

УДК 532.529

ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЧАСТИЦ ПРИ ОБТЕКАНИИ ЗАТУПЛЕННОГО ТЕЛА ДВУХФАЗНЫМ ПОТОКОМ

© 2022 г. А. Ю. Вараксин^{1, 2, *}, А. А. Желебовский^{1, 2}, А. А. Мочалов^{1, 2}

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*E-mail: varaksin_a@mail.ru

Поступила в редакцию 27.10.2021 г.

После доработки 18.01.2022 г.

Принята к публикации 15.02.2022 г.

Приводятся результаты измерения полей концентрации твердых частиц в окрестности лобовой точки цилиндрического тела с плоским торцом. Восстановление полей концентрации частиц проводилось на основе идентификации их изображений, получаемых путем фотофиксации при малой выдержке. Эксперименты выявили эффект роста концентрации частиц вблизи поверхности тела, который проявлялся сильнее с увеличением локальной концентрации частиц в набегающем потоке. Проанализированы механизмы роста концентрации частиц при обтекании тел потоками, содержащими частицы.

DOI: 10.31857/S0040364422010100

ВВЕДЕНИЕ

Проблема взаимодействия двухфазных потоков с обтекаемыми телами возникла в связи с изучением движения различных летательных аппаратов в атмосфере [1, 2], содержащей твердые грунто-пылевые образования, дождевые капли и т.п. Газотурбинные двигатели (ГТД) часто используются в условиях, когда элементы проточной части подвержены повреждениям из-за частиц песка или пыли. На сегодняшний день известно много механизмов деградации [3], связанных с присутствием дисперсной фазы как во входящем воздухе, так и в продуктах сгорания. Вот лишь некоторые из них: эрозия из-за истирания материала вследствие ударов частиц; коррозия вследствие примесей и топливных присадок; горячая коррозия из-за химического реагирования продуктов сгорания, минеральных кислот и солей; изменение геометрии лопаток и проточной части вследствие налипания частиц на обтекаемые поверхности; повреждения посторонними предметами, попадающими через воздухозаборник и др.

Имеется большое количество работ, в которых изучались различные аспекты воздействия частиц на лопатки компрессоров и турбин ГТД. Например, в [4] исследовано воздействие частиц оксида алюминия при скоростях до 145 м/с и углах столкновений 30° и 90° на эрозионную стойкость нанослойных покрытий, нанесенных на подложки различных сплавов, моделирующих лопатки ГТД. В [5] представлены результаты экспериментального исследования лопатки компрессора марки ЭИ-961, подверженной эрозии частицами абразивного по-

рошка различных размеров. Эрозионная стойкость оценивалась измерением уменьшения массы образца и изменением шероховатости поверхности вследствие воздействия частиц. Изучение высокоскоростной эрозии лопатки компрессора первой ступени ГТД в условиях коррозионной среды после длительной эксплуатации на суше выполнено в [6]. Найдено, что процессы эрозии и наличие коррозионных ямок вызывают значительное сокращение времени зарождения трещины, приводящей к поломке лопатки. В [7] численно моделировалась динамика движения твердых пылевых частиц в проточной части осевого компрессора с целью дальнейшего использования результатов для испытаний вновь созданных материалов и покрытий лопаток ГТД на эрозионную стойкость.

В связи с интенсивным развитием возобновляемых источников энергии во всем мире в последние годы большое внимание уделяется проблеме эрозионной стойкости лопастей ветряных турбин [8] к воздействию песка, града, дождя, а также насекомых и птиц. В [9] развита модель эрозии лопастей ветряных турбин, учитывающая влияние скорости ветра и размера частиц на интенсивность эрозии, что позволяет рассчитывать воздействие четырех возможных разновидностей осадков: дождя, снегопада, морских брызг и тумана. Негативное влияние ветра и дождя на интенсивность эрозионного разрушения лопастей ветряных турбин изучено также в работах [10, 11].

Во многих отраслях промышленности при транспортировке двухфазных сред (например, сланцевого газа) имеется проблема износа тру-

бопроводного оборудования, особенно актуальная в местах изгибов [12, 13], сочленения труб [14] и расположения задвижек [15, 16].

В последние годы интенсивно проводятся исследования взаимодействия высокоскоростных (сверх- и гиперзвуковых) двухфазных потоков с различными летательными аппаратами. Наибольшее количество вопросов вызывает интенсификация теплообмена и теплоэрозионного воздействия при обтекании тел двухфазными потоками с частицами крупных размеров, которые практически не тормозятся в ударном слое. В [17–22] представлены результаты численного моделирования газодинамического взаимодействия одиночной высокоинерционной частицы с ударным слоем, а также роли коллективных эффектов, включая межчастичные столкновения. Детальным образом проанализирована эволюция ударно-волнового и вихревых течений, возникающих при переходе отраженной от обтекаемой поверхности частицы через головную ударную волну.

Для создания и тестирования математических моделей, описывающих сложный процесс теплоэрозионного воздействия частиц или капель на обтекаемые тела, необходимо знание параметров дисперсной фазы (прежде всего, скорости и концентрации) вблизи поверхностей. Влияние частиц различной инерционности (макро-, микро- и наночастиц) на структуру турбулентности несущего газа рассмотрено в работах [23, 24].

Целью настоящей работы является изучение распределения частиц в окрестности лобовой точки модели с плоским торцом, а также анализ возможных механизмов роста их концентрации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка включает в себя вертикальный рабочий участок длиной 1000 мм, выполненный из органического стекла и имеющий квадратное сечение со стороной 100 мм. На входе в рабочий участок находится канал длиной 850 мм, представляющий собой трубу с внутренним диаметром 100 мм. С целью подавления отрывных явлений в канале имеется осесимметричный входной участок длиной 175 мм, спрофилированный по лемнискату Бернулли. Внутри входного участка на оси симметрии канала находится питатель цилиндрической формы, посредством которого в воздушный поток подаются частицы (стеклянные микросферы). В нижней части питателя имеется отверстие, диаметр которого определяет величину массового расхода дисперсной фазы. Непосредственно перед проведением эксперимента питатель заполняется стеклянными микросферами. Расстояние от места ввода частиц до поверхности обтекаемого тела составляет 1850 мм.

Основные параметры частиц: физическая плотность – 2550 кг/м³, средний диаметр – 160 мкм,

Основные характеристики экспериментальных режимов

U_c , м/с	V_c , м/с	Re	$\langle M \rangle$
1.5	3.1	10 100	0.059
2.1	3.4	14 200	0.054
3.2	4.6	21 600	0.040

среднеквадратическое отклонение – 18 мкм. Для описываемой серии экспериментов использовалось отверстие питателя, обеспечивающее массовый расход частиц, равный 2.2 г/с.

Рабочий участок соединен с выходным каналом, к которому через гибкую гофру присоединен уловитель частиц циклонного типа. Уловитель частиц соединен с вентилятором, обеспечивающим изменение скорости нисходящего потока на оси рабочего участка.

Эксперименты проводились при трех значениях скорости несущей фазы (на оси канала): $U_c = 1.5, 2.1, 3.2$ м/с. Скорость измерялась с использованием метода PIV при отсутствии частиц в канале. Соответствующие числа Рейнольдса: $Re = 10\ 100, 14\ 200$ и $21\ 600$. Основные характеристики экспериментальных режимов приведены в таблице.

Схема течения воздуха с частицами показана на рис. 1. Центр прямоугольной системы координат x – y находится в лобовой точке цилиндрического тела с плоским торцом (диаметр тела – 15.6 мм). Ось x направлена вверх по потоку.

В качестве источника освещения окрестности обтекаемого тела использовался непрерывный лазер с длиной волны 532 нм, луч которого при помо-

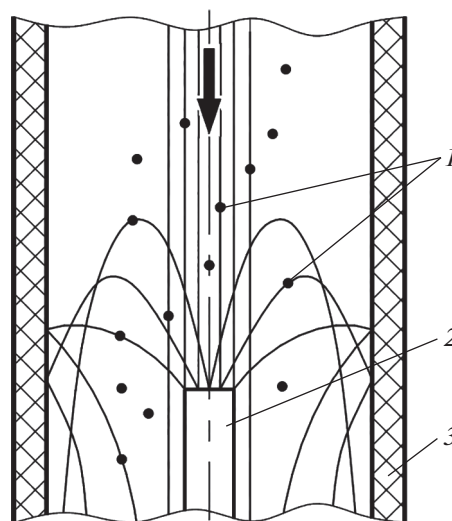


Рис. 1. Схема обтекания тела двухфазным потоком: 1 – частицы, 2 – обтекаемое тело, 3 – стенка канала.

щи оптической призмы развернут в плоскость с углом раскрытия 42° . Проводилась высокоскоростная съемка исследуемой области при помощи монохромной камеры Evercam F 1500-32-M (Россия) с объективом Zenitar 1.2/50s (Россия). Время выдержки каждого кадра составляло 160 мкс, что обеспечивало приемлемое значение перемещения частиц в кадре для их программной идентификации. Интервал между кадрами для определения полей концентрации составлял 0.05 с. В ходе эксперимента были получены и обработаны 8000 изображений для каждого из рассматриваемых случаев.

Измерения средней скорости частиц проводились для каждого из исследуемых режимов течения (таблица) непосредственно вблизи оси канала в отсутствие обтекаемого тела и выполнялись по получаемой последовательности кадров (частота съемки равна 1500 кадр/с). Полученные скорости частиц в области размещения модели составляли $V_c = 3.1, 3.4, 4.6$ м/с.

Зная массовый расход частиц и их скорости, легко определить среднюю (по сечению канала) массовую концентрацию $\langle M \rangle = 0.059, 0.054, 0.040$ при скоростях воздуха $U_c = 1.5, 2.1, 3.2$ м/с соответственно. Полученным значениям массовой концентрации соответствуют следующие значения средних (по сечению) объемных концентраций: $\langle \Phi \rangle = 2.8 \times 10^{-5}, 2.5 \times 10^{-5}, 1.9 \times 10^{-5}$.

МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

Для восстановления полей концентрации необходимо определить положения частиц в кадре, для чего применялся программный код обработки изображений, написанный на Python 3.8, с использованием библиотек OpenCV и NumPy [25].

Во-первых, кадры проходят предварительную подготовку, которая заключается в кадрировании по области интереса и тоновой коррекции. Во-вторых, определяется фоновое изображение по минимальному значению яркости каждого пикселя по всему набору монохромных изображений. Затем фоновое изображение попиксельно вычитается из исходного набора кадров. Этот шаг необходим для исключения из области интереса стационарных объектов (обтекаемого тела, деталей канала, неравномерности фона), которые могут ложно определяться в качестве частиц. В-третьих, к каждому кадру из набора применяется размытие по Гауссу. Это требуется для того, чтобы исключить данные о частицах, которые находятся на границе лазерного ножа, но их яркости недостаточно для достоверной идентификации. Затем к кадру применяется оператор Дж.Ф. Кэнни (J.F. Canny) для определения границ частиц. Незамкнутые контуры границ удаляются. В-четвертых, по изображению

с замкнутым контуром определяются положения центров частиц в каждом кадре. На заключительном шаге данные о положении центров частиц по всему набору изображений заносятся в таблицу. Каждая ячейка таблицы соответствует некоторой области изображения и хранит данные о количестве попаданий частиц в данную область. При необходимости данные в таблице осредняются по соседним ячейкам. Отметим, что время между кадрами при съемке выбирается таким образом, чтобы зафиксировать положение одной конкретной частицы не более одного раза во избежание появления видимых всплесков концентрации вдоль линии движения этой частицы.

Увеличение пространственного разрешения данного метода возможно за счет использования более крупной выборки кадров (например, при скорости потока воздуха на оси 1.5 м/с в каждом кадре определяется в среднем по 47 частицам). Увеличение скорости частиц в канале при неизменном их расходе ведет к уменьшению концентрации, что снижает количество данных об их положении.

Пересчет распределения частиц в плоскости измерений в объемную концентрацию проводился путем нормирования с учетом известного расхода дисперсной фазы через поперечное сечение канала. Массовая концентрация определялась из объемной с учетом отношения плотностей фаз.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распределения массовой концентрации частиц по сечению канала в отсутствие тела для разных скоростей несущего воздуха представлены на рис. 2. Распределение частиц по сечению канала неоднородно. Так, в осевой зоне канала локальная концентрация частиц превышает, а вблизи стенки канала становится ниже ее среднего значения $\langle M \rangle$ (см. таблицу). Это связано с тем, что введение частиц в поток осуществляется в осевой зоне, а длина рабочего

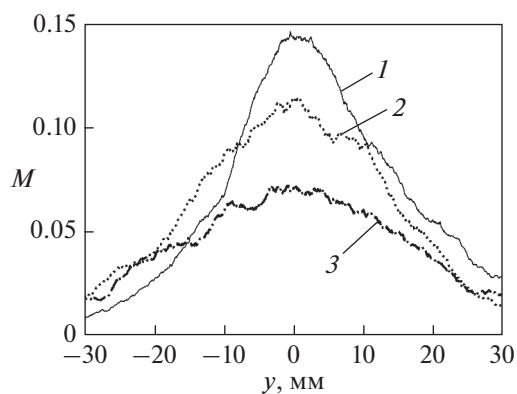


Рис. 2. Распределения массовой концентрации частиц в поперечном сечении канала (обтекаемое тело отсутствует): 1 – $U_c = 1.5$ м/с, 2 – 2.1, 3 – 3.2.

участка недостаточна для того, чтобы турбулентный поток воздуха успел выровнять поле концентрации частиц по всему сечению. Несмотря на данное обстоятельство, в описываемых экспериментах достигалось условие гидродинамической стабилизации двухфазного нисходящего потока, заключающееся в завершении разгона частиц на длине рабочего участка (см. таблицу). Неоднородный профиль концентрации играл положительную роль, так как необходимо было отработать методику восстановления поля концентрации частиц по их изображениям на кадрах.

С ростом скорости несущего воздуха неоднородность распределения частиц по сечению снижалась. По-видимому, это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, средняя (по сечению) концентрация частиц $\langle M \rangle$ снижалась с ростом скорости воздуха (см. таблицу). Во-вторых, увеличение интенсивности турбулентных пульсаций скорости воздуха с ростом числа Рейнольдса приводило к более активному “размытию” частиц и формированию более однородного профиля их концентрации.

Эксперименты позволили определить значения концентрации частиц на оси канала ($y = 0$) в невозмущенном присутствии тела потоке. Они равны $M_0 = 0.14, 0.12, 0.07$ для скоростей несущего воздуха $U_c = 1.5, 2.1, 3.2$ м/с.

Распределения относительной массовой концентрации частиц вдоль оси канала в окрестности лобовой точки тела представлены на рис. 3. Концентрация частиц существенно возрастает по мере приближения к телу для всех скоростей несущего воздуха. Максимальных значений концентрация частиц достигала в непосредственной близости к его поверхности ($x = 3$ мм). Они равны $M/M_0 = 6.5, 4.2, 3.2$ для скоростей несущего воздуха $U_c = 1.5, 2.1, 3.2$ м/с. Отметим, что развитая методика восстановления полей концентра-

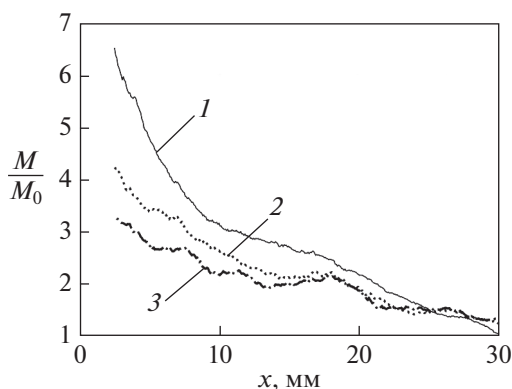


Рис. 3. Распределения относительной концентрации частиц вдоль оси потока ($y = 0$) в окрестности лобовой точки тела: 1 – $U_c = 1.5$ м/с, 2 – 2.1, 3 – 3.2.

ции частиц не позволяет измерять концентрацию в непосредственной близости к поверхности обтекаемого тела, так как тело попадает в область осреднения по пикселям.

Известно, что рост концентрации частиц при обтекании тел двухфазными потоками происходит вследствие действия трех основных физических механизмов, а именно 1) торможения частиц вблизи поверхности тела, 2) столкновений частиц с поверхностью тела (появление в потоке отраженных частиц), 3) столкновений падающих и отраженных частиц между собой.

Оценки показали, что в условиях настоящих экспериментов падающие на тело частицы обладают большой инерционностью и практически не изменяют своей скорости в области лобовой точки тела. Соответствующие числа Стокса, характеризующие процесс релаксации скоростей воздушной и дисперсной фаз в окрестности лобовой точки тела, равны $Stk_f = 19, 27, 41$ для скоростей несущего воздуха $U_c = 1.5, 2.1, 3.2$ м/с. Данные значения чисел Стокса свидетельствуют в пользу того, что коэффициент осаждения частиц на тело близок к единице. Таким образом, основными механизмами, отвечающими за рост концентрации частиц в условиях описываемых экспериментов, являются их столкновения с поверхностью тела и столкновения падающих и отраженных частиц между собой.

Многочисленные исследования двухфазных потоков показали, что столкновительное взаимодействие между частицами начинается при достижении объемной концентрации $\Phi = O(10^{-3})$, значительно превышающей приведенные выше величины. Поэтому ими, казалось бы, можно априори пренебречь. Однако в рассматриваемом случае обтекания тел двухфазными потоками в окрестности лобовой точки могут реализовываться условия для начала межчастичных столкновений при значительно меньших концентрациях [26, 27]. Это связано с тем, что частота столкновений определяется прежде всего величиной относительной скорости сталкивающихся частиц и их локальной концентрацией, которая в окрестности лобовой точки обтекаемого тела может превышать ее значение в набегающем потоке (хотя бы за счет появления отраженных частиц).

Вероятность межчастичных столкновений возрастает с увеличением концентрации, и в свою очередь межчастичные столкновения также приводят к ее увеличению. Таким образом, происходит некое подобие цепной реакции, следствием которой являются наблюдаемые в экспериментах высокие значения локальной концентрации. Так, максимальное значение локальной концентрации при $U_c = 1.5$ м/с и $x = 3$ мм было $M \approx 1.0$, что соответствует $\Phi \approx 5 \times 10^{-4}$. Это значение концентрации

близко к приведенному выше значению объемной концентрации, при котором начинаются столкновения частиц.

Распределения относительной массовой концентрации частиц в поперечном сечении канала на разных расстояниях от лобовой точки тела представлены на рис. 4. Неоднородность профиля концентрации в значительной степени определяется

неравномерностью распределения частиц в набегающем (не возмущенном присутствием тела) потоке (см. рис. 2). Градиентность профилей концентрации увеличивается вследствие роста концентрации частиц в окрестности поверхности тела. Протяженность области повышенной концентрации частиц на оси канала превышает 15 мм (рис. 4). Данные рис. 3 говорят о том, что рост концентрации частиц начинается на расстоянии 30 мм при $U_c = 1.5$ м/с и на больших расстояниях при более высоких скоростях несущего потока. Это связано с наличием в потоке отраженных частиц, которые с ростом скорости потока проникают на все большие расстояния вверх по потоку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты измерения полей концентрации твердых частиц в окрестности лобовой точки цилиндрического тела с плоским торцом, обтекаемым двухфазным потоком. Восстановление полей концентрации частиц проводилось на основе разработанного алгоритма идентификации их изображений, получаемых путем фотофиксации при короткой выдержке. Проведенные эксперименты выявили эффект роста концентрации частиц вблизи поверхности тела (до 6.5 раз). Данный эффект проявлялся сильнее с увеличением локальной концентрации частиц в набегающем потоке. Показано, что основными механизмами, отвечающими за рост концентрации частиц, являются их столкновения с поверхностью тела и столкновения падающих и отраженных частиц между собой.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 20-19-00551).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вараксин А.Ю.* Обтекание тел дисперсными газовыми потоками // ТВТ. 2018. Т. 56. № 2. С. 282.
2. *Вараксин А.Ю.* Двухфазный пограничный слой газа с твердыми частицами // ТВТ. 2020. Т. 58. № 5. С. 789.
3. *Alqallaf J., Ali N., Teixeira J.A., Addali A.* Solid Particles Erosion Behaviour and Protective Coatings for Gas Turbine Compressor Blades – A Review // Processes. 2020. V. 8. № 8. P. 984.
4. *Reedy M.W., Eden T.J., Potter J.K., Wolfe D.E.* Erosion Performance and Characterization of Nanolayer (Ti, Cr)N Hard Coatings for Gas Turbine Engine Compressor Blade Applications // Surfaces and Coatings Technology. 2011. V. 206. № 2–3. P. 464.
5. *Evtstifeev A., Kazarinov N., Petrov Y., Witek L., Bednarz A.* Experimental and Theoretical Analysis of Solid Particle Erosion of a Steel Compressor Blade Based on Incubation Time Concept // Eng. Failure Anal. 2018. V. 87. P. 15.
6. *Poursaeidi E., Niaei A.M., Lashgari M., Torkashvand K.* Experimental Studies of Erosion and Corrosion Interaction in an Axial Compressor First Stage Rotating

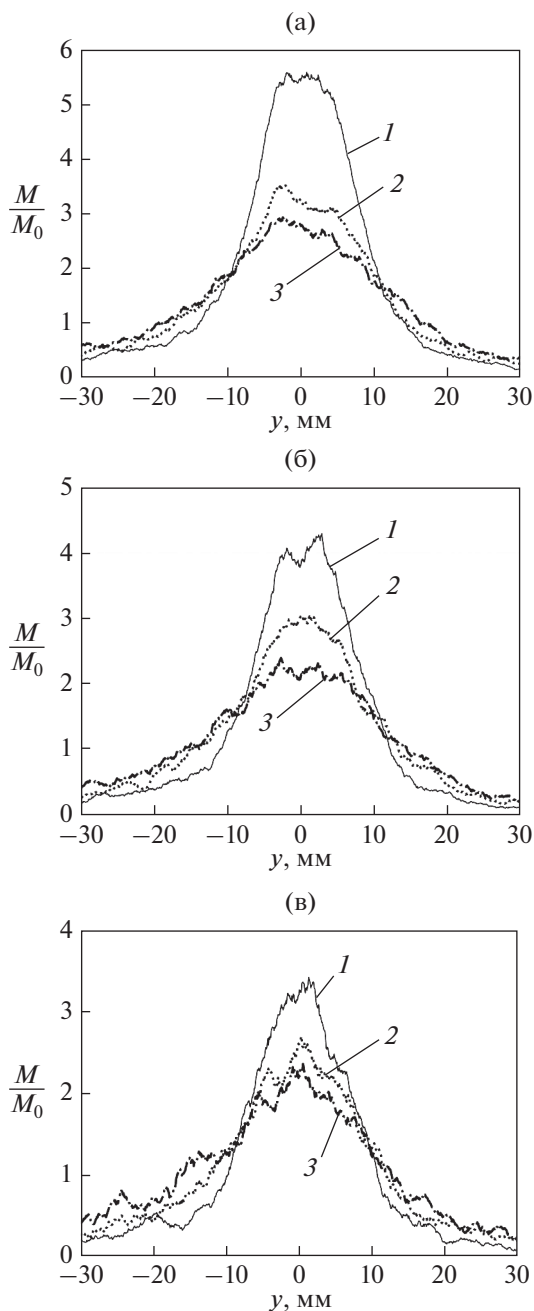


Рис. 4. Распределения относительной концентрации частиц в поперечном сечении канала на различных расстояниях от тела: (а) – $U_c = 1.5$ м/с, (б) – 2.1, (в) – 3.2; 1 – $x = 5$ мм, 2 – 10, 3 – 15.

- Blade Material // *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Proc.* 2018. V. 124. № 9. 629.
7. *Enikeev G., Abdulin A., Yanibaev R., Kasatkin A.* Analysis of the Particle Motion Dynamics in the Compressor to Accompany Erosion Resistance Testing of Blade Material // 2020 Int. Conf. on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM). 16–18 Sept. 2020. Samara, Russia. <https://doi.org/10.1109/DVM49764.2020.9243926>
 8. *Nash J.W.K., Zekos I., Stack M.M.* Mapping of Meteorological Observations over the Island of Ireland to Enhance the Understanding and Prediction of Rain Erosion in Wind Turbine Blades // *Energies*. 2021. V. 14. № 15. 4555.
 9. *Prieto R., Karlsson T.* A Model to Estimate the Effect of Variables Causing Erosion in Wind Turbine Blades // *Wind Energy*. 2021. V. 24. № 9. P. 1031.
 10. *Castorrini A., Venturini P., Corsini A., Rispoli F.* Machine Learnt Prediction Method for Rain Erosion Damage on Wind Turbine Blades // *Wind Energy*. 2021. V. 24. № 8. P. 917.
 11. *Verma A.S., Noi S.D., Ren Z., Jiang Z., Teuwen J.J.E.* Minimum Leading Edge Protection Application Length to Combat Rain-induced Erosion of Wind Turbine Blades // *Energies*. 2021. V. 14. № 6. 1629.
 12. *Hong B., Li X., Li Y., Li Y., Yu Y., Wang Y., Gong J., Ai D.* Numerical Simulation of Elbow Erosion in Shale Gas Fields under Gas-solid Two-phase Flow // *Energies*. 2021. V. 14. № 13. 3804.
 13. *Zeng Q., Qi W.* Simulation Analysis of Erosion–Corrosion Behaviors of Elbow under Gas-solid Two-phase Flow Conditions // *Lubricants*. 2020. V. 8. № 9. 92.
 14. *Hu J., Zhang H., Zhang J., Niu S., Cai W.* Gas-solid Erosion Wear Characteristics of Two-phase Flow Tee Pipe // *Mechanika*. 2021. V. 27. № 3. P. 193.
 15. *Ma G., Lin Z., Zhu Z.* Investigation of Transient Gas-solid Flow Characteristics and Particle Erosion in a Square Gate Valve // *Eng. Failure Anal.* 2020. V. 118. 104827.
 16. *Lin Z., Sun X.W., Yu T.C., Zhang Y.F., Li Y., Zhu Z.C.* Gas-Solid Two-phase Flow and Erosion Calculation of Gate Valve Based on the CFD-DEM Model // *Powder Technol.* 2020. V. 366. P. 395.
 17. *Reviznikov D.L., Sposobin A.V., Dombrovsky L.A.* Radiative Heat Transfer from Supersonic Flow with Suspended Polydisperse Particles to a Blunt Body: Effect of Collisions between Particles // *Comp. Thermal Sci.* 2015. V. 7. № 4. P. 313.
 18. *Dombrovsky L.A., Reviznikov D.L., Sposobin A.V.* Radiative Heat Transfer from Supersonic Flow with Suspended Particles to a Blunt Body // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2016. V. 93. P. 853.
 19. *Ревизников Д.Л., Способин А.В., Сухарев Т.Ю.* Численное моделирование обтекания затупленного тела сверхзвуковым полидисперсным потоком // *ТВТ*. 2017. Т. 55. № 3. С. 418.
 20. *Ревизников Д.Л., Способин А.В., Иванов И.Э.* Изменение структуры течения под воздействием высокоинерционной частицы при обтекании тела сверхзвуковым гетерогенным потоком // *ТВТ*. 2018. Т. 56. № 6. С. 908.
 21. *Reviznikov D.L., Sposobin A.V., Ivanov I.E.* Oscillatory Flow Regimes Resulting from the Shock Layer–Particle Interaction // *High Temp.* 2020. V. 58. № 2. P. 278.
 22. *Ревизников Д.Л., Способин А.В., Иванов И.Э.* Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных об осциллирующем течении, индуцированном газодинамическим взаимодействием частицы с ударным слоем // *ТВТ*. 2020. Т. 58. № 6. С. 901.
 23. *Вараксин А.Ю.* О влиянии макро-, микро- и наночастиц на турбулентность несущего газа // *Докл. РАН. Физика, техн. науки*. 2021. Т. 497. № 1. С. 36.
 24. *Вараксин А.Ю.* Анализ механизмов влияния макро-, микро- и наночастиц на энергию турбулентности несущего газа // *ТВТ*. 2021. Т. 59. № 4. С. 527.
 25. *Zhelebovskiy A.A., Mochalov A.A., Varaksin A.Yu.* Recovery of Particle Concentration Fields by Two-phase Flow Visualization Around Bodies // *Scientific Visualization*. 2021. V. 13. № 3. P. 1.
 26. *Вараксин А.Ю.* Столкновения частиц и капель в турбулентных двухфазных потоках // *ТВТ*. 2019. Т. 57. № 4. С. 588.
 27. *Вараксин А.Ю.* Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и результаты исследований (обзор) // *ТВТ*. 2020. Т. 58. № 4. С. 646.