

АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КАТАЛИТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРАХ ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ САЖИ

Т. Л. Павлова, Н. В. Верниковская, Н. А. Чумакова, А. С. Носков

Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, 630090 Новосибирск
vernik@catalysis.nsk.su, pavt@catalysis.nsk.ru

Проведено математическое моделирование динамики накопления частиц сажи и окислительной регенерации фильтра на основе каталитически активных материалов. Исследовано влияние параметров рассматриваемой модели на динамику этих процессов.

Ключевые слова: дизельная сажа, математическое моделирование, каталитический фильтр, окислительная регенерация.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наряду с автомобилями с бензиновыми двигателями внутреннего сгорания растет количество автомобилей с дизельными двигателями, что обусловлено их высокой эффективностью и низкой стоимостью топлива. Однако выхлопные газы дизельных двигателей содержат большее количество сажи по сравнению с отработанными газами бензиновых двигателей.

Существуют различные методы очистки выхлопных газов дизельного двигателя от сажевых частиц, состоящих главным образом из углерода, золы, несгоревших или частично сгоревших углеводородов и сульфатов. Наиболее перспективными считаются методы, основанные на использовании каталитических и некаталитических фильтров. Активно исследуются два типа фильтров для улавливания сажи. Первый — это блоки с узкими длинными каналами, открытыми с одной стороны [1, 2]. Стенки каналов проницаемы для газа и непроницаемы для частиц. Эффективность улавливания сажи в фильтрах этого типа очень высока, но требуется периодическое окисление уловленной сажи, чтобы предотвратить нежелательный рост перепада давления на фильтре. Термическое окисление сажи кислородом, содержащимся в выхлопных газах, происходит при температурах, превышающих 823 К. Выхлопные газы дизельного двигателя редко имеют такую температуру, поэтому следует либо увеличивать температуру выхлопных газов за счет изменения режима работы двигателя, либо понижать температуру окисления сажи. Этого можно достичь, размещая катализатор на стенках каналов. Однако эффективность каталитическо-

го окисления сажи также невысока из-за малой поверхности контакта «сажа — катализатор». Таким образом, сложность регенерации является основным недостатком таких фильтров.

Другой тип фильтров представлен сплошными цилиндрами из вспененных материалов с высокой порозностью [3]. Частицы сажи могут проникать глубоко внутрь фильтра, его проще регенерировать, достигается лучший контакт между частицами сажи и катализатором. Фильтр может удерживать достаточно большое количество сажи, при этом рост перепада давления незначителен, поэтому можно пропускать поток с относительно высокой линейной скоростью.

Для исследования методами математического моделирования процессов в фильтрах из вспененных материалов используют подходы, предложенные ранее для теоретического исследования фильтрации частиц через фильтры из волокнистых материалов. Так, в [3] для исследования процессов в фильтрах в виде сплошных цилиндров предложена двухфазная по частицам сажи и однофазная по температуре математическая модель, которая учитывает основные механизмы улавливания частиц на внутренней поверхности пористого материала, а именно: инертное соударение, перехват, броуновскую диффузию и их сочетания. Кроме того, учитывается изменение порозности по мере заполнения фильтра частицами. Основное внимание было уделено исследованию изменения перепада давления в ходе заполнения фильтра сажой в зависимости от ее содержания в выхлопных газах, температуры потока и используемых катализаторов. Процесс регенерации фильтра детально не исследовался.

Цель настоящей работы — теоретическое исследование процессов накопления частиц сажи в фильтре из вспененного материала и окислительной регенерации фильтра в предположении, что они проводятся последовательно либо происходят одновременно (режим фильтрации с одновременным окислением сажи), и изучение влияния параметров модели на динамику этих процессов.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для расчета фильтрации и горения сажи в фильтре используется модель, приведенная в [3], со следующими упрощениями:

— линейная скорость газа, его плотность и теплоемкость не изменяются по длине фильтра;

— плотность и теплоемкость фильтра не меняются в ходе процесса;

— не учитывается аксиальная теплопроводность фильтра, так как его теплопроводность мала ($k_t = 1,13 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$);

— не учитывается изменение концентрации азота в газовой смеси, так как азот инертен в реакциях окисления сажи.

Основные уравнения модели с учетом перечисленных изменений приведены ниже:

• уравнение для концентрации частиц сажи в газовой фазе:

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = -c\eta\varphi, \quad (1)$$

где c — массовая концентрация частиц сажи в газовой фазе, u — скорость подачи газа в фильтр, приведенная к нормальным условиям, t — время, x — пространственная переменная по глубине фильтра, ε — порозность загрязненного фильтра, η — общая эффективность фильтрации, φ — глубина проникновения сажи по фильтру;

• уравнение для массовой концентрации сажи, осаждаемой в фильтре:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = c\eta\varphi - r_{\text{reac}}, \quad (2)$$

где m — концентрация отфильтрованной сажи в фильтре, r_{reac} — скорость реакции окисления сажи;

• уравнения массового баланса O_2 , CO_2 :

$$\varepsilon \frac{\partial c_{\text{O}_2}}{\partial t} + u \frac{\partial c_{\text{O}_2}}{\partial x} = -\frac{r_{\text{reac}}}{M_{\text{C}}}, \quad (3)$$

$$\varepsilon \frac{\partial c_{\text{CO}_2}}{\partial t} + u \frac{\partial c_{\text{CO}_2}}{\partial x} = \frac{r_{\text{reac}}}{M_{\text{C}}}, \quad (4)$$

где c_{O_2} , c_{CO_2} — мольные концентрации O_2 и CO_2 в газовой фазе, M_{C} — молярная масса углерода;

• уравнение теплового баланса:

$$\rho_f c_{p,t} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_g u c_{p,g} \frac{\partial T}{\partial x} = r_{\text{reac}}(-\Delta H), \quad (5)$$

где ρ_f , ρ_g — плотности фильтра и газовой фазы, $c_{p,g}$, $c_{p,t}$ — удельные теплоемкости газовой фазы и материала фильтра, T — температура фильтра и газовой фазы, К; $\Delta H = 32800 \text{ кДж}/\text{кг}$ — массовая энтальпия реакции окисления углерода.

Начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} x = 0: \quad & c(0, t) = c_{in}, \quad c_i(0, t) = c_{in,i} \\ & (i = \text{O}_2, \text{CO}_2), \quad T(0, t) = T_{in}, \\ t = 0: \quad & m(x, 0) = m_0(x), \quad c(x, 0) = c_0(x), \\ & c_i(x, 0) = c_{0,i}(x) (i = \text{O}_2, \text{CO}_2), \\ & T(x, 0) = T_0(x). \end{aligned} \quad (6)$$

Накопление сажи на внутренней поверхности материала фильтра происходит за счет ее улавливания посредством таких аддитивных механизмов, как инертное соударение, перехват, броуновская диффузия и сочетание двух последних механизмов. При этом не учитывается накопление сажи в закрытых с одной стороны (слепых) порах, так как доля таких пор в фильтрах из вспененных материалов незначительна. Итак, выражение для эффективности фильтрации с учетом того, что часть уловленной сажи может вернуться в газовый поток, примет вид

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_{23} - \eta_{\text{stick}}, \quad (7)$$

где η_1 , η_2 , η_3 — эффективность фильтрации вследствие инертного соударения, перехвата и броуновской диффузии соответственно; η_{23} отражает вклад взаимодействия между перехватом и броуновской диффузией; η_{stick} — уменьшение η , вызванное возвратом частиц в газовый поток [3].

Эффективность улавливания сажи фильтром зависит от его порозности ε , диаметра пор d_{pore} и диаметра волокна фильтра d_f , которые изменяются в ходе заполнения или регенерации фильтра. Зависимости этих параметров от концентрации сажи определялись соотношениями [3]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \frac{\rho'_s - m}{\rho'_s}, \quad (8)$$

$$d_{pore} = d_{pore,0} \sqrt{\frac{\rho'_s - m}{\rho'_s}}, \quad (9)$$

$$d_f = d_{f,0} \sqrt{1 + \frac{2m}{\rho'_s(1 - \varepsilon_0)}}, \quad (10)$$

где ε_0 — порозность чистого фильтра, ρ'_s — плотность осажденного (размещенного) углеродного слоя, $d_{pore,0}$ — диаметр пор чистого фильтра, $d_{f,0}$ — диаметр чистого «эквивалентного» волокна.

Кроме того, эффективность улавливания сажи зависит от доли сажи, которая может быть профильтрована на единицу глубины фильтра [3]:

$$\varphi = \frac{4(1 - \varepsilon_0)}{\pi d_{f,0}^2} d_f. \quad (11)$$

Скорость реакции окисления сажи рассчитывается для фильтров с катализатором и принимается пропорциональной внешней поверхности частиц сажи [3]:

$$r_{reac} = k S m_{cat} p_{O_2}^{1/2}, \quad (12)$$

где k — константа скорости реакции, зависящая от температуры по закону Аррениуса, (кг сажи·м)/(кг катализатора·с·атм^{1/2}); S — общая геометрическая поверхность частиц сажи, 1/м; m_{cat} — масса катализатора на единицу объема фильтра, кг/м³; p_{O_2} — парциальное давление кислорода, атм.

2. АЛГОРИТМ

Для численного решения модели (1)–(6) разработан и реализован эффективный алгоритм, позволяющий рассчитывать распределение концентраций и температуры по фильтру и эволюцию системы во времени. Алгоритм основан на использовании метода «прямых», идея которого состоит в том, чтобы производные по пространственной переменной x аппроксимировать разностными выражениями в узлах сетки и перейти, таким образом, от дифференциальных уравнений в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений по времени для значений искоемых функций в узлах сетки по длине [4].

Полученная система уравнений интегрируется на интервалах фиксированной длины h по времени, при этом используется следующая схема бегущего счета: если известно решение в момент времени t_0 , то интегрирование выполняется от t_0 до $t_1 = t_0 + h$ последовательно в направлении потока в каждом внутреннем узле методом Розенброка 2-го порядка точности [5]. Отметим, что переменный шаг в каждом узле интегрирования выбирается автоматически так, что гарантируется заданная точность вычислений [6]. Затем также последовательно во всех узлах по x интегрирование выполняется до следующего значения $t_2 = t_1 + h$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В расчетах использованы следующие значения параметров: длина фильтра 0,017 м [3]; массовое содержание катализатора внутри фильтра 17 %; концентрации на входе в фильтр: частиц сажи в газовой фазе — $c_{in} = 0,13$ г/нм³, кислорода — $c_{O_2, in} = 3,57$ моль/нм³, углекислого газа — $c_{CO_2, in} = 3,12$ моль/нм³; температура на входе в фильтр $T_{in} = 473 \div 673$ К, диаметр частиц сажи $0,05 \div 0,2$ мкм.

Кроме того, были оценены следующие параметры модели: диаметр пор фильтра $d_{pore,0} = 2,4 \cdot 10^{-4}$ м [3], энергия активации окисления сажи 72700 Дж/моль [7], предэкспоненциальный множитель константы скорости $2,17 \cdot 10^{-5}$ (кг сажи·м)/(кг катализатора·атм^{1/2}·с) [7, 8].

Отметим, что при $T_{in} = 473$ К окисление сажи практически не происходит, этот режим соответствует накоплению сажи в фильтре. Если $T_{in} \geq 623$ К, то можно говорить о процессе регенерации, так как содержание сажи в фильтре будет уменьшаться вследствие ее быстрого окисления кислородом. При $523 < T_{in} < 623$ К процессы накопления и окисления сажи происходят одновременно.

3.1. Заполнение каталитического фильтра сажей с последующей окислительной регенерацией

Рассмотрим пример режима последовательного заполнения и регенерации. На рис. 1 показана динамика заполнения фильтра сажей при $T_{in} = 473$ К. Сажа улавливается преимущественно на начальных участках фильтра, к

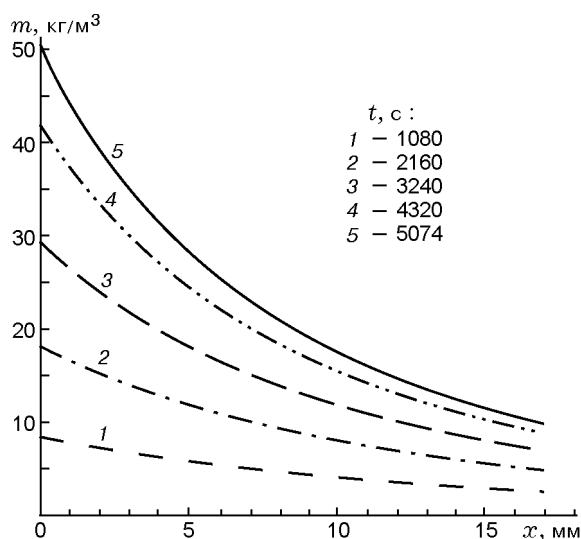


Рис. 1. Заполнение фильтра сажей:
 $T_{in} = 473 \text{ K}$, $d_p = 0,1 \text{ мкм}$, $u = 0,78 \text{ м/с}$

выходу из фильтра концентрация сажи уменьшается почти в четыре раза. Это можно объяснить тем, что по мере заполнения фильтра и увеличения концентрации сажи растет диаметр улавливающего «эквивалентного» волокна (10), уменьшаются диаметр пор (9) и порозность фильтра (8). Так, диаметр «эквивалентного» волокна вырастает от 6,3 мкм в начальный момент времени до 20 мкм к концу цикла заполнения на входном участке фильтра и до 10 мкм на выходном участке. Рост диаметра приводит к тому, что исходя из основных механизмов улавливания всё большее количество частиц сажи осаждается на внутренней поверхности фильтра. Более того, за время процесса улавливания порозность уменьшается от 0,82 (соответствует незаполненному фильтру) до 0,08 на входном участке фильтра и до 0,68 на выходном. Диаметр пор материала фильтра уменьшается от $2,4 \cdot 10^{-4}$ до $7,5 \cdot 10^{-5}$ м на входе и до $2,2 \cdot 10^{-4}$ м на выходе. Уменьшение диаметра пор и порозности фильтра приводит к тому, что частицы сажи все труднее проникают в глубь фильтра. Таким образом, проявляется обратная связь: чем больше концентрация сажи в порах фильтра, тем выше эффективность улавливания и быстрее увеличивается концентрация осажженной в фильтре сажи.

Увеличение концентрации сажи в фильтре приводит к более сильному уменьшению ее содержания в газовой фазе по глубине фильтра. Если в начальный момент времени концентра-

ции сажи в газовой фазе и на входе в фильтр составляют $7,5 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^3$, то в конце цикла концентрация сажи в потоке изменяется от указанного значения на входе до $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^3$ на выходе из фильтра, т. е. уменьшается вдоль фильтра более чем в шесть раз.

Уменьшение диаметра пор и порозности фильтра приводит к повышению перепада давления на фильтре. Резкий рост перепада давления наблюдается после 4000 с, поскольку начиная с этого момента времени порозность на начальном участке фильтра стремится к нулю, что приводит практически к полной непроницаемости фильтра для частиц сажи.

Отметим, что фильтр остается практически изотермичным в процессе заполнения его сажей.

Рассмотрим далее процесс окислительной регенерации фильтра — выгорание осажженной сажи при увеличении входной температуры до 673 К и прежних остальных условиях на входе. В качестве начальных условий $m_0(x)$, $c_0(x)$, $c_{0,i}(x)$, $T_0(x)$ используем профили, полученные в конце стадии заполнения фильтра.

По мере прогрева фильтра потоком на входном участке начинается горение сажи, что приводит к локальному повышению температуры (рис. 2). Это, в свою очередь, ведет к увеличению интенсивности горения сажи, хотя вблизи выхода сажа еще не окисляется, так как фильтр не прогреет. С течением времени зона высоких температур смещается вдоль фильтра в результате конвективного теплопереноса. Это приводит к началу окисления сажи на последующих участках, что еще больше увеличивает температуру. На участках фильтра, отстоящих от входа более чем на 12 мм, наблюдается локальный перегрев до температур выше 1000 К.

В процессе горения сажи изменяются распределения по длине фильтра концентраций O_2 и CO_2 в газовой фазе. Так, в первые 40 с в результате окисления сажи концентрация кислорода на выходе из фильтра снижается с 1,45 до 1,04 моль/м³, а концентрация углекислого газа растет с 1,27 до 1,65 моль/м³. Затем концентрация кислорода повышается практически до входного значения и одновременно снижается концентрация углекислого газа. Это объясняется тем, что интенсивность горения снижается по мере уменьшения концентрации сажи в фильтре, а кислород и CO_2 поступают в фильтр с газовым потоком.

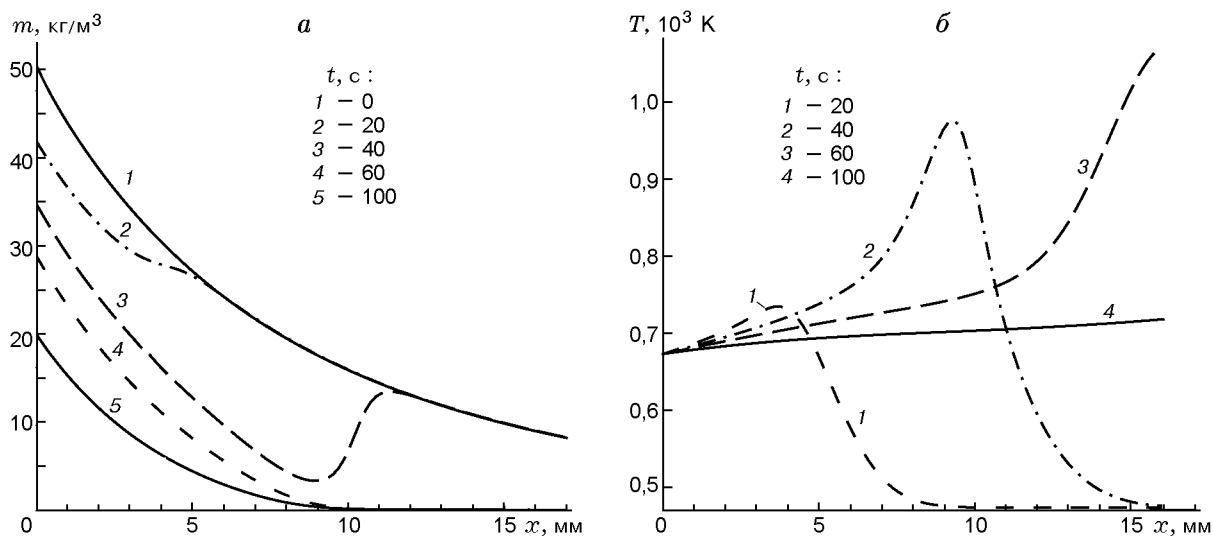


Рис. 2. Динамика изменения концентрации сажи (а) и температуры (б) в фильтре при окислительной регенерации

Изменение диаметра «эквивалентного» улавливающего волокна соответствует уменьшению концентрации сажи в фильтре: в ходе регенерации диаметр волокна уменьшается, а диаметр пор и порозность фильтра растут в результате выгорания осажденных частиц сажи. Как следствие, уменьшается эффективность улавливания сажи, поступающей с газовым потоком, и постепенно повышается концентрация сажи в газовой фазе. Более того, не встречая препятствий, часть сажи проходит через фильтр. Начиная с момента времени 60 с концентрация сажи в газе на выходе остается постоянной, что объясняется динамическим равновесием процессов улавливания сажи и ее горения в фильтре.

В ходе окислительной регенерации перепад давления на фильтре снижается с 7957 до 967 Па. Наиболее интенсивное изменение отмечается в течение первых 30 с — до 2200 Па, что связано с интенсивным выгоранием сажи на входном участке фильтра и освобождением транспортных пор. Можно отметить, что в результате регенерации фильтра концентрация сажи на входном участке уменьшилась в 2,5 раза и практически до нуля на длине 12 мм (рис. 2,а), соответственно этому увеличилась порозность и диаметр пор, уменьшился диаметр «эквивалентного» волокна.

3.2. Параметрический анализ

В качестве параметров, влияющих на тер-

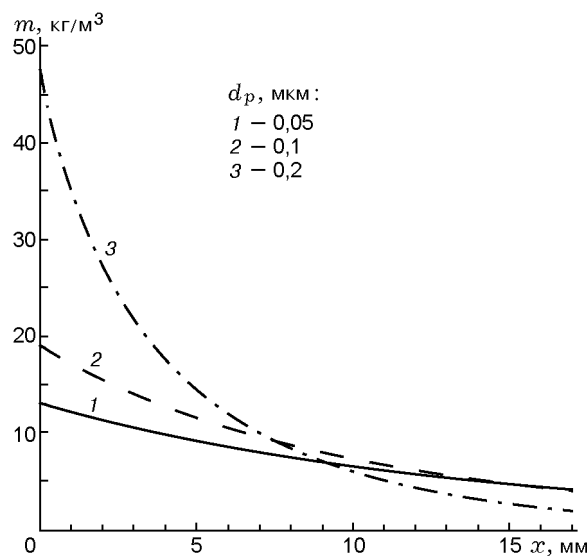


Рис. 3. Влияние диаметра частиц сажи на заполнение фильтра, $t = 2160$ с

мические процессы в фильтре, рассматривались диаметр частиц сажи d_p , линейная скорость газовой смеси u и входная температура.

Для сравнения выбраны три диаметра частиц сажи: $d_p = 0,05, 0,1$ и $0,2$ мкм. Входная температура при заполнении предполагалась постоянной — 473 К, скорость подачи газовой смеси в фильтр 0,78 м/с.

При диаметре частиц $d_p = 0,2$ мкм преимущественно заполняется начальный участок

фильтра, в то время как для частиц меньшего диаметра фильтр заполняется более равномерно по длине (рис. 3). Действительно, более крупные частицы быстрее заполняют начальный участок фильтра, так как с увеличением d_p возрастает эффективность перехвата и инертного соударения частиц сажи с внутренними поверхностями фильтра. Следствием этих процессов является то, что при наличии в газовой смеси крупных частиц сажи заполнение фильтра происходит быстрее. Так, при диаметре частиц $d_p = 0,05$ мкм фильтр заполняется в течение 8657 с, при $d_p = 0,1$ мкм — в течение 5074 с, при $d_p = 0,2$ мкм — в течение 2351 с. При этом средняя концентрация сажи в фильтре в конце процесса заполнения составляла 26,27, 21,82 и 13,13 кг/м³ соответственно.

От диаметра частиц сажи существенно зависит изменение перепада давления во времени. Причем если вначале (до $t = 1500$ с) рост перепада давления практически одинаков для разных частиц, то затем отмечается резкое увеличение перепада давления в случае крупных частиц ($d_p = 0,2$ мкм), что связано с быстрым заполнением начального участка фильтра. Для частиц диаметром $d_p = 0,1$ мкм интенсивное повышение перепада давления начинается гораздо позже (≈ 4000 с), а для частиц диаметром $d_p = 0,05$ мкм увеличение перепада давления практически равномерное в течение процесса заполнения.

Диаметр частиц сажи оказывает влияние и на процесс последующей окислительной регенерации фильтра, а именно на динамику изменения температуры. Регенерация проводилась в течение 100 с при постоянной входной температуре газа 673 К, начиная с условий, соответствующих полному заполнению фильтра. С увеличением диаметра частиц сажи наблюдалось ухудшение регенерации фильтра. В конце регенерации остаточная концентрация сажи в фильтре составила 1,3 кг/м³ на входе и 0,09 кг/м³ на выходе для частиц диаметром $d_p = 0,05$ мкм; 8,1 кг/м³ на входе и 0,12 кг/м³ на выходе при $d_p = 0,1$ мкм; 22 кг/м³ на входе и 0,8 кг/м³ на выходе при $d_p = 0,2$ мкм. Это вызвано тем, что при большем диаметре частиц распределение сажи по длине фильтра в конце процесса заполнения было неравномерным, концентрация сажи внутри фильтра и на выходе была значительно ниже, чем для частиц меньшего диаметра. Поэтому наблюдалось менее интенсивное тепловыделение при горении

крупных частиц сажи и, соответственно, была меньше скорость горения. Так, максимальная температура при горении самых мелких частиц составляет 1230 К ($t = 80$ с), для частиц диаметром $d_p = 0,1$ мкм — 1070 К ($t = 60$ с), а для $d_p = 0,2$ мкм — 720 К ($t = 80$ с).

Соответственно изменению концентрации сажи в фильтре меняются эффективность улавливания и перепад давления (см. таблицу).

Исследовано влияние линейной скорости газовой смеси на заполнение фильтра. Рассмотрены значения скорости $u = 0,39, 0,78$ и $1,56$ м/с при диаметре частиц сажи 0,1 мкм и входной температуре 473 К. Увеличение скорости, а следовательно, количества сажи, поступающей в фильтр за единицу времени, приводит к более быстрому заполнению фильтра, а также к увеличению среднего количества уловленной сажи в фильтре. Так, время максимального заполнения входного участка фильтра составляет 9255, 5074 и 2754 с при линейной скорости подачи газовой смеси в фильтр 0,39, 0,78 и 1,56 м/с соответственно. Среднее количество уловленной при этом сажи равно 19,8, 21,8 и 23,1 кг/м³ соответственно. Отметим, что при увеличении u от 0,39 до 0,78 м/с эффективность улавливания сажи возрастает в 1,5 раза, при дальнейшем повышении u от 0,78 до 1,56 м/с — в 2 раза. Повышение скорости увеличивает эффективность улавливания, причем происходит это за счет инертного соударения (скорость u входит в число Стокса, от которого зависит параметр η_1).

На рис. 4 показано влияние входной температуры на перепад давления в фильтре. При низкой входной температуре перепад давления повышается до больших значений (кривая 1), так как преобладает процесс заполнения фильтра, окисления сажи практически не происходит. В этом случае требуется периодическая регенерация фильтра путем подъема температуры. Если увеличить входную температуру газовой смеси до 523 К и выше, то заполнение фильтра сажей и ее окисление будут протекать одновременно. Причем если при $T_{in} = 523$ К преобладает заполнение фильтра и перепад давления увеличивается (кривая 2), то при $T_{in} = 573$ и 623 К устанавливается равновесие процессов заполнения и горения сажи, перепад давления остается практически постоянным (соответственно кривые 3 и 4).

На рис. 5 приведена зависимость доли уловленной сажи от времени для процесса од-

Изменение перепада давления Δp и эффективности улавливания сажи в процессе регенерации фильтра при различных диаметрах частиц сажи

d_p , мкм	Δp , Па		Эффективность, %	
	максимальное значение	минимальное значение	начало процесса	конец процесса
0,05	10302	816	62	54
0,1	7957	857	76	68
0,2	4953	1020	94	92

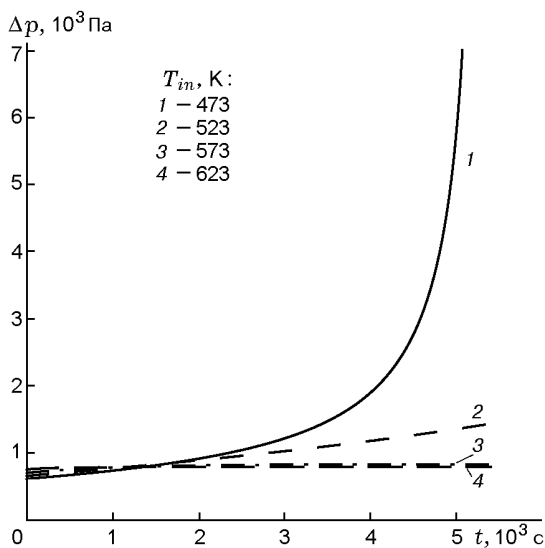


Рис. 4. Влияние входной температуры на изменение перепада давления в фильтре:

$d_p = 0,1$ мкм, $u = 0,78$ м/с

новременного заполнения фильтра и окисления сажи (кривая 2) и для последовательного протекания этих процессов (кривая 1). Доля уловленной сажи при $T_{in} = 623$ К остается постоянной во времени и составляет 70 %. Если процесс вести последовательно (заполнение при $T_{in} = 473$ К в течение 5074 с, затем окислительная регенерация при $T_{in} = 623$ К в течение 100 с), то доля уловленной сажи меняется во времени: от 74 до 82 % при заполнении, от 82 до 70 % при горении, что в среднем составляет 77 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено математическое моделирование динамики термических процессов заполнения фильтра и последующего окисления сажи в каталитических фильтрах, а также

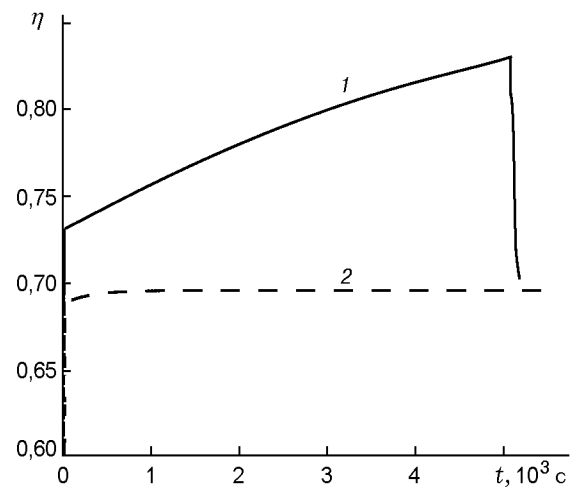


Рис. 5. Эффективность (η) улавливания сажи в фильтре:

$d_p = 0,1$ мкм, $u = 0,78$ м/с; 1 — режим последовательного заполнения и окисления ($T_{in} = 473$ К, температура горения 673 К); 2 — режим одновременного заполнения и окисления ($T_{in} = 623$ К)

процесса одновременного заполнения и окисления. Исследовано влияние диаметра частиц сажи на процессы заполнения и окисления, а также влияние входной температуры на процесс одновременного заполнения и окисления.

Приведенный пример режима последовательного заполнения и регенерации фильтра иллюстрирует выбор оптимальной температуры в ходе регенерации. Температура должна быть такой, чтобы можно было добиться наиболее полного выгорания сажи и одновременно избежать существенных локальных перегревов фильтра.

Показано, что для крупных частиц ($d_p = 0,2$ мкм) происходит интенсивное заполнение фильтра, особенно его начального участка, наблюдается резкий рост гидравлического сопротивления фильтра, поэтому при улавливании крупных частиц предпочтителен режим одно-

временного заполнения и окисления (входная температура $523 \div 623$ К). При улавливании частиц меньшего диаметра ($d_p = 0,05$ и $0,1$ мкм) наблюдается более однородное по длине заполнение фильтра и более равномерный рост перепада давления. В этом случае возможно чередование заполнения и окислительной регенерации каждые 50 мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Konstandopoulos A. G., Kostoglou M.** Reciprocating flow regeneration of soot filters // *Combust. Flame*. 2000. V. 121. P. 488–500.
2. **Van Setten B. A. A. L., Makkee M., Moulijn J. A.** Science and technology of catalytic diesel particulate filters // *Catal. Rev.* 2001. V. 43, N 4. P. 489–564.
3. **Ambrogio M., Saracco G., Specchia V.** Combining filtration and catalytic combustion in particulate traps for diesel exhaust treatment // *Chem. Eng. Sci.* 2001. V. 56. P. 1613–1621.
4. **Флетчер К.** Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.: Мир, 1991. Т. I.
5. **Новиков Е. А.** Численные методы решения дифференциальных уравнений химической кинетики // *Математические методы в химической кинетике*. Новосибирск: Наука, 1990. С. 53–68.
6. **Бибин В. Н.** Эффективные методы решения прямых и обратных задач химической кинетики // XII Междунар. конф. по химическим реакторам. Новосибирск, 1996. Ч. I. С. 127–132.
7. **Ciambelli P., Corbo P., Gambino M., et al.** Catalytic combustion of carbon particulate // *Catal. Today*. 1996. V. 27. P. 99–106.
8. **Serra V., Saracco G., Badini C., Specchia V.** Combustion of carbonaceous materials by Cu-K-V based catalysts. II. Reaction mechanism // *Appl. Catal. B: Environmental*. 1997. N 11. P. 329–346.

Поступила в редакцию 21/III 2003 г.