

УДК 621.928.99

Л.В. Мостовенко, Е.А. Рыжникова, В.П. Белоглазов, П.М. Тоцких
Нижевартовский государственный университет, Нижневартовск
Омский государственный технический университет, Омск

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАПЫЛЕННОГО ПОТОКА

Целью данной статьи является проведение анализа литературных источников на предмет исследования влияния газодинамических и термодинамических параметров на излишнюю турбулизацию потока в установке. Задачами исследования является оценка поведения потока на всех участках сложной конфигурации в ИВЗ (инерционно-вакуумном золоуловителе). В заключении представлены выводы, необходимые для учета в расчете математической модели в ANSYS CFX.

Ключевые слова: газодинамика сложных участков, запыленный поток, инерционно-вакуумный золоуловитель

L.V. Mostovenko, E. A. Ryzhnikova, V.P. Beloglazov, P.M. Totskikh
Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk
Omsk State Technical University, Omsk

INVESTIGATION OF GAS-DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A LADEN FLOW

The purpose of this article is to analyze the literature sources in order to study the influence of gas-dynamic and thermodynamic parameters on excessive turbulization of the flow in the installation. The objectives of the study are to assess the flow behavior in all areas of complex configuration in the IVDC (inertial vacuum dust collector). In conclusion, the conclusions necessary for accounting in the calculation of the mathematical model in ANSYS CFX are presented.

Keywords: gas dynamics of complex areas, laden flow, inertial vacuum dust collector.

Целью данной статьи является улучшение эффективности золоулавливающего устройства (инерционно-вакуумного золоуловителя ИВЗ), благодаря учёту особенностей движения запыленного потока в его математической расчетной модели.

К задачам относится исследование конструктивно сложных участков на предмет возникновения пульсационных скоростей, изменения температур на отдельных участках. Пульсации могут привести к изменению турбулизации потока и увеличению разрежения золоуловителя. Увеличение разрежения золоулавливающего аппарата снижает эффективность работы дымососа, из чего можно сделать вывод, что изменение напорной характеристики нагнетателя отклоняет обеспечение эффективной работы аппарата от его рабочей точки.

Несмотря на увеличение производственных мощностей и неограниченное потребление природных ресурсов, одной из главных задач сохранения окружающей среды остается рациональное использование природных ресурсов и развитие качественных объектов управления. Однако рациональное

использование природных ресурсов влияет не только на сокращение выбросов в окружающую среду, но и на сферы деятельности ученых – повышение эффективности оборудования за счет внедрения инновационных технологий в производственные процессы. Хотя современное оборудование герметично закрыто, все производственные процессы сопровождаются пылью, аэрозолями, туманами и другими выбросами[13].

Одной из основных проблем ТЭЦ, работающих на угле, являются выбросы твердых частиц, как вследствие пыления с оборудования, так и при уносе из дымовых труб. Присутствие твердых частиц может приводить как к тепловым потерям, так и к износу оборудования: как дымососа, так и поверхностей самого золоуловителя.

Объектом исследования в данной статье являются отдельные поверхности ИВЗ, представленные на рис. 1[20].

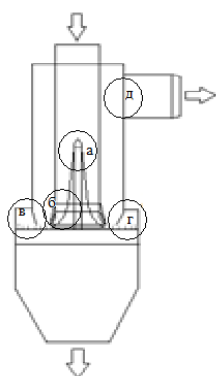


Рисунок 1 – Инерционно-вакуумный золоуловитель (ИВЗ): а) обтекание затупленного участка; б) прохождение запыленного потока через конфузорное сечение; в) сброс частиц в поворотную камеру; г) преодоление потоком поворотной камеры; д) движение дисперсной фазы вдоль колец; е) восходящее движение с последующим сбором и выходом из патрубка.

Движение дисперсного потока обусловлено одновременным изменением ряда параметров на всех испытательных участках, таких как характеристики барьера [3,4] на теле линии течения, зоны закручивания и турбулентные дорожки [2,7]. Частицы, сталкивающиеся с поверхностью, преобразуют кинетическую энергию в тепловую, изменяя не только траекторию своего потока, но и структуру потока тела, событие потока [5,6], шероховатость поверхности и т.д. Интенсивность описанных выше процессов, сопровождающихся двухфазным потоком взвешенных частиц, зависит от инерции и концентрации частиц.

Характеристики дисперсных потоков разделяются на интенсивные (физические свойства частиц – диаметр, плотность) и экстенсивные (характеристики двухфазных потоков – концентрация дисперсионной примеси). Данными параметрами необходимо оперировать при прогнозировании характера движения потока на сложных участках поверхностей, уязвимых с точки зрения эрозионного разрушения.

Инерционно-вакуумный золоуловитель [1] относится к аппаратам инерционного действия, соответственно определяющими параметрами эффективности аппарата считаются скорость потока в конфузорном сечении. Пульсационные скорости потока определяются турбулентной природой течения самого потока. Скорость пульсации частиц может быть вызвана различными причинами. Поведение частиц в турбулентных потоках подложки и их обратное влияние на характеристики газовой фазы во многом обусловлено их инерционностью [5]. Процесс столкновения с частицами или соударения со стенками канала дисперсной фазы также может иметь свои уникальные закономерности, которые характеризуются, например, числом Стокса [14]. Число Стокса(1) характеризует инерцию движения дисперсной примеси по отношению к определенным масштабам течения.

Для того чтобы начать исследование газодинамических характеристик потока необходимо определить основные уравнения критерия подобия для запыленного потока.

$$Stk_i = \frac{\tau_p}{T_i}, \quad (1)$$

здесь τ_p – комплексная характеристика инерционности частиц, время динамической релаксации; T_i – некоторое характерное время несущей фазы.

В ряде работ [14-16] по изучению гидрогазодинамики и теплофизики двухфазных потоков в рамках кластеризации частиц в турбулентных и вихревых двухфазных потоках выделяют три основных класса. Они характеризуются числами Стокса трёх типов движения потока – крупномасштабного, мелкомасштабного, усредненного импульсного движения потока. В зависимости от изменения числа Стокса [14] выделяют 4 основных класса бифазных течений – равновесное, квазиравновесное, неравновесное, течения с крупными частицами. Ранее в исследовании ИВЗ предполагалось, что течение с маломасштабными импульсными движениями уравнивается и с учетом турбулентности потока.

В пульсации турбулентного газа важную роль играет механизм турбулентной миграции осаждения твердых частиц вблизи поверхности перегрузки [11]. На движение пылевых потоков влияют также процессы, приводящие к перераспределению частиц пылевого потока с различными скоростями по поперечному сечению канала – турбулентная диффузия [17], турбулентная миграция.

После рассмотрения всех влияющих на газодисперсный поток сил, выявления важных газодинамических характеристик, хотелось бы перейти к анализу газодинамики на отдельных сложных участках проточной части золоуловителя. К сложным участкам можно отнести (рис. 1): конфузорный проходной участок вдоль рассекателя; «сброс» потока с поверхности рассекателя; движение запыленного потока в области колец; преодоление поворотной камеры, поворот на 180°, удаление из золотого бункера. Для этого оценим: термодинамику и газодинамику потока на данных участках.

Обтекание затупленного участка и преодоление конфузорного проходного участка вдоль рассекателя.

Для анализа физических процессов, происходящих в области обтекаемого запыленным потоком тела, необходимо знание распределений скоростей, температур (в случае неизотермического течения) и концентрации частиц; а также основные характеристики несущего потока (вроде скорости, расхода). Перечисленные характеристики частиц (по отношению к объему расхода) во многом определяются режимом обтекания, который реализуется в том или ином случае. Режим же зависит от числа Стокса (рис. 2).

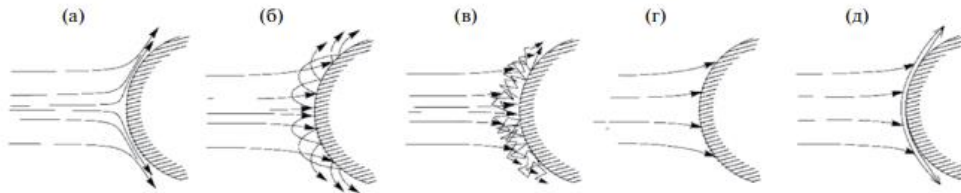


Рисунок 2. Классификация режимов течений при обтекании тел двухфазным потоком: а) – равновесное (квазиравновесное) течение, $Stk_f \rightarrow 0$; б) – слабозапыленное неравновесное течение, $Stk_f \approx O(1)$; в) – сильнозапыленное неравновесное течение, $Stk_f \approx O(1)$; г) – обтекание в случае поглощающей стенки; д) – обтекание с образованием пленки.

В случае осесимметричного течения (например, при обтекании сферы, в нашем же случае, рассекателя), когда размер частиц пренебрежимо мал по сравнению с размером тела, частицы равномерно распределены в набегающем потоке, а траектории их движения симметричны, коэффициент осаждения можно определить как (2)

$$\eta = \bar{y}_{cr}^2, \quad (2)$$

где $\bar{y}_{cr} = y_{cr}/R$ – безразмерное расстояние от оси симметрии потока, находясь на котором (в невозмущенном присутствии тела потоке) частицы лишь соприкасаются с телом при его обтекании. Опираясь на данные расчетов и результаты экспериментов, перечислим основные факторы, оказывающих влияние на величину η 1) потенциальность обтекания (влияние пограничного слоя ведет к снижению η и становится существенным при $Stk_f < 0$); 2) сила тяжести (приводит к существенному росту η при $Stk_f < 0$); 3) неизотермичность течения (вызывает рост η при $Stk_f < 0$); 4) осесимметричность течения (искривление линий тока газа начинается на меньшем расстоянии по сравнению с плоским течением, что приводит к росту инерционности частиц и увеличению η).

Особый акцент нужно сделать на особенности межчастичных столкновений и учет обратного влияния частиц на характеристики несущего газа. В случае течения с полидисперсными частицами показано, что мелкие из них успевают нагреться в сжатом слое и вызывают нагрев обтекаемого тела, в то время как крупные частицы, охлажденные ускоряющим потоком до скачка уплотнения, наоборот, понижают энтальпию тела после отскока. Только относительно инерционные частицы сохраняют свои траектории прямолинейными и имеют одинаковые скорости и углы встречи с ударной волной и поверхностью тела. Частицы, обладающие малой инерцией, могут

существенно изменять свою траекторию, а также нагреваться при движении в сжатом слое газа.

Взаимодействие частиц с поверхностью тела. Для нахождения различных видов нагрузок (механических, тепловых, эрозионных) на элементы конструкции необходимо знать параметры газовой и дисперсной фаз на поверхности обтекаемого тела. При задании граничных условий частицами на поверхности тела часто используются коэффициенты восстановления скорости, которые, как показывают результаты проведенных испытаний, зависят от скорости, угла воздействия, формы, ударных органов, шероховатости поверхности, а также физико-механических свойств материалов. В литературе коэффициент восстановления скорости имеет несколько зависимостей от нескольких параметров (скорости и угла удаа, удельной поверхности и твердых частиц и т. д.), которые применимы к условиям отдельных испытаний (19).

Вывод по теоретическому материалу: важно проведение в ANSYS нестационарного расчета, который бы показал основные параметры времени движения потока и частиц, вследствие чего можно было бы установить точный вид потока по режимным критериям Стокса. При преодолении конфузорного сечения будет снижаться толщина пограничного слоя, что скажется на концентрации частиц непосредственно у кромок поверхности. Его скорость напрямую зависит от скоростей и углов соударения частиц между собой. Также необходимо оценить неизотермичность процесса вследствие оценки преобразования одной энергии в другую (кинетической в тепловую) при соударении частиц, а также влияние возникновения при это турбулентных пульсаций.

«Сброс» дисперсного потока частиц из несущей фазы с поверхности рассекателя.

Сила, действующая на поверхность частицы, зависит только от течения жидкости в непосредственной близости от частицы. Однако на характер течения будут влиять также близлежащие объекты, например, другие частицы. Чтобы упростить задачу, необходимо вначале рассмотреть одиночную частицу, движущуюся со скоростью и в относительно бесконечной неньютоновской жидкости, в которой нет других источников появления сдвига. В этом случае также предполагается, что скорость частицы относительно жидкости остается постоянной, что может выполняться в условиях гравитационного осаждения [19].

При определении формулы (1) выше: время динамической релаксации $\tau_p = \frac{\rho_d d^2}{18\rho\nu U_s}$, $U_s = \frac{1+Re_d^{2/3}}{6}$, $Re_d = \frac{[U-U_s]d}{\nu}$; здесь ρ_d – плотность дисперсных частиц, d – диаметр частицы, ν – коэффициент кинематической вязкости, U , U_s – осредненные скорости газовой и дисперсной фазы. $T_i = \frac{\eta_k^2}{\nu}$, $\eta_k = 2R_1 Re_{c1}^{-3/4}$ – колмогоровский временной и пространственный масштабы; здесь R_1 - радиус трубы до отрыва, $Re_{c1} = \frac{2R_1 \langle u_{c1} \rangle}{\nu}$, $\langle u_{s1} \rangle$ – среднеквадратическая скорость пульсаций скорости газа на оси трубы перед сечением отрыва; характерное

время несущей фазы в осредненном движении $\tau_f = \frac{5H}{U_{m1}}$ – турбулентный микромасштаб, U_{m1} – характерная скорость – характерная скорость несущей среды перед сечением отрыва. Такое выражение для τ_f используется как для потока за плоским обратным уступом, так и за внезапным расширением трубы, что применимо к нашей задаче по изучению конструктивно сложных участков. Бифазный поток может быть осложнен фазовыми переходами и осаждением частиц на стенку, их взаимодействием с турбулентными пульсациями газа, перераспределением дисперсной фазы по поперечному сечению потока [6].

Преодоление поворотной камеры, поворот на 180° , удаление из золотого бункера [17].

В случае вертикальных потоков, когда скорость газа снижается или расход частиц слишком высок, суспензия может перекрыть подъемный канал, поток нарушается и возникает режим потока "пробка". Это проявляется в очень сильных импульсах давления. В системах с мелкими частицами закрытие потока возможно в тех областях, где процесс агломерации преобладает над процессом разрушения. Однако это должно быть подтверждено проведением повторного полномасштабного эксперимента [21].

Падение давления при течении взвеси в трубе может быть обусловлено трением, ускорением жидкости или силой тяжести.

Если измеренный в трубе перепад давления равен Δp_m и только некоторая часть этого перепада Δp_i обусловлена трением, то

$$\Delta p_i = \Delta p_m - \Delta p_{as} - \Delta p_{ag} - \Delta p_{\rho s} - \Delta p_{\rho g}, \quad (3)$$

Где Δp_{as} , Δp_{ag} вызваны соответственно ускорением частиц и газа. Гидростатическое давление газа и частиц также приводит к перепадам давления $\Delta p_{\rho s}$ и $\Delta p_{\rho g}$. При точных измерениях, когда величина $\Delta p_{\rho g}$ имеет большое значение, разность между $\Delta p_{\rho g}$ и высотой столба воздуха в линиях отбора давления, используемых для измерений Δp_m , также может оказаться важной поправкой для определяемой величины Δp_m – это сказывается существенным лишь тогда, когда температура взвеси сильно отличается от температуры окружающей среды.

Падение давления из-за ускорения газа можно рассчитать по такой же формуле, как и для твердых частиц:

$$\Delta p_{as} = 2\pi \left[\left(\int_0^{D/2} r \rho_{ds} U_s^2 dr \right)_{\text{ВЫХ}} - \left(\int_0^{D/2} r \rho_{ds} U_s^2 dr \right)_{\text{ВХ}} \right] \quad (4)$$

Из непосредственных измерений более простым расчетом по формуле

$$\Delta p_{as} \approx R \left(\frac{U_f}{A} \right)^2 \left(\frac{T_0}{p_0} - \frac{T_1}{p_1} \right), \quad (5)$$

Где в данном случае R – газовая постоянная. Давление газа p и его температуру T измерить сравнительно легко. С другой стороны, расчет по формуле выше провести трудно. Однако если скорость скольжения фаз достаточно мала, то разность $U_j - U_s$ на входе и выходе из трубы приблизительно одинакова. В этом случае

$$\Delta p_{as} \approx \frac{W_s}{W_g} - \Delta p_{ag} \quad (6)$$

Очевидным исключением является течение крупных частиц в короткой трубе, когда время релаксации для обмена количеством движения может быть достаточно большим по сравнению со временем пребывания частиц в трубе.

Использование закона Стокса не вносит большой погрешности. Вязкими силами можно пренебречь. Вводится поправочный коэффициент ψ/δ для определения силы аэродинамического сопротивления. Скорость мелких частиц можно и вовсе принять скорости газа. Определенное влияние на величину продольного скольжения частиц оказывают изменение скорости (разгона) частиц по длине канала, взаимодействие частиц друг с другом (концентрация дисперсной фазы) и со стенками канала, однако основную роль, видимо играют процессы, связанные с перераспределением частиц с разной скоростью по сечению канала: турбулентная диффузия, подъемная и турбулентная поперечная миграция.

Присутствие твердых частиц в потоке может приводить к значительному (порой многократному) увеличению тепловых потоков. Эти явления обусловлены совместным изменением ряда параметров, таких, как характеристики развивающегося на обтекаемом теле пограничного слоя [16–20], вихревых зон и турбулентных следов [21–32]; параметры частиц при соударении с поверхностью, в том числе изменение структуры течения набегающего на тело потока [10–15], а также шероховатости поверхности. Исследование процессов взаимодействия частиц с обтекаемой поверхностью, газодинамическое напыление, крайне важно принимать во внимание, особенно с учетом пограничного слоя. Для реализации расчета математической модели запыленного потока необходимо проведение расчета в ANSYSFluent и верификации расчета на установке.

Список литературы

1. Пат.175570 Российская Федерация, Инерционно-вакуумный золоотделитель для дымовых газов Л. В. Белоглазова (Л.В. Мостовенко) Инерционно-вакуумный золоотделитель для дымовых газов :№ 2017100591: заявл. 12.01.2017, опубл. 11.12.2017 / Л.В.Белоглазова (Л.В.Мостовенко) В. П. Белоглазов, В. Н. Градобоев; патентообладатели Фонд поддержки научной, научно-технической и инновационной деятельности «Энергия без границ»
2. Пахомов М.А., Терехов В.И. Влияние испарения капель на турбулентность газа и теплообмен при течении двухфазного потока за внезапным расширением трубы // Изв. РАН. МЖГ. 2016. № 1. С. 69
3. Осипцов А.Н. О структуре ламинарного пограничного слоя дисперсной примеси на плоской пластине // Изв. АН СССР. МЖГ. 1980. № 4. С. 48.
4. Вараксин А.Ю., Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Поляков А.Ф. Измерения полей скоростей газа и твердых частиц в пограничном слое турбулизированного гетерогенного потока // ТВТ. 1995. Т. 33. № 6. С. 915
5. Вараксин А.Ю., Зайчик Л.И. Влияние мелкодисперсной примеси на интенсивность турбулентности несущего потока в трубе // ТВТ. 1998. Т. 36. № 6. С. 1004.

6. Вараксин А.Ю. Влияние частиц на турбулентность несущего потока газа // ТВТ. 2015. Т. 53. № 3. С. 441.

7. Вараксин А.Ю. Воздушные торнадоподобные вихри: математическое моделирование // ТВТ. 2017. Т. 55. № 2. С. 291.

8. Белоглазов, В. П. Влияние элементов геометрии ИВЗ на эффективность улавливания золы / В. П. Белоглазов, Л. В. Белоглазова // Вестник науки и образования. – 2015. – № 7 (9). – С. 5–9.

9. Левич В.Г., Кучанов С.И. Движение частиц, взвешенных в турбулентном потоке // ДАН СССР. 1967. Т. 174. № 4. С. 763

10. Кучанов С.И., Левич В.Г. Диссипация энергии в турбулентном потоке, содержащем взвешенные частицы // ДАН СССР. 1967. Т. 174. № 5. С. 1033.

11. Абрамович Г.Н. О влиянии примеси твердых частиц или капель на структуру турбулентной газовой струи // ДАН СССР. 1970. Т. 190. № 5. С. 1052

12. Деревич И.В. Влияние примеси крупных частиц на турбулентные характеристики газозвеси в каналах // ТВТ. 1994 Т.2 №2 С.70-78

13. Дружакина, О. П. Проектирование сооружений пылегазоочистки : учебно-метод. пособие / О. П. Дружакина. – Ижевск : Удмуртский ун-т, 2014. – 44 с. – ISBN 978-5-9948-2955-4.

14. А. Ю. Вараксин, “Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения (Обзор)”, ТВТ, 51:3 (2013), 421–455; HighTemperature, 51:3 (2013).

16. Вараксин А.Ю. Кластеризация частиц в турбулентных и вихревых двухфазных потоках // ТВТ. 2014. Т. 52. № 5. С. 777.

17. Сугак Е.В., Кузнецов Е.В., ШАХРАЙ С.Г. Динамика газодисперсного потока в вертикальном канале. Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. Издательство: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева" (Красноярск). Номер: 4 Год: 2005 Страницы: 18-23.

18. Суган Е.В. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами / Е.В. Сугак, Н.А. Войнов, Н.А. Николаев, Казань: Школа, 1999 – 224с.

19. И. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. М., Мир, 1975, 378с.

20. Белоглазова Л. В. Влияние изменения высоты конфузторного участка на эффективность инерционно-вакуумного золоуловителя / Л. В. Белоглазова // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. Екатеринбург : УрФУ. – 2016. – С. 38–40.

21. Мостовенко Л.В. Проведение исследовательских испытаний на инерционно-вакуумном золоотделителе / А.М. Парамонов, Л.В. Мостовенко // Промышленная энергетика. - 2019. - № 12. - С. 43–49.

Сведения об авторах

Мостовенко Любовь Владимировна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры энергетики, ФГБОУ ВО «Нижевартовский государственный университет», Нижневартовск, email: teploblv@mail.ru

Рыжникова Екатерина Антоновна – студентка гр. 2802 кафедры энергетики, ФГБОУ ВО «Нижевартовский государственный университет», Нижневартовск, email:ryzhnikova.k@yandex.ru

Белоглазов Владимир Петрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергетики, ФГБОУ ВО «Нижевартовский государственный университет», Нижневартовск, email: vrbn@mail.ru

Тоцких Павел Михайлович – аспирант кафедры «Теплоэнергетика», ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», Омск.

About the authors

Mostovenko Lyubov Vladimirovna – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Power Engineering, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, email: teploblv@mail.ru

Ryzhnikova Ekaterina Antonovna – student 2802 Department of Energy, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, email: ryzhnikova.k@yandex.ru

Beloglazov Vladimir Petrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Power Engineering, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, email: ryzhnikova.k@yandex.ru

Totskikh Pavel Mikhailovich – post-graduate student of the Department of Heat Power Engineering, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Omsk State Technical University", Omsk.