

03

Особенности процессов деформации движущихся в газовой среде капель жидкостей

© Р.С. Волков, А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: pavelspa@tpu.ru

(Поступило в Редакцию 16 сентября 2014 г.)

С использованием высокоскоростной (10^5 кадров в секунду) видеокамеры проведены экспериментальные исследования процессов деформации капель (начальные характерные размеры 3–6 мм), получивших широкое практическое применение, жидкостей (вода, керосин, этиловый спирт) при их движении в воздухе с умеренными (до 5 м/с) скоростями. Установлены характерные „циклы деформации“ капель. Определены длительность, протяженность и амплитуды изменения размеров капель в пределах каждого цикла. Показано влияние начальных размеров и скоростей движения капель на эти характеристики. Проведена обработка результатов экспериментов с использованием принятых при исследовании движения капель жидкостей критериев подобия — чисел Вебера и Рейнольдса. Выделены особенности исследуемых процессов и показано, что условия и характеристики процессов изменения формы капель обусловлены влиянием не только сил вязкости, инерции и поверхностного натяжения.

Введение

Известны [1–3] попытки использования безразмерных временных характеристик и критериев подобия (в частности, чисел Вебера We и Рейнольдса Re) при обработке результатов исследования процессов деформации движущихся в газовых и жидкостных средах капель воды с различными примесями. В то же время можно выделить цикл работ [4–10], в которых анализ физических закономерностей процессов деформации и разрушения капель проводился после обработки экспериментальных данных в размерных переменных (например, устанавливаются времена индукции, характерные времена дробления и другие размерные параметры). Авторы [1–3] полагают, что размерная обработка результатов экспериментальных исследований рассматриваемых физических процессов ограничивает использование полученных зависимостей на другие условия теплообмена, геометрические размеры капель, физические свойства жидкостей и газов. Также следует отметить, что результаты [1–7] получены с применением средств измерений, возможности которых по дискретизации процессов были существенно ограничены. В последнее десятилетие в практику исследований сложных гидродинамических и теплообменных процессов введены высокоскоростные методы регистрации, обеспечивающие высокую точность измерений основных характеристик исследуемых процессов. Целесообразно экспериментальное исследование процессов деформации капель нескольких широко используемых жидкостей в типичной газовой среде (например, воздухе) при варьировании определяющих параметров движущихся капель в широких диапазонах. Обоснованным на этой стадии исследований является анализ возможности безразмерной обработки полученных результатов с использованием критериев подобия (в частности, Re и We), введенных достаточно давно

для обобщения данных экспериментальных исследований жидкостей и газов (Осборн Рейнольде, 1883 г.), а также условий дробления капель жидкостей в полете (Моритц Вебер, 1939 г.). Можно отметить, что критерии Re и We наиболее часто используются при анализе физики гидродинамических и газодинамических процессов [11–13].

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование особенностей процессов деформации капель широко распространенных жидкостей (вода, керосин, этиловый спирт) при их движении в типичной газовой среде (воздухе).

Методика экспериментальных исследований

Схема экспериментального стенда приведена на рис. 1. Аналогичный стенд использован при исследовании [14–18] закономерностей процессов испарения водяных капель в газовой среде с применением панорамных оптических методов „Particle Image Velocimetry“ (PIV) и „Interferometric Particle Imaging“ (IPI) [19–23]. Регистрационная аппаратура стенда (рис. 1): видеокамера 1 с частотой кадров до 10^5 в секунду, кросскорреляционная камера 2 с минимальной задержкой между двумя кадрами не более 5 мкс, двойной импульсный твердотельный лазер 3, имеющий длину волны 532 нм, энергию в импульсе не менее 70 мДж, длительность импульса не более 12 нс, частоту повторений не более 15 Гц, синхронизирующий процессор 4 с дискретизацией сигналов не более 10 нс.

В проведенных экспериментах жидкость (вода, керосин или этиловый спирт) из емкости 8 по каналу 9 поступала на вход дозатора 10. Начальные характерные размеры (диаметры d_0) капель исследовавшихся

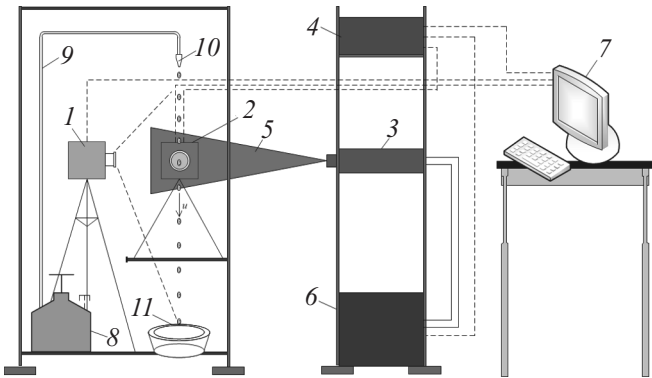


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 — высокоскоростная видеокамера, 2 — кросскорреляционная камера, 3 — двойной твердотельный импульсный лазер, 4 — синхронизатор персонального компьютера (ПК), кросскорреляционной камеры и лазера, 5 — световой «нож», 6 — генератор лазерного излучения, 7 — ПК, 8 — емкость с водой, 9 — канал подачи воды, 10 — дозатор, 11 — уловитель.

жидкостей изменялись от 3 до 6 мм. Второй основной варьируемый параметр — начальная скорость движения каплей u_0 . В областях видеорегистрации (рис. 1) скорости каплей u и достигали 5 м/с. В соответствии с заданными d_0 и u_0 из дозатора 10 выходили одиночные капли, которые пролетали через область видеорегистрации (протяженность 1 м) в воздухе до уловителя 11. Процесс движения каплей регистрировался видеокамерой 1. При прочих неизменных начальных условиях проводилось не менее 10 экспериментов. На персональном компьютере (ПК) 7 после обработки видеogramм выделялись периоды времени t_d , в течение которых капли завершали полный «цикл деформации» [1–4]. Цикл считался завершенным полностью, если капля приняла близкую по размерам и геометрическим параметрам к начальной форму. Для каждого цикла определялись длительность t_d , протяженность l_d , скорость каплей u . Также вычислялись максимальные диаметры каплей (мм): d_x — поперечный (относительно направления движения), d_y — продольный, d_{\max} — абсолютный. Использовались безразмерные переменные, характеризующие амплитуды деформации: $\Delta_x = (d_x - d_0)/d_0$, $\Delta_y = (d_y - d_0)/d_0$, $\Delta_{\max} = (d_{\max} - d_0)/d_0$. В соответствии с рекомендациями [19,20] рассчитывался масштабный коэффициент γ . Значения γ изменялись в диапазоне 0.01–0.1 мм/пикс. Аналогично обработке результатов экспериментов [14–18] с использованием алгоритмов [19,20] вычислялись диаметры каплей в пикселях, а затем выполнялся их пересчет в миллиметры.

Систематические погрешности (оценивались по методикам [24,25]) определения измеряемых и рассчитываемых в дальнейшем параметров не превышали размеры d_x , d_y , d_{\max} , d_0 — 10^{-5} м, протяженность l_d — 10^{-4} м, времена t_d — 10^{-5} с, скорости u , u_0 — $5 \cdot 10^{-2}$ м/с. Максимальные случайные погрешности составили d_x , d_y , d_{\max} , d_0 — 5.8%, t_d — 3.9%, l_d — 7.1%, u — 2.3%.

Результаты и обсуждение

По результатам экспериментов (после соответствующей обработки) установлены зависимости (рис. 2, 3) протяженностей циклов деформации от относительной скорости (u/u_0) и безразмерного диаметра (d_0/d_m) каплей исследованных жидкостей. За масштаб d_m принимался максимальный диаметр каплей в проведенных экспериментах (6 мм). С целью анализа протяженности циклов деформации использовалась безразмерная переменная l_d/l_{dm} . Параметр l_{dm} представляет максимальную протяженность из всех циклов деформации капли жидкости в экспериментах с максимальным характерным размером (6 мм).

Результаты исследований показывают (рис. 2), что безразмерная скорость u/u_0 значительно влияет на протяженность циклов деформации. Это обусловлено тем,

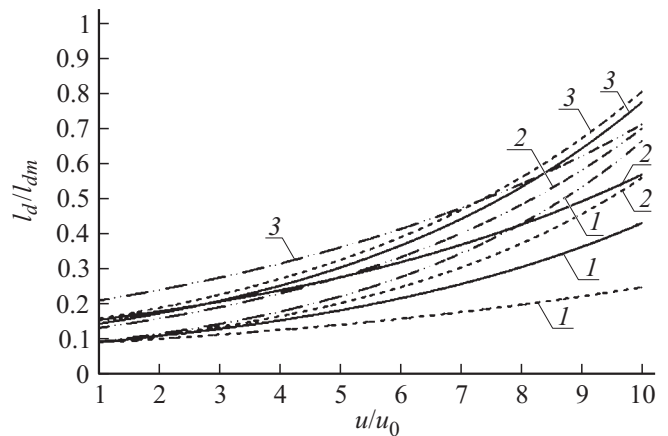


Рис. 2. Зависимости безразмерных протяженностей циклов деформации каплей жидкости ((---) — вода, (---) — керосин, (—) — этиловый спирт) от безразмерной скорости при d_0 , мм: 1 — ≈ 3 , 2 — ≈ 4 , 3 — ≈ 5 .

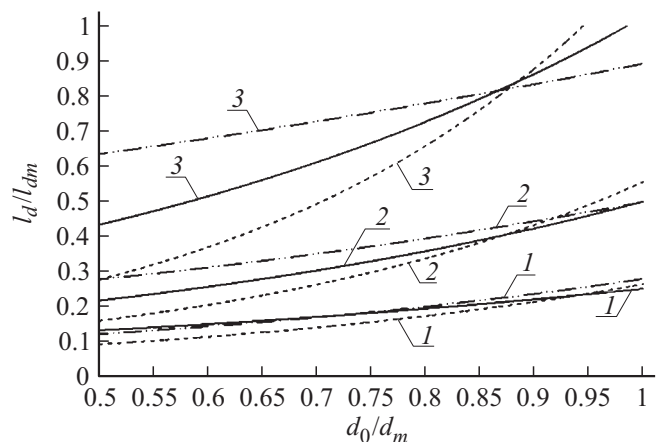


Рис. 3. Зависимости безразмерных протяженностей циклов деформации каплей жидкости ((---) — вода, (---) — керосин, (—) — этиловый спирт) от безразмерного диаметра при u , м/с: 1 — ≈ 1 , 2 — ≈ 3 , 3 — ≈ 5 .

что при увеличении скоростей движения капель растут силы инерции и поверхностного трения. Увеличение же размеров капель приводит к соответствующему изменению их массы. Времена циклов деформации растут, так как снижается интенсивность процессов изменения формы капель жидкостей. Протяженности циклов деформации увеличиваются. Соответственно последние возрастают при увеличении и скоростей, и размеров капель (рис. 2, 3). В то же время следует отметить, что при малых скоростях движения (до 1 м/с) рост l_d незначителен.

Также по результатам экспериментов установлено, что с увеличением скоростей движения амплитуды деформации капель увеличиваются. Так, при максимальных для проведенных экспериментов значениях (около 5 м/с) Δ_{\max} достигали для воды — 0,2, керосина — 0,28, спирта — 0,24. С ростом начальных размеров капель значения Δ_x , Δ_y и Δ_{\max} уменьшались вследствие

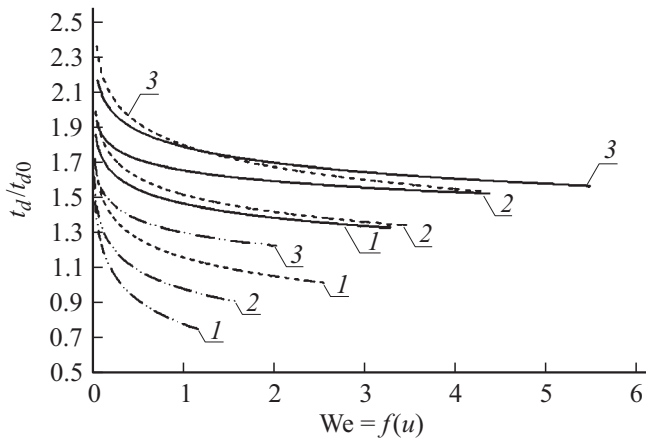


Рис. 4. Зависимости безразмерных времен циклов деформации капель жидкости ((-·-·-) — вода, (- - -) — керосин, (—) — этиловый спирт) от числа Вебера при d_0 , мм: 1 — ≈ 3 , 2 — ≈ 4 , 3 — ≈ 5 .

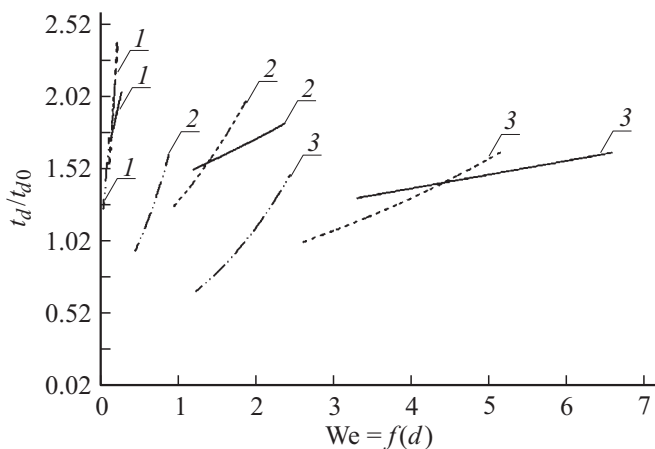


Рис. 5. Зависимости безразмерных времен циклов деформации капель жидкости ((-·-·-) — вода, (- - -) — керосин, (—) — этиловый спирт) от числа Вебера при u , м/с: 1 — ≈ 1 , 2 — ≈ 3 , 3 — ≈ 5 .

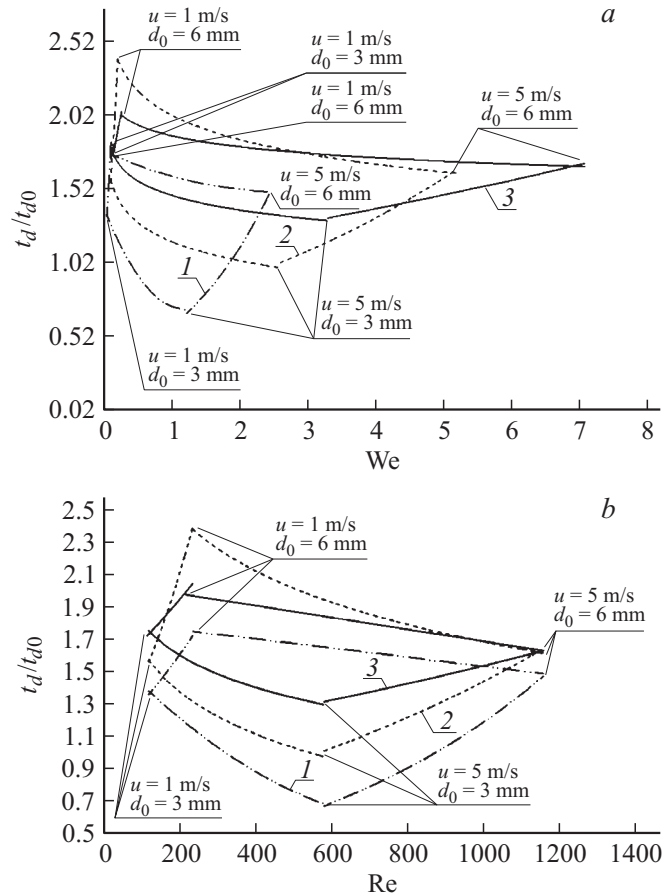


Рис. 6. Области характерных значений t_d/t_{d0} при варьировании We (a) и Re (b) в диапазонах, соответствующих условиям проведенных экспериментов: 1 — вода, 2 — керосин, 3 — этиловый спирт.

повышения массы капель и замедления процессов их деформации. Отличия Δ_x , Δ_y и Δ_{\max} для исследованных жидкостей можно объяснить соответствующим влиянием сил поверхностного натяжения. Чем эти силы больше, тем меньше значения Δ_x , Δ_y и Δ_{\max} . Значения коэффициента σ воды в несколько раз больше по сравнению со спиртом и керосином [26]. Также из анализа амплитуд деформации можно отметить пространственный характер их изменения ($\Delta_x \neq \Delta_y$).

В соответствии с традиционными подходами [11–13] обработки результатов в настоящей работе получены зависимости безразмерных времен циклов деформации (t_d/t_{d0}) от чисел Re и We (рис. 4–6).

Число Вебера рассчитывалось по формуле [13]

$$We = u^2 d_0 \rho / \sigma, \tag{1}$$

где ρ — плотность газов, kg/m^3 ; σ — поверхностное натяжение жидкости, kg/s^2 .

Число Рейнольдса для капли, движущейся в газовой среде, вычислялось с использованием выражения [13]

$$Re = u d_0 / (2\nu), \tag{2}$$

где ν — кинематическая вязкость газовой среды, m^2/s .

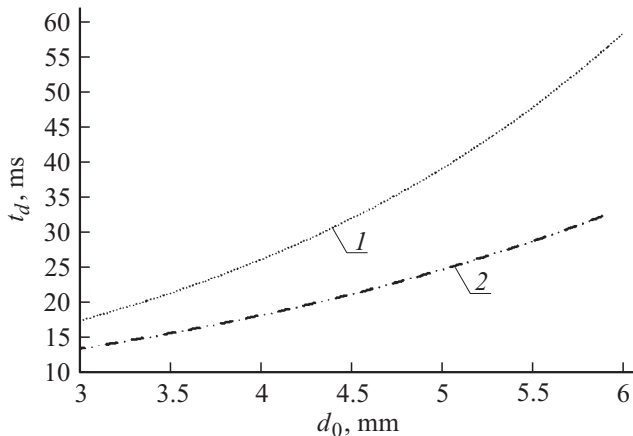


Рис. 7. Аппроксимационная экспериментальная [1] кривая (1) и зависимость времени первого цикла деформации капли воды от ее размера при $u \approx 5$ м/с (2) для проведенных экспериментов.

Коэффициенты поверхностного натяжения воды, керосина и этилового спирта приняты [26] $\sigma_w \approx 0.0618$ кг/с², $\sigma_k \approx 0.0289$ кг/с², $\sigma_s \approx 0.0228$ кг/с²; плотность $\rho \approx 1$ кг/м³ и кинематическая вязкость $\nu \approx 1.3 \cdot 10^{-5}$ м²/с газовой среды (воздуха).

Использовано безразмерное время характерных циклов деформации — t_d/t_{d0} , где t_{d0} — период собственных колебаний $t_{d0} = (d_0/g)^{0.5}$ [1–3], g — ускорение свободного падения, м/с².

На рис. 4 и 5 представлены результаты обработки экспериментов при различных скоростях движения и начальных размерах капель. Достаточно хорошо видно, что зависимости $t_d/t_{d0} = f(We)$ при варьировании скоростей (рис. 4) и размеров (рис. 5) капель существенно отличаются. Рост скорости движения капли приводит к уменьшению t_d/t_{d0} (рис. 5). При повышении размера капли времена t_d/t_{d0} увеличиваются (рис. 4).

В результате анализа массива числовых значений времен t_d/t_{d0} установлены границы (рис. 6) характерных областей варьирования этих параметров для типичных диапазонов изменения чисел Вебера и Рейнольдса. Можно отметить достаточно большие диапазоны изменения безразмерных времен, циклов деформации t_d/t_{d0} для идентичных значений We и Re (рис. 6). Это обусловлено разным влиянием скоростей движения и размеров капель на характеристики деформации. Как следствие, можно сделать вывод о том, что обработка результатов выполненных экспериментов в виде зависимостей от чисел We и Re не учитывает всех значимых факторов, определяющих деформацию капель жидкости при движении в газовой среде.

Известна попытка [1] обоснования размерных и безразмерных зависимостей времен периодов собственных колебаний капель (рассматривалась вода с различными включениями и примесями) при свободном падении в воздухе от физических свойств (вязкость, плотность,

поверхностное натяжение) жидкости и размеров капель. Полученные в проведенных экспериментах результаты (рис. 4–6) в целом хорошо соответствуют данным [1]. В частности, сопоставление (рис. 7) экспериментальных значений t_d в проведенных опытах при движении капель воды в газовой среде со скоростью $u \approx 5$ м/с показывает их удовлетворительное согласие. Установленные отличия времен t_d от данных экспериментов [1] обусловлены, очевидно, разными скоростями движения капель (в экспериментах [1] этот параметр не измерялся, а на рис. 5 показано довольно значительное влияние этого фактора).

Полученные результаты являются основанием для вывода о том, что процессы деформации капель жидкости в условиях интенсивного испарения при движении через высокотемпературные газы существенно нестационарны, и их закономерности обусловлены не только соотношением сил инерции и вязкости, а также сил инерции и поверхностного натяжения. Для описания результатов экспериментальных исследований закономерностей деформации, испаряющихся при движении через нагретые газы капель, недостаточно критериев Рейнольдса и Вебера (особенно при характерных расстояниях полета капель, много больших характерных размеров последних). В этих условиях значимыми становятся, скорее всего, процессы изменения формы капель, приводящие к соответствующим изменениям коэффициента сопротивления во времени в каждом цикле деформации. Также значимыми в рассматриваемых условиях становятся и массовые силы, величина которых связана со значением ускорения движения капель. Можно сделать вывод о том, что для описания рассматриваемых процессов необходимо введение еще нескольких (трех или четырех) критериев, описывающих в соответствии с общей теорией подобия [27] соотношения между силами, действующими на капли, и характерными временами отдельных физических процессов. Получение же таких критериев возможно после приведения к безразмерному виду системы дифференциальных уравнений (с соответствующими краевыми условиями), описывающих не только процессы движения отдельной капли, но и ее деформации циклического характера (переход от сферы к эллипсоиду, например). В настоящее время таких математических моделей движения и деформации капель нет, и актуальной задачей становится их создание.

Результаты выполненных исследований могут получить широкое применение в различных приложениях, предполагающих использование газопарокапельных смесей (например, [28–33]). В частности, они важны для прогностической оценки форм одиночных и капель полидисперсных жидкостных потоков в системах с газопарожидкостными теплоносителями, полидисперсного пароводяного пожаротушения, обработки поверхностей различных конструкций перед нанесением лакокрасочных материалов, конденсации водяного пара в теплоэнергетических установках, высокотемпературной очистки воды от примесей и включений при „выпаривании“.

Выводы

Выполненная безразмерная обработка результатов экспериментов позволяет заключить, что применение только критериев подобия Re и We при анализе движения капель в газовых потоках не позволяет в полной мере описать физические особенности исследованных процессов деформации капель. При анализе таких высокоскоростных процессов недостаточно учитывать только силы инерции, вязкости и поверхностного натяжения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-39-00003).

Список литературы

- [1] Дубровский В.В., Подвысоцкий В.В., Шрайбер А.А. // Инженерно-физический журн. 1990. Т. 58. № 5. С. 804–808.
- [2] Wierzbа A. // Exp. in Fluids. 1990. Vol. 9. N 1. P. 59–64.
- [3] Shreiber A.A., Podvisotski A.M., Dubrovski V.V. // Atomization Sprays. 1996. Vol. 6. N 6. P. 667–692.
- [4] Ивандаев А.И., Кутушев А.Г., Нигматуллин Р.И. // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. 1981. Т. 16. С. 209–287.
- [5] Гонор А.Л., Ривкинд В.Я. // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. 1982. Т. 17. С. 86–159.
- [6] Hsiang L.P., Faeth G.M. // Int. J. Multiph. Flow. 1993. Vol. 19. N 5. P. 721–735.
- [7] Trinh E.H., Holt R.G., Thiessen D.B. // Phys. Fluids. 1996. Vol. 8. N 1. P. 43–61.
- [8] Flock A.K., Gueldenbecher D.R., Chen J. et. al. // Int. J. Multiph. Flow. 2012. Vol. 47. P. 37–49.
- [9] Sprittles J.E., Shikhmurzaev Y.D. // Phys. Fluids. 2012. Vol. 24. P. 122–105.
- [10] El-Sayed R. Negeed, Albeirutty M., Takata Y. // Int. J. Therm. Sci. 2014. Vol. 79. P. 1–17.
- [11] Соу С. Гидродинамика многофазных систем. М.: Мир, 1971. 536 с.
- [12] Лабейши В.Г. Гидромеханика и газодинамика. Л.: Изд-во СЗПИ, 1973. 186 с.
- [13] Терехов В.И., Пахомов М.А. Теплоперенос и гидродинамика в газочапельных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 284 с.
- [14] Volkov R.S., Ysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. // J. Eng. Phys. Thermophys. 2013. Vol. 86. N 6. P. 1413–1418.
- [15] Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // ЖТФ. 2014. Т. 84. вып. 7. С. 15–23.
- [16] Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. // High Temperature. 2014. Vol. 52. N 4. P. 568–575.
- [17] Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. // Thermophys. Aeromechanics. 2014. Vol. 21. N 2. P. 255–258.
- [18] Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 12. С. 11–18.
- [19] Westerweel J. // Meas. Sci. Technol. 1997. Vol. 8. P. 1379–1392.
- [20] Foucaut J.M., Stanislas M. // Meas. Sci. Technol. 2002. Vol. 13. P. 1058–1071.
- [21] Damaschke N., Nobach H., Tropea C. // Exp. in Fluids. 2002. Vol. 32. N 2. P. 143–152.
- [22] Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В. // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12. № 3. С. 109–131.
- [23] Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М. // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18. № 1. С. 1–13.
- [24] Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. М.: Мир, 1972. 381 с.
- [25] Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений / АН СССР. 3-е изд., испр. и доп. Л.: Наука, 1968. 99 с.
- [26] Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: ООО Старс, 2006. 720 с.
- [27] Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.
- [28] Терехов В.И., Шаров К.А., Шишкин Н.Е. // Теплофизика и аэромеханика. 1999. Т. 6. № 3. С. 331–341.
- [29] Яламов Ю.И., Голикова Н.Н. // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 2. С. 30–35.
- [30] Абросимов П.Б., Заплатин П.В., Назорный В.С. и др. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 11. С. 39–43.
- [31] Анохина Е.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 8. С. 32–37.
- [32] Демьянов А.Ю., Динариев О.Ю., Иванов Е.Н. // Инженерно-физический журн. 2012. Т. 85. № 6. С. 1145–1154.
- [33] Вараксин А.Ю. // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51. № 3. С. 421–455.