

УДК 536.423

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАССИВНОГО ЗАВИХРИТЕЛЯ НА ИСТЕЧЕНИЕ ПЕРЕГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

К. А. Бусов, А. В. Решетников, Н. А. Мажейко, О. А. Капитунов

Институт теплофизики УрО РАН, 620016 Екатеринбург, Россия
E-mails: kbusov@mail.ru, reshav@itp.uran.ru, nikma2006@yandex.ru,
kapitunov.olezhka@mail.ru

Экспериментально исследовано вскипание в струе перегретой воды при ее истечении через короткий цилиндрический канал при наличии пассивного завихрителя (скрученной ленты). Изучена эволюция распада струи вскипающей жидкости с увеличением степени перегрева. Выявлены характерные структуры и формы потока. Установлена зависимость между формой струи и режимами вскипания. Отмечены значительные флуктуации и неустойчивость потока при определенных температурах. Экспериментально показана возможность воздействия на форму потока.

Ключевые слова: перегретая жидкость, пассивный завихритель, взрывное вскипание, полный распад струи, эффект Коанда.

DOI: 10.15372/PMTF20190108

Введение. Интерес к исследованию процесса распада свободных струй жидкости обусловлен созданием и модернизацией различных аппаратов для распыления жидкостей. Накопленные теоретические и экспериментальные данные о распылении различных веществ позволили создать многочисленные устройства, которые широко применяются в машиностроении, энергетике и т. д. Во многих агрегатах и механизмах (струйный принтер, пожарная машина нового поколения) используются жидкости в перегретом состоянии [1], являющиеся альтернативой холодным жидкостям, например для мелкодисперсного распыления веществ и топлив [2, 3]. Однако при использовании как холодных, так и горячих веществ необходимо исследовать механизм распада и устойчивости течения струй.

В работах [4–7] представлены результаты исследований формообразования струи перегретой жидкости, а также объяснены причины возникновения струй того или иного вида. Угол раскрытия струи позволяет получить информацию о различных факторах, оказывающих влияние на процесс истечения (геометрия сопла, степень перегрева) [8]. В экспериментальных работах [9–11] установлена корреляция реактивной отдачи вскипающей струи с углом ее раскрытия.

Особый интерес представляет аномальная форма струи — полый конус с максимальным углом раскрытия, или полный распад струи, проявляющийся в скачкообразном увеличении угла раскрытия струи от 110 до 180° (кризис формы) при соответствующих степенях перегрева и наличии твердой поверхности, прилегающей к выходному срезу канала. Данная форма струи наблюдается при истечении различных перегретых жидкостей (вода, гексан, н-пентан, этанол, фреон-11 [12]) через короткий цилиндрический канал. При

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 18-38-00404мол_а) и в рамках Комплексной программы УрО РАН (код проекта 18-2-2-3).

© Бусов К. А., Решетников А. В., Мажейко Н. А., Капитунов О. А., 2019

полном распаде струи резко уменьшается ее реактивная отдача (кризис реактивной тяги). Таким образом, проблема поиска средств управления параметрами струи, в частности ее формой, остается актуальной.

1. Распад струй вскипающих жидкостей. Рассмотрим механизмы парообразования и распада свободной струи жидкости в перегретом состоянии.

1.1. *Механизмы парообразования.* Экспериментальные исследования кинетики зародышеобразования в перегретой воде [1, 13] показывают, что при увеличении степени перегрева жидкости происходит смена режимов образования и взаимодействия пузырьков пара. Так, при малых степенях перегрева $T_{0s} < 0,7T_c$ (T_{0s} — начальная температура жидкости на линии насыщения; T_c — температура жидкости в критической термодинамической точке) происходит зарождение отдельных немногочисленных и невзаимодействующих пузырьков со скоростью, приблизительно равной $J = 10^2 \div 10^4 \text{ см}^{-3}/\text{с}$. При $T_{0s}/T_c \approx 0,7$ скорость возникновения пузырьков резко увеличивается до значения $J \approx 10^8 \text{ см}^{-3}/\text{с}$, т. е. на четыре порядка. Вскипание в основном происходит на различных неоднородностях жидкости (микроуглубления, трещины на поверхности, растворенный газ и т. д.) и сопровождается цепной инициацией центров кипения. Такое лавинообразное увеличение количества пузырьков известно как интенсивное гетерогенное зародышеобразование. Данный режим вскипания возникает и развивается при температуре $T_{0s} = 0,7T_c \div 0,9T_c$. При $T_{0s} > 0,9T_c$ наступает режим гомогенного зародышеобразования, особенностью которого является увеличение количества возникающих пузырьков пара, обусловленное различными флуктуациями в жидкости. Скорость возникновения пузырьков может достигать значения $J \approx 10^{24} \text{ см}^{-3}/\text{с}$ [1]. Зарождение большого количества пузырьков в единицу времени как в случае интенсивного гетерогенного, так и в случае гомогенно-флуктуационного режима происходит взрывообразно. Поэтому процесс вскипания для обоих режимов часто называется взрывным вскипанием [1].

1.2. *Распад свободной струи перегретой воды.* Распад струи перегретой воды происходит при ее истечении из камеры высокого давления в атмосферу через короткий цилиндрический канал диаметром $d = 0,5 \text{ мм}$ с острыми входными кромками. Рабочая камера представляет собой цилиндрический стакан объемом 630 мл, изготовленный из нержавеющей стали. В зависимости от начального давления стационарный режим истечения перегретой жидкости наблюдается в течение $10 \div 60 \text{ с}$. Использование короткого канала позволяет реализовать термодинамически неравновесное течение перегретой жидкости. Вследствие резкого падения давления по длине насадка (приблизительно 10^6 МПа/с) и задержки вскипания жидкость проникает в область метастабильных (перегретых) состояний. Глубина проникания жидкости, а следовательно, и время задержки вскипания определяются степенью перегрева. На фазовой диаграмме воды в координатах $p-T$ (рис. 1) с помощью изоэнтропы OQ показаны изменение термодинамических параметров жидкости на входном участке рабочего канала и переход жидкости из области устойчивых состояний в область метастабильных фазовых состояний.

Результаты проведенного экспериментального и теоретического исследования вскипания жидкостей позволили получить условие, при котором реализуется взрывной режим вскипания перегретой жидкости, истекающей через короткий канал [13]:

$$\frac{[1 - \Omega V(t)]p_*}{[1 - \Omega V(t)]p_{\text{пр}} + \rho\omega^2\Omega V(t)} > 1.$$

Здесь Ω — эффективное число гетерогенных центров в единице объема жидкости; $V(t)$ — объем пузырька, увеличивающегося в пределах канала; t — время нахождения жидкости в канале; ω — скорость движения жидкости на входе в канал; ρ — плотность жидкости; $p_{\text{пр}}$ — давление среды, в которую происходит истечение; p_* — давление, при котором наблюдается интенсивное флуктуационное зародышеобразование.

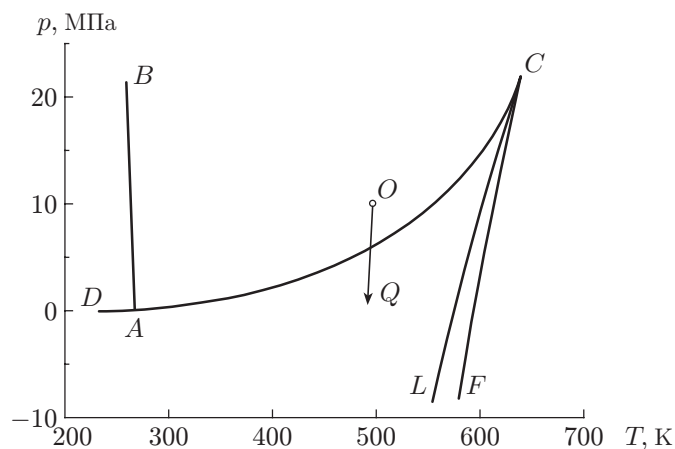


Рис. 1. Фазовая диаграмма воды:

AB — линия плавления, DC — бинодаль, CL — линия достижимого перегрева, CF — спинопаль

На рис. 2 показана эволюция формы свободной струи перегретой воды, истекающей из камеры высокого давления через короткий цилиндрический канал.

При малой степени перегрева в диапазоне температур $T_{0s} = 370 \div 420$ К струя имеет тот же вид, что и струя холодной, не вскипающей жидкости (см. рис. 2, *a*). При этом парообразование происходит в отдельных немногочисленных, невзаимодействующих центрах кипения, и на фотографиях струй отсутствуют даже отдельные пузыри. С увеличением температуры до $T_{0s} = 450$ К становится существенным влияние парообразования на форму струи. Механизм разрушения струи при малой степени перегрева преимущественно определяется барокапиллярной неустойчивостью поверхности струи [14], обусловленной интенсивным испарением с поверхности. В струе по-прежнему наблюдается жидкое ядро, окруженное облаком пара (см. рис. 2, *б*). При температуре $T_{0s} > 450$ К количество центров кипения в воде значительно увеличивается, и распад потока происходит вследствие возрастающей интенсивности вскипания (интенсивного гетерогенного зародышеобразования). Форма струи принимает вид полого конуса, и с увеличением температуры угол при вершине конуса монотонно увеличивается (см. рис. 2, *в*). Максимальное значение угла раскрытия потока составляет приблизительно 110° . При смещении сечения, в котором происходит вскипание (гомогенное зародышеобразование), внутрь цилиндрического канала струя принимает параболическую форму (см. рис. 2, *г*).

2. Влияние геометрических факторов на форму вскипающей струи. При наличии внешней прилегающей к выходному сечению канала плоскости, например диффузорного прижимного фланца (рис. 3, *a*), имеется ряд особенностей в поведении струи при взрывном вскипании: кризис формы струи (полный распад (рис. 3, *б, в*)) и ее реактивной отдачи [8–11], крупномасштабные низкочастотные пульсации ($1/f$ -шум), которые свидетельствуют о нарастании неустойчивостей и возможности крупномасштабных выбросов [15]. Наличие твердой поверхности за коротким каналом способствует возникновению эффекта Коанда [16], вследствие чего струя растекается в радиальном направлении.

3. Распад струи при наличии завихрителя. Для воздействия на аномальное поведение потока использовался пассивный завихритель — скрученная лента диаметром $d = 5,5$ мм с шагами закрутки $s/d = 1,8; 2,8; 3,8; \infty$. Завихритель устанавливался внутри рабочей камеры на расстоянии приблизительно 3 мм от канала.

При истечении холодной жидкости при заданных начальных значениях давления в рабочей камере $p = 10^6, 2 \cdot 10^6, 4 \cdot 10^6$ Па в случае использования завихрителя жидкое ядро

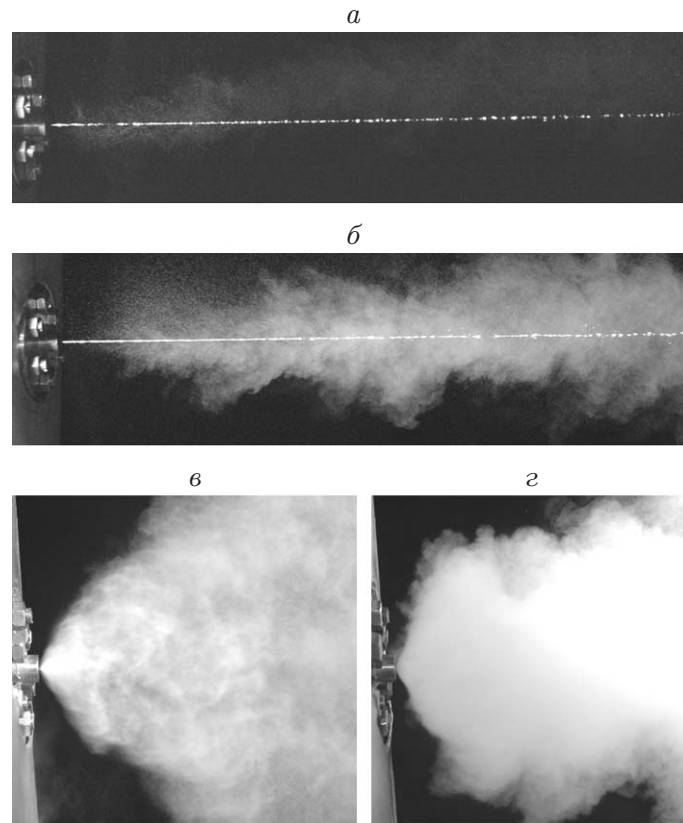


Рис. 2. Струи вскипающей воды при различных режимах вскипания:
a — $T_{0s} = 390$ К, *б* — $T_{0s} = 420$ К, *в* — $T_{0s} = 470$ К, *г* — $T_{0s} = 570$ К

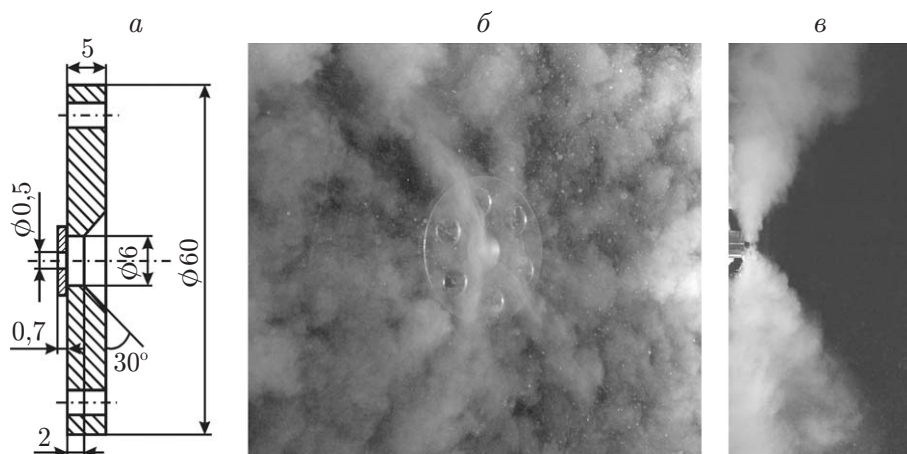


Рис. 3. Геометрия диффузорного прижимного фланца, соединяющего короткий канал с рабочей камерой (*a*), и полный распад струи вскипающей жидкости (*б, в*):
б — вид спереди, *в* — вид сбоку

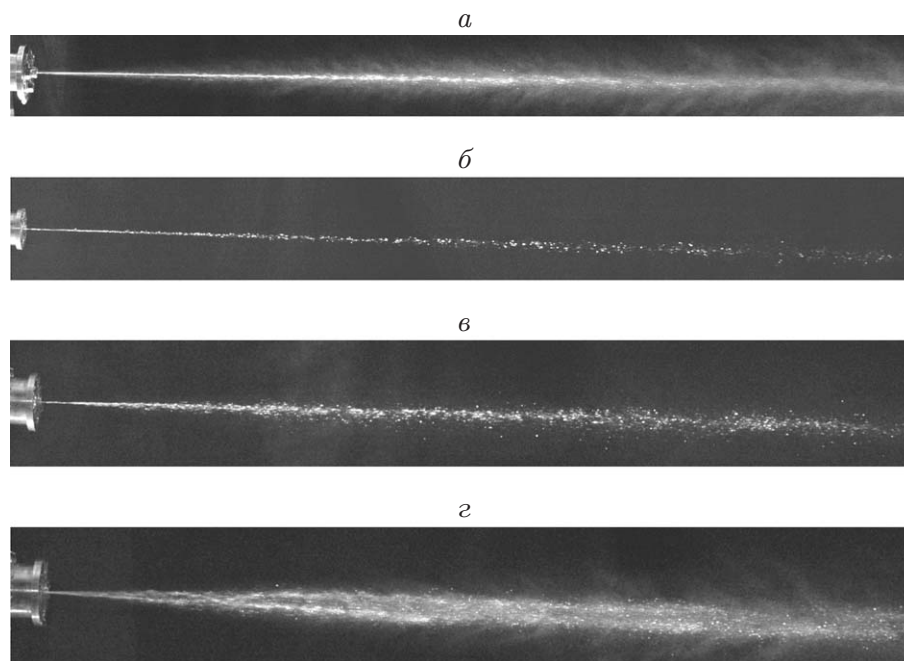


Рис. 4. Струи холодной воды, истекающей через цилиндрический канал в отсутствие (*а*) и при наличии (*б–г*) завихрителя (скрученной ленты с шагом закрутки $s/d = 1,8$) при различных значениях давления:
а, г — $p = 4 \cdot 10^6$ Па, *б* — $p = 10^6$ Па, *в* — $p = 2 \cdot 10^6$ Па

струи является более раздробленным, чем в случае отсутствия завихрителя (рис. 4, *а*). С увеличением давления в рабочей камере струя начинает разрушаться ближе к выходному сечению канала, т. е. уменьшается длина сплошной части струи (рис. 4, *б–г*).

В экспериментах со струями перегретой воды диффузорный прижимной фланец за выходным срезом короткого канала выбран таким образом, чтобы обеспечивать полный распад (кризис формы) струи в отсутствие завихрителя.

В случае использования завихрителя наблюдается истечение перегретой струи, вид и структура которой принципиально отличаются. В частности, при малых перегревах не наблюдается сплошного жидкого ядра, как в случае отсутствия завихрителя. Поток полностью раздроблен на капли различного размера (рис. 5, *а*). Данный вид струи наблюдается при температуре $T_s \leq 440$ К. При повышении температуры ($T_s > 440$ К) начинает увеличиваться угол раскрытия струи вследствие увеличения интенсивности вскипания. В этом случае струя полностью состоит из равномерно распределенных мелких капель (гомогенная парожидкостная среда) (рис. 5, *б*). Следует отметить, что при $T_s = 440$ К углы раскрытия струи совпадают как в случае наличия скрученной ленты, так и в случае ее отсутствия. Монотонное увеличение угла раскрытия происходит при температуре $T_s \leq 480$ К. При данной температуре происходит взрывное объемное вскипание, которое при наличии эффекта Коанда приводит к полному раскрытию струи. Однако в отличие от случая истечения горячей воды в отсутствие завихрителя полный распад струи не является равномерным во всех направлениях. В случае использования скрученной ленты струя растекается в виде полосы шириной приблизительно 250 мм (рис. 5, *в*). Струя такого вида наблюдается при температуре $T_s = 480 \div 510$ К. При $T_s = 510 \div 540$ К имеет место потеря устойчивости вскипающей струи (большие флуктуации угла раскрытия струи). В течение небольшого интервала времени чередуются процессы схлопывания и полного

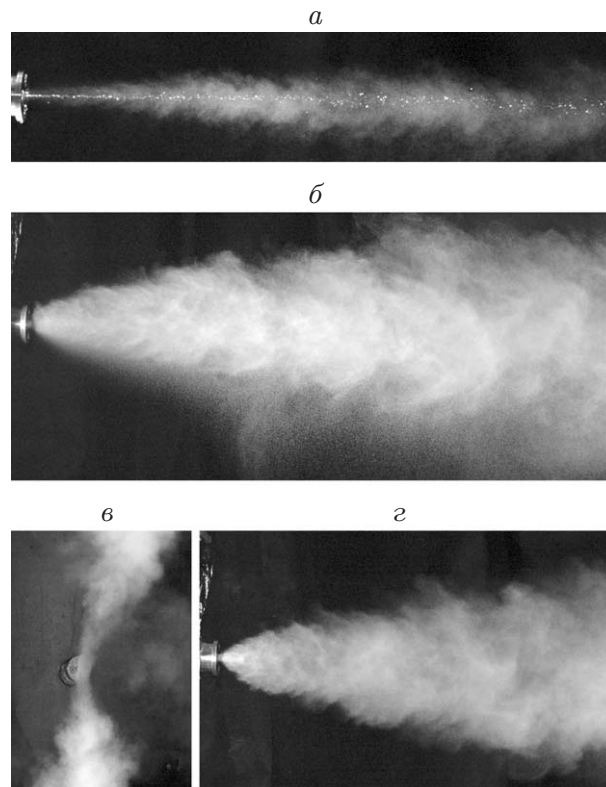


Рис. 5. Струи вскипающей воды в случае истечения при наличии завихрителя (скрученной ленты с шагом закрутки $s/d = 1,8$) при различных режимах вскипания: a — $T_{0s} = 400$ К, $б$ — $T_{0s} = 440$ К, $в$ — $T_{0s} = 480$ К, $г$ — $T_{0s} = 540$ К

раскрытия струи. При $T_s \geq 540$ К струя перегретой воды принимает устойчивую коническую форму (рис. 5,г). Результаты экспериментов показывают, что при использовании завихрителей с различными шагами закрутки наблюдаются незначительные различия в эволюции формы вскипающей струи с увеличением степени перегрева и изменением механизмов парообразования.

Заключение. Результаты проведенных экспериментальных исследований вскипания струи перегретой воды, истекающей через короткий цилиндрический канал с завихрителем (скрученной ленты), свидетельствуют о возможности эффективного воздействия на форму потока. Установлено, что струя перегретой воды, истекающая через короткий канал с завихрителем, значительно отличается от струи жидкости, истекающей в отсутствие завихрителя.

Струя холодной жидкости при различных значениях давления в случае наличия завихрителя более раздроблена, чем в случае его отсутствия. С увеличением давления распад струи происходит на меньших расстояниях от выходного среза короткого канала.

При истечении горячей воды при наличии завихрителя с увеличением температуры наблюдаются изменения в поведении потока: при малых степенях перегрева отсутствует сплошное жидкое ядро; при умеренных перегревах наблюдается истечение гомогенной двухфазной струи, состоящей из мелких капель; при больших степенях перегрева имеет место полное раскрытие струи, но не в виде диска, а в виде полосы с последующей потерей устойчивости. Значительные флуктуации формы струи свидетельствуют о накоплении энергии в области низких частот и о возможности возникновения $1/f$ -флуктуаций [15]. При значениях температуры, близких к значениям, соответствующим предельному перегреву, струя вновь принимала устойчивую коническую форму.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Скрипов В. П.** Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972.
2. **Eggers J., Villermaux E.** Physics of liquid jets // Rep. Progr. Phys. 2008. V. 71. P. 1–79.
3. **Negro S., Bianchi G. M.** Superheated fuel injection modeling: An engineering approach // Intern. J. Thermal Sci. 2011. V. 50. P. 1460–1471.
4. **Polanco G., Hold A., Munday G.** General review of flashing jet studies // J. Hazardous Materials. 2010. V. 173. P. 2–18.
5. **Авдеев А. А.** Форма струй при истечении перегретой жидкости (структура волновых формаций и реактивное усилие) // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54, № 5. С. 742–752.
6. **Болотнова Р. Х., Коробчинская В. А.** Пространственное моделирование процесса формирования струи вскипающей воды при истечении из тонкого сопла // Теплофизика и аэромеханика. 2017. № 5. С. 783–794.
7. **Zalkind V. I., Zeigarnik Yu. A., Nizovskiy V. L., et al.** Superheated water atomization: A possibility of obtaining sprays of droplets of micron diameters // High Temperature. 2018. V. 56, N 1. P. 153–155.
8. **Pavlenko A. N., Koverda V. P., Reshetnikov A. V., et al.** Disintegration of flows of superheated liquid films and jets // J. Engng Thermophys. 2013. V. 22, N 3. P. 174–193.
9. **Reshetnikov A. V., Mazheiko N. A., Skokov V. N., Koverda V. P.** Hydrodynamic response to explosive boiling-up in a jet of superheated water // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2015. V. 85. P. 965–970.
10. **Reshetnikov A. V., Mazheiko N. A., Busov K. A.** Recoil force and spray angle of a plane jet of superheated water // Interfacial Phenomena Heat Transfer. 2017. V. 5, N 3. P. 201–206.
11. **Решетников А. В., Мажейко Н. А., Скрипов В. П.** Струи вскипающих жидкостей // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 3. С. 125–132.
12. **Pavlenko A. N., Surtaev A. S., Zhukov V. E., et al.** Peculiarities of superheated liquid discharging under strong and weak nonequilibrium conditions // J. Engng Thermophys. 2010. V. 19, N 4. P. 289–305.
13. **Скрипов В. П.** Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии / В. П. Скрипов, Е. Н. Синицын, П. А. Павлов, Г. В. Ермаков, Г. Н. Муратов, Н. В. Буланов, В. Г. Байдаков. М.: Атомиздат, 1980.
14. **Павлов П. А.** Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей. Свердловск: Изд-во УрО АН СССР, 1988.
15. **Коверда В. П., Скоков В. Н., Скрипов В. П.** $1/f$ -шум в критическом неравновесном фазовом переходе // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т. 63, № 9. С. 739–742.
16. **Reba I.** Applications of the Coanda effect // Sci. Amer. 1966. V. 214, N 6. P. 84–92.

*Поступила в редакцию 5/VI 2018 г.,
после доработки — 18/VII 2018 г.
Принята к публикации 29/X 2018 г.*