких отверстий [82]. Распределительные устройства, с малым числом крупных отверстий, характеризуются высокими скоростями в отдельных точках основания слоя, что приводит к каналообразованию в слое гранул.

Для равномерного распределения ожижающего агента по всему сечению слоя гранул, целесообразно применять двойную газораспределительную решётку с переменным живым сечением или трубчатую распределительную решетку, с размещенной на ней «подложкой» - слоем крупных гранул, по сравнению с гранулами фильтрующей среды и с высокой насыпной плотностью [83-85].

1.7 Применение различных конфигураций зернистых фильтров

1.7.1 Некоторые особенности процессов и аппаратов фильтрации аэрозолей в различных областях промышленности

В мировой практике основное направление использования фильтров со слоем гранул являются процессы водоочистки. Фильтры применяются для очистки артезианских вод, технической воды на промышленных предприятиях и питьевой воды для бытовых нужд. В качестве гранулированного фильтрующего материала в основном используются высокопористые адсорбенты, способные очищать воду от различных органических загрязнителей, окислов металлов, улучшать цвет и вкус [86-88].

Наряду с применением фильтров со слоем гранул для водоочистки, активно развивается направление по использованию фильтров для очистки аэрозольных потоков [89-92]. Рассмотрим несколько примеров применения

процесса осаждения аэрозольного потока в слое гранул в различных отраслях промышленности.

Из работ исследовательской группы Красовицкого Ю.В. известно об активном использовании фильтров со слоем гранул в технологических процессах при производстве огнеупоров [93-95]. На ОАО Семилукинском огнеупорном заводе применяется несколько конфигураций фильтра со стационарным слоем гранул, использующих фильтрующий слой из гравия, щебня или песка. Основной недостаток данной технологии фильтрации это сложность регенерации фильтрующей среды и возврата обратно в процесс уловленного продукта. Но эта проблема решается на асфальтобетонных заводах использованием для очистки газов после сушильного барабана установки фильтра с движущимся слоем. Установка очистки состоит из циклона СДК-ЦН-33 для предварительного осаждения аэрозольного потока и из зернистого фильтра с движущимся слоем. В качестве фильтрующего материала применяется материал, использующийся в технологическом процессе получения готового продукта, песок или гравий с грансоставом 3-5 мм и толщиной слоя 60-150 мм. Фильтр работает без регенерации, а отработанный запылённый фильтрующий материал возвращается обратно в процесс получения. Данная установка улавливания обеспечивает очистку от пыли с входной концентрацией $3,9-18,5 \text{ г/м}^3$, медианным размером $2,4 - 11,7 \text{ мкм}$, с эффективностью до 98,4%, а концентрация пыли на выходе из фильтра составляет $0,06 \text{ г/м}^3$ [95].

В производстве нейтрального гипохлорита кальция при очистке воздуха после сушки пасты, применяется инерционно-фильтрационный пылеуловитель с зернистым слоем. Аппарат представляет собой инерционный пылеуловитель с размещенным в верхней части зернистым фильтром. Основная часть целевого продукта отделяется в инерционной части аппарата, а воздух направляется на доочистку в зернистый фильтр. В качестве фильтрующей среды применяется песок, гравий, гранулированные полимерные и другие материалы. Применением данного аппарата удастся

снизить запыленность выбрасываемого в атмосферу воздуха до санитарных норм, т.е. до концентрации нейтрального гипохлорита кальция в выбросах менее 200 мг/м³ [96, 9-10].

1.7.2 Осаждение аэрозолей технического углерода в опытно-промышленных установках фильтра со слоем гранул

Процесс осаждения аэрозолей углеродной природы характеризуется более жёсткими условиями: высокой температурой и наличием водяных паров в аэрозоле. При разработке процесса осаждения, особое внимание уделяется подбору жаростойкой фильтрующей среды. Из литературных источников известно о применении фильтра со слоем гранул в высокотемпературных процессах очистки [97-99]. В большинстве случаев для очистки высокотемпературных газов в качестве фильтрующей среды применяют углеродные материалы [100 -101]. Известно, что для улавливания частиц сажи из синтез-газа, в процессе газификации пылевидного каменноугольного сырья применяется фильтр со слоем гранул кокса размером 3-10 мм [102].

Во ВНИИ технического углерода был разработан процесс осаждения дисперсного углерода в слое гранулированного технического углерода [103-107]. Фильтр ФНС – 8/8 был испытан в опытном производстве института при осаждении активных марок технического углерода. В качестве фильтрующей среды использовался слой гранулированного технического углерода с гранулометрическим составом 0,7-1,8 мм при высоте слоя 200 мм и насыпной плотности 330 кг/м³. Концентрация частиц технического углерода на выходе из фильтра составила 60-100 мг/м³. На основе проведённых исследований, была предложена принципиальная технологическая схема зернистого фильтра для отделения основного улавливания установки по производству активного печного технического углерода мощностью 15 тыс. тонн в год.

Позднее сотрудниками конструкторско-технологического института технического углерода СО РАН был разработан зернистый фильтр ФЗГОР-85К-01М, который был испытан на участке по производству канального технического углерода Сосногорского газоперерабатывающего завода. Фильтр ФЗГОР-85К-01М (рис.1.10) состоял из 16 секций, каждая из которых была разделена на 3 элемента, в которых находился фильтрующий слой – уплотнённые в процессе пиролиза углеродные гранулы с гранулометрическим составом 0,7–2,0 мм и насыпной плотностью 0,51 г/см³.

Для равномерного распределения газового потока по объему фильтрующей среды, каждый элемент секции фильтра имел аэродинамическую решетку с расположенным на ней слоем «подложки». В качестве «подложки» использовали уплотнённые углеродные гранулы с гранулометрическим составом 2,0–3,2 мм и насыпной плотностью 0,73 г/см³.

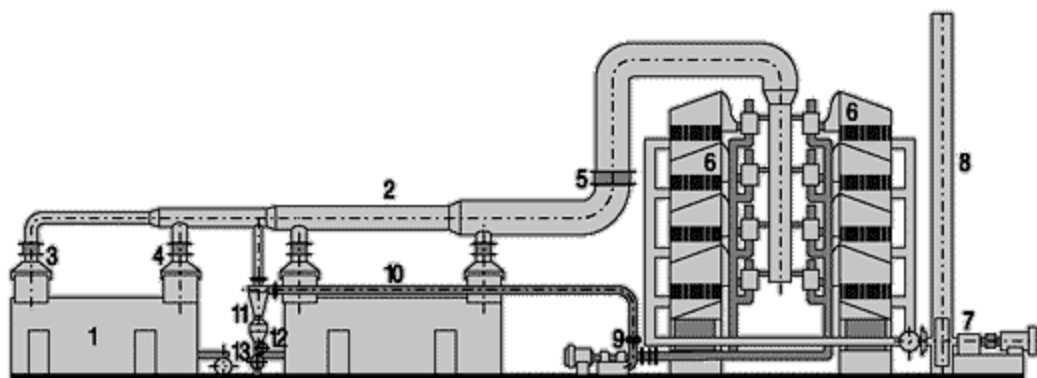


Рис. 1.10 – Общий вид зернистого фильтра ФЗГОР-85К-01М

1 – камера получения канального технического углерода; 2 – коллектор; 3, 4 – регулирующие заслонки; 5 – искрогаситель; 6 – зернистый фильтр; 7 – вентилятор; 8 – дымовая труба; 9 – турбовоздуходувка; 10 – газотранспорт уловленного технического углерода; 11 – циклон СК-ЦН-34; 12 – питатель шлюзовой; 13 – винтовой контейнер.

Зернистый фильтр ФЗГОР-85К-01М был испытан в процессе производства канального технического углерода К354 при осаждении высокодисперсного аэрозоля с медианным размером аэрозольных частиц 0,5

мкм (кривая 2, Рис. 1.11) медианный размер частиц на выходе из фильтра составил 0,15 мкм (кривая 1, Рис. 1.11). Регенерацию секций фильтра осуществляли псевдооживлением фильтрующего слоя, путём подачи потока очищенного газа под распределительную решетку, при скорости 0,55–0,6 м/с [108-109].

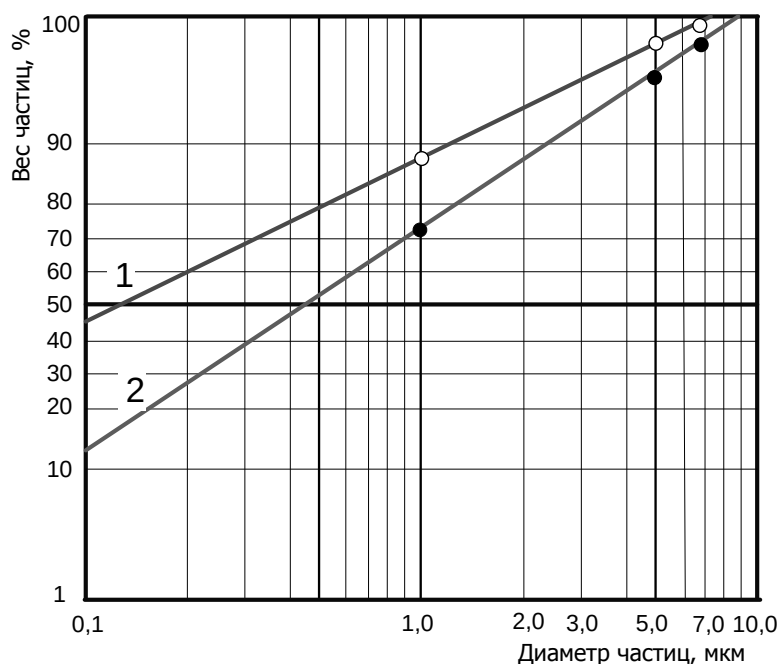


Рис. 1.11 – Дисперсный состав аэрозоля технического углерода в зернистом фильтре ФЗГОР-85К-01М:

1 – на выходе из фильтра; 2 – на входе в фильтр

Сравнительные характеристики технико-экономических показателей зернистого и рукавного фильтров представлены в (таблице 1.2).

Важным преимуществом зернистого фильтра перед рукавным фильтром является его низкая металлоёмкость, что позволяет проектировать установки в открытом исполнении, обеспечивая при фильтрации влажных аэрозольных потоков быстрый прогрев фильтра, исключение конденсации водяного пара.

Таблица 1.2

Технико-экономические показатели фильтров

№ п/п	Наименование показателей	Зернистый фильтра ФЗГОР-85К-01М	Рукавный фильтр ФР-5000
1	Производительность по очищенному газу, м ³ /ч	100 000	100 000
2	Температура очищаемого газа, °С	300	270
3	Скорость фильтрации, м/с	0,25-0,35	0,005-0,01
4	Аэродинамическое сопротивление, кПа	3,0	3,0
5	Удельная металлоёмкость, кг/м ³ ×ч	0,60	0,91
6	Концентрация технического углерода, г/м ³ : - перед фильтром - после фильтра	0,35-5,00 0,08	5,00 до 0,2

1.8 Выводы по главе I

На основании анализа современного состояния исследований в области коагуляции и осаждения аэрозолей можно сделать следующие выводы:

1. Применяемая в производстве технического углерода технология выделения целевого продукта из аэрозольного потока в рукавных стеклотканевых фильтрах, имеет ряд существенных недостатков:

- низкая надёжность процесса осаждения;
- высокая металлоёмкость аппарата;
- использование ручного труда при замене фильтрующего материала.

2. В последние годы интенсивно развивается технология очистки промышленных газов с использованием фильтров со слоем гранул. Основными преимуществами использования фильтра со слоем гранул в производстве технического углерода являются:

- простота и компактность конструкции;
- высокая надёжность процесса осаждения;
- возможность применения для очистки высокотемпературных газов;

- механизация процесса замены фильтрующего материала;
- эффективность осаждения аэрозолей технического углерода в фильтрах со слоем гранул может быть выше, чем в тканевых рукавных фильтрах.

3. При опытно-промышленных испытаниях фильтра со слоем углеродных гранул в производстве технического углерода было установлено, что в целевой продукт попадают сколы гранул фильтрующего слоя, материалом которых являлся пиролитически уплотнённый углерод. Выходом из сложившейся ситуации является применение в качестве фильтрующего слоя гранулированного технического углерода.

4. Коагуляция аэрозолей неразрывно связана с технологией осаждения дисперсных аэрозолей, интенсификация процессов коагуляции аэрозоля позволяет повысить эффективность очистки. Коагуляции посвящены работы по созданию математических систем уравнений для определения скорости процесса, которые могут быть применимы и к расчёту констант коагуляции аэрозоля технического углерода.

5. Для установления оптимальных параметров работы фильтра необходимо детально изучить кинетические закономерности процессов коагуляции и осаждения технического углерода, различающегося по своим физико-химическим свойствам, в слое углеродных гранул.

ГЛАВА II. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В главе рассматриваются основные методы исследования процессов коагуляции и осаждения дисперсного углерода из аэрозольного потока в слое углеродных гранул.

В работе использованы стандартные методики определения физико-химических свойств технического углерода и методы исследования параметров аэрозольного потока:

- метод определения абсорбции дибутилфталата технического углерода по ГОСТ 25699.5-90;
- метод определения насыпной плотности технического углерода по ГОСТ 25699.14-90;
- метод измерения объёмного расхода и скорости аэрозольного потока [110 - 111];
- метод определения массовой концентрации частиц дисперсного углерода в аэрозоле;
- метод определения дисперсного состава аэрозольного потока ротационным анализатором дисперсности.

2.1 Определение массовой концентрации агрегатов дисперсного углерода в аэрозольном потоке методом внешней фильтрации

Определение массовой концентрации частиц дисперсного углерода в аэрозольном потоке производили методом внешней фильтрации (рис. 2.1).

Применяемые приборы:

Для анализа аэрозоля дисперсного углерода используется пробоотборная трубка (1) и фильтрующий патрон (2) со сменными фильтрами, изготовленными из фильтровальной бумаги (8) или фильтродержатель для мембранных аэрозольных фильтров типа АФА-ВП со

сменными фильтрами (на рисунке не показаны). Определение привеса сменных фильтров осуществляется на лабораторных аналитических весах класса точности 2,0. Необходимый объёмный расход газа, при отборе пробы, фиксируется реометром (4). Отбор проб из газотока осуществляется аспиратором (5).

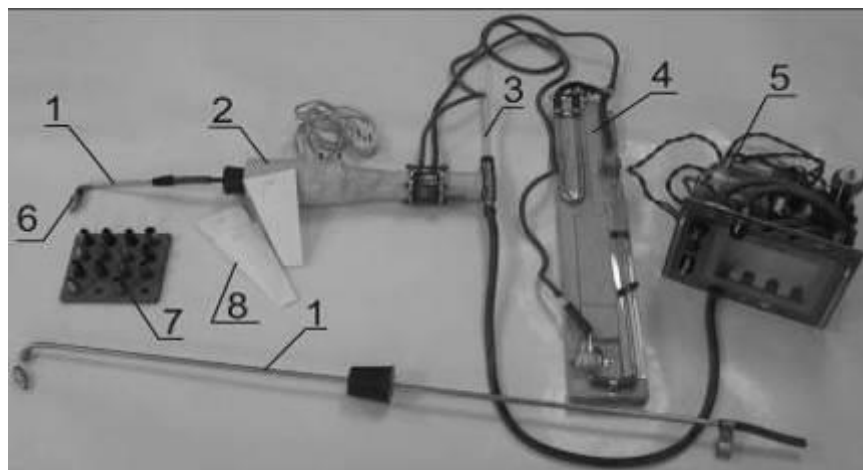


Рис. 2.1 – Комплект оборудования для проведения исследования:

- 1 – заборная трубка; 2 – фильтрующий патрон; 3 – термометр;
- 4 – реометр; 5 – аспиратор; 6 – наконечник; 7 – набор наконечников;
- 8 – комплект бумажных фильтров.

Проведение измерений:

Комплект оборудования собирается согласно рисунку 2.1. Пробоотборная трубка соответствующей длины в зависимости от диаметра газотока устанавливается в центральной точке потока так, чтобы входное отверстие сменного наконечника было расположено навстречу движению потока аэрозоля. Открытием вентиля аспиратора по реометру устанавливается скорость отбора газа и включается секундомер. Скорость отбора пробы аэрозоля в течение опыта поддерживается постоянной. Разрежение и температура газа в условиях реометра фиксируются в начале, середине и в конце опыта.

Продолжительность отбора проб устанавливается в зависимости от запылённости аэрозоля и типа аэрозольного фильтра.

Запылённый фильтр взвешивается с соблюдением всех условий, применяемых при взвешивании чистых фильтров.

Важным условием при отборе проб является соблюдение закона изокINETичности (равенства скорости аэрозольного потока в газоходе скорости этого же потока в носике пробоотборной трубки). Условие изокINETичности соблюдается с помощью подбора определенного диаметра наконечника пробоотборной трубки, рассчитываемого по формуле (2.1):

$$d = \frac{24}{\sqrt{w}}; \quad (2.1),$$

где d – диаметр наконечника заборной трубки, м; w – скорость газа в газоходе, м/с [110].

Обработка результатов:

Весовая концентрация твёрдых частиц в потоке определяется по формуле (2.2), исходя из значения увеличения массы фильтра после осаждения и значения отобранного объёма газа рассчитанного на нормальные условия.

$$C = \frac{(m + a)}{V_0} \cdot 1000; \quad (2.2),$$

где m – увеличение массы фильтра (привес), г; a – изменение массы пустого (контрольного) фильтра, г; V_0 – отобранный объём газа, рассчитанный на нормальные условия [110-111].

2.2 Определение дисперсного состава аэрозольных агрегатов в потоке

Метод основан на использовании ротационного анализатора дисперсности (рис.2.2). Принцип действия ротационного анализатора дисперсности заключается в следующем: отобранная на анализ проба аэрозольного потока просасывается по каналу съёмного патрона, который вращается со скоростью 5000 об/мин, под действием центробежных сил твёрдые частицы сепарируют из потока и в зависимости от своей массы оседают на различной длине внутренней цилиндрической стенки съёмного

патрона. Патрон состоит из семи соединённых между собой металлических стаканчиков разной длины. Аэрозоль, освобождённый от осаждённых в стаканчиках определённых фракций твёрдой фазы, поступает в фильтрующий патрон со сменным фильтром, где осаждаются наиболее тонкие фракции аэрозольных частиц.

Применяемые приборы:

Общий вид ротационного анализатора дисперсности с комплектом оборудования представлен на рис.2.3.

Для определения привеса сменных фильтров используются лабораторные аналитические весы класса точности 2,0.

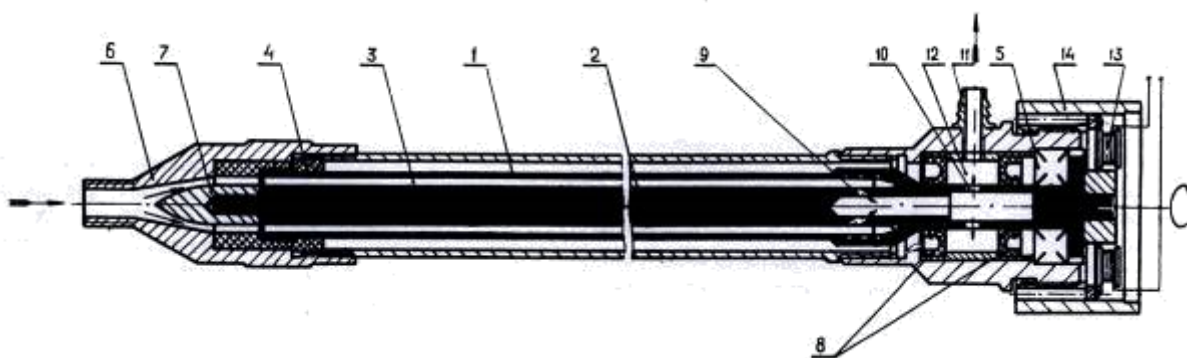


Рис. 2.2 – Схема ротационного анализатора дисперсности

1,2 – коаксиальные трубы ротора; 3 – кольцевой проточный канал; 4,5 – подшипники; 6 – головка; 7 – завихритель; 8 – уплотнение; 9 – окно трубы ротора; 10 – окно соединительной втулки; 11 – штуцер входной; 12 – камера соединительная; 13 – тахогенератор; 14 – втулка.

Проведение измерений:

Комплект оборудования собирается согласно рисунку 2.5. Пробоотборная трубка (1), соответствующей длины в зависимости от диаметра газохода, устанавливается в центральной точке потока. Через блок управления (7) ротационным анализатором дисперсности (2), запускается ротор и по амперметру устанавливается необходимая частота вращения. Затем, открытием вентиля аспиратора (5), по ротаметру (3) устанавливается скорость отбора газа и включается секундомер. С помощью регулирования

вентиля aspirатора, в течение всего времени опыта, необходимо поддерживать на постоянном уровне скорость отбора аэрозоля.

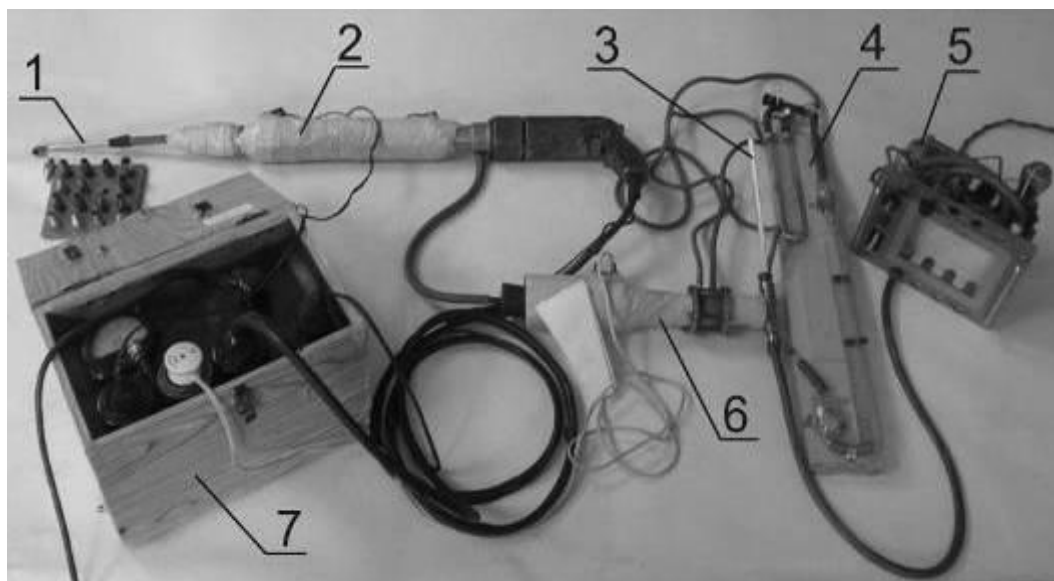


Рис. 2.3 – Комплект оборудования для определения дисперсного состава аэрозоля

1 – заборная трубка; 2 – ротационный анализатор дисперсности;
3 – термометр; 4 – реометр; 5 – аспиратор; 6 – фильтрующий патрон; 7 – блок управления ротационным анализатором дисперсности.

Продолжительность отбора проб устанавливается в зависимости от запылённости аэрозоля. По окончании отбора пробы останавливается секундомер, закрывается клапан аспиратора, выключается анализатор и меняется съёмный патрон и фильтр.

Обработка результатов:

Для получения результатов эксперимента, патрон расщепляется на отдельные стаканчики и находится вес осаждённых на них частиц. Дисперсный состав аэрозоля вычисляется исходя из распределения веса осадка по длине патрона методом седиментационного анализа. Полученный результат подчиняется закону логарифмически нормального распределения и выстраивается на логарифмической вероятностной координатной сетке в прямую линию с углом наклона, характеризующим дисперсию аэрозоля (рис.2.5) [112].

Рассмотрим пример расчёта дисперсного состава аэрозоля технического углерода. Для расчёта дисперсного состава, экспериментальные данные каждого опыта сводятся в отдельную таблицу 2.1.

Таблица № 2.1 заполняется следующим образом:

в графе 2 проставляются длины стаканчиков съёмной трубки;

в графе 3 проставляется привес стаканчиков после эксперимента;

в графе 4 проставляется суммарная длина стаканчиков, нарастающим итогом порядковых номеров стаканчиков;

Таблица 2.1

Экспериментальные данные определения дисперсного состава аэрозольного потока

№ ст.	Длина стаканчиков, см	Вес осадка ТУ, г	Длина стаканчиков суммарно, см	Вес осевшей пыли суммарно,	
				г	%
1	2	0,0346	2	0,0346	36,4
2	2	0,0165	4	0,0511	54,0
3	3	0,0070	7	0,0581	61,5
4	5	0,0051	12	0,0632	66,8
5	7	0,0045	19	0,0677	71,5
6	8	0,0038	27	0,0715	75,4
7	7,5	0,0034	34,5	0,0749	79,0
фильтр		0,0200		0,0949	100,0

в графе 5 проставляется суммарный вес, осевшего в стаканчиках дисперсного углерода в граммах, нарастающим итогом порядковых номеров стаканчиков;

в графе 6 проставляется суммарный вес, осевшего в стаканчиках дисперсного углерода в процентах, к общему весу дисперсного углерода, отобранного в данном опыте, нарастающим итогом порядковых номеров стаканчиков.

Экспериментальные данные таблицы 2.1 представляются в виде кривой накопления веса осадка по длине канала ротора $Q = f(t)$ (рис 2.4).

Для расчёта аналитическим методом, на полученной кривой накопления веса осадка (Рис. 2.4) для двух значений l_1 и l_2 отмечается процентное количество

осадка Q_1 и Q_2 . Значения l_1 и l_2 следует выбирать по обе стороны от наибольшей кривизны кривой. В приведенном примере выбирается $l_1 = 2$ см, соответственно $Q_1 = 36,4$ %, $l_2 = 10$ см, соответственно $Q_2 = 65,2$ %. Из значения функции седиментации $Q(t) = 100 \cdot (1 - e^{-\frac{1}{x}}) \cdot x$, % находятся величины x_1 и x_2 , соответствующие значениям Q_1 и Q_2 . В приведённом числовом примере для $Q_1 = 36,4$ % $x_1 = 0,359$, для $Q_2 = 65,2$ % $x_2 = 1,08$.

Вычисляются параметры β и μ_0 : $\beta = \frac{\lg \frac{x_2}{x_1}}{\lg \frac{l_2}{l_1}}$, и $\mu_{01} = \frac{x_1}{l_1^\beta}$, $\mu_{02} = \frac{x_2}{l_2^\beta}$.

Для приведённого числового примера $\beta = 0,62$, $\mu_{01} = 0,26$, $\mu_{02} = 0,26$.

Далее производится расчёт величин l_i^β и x_i и заполняется сравнительная таблица 2.2.

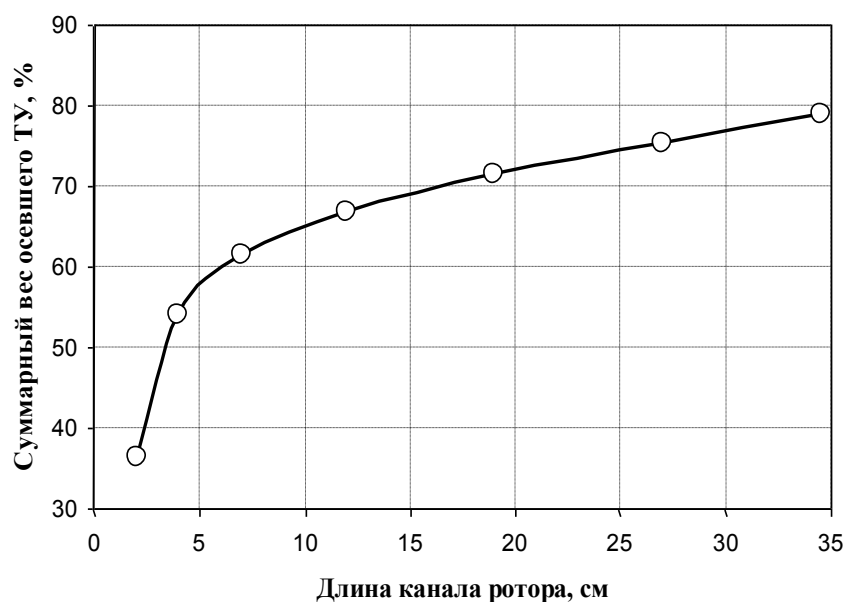


Рис. 2.4 – Кривая накопления веса осадка технического углерода по длине канала ротора

Математическая обработка

l_i , см	2	8	14	20	26	32	34,5
l_i^β	1,539	3,64	5,14	6,40	7,51	8,52	9,00
x_i	0,400	0,948	1,338	1,665	1,950	2,220	2,340
Q_i расчёт, %	36,72	61,70	70,40	75,10	78,25	80,40	81,50
Q_i эксп., %	36,40	62,80	69,00	73,00	76,00	79,00	80,50
q_i	19,50	45,06	56,20	62,50	66,70	70,00	71,40
$(100-q_i)$	80,50	54,94	43,80	37,50	33,30	30,00	28,60
δ_i	180,0	38,0	18,0	12,0	9,0	7,0	6,5

Таблица 2.2 заполняется следующим образом:

в первой строке проставляются значения длины канала ротора l_i в см в произвольных равномерных интервалах;

во второй строке проставляются значения выбранных величин l_i , возведённых в степень β ;

в третьей строке проставляются значения x_i вычисленные по формуле:

$$x_i = \mu_0 \cdot l_i^\beta;$$

в четвертой строке проставляются значения $Q_{\text{расчёт}}$, величины которых

определяются из зависимости: $Q(t) = 100 \cdot (1 - e^{-\frac{1}{x}}) \cdot x$, % по соответствующим значениям x_i ;

в пятой строке проставляются значения $Q_{\text{эксп.}}$, определенные по графику (рис. 2.4) по соответствующим значениям l_i ;

в шестой строке проставляются значения q_i , определённые из зависимости

кумулятивной кривой $q(t) = (1 - \beta - \frac{\beta}{x}) \cdot Q(t) + 100 \cdot \beta$ по соответствующим

значениям β и x_i ;

в седьмой строке проставляются весовые количества прошедших частиц, в %, размер которых меньше δ_i , мкм;

в восьмой строке проставляются диаметры частиц δ_i , мкм, осевших на соответствующей длине канала, определённые по тарировочному графику по

соответствующим величинам I_i и по соответствующему количеству газа, проходящего через канал анализатора. По весовым количествам прошедших частиц, в %, размер которых меньше δ_i , и по размерам частиц технического углерода, осаждённых на соответствующей длине канала, строится график дисперсного распределения частиц дисперсного углерода по размерам (рис. 2.5) [112-116].

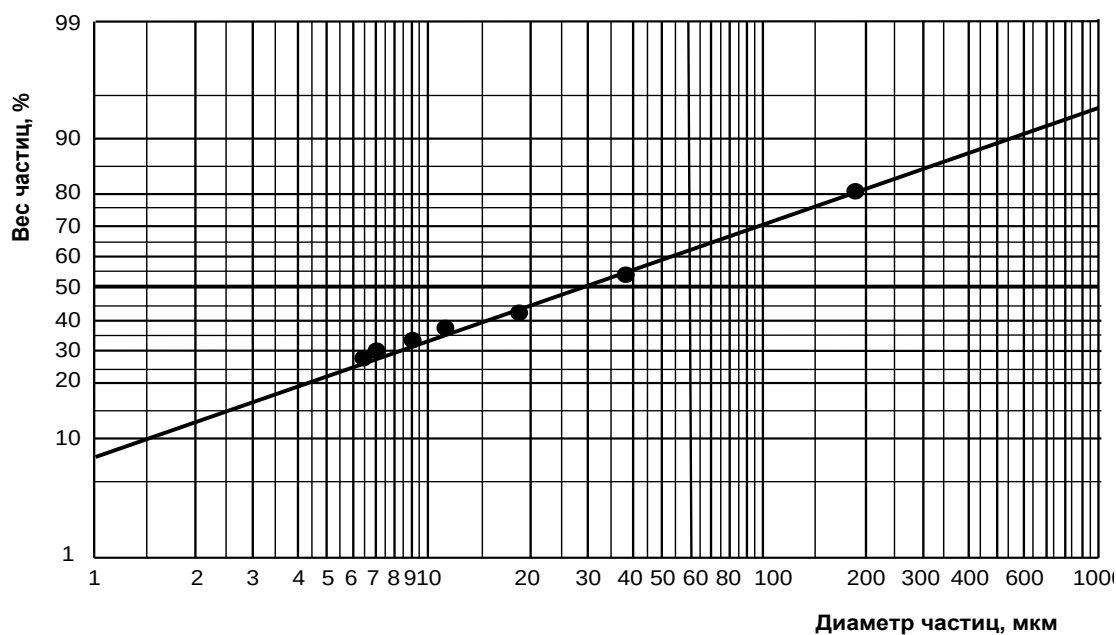


Рис. 2.5 – Распределения агрегатов технического углерода по размерам на логарифмически вероятностной координатной сетке

2.3 Изучение коагуляции агрегатов дисперсного углерода при движении в аэрозольном потоке

Целью данного исследования является определение основных параметров процесса коагуляции дисперсного углерода при движении аэрозольного потока.

Применяемые приборы:

1. Лабораторная установка изучения коагуляции аэрозоля дисперсного углерода.
2. Комплект оборудования для определения скорости газового потока.
3. Комплект оборудования для определения весовой концентрации частиц дисперсного углерода в аэрозольном потоке методом внешней фильтрации
4. Комплект оборудования для определения дисперсного состава аэрозоля.
5. Компрессорная установка КУ-10М.
6. Лабораторный автотрансформатор.
7. Весы аналитические лабораторные, класса точности 2,0; весы технические 0 – 500 г.
8. Секундомер механический 2 шт.

Описание лабораторной установки изучения коагуляции аэрозоля дисперсного углерода:

В состав лабораторной установки входят (см. рис. 2.6):

1. Прямолинейный участок газотока диаметром 70 мм с двумя точками отбора аналитических проб, расположенными на расстоянии 2 м друг от друга. Первая точка с условным названием – «до коагуляции» и вторая точка с условным названием – «после коагуляции».

2. Узел получения аэрозоля дисперсного углерода (на рисунке не показан) он состоит из дозатора подачи порошка технического углерода, эжектора, необходимого для диспергации углеродного порошка, ротаметра

РМ-25ГУЗ для фиксации объёмного расхода воздуха высокого давления, вентиля регулировки подачи воздуха и компрессорной установки. Узел получения аэрозоля позволял изменять концентрацию дисперсного углерода от 0,1 до 10 г/м³ и медианный размер агрегатов частиц от 0,2 до 20 мкм.

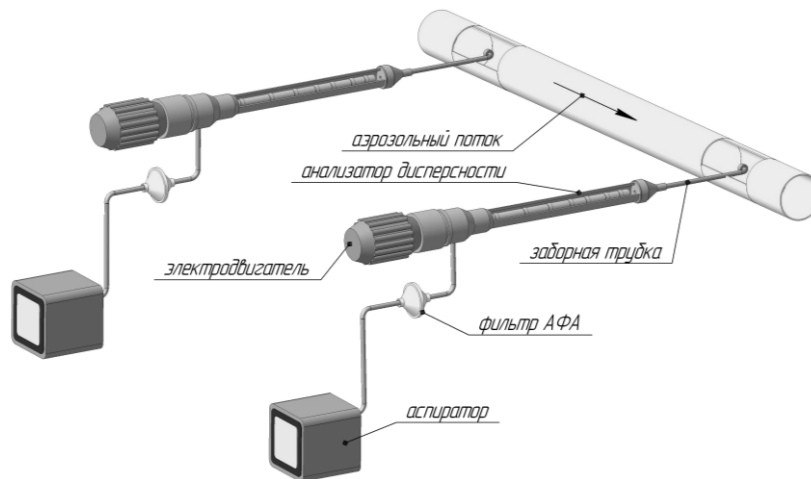


Рис. 2.6 – Лабораторная установка изучения коагуляции аэрозоля дисперсного углерода

3. Аспирационный агрегат, который придаёт движение аэрозольному потоку по прямолинейному участку газохода, он подключается к внешней электрической цепи через лабораторный автотрансформатор с рабочим напряжением от 0 до 250 В;

Принцип действия установки:

Аспирационный агрегат запускается через лабораторный автотрансформатор, подающий напряжение на двигатели и устанавливается необходимый скоростной режим потока воздуха в газоходе.

Для приготовления аэрозоля дисперсного углерода используется, выдержанный в сушильном шкафу в течение 8 часов при температуре 105-110⁰С пылящий порошок углерода. Далее он засыпается в дозатор. Накачивается воздух в компрессорную установку до избыточного давления 6 атм. По шлангу подаётся воздух в эжектор и включается дозатор. Полученный аэрозольный поток направляется по прямолинейному участку газохода.

Проведение измерений:

В каждой контрольной точке газохода лабораторной установки определяется объёмный расход, скорость, весовая концентрация и дисперсный состав аэрозольного потока по описанным ранее методикам. Время эксперимента фиксируется по секундомеру. Под временем коагуляции принимается время, за которое аэрозольный поток пройдёт расстояние между двумя контрольными точками.

Обработка результатов:

1. Время коагуляции:

$$\tau_{\phi} = \frac{S}{W}; \quad (2.3),$$

где S – расстояние между точками отбора проб участка газохода, м; τ_k – время коагуляции, с; W – скорость аэрозольного потока в газоходе, м/с.

По экспериментальным параметрам рассчитываются константы коагуляции аэрозольного потока:

2. Константы коагуляции по уравнению Смолуховского [19]:

$$\frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} = K \cdot \tau_k; \quad (2.4),$$

где n_0 , n – концентрация частиц и агрегатов частиц в аэрозоле в начальный момент и по истечению времени τ , $1/\text{м}^3$; $n = \frac{6C}{8\pi r^3 \rho_m}$; r – размер агрегатов частиц, м; ρ_m – кажущаяся плотность агрегатов частиц, $\text{кг}/\text{м}^3$; K – константа тепловой коагуляции, $\text{м}^3/\text{с}$.

3. Процесс кинематической коагуляции обусловлен полидисперсностью аэрозольного потока и описывается уравнением [42]:

$$K_k = \frac{\pi \cdot \eta \cdot r^2 \cdot W_s \cdot n_0}{2 \cdot n} \quad (2.5),$$

где K_k – константа кинематической коагуляции, $\text{м}^3/\text{с}$; η – вероятность эффективного столкновения частиц и агрегатов; W_s – относительная скорость движения частицы и агрегата, м/с;

4. Процесс турбулентной коагуляции, обусловленный наличием турбулентных пульсаций в аэрозольном потоке, описывается уравнением [42]:

$$K_{mб} = \frac{\pi \cdot \eta \cdot \rho \cdot W^{2,25} \cdot r^4}{\rho_m \cdot \gamma^{1,25} \cdot D_z^{0,75}} \quad (2.6),$$

где $K_{mб}$ – константа турбулентной коагуляции, м³/с; ρ_z – плотность дисперсионной среды, кг/м³; D_z – диаметр газохода, м; W – скорость аэрозольного потока, м/с;

γ – коэффициент кинематической вязкости дисперсионной среды, м²/с.

5. Процесс градиентной коагуляции в пристенном слое аэрозольного потока, при движении в газоходе [42]:

$$K_{mp} = \frac{5,33 \cdot W \cdot r^3}{\gamma} \quad (2.7).$$

Исследование процесса коагуляции дисперсного углерода в аэрозольном потоке проводилось в лабораторных условиях при комнатной температуре. Аэрозоль дисперсного углерода получали из предварительно просушенного порошка технического углерода, дисперсионной средой аэрозоля являлся воздух при комнатной температуре.

2.4 Исследование процесса осаждения аэрозоля дисперсного углерода в слое углеродных гранул и процесса регенерации слоя

Целью данного исследования является определение основных параметров процесса осаждения аэрозоля дисперсного углерода в слое углеродных гранул и регенерации запылённого слоя.

Применяемые приборы:

1. Лабораторная установка исследования закономерностей эффективного осаждения аэрозоля в слое углеродных гранул.
2. Комплект оборудования для определения скорости газового потока.
3. Комплект оборудования для определения весовой концентрации частиц дисперсного углерода в аэрозольном потоке, методом внешней фильтрации.
4. Комплект оборудования для определения дисперсного состава аэрозоля.
5. Компрессорная установка КУ-10М.
6. Лабораторный автотрансформатор.
7. Весы аналитические лабораторные, класса точности 2,0; весы технические 0 – 500 г.
8. Секундомер механический 2 шт.
9. Барометр класса точности не ниже 1,0.
10. Сушильный шкаф.
11. Вытяжной шкаф.

Описание лабораторной установки фильтра со слоем гранул

В состав лабораторной установки входят (см. рис. 2.7):

1. Фильтр со слоем гранул из органического стекла (1). Распределительная решётка фильтра из стальных трубок диаметром 32,0 мм с щелью между трубками 0,8 мм. Над слоем углеродных гранул находится камера запылённого воздуха, под распределительной решёткой – камера

очищенного воздуха. Камера запылённого воздуха снабжена патрубком для ввода аэрозоля дисперсного углерода и отвода воздуха регенерации слоя с уловленным углеродом. Камера очищенного воздуха снабжена патрубком для выхода очищенного воздуха и подвода воздуха регенерации слоя;

2. Узел получения аэрозоля дисперсного углерода, он состоит из дозатора подачи порошка дисперсного углерода (4), эжектора (3) необходимого для диспергации углеродного порошка, ротаметра РМ-25ГУЗ (8) для фиксации объёмного расхода воздуха высокого давления, вентиля регулировки подачи воздуха (10) и компрессорной установки.

3. Циклон (2) для улавливания частиц дисперсного углерода при регенерации.

4. Аспирационный агрегат (6), который подключается к внешней электрической цепи через лабораторный автотрансформатор (18) с рабочим напряжением от 0 до 250 В;

5. U-образный манометр (24) для определения гидравлического сопротивления фильтрующего слоя.

6. Система определения перепада давления по высоте слоя гранул (рис. 2.8), он состоит из набора датчиков, фиксирующих статическое давление на различной глубине в слое гранул и набора U-образных манометров, связанных с датчиками давления по последовательной схеме. Замер перепада давления по высоте слоя необходим для определения проникающей способности частиц и агрегатов аэрозоля дисперсного углерода в слой гранул [117-120]. Глубина расположения датчика давления в слое углеродных гранул может регулироваться.

Принцип действия установки:

Работа в режиме осаждения аэрозольного потока. Дроссельные заслонки устанавливаются в положение «фильтрация». Ориентируясь по шкале микроманометра, автотрансформатором подают на двигатели аспирационного агрегата напряжение для установления необходимой скорости для осаждения аэрозоля.

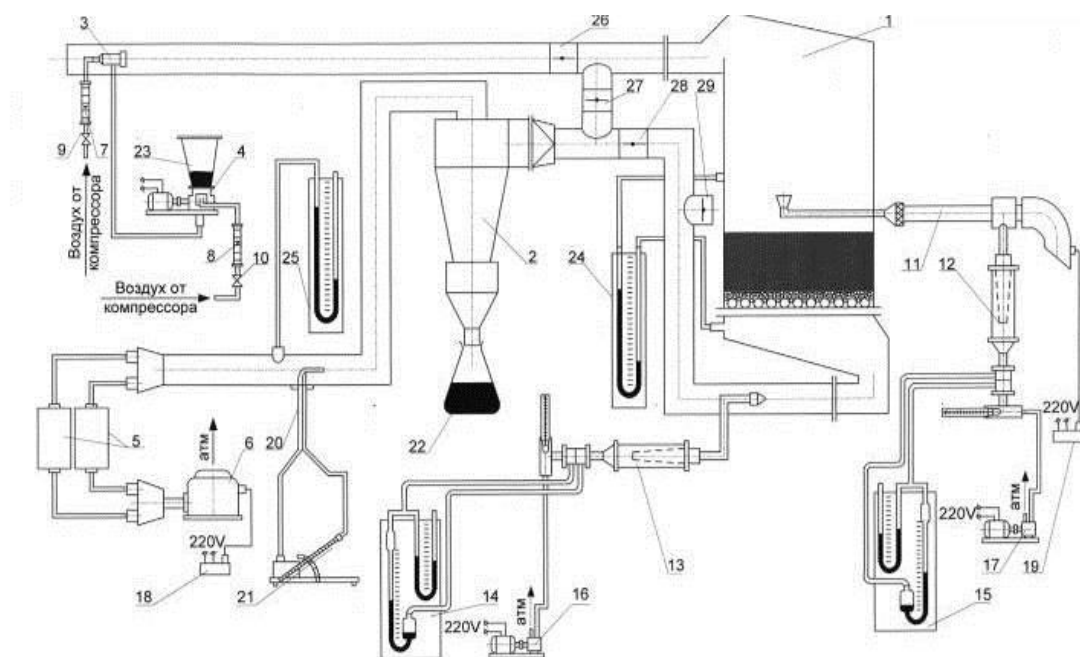


Рис. 2.7 – Экспериментальная установка исследования закономерностей эффективного осаждения аэрозоля в слое углеродных гранул

1 – фильтр с насыпным слоем; 2 – циклон; 3 – эжектор; 4 – дозатор; 5 – тканевый фильтр; 6 – аспирационный агрегат; 7,8 – ротаметр; 9,10 – вентиль; 11 – анализатор дисперсности; 12,13 – фильтрующий патрон; 14,15 – реометр; 16,17 – воздуходувки; 18,19 – автотрансформатор; 20 – пневмометрическая трубка; 21 – микроамперметр; 22 – колба; 23 – воронка; 24,25 – дифференциальный манометр; 26,27,28,29 – дроссельная заслонка.

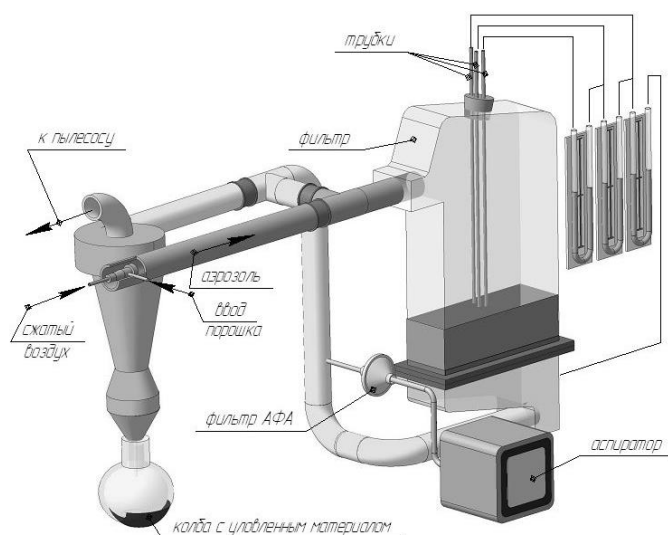


Рис. 2.8 – Общий вид экспериментальной установки исследования закономерностей эффективного осаждения аэрозоля в слое углеродных гранул

Полученный аэрозоль дисперсного углерода направляется во входной патрубок камеры запылённого воздуха фильтра. Далее аэрозольный поток проходит сверху вниз через слой углеродных гранул, обеспыливается и переходит в камеру очищенного воздуха. Очищенный воздух выводится из установки в атмосферу.

Работа в режиме «регенерация». Дроссельные заслонки устанавливаются в положение «регенерация». При включении аспирационного агрегата, чистый воздух подаётся под распределительную решётку фильтра. Слой углеродных гранул псевдоожижается и уловленные агрегаты дисперсного углерода с потоком воздуха уносятся по входному патрубку в циклон. Скорость регенерации устанавливают аналогично скорости фильтрации.

Для приготовления аэрозоля используют образец технического углерода, выдержанный в сушильном шкафу в течение 8 часов при температуре 105-110 °С. Далее он засыпается в дозатор. Накачивается воздух в компрессорную установку до избыточного давления 6 атм. По шлангу подаётся воздух в эжектор и включается дозатор. Расход воздуха в эжекторе измеряется ротаметром.

Проведение измерений:

Значения аэродинамического сопротивления фильтрующего слоя измеряется по U-образному манометру, заполненному водой.

Время осаждения и регенерации измеряется секундомером. Началом запыления считается момент поступления аэрозоля в камеру запылённого газа. Окончанием запыления считается момент прекращения поступления аэрозоля в камеру запылённого газа после отключения дозатора и эжектора.

Определение весовой концентрации частиц дисперсного углерода в аэрозольном потоке проводится методом внешней фильтрации на аэрозольных фильтрах АФА или бумажных. Осадок аэрозольных частиц взвешивается на фильтрах с известной массой. Если привес более 0,1 г, то применяются бумажные фильтры. В случае, когда масса пробы меньше 0,1 г

проводится осаждение на аэрозольные фильтры АФА. Время отбора пробы подбирается опытным путём. Количество осадка на фильтре должно быть таким, чтобы обеспечить точность анализа, а также быстроту и удобство его проведения. Бумажные фильтры впитывают пары воды, что требует введения поправки на влажность к привесу фильтра. Поэтому бумажные фильтры выдерживаются на воздухе в комнате, где проводится взвешивание, вдали от источников тепла и паров воды в течение суток. Кроме бумажных фильтров с осадком взвешиваются чистые контрольные фильтры. Они должны находиться в тех же условиях (температура, влажность), что и рабочие фильтры. По изменению массы контрольных фильтров, рассчитывается поправка к массе запылённых фильтров. Величина поправки не должна быть больше 2-3 % от привеса фильтра.

Отбор аэрозоля проводится с помощью аспираторов. Расход воздуха для отбора проб аэрозоля, предварительно должен быть рассчитан с учётом условия изокINETичности потоков в месте отбора пробы и входном отверстии заборной трубки. Измеряется расход по ротаметрам аспиратора.

Дисперсный состав аэрозоля в потоке на входе в фильтр и в аэрозоле, образующемся при регенерации слоя (рис. 2.9) определяется по описанной ранее методике определения дисперсного состава аэрозольного потока с помощью ротационного анализатора дисперсности.

Скорость и расход газа определяется согласно методике определения скорости аэрозольного потока в газоходе.

Обработка результатов:

1. Определение объёмного расхода потока во входном патрубке фильтра, рассчитываем скорость в сечении фильтра:

$$w = \frac{V}{F}; \quad (2.8)$$

где F – площадь поперечного сечения слоя гранул $0,03 \text{ м}^2$; w – скорость потока в сечении слоя гранул, м/с; V – объёмный расход, $\text{м}^3/\text{ч}$.

2. Определение скорости осаждения потока в пространстве между гранулами слоя:

$$W_{\text{э}} = \frac{w}{\varepsilon}, \quad (2.9)$$

$W_{\text{э}}$ – скорость осаждения потока в пространстве между гранулами слоя, м/с;

ε – доля свободного объёма слоя гранул, м³/м³;

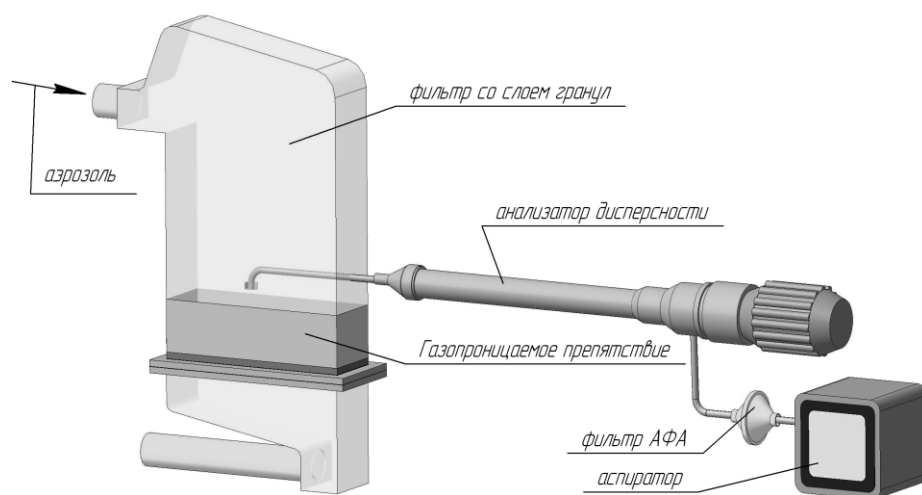


Рис. 2.9 – Схема расположения ротационного анализатора дисперсности при исследовании аэрозоля, образующегося при регенерации слоя

3. Расчёт эффективности осаждения.

В эксперименте определяется концентрация частиц аэрозоля на входе и выходе из слоя гранул.

Эффективность осаждения η рассчитывается по формуле (в %):

$$\eta = \frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}} \times 100\%, \quad (1.15)$$

4. Пылеёмкость слоя гранул:

$$П = \frac{w \cdot \tau_{\phi} \cdot (C_{\text{вх}} - C_{\text{вых}})}{H}, \text{ г/м}^3 \quad (1.14),$$

5. Эффективность регенерации слоя [121]:

$$\eta_{\text{рег}} = \frac{\Delta P_2 - \Delta P_1}{\Delta P_2 - \Delta P_0} \times 100\% \quad (2.10),$$

где ΔP_2 – аэродинамическое сопротивление слоя перед регенерацией, кПа,

ΔP_1 – аэродинамическое сопротивление слоя после регенерации, кПа,

ΔP_0 – аэродинамическое сопротивление чистого незапылённого слоя, кПа.

2.5 Выводы по главе II

На основании представленного в главе II методического материала можно сделать следующие выводы:

1. Метод исследования коагуляции дисперсного углерода в лабораторных условиях позволяет получать экспериментальные данные по изменению параметров аэрозольного потока до и после коагуляции.

2. Представленный метод исследования процесса осаждения аэрозоля дисперсного углерода в слое гранул даёт возможность с достаточной точностью получить экспериментальные данные по проникающей способности аэрозольных агрегатов в объём фильтрующей среды, технологическим параметрам осаждения и эффективности процесса.

ГЛАВА III. ИССЛЕДОВАНИЕ КОАГУЛЯЦИИ ДИСПЕРСНОГО УГЛЕРОДА И ЕГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ АЭРОЗОЛЬНОГО ПОТОКА В СЛОЕ УГЛЕРОДНЫХ ГРАНУЛ

В главе представлены результаты исследования процесса коагуляции различного по физико-химическим свойствам дисперсного углерода и процесса осаждения аэрозоля в слое углеродных гранул в лабораторных условиях.

3.1 Основные объекты исследований

В качестве объекта исследования были выбраны пять образцов технического углерода различных по способу производства, физико-химическим и морфологическим свойствам: П 267–Э, П 514, П 161, К 354 и Т 900.

П 267–Э – электропроводный печной технический углерод со средним размером первичных частиц 18-26 нм (рис. 3.1). Имеет до 90% первичных агрегатов разветвлённой сложной формы, поэтому обладает высокой структурностью. Основное применение при изготовлении химических источников тока.

П 514 – среднеактивный печной технический углерод со средним размером первичных частиц 50 нм. Применяется при изготовлении резиновых смесей для корпуса и камеры шин.

П 161 – высокоактивный технический углерод со средним размером первичных агрегатов 0,2-0,3 мкм и размерами первичных частиц в агрегате 18-22 нм.

К 354 – канальный активный технический углерод характеризуется высоким показателем дисперсности и низким показателем структурности. Применяют для изготовления резинотехнических изделий повышенной прочности. В

лакокрасочной промышленности используют в качестве пигмента для производства краски.

Т 900 – термический технический углерод со средним размером первичных агрегатов до 240 нм (рис. 3.2).

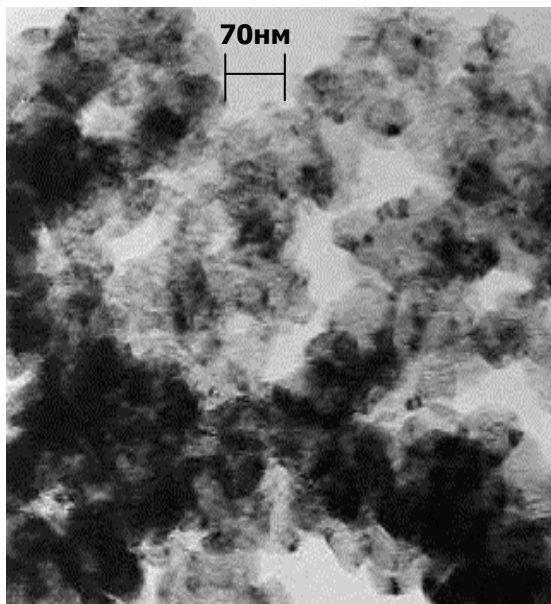


Рис. 3.1 – Микрофотография первичных частиц электропроводного технического углерода П 267–Э

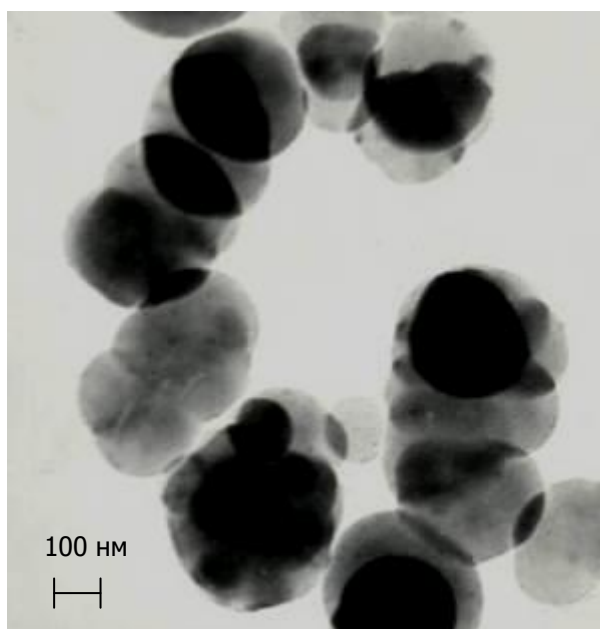


Рис. 3.2 – Микрофотография первичных частиц термического технического углерода Т 900

Первичные частицы имеют правильную шарообразную форму и гладкую поверхность, хотя наблюдается наличие агрегатов сросшихся по 2-3 частицы,

связанные между собой химическими связями. Термический углерод характеризуется низкими показателями структурности и внешней удельной поверхности.

Для получения аэрозоля дисперсного углерода исходный порошок технического углерода предварительно должен быть дезагрегирован. Процесс дезагрегации исходного порошка технического углерода проводится в шаровой мельнице при снижении показателя насыпной плотности до постоянной величины.

Затем порошок сушится в шкафу в течение 8 часов при температуре 105-110⁰С [122]. Просушенный порошок направляется в эксикатор. Окончательная дезагрегация частиц порошка проводится в эжекторе экспериментальной установки при получении аэрозоля дисперсного углерода.

3.2 Исследование процесса коагуляции дисперсного углерода

Основным объектом исследования процессов коагуляции аэрозоля являлся технический углерод, представленный четырьмя образцами, различающимися по своим физико-химическим свойствам.

С целью определения влияния скорости движения аэрозольного потока по прямолинейному участку газохода на константы коагуляции дисперсного углерода, исследования проводили при скоростях 2,0 и 4,0 м/с.

Рассмотрим экспериментальные данные, полученные для аэрозолей дисперсного углерода П 267–Э и Т 900.

Исходные данные для исследования коагуляции дисперсного углерода П267Э представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Исходные данные для исследования коагуляции углерода П 267–Э

№ п/п	Наименование показателя	Скорость движения аэрозольного потока, м/с	
		2,0	4,0
1	Концентрация агрегатов в аэрозольном потоке, г/м ³	2,41	1,82
2	Время коагуляции, с	1,0	0,5
3	Изменение медианного размера частиц аэрозольного потока, мкм	4,0-6,5	6,5-13,0
4	Дисперсия σ	5,7-6,0	6,2-6,7

Строки 3 и 4 таблицы заполняли после анализа логарифмически нормальных распределений дисперсного состава аэрозоля П 267–Э до и после коагуляции (рис. 3.3). Медианный размер аэрозольных частиц δ_{50} находится по точке пересечения функции распределения с линией соответствующей проходу 50% в логарифмически вероятностной координатной сетке. Дисперсия σ - величина, характеризующая расположение кривой логарифмически-нормального распределения на логарифмически вероятностной координатной сетке. Зная медианный размер δ_{50} и величину σ , из соотношения (3.1) можно вычислить $\delta_{84,1}$, $\delta_{15,9}$ и

построить на логарифмически нормальной сетке график функции распределения [116].

$$\sigma = \frac{\delta_{84,1}}{\delta_{50}} = \frac{\delta_{50}}{\delta_{15,9}}; \quad (3.1).$$

По представленным в главе II уравнениям 2.4 – 2.7 рассчитываются константы коагуляции (таблица 3.2).

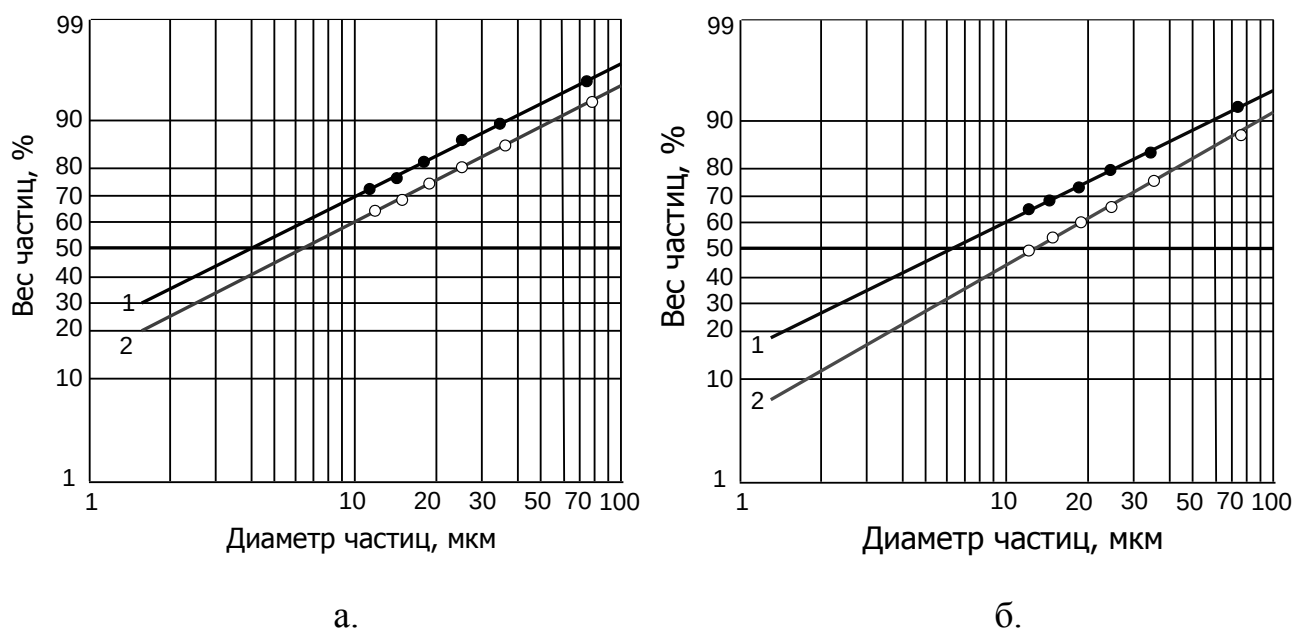


Рис. 3.3 – Логарифмически нормальные распределения дисперсного состава аэрозоля при коагуляции агрегатов частиц углерода П 267–Э, при скорости движения: а). 2 м/с; б). 4 м/с; 1 – до коагуляции; 2 – после коагуляции.

Таблица 3.2

Результаты исследования коагуляции аэрозоля П 267–Э

№ п/п	Наименование показателя $\times 10^{11}$	Скорость движения аэрозольного потока, м/с	
		2,0	4,0
1	Константа коагуляции, рассчитанная по уравнению Смолуховского, м ³ /с	3,7	6,7
2	Константа кинематической коагуляции, м ³ /с	1,8	2,1
3	Константа турбулентной коагуляции, м ³ /с	0,5	2,9

Исходные данные для исследования коагуляции дисперсного углерода Т900 представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Исходные данные для исследования коагуляции дисперсного углерода Т 900

№ п/п	Наименование показателя	Скорость движения аэрозольного потока, м/с	
		2,0	4,0
1	Концентрация агрегатов в аэрозольном потоке, г/м ³	11,2	12,0
2	Время коагуляции, с	1,0	0,5
3	Изменение медианного размера частиц аэрозольного потока, мкм	0,2-0,8	0,2-1,5
4	Дисперсия σ	6,4-7,0	7,3-8,0

Строки 3 и 4 таблицы 3.3 заполняли после анализа логарифмически нормальных распределений дисперсного состава аэрозоля Т 900 до и после коагуляции. По уравнениям 2.4 – 2.7 рассчитывали константы коагуляции (таблица 3.4).

Таблица 3.4

Результаты исследования коагуляции аэрозоля Т 900

№ п/п	Наименование показателя $\times 10^{11}$	Скорость движения аэрозольного потока, м/с	
		2,0	4,0
1	Константа коагуляции, рассчитанная по уравнению Смолуховского, м ³ /с	0,7	1,2
2	Константа кинематической коагуляции, м ³ /с	1,0	1,1
3	Константа турбулентной коагуляции, м ³ /с	0,5	1,9

Для технического углерода П 161 и П 514 получены аналогичные результаты.

Из литературного источника [123] известно, что в результате комплексного исследования методом просвечивающей электронной микроскопией технического углерода с различными физико-химическими свойствами было установлено, что все первичные агрегаты в зависимости от их формы можно классифицировать на четыре группы: сфероидальные, эллипсоидальные, линейные и разветвленные (рис. 3.4). Так же было

представлено процентное содержание различных типов форм первичных агрегатов в образцах технического углерода таблицы 3.5.

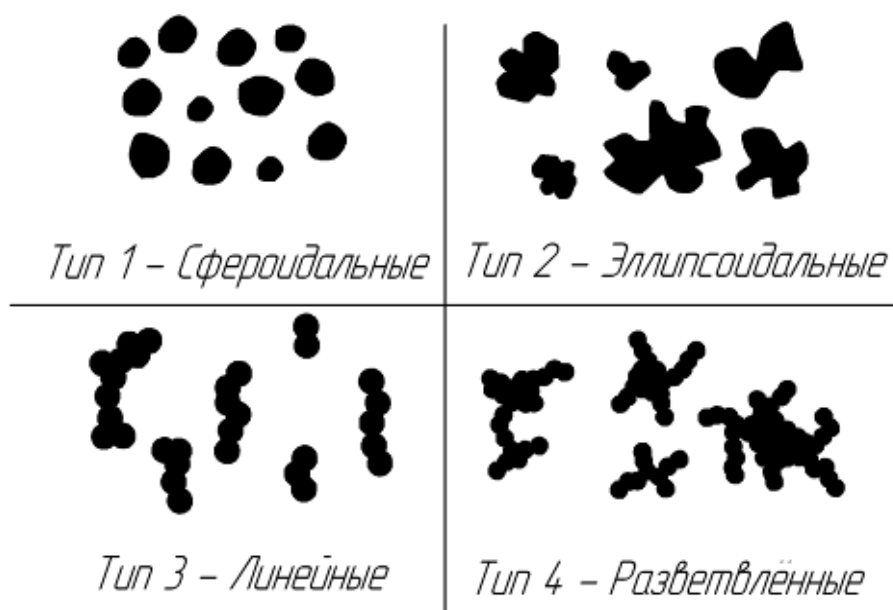


Рис. 3.4 – Различные типы форм первичных агрегатов технического углерода

Таблица 3.5

Сравнительные характеристики образцов технического углерода [123]

Технический углерод	Абсорбция дибутилфталата, см ³ /100г	Содержание агрегатов, %	
		сфероидальные + эллипсоидальные	линейные + разветвлённые
П 267–Э	170	4,9	95,1
П 514	101	14,4	85,6
П161	60	24,9	75,1
Т 900	30	79,7	20,3

Изменение медианных размеров агрегатов технического углерода, при коагуляции аэрозольного потока, а также константы коагуляции, определённые при скорости 4,0 м/с, представлены в (таблице 3.6).

Технический углерод П 267–Э на 95% состоит из агрегатов разветвленной и линейной формы, при этом значения константы коагуляции для данного образца являются максимальными (таблица 3.5). Для технического углерода Т 900 практически полностью состоящего из первичных агрегатов шарообразной формы значения констант коагуляции минимальны.

Таблица 3.6

Результаты исследования процесса коагуляции дисперсного углерода в лабораторных условиях

Наименование	Технический углерод			
	П 267–Э	П 514	П 161	Т 900
Изменение медианного размера агрегатов аэрозольного потока, мкм	6,5 – 13,0	6,5 – 10,0	5,0 – 9,2	0,2 – 1,5
Константа $\times 10^{11}$, м ³ /с				
По уравнению Смолуховского	6,7	5,6	4,9	1,2
Кинематическая коагуляция	2,2	1,8	1,3	1,1
Турбулентная коагуляция	2,9	1,0	1,5	1,9

Исследованиями процесса коагуляции аэрозоля технического углерода в лабораторных условиях была установлена линейная зависимость между константой коагуляции и показателем суммарного содержания линейных и разветвлённых форм первичных агрегатов в техническом углероде и зависимость роста константы коагуляции с увеличением показателя абсорбции дибутилфталата технического углерода. (Рис. 3.5).

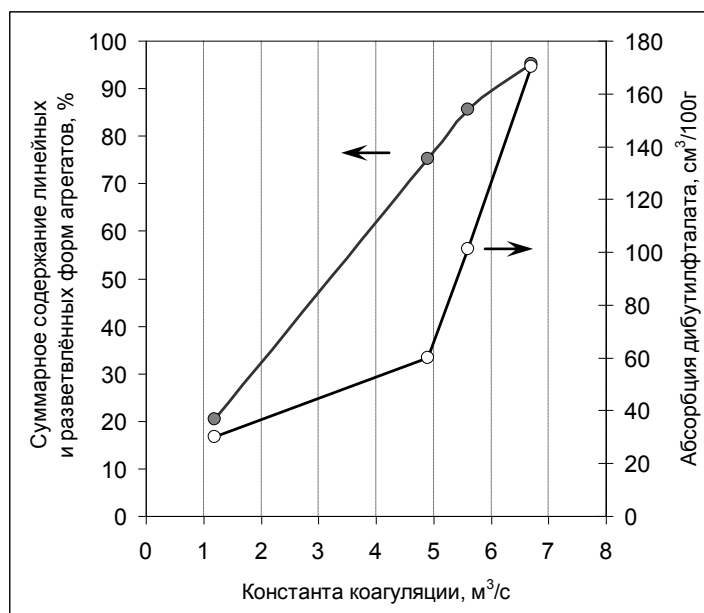


Рис. 3.5 – Зависимость константы процесса коагуляции от физико-химических свойств технического углерода

3.3 Исследование особенностей процесса осаждения аэрозоля дисперсного углерода в слое углеродных гранул

3.3.1 Получение аэрозоля в лабораторных условиях

Аэрозольный поток получали путём распыления предварительно дезагригированного и просушенного порошка технического углерода потоком воздуха. В зависимости от скорости воздуха в сопле эжектора установки, медианный размер частиц аэрозоля варьировали от 2,3 мкм до 40 мкм. Логарифмически нормальные распределения аэрозольного потока дисперсного углерода П 267–Э, полученные на лабораторной установке фильтра со слоем гранул представлены на (рис. 3.6).

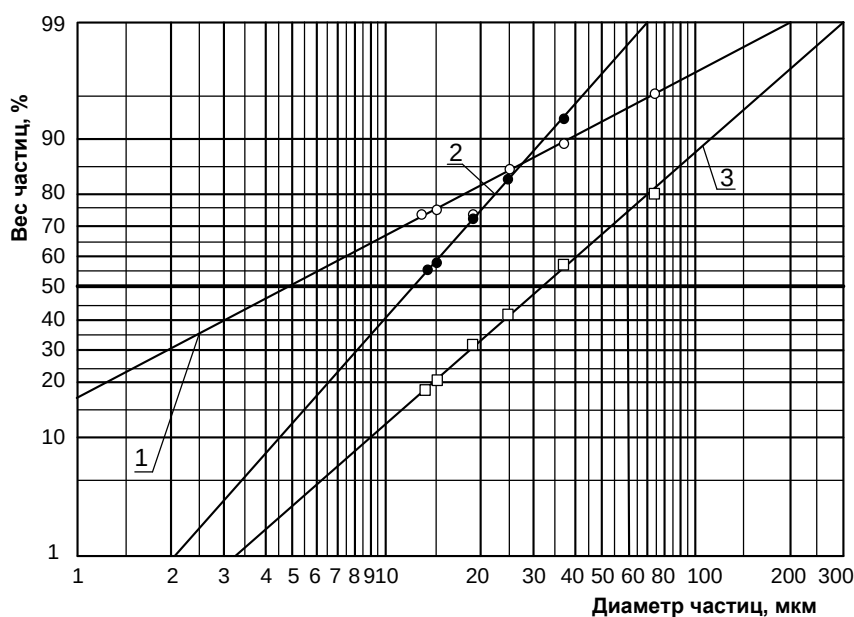


Рис. 3.6 – Зависимость дисперсного состава аэрозоля от скорости потока воздуха в сопле эжектора при скорости осаждения 0,4 м/с
1 – 200 м/с; 2 – 150 м/с; 3 – 100 м/с.

При скорости воздуха в сопле эжектора 200 м/с (рис. 3.6) аэрозольный поток имеет минимальный медианный размер агрегатов частиц и наибольшую дисперсность, при этом по своему составу он близок к промышленным аэрозолям технического углерода. Характеристики

аэрозолей, на основе пяти образцов технического углерода, при скорости воздуха в сопле эжектора 200 м/с представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7

Характеристики аэрозолей технического углерода, получаемых на лабораторной установке

№ п/п	Наименование показателя	Технический углерод				
		П 267–Э	П 514	П 161	К 354	Т 900
1	Медианный размер аэрозольных агрегатов, мкм	5,0	9,0	8,0	6,6	2,3
2	Дисперсия σ	7,7	6,7	7,0	8,2	7,5

3.3.2 Определение оптимальных характеристик фильтрующего слоя углеродных гранул

В качестве объектов исследования процесса осаждения дисперсного углерода из аэрозольного потока в слое углеродных гранул были приняты пять образцов технического углерода (таблица 3.8) и три образца фильтрующего углеродного материала.

Таблица 3.8

Физико-химические свойства технического углерода

№ п/п	Технический углерод	Абсорбция дибутил-фталата, см ³ /100г	Насыпная плотность порошка, кг/м ³	Медианный диаметр агрегатов в аэрозоле, мкм	Кажущаяся плотность, г/см ³ [124-125]
1	П 267–Э	170	30	5,0	1,36
2	П 514	101	61	9,0	1,80
3	П 161	60	220	8,0	1,57
4	К 354	100	250	6,6	—
5	Т 900	30	335	2,3	1,61

В качестве фильтрующего слоя использовали три образца углеродного материала, которые различались по показателям гранулометрического состава и насыпной плотности. Углеродный материал представляет собой гранулы технического углерода П 514.

Образец №1 – углеродный материал с насыпной плотностью 340 кг/м^3 и гранулометрическим составом 0,7-1,5 мм:

- гранул более 1,0 мм – 32 %,
- гранул более 0,7 мм – 58 %,
- гранул более 0,5 мм – 10 %.

Образец №2 – углеродный материал с насыпной плотностью 290 кг/м^3 и гранулометрическим составом 0,7-1,5 мм:

- гранул более 1,0 мм – 71 %,
- гранул более 0,7 мм – 24 %,
- гранул более 0,5 мм – 5 %.

Образец №3 – углеродный материал с насыпной плотностью 400 кг/м^3 и гранулометрическим составом 0,7-1,0 мм.

В лабораторной установке фильтра со слоем гранул фильтрующий слой располагается на распределительной системе, состоящей из аэродинамической решетки и слоя гранул подложки. Аэродинамическая решетка состоит из трубок диаметром 32 мм с размером щели между трубками 0,8 мм. Зависимость аэродинамического сопротивления, создаваемого решеткой, от скорости проходящего потока представлена на (рис. 3.7). В качестве подложки во всех экспериментах использовали углеродный материал с насыпной плотностью 800 кг/м^3 и гранулометрическим составом 3,5-5,0 мм, зависимость сопротивления создаваемого слоем подложки, расположенной на решетке от скорости проходящего потока представлена на (рис. 3.8).

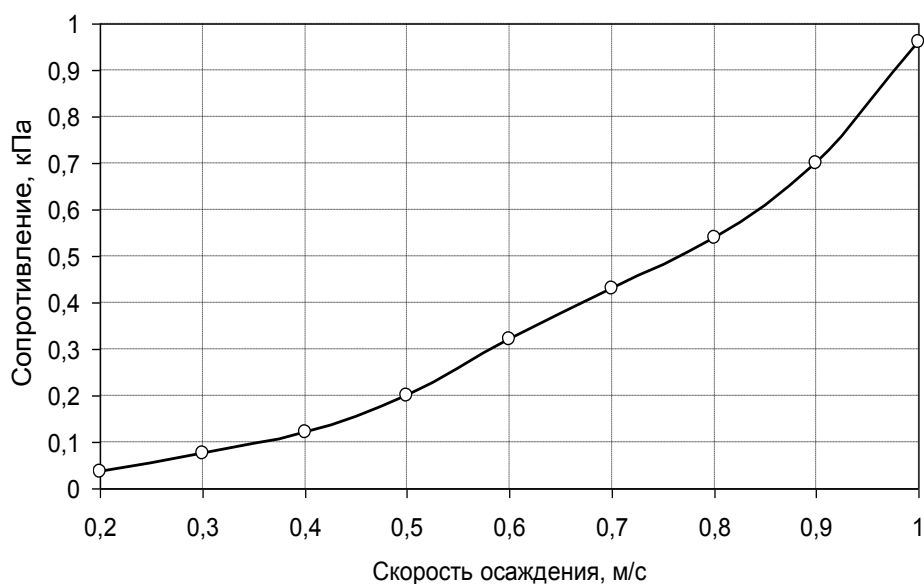


Рис. 3.7 – Зависимость аэродинамического сопротивления распределительной решётки от скорости потока

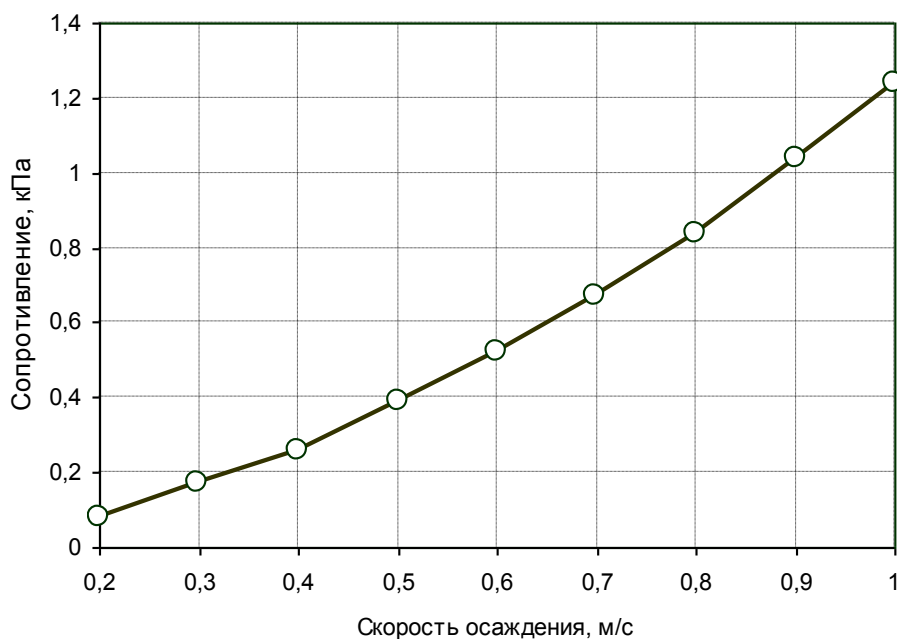


Рис. 3.8 – Зависимость сопротивления распределительной решётки и слоя подложки от скорости осаждения

Первый этап исследования заключался в выборе оптимального фильтрующего слоя, который обеспечивал высокую эффективность процесса осаждения дисперсного углерода, при наименьшем показателе аэродинамического сопротивления слоя. Для этого был проведён ряд экспериментов по осаждению аэрозоля дисперсного углерода П 267–Э в слое

углеродных гранул (образец №1) различной высоты. Высота слоя гранул варьировалась от 0,20 до 0,35 м с интервалом 0,05 м. По результатам замеров аэродинамических сопротивлений, построены зависимости сопротивления фильтрующего слоя от его высоты при скоростях 0,2 и 0,4 м/с и времени осаждения 180 секунд (рис. 3.9).

В таблице 3.9 приведены условия экспериментов и результаты измерений сопротивлений фильтрующего слоя и эффективностей осаждения. Из таблицы видно, что наибольшая эффективность осаждения обеспечивается слоем с высотой от 0,20 м с наименьшим аэродинамическим сопротивлением слоя.

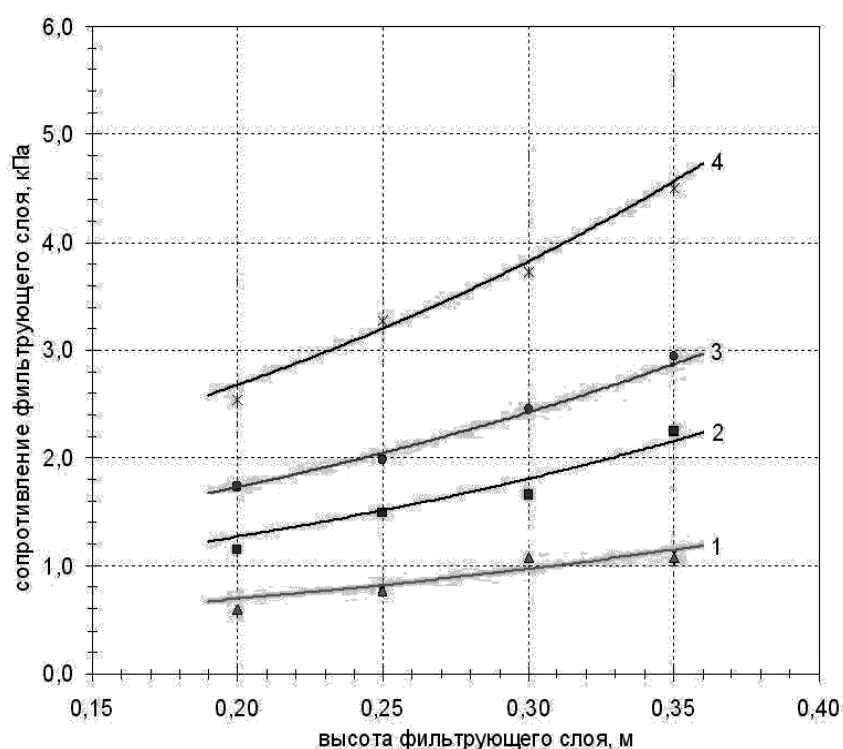


Рис. 3.9 – Зависимость аэродинамического сопротивления слоя (образец №1) от его высоты, при скоростях 0,2 и 0,4 м/с и времени осаждения 180 с.

1 – для чистого слоя при скорости осаждения 0,2 м/с; 2 – для запылённого слоя при скорости осаждения 0,2 м/с; 3 – для чистого слоя при скорости осаждения 0,4 м/с; 4 – для запылённого слоя при скорости осаждения 0,4 м/с.

Таблица 3.9

Результаты исследования процесса осаждения аэрозоля П 267–Э в слое
гранул различной высоты

№ п/п	Скорость осаждения, м/с	Высота слоя гранул, м	Изменение сопротив- ления, кПа	Концен- трация на входе, г/м ³	Концен- трация на выходе, г/м ³	Эффек- тивность осаждения, %
1	0,2	0,20	0,58 – 1,31	6,73	0,021	99,7
2	0,4		0,69 – 1,36	5,60	0,021	99,6
3	0,2	0,25	0,76 – 1,50	4,43	0,025	99,4
4	0,4		0,76 – 2,40	3,67	0,010	99,5
5	0,2	0,30	2,55 – 5,20	4,60	0,021	99,5
6	0,4		2,51 – 4,90	8,50	0,038	99,4
7	0,2	0,35	2,75 – 5,50	5,57	0,048	99,1
8	0,4		2,80 – 5,20	6,34	0,037	99,4

Анализом экспериментальных данных по исследованию осаждения аэрозоля дисперсного углерода в различных образцах фильтрующего слоя было установлено, что наибольшую эффективность осаждения аэрозоля обеспечивает (образец №3) слой из углеродного материала со следующими характеристиками: насыпной плотностью 400 кг/м³, гранулометрическим составом 0,7-1,0 мм и высотой 200 мм (таблица 3.10). Данный углеродный материал использовался в экспериментах по осаждению аэрозольного потока в течение 100 циклов осаждения и регенерации, при этом не было зафиксировано изменение его гранулометрического состава. Это свидетельствует о том, что гранулы не разрушаются в процессе регенерации слоя и выполняют своё функциональное назначение.

Результаты исследования процесса осаждения аэрозоля П 267–Э для
различных образцов слоя гранул

№ п/п	Наимено- вание слоя углеродных гранул	Скорость осаждения, м/с	Изменение аэродина- мического сопротив- ления, кПа	Концен- трация на входе в фильтр, г/м ³	Концен- трация на выходе из фильтр, г/м ³	Эффек- тивность осаждения, %
1	Образец №1	0,2	0,7 – 1,4	4,72	0,025	99,5
2		0,4	1,7 – 2,3	5,76	0,025	99,6
3	Образец №2	0,2	0,8 – 1,3	4,38	0,026	99,4
4		0,4	1,6 – 2,1	5,14	0,017	99,6
5	Образец №3	0,2	0,6 – 1,3	6,00	0,020	99,7
6		0,4	1,5 – 2,0	8,50	0,017	99,8

3.3.3 Экспериментальные исследования пылеемкости слоя углеродных гранул

Под пылеемкостью фильтра, понимают массу частиц аэрозоля дисперсного углерода, отложившуюся в слое гранул до момента интенсивного снижения эффективности процесса осаждения.

При определении значения пылеемкости, для каждого образца технического углерода, строилась диаграмма зависимости концентрации частиц на выходе из слоя, от времени осаждения аэрозольного потока.

Для этого, при проведении эксперимента по осаждению аэрозоля, каждую минуту процесса фиксировалась концентрация частиц дисперсного углерода на выходе из слоя, а время эксперимента увеличивалось до максимально возможного. При анализе полученных диаграмм, находили временной период эффективного осаждения аэрозоля и по расчетной формуле (1.14) вычисляли значение пылеемкости:

$$П = \frac{w (C_{\text{ex}} - C_{\text{вых}}) \tau_{\phi}}{H}, \text{ г/м}^3$$

Для технического углерода П 267–Э при осаждении в слое углеродных гранул (рис.3.10) с постоянной концентрацией перед слоем $2,25 \text{ г/м}^3$ и скоростью $0,4 \text{ м/с}$, значение пылеемкости слоя углеродного материала составило 1900 г/м^3 .

Аналогичные диаграммы были получены для всех образцов технического углерода (таблица 3.11). Динамику процесса осаждения аэрозоля в фильтрующем слое можно описать следующим образом: снижение концентрации в начале эксперимента связано с формированием на лобовой поверхности гранул слоя (автофилтра) из осаждённых частиц аэрозоля, который в свою очередь является высокоэффективной фильтрующей средой. После его образования, концентрация на выходе становится постоянной и наступает период эффективного осаждения. По истечению периода эффективного осаждения, аэрозольные частицы интенсивно проникают через слой гранул.

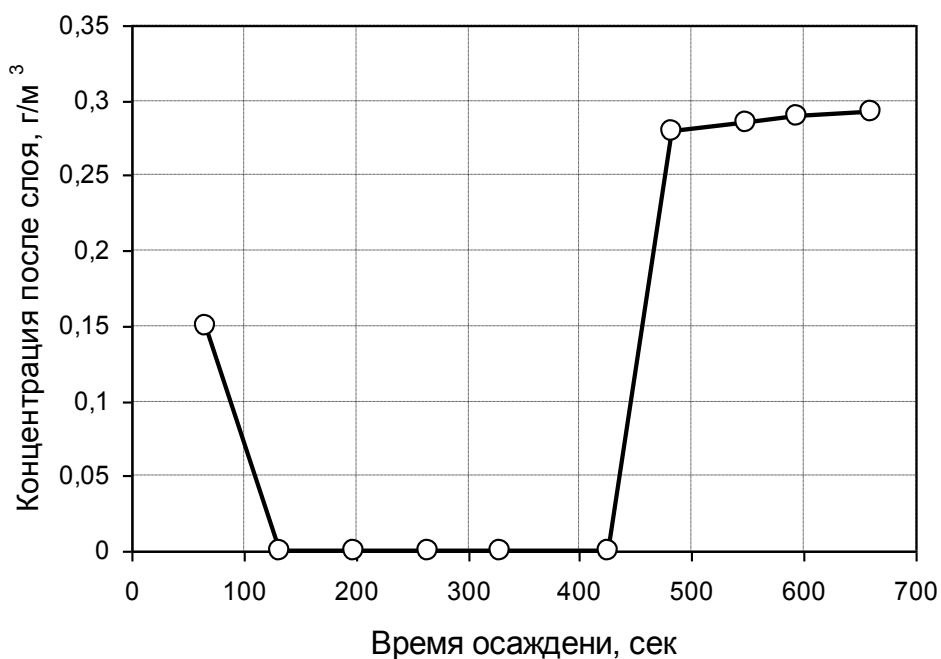


Рис. 3.10 – Диаграмма динамики изменения концентрации частиц дисперсного углерода П 267–Э на выходе из слоя

Таблица 3.11

Экспериментальные данные для расчёта значения пылеемкости
фильтрующего слоя

№ п/п	Наименование показателя	Технический углерод				
		П 267–Э	П 514	П 161	К 354	Т 900
1	Скорость осаждения	0,4				
2	Концентрация на входе в слой, г/м ³	2,25	3,5	12,6	8,1	11,3
3	Время эффективного осаждения, сек	490	480	470	420	450
4	Пылеемкость, г/м ³	1900	3360	9800	6833	9500

3.3.4 Определение проникающей способности частиц дисперсного углерода в слой гранул

В предварительных экспериментах по осаждению аэрозолей технического углерода различных марок было отмечено, что агрегаты аэрозольного потока проникают в фильтрующую среду с различной скоростью и на разную высоту. С целью исследования данного явления лабораторная установка фильтра со слоем гранул оснащена системой определения перепада давления по высоте фильтрующего слоя гранул. Система состоит из датчиков замера давления, расположенных по высоте слоя гранул и соединённых с U-образными манометрами. Увеличение перепада давления на манометре свидетельствует о проникновении осаждаемых аэрозольных агрегатов на соответствующую высоту слоя гранул. Расположение датчиков замера аэродинамического сопротивления представлено на (рис. 3.11).

Глубину расположения датчиков замера давления изменяли в зависимости от условий осаждения аэрозоля. При определении глубины и интенсивности проникновения аэрозольных агрегатов в слой углеродных гранул для каждого образца технического углерода строилась диаграмма изменения аэродинамического сопротивления по высоте фильтрующего слоя от времени осаждения аэрозольного потока. Для этого при проведении эксперимента по осаждению аэрозоля фиксировались показания манометров.

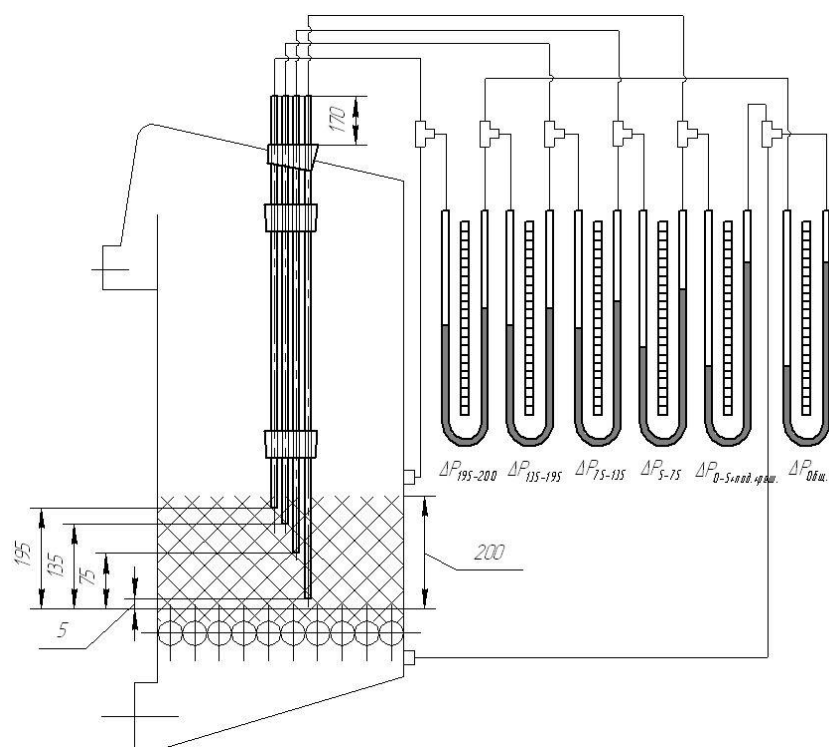


Рис. 3.11 – Схема расположения датчиков замера аэродинамического сопротивления

Примеры экспериментальных диаграмм изменения аэродинамического сопротивления во времени осаждения для технического углерода К 354 и Т900 представлены на (рис. 3.12). Для технического углерода Т 900, в отличие от К 354, характерно осаждение аэрозольных агрегатов в первых по ходу потока слоях углеродных гранул. Глубина проникновения агрегатов в слой гранул составляет 5-10 мм, а интенсивность проникновения невозможно зафиксировать. Аналогичные диаграммы были получены для всех образцов технического углерода см. таблицу 3.12.

Таблица 3.12.

Проникающая способность аэрозольных частиц в слой углеродных гранул

№ п/п	Наименование показателя	Технический углерод				
		П 267–Э	П 514	П 161	К 354	Т 900
1	Скорость осаждения	0,4				
2	Интенсивность проникновения агрегатов аэрозоля в слой гранул $\times 10^4$, м/с	2,2	-	1,1	1,3	-
3	Глубина проникновения аэрозольных агрегатов в слой гранул, мм	170	5-10	100	100	5-10

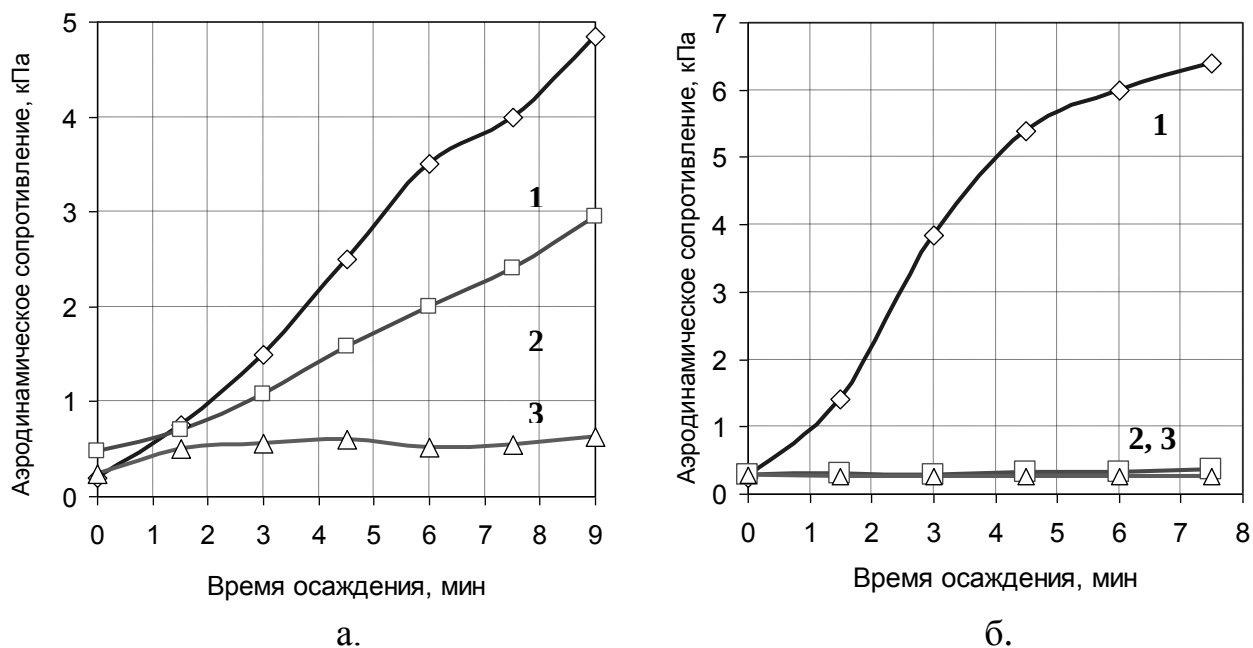


Рис. 3.12 – Динамика изменения аэродинамического сопротивления по высоте слоя углеродных гранул (1 – 5 мм; 2 – 70 мм; 3 – 100 мм) при осаждении аэрозоля технического углерода: а – К 354; б – Т 900.

При исследовании проникающей способности аэрозольных агрегатов в слой углеродных гранул было установлено, что для технического углерода П 514 и Т 900 характерно осаждение с образованием осадка на поверхности фильтрующего слоя. При этом протекают процессы соосаждения и закупоривания поровых каналов, что предотвращает проникновение частиц вглубь слоя гранул. При осаждении технического углерода П 514 (рис. 3.13.а), наибольший прирост аэродинамического сопротивления наблюдается в верхнем 5 мм слое гранул. В начальный момент фазы осаждения он составляет 20% от общего прироста аэродинамического сопротивления, а в конце эксперимента, перед регенерацией слоя – около 90%. Это свидетельствует о том, что основная часть дисперсных частиц практически не проникает в объём фильтрующей среды. На графике изменения концентрации аэрозольных частиц на выходе из слоя (рис. 3.13.б) основной проскок наблюдается в первые минуты процесса осаждения, когда на лобовой поверхности фильтрующего материала ещё не успел сформироваться слой осаждённой пыли. После его образования

концентрация на выходе уменьшилась и оставалась постоянной в течение всего эксперимента.

Для технического углерода П 267–Э характерно осаждение с постепенным закупориванием поровых каналов и процесс осаждения протекает непосредственно в объёме слоя гранул. Агрегаты углеродных частиц проникают в глубину слоя, постепенно осаждаются на стенках поровых каналов. На графиках изменения аэродинамического сопротивления (рис. 3.14.а) зафиксировано проникновение дисперсных частиц в слой углеродных гранул на глубину 170 мм по ходу аэрозольного потока, а на 7 минуте процесса осаждения аэрозоля наблюдается резкий скачок значения выходной концентрации углеродных частиц (рис. 3.14.б), свидетельствующий об их проникновении через слой гранул.

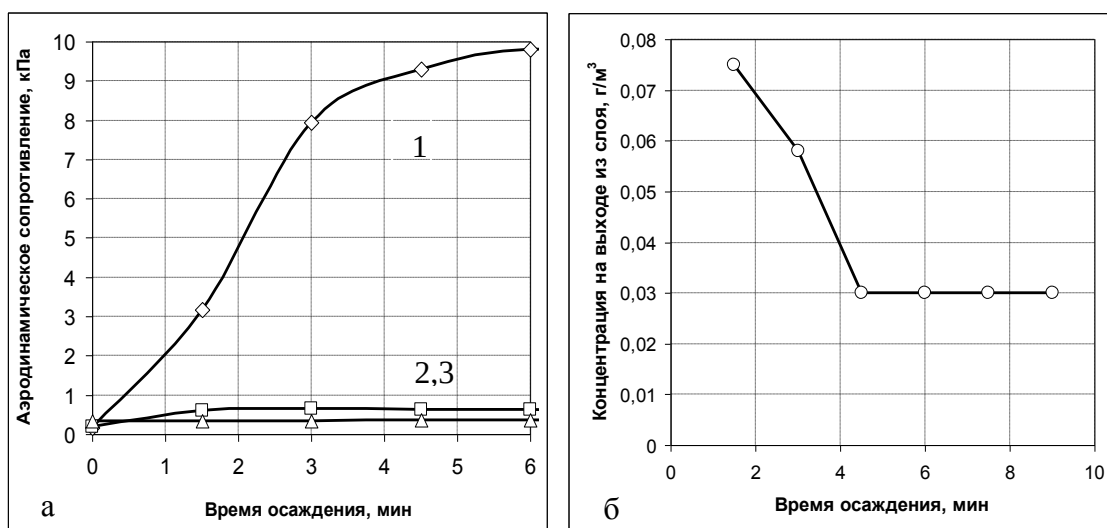


Рис. 3.13 – а) Зависимость аэродинамического сопротивления по высоте слоя от времени осаждения аэрозоля технического углерода П 514 (1 – 5 мм, 2 – 70 мм, 3 – 100 мм)

б) Зависимость концентрации аэрозольных частиц на выходе из слоя от времени осаждения аэрозоля технического углерода П 514

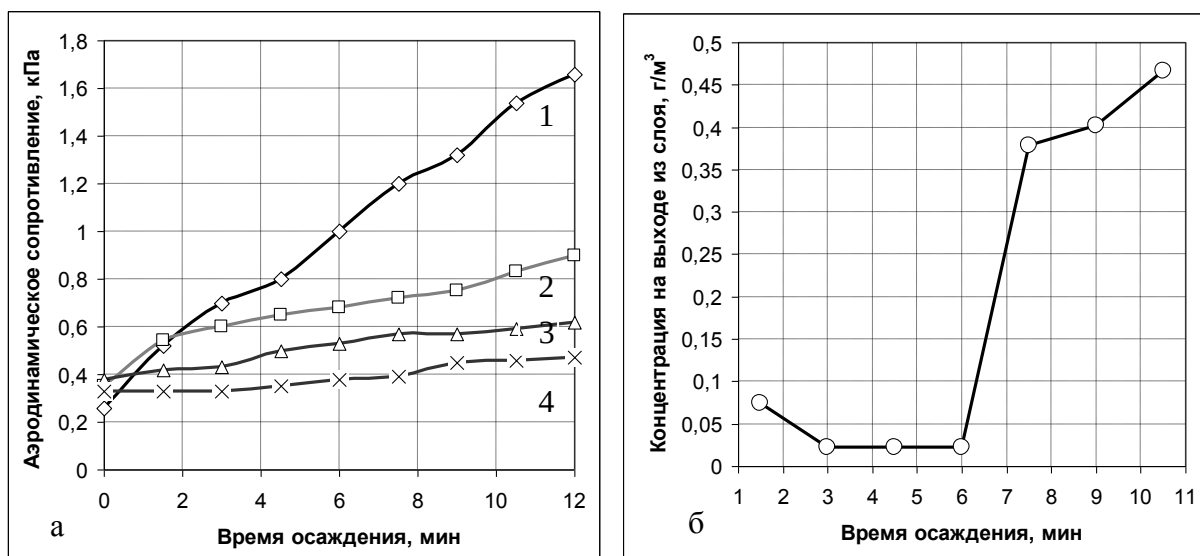


Рис. 3.14 – а) Зависимость аэродинамического сопротивления по высоте слоя от времени осаждения аэрозоля технического углерода П 267–Э (1 – 5 мм, 2 – 70 мм, 3 – 130 мм, 4 – 170 мм)
б) Зависимость концентрации аэрозольных частиц на выходе из слоя от времени осаждения аэрозоля технического углерода П 267–Э

Для технического углерода П 161 и К 354 характерен смешанный процесс осаждения. Наблюдается прирост аэродинамического сопротивления, как в верхнем слое фильтрующей среды, так и до 100 мм в глубину по ходу аэрозольного потока (рис. 3.15.а).

Отмечается резкое увеличение концентрации дисперсных частиц технического углерода после фильтра на 7 минуте процесса осаждения, свидетельствующее об их прохождении через слой углеродных гранул.

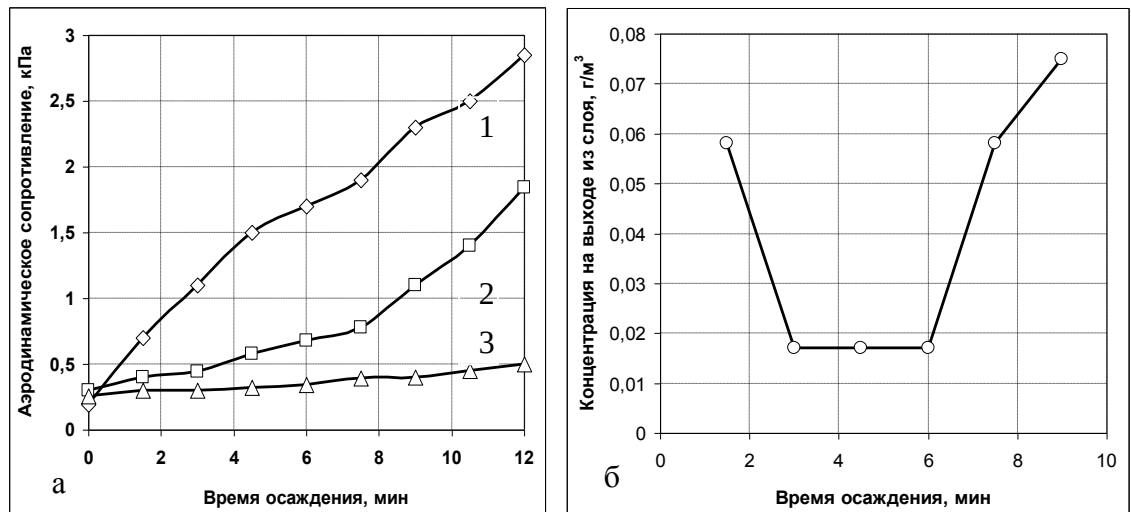


Рис. 3.15 – а) Зависимость аэродинамического сопротивления по высоте слоя от времени осаждения аэрозоля технического углерода П 161 (1 – 5 мм, 2 – 70 мм, 3 – 100 мм,)

б) Зависимость концентрации аэрозольных частиц на выходе из слоя от времени осаждения аэрозоля технического углерода П 161

Из литературных источников [43] известен метод определения вида исследуемого процесса осаждения аэрозоля. Метод основан на построении по полученным экспериментальным данным графической зависимости с двумя переменными. Если графическое изображение функции в заданных координатах см. (таблицу 1.1, стр.30) представляет собой прямую линию, то с уверенностью можно отнести исследуемый процесс к соответствующему виду фильтрования.

Для процесса осаждения с постепенным закупориванием пор протекающем при постоянной скорости и увеличении аэродинамического сопротивления

слоя характерно, что графическое изображение функции $C\tau_\phi = \left(\frac{1}{\Delta P_{нач}}\right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{1}{\Delta P}\right)^{\frac{1}{2}}$

построенной в осях $\tau_\phi - \left[\left(\frac{1}{\Delta P_{нач}}\right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{1}{\Delta P}\right)^{\frac{1}{2}}\right]$, проходящее через начало координат, представляет собой прямую линию.

На рисунке 3.16 изображены экспериментальные зависимости в координатах $\tau_\phi - \left[\left(\frac{1}{\Delta P_{нач}}\right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{1}{\Delta P}\right)^{\frac{1}{2}}\right]$ для каждого из объектов исследования, как

видно по коэффициенту корреляции (R^2) к прямой линии наиболее стремится зависимость, построенная для технического углерода П 267–Э.

На основании зависимостей изменения аэродинамического сопротивления по высоте слоя гранул при осаждении аэрозоля, а также графических зависимостей (рис. 3.16) можно сделать вывод о принадлежности процессов осаждения технического углерода:

- П 267–Э к модели с постепенным закупориванием пор;
- П 514 и Т 900 к модели с образованием осадка на поверхности слоя;
- П 161 и К 354 к промежуточной модели процесса осаждения.

Различия в процессах осаждения аэрозоля дисперсного углерода в слое углеродных гранул можно объяснить физическими характеристиками аэрозольных агрегатов. Дисперсный углерод П 514 имеет крупные аэрозольные агрегаты с высокими значениями кажущейся плотности $1,80 \text{ г/см}^3$ соответственно. Для данного образца характерно полное закупоривание поровых каналов слоя гранул в первые секунды процесса осаждения, что и предотвращает проникновение аэрозольных агрегатов в объём фильтрующей среды. Аэрозольные агрегаты дисперсного углерода П 161 и П 267–Э характеризуются мелкими размерами и низкими значениями кажущейся плотности $1,36$ и $1,57 \text{ г/см}^3$ соответственно. При осаждении данных образцов происходит неполное, а частичное закупоривание поровых каналов и соответственно активное проникновение аэрозольных агрегатов в объём фильтрующей среды.

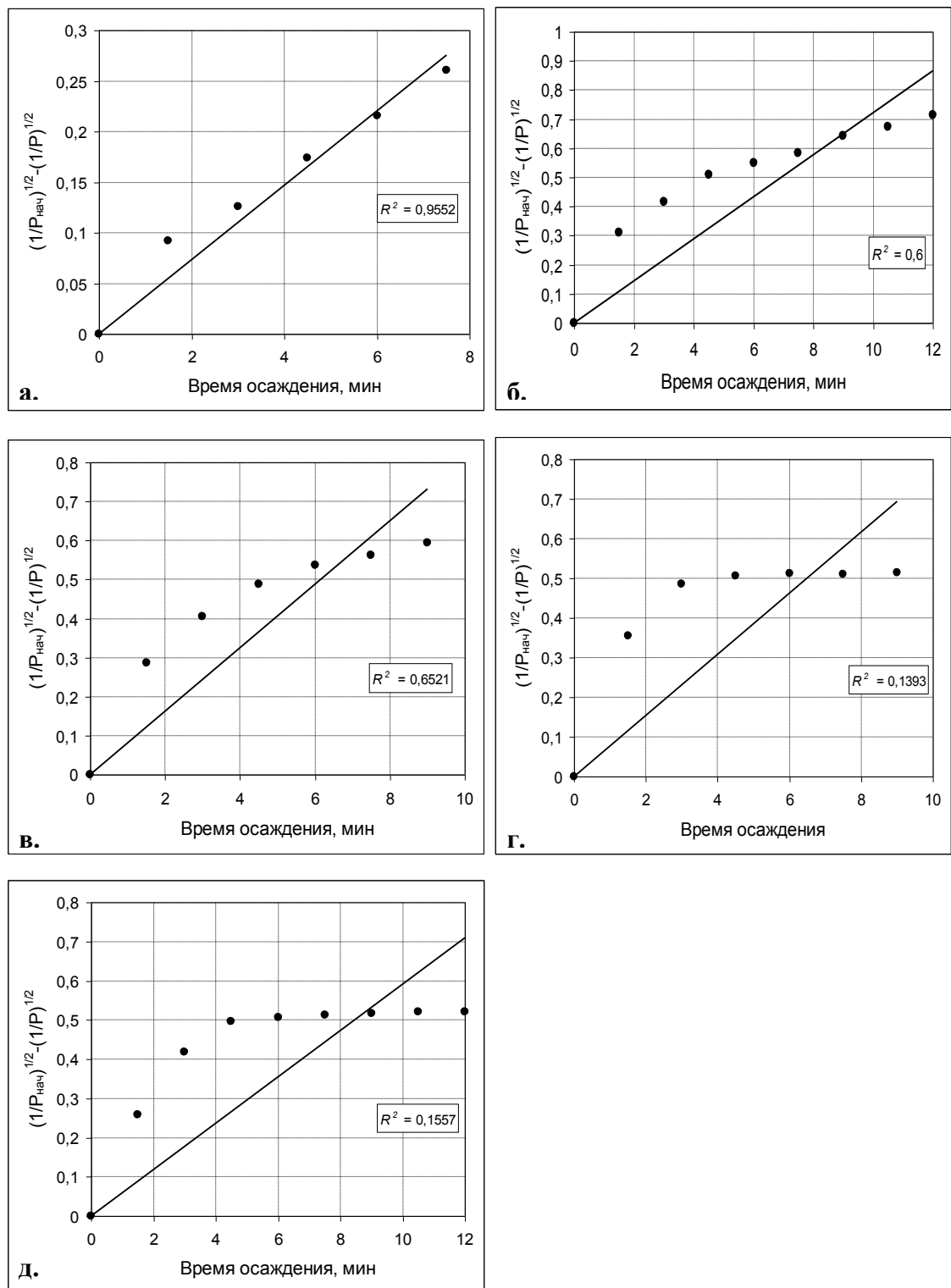


Рис. 3.16 – Экспериментальная зависимость величины $\left[\left(\frac{1}{\Delta P_{нач}} \right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{1}{\Delta P} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$ от времени осаждения (τ) для технического углерода:

а – П 267-Э; б – П 161; в – К 354; г – П 514; д – Т 900

На рисунке 3.17 представлены расчетные кривые изменения скорости движения условного фронта дисперсных частиц (v) по высоте слоя гранул

для технического углерода П 267–Э и П 161, построенные по уравнению (3.2):

$$v = \frac{(1-\eta) \times H \times \varepsilon}{100\eta} \times \frac{1}{\tau_{\phi}} \quad (3.2)$$

где, $\varepsilon = \frac{\rho_{ист.} - \rho_{н.ос.}}{\rho_{ист.}}$ – порозность слоя осаждённых дисперсных частиц;

$\rho_{ист.}$ – истинная плотность материала частиц, кг/м³; $\rho_{н.ос.}$ – насыпная плотность слоя осаждённых дисперсных частиц, кг/м³ [7-8].

Точками нанесены экспериментальные значения, полученные при исследованиях проникающей способности дисперсных частиц аэрозоля. В случае технического углерода П 161 и П 267–Э наблюдается согласованность экспериментальных и расчетных данных.

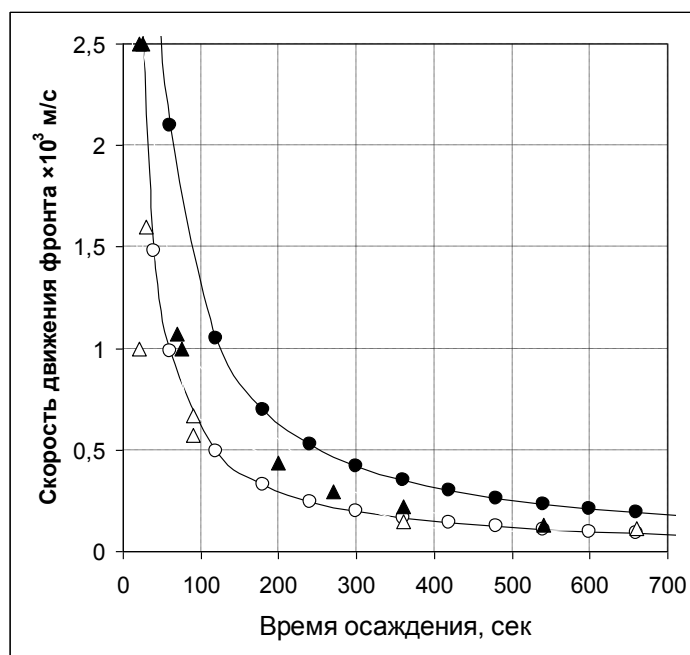


Рис. 3.17 – Зависимость скорости движения фронта частиц дисперсного углерода по высоте слоя гранул от времени осаждения:

-экспериментальные значения: ▲ – для П 267–Э, △ – для П 161;

-расчётные значения: ● – для П 267–Э, ○ – для П 161

Для визуального рассмотрения проникновения аэрозольных частиц в объём фильтрующей среды, использовали аэрозоль, на основе материала серого цвета. Наиболее подходящим для этой цели материалом является вельцокись, дисперсные частицы которой выделяются из плавильных печей в

производстве цинка. Характеристика аэрозоля, получаемого на основе дисперсных частиц вельцокиси, и результаты процесса осаждения в слое гранул, представлены в (таблице 3.13).

Таблица 3.13

Характеристика аэрозоля вельцокиси

№ п/п	Насыпная плотность, кг/м ³	Медианный размер частиц, мкм	Пылеемкость, г/м ³	Концентрация на выходе из слоя, мг/м ³	Эффектив- ность, %
1	960	2,7	25	0,024	99,7

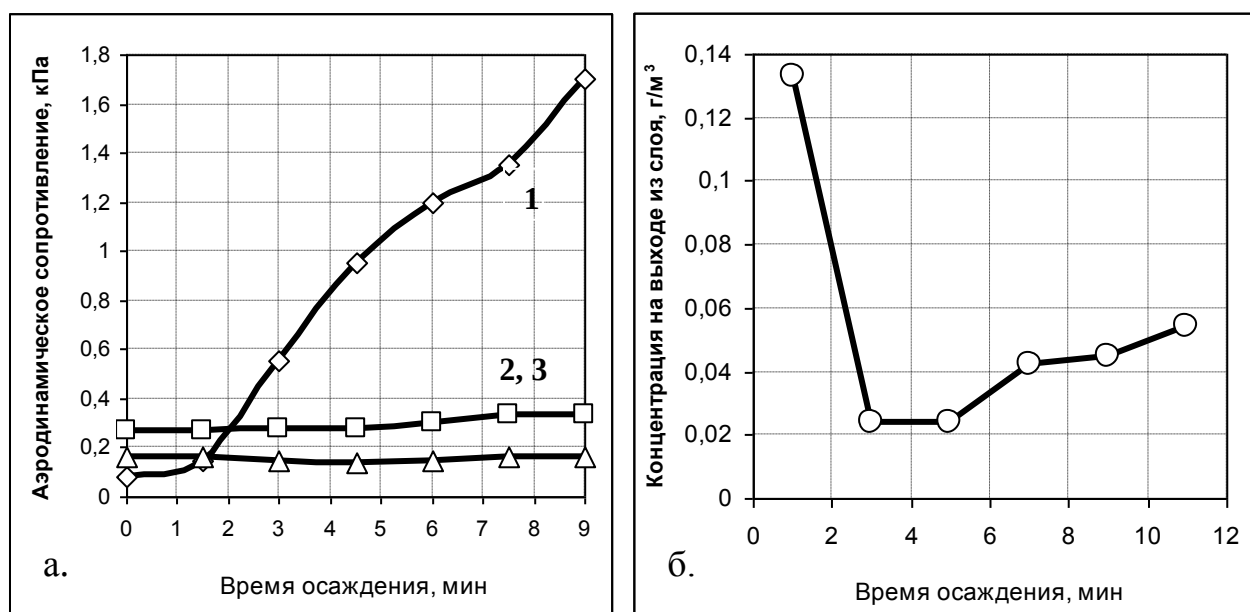


Рис. 3.18 – Зависимость аэродинамического сопротивления по высоте слоя от времени осаждения аэрозоля частиц вельцокиси

а) (1 – 5 мм, 2 – 70 мм, 3 – 100 мм,)

б) Зависимость концентрации аэрозольных частиц на выходе из слоя от времени осаждения аэрозоля частиц вельцокиси

Как видно из (рис. 3.18), дисперсные частицы вельцокиси, наряду с формированием плотного слоя на лобовой поверхности углеродных гранул, проникают в объём фильтрующей среды на глубину до 70 мм. На снимке боковой поверхности углеродного слоя (рис. 3.19) хорошо видны поровые каналы, по которым дисперсные частицы вельцокиси проникают в объём фильтрующей среды.



Рис. 3.19 – Снимок боковой поверхности слоя гранул при осаждении дисперсных частиц вельцоокси

3.3.5 Изучение слоя агрегатов частиц дисперсного углерода, осажденного на поверхности гранул

В процессе осаждения аэрозоля в слое углеродных гранул на его лобовой поверхности формируется пористый плотный слой, состоящий из частиц и агрегатов дисперсного углерода. Образование данного слоя имеет огромное прикладное значение, именно с его помощью, удаётся повысить эффективность осаждения в первые минуты процесса. Во время регенерации, сформированный слой разрушается с образованием более крупных агрегатов, чем в исходном аэрозольном потоке.

В условиях лабораторной установки определяется плотность сформированного слоя дисперсного углерода и размер частиц и агрегатов в аэрозоле, образующемся при разрушении слоя.

Для определения плотности слоя, перед проведением эксперимента, на лобовую поверхность углеродных гранул устанавливали ячейку, на дне которой находится сетка с размером 0,2 мм. Во время осаждения аэрозоля, слой из осажденных частиц и агрегатов дисперсного углерода формируется по всей лобовой поверхности углеродных гранул и внутри установленной

ячейки. По завершению эксперимента ячейка осторожно извлекается из фильтра. На аналитических весах определяется масса дисперсного углерода и, зная объём ячейки, находится плотность осажденного слоя:

$$\rho_{o.c.} = \frac{m}{V}; \quad (3.3)$$

где, $\rho_{o.c.}$ – плотность сформированного слоя, кг/м³; m – масса слоя частиц и агрегатов дисперсного углерода в ячейке, кг; V – объём ячейки, м³.

Плотность слоя дисперсного углерода Т 900 и П 161, сформированного в процессе осаждения аэрозольного потока представлена в таблице 3.14.

Снимки поверхности осаждённого слоя дисперсного углерода, полученные на оптическом микроскопе «Микромед» в отраженном свете представлены на рисунке 3.20.

Таблица 3.14

Плотность сформированного слоя

№ п/п	Технический углерод	Скорость осаждения, м/с	Аэродинамическое сопротивление, кПа	Плотность слоя, кг/м ³
1	Т 900	0,4	11,90	110
2	П 161	0,6	9,32	100
3	П 267–Э	0,6	6,50	90

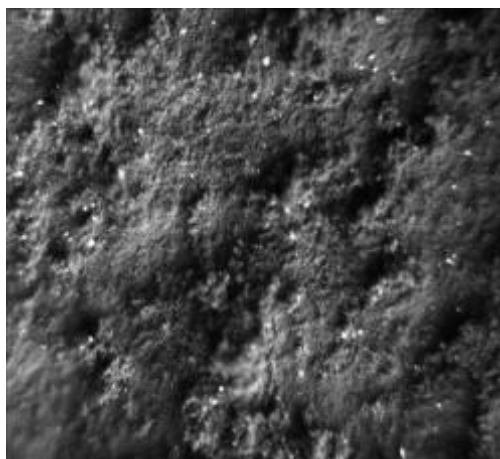


Рис. 3.20 – Снимок поверхности слоя сформированного в процессе осаждения аэрозоля дисперсного углерода

Определение размеров частиц и агрегатов слоя дисперсного углерода, сформированного при осаждении аэрозоля технического

углерода П 267–Э проводилось на углеродных гранулах (образец №3) с последующим разрушением образовавшегося слоя в режиме регенерации. Эксперимент проводился при скоростях осаждения аэрозоля дисперсного углерода от 0,2 м/с до 0,8 м/с.

Проба на анализ дисперсного состава аэрозоля отбиралась при разрушении слоя дисперсного углерода, сформированного в процессе осаждения на лобовой поверхности гранул. Слой разрушался во время регенерации псевдооживлением углеродных гранул. Для исключения попадания в пробоотборную трубку ротационного анализатора дисперсности углеродных гранул процесс регенерации проводился с критической скоростью начала псевдооживления.

Для расчёта критической скорости начала псевдооживления слоя использовали формулу Годеса [126 – 127]:

$$w_{кр} = \frac{Re_{кр} \times \mu}{d_3 \times \rho}, \text{ где } Re_{кр} = \frac{Ar}{150 \frac{1-\varepsilon_0}{\varepsilon_0^3} + \sqrt{\frac{1,75}{\varepsilon_0^3} \times Ar}} \quad (3.4)$$

где, μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; d_3 – эквивалентный диаметр гранул слоя, м; ρ – плотность воздуха, кг/м³; Ar – критерий Архимеда;

Экспериментальная критическая скорость начала псевдооживления, была сопоставима с теоретической $w_{кр} = 0,23$ м/с и составила 0,19 м/с.

Логарифмически нормальные распределения агрегатов частиц дисперсного углерода П 267–Э в аэрозольном потоке при разрушении слоя, сформированного при различных скоростях осаждения аэрозоля, представлены на (рис. 3.21).

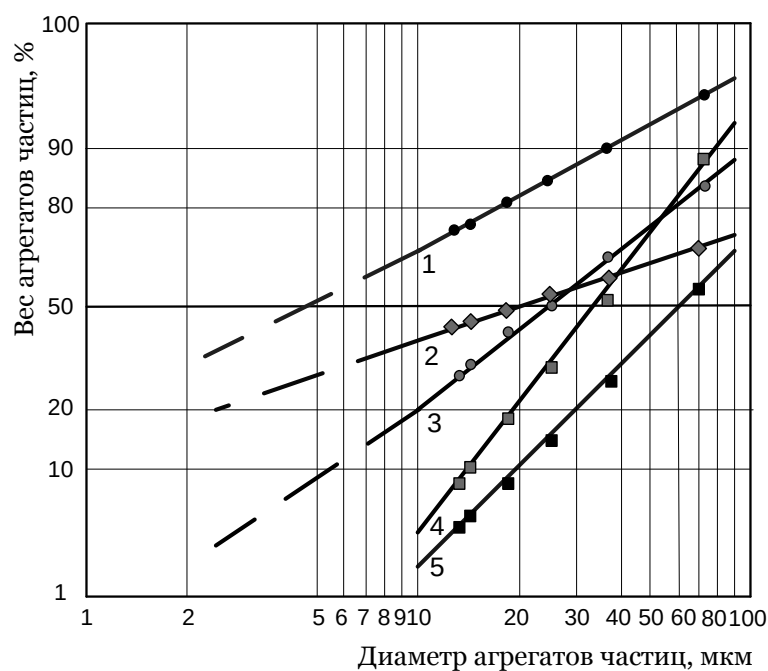


Рис. 3.21 – Логарифмически нормальные распределения агрегатов частиц дисперсного углерода в аэрозольном потоке, получаемом при разрушении сформированного слоя (при псевдоожижении со скоростью 0,19 м/с)

1 – скорость осаждения 0,2 м/с; 2 – 0,4 м/с; 3 – 0,5 м/с; 4 – 0,6 м/с; 5 – 0,8 м/с

Исследованиями было подтверждено, что с увеличением скорости осаждения аэрозоля от 0,2 м/с до 0,8 м/с на лобовой поверхности углеродных гранул формируется слой дисперсного углерода с более крупными агрегатами, чем в осаждаемом аэрозольном потоке.

Анализ результатов эксперимента показал, что на поверхности гранул с ростом скорости осаждения аэрозоля медианные размеры агрегатов углеродных частиц увеличиваются от 20 мкм до 70 мкм (рис. 3.22). При этом зависимость роста медианных размеров агрегатов углеродных частиц от скорости осаждения аэрозоля на поверхности гранул, имеет явно выраженный линейный характер.

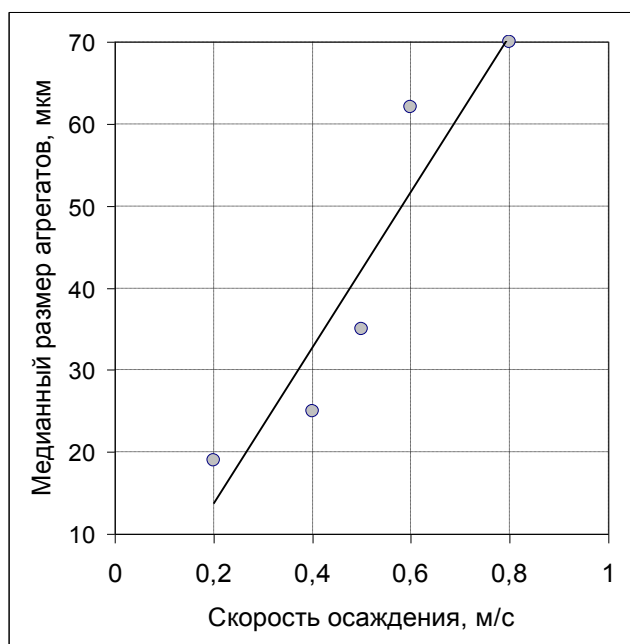


Рис. 3.22 – Зависимость медианного размера агрегата частиц дисперсного углерода от скорости осаждения аэрозоля

3.3.6 Эффективность регенерации слоя углеродных гранул

В задачи экспериментальных исследований процесса осаждения аэрозоля дисперсного углерода в слое углеродных гранул входило также установление оптимальных условий обеспечения полноты восстановления фильтрующих свойств слоя.

Эффективность процесса регенерации слоя углеродных гранул рассчитывали по уравнению:

$$\eta_{\text{рег}} = \frac{\Delta P_2 - \Delta P_1}{\Delta P_2 - \Delta P_0} \times 100\%,$$

Режим регенерации в течении 20-25 секунд со скоростью газового потока 0,5 м/с обеспечивает восстановление фильтрующих свойств слоя высотой 200 мм (таблица 3.15).

Таблица 3.15

Эффективность регенерации слоя гранул

№ п/п	Скорость регенерации, м/с	Время регенерации, с	Сопротивление чистого слоя, кПа	Сопротивление перед регенерацией, кПа	Сопротивление после регенерации, кПа	Эффективность регенерации, %
1	0,4	25	0,58	1,31	0,67	87,7
2	0,5	15	1,69	2,26	1,75	89,4
3	0,5	25	0,72	1,45	0,76	94,5
4	0,5	25	1,98	4,12	2,02	98,1

3.3.7 Результаты исследований процесса осаждения аэрозоля дисперсного углерода в слое углеродных гранул

Результаты исследования эффективного осаждения аэрозоля технического углерода в слое углеродных гранул представлены в таблице 3.16.

Эффективность процесса осаждения дисперсного углерода в лабораторных условиях, составляет 99,1 % и более, а медианный размер агрегатов частиц аэрозоля на выходе из слоя составляет 0,8 мкм (рис. 3.23).

Таблица 3.16

Результаты экспериментальных исследований процесса осаждения аэрозоля в слое углеродных гранул в лабораторных условиях

№ п/п	Технический углерод	Средняя скорость фронта $\times 10^4$, м/с	Пылеемкость слоя, г/м ³	Концентрация частиц на выходе из слоя, мг/м ³	Эффективность осаждения, %
1	П 267–Э	2,2	1900	38	99,1
2	П 514	-	3360	30	99,1
3	П 161	1,1	9800	55	99,5
4	К 354	1,3	6833	17	99,8
5	Т 900	-	9500	25	99,8

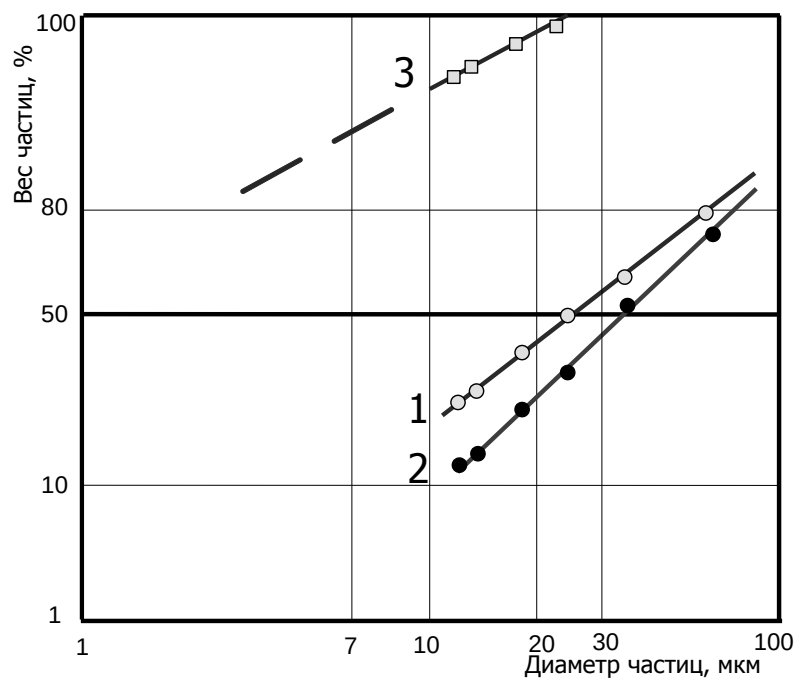


Рис. 3.23 – Логарифмически нормальные распределения агрегатов частиц дисперсного углерода П 267–Э в аэрозолях в модельных условиях

1 – перед слоем углеродных гранул, $\delta_{50} = 25$ мкм; 2 – над слоем углеродных гранул в момент его регенерации, $\delta_{50} = 35$ мкм; 3 – после слоя углеродных гранул, $\delta_{50} = 0,8$ мкм.

3.4 Выводы по главе III

На основании представленных в главе III экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

1. В условиях лабораторной установки для всех объектов исследования, отмечен рост констант коагуляции с увеличением скорости движения аэрозольного потока с 2,0 м/с до 4,0 м/с по прямолинейному участку газохода.

2. Скорость коагуляции увеличиваются с ростом показателя структурности технического углерода и суммарного показателя содержания линейных и разветвлённых форм первичных агрегатов в данном образце технического углерода.

3. Процесс осаждения различного по своим физико-химическим свойствам дисперсного углерода в слое углеродных гранул с насыпной

плотностью 400 кг/м^3 , гранулометрическим составом 0,7-1,0 мм и высотой 200 мм, эффективен на 99,1% - 99,9 % при следующих параметрах процесса:

- скорости осаждения 0,2-0,4 м/с;
- времени осаждения 360 секунд;
- аэродинамическом сопротивлении слоя не более 2,5 кПа.

4. Режим регенерации запылённого фильтрующего слоя путём псевдоожижения в течении 25 с со скоростью газового потока 0,5 м/с обеспечивает восстановление фильтрующих свойств слоя углеродных гранул.

На основе представленных в главе III результатов эксперимента были выданы исходные данные для создания опытной установки фильтра со слоем углеродных гранул в реальном процессе получения технического углерода.

ГЛАВА IV. СОЗДАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ ЗЕРНИСТОГО ФИЛЬТРА СО СЛОЕМ УГЛЕРОДНЫХ ГРАНУЛ

В главе представлены расчёты опытной установки зернистого фильтра со слоем углеродных гранул, а также рассматриваются результаты исследований процесса коагуляции и осаждения аэрозоля дисперсного углерода в опытно-промышленных условиях.

Автор данной работы принимал непосредственное участие в создании опытной установки зернистого фильтра со слоем углеродных гранул: проектировании, подготовке технологической документации и программы-методики испытаний, пуско-наладочных работах, предварительных опытно-промышленных и государственных испытаниях установки.

4.1 Проектирование опытной установки зернистого фильтра со слоем углеродных гранул

Опытная установка зернистого фильтра со слоем углеродных гранул рассчитывалась по общепринятой методике расчёта зернистых фильтров с насыпным слоем, описанной в [11].

Исходными данными для расчёта опытной установки фильтра со слоем гранул являлись следующие параметры:

1. Объёмный расход аэрозоля на осаждение (V_0) – 10000 м³/ч (н.у.);
2. Температура аэрозольного потока (t) – 250⁰С;
3. Рекомендуемая скорость осаждения (w_0) – 0,22 м/с;
4. Скорость регенерации фильтрующего слоя (w_p) – 0,5 м/с;
5. Время осаждения аэрозоля до регенерации слоя (τ_ϕ) – 135 с;
6. Время регенерации фильтрующего слоя (τ_p) – 25 с;
7. Весовая концентрация дисперсного углерода в аэрозоле на входе в фильтр ($C_{вх.}$) – 9,0 г/м³ (н.у.);

8. Весовая концентрация дисперсного углерода
в аэрозоле на выходе из установки ($C_{вых.}$) – 40 мг/м³ (н.у.);
9. Медианный размер агрегатов в аэрозоле (δ_{50}) – 5,0 мкм;
10. Дисперсия аэрозольных агрегатов (σ) – 5,9;
11. Насыпная плотность гранул фильтрующего слоя ($\rho_{сл.}$) – 400 кг/м³;
12. Гранулометрический состав фильтрующего слоя – (0,7-1,0) мм;
13. Доля свободного объёма фильтрующего слоя (ε) – 0,41 м³/м³;
14. Высота фильтрующего слоя (H) – 200 мм;
15. Плотность дисперсионной среды аэрозоля (ρ_c) – 1,1 кг/м³ (н.у.);
16. Коэффициент динамической вязкости дисперсионной среды
аэрозоля (μ) – $3,0 \times 10^{-5}$ Па·с (н.у.);

Площадь поверхности фильтрации рассчитывали по уравнениям:

$$V = V_0 \times \frac{273+t}{273} = 19157,5 \text{ м}^3/\text{ч}; \quad F = \frac{V}{w_0} = \frac{19157,5}{0,22 \times 3600} = 24,18 \text{ м}^2.$$

Учитывая, что одна секция аппарата должна быть в режиме регенерации фильтрующего слоя 25 с, а время фильтрации до регенерации слоя 135 с, принимаем восьмисекционную конструкцию фильтра. Округляем общую поверхность фильтрации до 24 м², поверхность одной секции при этом – 3 м².

Так как одна секция фильтра находится в режиме регенерации фильтрующего слоя, расход газов регенерации слоя (V_p) добавляли к общему объёму аэрозольного потока на входе в фильтр. При этом скорость осаждения аэрозоля составляла:

$$V_p = w_p \times F_c \times 3600 = 5400 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad w = \frac{(V + V_p)}{F} = \frac{(19157,5 + 5400)}{21 \times 3600} = 0,32 \text{ м/с}.$$

Сопротивление фильтра со слоем гранул определяется сопротивлением фильтрующего элемента состоящего из аэродинамической решетки (ΔP_p), слоя подложки ($\Delta P_{под.}$) и фильтрующего слоя гранул ($\Delta P_{сл.}$).

$$\Delta P = \Delta P_p + \Delta P_{под.} + \Delta P_{сл.}$$

Сопротивление фильтрующего слоя рассчитывали по формуле:

$$\Delta P_{сл.} = 1,2\Delta P_{\text{ч}} + \Delta P_3 = 1,2 \times 780,5 + 1154,5 = 2091,1 \text{ Па},$$

где $P_{\text{ч}}$ – сопротивление чистого слоя углеродных гранул, Па, P_3 – прирост сопротивления фильтрующего слоя за счёт накопления уловленных аэрозольных агрегатов, Па.

$$\Delta P_{\text{ч}} = \frac{32 \times \mu \times w \times H \times \varepsilon_{\kappa}^2}{d_{\text{г}}^2 \times \varepsilon} = \frac{32 \times 3 \cdot 10^{-5} \times 1,92 \times 0,32 \times 0,2 \times (1,4)^2}{(0,85 \cdot 10^{-3})^2 \times 0,41} = 780,5 \text{ Па},$$

где ε_{κ} – коэффициент извилистости каналов фильтрующей среды.

$$\Delta P_3 = K_{\text{ПС}} \times w^{1,6} \times C_{\text{вх}} \times \frac{\tau_{\phi}}{\varepsilon^2} = 988,9 \times (0,32)^{1,6} \times 0,009 \times \frac{135}{(0,41)^2} = 1154,5 \text{ Па}.$$

Сопротивление слоя подложки высотой 50 мм рассчитывали аналогичным образом: $\Delta P_{\text{под.}} = 74 \text{ Па}$, а сопротивление распределительной решетки при скорости осаждения 0,32 м/с определяли экспериментально: $\Delta P_{\text{р.}} = 70 \text{ Па}$

Общее аэродинамическое сопротивление элемента фильтрующего слоя:

$$\Delta P = 70 + 74 + 2091,1 = 2235,1 \text{ Па}.$$

Эффективность процесса осаждения:

$$\eta = \frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}} \times 100\% = \frac{9,0 - 0,04}{9,0} \times 100\% = 99,6\%.$$

Фильтр (рис. 4.1) представляет собой восьмисекционный аппарат, каждая секция которого состоит из трёх фильтрующих элементов (рис. 4.2), в них находится фильтрующий слой из углеродных гранул. Исходя из, размещения фильтра в габаритах установки получения технического углерода, поперечное сечение элемента секции представляет квадрат с длиной стороны 1 м. На основе экспериментальных данных полученных при исследовании процесса осаждения дисперсного углерода в лабораторных условиях установлено, что высота элемента секции фильтра должна составлять не менее 750 мм, это необходимо для предотвращения уноса гранул фильтрующего слоя при регенерации. Общий вид зернистого фильтра ФЗ-24/8×3 представлен на чертеже Эс 1304.00.000-01 СБ (Приложение I).

В состав элемента фильтра входят: распределительная решетка, выполненная из нержавеющей трубок диаметром 32×3 мм с расстоянием

между трубками 1 мм, на которой расположен слой подложки необходимый для равномерного распределения газового потока по объёму фильтрующего слоя, размещённого на подложке, верхняя камера запылённых газов и нижняя камера чистого газа [128].

Восемь секций объединены между собой в два блока по четыре секции в каждом блоке. Общий вид секции и элемента фильтра представлены на чертеже блока Эс 1304.01.000-01 СБ (Приложение №2). Аэрозольный поток подводится к каждой секции от общего коллектора. Между коллектором и входным патрубком каждой секции установлен механический затвор необходимый для переключения секции фильтра в режим фильтрации аэрозоля или регенерации слоя. Нижние патрубки механических затворов соединяются с коллектором регенерации слоя гранул.

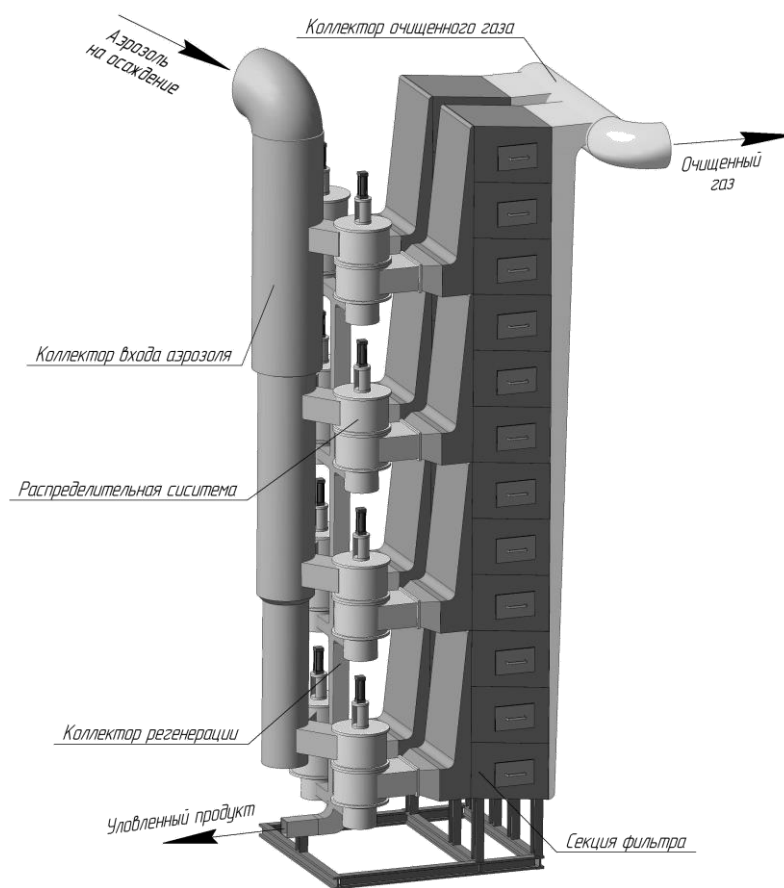
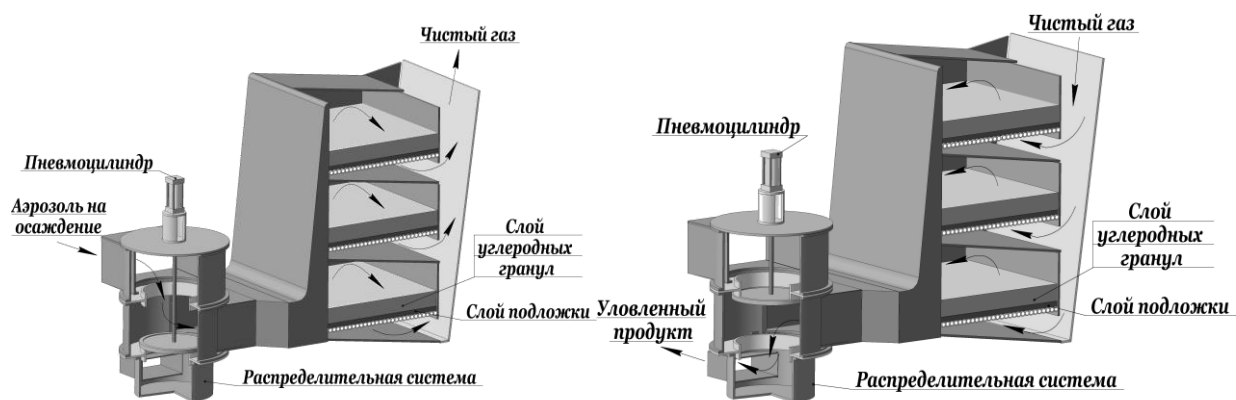


Рис. 4.1 – Фильтр со слоем гранул ФЗ-24/8×3



а.

б.

Рис. 4.2 – Секция фильтра ФЗ-24/8×3

а – режим фильтрации; б – режим регенерации

4.2. Исследования процессов коагуляции и осаждения аэрозоля дисперсного углерода в опытной установке зернистого фильтра со слое углеродных гранул

4.2.1 Программа исследований

Целью этапа работы является уточнение в реальном процессе получения технического углерода результатов экспериментальных исследований процесса коагуляции и осаждения дисперсного углерода из аэрозольного потока.

Применяемое оборудование:

1. Комплект оборудования для определения скорости газового потока.
2. Комплект оборудования для определения весовой концентрации частиц дисперсного углерода в аэрозольном потоке методом внешней фильтрации.
3. Комплект оборудования для определения дисперсного состава аэрозоля технического углерода.
4. Манометр.
5. Весы аналитические лабораторные, класса точности 2,0; весы технические 0 – 500 г.
6. Секундомер механический 2 шт.
7. Барометр класса точности не ниже 1,0.
8. Сушильный шкаф.

Описание опытной установки фильтра со слоем гранул

В опытную установку улавливания технического углерода из аэрозольного потока входит:

1. Система предварительного осаждения дисперсного углерода из аэрозольного потока, состоящая из двух последовательно установленных циклонов-концентраторов с диаметрами 1800 и 2200 мм. Циклон-концентратор представляет собой стандартный циклон СК-ЦН-34 с

присоединенной к нижнему основанию его бункера улитки для удаления уловленного дисперсного углерода в систему газового транспорта целевого продукта на грануляцию.

Система предварительного осаждения позволяет снизить концентрацию дисперсного углерода в аэрозольном потоке на входе в зернистый фильтр до $3-9 \text{ г/м}^3$.

2. Система фильтрации аэрозоля в зернистом фильтре ФЗ-24/8×3 (рис. 4.1).
3. Установка обезвреживания отходящих газов получения технического углерода.
4. Турбовоздуходувки 3ТВ-150-1,12, необходимые для транспорта аэрозольного потока и регенерации фильтрующего слоя.
5. Контрольные точки для отбора аналитических проб аэрозольного потока.

Каждая контрольная точка была оборудована всем необходимым для проведения замеров объёмного расхода, скорости потока, весовой концентрации и дисперсного состава частиц углерода в потоке. К месту измерения подвели линию сжатого воздуха, электропитание, напряжением 220В (в случае использования аспиратора) и 36В для обогрева фильтровального патрона и корпуса ротационного анализатора дисперсности

Особенности опытной установки фильтра со слоем гранул (рис. 4.3):

Аэрозоль дисперсного углерода с концентрацией от 40 до 80 г/м^3 (н.у.) и при рабочей температуре до 300°C подаётся от реакторов в циклон-концентратор (1), где осаждается от 80% до 90% целевого продукта. Дисперсный углерод, уловленный в циклоне-концентраторе (1), подавали на грануляцию. Не уловленный в циклоне-концентраторе (1) дисперсный углерод подавали на осаждение в циклоне-концентраторе (2).

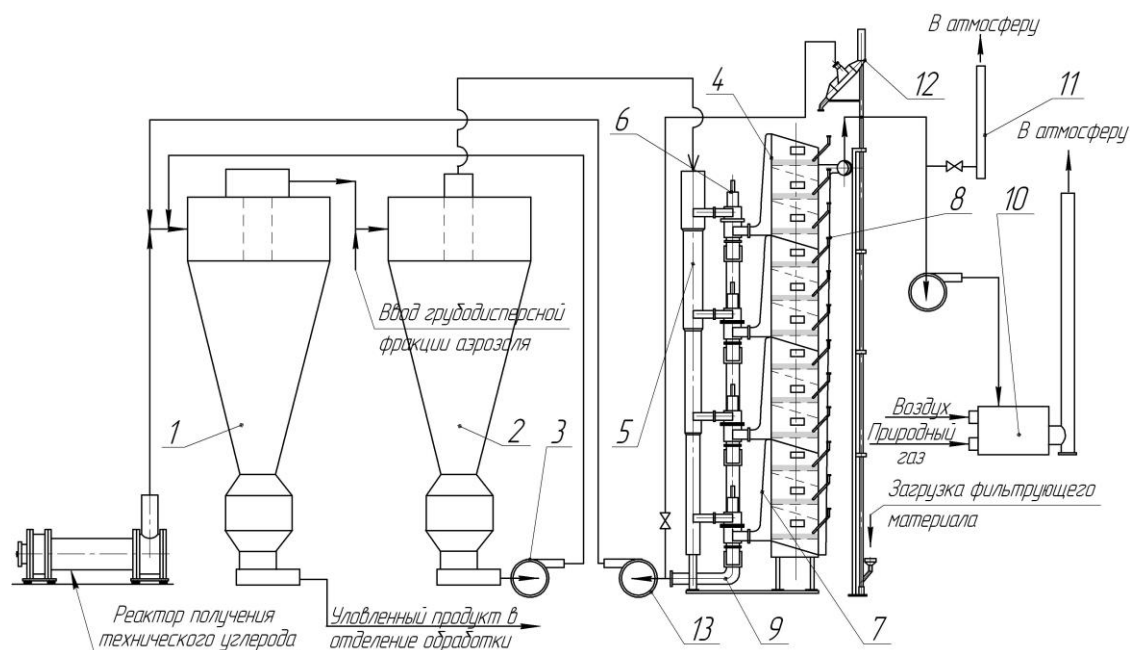


Рис. 4.3 – Технологическая схема опытной установки фильтра со слоем гранул

1 – циклон-концентратор диаметром 1800 мм.; 2 – циклон-концентратор диаметром 2200 мм.; 3, 13 – турбовоздуходувки; 4 – фильтр со слоем гранул ФЗ-24/8×3; 5 – входной коллектор; 6 – механический затвор; 7 – секция фильтра; 8 – коллектор очищенного газа; 9 – коллектор регенерации; 10 – обезвреживающее устройство; 11 – контрольная свеча; 12 – пневмоподъёмник

Уловленный в циклоне-концентраторе (2) целевой продукт в потоке аэрозоля турбовоздуходувкой (3) подавали в газоход перед циклоном-концентратором (1).

Аэрозольный поток с концентрацией твёрдых частиц от 3,0 до 8,5 г/м³ при рабочей температуре не более 200⁰С направляли на осаждение в фильтр со слоем гранул ФЗ-24/8×3 (4). Через общий коллектор (5) и механические затворы секций (6) аэрозоль поступал в камеры запылённых газов фильтрующих элементов (7). Поток аэрозоля проходил сверху вниз через слой углеродных гранул, слой подложки и аэродинамическую решётку в камеру чистого газа и сборный коллектор (8) Фильтрующий слой высотой 200 мм расположен на распределительной решетке, выполненной из труб диаметром 32×3 мм с шириной щели между трубами 1,0 мм.

Регенерацию фильтрующего слоя осуществляли в режиме

псевдоожижения фильтрующего слоя очищенным газом. При этом механический затвор регенерируемой секции закрывал патрубок подачи аэрозоля на фильтрацию и открывал патрубок подачи газов на регенерацию слоя из коллектора (8) в коллектор (9).

Очищенный газ проходил снизу вверх через распределительную решетку, подложку и фильтрующий слой, ожижал его, захватывал уловленные фильтрующим слоем агрегаты дисперсного углерода и через механический затвор поступал в коллектор регенерации слоя и далее турбовоздуходувкой (13) направлялся в газоход перед циклоном концентратором (1).

Очищенные газы, направляли в установку обезвреживания газов (10). Для визуального наблюдения за качеством очистки газов в фильтре со слоем гранул и забора воздуха из атмосферы при загрузке углеродного материала подложки и фильтрующего слоя предусмотрена контрольная свеча (11).

Для механизированной загрузки гранулированного углеродного материала подложки и фильтрующего слоя в секции фильтра предусмотрен пневмоподъёмник (12). При этом гранулированный углеродный материал в потоке воздуха с помощью пневмоподъёмника и турбовоздуходувки (13) направляли через патрубки загрузки в элементы каждой секции.

Система автоматического управления опытной установкой имеет информационную подсистему, которая обеспечивает сбор и первичную переработку текущей информации, архивирования данных, а также организацию операторского интерфейса.

Информационная подсистема позволяет получать следующие экспериментальные параметры, необходимые для данного исследования:

- температуру аэрозольного потока в коллекторе регенерации, перед и после фильтра;
- давление аэрозольного потока в коллекторе регенерации, перед и после фильтра;
- аэродинамическое сопротивление фильтра.

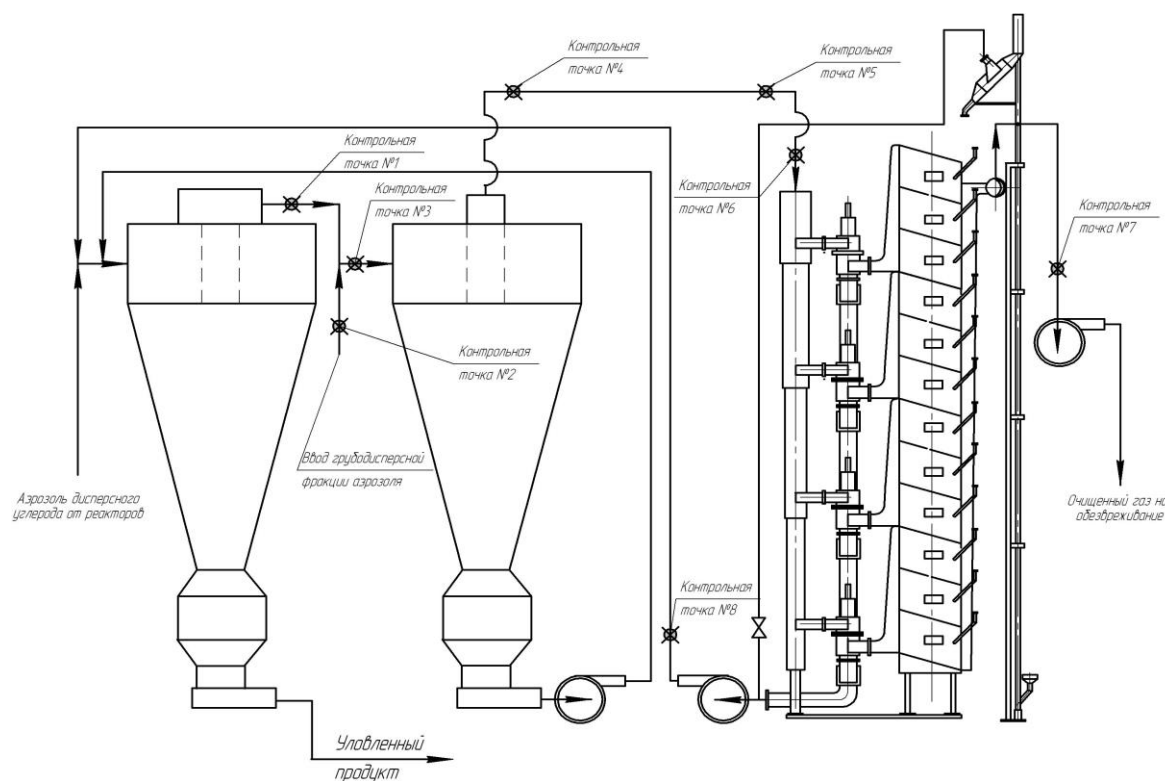


Рис. 4.4 – Схема расположения контрольных точек для отбора аналитических проб опытной установки фильтра со слоем гранул

4.2.2 Исследование процесса коагуляции аэрозоля в опытно-промышленных условиях

Опытная установка фильтра со слоем углеродных гранул характеризуется более жёсткими условиями процесса по сравнению с лабораторной установкой. Аэрозоль образуется в реакторе получения технического углерода, когда дисперсионной средой являются отходящие газы процесса. После стадии охлаждения, где аэрозольный поток насыщается водяными парами его температура составляет 300 °С.

Опытная установка зернистого фильтра, оснащена 5 контрольными точками отбора аналитических проб аэрозоля, предназначенными для исследований процесса коагуляции дисперсного углерода.

Контрольные точки 1 – 3 (рис. 4.5), расположены на участке введения в движущийся из циклона-концентратора (1) аэрозольный поток

грубодисперсного аэрозоля из сушильного барабана системы грануляции технического углерода.

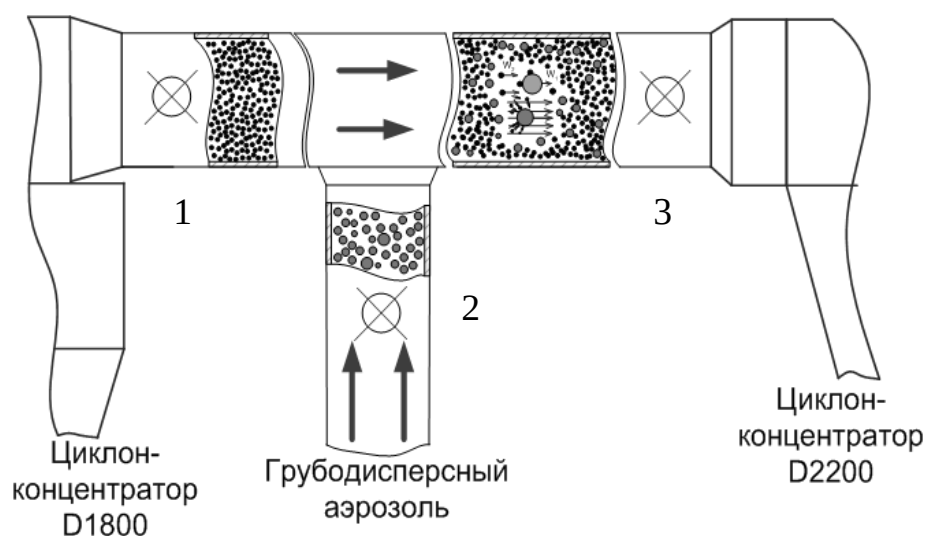


Рис. 4.5 – Схема расположения контрольных точек

В контрольной точке 3, расположенной в 12 м от узла ввода грубодисперсного аэрозоля, отбирается аналитическая проба, являющаяся результатом процесса интенсивной кинематической и турбулентной коагуляции.

Характеристики аэрозольного потока дисперсного углерода П 267–Э в контрольных точках представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Характеристика аэрозоля в контрольных точках №1, 2 и 3

№ п/п	Контрольная точка	Скорость аэрозоля, м/с	Температура, °С	Концентрация аэрозольных частиц, г/м ³	Медианный размер частиц
1	точка №1	18,0	265	5,7	5,5
2	точка №2	14,7	200	27,0	15,0
3	точка №3	18,0	248	8,0	23,0

Таблица заполняется по результатам анализа логарифмически нормальных распределений аэрозольного потока в контрольных точках (рис. 4.6).

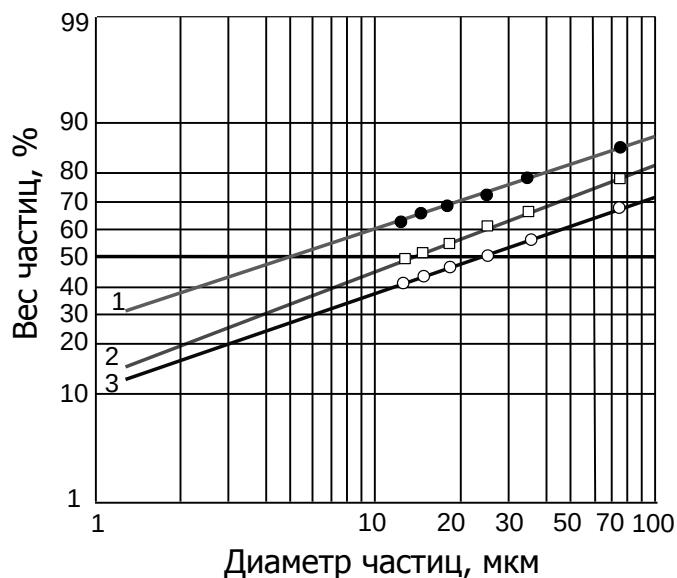


Рис. 4.6 – Логарифмически нормальные распределения частиц и агрегатов дисперсного углерода в аэрозольном потоке, в контрольных точках №1, 2 и 3

Рост медианного размера частиц аэрозоля дисперсного углерода при введении в аэрозольный поток агрегатов из сушильного барабана составил от 5,7 до 23,0 мкм, а константы кинематической и турбулентной коагуляции в этих условиях равнялись $5,6 \times 10^{11}$ и $7,8 \times 10^{11}$ м³/с соответственно. Показано, что введение в аэрозольный поток агрегатов частиц с более крупными размерами, чем в исходном аэрозоле, интенсифицирует процессы кинематической и турбулентной коагуляции.

Контрольные точки 4 и 5 опытной установки расположены на прямолинейном участке газотока на расстоянии друг от друга в 41 м. Характеристика аэрозольного потока дисперсного углерода П 267–Э в контрольных точках представлена в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Характеристика аэрозоля в контрольных точках № 4 и 5

№ п/п	Контрольная точка	Скорость аэрозоля, м/с	Температура, °С	Концентрация аэрозольных частиц, г/м ³	Медианный размер частиц
1	точка №4	19,4	220	5,9	5,5
2	точка №5		210	17,0	15,0

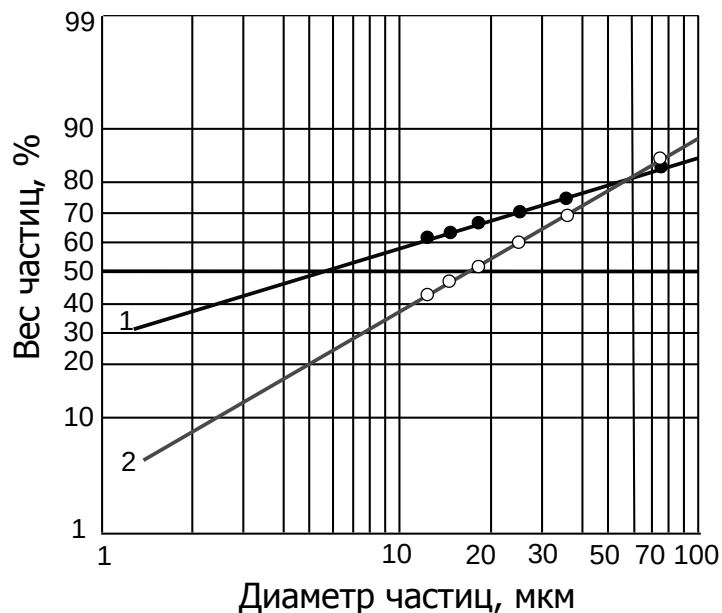


Рис. 4.7 – Логарифмически нормальные распределения частиц и агрегатов дисперсного углерода в аэрозольном потоке, в контрольных точках № 4 и 5

Рост медианного размера частиц аэрозоля дисперсного углерода при движении аэрозольного потока по прямолинейному участку газохода опытной установки составил от 5,9 до 17,0 мкм (рис. 4.7), а расчётные значения констант коагуляции представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Константы коагуляции аэрозоля дисперсного углерода П 267–Э

№ п/п	Наименование показателя	$K \times 10^{11}$
1	Константа коагуляции рассчитанная по уравнению Смолуховского, $\text{м}^3/\text{с}$	0,7
2	Константа кинематической коагуляции, $\text{м}^3/\text{с}$	1,7
3	Константа турбулентной коагуляции, $\text{м}^3/\text{с}$	6,0

В полномасштабном процессе получения технического углерода П 267–Э при температуре 250°C , высокой вязкости дисперсионной среды константа коагуляции, рассчитанная по уравнению Смолуховского составила $0,7 \times 10^{-11} \text{ м}^3/\text{с}$ при скорости потока 19,4 м/с. Низкую величину константы коагуляции в данном случае можно объяснить наличием в дисперсионной среде водяных паров. Как известно из [129 – стр. 275] пары воды создают на

поверхности частиц плёнку, которая уменьшает количество эффективных столкновений между частицами и тем самым препятствуют процессу коагуляции.

Высокие значения константы турбулентной коагуляции по сравнению с лабораторными условиями можно объяснить высокой скоростью движения аэрозольного потока, что способствует интенсификации турбулентных пульсаций потока и увеличению эффективных столкновений между аэрозольными агрегатами

4.2.3 Исследование процесса осаждения дисперсного углерода из аэрозольного потока в условиях опытной установки

Исследование процесса осаждения аэрозольного потока в опытной установке фильтра со слоем гранул проводилось при получении технического углерода электропроводных марок П 267–Э, П 277–Э, П 268–Э, П 367–Э и технического углерода П 514

В качестве фильтрующего слоя использовали углеродный материал, полученный на основе гранул технического углерода П 514 с насыпной плотностью 400 кг/м^3 , гранулометрическим составом 0,7-1,0 мм и высотой не менее 170 мм.

Регенерация фильтрующего слоя проводилась последовательно в каждой секции в течение 25 с со скоростью 0,50 м/с. Для предотвращения уноса гранул при смене цикла осаждения аэрозоля - регенерация слоя, регенерация в каждой соседней секции начиналась с пятисекундным опережением. Циклограмма работы зернистого фильтра ФЗ-24/8×3 изображена на рис. 4.8.

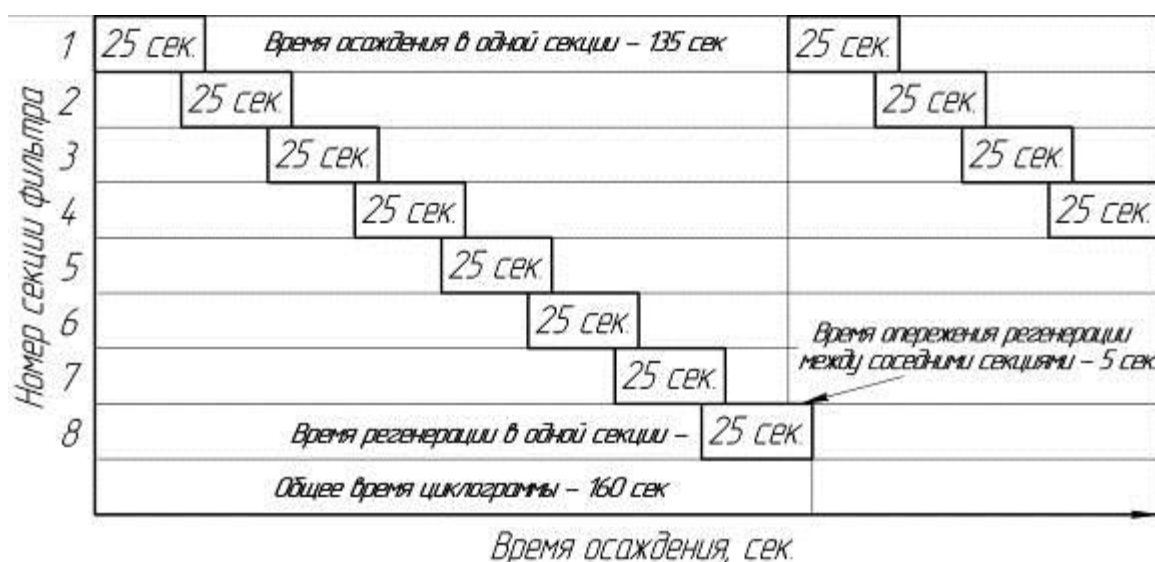


Рис. 4.8. Циклограмма работы зернистого фильтра ФЗ-24/8×3

Для исследования процесса осаждения дисперсного углерода из аэрозольного потока опытно-промышленная установка фильтра со слоем гранул снабжена тремя точками для отбора аналитических проб аэрозоля.

Контрольные точки 6 – 8 (рис. 4.4) были расположены следующим образом:

- точка №6 – находилась на входном коллекторе фильтра (5);
- точка №7 – на коллекторе очищенных газов (8);
- точка №8 – на коллекторе регенерации фильтрующего слоя (9).

Характеристика аэрозольного потока дисперсного углерода П 267–Э в контрольных точках представлена в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Характеристика аэрозоля дисперсного углерода П 267–Э в контрольных точках № 6, 7 и 8

№ п/п	Контрольная точка	Объёмный расход аэрозоля, м ³ /ч	Температура, °С	Концентрация аэрозольных частиц, г/м ³ (н.у.)	Медианный размер частиц
1	точка №6	16800	210	2,1 – 3,9	20,0
2	точка №7	12300	192	0,02 – 0,04	-
3	точка №8	4500	178	6,1 – 6,5	-

Таблица 4.4 заполняется на основе анализа дисперсного состава аэрозольного потока в этой точке (рис. 4.9).

Рассмотрим процесс осаждения аэрозольного потока дисперсного углерода П 514.

Характеристика аэрозольного потока в контрольных точках представлена в таблице 4.5.

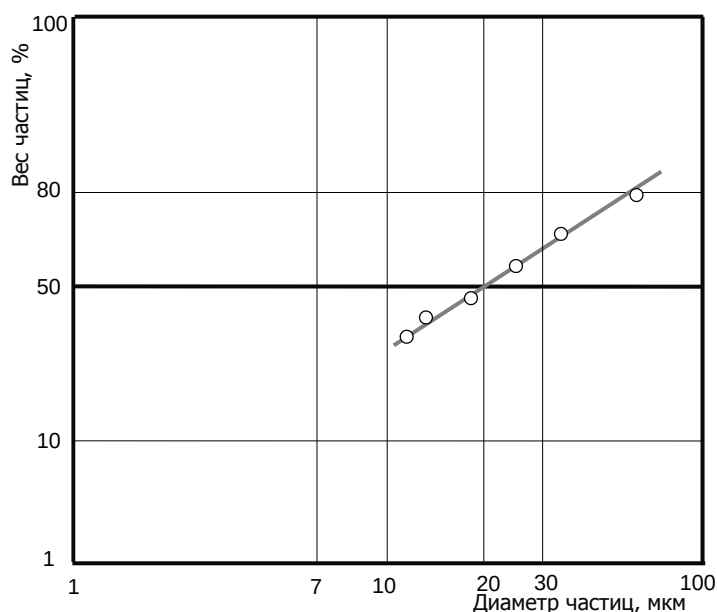


Рис. 4.9 – Логарифмически нормальные распределения частиц и агрегатов дисперсного углерода П 267–Э в аэрозольном потоке в контрольной точке №6, на входе в фильтр со слоем гранул

Таблица 4.5

Характеристика аэрозольного потока дисперсного углерода П 514 в контрольных точках №6, 7 и 8

№ п/п	Контрольная точка	Объёмный расход аэрозоля, м ³ /ч	Температура, °С	Концентрация аэрозольных частиц при (н.у.), г/м ³
1	точка №6	16100	252	6,7 – 6,83
2	точка №7	10600	230	0,09 – 0,11
3	точка №8	5408	205	15,8 – 20,1

Концентрация частиц технического углерода в контрольной точке №7 на выходе из фильтра со слоем гранул не превышает 20-40 мг/м³, что сравнимо со среднестатистическими данными по концентрации технического

углерода на выходе из рукавного фильтра, эксплуатируемого без замены фильтрующего материала в течение 18 месяцев от 40 до 230 мг/м³ [130].

Сводная таблица эксперимента по осаждению аэрозольного потока в слое углеродных гранул для двух марок технического углерода, представлена в таблице 4.6. Экспериментальные данные, полученные при осаждении аэрозольного потока дисперсного углерода в опытно-промышленных условиях согласуются с результатами экспериментов, полученных в лабораторных условиях.

Таблица 4.6

Результаты исследований процесса осаждения дисперсного углерода в опытной установке фильтра со слоем гранул.

№ п/п	Наименование показателей	Технический углерод			
		П 267–Э	П 268–Э	П 367–Э	П 514
1	Скорость осаждения, м/с	0,25			
2	Время осаждения, с	135			
3	Аэродинамическое сопротивление, кПа	1,50	1,30	1,25	1,80
4	Концентрация на выходе, мг/м ³ (н.у.)	21	34	31	100
5	Эффективность, %	99,1	99,2	99,3	99,1

Результаты экспериментальных исследований осаждения аэрозоля дисперсного углерода на лабораторной установке были подтверждены в опытной установке фильтра со слоем гранул ФЗ-24/8×3 производительностью 10000 м³/ч (н.у.) в процессе получения технического углерода П 267–Э и П 514 (таблица 4.7).

Таблица 4.7

Результаты исследования процесса осаждения аэрозоля дисперсного углерода в слое углеродных гранул в лабораторных и опытно-промышленных условиях

№ п/п	Наименование показателей	Лабораторные условия		Опытно-промышленная установка фильтра со слоем гранул Ф3-24/8×3	
		П 267–Э	П 514	П 267–Э	П 514
1	Скорость осаждения, м/с	0,2	0,2	0,25	0,25
2	Время осаждения, с	180	180	135	135
3	Аэродинамическое сопротивление, кПа	1,40	2,00	1,55	1,80
4	Концентрация на входе при (н.у.), г/м ³	12,5	3,33	4,80	8,50
5	Концентрация на выходе при (н.у.), мг/м ³	25	30	44	100
6	Эффективность, %	99,8	99,1	99,1	99,1

4.2.4 Материальный баланс опытной установки зернистого фильтра

Материальный баланс установки фильтра со слоем гранул, рассчитывали по результатам замеров характеристик аэрозольного потока в контрольных точках, на входе точка №6, на выходе точка №7 и в коллекторе регенерации фильтра точка №8 (Рис. 4.10). Материальный поток характеризуют две величины: объёмный расход аэрозоля – Q , м³/ч и массовое содержание в аэрозоле технического углерода – m , кг/ч)

Сводный материальный баланс для технического углерода П 267–Э и П 514 представлен в таблице 4.8.

Таблица 4.8

Материальный баланс установки фильтра со слоем гранул

№ п/п	Технический углерод	Q_1 , м ³ /ч	m_1 , кг/ч	Q_2 , м ³ /ч	m_2 , кг/ч	Q_3 , м ³ /ч	m_3 , кг/ч
1	П 267–Э	16800	35,3	12300	0,50	4500	34,8
2	П 514	16100	107,4	10600	0,95	5408	106,0

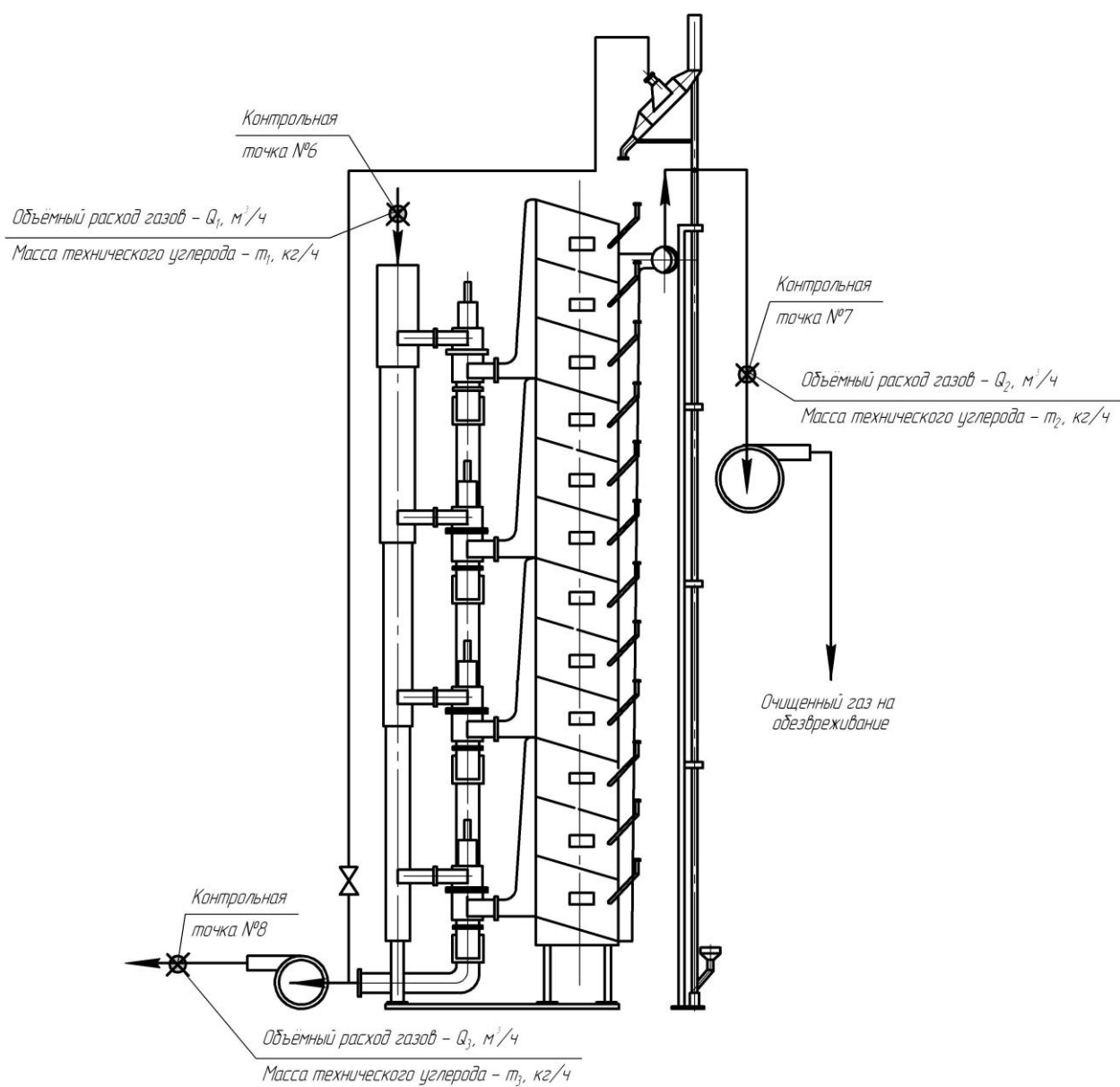


Рис. 4.10 – Схема к расчёту материального баланса установки фильтра со слоем гранул

4.3 Выводы по главе IV

1. Коагуляция аэрозоля дисперсного углерода в системе предварительного осаждения целевого продукта в циклонах создаёт условия для эффективного процесса фильтрации аэрозоля в слое углеродных гранул.

2. Эффективность осаждения аэрозоля технического углерода в слое углеродных гранул, как в лабораторных, так и в опытно-промышленных условиях составляет более 99%, оставаясь постоянной во времени.

3. Процесс осаждения аэрозоля дисперсного углерода в опытной установке зернистого фильтра успешно прошёл испытания в реальном процессе получения технического углерода и был рекомендован для опытно-промышленной отработки и промышленной реализации.

ОБЩИЕ ВЫВООДЫ

В работе дано решение актуальной задачи совершенствования процесса осаждения аэрозоля в производстве технического углерода. По результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. Высокие значения показателя структурности по абсорбции дибутилфталата (выше $100 \text{ см}^3/100\text{г}$) и суммарного содержания линейных и разветвленных форм агрегатов в образце дисперсного углерода (выше 85%) способствуют росту констант процесса коагуляции аэрозоля.

2. Проникающая способность аэрозольных агрегатов в фильтрующий слой углеродных гранул при осаждении аэрозоля различного по физико-химическим свойствам технического углерода определяется размером и кажущейся плотностью агрегатов. Аэрозольные агрегаты дисперсного углерода (П 161 и П 267–Э) с низкими значениями кажущейся плотности наряду с формированием слоя на поверхности гранул глубоко проникают в объём фильтрующей среды, а технический углерод П514 с крупными аэрозольными агрегатами высокой кажущейся плотности при осаждении образует на поверхности гранул плотный слой из осаждённых аэрозольных агрегатов, который является высокоэффективной фильтрующей средой.

3. Оптимальными характеристиками фильтрующего слоя углеродных гранул для процесса осаждения аэрозоля дисперсного углерода являются: гранулометрический состав 0,7-1,0 мм, плотность 400 кг/м^3 и высота слоя не менее 170 мм.

4. Эффективность осаждения аэрозоля технического углерода в слое гранул, как в лабораторных условиях при скорости осаждения 0,2 – 0,4 м/с и времени осаждения до 360 с, так и в условиях получения высокодисперсных марок технического углерода при скорости осаждения 0,2 – 0,4 м/с и времени осаждения до 135 с превышает 99%.

5. Процесс регенерации фильтрующего слоя гранул псевдоожижением слоя очищенным газом при скорости 0,5 м/с в течение 25 сек. восстанавливает его первоначальное аэродинамическое сопротивление.

6. Предварительное осаждение аэрозоля в циклонах – концентраторах для обеспечения концентрации дисперсного углерода в аэрозольном потоке перед фильтром 3 – 9 г/м³ при нормальных условиях необходимо для эффективного осаждения аэрозоля дисперсного углерода в зернистом фильтре со слоем углеродных гранул в производстве технического углерода.

7. Процесс осаждения аэрозолей и фильтр со слоем углеродных гранул, испытанный в опытной технологической установке в реальном процессе получения технического углерода и рекомендован для опытно-промышленной отработки и промышленной реализации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красовицкий Ю.В. К расчёту процесса фильтрования через слой осадка [Текст] / Ю.В. Красовицкий // Теоретические основы химической технологии. – 1983. – т.XVII, №4. – С. 559 - 562.
2. Красовицкий Ю.В. Использование некоторых закономерностей фильтрования суспензий для разделения аэрозолей на цилиндрических фильтровальных перегородках [Текст] / Ю.В. Красовицкий, В.А. Жужиков, М.И. Ермолаев // Химическая промышленность. – 1971. – №1. – С. 69 - 71.
3. Красовицкий Ю.В. Расчёт оптимальной нагрузки по газу при разделении аэрозолей зернистыми фильтровальными перегородками [Текст] / Ю.В. Красовицкий, Н.Ю. Карнеев // Теоретические основы химической технологии. – 1986. – т.XX, №5. – С. 704 - 706.
4. Красовицкий Ю.В. К расчёту процесса фильтрования через зернистые перегородки [Текст] / Ю.В. Красовицкий, К.А. Красовицкая, В.Я. Лыгина // Инженерно-физический журнал. – 1974. – т.XXXIV, №1. – С. 142 - 143.
5. Красовицкий Ю.В. Об использовании факторного планирования эксперимента при исследовании процесса фильтрации с постепенным закупориванием пор [Текст] / Ю.В. Красовицкий, В.А. Жужиков, К.А. Красовицкая, Р.М. Терёхин // Теоретические основы химической технологии. – 1977. – т.XI, №5. – С. 786 - 787.
6. Красовицкий Ю.В. Анализ и перспективные применения связанных зернистых фильтровальных структур для обеспыливания технологического оборудования [Текст] / Ю.В. Красовицкий, С.В. Энтин, С.П. Кабаргин // Новые огнеупоры. – 2006. – №6. – С. 47 - 52.
7. Самохвалов Н.М. Гидродинамика и эффективность улавливания пыли в зернистых фильтрах [Текст] / Н.М. Самохвалов, Е.В. Скачков // Химическая промышленность сегодня. – 2009, №6. – С. 49 - 56.

8. Самохвалов Н.М. Моделирование процесса фильтрования с закупориванием пор [Текст] / Н.М. Самохвалов, Е.В. Скачков, С.А. Сенотова // Вестник ИрГТУ. – 2009. – №2 (38). – С. 181 - 185.
9. Самохвалов Н.М. Очистка промышленной пыли зернистыми фильтрами [Текст] / Н.М. Самохвалов // Техника и технология. – 2007, №3. – С. 53 - 58.
10. Самохвалов Н.М. Инерционно-фильтрационный пылеулавитель [Текст] / Н.М. Самохвалов, Е.В. Скачков // Вестник ИрГТУ. – 2008, №2. – С. 104 - 106.
11. Самохвалов Н.М. Очистка промышленных пылей зернистой средой [Текст] / Н.М. Самохвалов, В.А. Ульянов. – Иркутск.: Иркутский университет, 1994. – 116 с.
12. Самохвалов Н.М. Расчёт зернистых фильтров для очистки запылённых газов [Текст] / Н.М. Самохвалов // Естественные и технические науки. – 2007. – №3. – С. 106 - 113.
13. Самохвалов Н.М. Классификация процессов фильтрования запылённых газов и регенерации зернистых фильтров [Текст] / Н.М. Самохвалов // Естественные и технические науки. – 2007. – №3. – С. 102 - 105.
14. Quevedo J. Agglomerates and granules of nanoparticles as filter media for submicron particles [Текст] / J. Quevedo, P. Gaurav // Powder Technology. – 2008, №183. – С. 480 - 500.
15. Ивановский И.В. Технический углерод. Процессы и аппараты. Учебное пособие [Текст] / И.В. Ивановский. – Омск. ОАО «Техуглерод», 2004. – 228 с.
16. Зуев В.П. Производство сажи [Текст] / В.П. Зуев, В.В. Михайлов. – М.: Химия, 1970. – 318 с.
17. Hisaeda Y. Simulation of soot formation and aggregation in high temperature condition [Текст] / Y. Hisaeda, S. Hayashi, T. Yamamoto // Proceedings of 2000 international. Joint Power Generation Conference, Florida. – 2000. – 325 с.

18. Орлов В.Ю. Производство и использования технического углерода для резин [Текст] / В.Ю. Орлов, А.М. Комаров, Л.А. Ляпина. – Ярославль.: Изд-во Александр Рутман, 2002. – 512 с.
19. Smoluchowski M.V. Опыт математической теории кинетики коагуляции коллоидных растворов [Текст] / M.V. Smoluchowski // Zeitschr. f. phys. Chemie. – 1917. – Bd. 92. – С. 129 - 168.
20. Штеренберг А.М. Филиппов Д.А. Моделирование процессов коагуляции на основе применений систем кинетических дифференциальных нелинейных уравнений [Текст] / А.М. Штеренберг // Вестник Самарского государственного технического университета. – 2006. – №42. – С. 207 - 209.
21. Галкин В.А. Математическое моделирования кинетики коагуляции [Текст] / В.А. Галкин, Д.Ю. Осецкий // Математическое моделирование. – 2006. – т.18. №1. – С. 99 -116.
22. Долгоносов Б.М. Равновесное распределение частиц в дисперсной системе с коагуляцией и распадом агрегатов [Текст] / Б.М. Долгоносов // Коллоидный журнал. – 2001. – т.63, №1. – С. 32 - 38.
23. Карпов С.В. Моделирование роста агрегатов наночастиц воспроизводящее их естественную структуру в дисперсных системах [Текст] / С.В. Карпов, В.С. Герасимов, И.Л. Исаев, А.В. Обущенко // Коллоидный журнал. – 2006. – т.68, №4. – С. 484 - 493.
24. Долгоносов Б.М. Кинетика обратимой гравитационной коагуляции в пространственно-однородной дисперсной системе [Текст] / Б.М. Долгоносов // Коллоидный журнал. – 2001. – т.63, №4. – С. 459 - 469.
25. Мищук Н.А. Теоретические основы анализа кинетики коагуляции в броуновских дисперсных системах [Текст] / Н.А. Мищук // Коллоидный журнал. – 2005. – т.67, №3. – С. 381 - 391.
26. Борщев В.Я. Феноменологический анализ взаимодействия неэластичных несвязанных частиц в быстром гравитационном потоке [Текст] / В.Я.

- Борщев, В.Н. Долгунин, П.А. Иванов // Теоретические основы химической технологии. – 2008. – т. 42, №3. – С. 343 - 347.
27. Mucoz-Bueno R. Deposition of fine aerosols in laminar tube flow at high temperature with large gas-to-wall temperature gradients [Текст] / R. Mucoz-Bueno, E. Hontacyn, M. Rucandio // Aerosol Science. – 2005. – №36. – С. 495 - 520.
28. Сугак Е.В. Моделирование движения аэрозольных частиц в турбулентном газовом потоке [Текст] / Е.В. Сугак, Е.В. Кузнецов, С.Г. Шахрай // Вестник университетского комплекса НИИ систем управления волновых процессов и технологий. – 2006. – №5. – С. 253 - 266.
29. Зайчик Л.И. Влияние броуновского движения на столкновения аэрозольных частиц в турбулентном потоке [Текст] / Л.И. Зайчик, В.М. Алипченков // Теплофизика высоких температур. – 2008. – т.46, №4. – С. 553 - 562.
30. Зайчик Л.И. Коагуляция аэрозольных частиц в турбулентном потоке [Текст] / Л.И. Зайчик, В.М. Алипченков // Теплофизика высоких температур. – 2008. – т.46, №5. – С. 730 - 739.
31. Дьякова Е.В. Обратная задача для уравнения коагуляции дисперсных систем [Текст] / Е.В. Дьякова, И.Э. Наац // Сб. научных трудов СевКавГТУ. – 2006. – №2. – С. 102 - 105.
32. Степанян Д.И. Расчётная схема для численного решения уравнения коагуляции атмосферного аэрозоля [Текст] / Д.И. Степанян // Сб. научных трудов СевКавГТУ. – 2004. – №1. – С. 12 - 21.
33. Сажин Б.С. Исследование влияния процесса акустической коагуляции на улавливания пыли продукта в процессе сушки диспергированных материалов на ОАО Реатэкс [Текст] / Б.С. Сажин, О.С. Кочетов, Г.А. Кесаян // Успехи в химии и химической технологии. – 2007. – 21, №9. – С. 105 - 109.
34. Юдаев В.Ф. Акустическая коагуляция аэрозолей [Текст] / В.Ф. Юдаев // Экспертиза. – 2004. – №6. – С. 58 - 59.

35. Салов В.В. О физическом механизме подавления плотного дыма в замкнутых помещениях введением заряженного водного аэрозоля [Текст] / В.В. Салов, С.О. Ширяева, В.А. Салов, А.С. Голованов // Письма в ЖТФ. – 2001. – т.27, выпуск 17. – С. 88 - 94.
36. Самимов З.С. Исследование пароконденсационного метода укрупнения частиц в пылеулавливающем аппарате с витающей насадкой [Текст] / З.С. Самимов, Т.З. Рахманов // Узбекский химический журнал. – 2005. – №2. – С. 56 - 59.
37. Павловцев В.М. Применение коагулянтов в центробежных пылеуловителях [Текст] / В.М. Павловцев // Вестник горно-металлургической академии РАЕН. Отделение металлургия. – 2005. – №14. – С. 290 - 296.
38. Балтаев У.С. Исследование гидродинамики процессов укрупнения и осаждения волокнистых частиц [Текст] / У.С. Балтаев, Н.Х. Юлдашев // Химическая технология. Контроль и управление. – 2008. – №5. – С. 9 - 12.
39. Sorensen C. Aerogelation in a Flame Soot Aerosol [Текст] / C. Sorensen, W. Hageman, T. Rush, H. Huang // Physical review letters. – 1998. – Vol 80, №8. – С. 1782 - 1785.
40. Marig Matti. Coagulation dynamis of fractal-like soot aggregates [Текст] / Marig Matti // Journal of Aerosol Science. – 2007. – V.38, issue 2. – С. 141 - 156.
41. Мансуров З.А. Сажеобразование в процессах горения (обзор) [Текст] / З.А. Мансуров // Физика горения и взрыва. – 2005. – т.41, №6. – С. 137 - 156.
42. Шопин В.М. Исследование процессов выделения дисперсного углерода из аэрозольного потока [Текст] / В.М. Шопин // Российский химический журнал. – 2007. – LI, №4. – С. 104 - 109.
43. А. с. 413961 СССР. Способ центробежной очистки газа [Текст] / В.М. Шопин. Дата приоритета: 10.04.1972.

44. Жужиков В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий [Текст] / В.А. Жужиков.. – М.: Химия, 1971. – 440 с.
45. Гордон Г.М. Пылеулавливание и очистка газов в цветной металлургии [Текст] / Г.М. Гордон, И.Л. Пейсахов. – М.: Металлургия, 1977. – 456 с.
46. Ярошенко А.Е. Обзор современных фильтровальных материалов используемых в цементной промышленности [Текст] / А.Е. Ярошенко // Информцемент. – 2008. – №1. – С. 39 - 42.
47. Таразанов А.Н. Реконструкции эксплуатируемых газоочистных установок с применением современных технологий и фильтровальных материалов [Текст] / А.Н. Таразанов // Информцемент. – 2008. – №1. – С. 49-52.
48. Семин А.Г. Использование рукавных фильтров при производстве цемента [Текст] / А.Г. Семин, А.В. Мещеряков, В.Г. Калгатин, Н.Н. Акишева // Информцемент. – 2008. – №1. – С. 71 - 73.
49. Замета Б.В. К вопросу повышения эксплуатационных свойств фильтровальных нетканых полотен для фильтрации аэрозолей [Текст] / Б.В. Замета, С.И. Титова, Н.В. Засенко // Текстильная промышленность. – 2004. – №5. – С. 46 - 47.
50. Dubey V. Mastering carbon black filtration [Текст] / V. Dubey, T. Savage, V. Maindola //Textiles a Usage Techniques. – 2002. – Issue 43. – С. 26 - 30.
51. Мустафин В.Ш. Решения компании «Сименс» для эффективной модернизации электрофильтров (ЭФ) [Текст] / В.Ш. Мустафин // Информцемент. – 2008. – №1. – С. 43 - 46.
52. Андриевский А.И. Реконструкция систем газоочистки с использованием существующих строительных конструкций и сооружений на предприятиях цементной промышленности [Текст] / А.И. Андриевский // Информцемент. – 2008. – №1. – С. 53 - 54.
53. Гузаев В.А. Опыт реконструкции газоочистного оборудования в цементной промышленности на основе последних разработок ХГ «Кондор Эко – СФ НИИОГАЗ» [Текст] / В.А. Гузаев, М.Е. Смирнов // Информцемент. – 2008. – №1. – С. 55 - 58.

54. Тензмайер С.И. Планирование и реализация проектов по газоочистке [Текст] / С.И. Тензмайер // Информцемент. – 2008. – №1. – С. 59 - 62.
55. Куркин В.П.. Очистка промышленных газов от сажи. Серия промышленная и санитарная очистка газов [Текст] / В.П. Куркин, Н.В. Ужов, И.И. Урбах. – М.: Изд-во ЦНИИТЭнефтехим, 1969. – 125 с.
56. Борозняк И.Г. Производство сажи. Улавливание Гранулирование Упаковка [Текст] / Борозняк И.Г. – М.: Химия, 1975. – 192 с.
57. А. с. 580914 СССР. Центробежное устройство для очистки газового потока [Текст] / Шопин В.М., Супонев К.В. Дата приоритета: 10.12.1976.
58. Шопин В.М. К Вопросу об осаждении аэрозолей в циклоне [Текст] / Производства и свойства углеродных саж. Сб. науч. тр./Под ред. Суровикина В.Ф. – Омск, 1972. - С. 253-259.
59. Шопин В.М. Особенности коагуляции и осаждения аэрозоля в производстве технического углерода [Текст] / В.М. Шопин, В.П. Исаков // Пути развития промышленности технического углерода/НИИ шинной промышленности. – Омск, 1976. – С . 137 - 140.
60. Шопин В.М. Результаты исследования фильтровальных стеклотканей и рукавов в производстве техуглерода [Текст] / В.М. Шопин Л.Г. Туренко // Достижение в области производства и применения техуглерода. – М., 1980. – 190 с.
61. Шопин В.М. Исследования процессов фильтрации аэрозоля технического углерода в высокопроизводительных рукавных фильтрах [Текст] / В.М. Шопин, В.П. Исаков, К.В. Супонев, В.С. Ерохина // Достижения в области производства и применения технического углерода/Сборник научных трудов. – М.: ЦНИИТЭнефтехим., 1980. – С. 124 - 143.
62. Пат. 4396590 США. Дата приоритета 06.08.1983.
63. Pikon J. Theoretische und experimentelle Analyse der Entstaubung eines Aerosols mit kornigen [Текст] / J. Pikon, J. Hehlmann // Schichten Chemical Technologic. – 1978. – №7. – С. 34 - 40.

64. Ужов В.Н. Очистка промышленных газов фильтрами [Текст] / В.Н. Ужов, Б.И. Мягков. – М.: Химия, 1970. – 318 с.
65. Уайт П. Высокоэффективная очистка воздуха [Текст] / П. Уайт, М. Смит. – М., 1967. – 154 с.
66. Трущенко Н.Г. Аэродинамика зернистого слоя [Текст] / Н.Г. Трущенко, К.Ф. Коновальчик, Г.Г. Северин / Труды НИПИСТРОМа. – 1982. – Вып. IX. – 120 с.
67. Шопин В.М. Исследование процесса фильтрации аэрозоля дисперсного углерода в слое пористых углеродных гранул [Текст] / В.М. Шопин // Тез. докл. международ. науч.-практ. конф. «Химия – XXI век: Новые технологии, новые продукты». – Кемерово., 2004. – С. 125 - 128.
68. Волобуев В.Е. Исследование процесса фильтрации запылённых газов через зернистые слои [Текст] / В.Е. Волобуев, В.П. Куркин // Промышленная и санитарная очистка газов. – 1976. – №1. – С. 10-12.
69. Добросоцкий В.П. Анализ современных математических моделей фильтрования пылегазовых потоков зернистыми слоями [Текст] / В.П. Добросоцкий, О.А. Панова, Ю.В. Красовицкий // Экология ЦЧО РФ. – 2006. – №1. – С. 45 - 47.
70. Архангельская Е.В. Исследование кинетики фильтрования [Текст] / Е.В. Архангельская, О.А. Панова // Сб. трудов ВГТА. – 2003. – С. 221 - 222.
71. Логинов А.В. Оценка воздействия неравномерности подаваемого на очистку запылённого воздуха на эффективность работы зернистых фильтров [Текст] / А.В. Логинов, Н.С. Граничев // Горные машины и автоматика. – 2003. – №2. – С. 50 - 55.
72. Shin C. Finite element simulation of deep bed filtration [Текст] / C. Shin // Chemical Engineering Science. – 2006. – V.61, issue 8. – С. 2324 - 2329.
73. Успенский В.А. К теории и расчёту слоевого фильтра [Текст] / В.А. Успенский, О.Х. Вивденко, А.Н. Подоляка, В.А. Шарапов // Инженерно-физический журнал. – 1974. – т. XXVII, №4. – С. 740 - 742.

74. Матвеев М.А. Пористые силикатные изделия [Текст] / М.А.. Матвеев. – М.: Химия, 1956. – 198 с.
75. Павловская Е.И. Металлокерамические фильтры [Текст] / Е.И. Павловская. – М.: Недра, 1967. – 164 с.
76. Архангельская Е.В. Разработка высокоэффективных зернистых фильтров со связанной структурой для тонкой очистки промышленных газов от механических примесей [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук/ Е.В. Архангельская. – 1997. – 20 с.
77. Жуланов Ю.В.. Исследование фильтрации аэрозолей металлокерамическими фильтрами [Текст] / Ю.В. Жуланов, Ю.В. Красовицкий // Коллоидный журнал. – 1981. – т. XLIII, №2. – С. 246 - 250.
78. Heping Cui and Jamal Chaouki. Interparticle forces in high temperature fluidization of Geldart A particles [Текст] / Heping Cui and Jamal Chaouki // China particuology. – 2004. – V.2, No.3. – С. 113 - 118.
79. Рустамов Я.И. Механизм и математическое описание гранулообразованных сыпучих материалов в псевдооживленном слое [Текст] / Я.И. Рустамов, Г.А. Карамедов, Ф.В. Казымов // Химическая промышленность. – 2000. – №12. – С. 36 - 40.
80. Сажин Б.С. Определение предельных значений показателя полидисперсности безуносного кипящего слоя [Текст] / Б.С. Сажин, Л.Б. Дмитриева, Д.Л. Ракушин // Успехи в химии и химической технологии. – 2004. – т. XVIII, №7. – С. 76-79.
81. Огурцов А.В. Ячеечная математическая модель распределения твердых частиц в псевдооживленном слое [Текст] / А.В. Огурцов, А.В. Митрофанов, В.Е. Мизонов // Химия и химическая технология. – 2007. – т.50, №3. – С. 100 - 103.
82. Дэвидсон И. Псевдооживление [Текст] / И. Дэвидсон, Д. Харрисон. – М.: Химия, 1974. – 250 с.
83. А. с. 1328973 СССР. Фильтр для выделения сажи из газов [Текст] / В.М. Шопин, О.А. Гладков, К.В. Супонев. Дата приоритета: 02.08.1985.

84. Шопин В.М. Исследование фильтрации аэрозоля в слое пористого углеродного материала [Текст] / В.М. Шопин // Адсорбция и хроматография макромолекул. – 1994. – С. 101 - 103.
85. Шопин В.М. Будущее промышленной очистки газов – за фильтрацией в слое пористых гранулообразных материалов [Текст] / В.М. Шопин, К.В. Супонев // Тез. докл. междунар. науч.-прак. конф. «Химия – XXI век: Новые технологии, новые продукты». – Кемерово. – 2004. – С. 121 - 124.
86. Ярошевская Н.В. Методы расчёта водоочистного фильтра с учётом гранулометрического состава загрузки [Текст] / Н.В. Ярошевская // Химия и химическая технология воды. – 2007. – т.29, №3. – С. 50 - 58.
87. Соковнин О.М. Определение адсорбционной ёмкости фильтрующего слоя [Текст] / О.М. Соковнин, С.Н. Загоскин // Химическая промышленность. – 2003, №6, - С. 48 - 50.
88. Рулёв Н.В. Парная энергия связи частиц и размер флоккул, образующихся в турбулентном потоке [Текст] / Н.В. Рулёв, Т.А. Донцова, Т.В. Небеснова // Химия и химическая технология воды. – 2005. – т.27, №1. – С. 20 - 25.
89. Гончаренко В.К. Очистка промышленных газов от фтористых соединений и пыли в зернистом фильтре [Текст] / В.К. Гончаренко, И.Я. Боев, В.П. Куркин, В.Е. Волобуев // Промышленная и санитарная очистка газов. – 1976, №6. – С. 29 - 30.
90. Чумарный В.И. Очистка газов сушильного барабана от магнезитовой пыли зернистым фильтром с движущимся слоем [Текст] / В.И. Чумарный, Н.И. Алексеев, В.Е. Волобуев, И.Г. Кальчик // Промышленная и санитарная очистка газов. – 1976, №3. – С. 1 - 2.
91. Гончаренко В.К. Схемы комплексной очистки газов с применением зернистых фильтров [Текст] / В.К. Гончаренко, А.И. Денисенко, В.Е. Волобуев, О.М. Сквирский // Промышленная и санитарная очистка газов. – 1979, №4. – С. 4 - 5.

92. Волобуев В.Е. Оценка оптимальной скорости вертикального продвижения зернистого слоя при улавливании различных пылей [Текст] / В.Е. Волобуев, В.К. Гончаренко, В.П. Куркин // Промышленная и санитарная очистка газов. – 1976, №6. – С. 6 - 8.
93. Красовицкий Ю.В. Зернистые фильтры для пылеулавливания из технологических газов и аспирационных выбросов в производстве огнеупоров [Текст] / Ю.В. Красовицкий, С.В. Энтин, С.Л. Кабаргин, Д.А. Ермолычев // Новые огнеупоры. – 2006, №5. – С. 55 - 63.
94. Маньков А.А. Экспериментальная оценка общей и фракционной эффективности зернистых фильтров – пылеуловителей при производстве огнеупоров [Текст] / А.А. Маньков, Ю.В. Красовицкий, Е.В. Архангельская, С.Л. Кабаргин // Новые огнеупоры. – 2008, №4. – С. 64 - 67.
95. Красовицкий Ю.В. Обеспыливание газов зернистыми слоями [Текст] / Ю.В. Красовицкий, В.В. Дуров. – М.: Химия, 1991. – 192 с.
96. Красовицкий Ю.В. Улавливание и утилизация пыли зернистыми слоями при сушке гранулированных материалов [Текст] / Ю.В. Красовицкий, А.В. Логинов, Е.В. Архангельская // Строительные материалы. – 2006, июль. – С. 61 - 63.
97. Peng He. Experimental research on high temperature granular bed filters [Текст] / Peng He, Hongxia Qin, Yanbing Zong // Journal of University Science and Technology. Beijing. – 2006, V.28, issue 11. – С. 1064 - 1067.
98. Macias-Machin A. New granular material for and gas filtration: use of the “Lapilli” [Текст] / A. Macias-Machin, M. Socorron, J. Verona // Chemical Engineering and Processing. – 2006. – V.45, issue 9. – С. 719 - 727.
99. Henriquez V. Hot gas filtration, using a moving bed heat exchanger-filter (MHEF) [Текст] / V. Henriquez, A. Macias-Machin // Chemical Engineering and Processing. – 1997. – V. 36, issue 5. – С. 353 - 361.

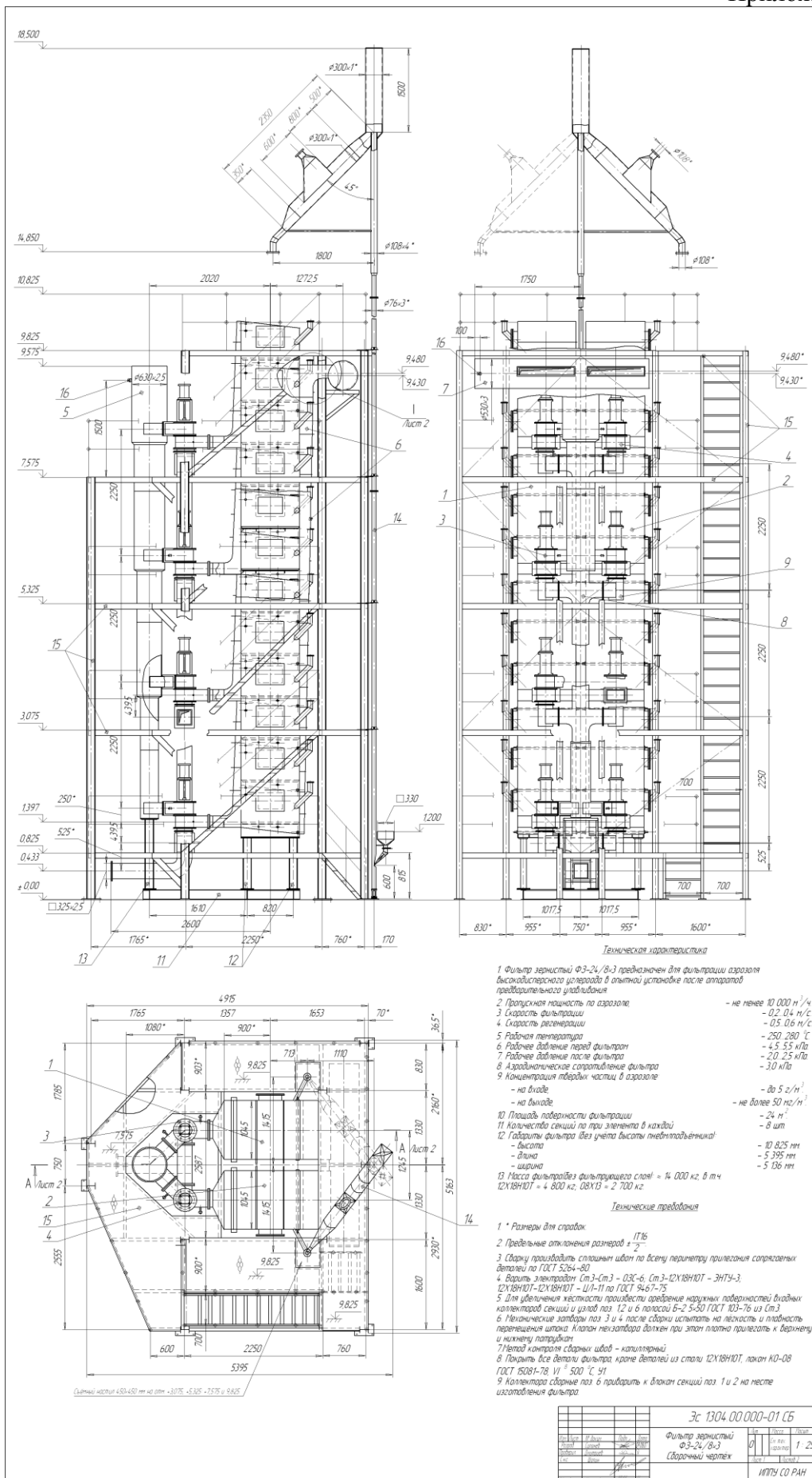
100. Zhay Jigu. Design and development of a high efficiency carbon-granular bed filter in industrial scale [Текст] / Zhay Jigu, Lin Cheng. // Journal China Chemical Engineering. – 2004. – V.12, issue 3. – С. 395 - 400.
101. Гладков О.А. Очистка отработанных газов дизеля от сажи зернистым фильтром [Текст] / О.А. Гладков, В.М. Шопин, А.Н. Медяник, В.К. Шпраер // Двигателестроение. – 1984, №12. – С. 22 - 23.
102. Egleson G. Moving coke-bed gas filter for dust removal [Текст] / G. Egleson, H. Simous, L. Kane, E. Sands // Industrial & Engineering Chemistry. – 1954. – V.46. – С. 1157 - 1162.
103. А. с. 833285 СССР. Способ выделения сажи из сажевого аэрозоля [Текст] / Шопин В.М., Туренко Л.Г., Суровикин В.Ф., Супонев К.В. Дата приоритета: 20.01.1977.
104. А. с. 869797 СССР. Фильтр для очистки газов от сажи [Текст] / Шопин В.М., Туренко Л.Г., Суровикин В.Ф., Супонев К.В. Дата приоритета: 04.02.1977.
105. Пат. 4295867 США. Дата приоритета: 08.07.1979.
106. А. с. 815999 СССР. Способ выделения сажи из сажевого аэрозоля [Текст] / Шопин В.М., Суровикин В.Ф., Цеханович М.С., Супонев К.В., Туренко Л.Г., Рогов А.В., Сажин Г.В. Дата приоритета: 09.07.1979.
107. А. с. 1231673 СССР. Способ фильтрации аэрозолей в зернистом фильтре [Текст] / Шопин В.М., Гладков О.А., Супонев К.В., Лерман Е.Ю., Шпраер В.К., Миселев М.А. Дата приоритета: 15.01.1986.
108. Шопин В.М. Будущее промышленной очистки газов за фильтрацией в слое пористых гранулообразных материалов [Текст] / В.М. Шопин, К.В. Супонев // Журнал Сантехника Отопление Канализация. – 2005, №1. – С. 1 - 5.
109. А. с. 1496055 СССР. Зернистый фильтр для очистки газов от сажи [Текст] / Шопин В.М., Супонев К.В., Теплоухов В.Л. Дата приоритета: 24.08.1989.

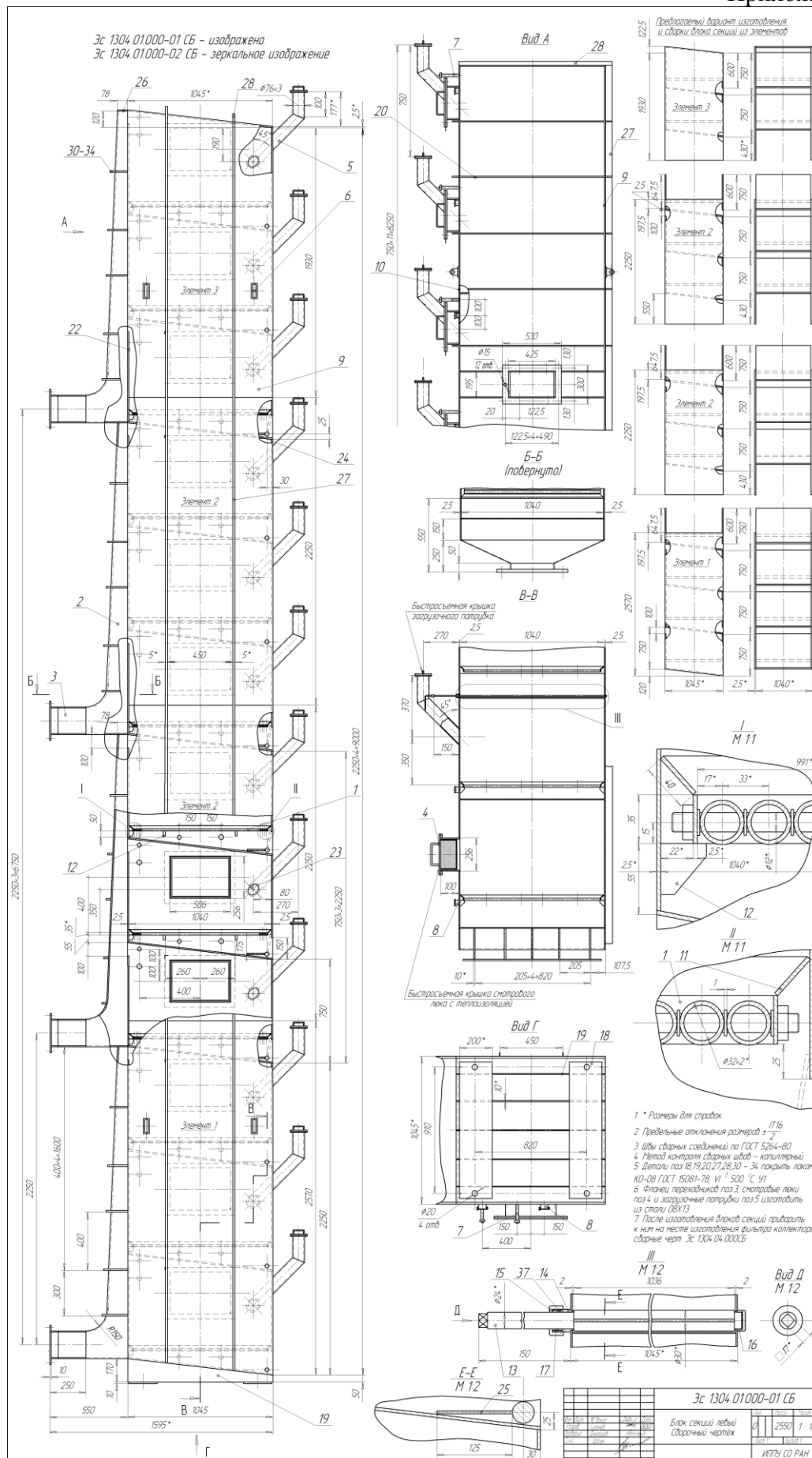
110. Сборник методик по определению концентраций загрязняющих веществ в промышленных выбросах [Текст]. – Ленинград.: Изд-во Гидрометеиздат, 1987. – 269 с.
111. Щеглова А.И. Организация и проведение пылегазовых измерений при решении экологических проблем огнеупорного производства [Текст] / А.И. Щеглова, С.В. Энтин, Е.В. Архангельская // Новые огнеупоры. – 2003. – №3. – С. 47 - 54.
112. Шопин В.М. Методика проведения дисперсного анализа сажевого аэрозоля в потоке [Текст] / В.М. Шопин, К.В. Супонев / ВНИИСП. – Омск, 1973. – 50 с.
113. Скрыбин Г.М. Временная инструкция по определению дисперсного состава пылей ротационным анализатором РАД-1 / Государственный научно-исследовательский институт по промышленной и санитарной очистке газов (Семибратовский филиал) [Текст] / Г.М. Скрыбин. – 1971. – 60 с.
114. Скрыбин Г.М. Ротационные анализаторы дисперсного состава промышленной пыли. Тематический обзор [Текст] /. – М., 1973. – 33 с.
115. Алифанова А.И. Аналитическое описание кривых распределения промышленных пыли [Текст] / А.И. Алифанова // Вестник БГГУ им. Шухова В.Г. – 2003, №6. – С. 8 - 10.
116. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельчённых материалов [Текст] / П.А. Коузов. Издание 3-е переработанное. – М.: Химия, 1987. – 264 с.
117. Анисимов К.Г. Исследование структуры давления внутри зернистого слоя [Текст] / К.Г. Анисимов, В.И. Волков // Известия Алтайского государственного университета. – 2000, №15. – С. 1 - 3.
118. Борозденко Д.А. Изучение спектральных характеристик потока и распределения давления внутри зернистого слоя [Текст] / Д.А. Борозденко // Известия Алтайского государственного университета. – 2001. – №19. – С. 95-94.

119. Красовицкий Ю.В. Разделение аэрозолей при постоянной скорости процесса и постепенном закупоривании пор перегородки [Текст] / Ю.В. Красовицкий, В.А. Жужиков, К.А. Красовицкая, В.Я. Лыгина // Химическая промышленность. – 1974. – №4. – С. 56 - 58.
120. Красовицкий Ю.В. К вопросу о разделении полидисперсных аэрозолей зернистыми фильтровальными перегородками [Текст] / Ю.В. Красовицкий, В.Я. Лыгина, К.А. Красовицкая // Инженерно-физический журнал. – 1976. – т. XXX, №1. – С. 147 - 150.
121. Guo-hua Yang. Experimental Study on a New Dual-Layer Granular Bed Filter for Removing Particulates [Текст] / Guo-hua Yang, Jiang-hua Zhou // Journal of China University of Mining & Technology. – 2007. – V.17, №2. – С. 201 - 204.
122. ГОСТ 12597-80. Сорбенты. Метод определения доли воды в активных углях и катализаторах на их основе [Текст]. – М., 1989.
123. Herd C.R. Morphology of carbon black aggregates: fractal versus Euclidean geometry [Текст] / C.R. Herd, G.C. McDonald, W.M. Hess // Rubber Chem. Technol. – 1991. – V.65. – С. 107 - 129.
124. Razdiakonova G.I., Dugnova Y.V. Experimental estimation of a volume of pores of aggregates Carbon black [Текст] / Mater. II Int. Symp. on Carbon for Catalysis –CarboCat-II/ July 11-13 St. Petersburg – 2006. – С. 186-187.
125. Филиппева А.А., Раздьяконова Г.И., Шопин В.М., Лихолобов В.А. Исследование процесса формирования плотноупакованного материала на основе глобулярного дисперсного углерода [Текст] // Перспективные материалы. – 2010. – №3. – С. 84-89.
126. Кузнецов А.М. Критическая скорость начала псевдоожижения круглых твёрдых частиц [Текст] / А.М. Кузнецов, В.В. Самсонов, А.П. Звягинцев // Химическая промышленность. – 2006. – т.83, №4. – С. 185 - 189.
127. Delebarre. A. Revisiting the Wen and Yu Equations for Minimum Fluidization Velocity Prediction [Текст] / A. Delebarre. // Chemical Engineering Research and Design. – 2004. – V.82, issue 5. – С. 587 - 590.

128. Пат. 2317134 Российская федерация. Зернистый фильтр для выделения высокодисперсной сажи из аэрозольных потоков [Текст] / Шопин В.М., Супонев К.В., Дмитриев К.И. Дата приоритета: 29.05.2006.
129. Фукс Н.А. Механика аэрозолей [Текст] / Н.А. Фукс. – М.: Академия наук СССР, 1955. – 351 с.
130. Шопин В.М. Опыт использования стеклотканевых рукавных фильтров в производстве дисперсного технического углерода [Текст] / В.М. Шопин, И.В. Ивановский, К.В. Супонев // Тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. Химия – XXI век: Новые технологии, новые продукты. – 2005. – С. 274 - 277.

ПРИЛОЖЕНИЕ





УТВЕРЖДАЮ

Руководитель проекта
Директор Института проблем переработки
углеводородов СО РАН
член-корреспондент РАН


В.А.Лихолобов

«26» сентября 2008 г.

АКТ № 16

предварительных испытаний

процесса фильтрации высокодисперсных аэрозолей
в опытной установке мощностью 10 000 м³/ч с использованием
углеродного материала АКМ-УФ

Государственный контракт от 06 августа 2007 г. № 02.523.12.3005,

Шифр 2007-3-2.3-28-02-008

Этап 4

26 сентября 2008г.

г. Омск

Комиссия в составе:

Председателя:	зам. директора Института по научной работе	М. С. Цехановича
членов комиссии:	главного научного сотрудника	В. Ф. Суровикина
	старшего научного сотрудника	Ю. В. Суровикина
	старшего научного сотрудника	В. М. Шопина
секретаря комиссии:	ученого секретаря	Р. Х. Карымовой,

назначенная приказом по Институту проблем переработки углеводородов СО РАН от "04" сентября 2007 г. № 47, составила настоящий акт о том, что в период с 22 сентября 2008 г. по 25 сентября 2008 г. проведены предварительные испытания:

- углеродного фильтрующего материала АКМ-УФ в технологическом процессе фильтрации аэрозолей на опытной установке зернистого фильтра (объект испытания 1)

- опытной установки фильтрации высокодисперсных аэрозолей с использованием углеродного фильтрующего материала АКМ-УФ в зернистом фильтре ФЗ-24/8×3 Эс 1305.00.000 (объект испытания 2)

на предмет их соответствия требованиям Технического задания.

Испытания проведены в отделе экспериментальных технологий углеродных материалов Института проблем переработки углеводородов СО РАН по Программе и методикам предварительных испытаний углеродного материала АКМ-УФ в процессе

фильтрации аэрозолей в опытной установке зернистого фильтра ФЗ-24/8×3 Эс 1305.00.000 ПМ 1.

1 Комиссией установлено:

1.1 Программа предварительных испытаний выполнена полностью.

1.2 Состав и комплектность объектов испытаний соответствуют технической документации.

1.3 Объекты испытаний и его техническая документация выдержали предварительные испытания по пп. 4.1–4.4 Программы и методик предварительных испытаний углеродного материала АКМ-УФ в процессе фильтрации аэрозолей в опытной установке зернистого фильтра ФЗ-24/8×3 Эс 1305.00.000 ПМ 1.

2 Выводы

2.1 Объекты испытаний соответствуют требованиям, заданным в техническом задании (пп. 4.1.3.2, 4.1.8, 4.1.9, 4.1.12, 4.1.13), перечисленным в Программе и методиках

2.2 Техническая документация на объекты испытаний в техническом и патентно-правовом аспекте соответствует заданным в техническом задании требованиям, перечисленным в Программе и методиках

2.3 Объекты испытаний и их техническая документация готовы для предъявления на государственные приемочные испытания.

3 Замечания и рекомендации

Присвоить рабочей конструкторской и технологической документации «Опытная установка фильтрации высокодисперсных аэрозолей мощностью 10 000 м³/ч» в соответствии с основным конструкторским документом Эс 1305.00.00.000 литеру «О».

Приложения

А Отчет о патентных исследованиях (предъявлен на этапе 2 выполнения Госконтракта)..

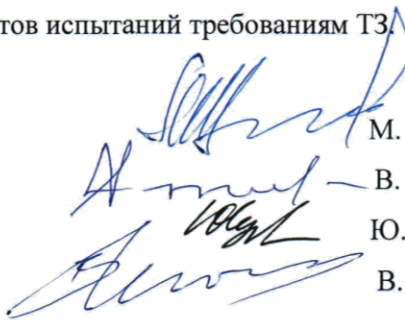
Б Протокол № 1 от 25 сентября 2008 г. испытаний по пунктам № 4.1.- 4.4. ПМ.

В Ведомость соответствия результатов испытаний требованиям ТЗ.

Председатель комиссии

Члены комиссии

Секретарь комиссии


М. С. Цеханович
В. Ф. Суровикин
Ю. В. Суровикин
В. М. Шопин
Р. Х. Карымова

ПРОТОКОЛ

испытаний по пунктам № 4.1- 4.4

**Программы и методики предварительных испытаний процесса фильтрации высокодисперсных аэрозолей
в опытной установке мощностью 10 000 м³/ч с использованием
углеродного материала АКМ-УФ**

№ 1

25 сентября 2008 г

1. Объекты испытаний:

- углеродный фильтрующий материал АКМ-УФ в технологическом процессе фильтрации аэрозолей на опытной установке зернистого фильтра (объект испытания 1)

- опытная установка фильтрации высокодисперсных аэрозолей с использованием углеродного фильтрующего материала АКМ-УФ в зернистом фильтре ФЗ-24/8×3 Эс 1305.00.000 (объект испытания 2)

2. **Цель испытания:** проверка соответствия объектов испытания пунктам технического задания: 4.1.3 Требования к АКМ-УФ (4.1.3.2); 4.1.8 Требования к конструкции зернистого фильтра ФЗ с применением АКМ-УФ; 4.1.9 Требования к конструкторской и технологической документации; 4.1.12 Требования по эксплуатации, удобству технического обслуживания, ремонту и хранению; 4.1.13 Требования по безопасности.

3 **Дата начала испытания:** 22 сентября 2008 г.

4 **Дата окончания испытания:** 25 сентября 2008г.

5 **Место проведения испытания:** г.Омск, Институт проблем переработки углеводородов СО РАН

6 Результаты испытания

Наименование параметра	Ед. изм.	Номера пунктов		Требования к параметру		Измеренное значение
		Программы испытаний	Методик испытаний	Номинальное значение	Предельное отклонение	
Проверка комплектности качества КД и и ТД		4.1	6.1	Соответствие		Соответствует
Проверка ТД на соответствие требованиям ТЗ		4.2	6.2	Соответствие		Соответствует
Контроль выполнения технологического процесса		4.3	6.3			
Производительность						

по очищенному аэрозолю	м ³ /ч	4.3.1.1	6.3.1	10000	не менее	13000-14000
Температура аэрозоля:						
- на входе в зернистый фильтр	°C	4.3.1.2	6.3.2	265	±15	260-280
- на выходе из зернистого фильтра	°C			225	±25	230-250
Скорость фильтрации	м/с	4.3.1.3	6.3.3.	0,2-0,4		0,25-0,3
Концентрация твёрдых частиц в аэрозоле:						
- на входе в зернистый фильтр	г/м ³	4.3.1.4.	6.3.4.	5	не более	4,2-5,0
- на выходе из зернистого фильтра	мг/м ³			50	не более	40-50
Давление аэрозоля:						
- на входе в зернистый фильтр	Па	4.3.1.5	6.3.5	5250	±250	4700-5500
- на выходе из зернистого фильтра	Па			2000	±250	1800-2500
Аэродинамическое сопротивление зернистого фильтра	Па	4.3.1.6	6.3.5	3000		2900-3000
Скорость регенерации фильтрующего слоя	м/с	4.3.1.7	6.3.6	0,5-0,6		0,5-0,6
Время						
- фильтрации аэрозоля	сек	4.3.1.8		до 300		185
- регенерации фильтрующего слоя				до 30		25
Контроль показателей технологического оборудования		4.4	6.4			
Проведение входного контроля		4.4.1	6.4.1	Соответствие		Соответствует
Проведение приёмочного контроля		4.4.2	6.4.2	Соответствие		Соответствует
Проверка удобства обслуживания и проведения ремонта		4.4.3	6.4.3	Соответствие		Соответствует
Подготовка фильтрующего слоя к предварительным испытаниям		4.4.4	6.4.4	Соответствие		Соответствует

7 Замечания и рекомендации: замечаний нет.

8 Выводы

8.1 Объекты испытания :

- углеродный фильтрующий материал АКМ-УФ в технологическом процессе фильтрации аэрозолей на опытной установке зернистого фильтра (объект испытания 1)
- опытная установка фильтрации высокодисперсных аэрозолей с использованием углеродного фильтрующего материала АКМ-УФ в зернистом фильтре ФЗ-24/8×3 Эс 1305.00.000 (объект испытания 2)

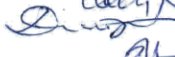
выдержали испытания по пунктам 4.1 - 4.4 Программы и методик предварительных испытаний.

8.2 Объекты испытания :

- углеродный фильтрующий материал АКМ-УФ в технологическом процессе фильтрации аэрозолей на опытной установке зернистого фильтра (объект испытания 1)
- опытная установка фильтрации высокодисперсных аэрозолей с использованием углеродного фильтрующего материала АКМ-УФ в зернистом фильтре ФЗ-24/8×3 Эс 1305.00.000 (объект испытания 2)

соответствуют требованиям пунктов . 4.1.3.2, 4.1.8, 4.1.9, 4.1.12, 4.1.13 технического задания Государственного контракта от 06 августа 2007 г. № 02.523.12.3005.

Испытания проводили:

 старший научный сотрудник Шопин В.М.
 ведущий технолог Супонев К.В.
 ведущий технолог Оплева Е.С.
 инженер Дмитриев К.И.
 инженер Змейков С.А.



АКТ
государственных приемочных испытаний
процесса фильтрации высокодисперсных аэрозолей
в опытной установке мощностью 10 000 м³/ч с использованием
углеродного материала АКМ-УФ

Государственный контракт от 06 августа 2007 г. № 02.523.12.3005
Шифр 2007-3-2.3-28-02-008

«24» октября 2008 г.

Москва

Комиссия Роснауки для проведения государственных приемочных испытаний опытных образцов продукции по мероприятию 2.3 «Осуществление комплексных проектов, в том числе разработка конкурентоспособных технологий, предназначенных для последующей коммерциализации в области индустрии наносистем и материалов», в составе:

Дроженко Владимир Георгиевич	заместитель начальника Управления развития поисковых исследований и новых технологий (председатель комиссии)
Люев Александр Михайлович	заместитель начальника Управления программ и проектов (заместитель председателя комиссии)
Тагильцева Наталья Борисовна	главный специалист-эксперт Управления развития поисковых исследований и новых технологий (секретарь комиссии)
Королькова Татьяна Витальевна	главный специалист ГУ «Государственная дирекция ЦНТП» (по согласованию)
Логунов Сергей Алексеевич	заместитель начальник отдела Управления развития поисковых исследований и новых технологий
Нелидова Галина Александровна	главный специалист-эксперт Управления развития поисковых исследований и новых технологий
Павлюк Богдан Филиппович	главный специалист-эксперт Управления программ и проектов
Савченко Александр Григорьевич	начальник отдела Управления развития поисковых исследований и новых технологий
Борисова Елена Константиновна	представитель организаций, осуществляющих мониторинг, - генеральный директор корпорации «МетаСинтез» (по согласованию)
Цеханович Марк Соломонович	представитель головного исполнителя - заместитель директора Института проблем переработки углеводородов СО РАН,

назначенная приказом Федерального агентства по науке и инновациям от 28 апреля 2008г. № 86, провела государственные приемочные испытания процесса фильтрации высокодисперсных аэрозолей в опытной установке мощностью 10 000 м³/ч с использованием углеродного материала АКМ-УФ.

Место проведения испытаний - Институт проблем переработки углеводородов СО РАН (ИППУ СО РАН), г. Омск.

1 Комиссией установлено

1.1 Программа государственных приемочных испытаний процесса фильтрации высокодисперсных аэрозолей в опытной установке мощностью 10 000 м³/ч с использованием углеродного материала АКМ-УФ выполнена полностью.

1.2 Состав и комплектность объекта испытаний соответствуют технической документации.

1.3 Объект испытаний и его техническая документация выдержали государственные приёмочные испытания по Программе и методикам государственных приёмочных испытаний процесса фильтрации высокодисперсных аэрозолей в опытной установке мощностью 10 000 м³/ч с использованием углеродного материала АКМ-УФ Эс 1305.00.000 ПМ1

2 Выводы

2.1 Объект испытаний соответствует всем требованиям, заданным техническим заданием.

2.2 Техническая документация на объект испытаний в техническом и патентно-правовом аспекте пригодна для постановки на производство с последующей реализацией продукции.

3. Замечания и рекомендации.

3.1 Присвоить рабочей конструкторской документации Эс 1305.00.00.000 литеру «О1».

3.2 Технологический процесс фильтрации аэрозолей с использованием углеродного материала АКМ-УФ рекомендуется для опытно-промышленной отработки и промышленной реализации.

Приложения:

А Акт предварительных испытаний углеродного фильтрующего материала АКМ-УФ в технологическом процессе фильтрации аэрозолей на опытной установке зернистого фильтра от 26.09.2008 № 16

Б Отчёт о патентных исследованиях (представлен на этапе 2 выполнения работы).

В Протоколы испытаний по пунктам Программы и методик государственных

приемочных испытаний процесса фильтрации высокодисперсных аэрозолей в опытной установке мощностью 10 000 м³/ч с использованием углеродного материала АКМ-УФ

Г Ведомость соответствия результатов испытаний требованиям ТЗ.

Председатель комиссии

Члены комиссии

Секретарь комиссии

Представитель головного
исполнителя



В.Г.Дроженко

А.М.Люев

Т.В.Королькова

С.А.Логунов

Г.А.Нелидова

Б.Ф.Павлюк



А.Г.Савченко

Е.К.Борисова

Н.Б.Тагильцева



М.С.Цеханович