

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ САЖИСТЫХ ЧАСТИЦ В КОНВЕКТИВНЫХ ПУЧКАХ ВОДОТРУБНЫХ КОТЛОВ

### DETERMINATION OF SOOT PARTICLES DEPOSITION RATE IN CONVECTIVE BEAMS OF WATER-TUBE BOILERS

Представлено описание методики, позволяющей определить скорость осаждения сажистых частиц применительно к условиям работы водотрубных котлоагрегатов, работающих в условиях запыленного потока дымовых газов. Дано описание сажистых частиц и причин их возникновения в процессе сжигания топлива. В применяемой методике используются критериальные уравнения, выбираемые для соответствующего режима осаждения частиц и содержащие величины, зависящие от скорости осаждения и диаметра сажистых частиц, вязкости и температуры продуктов сгорания. Методика рассмотрена на примере параметров работы котлоагрегата КВ-ГМ-0,8 с номинальной нагрузкой. Представлены результаты расчета скорости осаждения сажистых частиц в потоке продуктов сгорания с температурой от 100 до 1100 °С, где в ходе проведения расчетов учитывался диаметр твердых частиц, варьирующийся от 0,01 до 0,35 мкм.

*Ключевые слова:* описание методики, сажистые частицы, поток дымовых газов, скорость осаждения, отопительный котел.

The article describes a methodology for determining the deposition rate of particulate matter in relation to the operating conditions of the water-tube boilers operating in a dusty flue gas flow. The description of soot particles and the causes of their occurrence in the process of fuel combustion are given. The applied methodology uses criteria equations selected for the appropriate mode of particle deposition, and containing values depending on the deposition rate and diameter of carbonaceous particles, viscosity and temperature of combustion products. The methodology is considered on the example of the parameters of the operation of the KV-GM-0.8 boiler unit at rated power. The results of calculating the deposition rate of particulate matter in the combustion product stream with a temperature from 100 to 1100 °C are presented, where the diameter of solid particles, varying in the conversion from 0.01 to 0.35 microns, was taken into account during the calculations.

*Keywords:* description of the methodology, soot particles, flue gas flow, deposition rate, heat-boiler.

#### Введение

Процесс сжигания в топках водотрубных котлоагрегатов органического топлива, содержащего минеральные примеси, сопровождается выбросами с уходящими газами золовых и сажистых твердых частиц, загрязняющих окружающую среду. Золовые час-

тицы формируются при горении твердого органического топлива с преимущественно тугоплавкой или огнеупорной минеральной составляющей рабочего состава топлива, которую имеют некоторые виды каменных и бурых углей, антрациты. Сажистые частицы образуются во время процесса горения

практически всех видов органического топлива (твердого, жидкого и газообразного) и являются продуктом топочной агломерации частиц углерода, образовавшихся вследствие неравномерного распределения окислителя в реакционной зоне с локализацией в топочном объеме зон с его недостатком. Такая неравномерность распределения окислителя приводит к неидеальности кинетических явлений и увеличивает стадийность химических реакций окисления органической массы топлива.

Выявлено, что за отопительный период работы водотрубных котлоагрегатов в большинстве случаев наиболее высокая степень загрязнения конвективных поверхностей отмечается в случае работы на твердых и жидких видах топлива. Выгорание топливных частиц угля в сравнении с газообразным топливом обладает существенно более высокой многостадийностью физико-химических процессов преобразования горючей органической массы [17, 19]. Этим обуславливается увеличение времени на прохождение физических процессов подготовки горючей смеси окислителя и летучих компонентов — продуктов пирогенетического разложения органических веществ. Увеличение времени выгорания топлива приводит к снижению тепловых напряжений топочного объема, увеличению химической неполноты сгорания топлива и концентрации сажистых частиц в уходящих газах.

**Цель работы.** Для теоретической оценки скорости роста отложений твердых частиц на конвективных поверхностях нагрева необходимо:

- выявить зависимости, отражающие влияние физических факторов на активность выпадения частиц из потока дымовых газов;
- определить методику нахождения пороговой скорости потока, ниже которой будет происходить активное выпадение частиц из потока дымовых газов (скорости осаждения частиц).

Метод численного анализа в программном комплексе *ANSYS Fluent* с применением пользовательских функций (*UDF*) на основе представленной методики позволит впоследствии выявить толщину образующихся отложений на конвективных трубах котлоагрегатов серии КВ-ГМ, что поможет уточнить средние значения термических сопротивлений, представленных в справочной литературе<sup>1</sup>, влияющие на точность тепловых расчетов водотрубных котлоагрегатов.

### 1. Особенности образования отложений твердых частиц

Свежеобразовавшиеся и не выгоревшие в реакционной топочной зоне потухшие сажистые частицы,двигающиеся в газоходах котлоагрегата при температуре продуктов сгорания, обладают сильной адгезионной способностью друг к другу, что приводит к образованию слипшихся в более крупного размера конгломераты углерода аморфного вида как сферической, так и различной неправильной формы частиц с размером от 10 до 350 нм [6]. Такие частицы, выпадая из потока, способны с течением времени на поверхности конвективных пучков образовывать плотные отложения.

Данные отложения обладают высоким термическим сопротивлением, что существенно снижает эффективность теплообмена между дымовыми газами и нагреваемым теплоносителем [18].

Величина термического сопротивления слоя отложений из сажистых и золовых частиц на конвективных трубах представляется уравнением

$$R_3 = \frac{1}{k_3} = \frac{1}{\alpha_3} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}, \quad (1)$$

где  $R_3$  — термическое сопротивление слоя отложений;  $k_3$  — коэффициент теплопередачи от продуктов сгорания к металлу загрязненной трубы;  $\alpha_3$  — коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к наружной

<sup>1</sup> Тепловой расчет котлов. (Нормативный метод). Изд. 3-е, перераб. и доп. СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.

поверхности слоя отложений;  $\delta_3$  — средняя толщина слоя отложений;  $\lambda_3$  — коэффициент теплопроводности загрязняющих веществ.

Величина  $R_3$  зависит не только от толщины отложений  $\delta_3$ , но и от коэффициента теплопроводности отложений  $\lambda_3$ . Например, значение  $\lambda_3$  отложений, формирующихся при сжигании угля Назаровского разреза, находится в пределах 0,08–0,15 Вт/(м · К). Средний коэффициент теплопроводности труб, выполненных из углеродистой стали,  $\lambda_{ст}$  в интервале температур 20–700 °С равен 36 Вт/(м · К)<sup>2</sup>, что в 450 раз выше значения для сажистых отложений. Термическим сопротивлением стальных труб обычно в инженерных расчетах пренебрегают, так как оно, ввиду малых значений, влияния на коэффициент теплопередачи практически не оказывает.

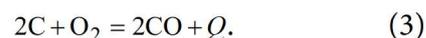
По условиям химических реакций горения углеводородного топлива известно [14], что атом углерода в момент протекания окислительной реакции вступает во взаимодействие с молекулярным кислородом, вследствие чего образуется диоксид углерода (углекислый газ) по реакции



Химическая реакция (2) будет протекать при достижении теплового условия начала протекания реакций (энергии активации) и наличии необходимого количества кислорода в поступающем на горение воздухе [20]. В процессе эксплуатации котлоагрегатов для достижения процессов полного выгорания топлива воздух подается в количестве, равном действительному расходу воздуха  $V_d$ , м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>), превышение которого над теоретически необходимым расходом воздуха  $V_r$ , м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>) определяется коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$  [5]. Величина коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  зависит от организации условий сжигания и совершенства технологии про-

цесса выгорания топлива и на практике всегда больше единицы. При увеличении  $\alpha$  снижается вероятность недостатка в свободных молекулах окислителя, находящихся по соседству с молекулами горючего органического вещества, от концентрации которых зависят ход реакций и величина тепловыделения.

При недостатке окислителя та же химическая реакция горения углеродной частицы может пройти с меньшим тепловыделением по реакции



В результате протекания химического взаимодействия по реакции (3) происходит образование оксида углерода (угарного газа) — ядовитого горючего газа.

При более глубоком недостатке кислорода в зоне активных реакций появляются условия для образования сажистых частиц. Это наблюдается, когда соотношение углерода к кислороду становится больше единицы ( $C/O > 1$ ).

В ходе исследований сжигания жидкого топлива, представленных в работе [4], были выявлены пороговые концентрации окислителя, при которых начинается процесс активного выделения сажистых частиц из зоны пламени в зависимости от температуры горения, условий подачи топлива и дисперсности его распыливания. Количество воздуха в зоне протекания химических реакций горения топливных частиц при образовании сажистых частиц составило 33–70 % (переобогащенная смесь топлива и воздуха) от теоретически необходимого количества воздуха для полного выгорания поступившего в зону горения топлива [3, 4]. Меньшие значения диапазона характерны для условий образования сажистых частиц в смесях «топливо–воздух» с увеличением давления в реакционной зоне. Соответственно, большие значения диапазона характерны при образовании сажистых частиц в высокотемпературных смесях «топливо–воздух». При диффузионном принципе сжигания топлива

<sup>2</sup> РД 10-249-98. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды (с Изм. № 1).

с  $\alpha > 1$ , при недостаточности перемешивания топлива с окислителем из-за низкой активности процессов молярной и молекулярной диффузии компонентов реакции во фронте пламени обнаруживается активное образование сажистых частиц [13].

В работе [21] представлена CFD-модель для прогнозирования образования золowych отложений при сжигании бурого угля в высокотемпературной опытно-промышленной печи. CFD-модель разработана на основе математической модели и включает в себя уравнения движения частиц в лагранжевой системе отсчета для моделирования траекторий движения частиц; уравнения, учитывающие влияние сил термофореза, свойств осаждения, конденсации паров щелочи и условий прилипания частиц. Также с помощью разработанной CFD-модели изучается поведение золowych частиц при различных температурах. Результаты моделирования показали, что образование отложений золы на поверхностях нагрева при высоких температурах дымовых газов обуславливается осаждением частиц в результате соударений и сил термофореза. Конденсация паров щелочи на осаждение золowych частиц не оказывает существенного влияния. Результаты моделирования по характеру осаждения золы и величине теплового потока ( $q$ , Вт/м<sup>2</sup>) соответствуют полученным экспериментальным данным при сжигании бурого угля в опытно-промышленной печи.

В работе [16] представлена методика расчета осаждения и уноса твердых частиц на основе модели отскока частиц от стенки Табакова–Гранта и теории Джонсона–Кендалла–Робертса (*JKR*-теория). Модель учитывает поведение частиц при их транспортировании газовым потоком, прилипании, отскоке и уносе, а также в процессе осаждения в результате многократных их столкновений со стенками газохода. Также показано существенное влияние скорости дымовых газов, концентрации твердых частиц в ды-

мовых газах и геометрических характеристик газохода на характер образования слоя загрязнений и количество образовавшихся отложений. В этой модели критическая скорость осаждения (на основе теории *JKR*) применяется в качестве критерия для определения условий осаждения частиц.

Для подтверждения адекватности математических моделей проведено численное моделирование процессов осаждения с сопоставлением с результатами экспериментальных исследований. Обнаружено, что результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными (разница между двумя способами определения массы выпавших из потока частиц составила 12,2 % [16]).

## 2. Порядок проведения расчета

Для достижения поставленной цели было проведено исследование поведения сажистых частиц с физическими характеристиками, аналогичными характеристикам технического углерода<sup>3</sup> марки П 702 (печной углерод, получаемый при термоокислительном разложении жидкого углеводородного сырья с плотностью  $\rho_{\text{ч}} = 1800$  кг/м<sup>3</sup>). Диаметр исследуемых частиц  $d$  принимался равным 0,01 мкм, 0,1 мкм и 0,35 мкм. В качестве транспортирующей среды был принят поток дымовых газов с теплофизическими характеристиками, полученными в результате численного анализа работы конвективных пучков водотрубного котлоагрегата КВ-ГМ-0,8: температура продуктов сгорания изменяется в диапазоне от 100 до 1100 °С при скорости движения в межтрубных каналах пучка до 2,52 м/с [7].

В случае рассмотрения условий выпадения мелкодисперсных твердых частиц из газового потока, движущегося в вертикальном направлении, основной характеристикой процесса будет являться скорость осаждения частиц  $w_{\text{ос}}$ , м/с, значение которой может

<sup>3</sup> ГОСТ 7885–86. Углерод технический для производства резины. Технические условия (с Изм. № 1–4).

быть найдено с использованием критериальной методики.

В уравнениях движения частицы предполагается, что частицы разного диаметра при движении в потоке газа не взаимодействуют друг с другом. Такая постановка задачи дает возможность исследовать выпадение частиц, имеющих одинаковый диаметр, независимо от других частиц и факторов. В методике дополнительно сделано допущение, что концентрация находящихся в потоке продуктов сгорания частиц мала настолько, что столкновений между летящими частицами не происходит [8, 14]. В этом случае влиянием частиц на турбулентные характеристики и профиль скорости движения газового потока можно пренебречь [9]. Так как сажиные частицы обладают предельно малыми размерами, температура сажиных частиц принимается равной температуре газового потока в точке их нахождения.

При движении твердой частицы в газовом потоке на частицу действуют внешние силы: тяжести, Архимедова сила, сила сопротивления потоку продуктов сгорания и трения. На основании сделанных допущений в уравнениях движения частицы были учтены эти силы (рис. 1).

Критерий Архимеда, характеризующий отношение подъемной силы потока к силе инерции сажиной частицы диаметром  $d$ , м [2, 8],

$$Ar = \frac{d^3 \rho_c (\rho_{\text{ч}} - \rho_c) g}{\mu_c^2}, \quad (4)$$

где  $d$  — диаметр частицы, м;  $\rho_c$  — плотность продуктов сгорания при температуре продуктов сгорания, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ч}}$  — плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение свободного падения, м<sup>2</sup>/с;  $\mu_c$  — динамическая вязкость продуктов сгорания, Па · с.

Критерий Рейнольдса для соответствующего режима осаждения [11, 12]:

- ламинарный режим ( $Ar \leq 36$ ):

$$Re = \frac{Ar}{18}; \quad (5)$$

- переходный режим ( $36 < Ar < 8,3 \cdot 10^4$ ):

$$Re = 0,152 Ar^{0,715}; \quad (6)$$

- турбулентный режим ( $Ar > 8,3 \cdot 10^4$ ):

$$Re = 1,74 Ar^{0,5}. \quad (7)$$

Выбрав из трех режимов осаждения частиц ламинарный, переходный или турбулентный, можно по найденному значению числа  $Re$  определить коэффициент сопротивления  $\xi$  [1, 11]:

- ламинарный режим ( $Re < 2$ ):

$$\xi = \frac{24}{Re}; \quad (8)$$

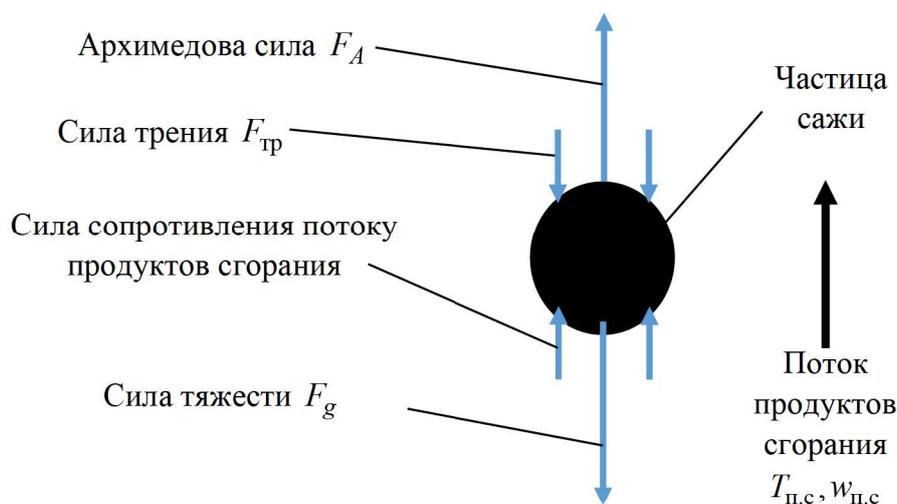


Рис. 1. Схема внешнего силового воздействия на движущуюся частицу сажи

- переходный режим ( $2 \leq Re \leq 500$ ):

$$\xi = \frac{18,5}{Re^{0,6}}; \quad (9)$$

- турбулентный режим ( $Re > 500$ ):

$$\xi = 0,44. \quad (10)$$

Скорость осаждения  $w_{oc}$ , м/с, шарообразной частицы [10]

$$w_{oc} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{d(\rho_{ч} - \rho_{с})g}{\xi \rho_{с}}}. \quad (11)$$

Для определения скорости осаждения не-сферических частиц требуется определить поправочный коэффициент  $\phi$  (фактор формы):

$$\phi = \frac{F_{ш}}{F}, \quad (12)$$

где  $F_{ш}$  — поверхность шарообразной частицы ( $m^2$ ), имеющей объем, эквивалентный рассматриваемой частице, обладающей площадью наружной поверхности  $F$ ,  $m^2$ .

Вычислив поправочный коэффициент  $\phi$ , можно рассчитать скорость осаждения не-сферической частицы:

$$w'_{oc} = \phi w_{oc}. \quad (13)$$

### 3. Результаты и обсуждение

С учетом представленной методики рассчитана скорость осаждения шарообразных сажистых частиц в конвективных пучках водотрубного котлоагрегата КВ-ГМ-0,8 при температурах продуктов сгорания от 100 до 1100 °С и теплофизических характеристиках продуктов сгорания, соответствующих условиям данных температур.

Использованные в расчетах теплофизические характеристики продуктов сгорания приняты равными характеристикам продуктов сгорания, наблюдаемым при работе котлоагрегатов КВ-ГМ, потому что данная серия котлов является унифицированной и широко применяется в котельных малой и средней мощности как в промышленной, так и в жилищно-коммунальной энергетике. Учитывая массовость и унификацию котлов КВ-ГМ, предполагается, что модернизация и улучшение их технических характеристик в ходе исследований внесут ощутимый результат в повышение эффективности

использования теплоты и качества выгорания топлива.

Графические зависимости скорости осаждения сажистых частиц диаметром 0,01 мкм, 0,1 мкм и 0,35 мкм в зависимости от температуры потока продуктов сгорания позволяют выявить скорость осаждения сажиистой частицы в разных частях (рядах труб) конвективных пучков котла, так как высокотемпературный поток продуктов сгорания, проходя по межтрубному пространству, отдает теплоту нагреваемому теплоносителю. Вследствие зависимости скорости осаждения от температурных условий, в температурных зонах (с различной температурой продуктов сгорания) конвективного пучка будет наблюдаться разная скорость осаждения твердых частиц (рис. 3). Скорости продуктов сгорания в реальном котлоагрегате значительно выше скоростей, определенных по данной методике.

При увеличении диаметра сажиистой частицы в десять раз — с 0,01 мкм до 0,1 мкм — скорость осаждения увеличивается в десять раз (рис. 2, а, б). Тенденция уменьшения величины скорости осаждения твердых частиц при увеличении температуры не зависит от диаметра сажиистых частиц (рис. 2, а, б, в).

Выявлено, что с увеличением температуры потока продуктов сгорания на каждые 50 °С скорость осаждения сажиистых частиц снижается в среднем на 4,4 %, но стоит отметить, что зависимость скорости осаждения твердых частиц от температуры потока продуктов сгорания является нелинейной, так как при температурах продуктов сгорания до 500 °С темп падения скорости частиц выше, чем при температуре продуктов сгорания более 500 °С. Например, при увеличении температуры потока со 150 до 200 °С скорость осаждения частицы сажи снизилась на 7,7 %, а при увеличении температуры потока с 1050 до 1100 °С скорость осаждения частицы снизилась на 2,2 %.

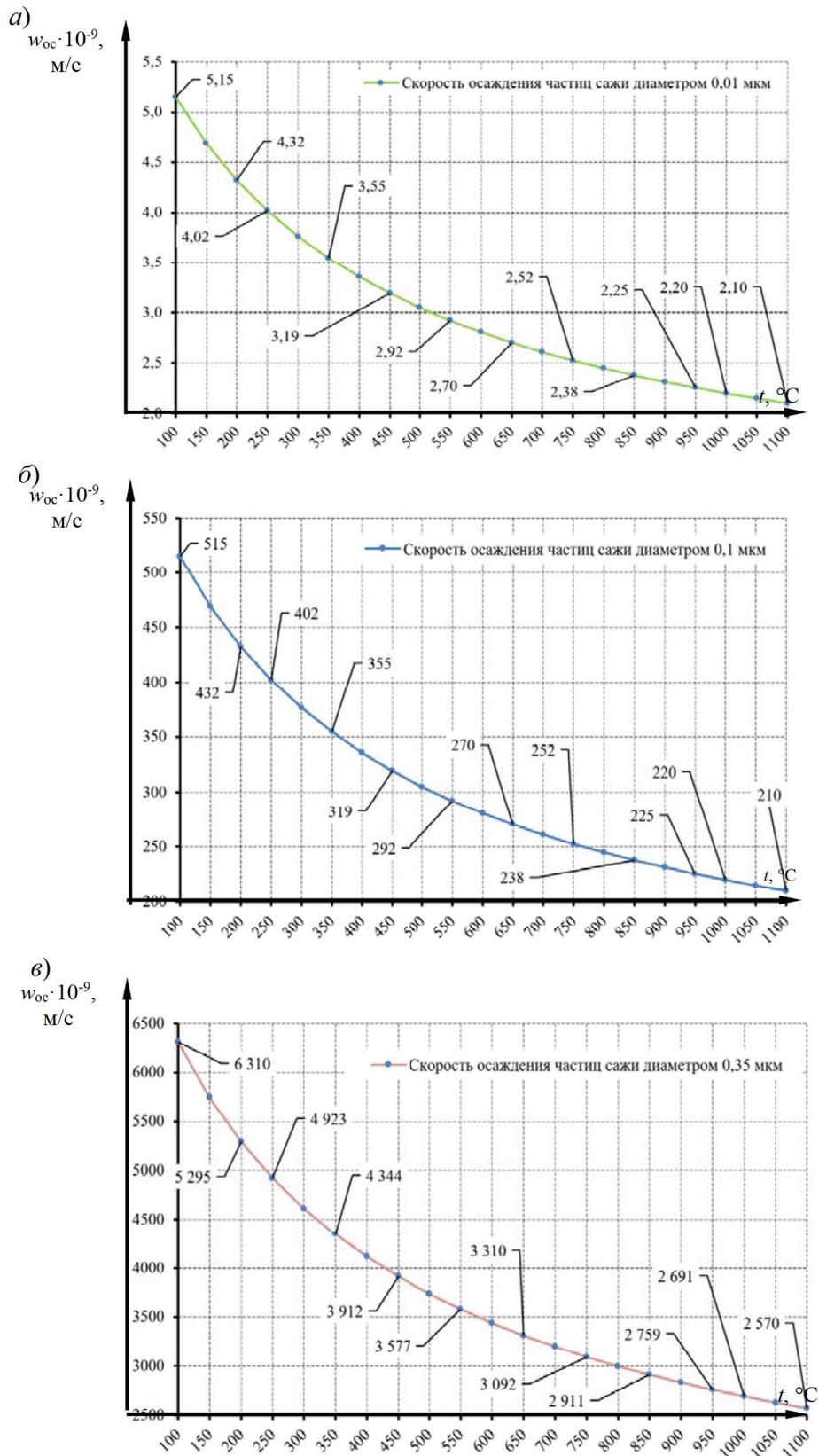


Рис. 2. Зависимости скорости осаждения сажистых частиц от их диаметра:  
 а — 0,01 мкм; б — 0,1 мкм; в — 0,35 мкм

Уменьшение скорости осаждения сажи-стых частиц при увеличении температуры газового потока объясняется увеличением динамической вязкости потока. Сила трения потока о частицы при этом уменьшается, что приводит к более резкому падению скорости частицы. Низкие значения скорости осаждения, практически исключают осаждение частиц, противоречат наблюдениям сажи-стых отложений во время эксплуатации котлов, что может свидетельствовать о необходимости учета дополнительных действующих сил [15]. На зависимостях (см. рис. 3) видно, что для частиц размером 0,01 мкм и меньше скорость осаждения предельно мала, и такие частицы выпадать из потока продуктов сгорания практически не будут.

Преимущественно начиная с размера 0,095 мкм становится заметно, что при равенстве температур потока продуктов сгорания увеличение диаметра частиц сажи оказывает все большее влияние на отклонение значений скорости осаждения частиц разного диаметра. Видно, что для сажи-стых частиц диаметром 0,095 мкм величина отклонения скоростей осаждения для температур

270 и 589 °С равна  $9,76 \cdot 10^{-8}$  м/с, а в случае диаметра частиц 0,35 мкм величина отклонения станет равна  $132,5 \cdot 10^{-8}$  м/с. Следовательно, при увеличении диаметра частицы в 3,7 раза скорость осаждения возрастет в 13,6 раза. С увеличением диаметра сажи-стых частиц при постоянной температуре потока скорость осаждения возрастает. Отмечается, что интенсивность увеличения скорости при изменении диаметра частиц с 0,18 до 0,265 мкм и с 0,265 до 0,35 мкм для всех рассчитанных температур одинакова и составляет 2,2 и 1,7 раза соответственно.

### Выводы и перспективы

1. В результате анализа кинетических явлений и химических реакций процесса горения углеводородного топлива установлено, что сажи-стые частицы по своей природе являются результатом химического недожога топлива.

2. Разработана методика, позволяющая вычислить скорости осаждения сажи-стых и золовых частиц, выпадающих из потока продуктов сгорания.

3. Определены зависимости скорости осаждения частиц от температуры потока

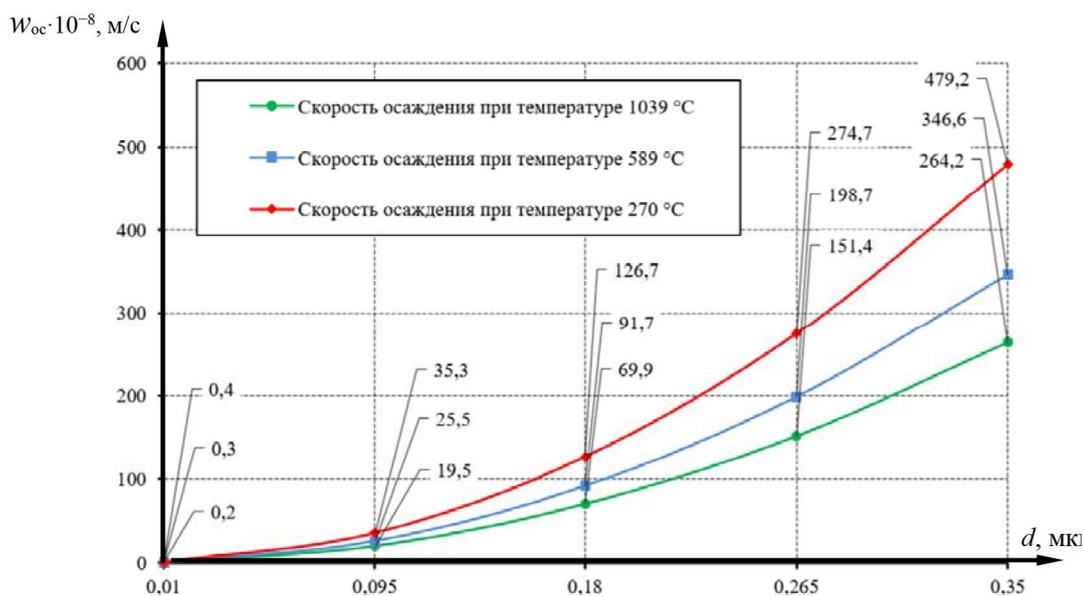


Рис. 3. Зависимости скорости осаждения частицы от ее диаметра и температуры потока

продуктов сгорания и размера частиц. Установлено, что с увеличением температуры потока скорость осаждения частиц уменьшается, а с увеличением диаметра частиц — увеличивается.

### Библиографический список

1. Архипов В. А., Басалаев С. А., Перфильева К. Г., Усанина А. С. Коэффициент сопротивления твердой сферы в неизотермических условиях // Вестник Томского гос. ун-та. Математика и механика. 2021. № 71. С. 13–24. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/koeffitsient-soprotivleniya-tverdoy-sfery-v-neizotermicheskikh-usloviyah> (дата обращения: 15.03.2025).
2. Бальчугов А. В., Баранова А. А. Экспериментальное исследование процесса седиментации твердых частиц разного происхождения // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2024. Т. 14, № 3. С. 513–523. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-issledovanie-protsessas-dimentatsii-tverdyh-chastits-raznogo-proishozhdeniya> (дата обращения: 15.03.2025).
3. Брозе Д. Д. Сгорание в поршневых двигателях. М.: Машиностроение, 1969. 248 с.
4. Глазков Д. Ю. Процесс сажеобразования в цилиндре дизеля и методы его моделирования // Известия КГТУ. 2018. № 48. С. 131–141. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/protsess-sazheobrazovaniya-v-tsilindre-dizelya-i-metody-ego-modelirovaniya> (дата обращения: 02.05.2024).
5. Гонте Г. Г., Луконин А. А., Павлов В. Е. Управление соотношением топливо — воздух в котлоагрегатах ТЭС при регулировании производительности дутьевых вентиляторов методом дросселирования // Вестник ИрГТУ. 2015. № 8 (103). С. 156–165. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-sootnosheniem-toplivo-vozduh-v-kotloagregatah-tes-pri-regulirovanii-proizvoditelnosti-dutievyh-ventilyatorov-metodom> (дата обращения: 15.03.2025).
6. Иванов В. Н. Словарь-справочник по литейному производству. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.
7. Каишанов Д. И., Яковлев В. А. Анализ влияния смещения рядов конвективных трубок на эффективность теплопередачи в водотрубных котлоагрегатах // Инновации и инвестиции. 2024. № 6. С. 385–389.
8. Кащеев В. М., Муранов Ю. В. Движение частиц в пристенной области турбулентного потока газа. Обнинск: [б. и.], 1973. 51 с.
9. Кащеев В. М., Муранов Ю. В. К вопросу о влиянии пульсационных сил Магнуса и ускорения на движение частиц в турбулентном потоке газа // Теплофизика высоких температур. 1975. Т. 13, вып. 5. С. 1015–1022; High Temperature. 1975. Vol. 13 (5). Pp. 930–937.
10. Мустафаева Г. Р. Осаждение твердых частиц из потока суспензии // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2017. № 1. С. 33–37. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osazhdenie-tverdyh-chastits-iz-potoka-suspenzii> (дата обращения: 15.03.2025).
11. Романков П. Г., Курочкина М. И. Гидромеханические процессы химической технологии. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л.: Химия, 1974. 288 с.
12. Страус В. Промышленная очистка газов / пер. с англ. Ю. А. Косога. М.: Химия, 1981. 616 с.
13. Ярмольчик Ю. П., Шрёгер Р., Хаберфельне Х., Пихлер М., Костич Д., Мороз Г. В. Комбинированное сжигание потоков различных промышленных отходов в топках котлов. Ч. 2 // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 6. С. 526–540. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kombinirovannoe-szhiganiye-potokov-razlichnyh-promyshlennyh-othodov-v-topkakh-kotlov-chast-2>
14. Greifzu F., Kratzsch C., Forgber T., Lindner F., Schwarze R. Assessment of particle-tracking models for dispersed particle-laden flows implemented in OpenFOAM and ANSYS FLUENT // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2016. Vol. 10 (1). Pp. 30–43. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/1942060.2015.1104266>
15. Kleinhans U., Rück R., Schmid S., Haselsteiner T., Spliethoff H. Alkali vapor condensation on heat exchanging surfaces: laboratory-scale experiments and a mechanistic CFD modeling approach // Energy & Fuels. 2016. Vol. 30 (11). Pp. 9793–9800.
16. Li P., Liu W., Gong K., Han C., Zhang H., Sui Z., Hu R. Numerical Study on Particulate Fouling Characteristics of Flue with a Particulate Fouling Model Considering Deposition and Removal Mechanisms // Energies. 2022. Vol. 15 (22). 8708. URL: <https://doi.org/10.3390/en15228708>
17. Magda A. Modelling of mineral matter transformation and deposition in furnaces: PhD thesis. TU Braunschweig, Shaker, 2012. 160 p. ISBN 978-3844015447.
18. Roy R., Schooff B., Li X., Montgomery S., Tuttle J., Wendt J. O. L., Dickson K., Iverson B., Fry A. Ash aerosol particle size distribution, composition, and deposition behavior while co-firing coal and steam-exploded biomass in a 1.5 MW<sub>th</sub> combustor // Fuel Processing Technology. 2023. Vol. 243. 107674. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107674>

19. Spliethoff H. Power generation from solid fuels. Heidelberg and New York: Springer, 2010. 712 p. ISBN 978-3642028557.

20. Williams A., Jones J. M., Ma L., Pourkashanian M. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels // Progress in Energy and Combustion Science. 2012. Vol. 38 (2). Pp. 113–137.

21. Yang X., Ingham D., Ma L., Zhou H., Pourkashanian M. Understanding the ash deposition formation in Zhundong lignite combustion through dynamic CFD modelling analysis // Fuel. 2017. Vol. 194. Pp. 533–543. ISSN 0016-2361. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.01.026>

### References

1. Arkhipov V. A., Basalaev S. A., Perfil'eva K. G., Usanina A. S. Koeffitsient soprotivleniya tverдой sfery v neizotermicheskikh usloviyakh [Resistance coefficient of a solid sphere in non-isothermal conditions]. Vestnik Tomskogo gos. un-ta. Matematika i mekhanika – Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and Mechanics, 2021, no. 71, pp. 13–24. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/koeffitsient-soprotivleniya-tverдой-sfery-v-neizotermicheskikh-usloviyakh> (accessed: 15.03.2025).

2. Bal'chugov A. V., Baranova A. A. Eksperimental'noe issledovanie protsessa sedimentatsii tverdykh chastits raznogo proiskhozhdeniya [Experimental study of the process of sedimentation of solid particles of different origin]. Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' – Bulletin of Higher Schools. Investments. Construction. Real Estate, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 513–523. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-issledovanie-protsessas sedimentatsii-tverdykh-chastits-raznogo-proishozhdeniya> (accessed: 15.03.2025).

3. Broze D. D. Sgoranie v porshnevnykh dvigatelyakh [Combustion in piston engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969, 248 p.

4. Glazkov D. Yu. Protsess sazheobrazovaniya v tsilindre dizelya i metody ego modelirovaniya [Process of soot formation in a diesel engine cylinder and methods of its modeling]. Izvestiya KGTU – Bulletin of KSTU, 2018, no. 48, pp. 131–141. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/protsess-sazheobrazovaniya-v-tsilindre-dizelya-i-metody-ego-modelirovaniya> (accessed: 02.05.2024).

5. Goppe G. G., Lukonin A. A., Pavlov V. E. Upravlenie sootnosheniem toplivo — vozdukh v kotloagregatakh TES pri regulirovaniy proizvoditel'nosti du'evykh ventilyatorov metodom drosselirovaniya [Management of a fuel - air ratio in TPP boiler units at regulation of productivity of blowing fans by a throttling method]. Vestnik IrGTU – Bulletin of IrSTU, 2015, no. 8 (103), pp. 156–165. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-sootnosheniem->

toplivo-vozdukh-v-kotloagregatah-tes-pri-regulirovaniy proizvoditel'nosti-du'evykh-ventilyatorov-metodom (accessed: 15.03.2025).

6. Ivanov V. N. Slovar'-spravochnik po liteynomu proizvodstvu [Reference book on foundry production]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 384 p.

7. Kashtanov D. I., Yakovlev V. A. Analiz vliyaniya smeshcheniya ryadov konvektivnykh trubok na effektivnost' teploperedachi v vodotrubnykh kotloagregatakh [Analysis of influence of displacement of rows of convective tubes on efficiency of heat transfer in water-tube boiler units]. Innovatsii i investitsii – Innovations and Investments, 2024, no. 6, pp. 385–389.

8. Kashcheev V. M., Muranov Yu. V. Dvizhenie chastits v pristennoy oblasti turbulentnogo potoka gaza [Particle motion in the near-wall region of a turbulent gas flow]. Obninsk, 1973, 51 p.

9. Kashcheev V. M., Muranov Yu. V. K voprosu o vliyaniy pul'satsionnykh sil Magnusa i uskoreniya na dvizhenie chastits v turbulentnom potoke gaza [To the issue of the influence of Magnus forces and pulsation forces acceleration on the motion of particles in turbulent gas flow]. Teplofizika vysokikh temperatur – Thermophysics of high temperatures, 1975, vol. 13, iss. 5, pp. 1015–1022; High Temperature, 1975, vol. 13 (5), pp. 930–937.

10. Mustafaeva G. R. Osazhdenie tverdykh chastits iz potoka suspenzii [Sedimentation of solid particles from suspension flow]. Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya – Transportation and storage of oil products and hydrocarbon raw materials, 2017, no. 1, pp. 33–37. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osazhdenie-tverdykh-chastits-iz-potoka-suspenzii> (accessed: 15.03.2025).

11. Romankov P. G., Kurochkina M. I. Gidromekhanicheskie protsessy khimicheskoy tekhnologii [Hydromechanical processes of chemical technology]. 2-nd ed., revised. Leningrad, Khimiya Publ., 1974, 288 p.

12. Straus V. Promyshlennaya ochistka gazov [Industrial purification of gases]. Transl. From English by Kosoy Yu. A. Moscow, Khimiya Publ., 1981, 616 p.

13. Yarmol'chik Yu. P., Shryoger R., Khaberfel'ne Kh., Pikhler M., Kostich D., Moroz G. V. Kombinirovannoe szhiganie potokov razlichnykh promyshlennykh otkhodov v topkakh kotlov. Ch. 2. Energetika. [Combined combustion of different industrial waste streams in boiler furnaces. Part 2. Energy]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'edineniy SNG – Proceedings of higher educational institutions and energy associations of CIS countries, 2020, vol. 63, no. 6, pp. 526–540. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kombinirovannoe-szhiganie-potokov-razlichnyh-promyshlennykh-othodov-v-topkah-kotlov-chast-2>.

14. Greifzu F., Kratzsch C., Forger T., Lindner F., Schwarze R. Assessment of particle-tracking models for

dispersed particle-laden flows implemented in Open FOAM and ANSYS FLUENT. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2016, vol.10 (1), pp. 30–43. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/19942060.2015.1104266>.

15. Kleinhans U., Rück R., Schmid S., Haselsteiner T., Spliethoff H. *Alkaliva por condensation on heat exchanging surfaces: laboratory-scale experiments and mechanistic CFD modeling approach. Energy&Fuels*, 2016, vol. 30 (11), pp. 9793–9800.

16. Li P., Liu W., Gong K., Han C., Zhang H., Sui Z., Hu R. *Numerical Study on Particulate Fouling Characteristics of Flue with a Particulate Fouling Model Considering Deposition and Removal Mechanisms. Energies*, 2022, vol. 15 (22), 8708. Available at: <https://doi.org/10.3390/en15228708>.

17. Magda A. *Modelling of mineral matter transformation and deposition in furnaces: PhD thesis*. TU Braunschweig, Shaker, 2012, 160 p. ISBN 978-3844015447.

18. Roy R., Schooff B., Li X., Montgomery S., Tuttle J., Wendt J. O. L., Dickson K., Iverson B., Fry A. *Ash aerosol*

*particle size distribution, composition, and deposition behavior while co-firing coal and steam-exploded biomass in a 1.5 MW<sub>th</sub> combustor. Fuel Processing Technology*, 2023, vol. 243, 107674. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107674>.

19. Spliethoff H. *Power generation from solid fuels*. Heidelberg and New York, Springer, 2010, 712 p. ISBN 978-3642028557.

20. Williams A., Jones J. M., Ma L., Pourkashanian M. *Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. Progress in Energy and Combustion Science*, 2012, vol. 38 (2), pp. 113–137.

21. Yang X., Ingham D., Ma L., Zhou H., Pourkashanian M. *Understanding the ash deposition formation in Zhundong lignite combustion through dynamic CFD modelling analysis. Fuel*, 2017, vol. 194, pp. 533–543. ISSN 0016-2361. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.01.026>.