

03

Влияние твердых включений в каплях жидкости на характеристики их испарения при движении через высокотемпературную газовую среду

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

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

(Поступило в Редакцию 4 апреля 2014 г.)

С использованием оптических методов диагностики двухфазных газо- и парожидкостных потоков проведено экспериментальное исследование влияния типичных твердых включений (неметаллических частиц размерами от нескольких десятков до сотен микрометров) в каплях воды на интегральные характеристики их испарения при движении через высокотемпературные газы. Установлено, что при движении капель воды размерами более 1 мм через поток высокотемпературных газов твердые включения значительно (в несколько раз) интенсифицируют испарение жидкости.

Введение

Потоки распыленных жидкостей (преимущественно воды или эмульсий на ее основе) широко применяются в различных высокотемпературных технологиях современных производств (теплоэнергетика, машиностроение, химическая промышленность и др.) [1–8]. Но выбор технологических режимов и параметров осуществляется, как правило, эмпирически [5] в связи с отсутствием как общей теории испарения жидкостей в условиях интенсивного нагрева, так и моделей испарения жидкостей, содержащих твердые включения, при движении через высокотемпературную среду.

В последние годы предприняты попытки кинетического анализа интенсивного испарения жидкостей [9] с целью изучения закономерностей фазовых превращений в рамках моделей, отличающихся от используемых уже более ста лет представлений Герца [7] и Кнудсена [5] об „испарении в вакуум“. Но результаты [9], полученные с применением метода обратных балансов, позволяют утверждать только о „качественно верных“ изменениях „плотности обратного молекулярного потока“ с ростом интенсивности испарения жидкости.

Развитие модельных представлений, сконцентрированных в хорошо известной и широко используемой формуле Герца–Кнудсена [9–11], уже многие десятилетия сдерживается отсутствием достоверных экспериментальных данных о коэффициенте испарения (конденсации), являющемся обобщенной (в некотором роде) характеристикой состояния межфазной поверхности.

Предпринимающиеся уже неоднократно [5,9] попытки учесть термодинамическую неравновесность пара вблизи межфазной границы (обусловленную молекулярно-кинетическими закономерностями фазового перехода) сводятся к решению уравнения Больцмана, описывающего эволюцию функции распределения молекул пара по скоростям. Но до настоящего времени не разработаны общие методы построения точных решений нелинейного

интегрально-дифференциального уравнения Больцмана. Использование „метода моментов“ [9] приводит к некоторому приближенному решению, возможности прогнозирования которого ограничены.

В связи с вышеизложенным целесообразным является экспериментальное изучение основных закономерностей интенсивного испарения жидкостей в условиях движения капель последних через высокотемпературные газовые среды с целью детализации физических процессов, протекающих при испарении. Наиболее интересными для последующего анализа, скорее всего, являются процессы испарения капель жидкости с твердыми включениями. Такие „неоднородные“ капли являются хорошей „рабочей средой“ не только для большой группы промышленных технологий, но и для оптических методов диагностики парокapельных и газопарокapельных потоков (в частности, „Particle Image Velocimetry“ (PIV) и „Interferometric Particle Imaging“ (IPI) [12–14]).

Цель работы — экспериментальное исследование механизма интенсивного испарения „неоднородных“ капель воды и влияния на характеристики этого процесса концентрации и размеров твердых включений.

Экспериментальная установка и методы исследований

Экспериментальная установка (рис. 1) представляет собой программно-технический комплекс, работающий на базе оптических методов диагностики двухфазных газопарожидкостных потоков PIV и IPI [12–14].

По основным элементам экспериментальная установка (рис. 1) аналогична используемой в [15] и включает: кросскорреляционную видеокамеру 5 с форматом изображения — 2048 × 2048 пикселей, кадровой частотой — не менее 1.5 Hz, минимальной задержкой между двумя последовательными кадрами — не более 5 μs; двойной импульсный твердотельный лазер 4 с активной сферой

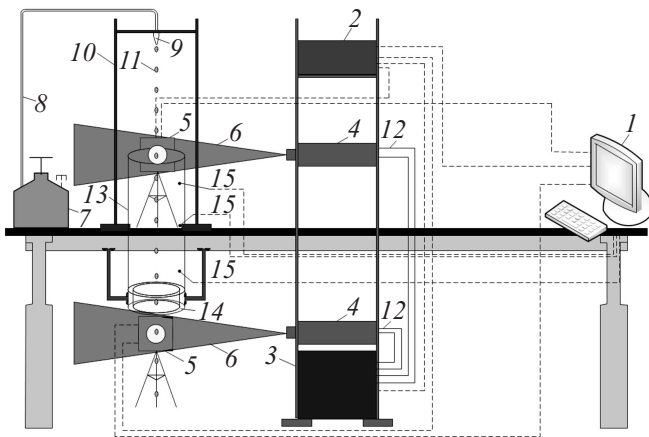


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — ПК, 2 — синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера, 3 — генератор лазерного излучения, 4 — двойной твердотельный импульсный лазер, 5 — кросскорреляционная камера, 6 — световой „нож“, 7 — емкость с рабочей жидкостью, 8 — канал подачи рабочей жидкости, 9 — дозатор, 10 — штатив, 11 — капли рабочей жидкости, 12 — канал движения охлаждающей жидкости лазера, 13 — цилиндр из жаростойкого светопрозрачного материала, 14 — полый цилиндр, в межстеночное пространство которого залита горячая жидкость, 15 — термопары.

„алюмо-иттриевый гранат“ и добавками неодима, имеющий длину волны — 532 nm, энергию в импульсе — не менее 70 mJ, длительность импульса — не более 12 ns, частоту повторений — не более 15 Hz; синхронизирующий процессор 2 с дискретизацией сигналов — не более 10 ns и поддерживающий режимы внешнего и внутреннего запуска.

Разработана следующая методика проведения экспериментов. В основание жаростойкого светопрозрачного цилиндрического канала 13 (высота 1 m, диаметр 0.2 m) устанавливался полый цилиндр 14 (высота 0.1 m, диаметр внутренней и внешней стенок — 0.1 m и 0.18 m соответственно). Во внутреннее (межстеночное) пространство цилиндра 14 заливалась горячая жидкость со стабильными свойствами — керосин. Непосредственно перед началом опытов инициировалось зажигание горючей жидкости. В процессе горения керосина во внутреннем пространстве цилиндрического канала 13 формировались пламя и поток продуктов сгорания. Через интервал времени около 5 min температура продуктов сгорания в цилиндрическом канале 13 достигала значений 1070 ± 30 K. Температура газов контролировалась хромель-алюмелевыми (диапазон измеряемых температур 273–1373 K, допустимое отклонение $\Delta = 3.3$ K) термопарами на разных по высоте уровнях (0.15, 0.5, 0.85 m). Рабочая жидкость (вода) из емкости 7 по каналу 8 подавалась на вход дозатора 9, при помощи которого выставлялись необходимые параметры ее истечения (начальные размеры капель жидкости задавались в диапазоне $R_d = 1-5$ mm). Дозатором 9 осуществля-

лась подача капель жидкости в канал 13, заполненный высокотемпературными газами. При помощи светового „ножа“ [6] лазера 4 выполнялась лазерная подсветка траектории движения капель жидкости. Кросскорреляционной камерой 5 проводилась регистрация видеоизображений капель. Отснятые в ходе проведения опытов видеоизображения передавались на персональный компьютер (ПК) 1, где с использованием специализированного программного обеспечения выполнялась процедура их обработки (вычислялись размеры перемещающихся капель).

Для оценки влияния твердых включений на интегральные характеристики испарения капель воды в состав рабочей жидкости вводились типичные неметаллические (углерод) частицы размерами от 0.05 до 0.5 mm. При этом относительная массовая концентрация (доля) γ твердых включений в воде изменялась в пределах 0–0.01. Для каждого значения γ и соответствующих размеров твердых включений фиксировались изменения размеров (R_d) капель воды при прохождении последними высокотемпературной газовой области.

Для повышения контрастности видеogramм при лазерной подсветке непосредственно перед началом проведения экспериментов в жидкость вводилось (аналогично методике [15]) около 0.5% по массе нанопорошка диоксида титана. Выбор порошка TiO_2 в качестве „трассеров“ обусловлен тем, что его частицы не растворяются в воде и практически не влияют на парообразование [16].

Размеры капель в регистрационных областях видеogramм (до и после высокотемпературной газовой среды) определялись с использованием оптического метода IPI [13,14]. Капли в регистрационной области многократно (более 100 раз в секунду) освещались ножом 6. По числу наблюдаемых на видеogramмах интерференционных полос определялись размеры капель в потоке газов [13,14]. В качестве характерного размера капель аналогично экспериментам [15] выбран условный (эквивалентный) радиус R_d . Это обусловлено тем, что при падении капли жидкости принимают формы эллипсоидов [15]. Для таких капель вычислялись максимальные диаметры (от 6 до 10 в зависимости от конфигурации) и усреднялись. По полученным значениям рассчитывались средние условные (так как форма капель отличается от сферы) радиусы R_d . Систематические погрешности измерения размеров капель, определенные по методикам [14], составили 10^{-6} m. Максимально допустимые значения случайных погрешностей определения R_d принимались равными $30 \mu m$ (опыты, при которых значения случайных погрешностей определения R_d превышали $30 \mu m$, исключались из рассмотрения).

Результаты и обсуждение

На рис. 2 и 3 приведены типичные кадры видеogramм серии экспериментов при фиксированных значениях основных варьируемых факторов (начального

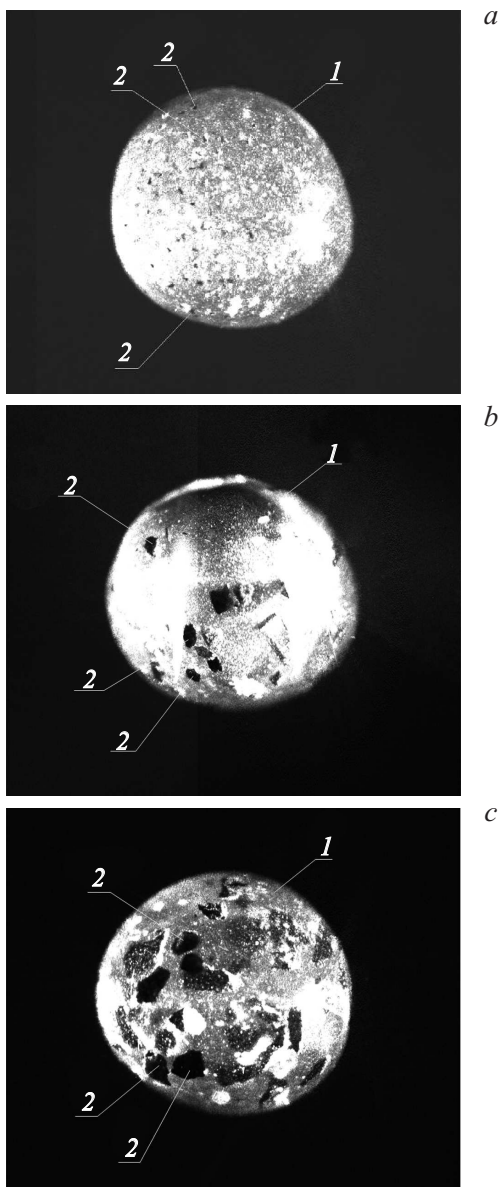


Рис. 2. Видеogramмы одиночных капель жидкости ($R_d = 3 \text{ mm}$) с включениями углеродистых частиц разного размера ($L_m, \mu\text{m}$: a — 50–70, b — 250–300, c — 450–500) на входе в высокотемпературную газовую среду: 1 — капля, 2 — углеродистые частицы.

размера капель, концентрации твердых включений, характерных размеров последних). В качестве функции цели экспериментальных исследований выбрана характеристика изменения эквивалентного радиуса капель — введен в рассмотрение безразмерный параметр ΔR ($\Delta R = (R_d^{\text{inp}} - R_d^{\text{out}}) / R_d^{\text{inp}}$, где R_d^{inp} , R_d^{out} — эквивалентный радиус капель на входе и выходе из канала [3]).

Анализ видеogramм (рис. 2 и 3) позволяет сделать вывод о том, что в процессе движения через высокотемпературную газовую среду форма капель, содержащих твердые включения (частицы углерода), меняется существенно от эксперимента к эксперименту. При этом

на входе в область высоких температур конфигурация капель почти не отличается (рис. 2). Но, несмотря на значительные изменения формы капель, отклонения по параметру ΔR не превышают 1.5%. Можно сделать вывод о том, что форма капель не оказывает практически никакого влияния на интенсивность испарения воды. Полученный результат позволяет при моделировании рассматриваемого процесса не учитывать возможную деформацию капель в полете.

Сравнение видеogramм опытов (рис. 2 и 3) с аналогичными кадрами для капель воды без твердых включений [15] позволяет сделать еще один вывод. Присутствие твердых включений в жидкости приводит к значительным деформациям капель в полете через высокотемпе-

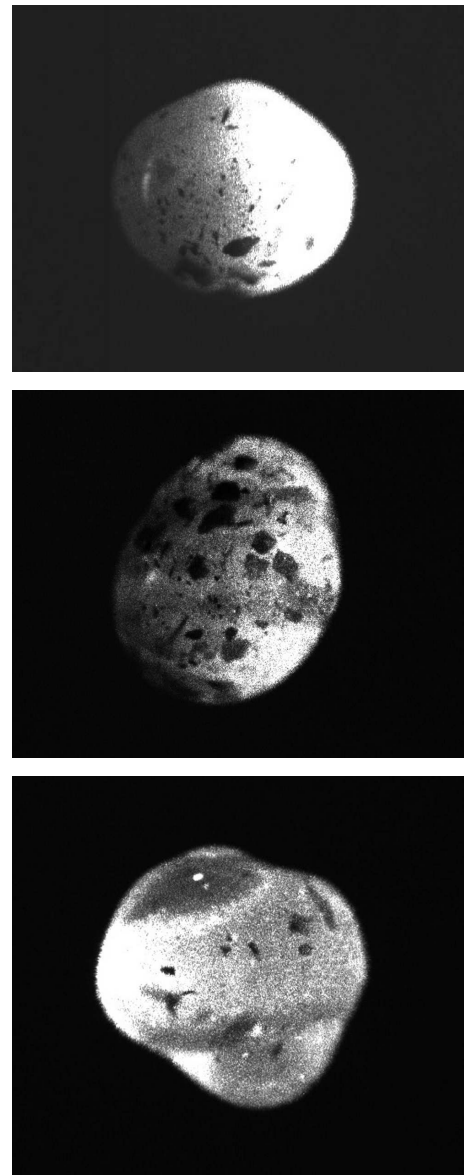


Рис. 3. Видеogramмы капель жидкости ($R_d = 3 \text{ mm}$) с включениями углеродистых частиц ($L_m = 450\text{--}500 \mu\text{m}$) на выходе из высокотемпературной газовой среды.

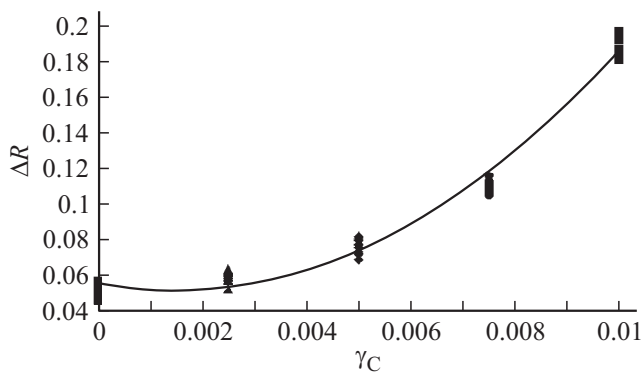


Рис. 4. Зависимость параметра ΔR от относительной массовой концентрации углеродистых частиц γ_c для одиночных капель с $R_d = 3 \text{ mm}$ (средний размер углеродистых частиц $L_m = 50\text{--}70 \text{ }\mu\text{m}$).

ратурные газы (рис. 3). Изменение формы капель при этом происходит случайным образом. По результатам проведенных экспериментов можно выделить от 10 до 15 наиболее типичных конфигураций, установленных в нескольких десятках опытов. Можно предположить, что наличие твердых включений приводит к снижению эффективной вязкости системы „вода–частицы углерода“, а также к уменьшению силы поверхностного натяжения жидкости на участках поверхности капель, включающих частицы углерода.

На рис. 4 приведена экспериментальная зависимость эквивалентного радиуса капель на выходе из области высоких температур от концентрации твердых включений. Хорошо видно, что изменение относительной массовой доли примесей от 0 до 0.01 приводит к росту скорости испарения воды в системе „жидкость–твердые включения“ более чем в 2 раза.

Такие масштабные изменения размеров капель не могут быть следствием только роста теплопроводности смеси воды с частицами углерода при малых концентрациях последних. В процессе движения через высокотемпературные газы капли прогреваются за счет теплопроводности, конвекции и излучения. При относительных скоростях движения капель 2–3 м/с тепловой поток за счет конвекции составляет не более 3500 W/m^2 . Молекулы окружающей каплю суспензии газа, нагретого до температур более 1000 К, излучают, и удельный лучистый поток при таких температурах достигает $30\,000 \text{ W/m}^2$. Скорость движения капель мала и вследствие этого удельный лучистый поток к поверхности капли почти в 9 раз превышает соответствующий конвективный. Тепловой поток за счет теплопроводности много меньше конвективного, потому что в „пристенном“ слое капли температура паров много меньше температуры внешней среды (вследствие эндотермического фазового перехода), а коэффициент теплопроводности водяного пара даже при высоких температурах не превышает $0.1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. В таких условиях наиболее вероятным механизмом интенсификации процесса испарения в рас-

сматриваемой системе является увеличение радиационного теплового потока к поверхности „гетерогенной“ („неоднородной“ по своему составу) капли, а также доли поглощаемой энергии. Тепловой поток к находящимся в тонком приповерхностном слое нагреваемой капли частицам углерода существенно (в 5–6 раз) превышает аналогичный поток для воды (вследствие большего коэффициента поглощения). В результате, несмотря на малую концентрацию примесей, их температура может достичь существенно более высоких значений по сравнению с однородной каплей воды. Соответственно в окрестности каждого включения происходит испарение воды со скоростью, кратно превышающей скорости испарения однородной жидкости. Если углеродистые включения смещены от поверхности нагрева в глубь капли на малые по сравнению со своими характерными размерами расстояния, то „перегрев“ (относительно жидкости) до существенно более высоких температур будет приводить к образованию парового слоя вблизи поверхности твердых частиц и последующему диспергированию поверхности „гетерогенной“ капли. Последнее и может приводить к зарегистрированным в экспериментах уменьшениям размеров „гетерогенных“ капель по сравнению с однородными в идентичных условиях проведения опытов.

Для проверки выше сформулированной гипотезы о механизме интенсификации испарения проведено численное моделирование процесса прогрева сферических частиц углерода и капель воды. Решена задача теплопереноса в условиях теплообмена с внешней средой, идентичной условиям проведенных экспериментов. Учитывались конвективная и радиационная компоненты теплового потока на границе „жидкость–газ“. Задача в такой постановке сводится к решению уравнения энергии для сферы с нелинейными граничными условиями, аналогичными представленным в [17]. Считалось, что теплоперенос в частице углерода осуществляется за счет теплопроводности, а в каплях жидкости — теплопроводности и излучения:

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial H(r)}{\partial r}, \quad (1)$$

$$H(r) = H_{rd} \exp[-\chi(R_d - r)], \quad (2)$$

$$H_{rd} = \varepsilon \sigma [T_f^4 - T_{rd}^4], \quad (3)$$

где C — теплоемкость, $\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$; ρ — плотность, kg/m^3 ; T — температура, К; t — время, с; λ — теплопроводность, $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$; r — сферическая координата, м; $H(r)$ — плотность теплового потока излучения в капле, W/m^2 ; H_{rd} — плотность теплового потока излучения на поверхности капли (частицы), W/m^2 ; χ — коэффициент поглощения; ε — приведенная степень черноты; σ — постоянная Стефана–Больцмана, $\text{W/(m}^2\cdot\text{K}^4)$; T_f — температура внешней газовой среды, К; T_{rd} — температура поверхности капли (частицы), К. Теплофизические характеристики воды и углерода выбирались с учетом

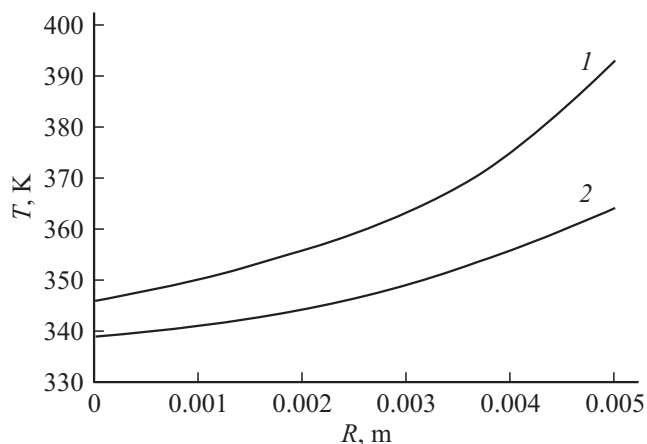


Рис. 5. Распределения температур по радиусу (0,005 м) сферической частицы углерода (1) и капли воды (2) при $t = 1$ с.

зависимости от температуры согласно [18,19], коэффициенты поглощения и степень черноты — [20,21].

На рис. 5 приведены распределения температур по радиусам сфер, включающих только воду и только углерод. Температура поверхности углеродистой частицы почти на 30 К выше, несмотря на более высокую теплопроводность углерода. Полученный результат обусловлен меньшей поглощающей способностью воды. За счет лучистого теплопереноса происходит (рис. 5) прогрев глубинных слоев капли. Приповерхностные слои при этом прогреваются существенно меньше. Полученные теоретические следствия, таким образом, подтверждают сформулированную выше гипотезу о механизме интенсификации испарения капель воды с твердыми включениями.

Заключение

1. Изменение относительной массовой доли твердых включений (углеродистых частиц размерами 50–500 мкм) от 0 до 0,01 в каплях воды (размерами 1–5 мм) приводит к росту скорости испарения последних в области высокотемпературных газов в несколько раз.

2. Увеличение размеров включений приводит к усилению их влияния на интегральные характеристики прогрева капель и скорости фазовых превращений. При этом выявлено, что определяющую роль в системе „жидкость–твердые включения–высокотемпературные газы“ играет радиационный механизм теплообмена.

3. Установленные по результатам экспериментов закономерности не только иллюстрируют влияние твердых включений на скорость испарения капель воды при движении через высокотемпературную газовую среду. Экспериментальные результаты являются основой для дальнейшего развития моделей испарения жидкостей в условиях интенсивного нагрева.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 14-08-00057).

Список литературы

- [1] Lebedev V.P., Lemanov V.V., Misyura S.Ya. et al. // Int. J. Heat and Mass Transf. 1995. Vol. 38. № 11. P. 2117–2125.
- [2] Жидов И.Г., Мешков Е.Е., Невмержицкий Н.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. № 3. С. 9–14.
- [3] Беляков М.Ю., Воронов В.П., Городецкий Е.Е. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88. № 5. С. 351–355.
- [4] Александров Д.В. // ЖЭТФ. 2009. Т. 136. № 3. С. 526–530.
- [5] Вараксин А.Ю. // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51. № 3. С. 421–455.
- [6] Яламов Ю.И., Голикова Н.Н. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 2. С. 30–35.
- [7] Абросимов П.Б., Заплатин П.В., Назорный В.С. и др. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 11. С. 39–43.
- [8] Анохина Е.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 8. С. 32–37.
- [9] Авдеев А.А., Зудин Ю.Б. // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50. № 4. С. 565–574.
- [10] Hertz H. // Ann. Phys. Chem. 1882. Vol. 253. P. 177.
- [11] Knudsen M. // Ann. Phys. 1915. Vol. 352. P. 697.
- [12] Keane R.D., Adrian R.J. // Appl. Sci. Res. 1992. Vol. 49. P. 191–215.
- [13] Westerweel J. // Meas. Sci. Technol. 1997. Vol. 8. P. 1379–1392.
- [14] Foucault J.M., Stanislas M. // Meas. Sci. Technol. 2002. Vol. 13. P. 1058–1071.
- [15] Volkov R.S., Vysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V. et al. // J. Eng. Phys. Thermophys. 2013. Vol. 86. N 6. P. 1413–1418.
- [16] Ильин А.П., Назаренко О.Б., Коршунов А.В. и др. // Особенности физико-химических свойств нанопорошков и наноматериалов. Томск: Изд-во ТПУ, 2012. 196 с.
- [17] Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2010. Vol. 4. N 2. P. 249–255.
- [18] Варгафтик Н.Б. // Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Старс, 2006. 720 с.
- [19] Бабичев А.П. Физические величины: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- [20] Чандрасекар С. Перенос лучистой энергии. М.: ИЛ, 1953. 432 с.
- [21] Шейндлин А.Е. Излучательные свойства твердых материалов: справочник. М.: Энергия, 1974. 472 с.