

УДК 662.613+536.7+541.123.7

ВЛИЯНИЕ ЗАПЫЛЕННОСТИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ И ПРОЦЕССОВ КОАГУЛЯЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЕЙ

© 2019 г. Н. М. Корценштейн¹*, Л. В. Петров¹

¹АО “Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского”,
Ленинский пр., 19, Москва, 119071 Россия

*e-mail: naumkor@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.11.2018 г.

После доработки 01.12.2018 г.

Принята к публикации 07.12.2018 г.

Проведено численное моделирование гомогенно-гетерогенной объемной конденсации паров сульфата калия в запыленном парогазовом потоке продуктов сгорания угля при их охлаждении в технологическом тракте. Использована предложенная авторами замкнутая модель образования субмикронных частиц в продуктах сгорания углей. Получены данные по концентрации и распределению по размерам образующихся частиц при варьируемых параметрах гетерогенных центров конденсации и скорости изменения температуры в потоке. Рассмотрено изменение относительного вклада гомогенного и гетерогенного механизмов при изменении запыленности потока. Предложен критерий, позволяющий судить о влиянии запыленности потока на процесс объемной конденсации, учитывающий как параметры пыли, так и скорость изменения температуры в зоне конденсации. Представлены оценки влияния процессов коагуляции на параметры субмикронных частиц, образующихся при сжигании углей.

DOI: 10.1134/S002329121903008X

ВВЕДЕНИЕ

Содержание экологически опасных субмикронных частиц в воздушной среде подлежит контролю в РФ [1, 2]. Имеются ограничения на концентрацию таких частиц в стандартах качества окружающего воздуха других стран, в том числе США [3]. В КНР проблема сокращения загрязняющих выбросов в атмосферу приобрела статус приоритетной в национальной политике, о чем свидетельствует внедрение плана действий по предотвращению и контролю загрязнения воздуха [4].

Одним из источников указанного вида загрязнения атмосферы является эмиссия субмикронных частиц при сжигании углей. В этом случае опасность представляют не только сами частицы, но также и то, что на их поверхности могут конденсироваться различные вредные вещества, например, некоторые токсичные микроэлементы, содержащиеся в углях [5–7].

Вероятным механизмом образования субмикронных частиц считается объемная конденсация паров веществ, образующихся из минеральной части углей в процессе горения (“solid–vapor–particulate pathway” [8–10]). Для сокращения выбросов субмикронных частиц в атмосферу за счет

их улавливания необходима информация о параметрах конденсационных аэрозолей, образующихся при горении углей. Такую информацию — концентрацию частиц и их распределение по размерам — может обеспечить численное моделирование процесса объемной конденсации. В существующих исследованиях данной тематики преобладают работы, посвященные описанию процессов образования частиц при сжигании определенного типа углей, в частности, лигнитов с высоким содержанием натрия [11]. Неизбежно встает проблема перенесения таких результатов на угли другого типа с преобладанием в их минеральной части других летучих элементов, например, калия.

Применительно к продуктам сжигания углей, представляющим собой многокомпонентную реагирующую систему, при моделировании целесообразно применение комплексного — термодинамического и кинетического — подхода. На первом этапе методами химической термодинамики определяются равновесные составы газовой и конденсированных фаз, последовательность конденсации различных веществ по мере понижения температуры продуктов сгорания вдоль технологического тракта. С учетом результатов термоди-

намического анализа на втором этапе из решения кинетического уравнения объемной конденсации определяются искомые параметры конденсационного аэрозоля. При этом предполагается сохранение термодинамического равновесия в газовой фазе. Реализация такого подхода в [12] позволила рассмотреть влияние содержания алюмосиликатов летучих элементов (калия и натрия) на параметры конденсационного аэрозоля для различных видов углей с различным химическим составом золы. В продолжение этой работы в [13] была реализована модель, учитывающая убыль калия и натрия вместе с алюмосиликатами за счет перехода некоторой доли этих соединений в жидкий шлак после прекращения горения и снижения температуры. В то же время в работах [11–13] не было рассмотрено возможное влияние запыленности продуктов сгорания углей и процессов коагуляции на параметры образующихся при горении конденсационных аэрозолей.

Указанная проблема является предметом рассмотрения в данной работе. Предполагается рассмотрение гомогенно-гетерогенной объемной конденсации в запыленном потоке продуктов сгорания углей с учетом процессов коагуляции. Запыленность обусловлена наличием летучей золы, образующейся после сгорания частиц угля. Общим вопросам гетерогенной конденсации посвящены фундаментальные обзоры [14, 15]. Необходимость учета гетерогенной конденсации возникает при планировании экспериментальных исследований, в частности, в ламинарных диффузионных камерах, используемых для опытов с наночастицами [16], и в аэродинамических трубах [17].

В первом случае гетерогенная конденсация водяного пара, диффундирующего от нагретых стенок камеры, используется для увеличения конденсационным путем размеров наночастиц, поступающих в камеру вместе с холодным потоком газа-носителя. В результате наночастицы, покрытые пленкой воды, становятся “видимыми” для оптических средств регистрации. Постановка экспериментов в ламинарных диффузионных камерах и интерпретация получаемых результатов могут быть успешными при наличии математической модели процессов, протекающих в данном устройстве. Соответствующая модель и результаты ее применения представлены в работе [16].

Во втором случае речь идет о расширении возможностей проведения экспериментальных исследований в аэродинамических трубах, что связано, в частности, с достижением как можно большего переохлаждения потока. Ограничивающим фактором при этом является гетерогенная конденсация рабочего тела вследствие наличия в потоке инородных частиц, что стимулировало многочисленные исследования гомогенно-гете-

рогенной конденсации газовых смесей, в частности воздуха, в условиях, характерных для аэродинамических труб. Соответствующие результаты суммированы в [17].

В общем случае при моделировании гетерогенной конденсации возникает вопрос об учете полидисперсности гетерогенных центров конденсации (пылинок). В [15] на основе предположения о форме спектра гетерогенных центров сформулированы неравенства, выполнение которых обеспечивает близость результатов, полученных с учетом и без учета полидисперсности. Система моментных уравнений для последовательного учета полидисперсности представлена в [17]. В то же время численные результаты для гомогенно-гетерогенной конденсации в запыленном потоке, представленные в [17], получены в монодисперсном приближении. Численное моделирование объемной конденсации в запыленном парогазовом потоке с учетом распределения пылинок по размерам проведено в [18]. В качестве критерия, позволяющего судить о влиянии запыленности потока на процесс объемной конденсации, в [17] использована массовая доля пылинок. В [18] наряду с массовой долей пылинок использовалась также их относительная суммарная поверхность. В настоящей работе предложен новый критерий, учитывающий как параметры пыли, так и скорость изменения температуры в зоне конденсации.

В первой части данной работы описана использованная математическая модель исследуемого процесса, результаты моделирования и их обсуждение — во второй, заключение содержит выводы по работе.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассматривалось стационарное одномерное течение запыленных продуктов сгорания в канале с постоянной скоростью и заданным осевым градиентом температуры, моделирующим охлаждение продуктов сгорания в технологическом тракте. Предполагалось, что размеры пылинок и капель позволяют использовать односкоростную модель, а малость концентрации конденсирующихся компонентов в продуктах сгорания позволяет использовать однотемпературное приближение, когда температура капель и газовой фазы одинаковы. Принятая модель процесса образования субмикронных частиц (капель) в продуктах сгорания углей включала:

- 1) образование конденсирующегося компонента (сульфата калия) в газовой фазе в приближении термодинамического равновесия,
- 2) образование аэрозоля сульфата калия в процессе гомогенно-гетерогенной конденсации с учетом кинетики процесса.

Движущей силой процесса конденсации является превышение парциального давления конденсирующегося компонента относительно равновесного значения при заданной температуре, характеризуемое степенью пересыщения. Применительно к рассматриваемому случаю степень пересыщения может быть записана в виде [12]:

$$s = \frac{N_{K_2SO_4}}{N_{K_2SO_4}^s}. \quad (1)$$

Здесь $N_{K_2SO_4}$ — текущее число молей сульфата калия в газовой фазе, соответствующее однофазному — при “замороженной” конденсации — термодинамическому равновесию в газовой фазе (аналог парциального давления пара), $N_{K_2SO_4}^s$ — число молей сульфата калия в газовой фазе, соответствующее двухфазному термодинамическому равновесию в системе (аналог давления насыщенного пара).

Вычисление степени пересыщения на каждом шаге численного моделирования кинетики процесса объемной конденсации проводилось следующим образом. Для знаменателя выражения (1) в [12] на основании расчетных данных термодинамического этапа комплексного подхода получена следующая температурная зависимость:

$$\lg N_{K_2SO_4}^s = A^s - B^s/T, \quad (2)$$

$$A^s = 4.42991, B^s = 1.55904 \times 10^4.$$

Для определения числителя получено выражение [12]

$$N_{K_2SO_4} = \left(\sqrt{1 + 8 \sum K_{eq}} - 1 \right)^2 / 16 K_{eq}, \quad (3)$$

$$\sum K = N_K^0 - \Delta N_K.$$

Здесь N_K^0 — концентрация калия в угле, ΔN_K — убыль калия из газовой фазы в процессе гомогенно-гетерогенной конденсации, определяемая на каждом шаге численного интегрирования уравнений кинетики конденсации (см. ниже), K_{eq} — константа равновесия реакции образования сульфата калия в газовой фазе продуктов сгорания. В [13] температурная зависимость константы равновесия для 15 углей аппроксимирована двучленными полиномами вида

$$\lg K_{eq}^{(i)} = A_i + B_i/T, \quad (4)$$

на основании расчетных данных термодинамического этапа комплексного подхода. В данной работе использованы значения $A_i = -2.471$, $B_i = 2.93 \times 10^4$ для одного из углей — Yanzhou, КНР.

Следуя [18], при описании кинетики гомогенно-гетерогенной конденсации исходили из того, что в потоке имеется две группы капель: 1) микрокапли, образующиеся вследствие гомогенной

нуклеации в объеме парогазовой смеси, 2) макрокапли, образующиеся при конденсации пара на частицах пыли. Процессы образования и роста микрокапель описываются кинетическим уравнением, которое в случае гомогенной конденсации в одномерном стационарном потоке без учета коагуляции имеет следующий вид (см., например, [19]):

$$u \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial(\dot{r}f)}{\partial r} = \frac{I}{\rho_\Sigma} \delta(r - r_{cr}), \quad (5)$$

где f — функция распределения капель по размерам, нормированная на число капель в единице массы парогазовой смеси, u — скорость потока, r — радиус капли, $\dot{r}$ — скорость роста капель, I — скорость нуклеации, ρ_Σ — плотность смеси пара, газа и капель, δ — дельта-функция, r_{cr} — критический радиус.

При условии, что размер капель много меньше средней длины свободного пробега, для решения уравнения (5) успешно применяется моментный метод, который позволяет получить эквивалентную (5) систему моментных уравнений для первых четырех моментов функции распределения [19]:

$$\frac{d\Omega_n}{dx} = n \frac{\dot{r}}{u} \Omega_{n-1} + \frac{I}{u\rho_\Sigma} r_{cr}^n, \quad n = 0-3. \quad (6)$$

Моменты функции распределения определяются следующим образом:

$$\Omega_n = \int_{r_{cr}}^{\infty} r^n f dr. \quad (7)$$

Параметры конденсационного аэрозоля выражаются через моменты функции распределения:

$$\text{число капель в единице объема} \quad (8)$$

$$n_d = \rho_\Sigma \Omega_0, \text{ м}^{-3},$$

$$\text{средний размер (радиус) капель} \quad (9)$$

$$r_d = \Omega_1 / \Omega_0, \text{ м},$$

$$\text{массовая концентрация капель} \quad (10)$$

$$\rho_d = 4\pi\rho_1\rho_\Sigma \Omega_3 / 3, \text{ кг/м}^3,$$

где ρ_1 — плотность конденсата. Сама функция распределения восстанавливается по результатам решения. При интегрировании системы уравнений (6) использовалась классическая теория Фольмера—Френкеля—Зельдовича [20] для вычисления скорости нуклеации и формула Герца—Кнудсена [21] для вычисления скорости роста капель.

Для макрокапель кинетическое уравнение имеет вид

$$u \frac{\partial f_M}{\partial x} + \frac{\partial(\dot{r}f_M)}{\partial r} = 0. \quad (11)$$

Здесь f_M — функция распределения макрокапель по размерам. В отличие от (5), правая часть (11) равна нулю, так как количество макрокапель постоянно и равно количеству гетерогенных центров конденсации (пылинок). Данное утверждение справедливо, если размер пылинок превышает размер критических зародышей при гомогенной нуклеации для всех рассматриваемых значений степени пересыщения. Именно такая ситуация рассматривалась в данной работе. Уравнения (5) и (11) имеют разные начальные условия: для микрокапель функция распределения во входном сечении равна нулю, а для макрокапель — задаваемой функции распределения частиц пыли. Исследование влияния этих частиц (пылинок) на процесс объемной конденсации в потоке было целью настоящей работы. Использование предположения об идеальной смачиваемости гетерогенных центров конденсации позволило получить оценку сверху по их влиянию на процесс объемной конденсации. Результаты численного исследования, представленные в [18], показали, что учет полидисперсности гетерогенных центров приводит к изменению счетной концентрации капель и массовой доли конденсата в пределах 10% по сравнению с моодисперсным приближением при той же массовой доле пылинок. С учетом этого обстоятельства в данной работе было использовано моодисперсное приближение, которое позволило получить из (7) выражение, определяющее кинетику конденсации пара на пылинках,

$$\frac{dc^{\text{het}}}{dx} = \frac{4\pi\rho_l}{\rho_\Sigma u} n_p r_p^2 \dot{r}_p. \quad (12)$$

Здесь c^{het} — массовая доля конденсата, образовавшегося на пылинках, n_p и r_p — соответственно число пылинок в единице объема и их радиус, $\dot{r}_p$ — конденсационная скорость роста пылинок, определяющаяся по формуле Фукса [21]:

$$\dot{r}_p = \frac{\alpha(p_v - p_s)}{\rho_l \sqrt{2\pi RT/\mu_v}} \left(1 + \frac{\alpha}{D} \sqrt{\frac{RT}{2\pi\mu_v}} \frac{r_p^2}{r_p + \langle l \rangle} \right)^{-1}, \quad (13)$$

где α — коэффициент конденсации, p_v и p_s — парциальное давление пара и давление насыщения соответственно, R — универсальная газовая постоянная, μ_v — молярная масса пара, D — коэффициент диффузии, $\langle l \rangle$ — средняя длина свободного пробега молекул пара.

Концентрация пара вычислялась из уравнения материального баланса

$$\frac{dc_v}{dx} = - \left(\frac{dc^{\text{hom}}}{dx} + \frac{dc^{\text{het}}}{dx} \right), \quad (14)$$

где $c^{\text{hom}} = \rho_d/\rho_\Sigma$ — массовая доля конденсата, образовавшегося по гомогенному механизму.

Система уравнений кинетики гомогенно-гетерогенной конденсации (6), (12), (14) позволяет описать конденсационный механизм влияния запыленности потока на параметры образующихся субмикронных частиц (капель), реализующийся при соударениях молекул пара с поверхностью пылинок. Наряду с этим влияние запыленности потока может реализоваться по коагуляционному механизму при соударении субмикронных капель с пылинками. При оценке влияния процессов коагуляции учитывались соударения капель между собой (в приближении броуновской коагуляции моодисперсных сферических частиц аналогично [22, 23]) и с пылинками (столкновительная коагуляция). Для вычисления убыли капель при коагуляции использовалось выражение

$$u \frac{dn_d}{dx} = - \left(K_0 n_d^2 / 2 + K_1 n_d n_p \right), \quad (15)$$

где K_0 — константа броуновской коагуляции, K_1 — константа столкновительной коагуляции. С учетом приближенности подхода расчеты проводились при постоянном значении $K_0 = 6 \times 10^{-19} \text{ м}^3/\text{с}$, которое позволило в [24] получить согласование расчетных и экспериментальных данных. Значение K_1 определялось с учетом того факта, что размер пылинок (от 10 мкм и выше) существенно превосходит размер субмикронных капель:

$$K_1 = \pi r_p^2 v_{\text{rel}}, \quad (16)$$

где v_{rel} — скорость соударения капель и пылинок. Корректное вычисление этой величины является отдельной сложной задачей (см., например, [25]). В данной работе для оценок влияния столкновительной коагуляции были приняты значения v_{rel} , равные 1 и 10% от скорости потока u . Как следует из выражений (15), (16), запыленность потока влияет на процесс коагуляции образующихся капель через комплекс $n_p r_p^2$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве объекта моделирования был использован один из рассмотренных в работах [12, 13] углей. Полученные результаты численного моделирования образования субмикронных частиц (капель) в продуктах сгорания угля Yanzhou (КНР) при гомогенно-гетерогенной конденсации сульфата калия представлены на рис. 1–11. Варьируемыми параметрами были концентрация и размер пылинок, а также градиент температуры в зоне конденсации. Естественно предположить, что влияние пылинок тем больше, чем выше скорость конденсации пара на пылинках, определяемая выражением (8). С учетом того факта, что при

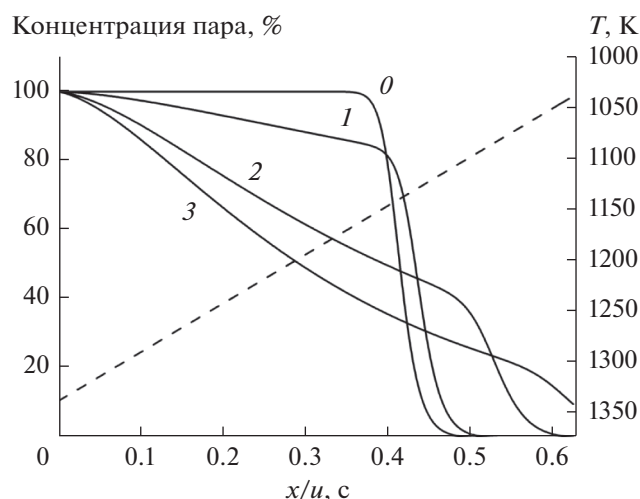


Рис. 1. Изменение концентрации пара (сплошные кривые) и температуры (штриховая кривая) вдоль оси канала при различных значениях $n_p r_p$: 0 – 0, 1 – 250, 2 – 1000, 3 – 1500.

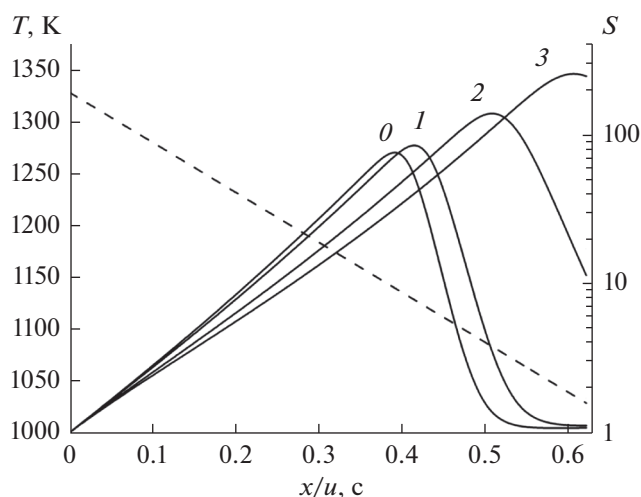


Рис. 2. Изменение степени пересыщения (сплошные кривые) и температуры (штриховая кривая) вдоль оси канала при различных значениях $n_p r_p$: 0 – 0, 1 – 250, 2 – 1000, 3 – 1500.

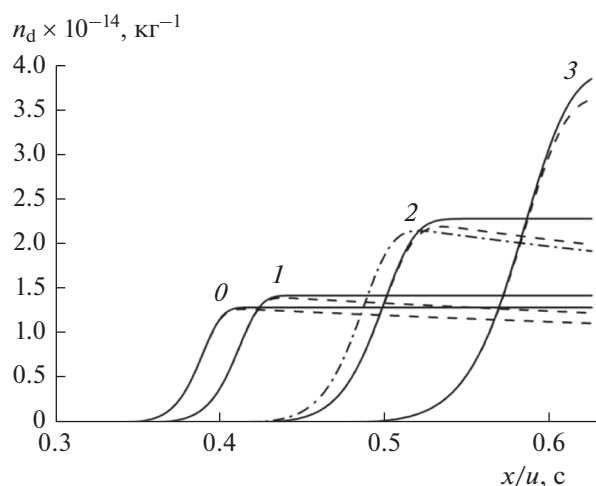


Рис. 3. Изменение вдоль оси канала концентрации капель, образующихся при гомогенной нуклеации, без учета коагуляции (сплошные кривые) и с учетом коагуляции (только броуновской – штриховые кривые, броуновской и столкновительной – штрихпунктир) при различных значениях $n_p r_p$: 0 – 0, 1 – 250, 2 – 1000, 3 – 1500.

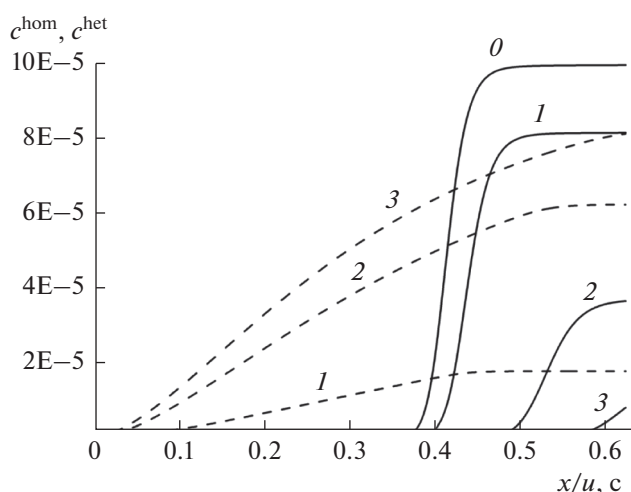


Рис. 4. Изменение массовой доли конденсата при гомогенной (сплошные кривые) и гетерогенной (штриховые кривые) конденсации вдоль оси канала при различных значениях $n_p r_p$: 0 – 0, 1 – 250, 2 – 1000, 3 – 1500.

моделировании размер пылинок варьировался от 10 мкм и выше, скорость конденсационного роста гетерогенных капель при таких размерах становится обратно пропорциональной радиусу (диффузионный режим роста [21]). В итоге влияние пылинок должно определяться комплексом $n_p r_p^2$. Расчеты при вариации величин n_p и r_p подтвердили этот вывод.

На рис. 1 представлено изменение концентрации пара в зоне гомогенно-гетерогенной конденсации при различных значениях величины $n_p r_p$ и фиксированной скорости изменения температуры (480 К/с). Для сравнения представлены результаты для чисто гомогенного случая. Видно, что на кривых убывания концентрации пара четко

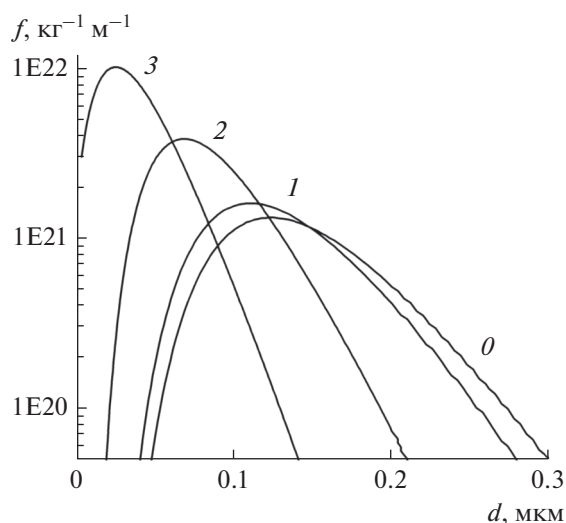


Рис. 5. Функция распределения капель, образующихся при гомогенной нуклеации, при различных значениях $n_p r_p$: 0 – 0, 1 – 250, 2 – 1000, 3 – 1500.

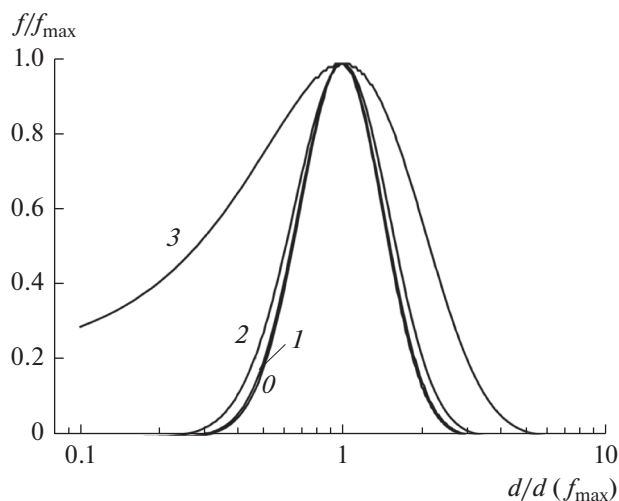


Рис. 6. Нормированная функция распределения капель, образующихся при гомогенной нуклеации, при различных значениях $n_p r_p$: 0 – 0, 1 – 250, 2 – 1000, 3 – 1500. Нормировка на параметры, соответствующие максимумам кривых на рис. 5.

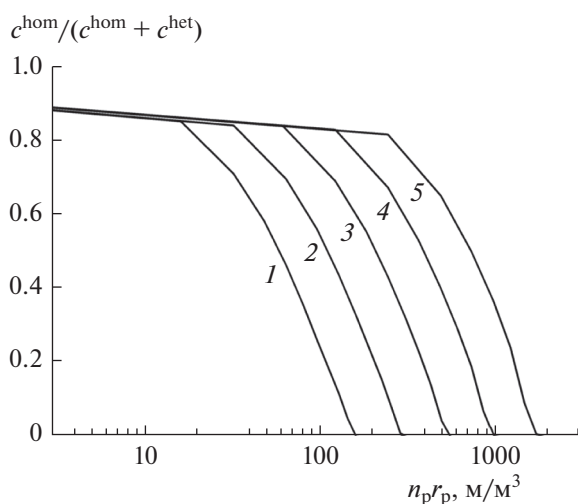


Рис. 7. Изменение вклада гомогенной конденсации в увеличение массовой доли конденсата в зависимости от величины комплекса $n_p r_p$ при различной скорости изменения температуры: 1 – $dT/dt = 30$, 2 – 60, 3 – 120, 4 – 240, 5 – 480 К/с.

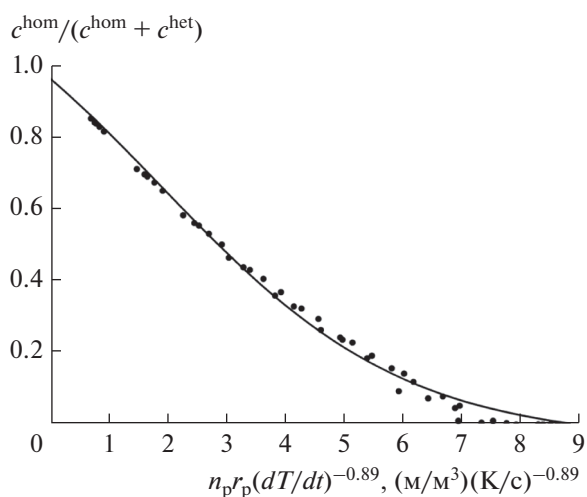


Рис. 8. Изменение вклада гомогенной конденсации в увеличение массовой доли конденсата в зависимости от обобщающего критерия. Символы – результаты расчетов при различных значениях параметра $n_p r_p$ и скорости изменения температуры dT/dt .

выделяются два участка: начальный, характеризующийся плавным изменением концентрации пара при гетерогенной конденсации, и заключительный, характеризующийся резким изменением концентрации пара при гомогенной конденсации. По мере увеличения $n_p r_p$ протяженность зоны гетерогенной конденсации на пылинках и вклад этого процесса в убыль пара возрастают.

При этом зона гомогенной конденсации смещается в область более низких температур и концентраций пара и одновременно более высоких степеней пересыщения (рис. 2). Следствием этого является увеличение количества капель, образующихся при гомогенной нуклеации (рис. 3, сплошные кривые), при одновременном снижении их массы (рис. 4).

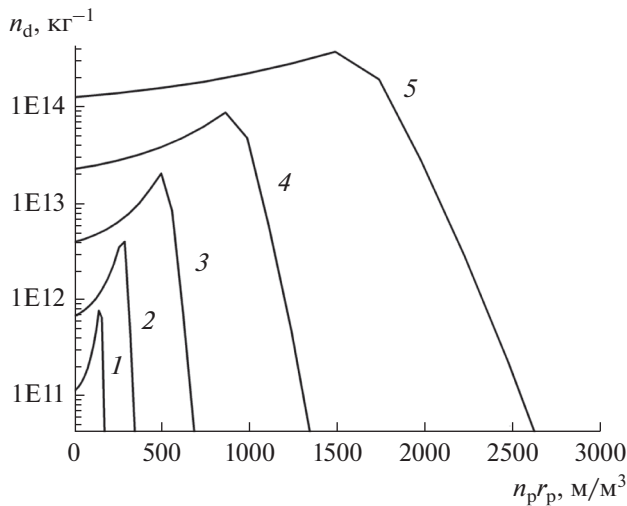


Рис. 9. Зависимость числа капель, образующихся при гомогенной нуклеации, от величины комплекса $n_p r_p$ при различной скорости изменения температуры: 1 – $dT/dt = 30$, 2 – 60, 3 – 120, 4 – 240, 5 – 480 K/c.

Результаты расчета концентрации капель с учетом процессов коагуляции представлены на рис. 3 штриховыми и штрихпунктирными кривыми. Штриховые кривые представляют данные расчетов с учетом только броуновской коагуляции. Штрихпунктирная кривая представляет данные расчетов с учетом совместного влияния как броуновской, так и столкновительной коагуляции при $v_{rel} = 0.1u$. При $v_{rel} = 0.01u$ влияние столкновительной коагуляции незаметно на фоне броуновской коагуляции. Видно, что влияние этих процессов невелико как для незапыленного, так и для запыленного потоков.

Без учета процессов коагуляции функция распределения по размерам образующихся капель, нормированная на число капель в единице массы парогазовой смеси, имеет вид, представленный на рис. 5, 6. Как следует из рис. 2, 5 и 6, если в пределах зоны конденсации степень пересыщения снижается до значений, при которых процесс нуклеации прекращается, присутствие гетерогенных центров не изменяет качественный вид функции распределения гомогенных капель по размерам, которая соответствует логнормальному распределению. Как видно на рис. 5, увеличение параметра $n_p r_p$ приводит к сдвигу максимума функции распределения в сторону меньших размеров капель. Это согласуется с отмеченным выше увеличением количества образующихся ка-

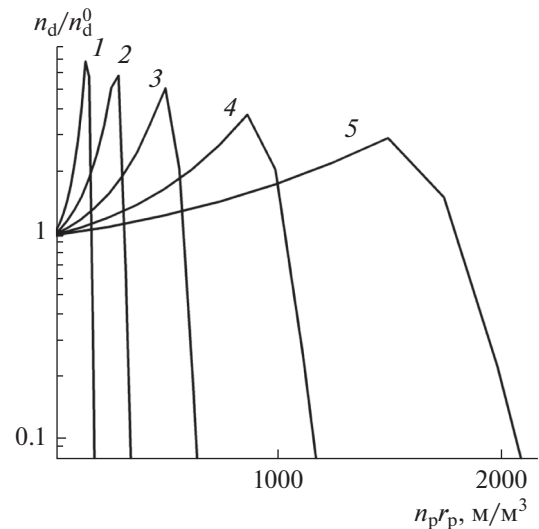


Рис. 10. Зависимость относительного числа капель, образующихся при гомогенной нуклеации, от величины комплекса $n_p r_p$ при различной скорости изменения температуры: 1 – $dT/dt = 30$, 2 – 60, 3 – 120, 4 – 240, 5 – 480 K/c.

пель и уменьшением их массы при возрастании параметра $n_p r_p$ (рис. 3, 4).

Изменение вклада гомогенной конденсации в увеличение массовой доли конденсата в зависи-

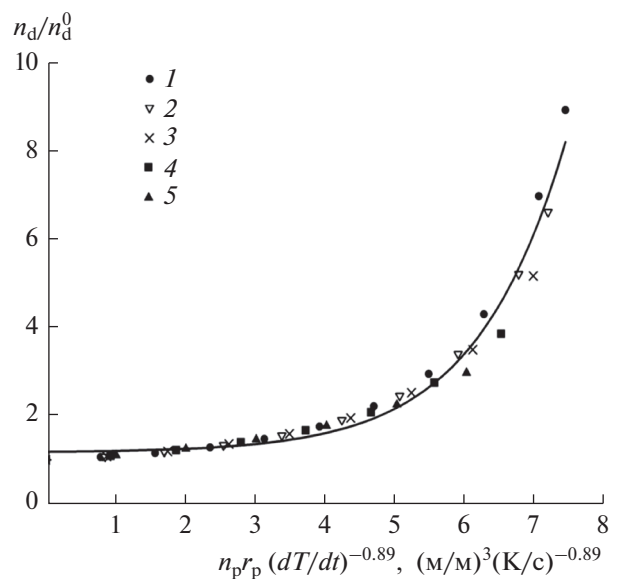


Рис. 11. Изменение относительного числа капель, образующихся при гомогенной нуклеации, в зависимости от обобщающего критерия. Символы – результаты расчетов при различных значениях параметра $n_p r_p$ и скорости изменения температуры: 1 – $dT/dt = 30$, 2 – 60, 3 – 120, 4 – 240, 5 – 480 K/c.

мости от величины комплекса $n_p r_p$ при различной скорости изменения температуры dT/dt представлено на рис. 7. Видно, что с увеличением dT/dt влияние гетерогенных центров на процесс конденсации уменьшается. В частности, одинаковое уменьшение вклада гомогенной конденсации достигается при больших значениях комплекса $n_p r_p$.

На основании проведенных расчетов было установлено, что весь набор расчетных точек, на основании которого получены кривые рис. 7, с хорошей точностью может быть описан зависимостью от параметра $\xi = n_p r_p (dT/dt)^{-0.89}$ (см. рис. 8). Как показывает опыт расчетов, dc^{hom}/dx при максимальной степени пересыщения и $n_p r_p = 0$ линейно зависит от dT/dt . С другой стороны, dc^{het}/dx линейно зависит от $n_p r_p$. Следовательно, по физическому смыслу параметр ξ есть отношение скорости конденсации на пылинках к скорости гомогенной конденсации при максимальной степени пересыщения.

Количество образующихся при гомогенной нуклеации капель в зависимости от величины комплекса $n_p r_p$ при различной скорости изменения температуры dT/dt представлено на рис. 9. Видно, что увеличение dT/dt приводит к росту числа капель. При каждом значении dT/dt с увеличением параметра $n_p r_p$ до определенного предела, связанного с протяженностью зоны конденсации, также наблюдается рост числа капель, связанный со сдвигом зоны гомогенной конденсации в область более низких температур и более высоких степеней пересыщения (рис. 2, 3). При превышении предельного значения $n_p r_p$ в пределах зоны конденсации имеет место уменьшение степени пересыщения и концентрации капель. Для всех значений dT/dt зона конденсации определялась по перепаду температуры в 300 К.

Влияние гетерогенных центров на число образующихся капель характеризуется отношением n_d/n_d^0 , где n_d^0 — число образующихся капель при отсутствии гетерогенных центров. Зависимость n_d/n_d^0 от величины комплекса $n_p r_p$ при различной скорости изменения температуры dT/dt представлена на рис. 10. Следует отметить уменьшение влияния гетерогенных центров (комплекса $n_p r_p$) на число образующихся капель с увеличением dT/dt . В частности, одинаковое значение

n_d/n_d^0 достигается при больших значениях комплекса $n_p r_p$.

Отметим, что при существенном увеличении dT/dt до значений, характерных для течения в сопле ($\sim 10^6$ К/с), имеет место снижение величины n_d/n_d^0 до значений, меньших единицы [24]. По-видимому, в этом случае истощение паровой фазы за счет гетерогенной конденсации оказывается более существенным, чем рост степени пересыщения при сдвиге зоны гомогенной конденсации вниз по потоку. Использование параметра ξ позволяет с хорошей точностью представить данные, соответствующие восходящим ветвям кривых на рис. 10, единой кривой (рис. 11).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования получены данные о параметрах субмикронных частиц образующихся при сжигании углей с учетом влияния запыленности потока. Использование предположения об идеальной смачиваемости гетерогенных центров конденсации (пылинок) позволило получить оценку сверху по их влиянию на процесс объемной конденсации. Выяснено, что запыленность потока приводит к уменьшению массовой концентрации субмикронных частиц вследствие конденсации части пара на пылинках. В то же время счетная концентрация субмикронных частиц возрастает, а их размер уменьшается, что должно быть учтено при организации улавливания таких частиц. Указанный эффект зависит не только от параметров запыленности потока, но и от скорости изменения температуры в зоне конденсации.

Предложен критерий, позволяющий судить о влиянии запыленности потока на процесс объемной конденсации, учитывающий как параметры пыли, так и скорость изменения температуры в зоне конденсации. Проведенные оценки показали незначительное влияние процессов коагуляции на параметры субмикронных частиц, образующихся при сжигании углей.

Вне рамок обсуждения данной работы осталось возможное приобретение электрического заряда летучей золой, образующейся после сгорания угольных частиц, что может существенно интенсифицировать процесс конденсации паров на частицах летучей золы. Данное обстоятельство требует отдельного рассмотрения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-08-00182а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dockery D.W., Pope C.A., Xu X.P., Spengler J.D., Ware J.H., Fay M.E., Ferris B.G., Speizer F.E. // *N. Engl. J. Med.* 1993. V. 329. P. 1753.
2. <http://base.garant.ru/71126758/>.
3. www.crs.gov.
4. Jin Y., Andersson H., Zhang S. // *Int. J. Environ. Res. Public. Health.* 2016. V. 13. P. 1219.
5. Vejehati F., Xu Z., Gupta R. // *Fuel.* 2010. V. 89. P. 904.
6. Soco E., Kalembkiewicz J. // *Fuel.* 2009. V. 88. P. 1513.
7. Li J., Zhuang X., Querol X. // *Fuel.* 2011. V. 90. P. 240.
8. Zhang L., Ninomiya Y. // *Fuel.* 2006. V. 85. P. 194.
9. Lockwood F.C., Yousif S. // *Fuel Process. Technol.* 2000. V. 65–66. P. 439.
10. Tomeczek J., Palugniok H. // *Fuel.* 2002. V. 81. P. 1251.
11. Gao Q., Li S., Yang M., Biswas P., Qiang Y. // *Proc. Combust. Inst.* 2017. V. 36. P. 2083.
12. Корцеништейн Н.М., Лебедева Л.Н., Петров Л.В., Самуйлов Е.В. // *Коллоид. журн.* 2015. Т. 77. С. 174.
13. Корцеништейн Н.М., Петров Л.В. // *Теплоэнергетика.* 2018. № 7. С. 33.
14. Kuni F.M., Shchekin A.K., Rusanov A.I., Widom B. // *Adv. Colloid Interface Sci.* 1996. V. 65. P. 71.
15. Куни Ф.М., Щекин А.К., Гринин А.П. // *УФН.* 2001. Т. 171. С. 345.
16. Бринь А.А., Фисенко С.П., Шабер К. // *Коллоид. журн.* 2009. Т. 71. С. 454.
17. Чирихин А.В. Течение конденсирующихся и запыленных сред в соплах аэродинамических труб. М.: Физматлит, 2011.
18. Корцеништейн Н.М., Ястребов А.К. // *Коллоид. журн.* 2016. Т. 78. С. 444.
19. Стернин Л.Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. М.: Машиностроение, 1974.
20. Kashchiev D. Nucleation. Basic Theory with Applications. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2000.
21. Фукс Н.А. Испарение и рост капель в газообразной среде. М.: Изд-во АН СССР, 1958.
22. Giesen A., Kowalik A., Roth P. // *Phase Transit.* 2004. V. 77. P. 115.
23. Pathak H., Mullick K., Shinobu T., Wyslouzil B.E. // *Aerosol Sci. Technol.* 2013. P. 1310.
24. Корцеништейн Н.М., Петров Л.В. // *Коллоид. журн.* 2017. Т. 79. С. 276.
25. Derevich I.V. // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2006. V. 49. P. 4290.