



## РУХ ТВЕРДИХ ЧАСТОК НА ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ДІЛЯНКАХ ГАЗОХОДІВ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

**Д. В. Остапенко, О. В. Лук'янов, Л. Д. Катін**

*Донбаська національна академія будівництва та архітектури*

*вул. Державіна 2, Макіївка, Донецька область, Україна, 86123*

*E-mail: AV\_Lytkianov232@mail.ru*

*Отримана 28 серпня 2009; прийнята 25 вересня 2009.*

**Анотація.** У наш час для розрахунків руху твердих часток у газовому потоці, при дії на них сил опору, використовується "в'язка" модель Стокса. Однак її можливості обмежені ділянкою в'язкого плинну при значеннях числа Рейнольдса від 0,1 до 2. Більш широкий діапазон має залежність Клячко, що ускладнює рівняння руху, роблячи його більш громіздким. У роботі отримане аналітичне рішення рівняння руху частки при невязкому обтіканні. Отримані перший і другий інтеграли дозволили визначити закономірності руху твердих часток у нестационарних умовах, що характерно для котлів малої потужності. Перший інтеграл дозволяє оцінити час розгону часток різного розміру до величини швидкості потоку. У цьому випадку можна визначити межі моделі в'язкого обтікання. Другий інтеграл дозволяє визначити відстань, на якій відбудеться стабілізація руху частки. Практичне застосування результатів роботи дозволяє визначити розміри вхідних ділянок золоуловлювачів, закономірності руху в пучках конвективних трубок та ін.

**Ключові слова:** газоходи котлів, газопильовий потік, рівняння руху.

## ДВИЖЕНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ УЧАСТКАХ ГАЗОХОДОВ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

**Д. В. Остапенко, А. В. Лукьянов, Л. Д. Катин**

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры*

*ул. Державина 2, Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123*

*E-mail: AV\_Lytkianov232@mail.ru*

*Получена 28 августа 2009; принята 25 сентября 2009.*

**Аннотация.** В настоящее время для расчетов движения твердых частиц в газовом потоке, при действии на них сил сопротивления, используется "вязкая" модель Стокса. Однако ее возможности ограничены областью вязкого течения при значениях числа Рейнольдса от 0,1 до 2. Более широкий диапазон имеет зависимость Клячко, которая усложняет уравнение движения, делая его более громоздким. В работе получено аналитическое решение уравнения движения частицы при невязком обтекании. Полученные первый и второй интегралы позволили определить закономерности движения твердых частиц в нестационарных условиях, что характерно для котлов малой мощности. Первый интеграл позволяет оценить время разгона частиц различного размера до величины скорости потока. В этом случае можно определить границы модели вязкого обтекания. Второй интеграл позволяет определить расстояние, на котором произойдет стабилизация движения частицы. Практическое применение результатов работы позволяет определить размеры входных участков золоуловителей, закономерности движения в пучках конвективных трубок и др.

**Ключевые слова:** газоходы котлов, газопылевой поток, уравнение движения.

## FIRM PARTICLES MOVEMENT ON HORIZONTAL SITES OF EXHAUST GAS DUCT LOW POWER BOILERS

**D. V. Ostapenko, A. V. Lukjanov, L. D. Katin**

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*

*The department „Heat- Engineering, Heat and Gas-supply and Ventilation”*

*Derzhavin's street 2, Makeyevka, Donetsk area, Ukraine, 86123*

*E-mail: AV\_Lykianov232@mail.ru*

*Received 28 August 2009; accepted 25 September 2009.*

**Abstract.** “Viscous” Stoks model is used now for calculations of firm particles movement in the gas stream, at action resistance forces on them. However its opportunities are limited by area of viscous flow at values of Reynolds number from 0,1 up to 2. Wider range has Klyachko dependence which complicates the equation of movement, making it more cumbersome. In work the analytical solution of the equation of particle movement has been received at a nonviscous flow. The received the first and the second integrals have allowed to define movement regularity of firm particles in non-stationary conditions which is characteristically for boilers of low power. The first integral allows to estimate time of particles start of the various size up to the stream speed value. In this case it is possible to define the model borders of the viscous flow round. The second integral allows to define the distance where there will be the stabilization of particle movement. The practical application of work results allows to define the sizes of entrance ash-catchers sections, laws of movement regularities in bunches of convective tubes, etc.

**Keywords:** gas-pipes of boilers, gas-powder stream, the equation of movement.

### Формулировка проблемы

Движение твердой частицы в воздуховодах и газоходах изучалось многими авторами в основном для систем пневмотранспорта. При теоретическом анализе закономерностей перемещения твердых частиц используется модель вязкого обтекания Стокса. Однако при рассмотрении движения твердых частиц в газоходах котлов возникает проблема погрешности расчетов, так как величина критерия Рейнольдса, рассчитываемого по диаметру частиц, значительно отличается от рекомендуемой большинством авторов – 0,1-2 [1,2]. Для невязкого обтекания значительное количество практических задач решено численно, но использование их результатов ограничено.

### Анализ последних исследований

Движение твердых частиц в воздушных и газовых потоках подробно исследовано в системах пневмотранспорта сыпучих материалов и очистке газов от пыли [3]. Предложены различные математические модели этих процессов для различных режимов обтекания частиц

как вязкого, так и инерционного. Большинство из них опираются на модель обтекания Стокса для вязкого режима, хотя это не всегда обоснованно. Отсутствуют данные по исследованиям движения твердых частиц в конкретных случаях, например, газоходах котлов. В связи с наметившимся увеличением использования котлов малой мощности, особенно жаротрубных, эти проблемы представляют повышенный интерес. Следует отметить, что в жарогазотрубных котлоагрегатах продукты сгорания движутся внутри поверхностей нагрева – в трубах. Особый интерес вызывают двух- и трехходовые жаротрубные конструкции. В данных котлах на значительных участках газоходов преобладает нестационарное движение частиц. В настоящее время существуют только численные решения для ряда частных случаев.

### Цель и формулировка задачи исследований

Целью задачи является теоретические исследования движения твердой частицы в горизонтальном направлении при невязком обтекании

в газоходах котлов. Для этого аналитически решается уравнение движения с использованием зависимости Клячко для коэффициента лобового сопротивления.

### Основная часть

При изучении технических характеристик жаротрубных котлов представляет практический интерес закономерности движения твердых частиц в газоходах котла при сжигании твердого и жидкого топлива, где взвесенесущие потоки играют важную роль. Кроме того устройства для очистки газов, выбрасываемых в атмосферу, от пыли, являются неотъемлемой частью энергетического оборудования. Эти устройства решают важную экологическую задачу. И, наконец, важное значение имеет определение времени пребывания твердой частицы в различных участках газоходов для оценки их зарастания.

При вязком движении на горизонтальных участках газоходов движение твердой частицы можно описать следующим уравнением:

$$m \frac{du}{dt} = P + F, \quad (1)$$

где  $u$  – скорость частицы;

$m$  – масса частицы;

$P$  – равнодействующая массовых сил, действующих на частицу;

$F$  – сила межфазного взаимодействия.

Если рассматривать движение частицы или золы в горизонтальном направлении, то есть в горизонтальных участках газоходов, например, в конвективных трубках [4], можно выполнить расшифровку действующих сил, исходя из следующих предположений:

- массовые силы отсутствуют;
- влияние частиц друг на друга не учитывается;
- сила межфазного взаимодействия сводится к действию на твердую частицу силы сопротивления;
- частицы достаточно крупные и можно не учитывать силы, действующие на молекулярном уровне, например, броуновское движение.

Влияние движения частиц друг на друга, обычно учитываемое в системах пневмотранспорта, в газоходах котлов концентрации твердых

частиц не более  $2 \text{ г/м}^3$ , что значительно меньше порогового значения. Со стороны газовой фазы обычно учитывают силу сопротивления, пренебрегая силой Архимеда [5]. Собственно сила сопротивления и является движущей силой для твердых частиц на горизонтальных участках газоходов [6]. С учетом этого, уравнение (1) можно записать в следующем виде:

$$m \frac{du}{dt} = C_D \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot (V - u)^2, \quad (2)$$

где  $C_D$  – коэффициент сопротивления частицы;

$\rho$  – плотность газа;

$S$  – миделево сечение частицы;

$V$  – скорость газа.

Следует отметить, что скорости  $V$  и  $u$  определяются в неподвижной системе координат, в системе координат, связанной с газом, можно ввести скорость скольжения  $U = V - u$ . В общем эта величина зависит от обеих скоростей, но в газоходах котлов, когда скорость газа стабильна, ее величина определяется скоростью частицы, и показывает отставание частицы от газа, причем скорость частицы должна стремиться к скорости газа. Сложностью при решении на вид простого, но нелинейного уравнения (2), является зависимость коэффициента сопротивления частицы от режима движения:

$$C_D = f(\text{Re}), \quad (3)$$

где  $\text{Re} = \frac{(V - u) \cdot d}{\nu}$

критерий Рейнольдса, который в некоторых литературных источниках называют “модифицированным”, так как в качестве характерного размера принимается диаметр частицы;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости.

В практике теоретических исследований и расчетов обычно используется зависимость Стокса для режима вязкого обтекания:

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} \quad (4)$$

Однако эта зависимость справедлива, по мнению ряда исследователей [1,2], только до предельных величин  $\text{Re} \leq 10^{-2} - 2$ . Для больших же величин  $\text{Re}$  применяют эмпирические зависимости. Наиболее точной считается формула Клячко:

Таблица 1. Фракционный состав частиц летучей золы.

Фракционный состав, %	Размер частиц, мкм						
	<10	10-20	20-40	40-60	60-86	86-100	>100
	3	3	7	7	7	6	67

Таблица 2. Значения чисел Re для частиц золы при различных скоростях.

Размер частиц, мкм	Скорость потока, м/с			
	3	4	5	6
<10	<0,4	<0,52	<0,66	<0,79
10-20	0,4-0,79	0,52-1,05	0,66-1,31	0,79-1,57
20-40	0,79-1,57	1,05-2,1	1,31-2,62	1,57-3,15
40-60	1,57-2,36	2,1-3,15	2,62-3,93	3,15-4,72
60-86	2,36-3,38	3,15-4,51	3,93-5,64	4,72-6,76
86-100	3,38-3,93	4,51-5,24	5,64-6,55	6,76-7,86
>100	>3,93	>5,24	>6,55	>7,86

Размер частиц, мкм	Скорость потока, м/с			
	7	8	9	10
<10	<0,92	<1,05	<1,18	<1,31
10-20	0,92-1,84	1,05-2,1	1,18-2,36	1,31-2,62
20-40	1,84-3,67	2,1-4,19	2,36-4,72	2,62-5,24
40-60	3,67-5,51	4,19-6,29	4,72-7,08	5,24-7,86
60-86	5,51-7,89	6,29-9,02	7,08-10,14	7,86-11,27
86-100	7,89-9,17	9,02-10,49	10,14-11,8	11,27-13,11
>100	>9,17	>10,49	>11,8	>13,11

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}} \quad (5)$$

Эта формула может быть использована при величинах до 1000.

Подставив формулу (5) в уравнение (2) и проведя ряд преобразований, получим:

$$\frac{du}{dt} = (V - u) \cdot \left[ C + A \cdot (V - u)^{\frac{2}{3}} \right], \quad (6)$$

где

$$C = 18 \frac{\rho}{\rho_r} \cdot \frac{v}{d^2} \quad (7)$$

$$A = 3 \frac{\rho}{\rho_r} \cdot \frac{\sqrt[3]{v}}{d \cdot \sqrt[3]{d}} \quad (8)$$

где  $\rho$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>.

Величина имеет размерность [1/с] и обратно пропорциональна известной величине “времени релаксации”.

Определим законность применения формул (5) и (6) для условий движения летучей золы в газоходах котлов.

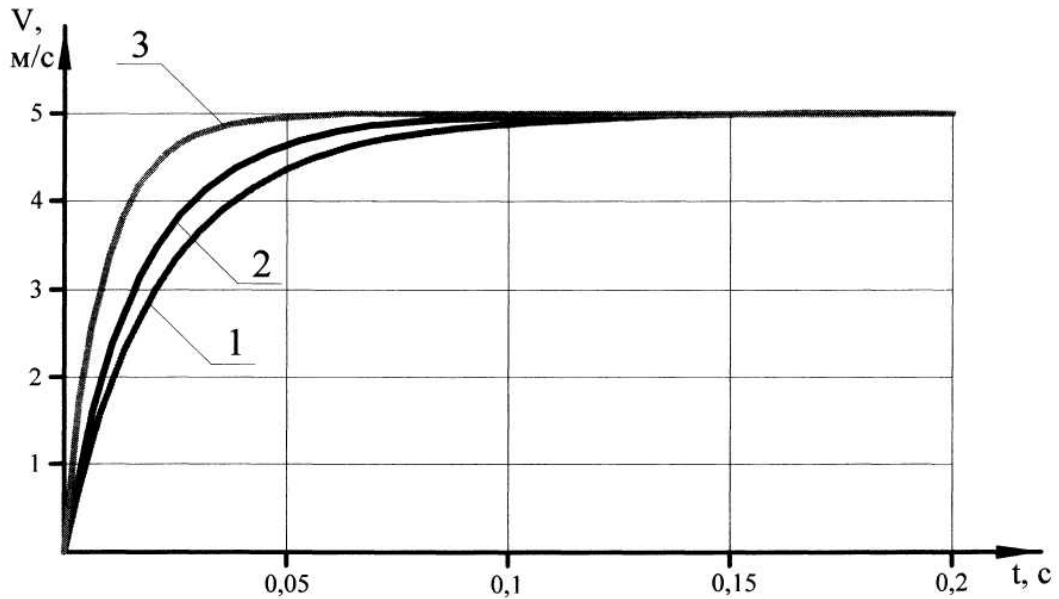
С этой целью приведем данные по фракционному составу частиц золы при сжигании энергетического антрацита в котле.

Из приведенной таблицы видно, что 67% частиц имеют размер более 100 мкм.

Для данного фракционного состава частиц летучей золы и различных скоростей газа выполнен расчет чисел Re при температурах газов, осредненных по всему контуру движения. Результаты приведены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2 величины действия чисел Re входят в диапазон действия формулы Клячко. В этом случае законна и применима форма записи уравнения (6) для движения летучей золы. Несмотря на нелинейность данного уравнения, оно допускает интегрирование в квадратурах после замены переменных. В результате решения получим первый интеграл в следующем виде:

$$C \cdot (u - V)^{-\frac{2}{3}} - A = C_{const} \cdot \frac{2}{3} Ct \quad (9)$$



**Рис. 1.** Изменение скорости движения частицы во времени. 1 – частица размером 100 мкм, 2 – частица размером 86 мкм, 3 – частица размером 60 мкм.

В качестве граничных условий принимаем начальные при входе частицы в горизонтальный участок  $u = 0$  при  $t = 0$  и постоянной скорости газа  $V$ . Определив постоянную интегрирования, можно записать в окончательной форме первый интеграл уравнения (6):

$$u = V - \left[ \left( V^{-\frac{2}{3}} + A \cdot \tau \right) \cdot e^{\frac{2t}{3\tau}} - A \cdot \tau \right]^{-\frac{3}{2}} \quad (10)$$

Полученный результат обработан в виде графической зависимости для газоходов котла КВ-ГМ-1,25-95СН и представлен на рисунке 1.

На рисунке 1 представлены зависимости скоростей частиц различных размеров от времени разгона на начальных участках движения. Из рисунка видно, что частица разгоняется по параболической зависимости и асимптотически стремится к скорости газа. При этом через определенный промежуток времени она входит в Стоксовскую область движения. Время разгона увеличивается с увеличением диаметра частицы. Полученные результаты позволяют определить скорости движения твердых частиц и время пребывания их в любой точке контура. Учитывая, что скорость частицы в одномерном движении направлена только горизонтально, то можно записать  $u = dx/dt$ . Тогда уравнение (10) примет вид:

$$\frac{dx}{dt} = V - \left[ \left( V^{-\frac{2}{3}} + A \cdot \tau \right) \cdot e^{\frac{2t}{3\tau}} - A \cdot \tau \right]^{-\frac{3}{2}} \quad (11)$$

Это даст возможность определить второй интеграл уравнения движения частицы:

$$x = V \cdot t + \frac{3}{A} \cdot \left[ \left( V^{-\frac{2}{3}} + A \cdot \tau \right) \cdot e^{\frac{2t}{3\tau}} - A \cdot \tau \right]^{-\frac{1}{2}} + \frac{3}{A \cdot \sqrt{A \cdot \tau}} \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{\left( V^{-\frac{2}{3}} + A \cdot \tau \right) \cdot e^{\frac{2t}{3\tau}} - A \cdot \tau}{A \cdot \tau} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Аналогично первому интегралу граничные условия также принимаются нулевыми:  $x=0$  при  $t=0$ . Определив постоянную интегрирования, получим выражение для второго интеграла уравнения:

$$x = V \cdot t + \frac{3}{A} \cdot \left[ \left( V^{-\frac{2}{3}} + A \cdot \tau \right) \cdot e^{\frac{2t}{3\tau}} - A \cdot \tau \right]^{-\frac{1}{2}} + \frac{3}{A \cdot \sqrt{A \cdot \tau}} \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{\left( V^{-\frac{2}{3}} + A \cdot \tau \right) \cdot e^{\frac{2t}{3\tau}} - A \cdot \tau}{A \cdot \tau} \right)^{\frac{1}{2}} - \left( \frac{3}{A} \cdot V^{\frac{1}{3}} + \frac{3}{A \cdot \sqrt{A \cdot \tau}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{V^{-\frac{1}{3}}}{\sqrt{A \cdot \tau}} \right) \quad (13)$$

На основании полученного уравнения строится графическая зависимость длины нестационарного пробега частицы, показанная на рисунке 2.

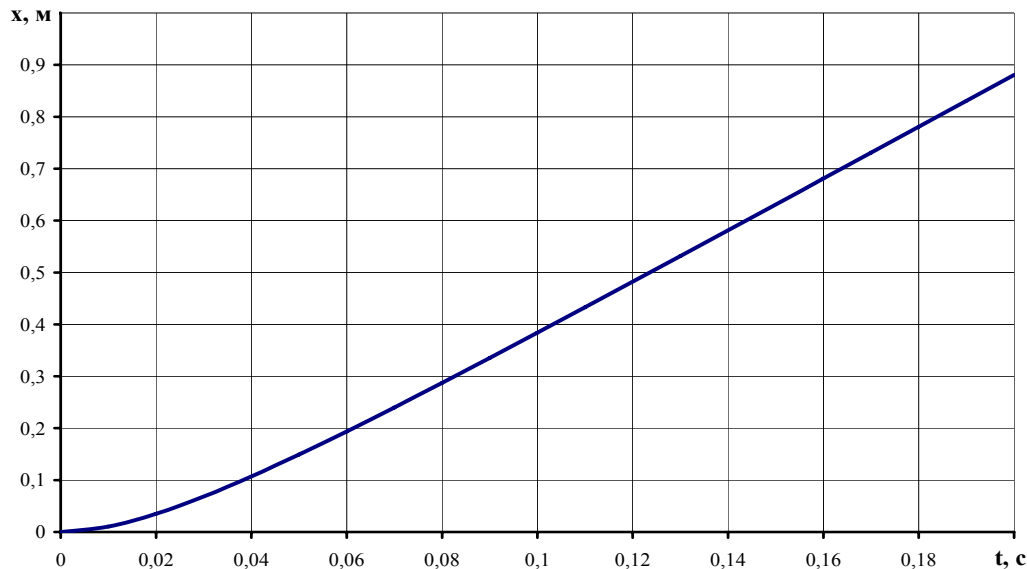


Рис. 2. Длина нестационарного пробега частицы.

На рисунке приведена зависимость времени от расстояния, которое проходит частица диаметром 100 мкм в ускоренном режиме.

Приведенный рисунок позволяет определить длину пробега в нестационарном режиме, то есть то расстояние, которое необходимо пройти частице, чтобы скорость скольжения приблизилась к нулю. Практическим применением данной зависимости является возможность определения размеров входных участков золоуловителей и параметров движения пылегазовых потоков внутри аппаратов.

### Заключение

На основании аналитического решения уравнения движения твердой частицы в газоходах котлов малой мощности определены первый и второй интеграл уравнения (1) при горизонтальном движении частиц. Полученные закономерности позволяют математически описать нестационарное движение твердых час-

тиц и определить границы применения “вязкой” модели при ускоренном их движении.

### Литература

1. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – Л.: 1950. – 676 с.
2. Повх И. Л. Техническая гидромеханика. – Л.: Машиностроение, 1976. – 504 с.
3. Разумов И. М. Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов. – М.: Химия, 1972. – 240 с.
4. Nakayama A. Calculation of fully developed turbulent flow in ducts of arbitrary cross-section / Nakayama A., Chow W.L., Sharma D. // J. Fluid Mech. – 1983. – Vol. 128. – P. 199-217.
5. Brundrett E. Production and diffusion of vorticity in duct flow / Brundrett E., Baines W.D. // J. Fluid Mech. – 1964. – Vol. 19. – P. 375-394.
6. Висоцький С.П., Грибок О.А. Вплив експлуатаційних та конструктивних параметрів на ефективність очищення котельних газів. // Інженерні системи та техногенна безпека у будівництві: Зб. наук. праць. - Макіївка, 2001. – Вип. 2001. – 2(27). – С. 155-158.

**Остапенко Дмитро Валерійович** – асистент кафедри «Теплотехніка, теплогазопостачання і вентиляція» Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: локальні джерела теплоти і їхній вплив на довкілля.

**Лук'янов Олександр Васильович** – д.т.н., доцент, працює завідувачем кафедри «Теплотехніка, теплогазопостачання і вентиляція» Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: енергозберігаючі технології в системах теплопостачання, теплогенератори локальних систем теплопостачання.

**Катін Леонід Дмитрович** – к.т.н., доцент кафедри «Теплотехніка, теплогазопостачання і вентиляція» Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: екологічні проблеми впровадження паливоспалювального обладнання.

**Остапенко Дмитрий Валериевич** – ассистент кафедры «Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: локальные источники теплоты и их влияние на окружающую среду.

**Лукьянов Александр Василевич** – д.т.н., доцент, работает заведующим кафедрой «Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: энергосберегающие технологии в системах теплоснабжения, теплогенераторы локальных систем теплоснабжения.

**Катин Леонид Дмитриевич** – к.т.н., доцент кафедры «Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: экологические проблемы внедрения топливосжигающего оборудования.

**Ostapenko Dmitry Valerievich** – an assistant of the «Thermatecniques, thermagas suuply» Chair of the Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: local sources of heat and their influence on the environment.

**Luk'yanov Alexander Vasil'evich** – doctor of technical sciences, assistant professor, the Head of «Thermotecnics, Thermogas Supply» Chair of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: technology of power savings in heat supply, systems thermogenerators of local systems.

**Katin Leonid Dmitrievich** – candidate of technical sciences, assistant professor of the «Thermotecnics, Thermogas Supply» Chair of the Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: environmental problems of introduction fuel burning equipment.