



ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О КОНДЕНСАЦИИ ПАРА, СОДЕРЖАЩЕГО ТВЁРДЫЕ ЧАСТИЦЫ НА РЕБРЕ

Якимов¹ Н.Д., Дмитриев² А.В., Бадретдинова³ Г.Р., Борисова⁴ С.Д.

^{1,2,3,4}Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0253-3762>, nyakimov@inbox.ru¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com²

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5312>, nice.badretdinova@mail.ru³
svetlana-zag@bk.ru⁴

Резюме: ЦЕЛЬ. Оценить влияние на процесс конденсации загрязнений, содержащихся в паре и оседающих на поверхности охлаждаемых рёбер, для чего сформулировать математическую модель процесса, исследовать его свойства и получить количественные оценки характеристик. МЕТОДЫ. Уравнения математической модели строятся на основе законов сохранения энергии и массы, их исследование и оценки проводятся с применением аналитических методов теории дифференциальных уравнений, методов теории подобия и размерностей, а также численных методов решения краевых задач. РЕЗУЛЬТАТЫ. Сформулирована постановка задачи о конденсации пара, содержащего твёрдые частицы, на ребре. Выявлено наличие автомодельного решения, представляющегося в виде безразмерной функции одной переменной, единой для всех наборов исходных параметров. Получены соотношения, описывающие распределения толщины $\delta(x, \tau)$ осадка и температуры $\vartheta(x, \tau)$ на прямом ребре неограниченной высоты ($l = \infty$) при первоначально чистой поверхности ($h_0 = 0$). Данные соотношения также практически точно описывают начальную стадию такого процесса на прямом ребре конечной высоты l , пока осадок заметной толщины не покроет поверхность ребра целиком, а также – начальные моменты в случае ребра на круглой трубе, пока ширина зоны осадка с заметной толщиной существенно меньше радиуса трубы. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование этих распределений как начальных для рёбер ограниченной высоты вместо, например, введения равномерного начального слоя h_0 , позволит достигать высокой точности численных расчётов без чрезмерного сгущения сетки по координате и времени.

Ключевые слова: конденсация пара; осаждение частиц; оребрённая поверхность.

Для цитирования: Якимов Н.Д., Дмитриев А.В., Бадретдинова Г.Р., Борисова С.Д.. Особенности решения задачи о конденсации пара, содержащего твёрдые частицы на ребре // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 121-129. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-121-129.

FEATURES OF SOLVING THE PROBLEM OF CONDENSATION OF VAPOR CONTAINING SOLID PARTICLES ON THE EDGE

ND. Yakimov¹, AV. Dmitriev², GR. Badretdinova³, SD. Borisova⁴

^{1,2,3,4}Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ieremiada@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0253-3762>, nyakimov@inbox.ru¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com²

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5312>, nice.badretdinova@mail.ru³
svetlana-zag@bk.ru⁴

Abstract: THE PURPOSE. To evaluate the effect on the condensation process of contaminants contained in the steam and deposited on the surface of the cooled fins, for which to formulate a

mathematical model of the process, to investigate its properties and to obtain quantitative estimates of the characteristics. **METHODS.** The equations of the mathematical model are based on the laws of conservation of energy and mass, their study and evaluation are carried out using analytical methods of the theory of differential equations, methods of similarity theory and dimensions, as well as numerical methods for solving boundary value problems. **RESULTS.** The formulation of the problem of condensation of vapor containing solid particles on the edge is formulated. The presence of a self-similar solution is revealed, which is represented as a dimensionless function of one variable, uniform for all sets of initial parameters. The relations describing the distributions of the thickness $\delta(x, \tau)$ of the sediment and the temperature $\vartheta(x, \tau)$ on a straight edge of unlimited height ($l = \infty$) with an initially clean surface ($h_0 = 0$) are obtained. These relations also almost accurately describe the initial stage of such a process on a straight edge of a finite height l , until a sediment of noticeable thickness covers the entire surface of the rib, as well as the initial moments in the case of an edge on a round pipe, until the width of the sediment zone with a noticeable thickness is significantly less than the radius of the pipe. **CONCLUSION.** Using these distributions as the initial ones for edges of limited height instead of, for example, introducing a uniform initial layer h_0 , will allow achieving high accuracy of numerical calculations without excessive thickening of the grid in coordinate and time.

Keywords: steam condensation; particle deposition; finned surface.

For citation: Yakimov ND., Dmitriev AV., Badretdinova GR., Borisova SD. Features of solving the problem of condensation of vapor containing solid particles on the edge. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(3): 121-129. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-121-129.

Введение

На сегодняшний день наблюдается тенденция к снижению потребления энергоресурсов, за счет повышения эффективности применяемого технологического оборудования. Для реализации сложных технологических процессов производству необходимо выполнять комплекс мер для эксплуатации технических устройств и аппаратов, в том числе очистку поверхностей оборудования от загрязнений твердыми частицами. Данная проблема возникает при производстве пищевых продуктов, бумаги и картона из целлюлозы, текстиля, катализаторов, цемента, в покрасочных камерах при окрашивании изделий и т.д. Наиболее известными источниками загрязнения производственного оборудования и атмосферного воздуха являются дымовые газы, образующиеся при сжигании различного топлива на тепловых и атомных электростанциях, предприятия черной и цветной металлургии, автомобильный и железнодорожный транспорт, многочисленные заводы и фабрики и т.д.

Задачи по снижению затрат на эксплуатацию теплообменного оборудования с целью повышения энергоэффективности энерго- и ресурсосбережения рассматриваются многими авторами [1, 2]. Так как закупорка каналов, пластин и ребер теплообменников, вызванная загрязнением твердыми частицами, ограничивает применение оборудования, то очень важно уменьшать количество осадка на поверхностях теплопередачи [3]. Следовательно, возникает необходимость в изучении процесса осаждения частиц на поверхности с помощью экспериментов и численного моделирования. Однако из-за сложности реализации физического эксперимента и финансовых затрат, большинство исследователей используют методы численного моделирования для изучения механизмов осаждения твердых частиц [4] и их влияние на процесс теплопередачи [5, 6]. В последнее время научные знания в области математического моделирования значительно продвинулись, поэтому численные исследования по прогнозированию осаждения твердых частиц на поверхностях теплообменных аппаратов [7-9] является важной и актуальной задачей.

Многие работы посвящены изучению моделей осаждения частиц на поверхность теплообмена [10, 11]. В работах [12-14] с помощью численного моделирования авторами было установлено, что на движение и осаждение частиц на поверхность теплообмена влияют такие факторы как, геометрические параметры устройства, температура поверхности, скорость потока, размер частиц и т.п. Поэтому большинство исследований направлены на изучение влияния различных внешних факторов, механизмов и степени осаждения твердых частиц на поверхности теплообменных аппаратов [15, 16]. Например, в статье [17] рассматривается влияние скорости потока, массы и размера частиц на их

осаждение. Было установлено, что увеличение диаметра частиц приводит изначально к повышению степени осаждения, затем к снижению, как и рост скорости потока воздуха. Приращение массы частиц способствует количественному накоплению слоя осадка на передней части поверхности ребристого теплообменника.

Рассматриваемая проблема встречается в работах авторов, которые изучают такие факторы, как относительная влажность воздуха и концентрация частиц, осаждающиеся на мокрые поверхности теплообмена. В работе [18] разработанная численная модель использовалась для реализации процесса захвата частиц конденсатом воды и слоем влажного осадка на мокрой поверхности оребренного теплообменника. Так как твердые частицы имеют большую склонность осаждаться на мокрых поверхностях, чем на сухих, то в случае интенсивного осаждения частиц на влажные ребра в условиях осушения возникает более серьезное ухудшение тепловых характеристик аппарата. Результаты работы показывают, что такие параметры как относительная влажность воздуха и концентрация частиц оказывают большее влияние на общую массу слоя осадка, чем, например, скорость воздуха и диаметр частиц, поскольку ранее приведенные параметры способствуют интенсивности осаждения, а высокая скорость воздуха или больший диаметр частиц приводят к уменьшению интенсивности за счет отпрыгивания или инерциального движения в потоке воздуха.

Процессы в котельных системах также сопровождаются проблемами осаждения частиц на поверхностях теплообмена, а именно зашлаковывание и засорение золой, приводящее к ухудшению характеристик теплопередачи, внеплановым отключениям и выходу из строя систем с серьезными экономическими последствиями [19, 20]. Для этого авторы предлагают различные типы оптимизированных теплообменников, как один из способов снижения загрязнения твердыми частицами поверхностей теплообмена. Исследования по изменению характеристик теплопередачи и загрязнению пяти различных теплообменников с оребренными трубами в работе [21] показывают, что увеличение количества ребер приводит к уменьшению слоев осадка при незначительном снижении эффективности теплопередачи. Поэтому их целесообразно использовать в качестве теплообменников, предотвращающих образование загрязнений, в системах рекуперации отработанного тепла. Изменение геометрических параметров, то есть замена круглых труб на эллиптические, при неизменном шаге приводит к снижению эффективности теплопередачи и увеличению загрязнений, следовательно, применять их нецелесообразно.

Таким образом, в системах рекуперации отработанного тепла, которые играют важную роль в снижении потерь энергии и повышении энергоэффективности во многих промышленных процессах, загрязнение теплообменников может стать серьезной проблемой. Поэтому улучшение теплопередающих характеристик и снижение загрязнений твердыми частицами поверхностей теплообмена на сегодняшний день является актуальной задачей.

В данной работе решены задачи переноса энергии при вынужденной конвекции в широком диапазоне характеристик оребренных поверхностей в многофазных системах при конденсации парогазовой смеси. Изложены научные основы и методы интенсификации процессов передачи тепла и массы в оборудовании, предназначенном для передачи теплоты.

Материалы и методы

В данном разделе статьи рассмотрена задача о конденсации пара, содержащего твердые частицы, на ребре, причём частицы в ходе процесса могут оседать на поверхности, образуя слой осадка. При первоначальном рассмотрении картины формирования слоя осадка на ребре, основных свойств процесса, желательно, чтобы математическая модель оказалась максимально простой. Следовательно, она должна учитывать лишь основные факторы при упрощенных предположениях. Исходя из этого, ребро и слой осадка можно считать тонкими, и распределения температуры в них одномерными. Их теплоёмкость можно не учитывать. Температура на внешней поверхности слоя осадка равна температуре t_s конденсации (насыщения), а осадок однороден. Его толщина пропорциональна общему количеству образовавшегося в этом месте конденсата.

Если рассматривать прямое ребро, на плоской поверхности, то при указанных предположениях получается система двух дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial^2 \vartheta(x, \tau)}{\partial x^2} = A \frac{\vartheta(x, \tau)}{\delta(x, \tau)}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \delta(x, \tau)}{\partial \tau} = P \frac{\vartheta(x, \tau)}{\delta(x, \tau)} \quad (2)$$

при условиях

$$\vartheta(0, \tau) = \vartheta_0, \quad \frac{d\vartheta}{dx}_{x=l} = 0, \quad \delta(x, 0) = 0. \quad (3)$$

Здесь τ – время, x – координата ребра, $0 \leq x \leq l$, l – высота ребра, $\delta(x, \tau)$ – распределение толщины слоя осадка по ребру, $\vartheta(x, \tau)$ – распределение избыточной температуры в ребре, $\vartheta = ts - t$, t – температура, $\vartheta_0 = ts - t_0$, t_0 – температура у основания

ребра. Коэффициенты A и P выражаются через заданные параметры процесса, $A = \frac{2\lambda_0}{\lambda_p \cdot \delta_p}$,

$P = k \cdot \lambda_0$; λ_0, λ_p – теплопроводности осадка и ребра, δ_p – толщина ребра, k – коэффициент осаждения.

Такого же рода уравнения можно выписать для ребра на круглой трубе. Рассматриваемая математическая постановка о формировании слоя осадка на ребре при изначально чистой поверхности оказывается математически чёткой и лаконичной. Вместе с тем, она оставляет серьёзные вопросы о поведении решения в начальные моменты времени. Первоначальный анализ показывает, что при $\tau \rightarrow 0$ тепловой поток ребра оказывается неограниченно большим, а картина процесса – не очень понятной, что осложняет построение даже численного решения. Конечно, в начальные моменты времени, данная модель всё равно не отвечает физике реального процесса, и эти детали решения при малых τ не представляют интереса для практики. Поэтому оправдано, для осуществления численных расчётов, например, исказить модель введением условного тонкого первоначального слоя осадка толщиной h_0 . Однако, думается, представление о поведении модели, в том числе в начальные моменты, необходимо для её понимания и правильного применения.

Отчасти поведение модели при малых τ характеризует, что толщина δ_0 слоя осадка у основания ребра меняется по зависимости $\delta_0(\tau) = \sqrt{2 \cdot P \cdot \vartheta_0 \cdot \tau}$ (при $h_0 = 0$), что нетрудно получить интегрированием (2) при $x = 0$ с учётом $\vartheta(0, \tau) = \vartheta_0$. Но этого, конечно, недостаточно. Нужно представлять всё решение, в частности, насколько быстро расширяется зона с заметной толщиной осадка, какова его форма и т.п. Выяснению этих вопросов и посвящается нижеизложенный материал.

Можно видеть, что в начальные моменты времени большая плотность теплового потока имеет место у основания ребра, и именно там и только там начинает формироваться слой осадка, а поверхность ребра на некотором удалении от основания сначала остаётся фактически чистой. Лишь постепенно, по мере роста толщины осадка у самого основания и, соответственно, уменьшения там плотности теплового потока, зона с заметной толщиной осадка расширяется. Поэтому сначала процесс будет идти одинаково на плоских рёбрах разной высоты, пока зона заметного осаждения не охватит всё ребро по высоте. Также, если ребро находится не на плоской поверхности, а скажем, на трубе, то пока ширина зоны заметного осаждения будет много меньше радиуса трубы, процесс не будет отличаться от случая плоского ребра.

Поэтому для анализа картины процесса в начальные моменты достаточно рассмотреть вариант постановки для плоского ребра бесконечной высоты ($l = \infty$). Тогда

$$0 \leq x < \infty, \text{ а в (3) вместо условия } \frac{d\vartheta}{dx}_{x=l} = 0 \text{ будет } \lim_{x \rightarrow \infty} \vartheta(x, \tau) = 0.$$

Видно, что в постановке (1) – (3) теперь нет параметров, определяющих масштаб длины, как l для ребра конечной высоты, и времени. Поэтому искомые распределения $\vartheta(x, \tau)$ и $\delta(x, \tau)$ при изменении времени τ или исходных параметров задачи должны оказаться подобными сами себе, быть автомодельными. Если сопоставить с безразмерными аргументами для случая конечного ребра (время $\frac{\tau \cdot P \cdot \vartheta_0}{l^4 \cdot A^2}$ и координата $\frac{x}{l}$), то здесь составить безразмерный аргумент, не содержащий определяющей длины, можно, взяв отношение этих координаты и времени, причём координату в степени, в четыре раза большей, чем у времени, например, в виде

$$\xi = \frac{x}{\sqrt[4]{\tau}} \cdot \sqrt[4]{\frac{A^2}{2P\vartheta_0}}. \quad (4)$$

Безразмерные температура $\frac{\vartheta}{\vartheta_0}$ и толщина осадка $\frac{\delta}{\sqrt{2P\vartheta_0\tau}}$ должны быть функциями этого аргумента:

$$\frac{\vartheta}{\vartheta_0} = \psi(\xi), \quad (5)$$

$$\frac{\delta}{\sqrt{2P\vartheta_0\tau}} = \varphi(\xi). \quad (6)$$

Функции $\varphi(\xi)$ и $\psi(\xi)$ от одного аргумента. Они должны оказаться одними и теми же для всех постановок с неограниченным прямым ребром во все моменты времени при всех наборах исходных параметров $t_0, t_s, \lambda_0, k, \lambda_p, \delta_p$.

Таким образом, если $\varphi(\xi)$ и $\psi(\xi)$ заранее известны, то искомые размерные распределения δ и ϑ от размерных аргументов x и τ сразу определяются

$$\vartheta(x, \tau) = \vartheta_0 \cdot \psi(\xi(x, \tau)), \quad (7)$$

$$\delta(x, \tau) = \sqrt{2P\vartheta_0\tau} \cdot \varphi(\xi(x, \tau)), \quad (8)$$

где

$$\xi(x, \tau) = \frac{x}{\sqrt[4]{\tau}} \cdot \sqrt[4]{\frac{A^2}{2P\vartheta_0}} \quad (0 \leq x < \infty, 0 < \tau < \infty). \quad (9)$$

Для определения $\varphi(\xi)$ и $\psi(\xi)$ подставим (7)–(9) в уравнения (1), (2).

Сначала для уравнения (1). Если по уравнению (7) $\vartheta(x, \tau) = \vartheta_0 \cdot \psi(\xi(x, \tau))$, то

$$\frac{\partial \vartheta(x, \tau)}{\partial x} = \vartheta_0 \cdot \frac{d\psi(\xi)}{d\xi} \cdot \frac{\partial \xi(x, \tau)}{\partial x}, \quad \text{где по (9)} \quad \frac{\partial \xi(x, \tau)}{\partial x} = \sqrt[4]{\frac{A^2}{\tau \cdot 2 \cdot P \cdot \vartheta_0}}, \quad \text{и} \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = 0. \quad \text{Далее,}$$

$$\frac{\partial^2 \vartheta(x, \tau)}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \vartheta(x, \tau)}{\partial x} \right) = \vartheta_0 \cdot \left[\frac{d^2 \psi(\xi)}{d\xi^2} \cdot \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + \frac{d\psi(\xi)}{d\xi} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \right] = \vartheta_0 \cdot \frac{d^2 \psi(\xi)}{d\xi^2} \cdot \frac{A}{\sqrt{2\tau P \vartheta_0}}.$$

Подставляем это в левую часть уравнения (1), а непосредственно уравнения (7),

$$(8) - \text{ в правую: } \vartheta_0 \cdot \frac{d^2 \psi(\xi)}{d\xi^2} \cdot \frac{A}{\sqrt{2\tau P \vartheta_0}} = A \cdot \frac{\vartheta_0 \cdot \psi(\xi)}{\sqrt{2\tau P \vartheta_0} \cdot \varphi(\xi)}, \quad \text{то есть} \quad \frac{d^2 \psi(\xi)}{d\xi^2} = \frac{\psi(\xi)}{\varphi(\xi)}.$$

Аналогично, если $\delta(x, \tau) = \sqrt{2P\vartheta_0\tau} \cdot \varphi(\xi(x, \tau))$, то

$$\begin{aligned} \frac{\partial \delta(x, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{\partial \sqrt{2P\vartheta_0\tau}}{\partial \tau} \cdot \varphi(\xi) + \sqrt{2P\vartheta_0\tau} \cdot \frac{d\varphi(\xi)}{d\xi} \cdot \frac{\partial \xi(x, \tau)}{\partial \tau} = \\ &= \frac{\sqrt{2P\vartheta_0}}{2\sqrt{\tau}} \varphi(\xi) + \sqrt{2P\vartheta_0\tau} \cdot \frac{d\varphi(\xi)}{d\xi} \cdot x \cdot \sqrt[4]{\frac{A^2}{2P\vartheta_0}} \cdot \left(-\frac{1}{4}\right) \cdot \frac{1}{\tau \cdot \sqrt[4]{\tau}} = \frac{\sqrt{P\vartheta_0}}{\sqrt{2\tau}} \left(\varphi(\xi) - \frac{\xi}{2} \cdot \frac{d\varphi(\xi)}{d\xi} \right). \end{aligned}$$

Подставляя это вместе с (7), (8) в (2), получаем:

$$\frac{\sqrt{P\vartheta_0}}{\sqrt{2\tau}} \left(\varphi(\xi) - \frac{\xi}{2} \cdot \frac{d\varphi(\xi)}{d\xi} \right) = P \cdot \frac{\vartheta_0 \cdot \psi(\xi)}{\sqrt{2P\vartheta_0\tau} \cdot \varphi(\xi)}, \quad \text{то есть} \quad \varphi(\xi) - \frac{\xi}{2} \cdot \frac{d\varphi(\xi)}{d\xi} = \frac{\psi(\xi)}{\varphi(\xi)}.$$

Таким образом, в результате этих выкладок вместо (1) и (2) остаётся

$$\psi''(\xi) = \frac{\psi(\xi)}{\varphi(\xi)}, \quad (10)$$

$$\frac{\xi}{2} \cdot \varphi'(\xi) = \varphi(\xi) - \frac{\psi(\xi)}{\varphi(\xi)}, \quad (11)$$

с условиями

$$0 \leq \xi < \infty, \varphi(0) = 1, \psi(0) = 1, \lim_{\xi \rightarrow \infty} \varphi(\xi) = 0, \lim_{\xi \rightarrow \infty} \psi(\xi) = 0. \quad (12)$$

Получилась система из двух обыкновенных дифференциальных уравнений, а не с частными производными, тоже нелинейных, третьего порядка. Их можно решить численно.

Графики зависимостей $\varphi(\xi)$ и $\psi(\xi)$ показаны на рис.1.

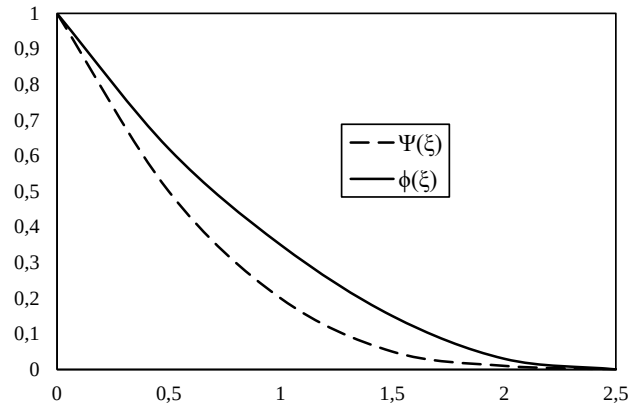


Рис. 1. Вид автомодельного решения

Fig. 1. Type of self-similar solution

Чтобы считать решение данной задачи построенным, достаточно знать одну из функций $\varphi(\xi)$ и $\psi(\xi)$. Вторая, согласно выражениям (10) или (11), может быть выражена через известную функцию. Например,

$$\varphi(\xi) = \frac{\psi(\xi)}{\psi''(\xi)}, \quad (13)$$

или

$$\psi(\xi) = \varphi(\xi) \cdot \left(\varphi(\xi) - \frac{\xi}{2} \cdot \varphi'(\xi) \right). \quad (14)$$

Для этой функции, после прямой подстановки одного из этих соотношений в другое, получится обыкновенное дифференциальное уравнение относительно одной функции одного переменного, но довольно сложное, нелинейное, третьего порядка.

Результаты и обсуждение

Таким образом, в работе показано, что рассматриваемая задача о формировании осадка на плоском ребре неограниченной высоты имеет автомодельное решение, которое может быть представлено в виде безразмерной функции одной переменной, единой для всех наборов исходных параметров ($t_0, t_s, \lambda_0, k, \lambda_p, \delta_p$). Размерные значения толщины слоя осадка и температуры в каждой точке ребра в любой момент времени легко находятся по этой функции через элементарные соотношения (7), (8), с использованием при необходимости выражения (14) или (13). Вид автомодельного решения представлен графически на рисунке 1.

Следует отметить, что это решение фактически точно описывает начальную стадию формирования осадка и на прямом ребре заданной (конечной) высоты, а также начальные моменты процесса в случае ребра на круглой трубе.

Заключение

Полученные результаты не только проясняют картину процесса в начальные моменты времени, но и дают точное количественное описание для его характеристик. Эти оценки показывают, что первоначально осадок образуется у основания ребра, там толщина слоя осадка растёт наиболее быстро. При достаточной высоте ребра часть его

поверхности, удалённая от основания, сначала остаётся практически чистой, хотя ширина зоны, покрытой осадком, в ходе процесса растёт.

Построенные распределения толщины осадка и температуры можно использовать в качестве начальных, при численном решении задач о формировании осадка на круглом или плоском ребре конечной высоты, чтобы избежать трудностей, связанных с неограниченными значениями теплового потока при малых временах. Это позволяет не вводить искажающее модель предположение о конечном первоначальном осадке на всём ребре, и тем самым избежать сильного сгущения сетки по координате и времени.

Литература

1. Голованчиков А.Б., Шурак А.А., Меренцов Н.А. Моделирование работы кожухотрубного теплообменника с учетом энерго- и ресурсосбережения // Химия. Экология. Урбанистика. 2021. (2021-1). С. 26–29.
2. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Гумерова Г.Х. Оценочный расчет процесса теплообмена в камере сгорания при сжигании природного газа // Вестник технологического университета. 2018. № 2(21). С. 99–103.
3. Sun K., Lu L., Jiang H. A computational investigation of particle distribution and deposition in a 90 bend incorporating a particle-wall model // Building and Environment. 2011. Vol. 46, N6. pp. 1251–1262.
4. Lu H., Lu L. Effects of rib spacing and height on particle deposition in ribbed duct air flows // Building and Environment. 2015. Vol. 92. pp. 317–327.
5. Guo Z., Li N., Klemeš J.J., et al. Mechanisms and strategies for ash deposition reduction in flue gas heat exchanger // Clean Technologies and Environmental Policy. 2022. Vol. 24, N1. pp. 77–93.
6. Kapustenko P.O., Klemeš J.J., Matsegora O.I., et al. Accounting for local thermal and hydraulic parameters of water fouling development in plate heat exchanger // Energy. 2019. Vol. 174. pp. 1049–1059.
7. Xu Z., Sun A., Han Z., et al. Simulation of particle deposition in a plate-fin heat exchanger using a particle deposition model with a random function method // Powder Technology. 2019. Vol. 355. pp. 145–156.
8. Tang S.Z., Li M.J., Wang F.L., et al. Fouling and thermal-hydraulic characteristics of aligned elliptical tube and honeycomb circular tube in flue gas heat exchangers // Fuel. 2019. Vol. 251. pp. 316–327.
9. Davoudi E., Vaferi B. Applying artificial neural networks for systematic estimation of degree of fouling in heat exchangers // Chemical Engineering Research and Design. 2018. Vol. 130. pp. 138–153.
10. Jiang H., Lu L., Sun K. Simulation of particle deposition in ventilation duct with a particle-wall impact model // Building and environment. 2010. Vol. 45, N5. pp. 1184–1191.
11. Jiang H., Lu L., Sun K. Computational fluid dynamics (CFD) modelling of particle deposition in a two-dimensional turbulent channel air flow: study of influence factors // Indoor and Built Environment. 2012. Vol. 21, N2. pp. 264–272.
12. Han H., He Y.L., Tao W.Q., et al. A parameter study of tube bundle heat exchangers for fouling rate reduction // International journal of heat and mass transfer. 2014. Vol. 72. pp. 210–221.
13. Lu H., Lu L., Jiang Y. Numerical simulation of particle deposition in duct air flows with uniform, expanding or contracting cross-section // Energy and Buildings. 2016. Vol. 128. pp. 867–875.
14. Zhan F., Zhuang D., Ding G., et al. Numerical model of particle deposition on fin surface of heat exchanger // International Journal of Refrigeration. 2016. Vol. 72. pp. 27–40.
15. Li J., Du W., Cheng L. Numerical simulation and experiment of gas-solid two phase flow and ash deposition on a novel heat transfer surface // Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 113. pp. 1033–1046.
16. Guo K., Zhang N., Smith R. Design optimisation of multi-stream plate fin heat exchangers with multiple fin types // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 131. pp. 30–40.
17. Hosseini S.B., Khoshkhoo R.H., Malabad S.M.J. Experimental and numerical investigation on particle deposition in a compact heat exchanger // Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 115. pp. 406–417.
18. Zhan F., Ding G., Zhuang D. Numerical model of particle deposition on wet fin surfaces of heat exchanger under dehumidifying conditions // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 149. pp. 119258.
19. Li M.J., Tang S.Z., Wang F.L., et al. Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat

exchangers for middle/low temperature waste heat utilization: A review on simulation and experiment // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 126. pp. 737–761.

20. YaLing H.E., SongZhen T.A.N.G., FeiLong W.A.N.G., et al. Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchanger for middle and low temperature flue gas waste heat recovery // *Chinese Science Bulletin*. 2016. Vol. 61, N17. pp. 1858–1876.

21. Wang F.L., Tang S.Z., He Y.L., et al. Heat transfer and fouling performance of finned tube heat exchangers: Experimentation via on line monitoring // *Fuel*. 2019. Vol. 236. pp. 949–959.

Авторы публикации

Якимов Николай Дмитриевич – д-р. физ.-мат. наук, профессор кафедры «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Дмитриев Андрей Владимирович – д-р. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Бадретдинова Гузель Рамилевна – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Борисова Светлана Дмитриевна – канд. тех. наук, доцент кафедры «Водные биоресурсы и аквакультура» (ВБА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Golovanchikov AB, Shurak AA, Merentsov NA. Modelirovanie raboty kozhukhotrubnogo teploobmennika s uchetom energo- i resursobrezheniya. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika*. 2021;2021:26-29.

2. Dmitriev AV, Zinurov VE, Gumerova GH. Otsenochnyi raschet protsessa teploobmena v kamere sgoraniya pri szhigani prirodnogo gaza. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2018; 21(2): 99-103. (In Russ).

3. Sun K, Lu L, Jiang H. A computational investigation of particle distribution and deposition in a 90 bend incorporating a particle–wall model. *Building and Environment*. 2011;46(6):1251-2. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.006>

4. Lu H, Lu L. Effects of rib spacing and height on particle deposition in ribbed duct air flows. *Building and Environment*. 2015;92:317-7. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.035>

5. Guo Z, Li N, Klemeš JJ, et al. Mechanisms and strategies for ash deposition reduction in flue gas heat exchanger. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2022;24(1):77-3. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02083-2>

6. Kapustenko PO, Klemeš J.J., Matsegora OI, et al. Accounting for local thermal and hydraulic parameters of water fouling development in plate heat exchanger. *Energy*. 2019;174:1049-9. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.026>

7. Xu Z, Sun A, Han Z, et al. Simulation of particle deposition in a plate-fin heat exchanger using a particle deposition model with a random function method. *Powder Technology*. 2019;355:145-6. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.031>

8. Tang SZ, Li MJ, Wang FL, et al. Fouling and thermal-hydraulic characteristics of aligned elliptical tube and honeycomb circular tube in flue gas heat exchangers. *Fuel*. 2019;251:316-7. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.045>

9. Davoudi E, Vaferi B. Applying artificial neural networks for systematic estimation of degree of fouling in heat exchangers. *Chemical Engineering Research and Design*. 2018;130:138-3. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.12.017>

10. Jiang H, Lu L, Sun K. Simulation of particle deposition in ventilation duct with a particle–wall impact model. *Building and environment*. 2010;45(5):1184-1. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.11.001>

11. Jiang H, Lu L, Sun K. Computational fluid dynamics (CFD) modelling of particle deposition in a two-dimensional turbulent channel air flow: study of influence factors. *Indoor and Built Environment*. 2012;21(2):264-2. <https://doi.org/10.1177/1420326X11414939>

12. Han H, He YL, Tao WQ, et al. A parameter study of tube bundle heat exchangers for fouling rate reduction. *International journal of heat and mass transfer*. 2014;72:210-1. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.010>
13. Lu H, Lu L, Jiang Y. Numerical simulation of particle deposition in duct air flows with uniform, expanding or contracting cross-section. *Energy and Buildings*. 2016;128:867-5. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.052>
14. Zhan F, Zhuang D, Ding G, et al. Numerical model of particle deposition on fin surface of heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*. 2016;72:27-40. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.07.015>
15. Li J, Du W, Cheng L. Numerical simulation and experiment of gas-solid two phase flow and ash deposition on a novel heat transfer surface. *Applied Thermal Engineering*. 2017;113:1033-6. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.198>
16. Guo K, Zhang N, Smith R. Design optimisation of multi-stream plate fin heat exchangers with multiple fin types. *Applied Thermal Engineering*. 2018;131:30-40. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.099>
17. Hosseini SB, Khoshkhoo RH, Malabad SMJ. Experimental and numerical investigation on particle deposition in a compact heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2017;115:406-7. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.110>
18. Zhan F, Ding G, Zhuang D. Numerical model of particle deposition on wet fin surfaces of heat exchanger under dehumidifying conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;149:119258. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119258>
19. Li MJ, Tang SZ, Wang FL, et al. Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchangers for middle/low temperature waste heat utilization: A review on simulation and experiment. *Applied Thermal Engineering*. 2017;126:737-1. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.095>
20. YaLing HE, SongZhen TANG, FeiLong WANG., et al. Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchanger for middle and low temperature flue gas waste heat recovery. *Chinese Science Bulletin*. 2016;61(17):1858-6. <https://doi.org/10.1360/N972016-00248>
21. Wang FL, Tang SZ, He YL, et al. Heat transfer and fouling performance of finned tube heat exchangers: Experimentation via on line monitoring. *Fuel*. 2019;236:949-9. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.081>

Authors of the publication

Nikolay D. Yakimov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Andrey V. Dmitriev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Guzel R. Badretdinova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Svetlana D. Borisova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено **20.05.2022г.**

Отредактировано **25.05.2022г.**

Принято **26.06.2022г.**