

УДК 532.5.032

ОБ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ РЕЖИМАХ ПРОНИКАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СВОБОДНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ ЧЕРЕЗ ПОВЕРХНОСТЬ ЖИДКОСТИ

© 2017 г. В.П. Карликов^а, А.Т. Нечаев^б, С.Л. Толоконников^с

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

^аe-mail: karlikovvp@mail.ru; ^бe-mail: artm26@mail.ru; ^сe-mail: tolsl@mail.ru

Поступила в редакцию 25.05.2017 г.

Представлены результаты экспериментального изучения процесса проникания вертикальных плоских и круглых свободных турбулентных струй через поверхность жидкости, находящейся в относительно узких каналах. Установлено существование диапазонов значений толщин струй, их скоростей и длин свободных участков, в которых наблюдаются регулярные автоколебательные режимы перемещения затопленных участков струй и двухфазных областей течения. Обсуждаются механизм возникновения таких режимов и особенности наблюдаемых течений. Найдены зависимости периодов автоколебаний от основных определяющих параметров задачи.

Ключевые слова: свободные струи, проникание, автоколебания.

DOI: 10.7868/S0568528117060032

Исследование процесса проникания свободных турбулентных струй через поверхность жидкости является одной из актуальных проблем гидродинамики струйных течений. Такие струи, проникая в жидкость, увлекают за собой значительное количество воздуха и создают подводные двухфазные области с большой межфазной поверхностью, что может быть использовано во многих технологических процессах – оксигенация водоемов, флотационная очистка сточных вод, перемешивание химикатов и др. Имеется очень большое число публикаций, посвященных этим вопросам (см., например, библиографию в [1–5]).

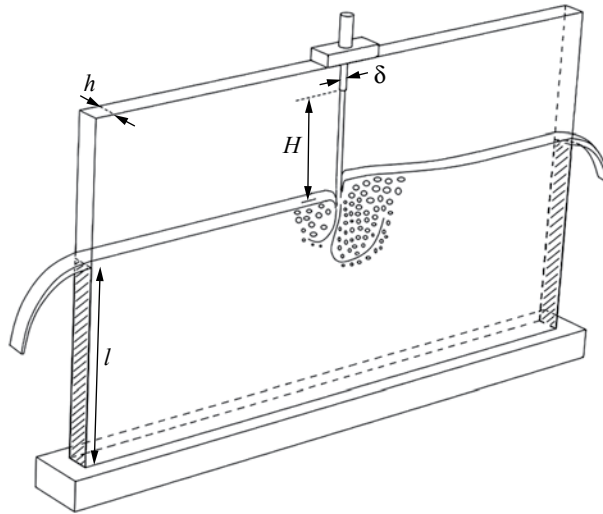
Авторы настоящей работы установили, что при внедрении свободных вертикальных струй в жидкость, находящуюся в относительно узких каналах, существуют широкие диапазоны значений определяющих параметров, в которых наблюдаются устойчивые регулярные автоколебательные режимы поведения затопленных участков струй и перемещения газонасыщенных объемов жидкости. Такие режимы течений могут представлять интерес для указанных выше приложений.

Первый раздел работы содержит результаты экспериментального исследования процесса проникания через поверхность жидкости плоских вертикальных турбулентных струй. Анализ механизма автоколебательных режимов исследованных течений позволил сделать вывод о возможности существования аналогичных режимов и в случае проникания свободных вертикальных осесимметричных (круглых) струй через поверхность жидкости, находящейся в плоских узких каналах. Эксперименты подтвердили это. Результаты этих исследований представлены во втором разделе работы.

1. ПРОНИКАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПЛОСКИХ СТРУЙ

Схема эксперимента

Эксперименты проводились на установке, схематично изображенной на фиг. 1. Она представляла собой закрепленные на горизонтальном основании две вертикальные параллельные пластины из оргстекла размером $1 \times 55 \times 105$ см с расстоянием между ними $h = 1$ см. С левой и правой сторон в установке размещались водосливные стойки высотой l , через которые перетекала вода, поступавшая в установку. В верхней центральной части установки в зазор между стенками могут устанавливаться детали с набором вертикальных плоских щелей толщиной δ , либо вертикальных цилиндрических каналов с диаметрами d , через которые в установку поступали плоские или



Фиг. 1. Схема установки

круглые струи воды. Изменением высоты водосливов l регулировалась глубина жидкости, находящейся в установке и тем самым длина свободных участков струи H .

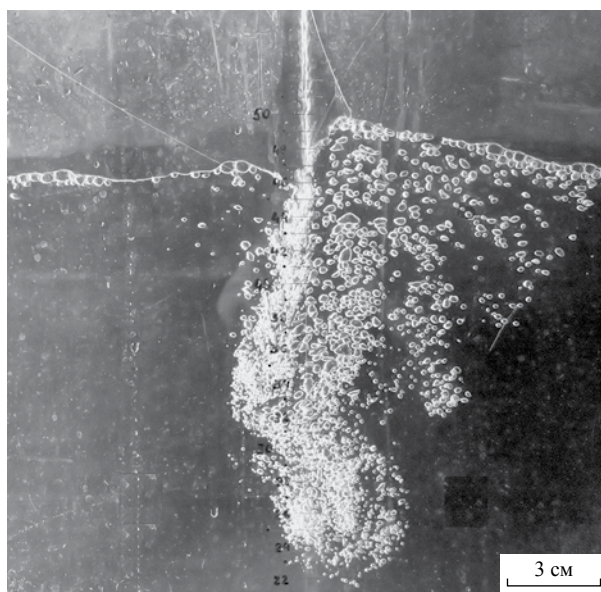
Конструктивные особенности и размеры установки естественно ограничивали диапазоны изменения значений определяющих параметров при проведении экспериментов, таких, например, как скорость струй, их толщина, расстояние от сопла до свободной поверхности.

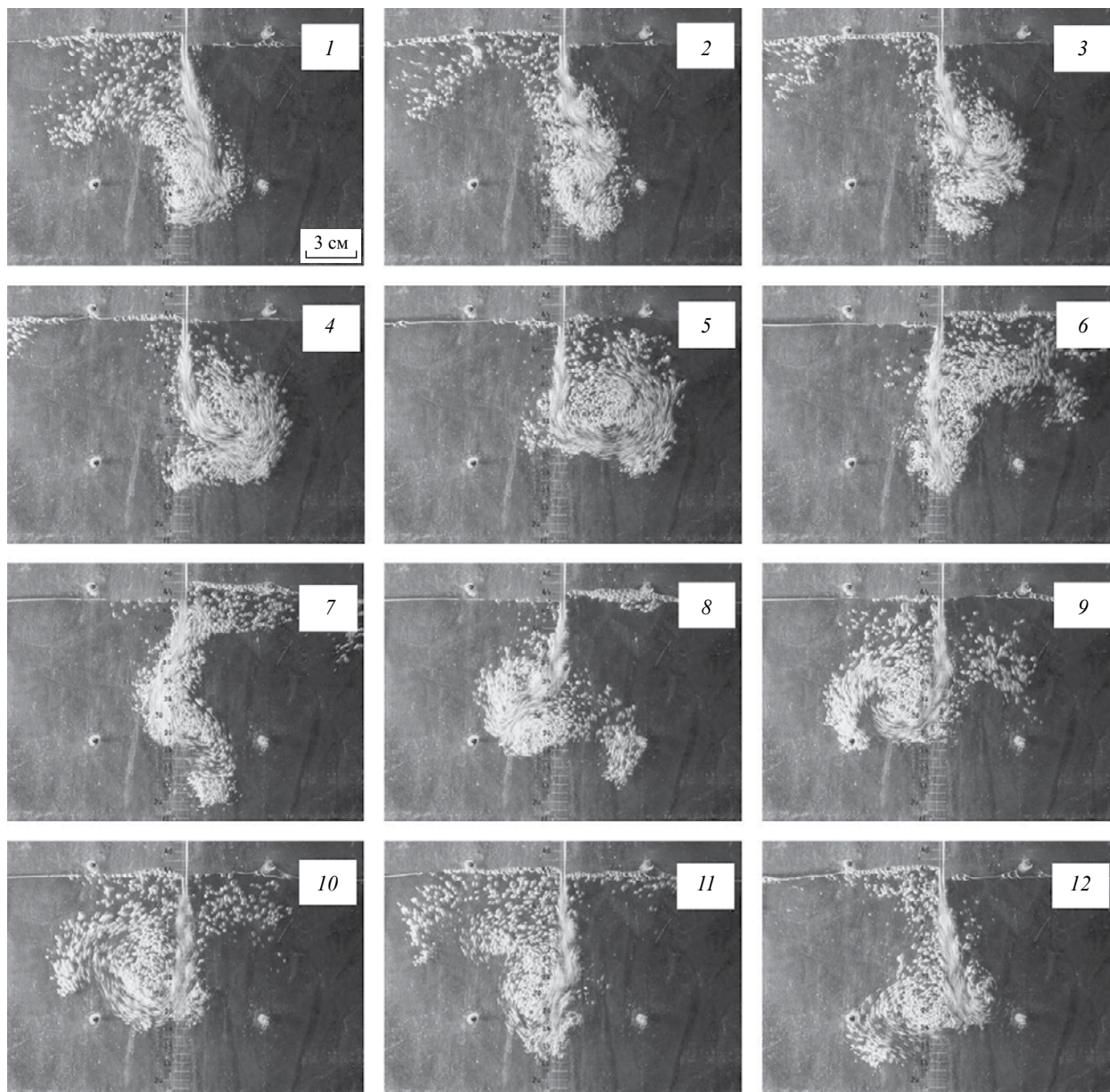
Велась видео- и фотосъемка картин течения в окрестности подводного и надводного участков струй. Расход жидкости в струях измерялся стандартным расходомером и контролировался весовым методом. Период колебаний находился делением промежутка времени наблюдения 20 колебаний на их число.

Физические особенности течений.

Механизм возникновения автоколебаний

Турбулентные свободные струи увлекают окружающий их воздух и внедряют его в жидкость. Значительная часть воздуха, как показывают опыты, захватывается и в области начального контакта струи с жидкостью. Пузыри воздуха по мере всплытия увеличивают свой объем.

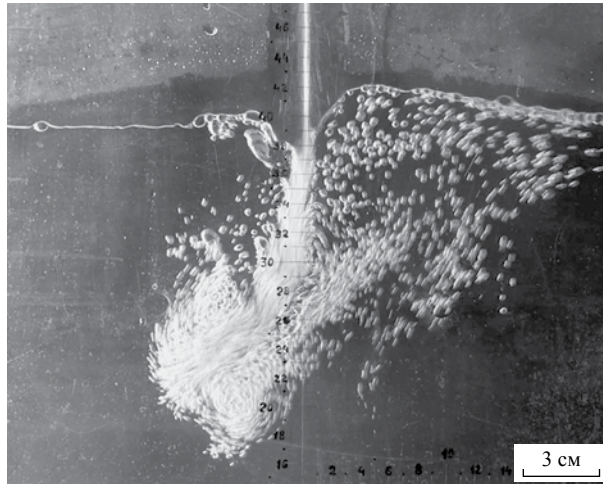
Фиг. 2. Фотоснимок течения при проникании плоской струи с $\delta = 0.2$ см при $H = 15$ см и $V = 5.2$ м/с



Фиг. 3. Последовательность картин течения (1–12) за один период автоколебаний для плоской струи с $\delta = 0.2$ см при $H = 18$ см и $V = 3.9$ м/с

Наиболее характерной особенностью течений, возникающих в жидкости, находящейся в узких каналах, как указывалось, является автоколебательный характер поведения затопленного участка струи. В основе возникновения такого режима лежит появление в какой-то момент времени случайного отличия в суммарных объемах пузырей, внедренных в жидкость по обеим сторонам затопленного участка струи, что приводит к разным уровням свободной поверхности и, следовательно, разным значениям разности гидростатической составляющей давления в жидкости, отклоняющей затопленный участок струи (фиг. 2). При значительных скоростях струй, когда разница уровней свободной поверхности достаточно велика, становится хорошо заметным отклонение также и лишь частично затопленного участка свободной струи (фиг. 2), что еще более увеличивает амплитуду автоколебаний и способствует устойчивости такого режима.

При автоколебательном режиме поведения затопленного участка струи наблюдаются весьма сложные режимы течения двухфазной среды. Представление о них дает показанная на фиг. 3 последовательность кадров скоростной фотосъемки, полученная для струи с $\delta = 0.2$ см при $H = 18$ см и скорости $V = 3.9$ м/с, на протяжении одного периода колебаний.



Фиг. 4. Фотоснимок течения при проникании плоской струи с $\delta = 0.2$ см при $H = 22.5$ см и $V = 6.8$ м/с

При больших скоростях струи возрастает глубина проникания пузырей в жидкость, увеличивается амплитуда поперечного перемещения двухфазных областей, наблюдаются режимы с разветвлением затопленного участка газовой смеси (фиг. 4).

Обращает на себя внимание факт рассогласования периодических процессов повышения уровней жидкости в окрестности струи и накопления объема пузырей с каждой из ее сторон. Как видно из фиг. 4, моментам максимального уровня жидкости с одной из сторон соответствует минимальное число пузырей с этой стороны струи. Периоды этих двух процессов одинаковы.

Описываемый процесс возникновения автоколебательного режима представляет новый пример парадокса симметрии по терминологии Биркгофа [6], когда симметричная задача не обязательно имеет устойчивые симметричные решения. Аналогичный этому парадокс был обнаружен [7] и исследован ранее в случае плоских затопленных фонтанов, когда через свободную поверхность жидкости проникают вертикальные затопленные струи, вызывающие генерацию в автоколебательном режиме поверхностных волн [8–10].

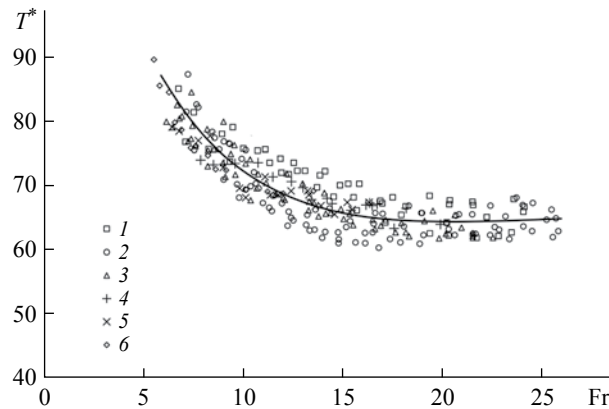
Экспериментальные зависимости

Создаваемые в описанной установке плоские струи, в отличие от осесимметричных, являются лишь относительно свободными из-за частичного контакта их на краях со стенками установки. Взаимодействие со стенками установки приводит к торможению струй в торцевых участках и к растеканию их по смачиваемым стенкам, т.е. вблизи стенок имеет место некоторое изменение формы сечения струи.

Проведенный анализ этих эффектов для струй разной толщины, неучет сжимаемости воздуха, оценка и апробация разных способов минимизации влияния этих факторов при проведении опытов заставили существенно ограничить число определяющих параметров задачи и диапазоны их значений. Принималось, что период автоколебаний $T = f(\delta, V, g, H, h, \nu)$, где ν – кинематический коэффициент вязкости.

Исследование проводилось в следующих приведенных ниже диапазонах значений начальных толщин струй δ , расстояний от сопла до свободной поверхности H и скоростей струй V .

$\delta, \text{см}$	$H, \text{см}$	$V, \text{см / с}$
0.2	6 – 15	2.1 – 7.5
0.3	12 – 18	2.3 – 8
0.4	12.5 – 18	1.9 – 7
0.5	15	2.4 – 6.2
0.6	15	2 – 5.1
0.7	15	1.7 – 4.2



Фиг. 5. Зависимости безразмерного периода автоколебаний от числа Фруда для плоских струй: 1–6 — $\delta/h = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ и 0.7

Из П-теоремы следует, что

$$T^* = \frac{T}{\sqrt{h/g}} = \varphi \left(Fr, \frac{\delta}{h}, \frac{H}{h}, \frac{v}{g^{1/2} h^{3/2}} \right),$$

где $Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}$ — число Фруда.

Значения безразмерного периода автоколебаний, полученные в экспериментах, при фиксированном значении последнего аргумента в этой формуле, приведены на фиг. 5.

Анализ этих результатов позволяет сделать следующие существенные выводы.

Для каждой из рассмотренных струй в изученных диапазонах значений определяющих параметров с ростом числа Фруда до определенного его значения период автоколебаний убывает, а далее, начиная с этого значения, период практически не меняется и является близким к 65, что соответствует размерным значениям частоты автоколебаний ≈ 2 Гц.

В исследованных диапазонах значений определяющих параметров все полученные зависимости периода автоколебаний от числа Фруда для каждой из струй с максимальной относительной погрешностью, не превышающей 8%, можно представить в виде определенного участка показанной на фиг. 5 сплошной линии.

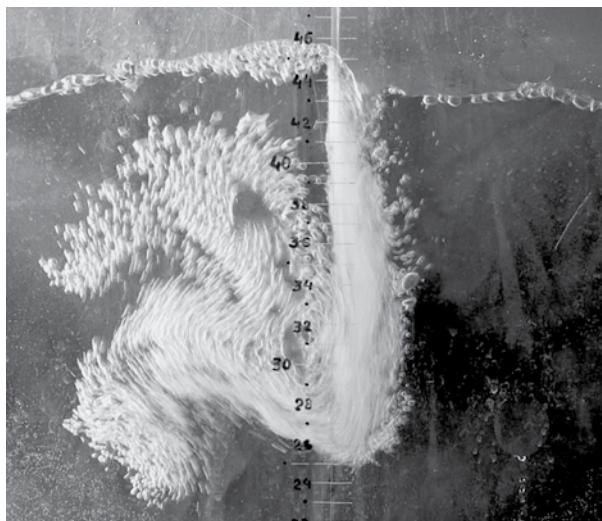
2. ПРОНИКАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СВОБОДНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ.

Опыты проводились на описанной выше установке с круглыми струями с относительными диаметрами $d/h = 0.3, 0.5$ и 0.7 , для значений относительных длин свободных участков струй $H/h = 7, 10, 17$, при числах Фруда, менявшихся от 5 до 40.

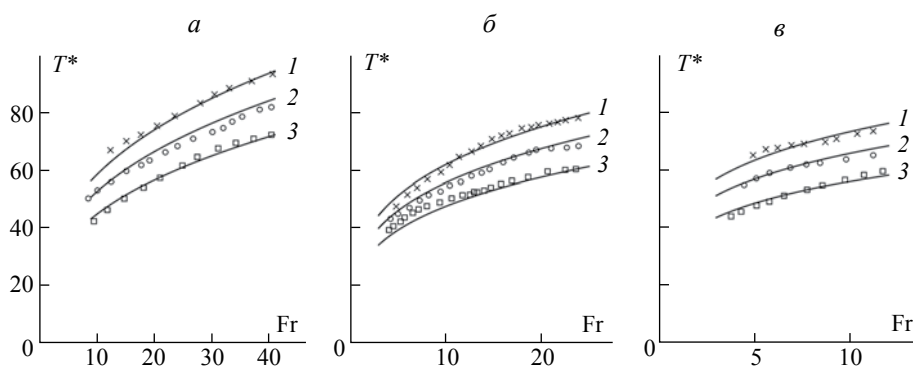
На фиг. 6 показан фотоснимок одного из течений, характерных для проникания круглых струй ($d/h = 0.5, H/h = 17, V = 3.2$ м/с).

Самой существенной особенностью, отличающей наблюдаемые картины течения от случая плоских струй, является интенсивное обтекание свободного и затопленного участков круглой струи потоком жидкости со стороны с более высоким уровнем свободной поверхности.

Экспериментальные значения безразмерного периода автоколебаний для указанных выше диапазонов изменения определяющих параметров показаны точками на фиг. 7. Здесь приведены зависимости безразмерного периода T^* от числа Фруда для $\delta/h = 0.3, 0.5$ и 0.7 (графики *а, б, в*). Кривые 1, 2, 3 на каждом графике соответствуют различным значениям H/h . Оказалось, что для каждого из указанных δ/h полученные экспериментальные данные можно аппроксимировать степенными зависимостями вида $T^* = C_i Fr^{\alpha_i} (H/h)^{-0.3}$ (сплошные линии). Здесь индексы $i = 1, 2, 3$ соответствуют струям с $\delta/h = 0.3, 0.5, 0.7$. Значения C_i и α_i для этих струй равны соответственно: $C_1 = 48, \alpha_1 = 0.34$; $C_2 = 58, \alpha_2 = 0.26$; $C_3 = 81, \alpha_3 = 0.21$. Зависимость от H/h одинакова для всех рассмотренных струй при разных скоростях.



Фиг. 6. Фотоснимок течения при проникании осесимметричной струи с $d = 0.5$ см при $H = 17$ см и $V = 3.2$ м/с



Фиг. 7. Зависимости безразмерного периода автоколебаний от числа Фруда для круглых струй разного относительного диаметра $d/h = 0.3, 0.5, 0.7$ (а-в): 1-3 — $H/h = 17, 10$ и 7

Опыты обнаружили качественное отличие в исследованных диапазонах значений определяющих параметров вида зависимостей безразмерного периода автоколебаний от числа Фруда для плоских и осесимметричных струй: если для плоских струй имеет место с ростом скорости уменьшение периода автоколебаний до определенной величины, то в случае круглых струй, наоборот, наблюдается постоянный рост периода, т.е. уменьшение частоты автоколебаний. Этот эффект может быть связан с указанным выше отличием течений в окрестности струи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружен и изучен новый по терминологии Биркгофа парадокс симметрии, состоящий в формировании несмотря на наличие первоначальной симметрии регулярных автоколебательных режимов течений, возникающих при проникании вертикальных плоских или круглых свободных турбулентных струй в относительно узкий слой жидкости. Возникновение таких режимов связано с внедрением в жидкость воздуха свободными струями. Найдены зависимости безразмерного периода автоколебаний от основных определяющих параметров. Установлено качественное отличие их закономерностей для плоских и круглых струй. Учет изученных особенностей процесса эжектирования воздуха в жидкость свободными струями может быть полезным при проектировании ряда технических устройств (аэраторов, смесителей и др.)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№№ 16-01-00519, 15-01-00361).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chanson H., Brattberg T. Air entrainment by two-dimensional plunging jets: the impingement region and the very-near flow field// Proc. ASME FEDSM98, Washington DC. 1998. P. 1–8.
2. Bin A.K. Gas entrainment by plunging liquid jets// Chem. Eng. Sci. J. Great Britain. 1993. V. 48. P. 3585–3630.
3. Kusabiraki D., Niki H., Yamagiwa K., Ohkawa A. Gas entrainment rate and flow pattern of vertical plunging liquid jets// The Canadian J. Chem. Eng. 1990. V. 68. P. 893–903.
4. Bonetto F., Drew D., Lahey R.T. The Analysis of a plunging liquid jet – The air entrainment process // Chem. Eng. Comm. 1994. V. 130. P. 11–29.
5. Chanson H., Aoki S., Hoque A. Physical modelling and similitude of air bubble entrainment at vertical circular plunging jets// Chem. Eng. Sci. 2004. V. 59. P. 747–758.
6. Биркгоф Г. Гидродинамика. М.: Изд-во иностр. лит., 1954. 184 с.
7. Карликов В.П. Об истечении плоских струй несжимаемой жидкости из-под свободной поверхности // Аннот. докл. 7-го Всесоюз. съезда по теорет. и прикл. механике, М.: Изд-во МГУ, 1991. С. 184.
8. Карликов В.П., Трушина О.В. Об автоколебательных режимах истечения плоских струй жидкости из-под свободной поверхности// Тр. МИАН им. В.А. Стеклова. 1998. Т. 223. С. 52–62.
9. Карликов В.П., Толоконников С.Л., Трушина О.В. О возможной классификации автоколебательных режимов фонтанирования плоских вертикальных затопленных струй тяжелой жидкости// Изв. РАН. МЖГ. 2009. № 3. С. 23–35.
10. Карликов В.П., Толоконников С.Л., Трушина О.В. Об автоколебательных режимах фонтанирования плоских вертикальных затопленных струй тяжелой жидкости в установках с придонным стоком// Изв. РАН. МЖГ. 2011. № 3. С. 89–96.