

## ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 532.5.032

### ОБ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ РЕЖИМАХ ПРОНИКАНИЯ СВОБОДНЫХ ИЛИ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЙ ЧЕРЕЗ ПОВЕРХНОСТЬ ЖИДКОСТИ<sup>1</sup>

© 2019 г. В. П. Карликов<sup>1, \*</sup>, А. Т. Нечаев<sup>1</sup>, С. Л. Толоконников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

Россия 119991 Москва

\*e-mail: karlikovvp@mail.ru

Поступила в редакцию 16.09.2017 г.

Принята к публикации 26.12.2017 г.

Представлен краткий обзор наиболее существенных результатов выполненных в Институте механики МГУ исследований нового класса нестационарных течений несжимаемой жидкости, возникающих при проникании вертикальных затопленных или свободных плоских и осесимметричных водяных струй через поверхность воды, находящейся в относительно узких каналах, а также проникании через поверхность воды в сосуде прямоугольной формы свободных тонкостенных водяных струй, вытекающих из конического щелевого сопла с вертикальной осью. Обнаружено существование широких диапазонов значений определяющих параметров, при которых в жидкости формируются неизвестные ранее автоколебательные режимы течений. Описаны разные механизмы возникновения таких режимов и характерные особенности найденных экспериментально и численно зависимостей периода автоколебаний от основных определяющих параметров. Указаны возможные приложения полученных результатов.

*Ключевые слова:* свободные и затопленные струи, проникание, автоколебания.

**DOI:** 10.31857/S0321-0596462142-148

Проблема проникания жидких струй через свободную поверхность покоящейся жидкости представляет научный и большой практический интерес. Это явление наблюдается и в природе, и во многих технических устройствах и технологических процессах.

Действительно, специфический характер проникания затопленных струй можно наблюдать, например, при фонтанировании родниковых вод из плоских трещин в прибрежной зоне дна озер (наблюдения М.А. Лаврентьева). Знание особенностей проникания свободных струй необходимо при проектировании аппаратов на воздушной подушке, струйных аэраторов, а также для оптимизации таких технологических процессов, как флотационная очистка сточных вод, перемешивание химикатов, заливка жидкого металла в изложницы и многих других.

Известно огромное число публикаций (библиография в [17–19]), посвященных этой проблеме. Как правило, это экспериментальные

работы, исследующие такие, например, характеристики, как глубина проникания струй в жидкость, количество увлекаемого ими в жидкость воздуха в зависимости от скорости струи, ее формы и направления. В теоретических работах математическими методами изучались только стационарные задачи о плоских затопленных фонтанах или о точечном источнике в тяжелой несжимаемой жидкости [2, 3, 5, 15].

В 1975 г. в Институте механики МГУ был обнаружен новый класс нестационарных течений, возникающих при фонтанировании жидкости из плоского затопленного вертикального канала. Эти течения имели четко выраженный автоколебательный характер [4, 12, 13].

Найденные режимы фонтанирования свидетельствовали об установлении нового парадокса симметрии (по терминологии Биркгофа [1]), “когда симметричная задача не обязательно имеет симметричное решение”.

Систематическое исследование таких режимов проникания вертикальных затопленных

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-01-00519).

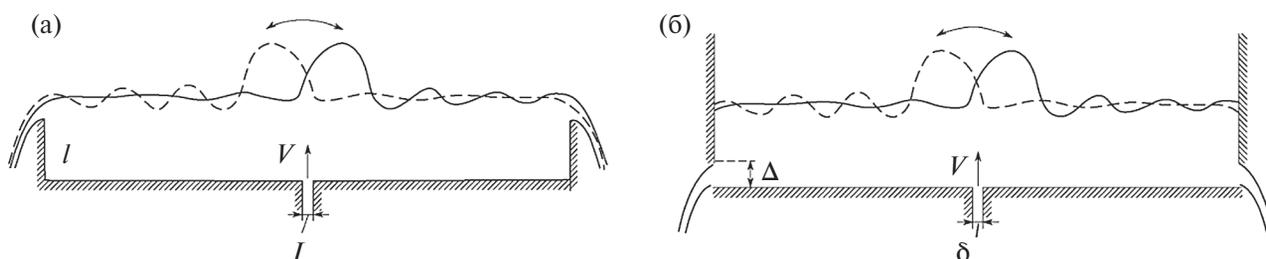


Рис. 1. Схемы установок с водосливным (а) и придонным (б) режимами стока жидкости.

струй проводилось на установках, схематически показанных на рис. 1.

Установки состояли из двух параллельных прозрачных стенок с расстоянием между ними  $h = 1$  см, установленных на плоском основании, в центральной части которого размещался вертикальный плоский канал шириной  $\delta$ . На краях основания находились сменные водосливы вы-

сотой  $l$  (рис. 1а), или имелись стенки с придонными водосливными отверстиями (рис. 1б).

В зависимости от толщины струи  $\delta$ , ее начальной скорости  $V$ , высоты водосливов  $l$  и других определяющих параметров можно было наблюдать в опытах показанные на рис. 2 шесть видов волн ( $A, B, C, D, E, F$ ), возникающих на свободной поверхности жидкости над каналом.

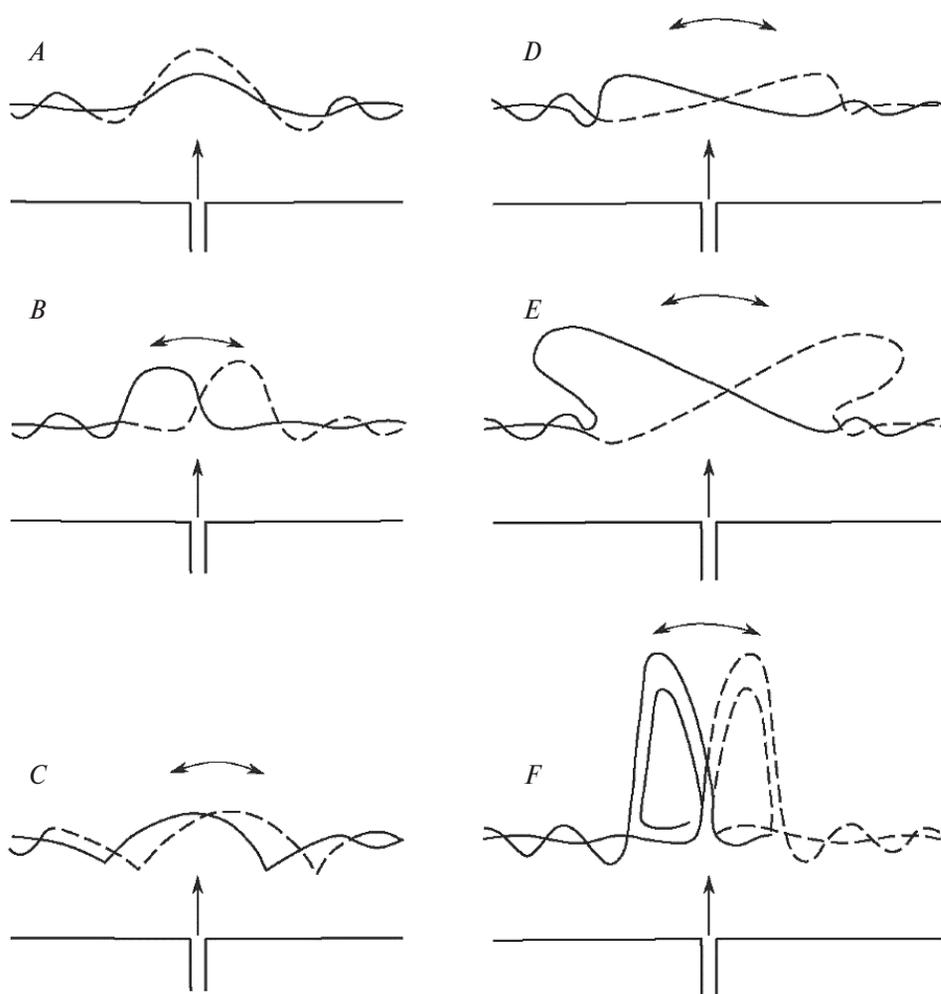


Рис. 2. Возможные варианты вида свободной поверхности над каналом при различных режимах фонтанирования в установках с водосливным режимом стока.

Пять из них относятся к автоколебательным режимам течений.

Стационарный или квазистационарный симметричный режим *A* наблюдался только при очень малых скоростях струи.

Изучение механизма формирования автоколебательных режимов показало, что основная причина появления и существования устойчивых автоколебаний в случае проникания затопленных струй – периодическое изменение перепада гидростатической составляющей давления по обеим сторонам выходного сечения струи, вызванное различием глубин жидкости здесь из-за случайно возникшей в какой-то момент несимметрии в возвышении свободной поверхности над каналом для подачи воды.

В случае, когда затопленная струя прорывает через свободную поверхность, т.е. формируется режим *F*, указанные перепады давления обусловлены импульсами, приходящими с мест падения свободных струй на поверхность жидкости.

В условиях проводившихся опытов безразмерный период автоколебаний  $\tau = T/\sqrt{(g/\delta)}$  ( $g$  – ускорение силы тяжести) зависел главным образом от двух безразмерных параметров – числа Фруда  $Fr = V/\sqrt{g\delta}$  и величины относительного начального заглубления канала для подачи воды  $p = l/\delta$ .

Построенные зависимости  $\tau$  от числа  $Fr$  при фиксированных относительных заглублениях  $p$  свидетельствуют о наличии при его изменении многократных (вплоть до трех) смен режимов фонтанирования бифуркационного типа [11]. Общее представление о характере таких зависимостей дает график, приведенный на рис. 3 в случае  $p = 29.3$ .

Выявилась также сильная зависимость периода автоколебаний и от относительного заглубления  $p$ , незначительное изменение которого может приводить к качественной перестройке всей системы волн на свободной поверхности.

Наконец, самым важным результатом проведенных исследований стало обнаружение

безразмерного параметра  $q = \frac{V\sqrt{\delta}}{\sqrt{g}}$ , ответствен-

ного за бифуркационный характер смены режимов фонтанирования. Использование этого параметра позволило для групп течений, соответствующих разным диапазонам значений параметра  $p$ , провести классификацию границ

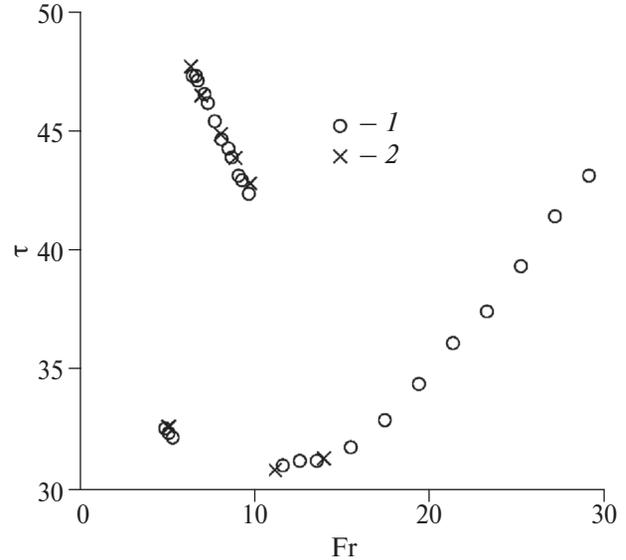


Рис. 3. Зависимость  $\tau = \tau(Fr)$  для  $p = 29.3$ . 1 – эксперимент, 2 – расчет.

бифуркационной смены режимов фонтанирования и представить зависимости безразмерного периода автоколебаний от определяющих параметров в виде универсальной зависимости:

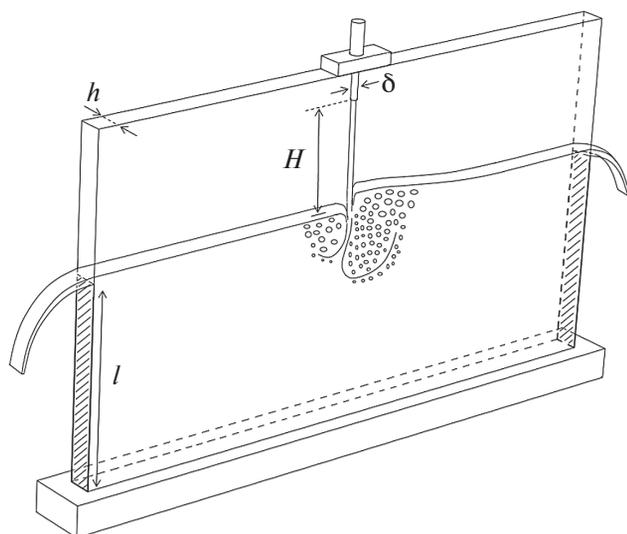
$$\tau^* = \psi(q), \text{ где } \tau^* = T\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Полученные в экспериментах результаты дополнены численными расчетами с использованием пакета программ STAR-CD, первый успешный опыт применения которого к частному случаю  $p = 0$ , т.е. при нулевом начальном затоплении, представлен в [16].

Результаты проведенных исследований с фонтанированием затопленных струй указали на принципиальную возможность использования их для создания нового способа бесконтактного измерения расхода текущих в трубопроводах жидкостей [14].

Опыты, аналогичные описанным выше, проводились также и на установках с придонным стоком жидкости (рис. 16). Результаты этих исследований описаны в [10]. Установлено, что в определенных диапазонах значений определяющих параметров задачи период автоколебаний фонтанов совпадает с периодом собственных колебаний стоячих волн в установке.

Серию исследований затопленных фонтанов завершали на той же установке испытания осесимметричных (круглых) струй. Предполагалось, что описанный для плоских струй механизм возбуждения автоколебаний может действовать и для круглых струй. Опыты с круглыми



**Рис. 4.** Схема установки для изучения режимов проникновения через поверхность жидкости вертикальных свободных струй.  $H$  — уровень сопла над свободной поверхностью;  $h$  — расстояние между боковыми стенками установки;  $l$  — высота боковых водосливов;  $\delta$  — начальная толщина струи.

струями с диаметрами  $d = 3; 5$  мм при затоплении  $l = 15, 12.5, 10, 7.5, 5$  см подтвердили это.

Эксперименты при существенно меньших значениях отношений диаметра струй к ширине канала не проводились, поскольку, как показали численные расчеты, в этом случае регулярные автоколебательные режимы могут и не возникать.

Эти результаты позволяют сделать вывод о том, что для плоских и круглых вертикальных затопленных струй в числе условий возникновения автоколебательных режимов при пересечении свободной границы должно быть определенное ограничение на ширину канала с жидкостью, в которую проникает струя, т.е. канал должен быть относительно узким.

Следующий этап исследований включал в себя изучение процесса проникания в жидкость вертикальных свободных турбулентных плоских струй. Такие струи, увлекая за собой воздух, создают под водой двухфазные области с большой межфазной поверхностью, что представляет значительный интерес в связи с указанными выше многочисленными приложениями.

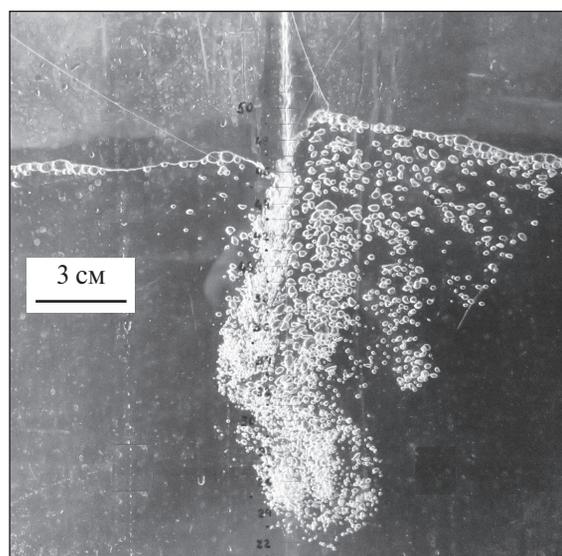
Эксперименты проводились на установке, показанной на рис. 4, аналогичной использо-

ванной для изучения затопленных струй. Расстояние между стенками установки:  $h = 1$  см.

Опыты показали, что в случае проникания вертикальных свободных плоских турбулентных струй значения определяющих параметров также имеют диапазоны, при которых возникают очень близкие к регулярным автоколебательные режимы течений. Очевидно, что механизм возникновения таких режимов должен быть связан с внедрением струй воздуха в жидкость.

Действительно, возникновение в какой-то момент случайной разницы суммарных объемов увлеченного в жидкость воздуха нарушает равенство уровней свободной поверхности по обеим сторонам внедряемой вертикальной струи жидкости (рис. 5). Возникающая в связи с этим разница гидростатических составляющих давления в воде действует на подводный участок струи и на увлеченный струей воздух, отклоняя их в сторону меньшего давления. Внедренные пузырьки, всплывая, увеличивают свой объем и еще более повышают разницу уровней свободной поверхности с обеих сторон струи. Указанный дисбаланс уровней жидкости вызывает близкое к периодическому отклонение в противоположные стороны затопленного участка струи и газовых включений, т.е. возникает квазирегулярный автоколебательный режим течения в области внедрения струи в жидкость.

Процесс возникновения автоколебательных режимов — еще один пример парадокса симметрии (по терминологии Биркгофа).



**Рис. 5.** Фотоснимок течения при проникании плоской струи с  $\delta = 0.2$  см при  $H = 15$  см и  $V = 5.2$  м/с.

Согласно П-теореме, зависимость безразмерного периода автоколебаний от безразмерных определяющих параметров можно записать в виде:

$$\frac{T}{\sqrt{h/g}} = \varphi \left( \frac{V}{\sqrt{gh}}, \frac{\delta}{h}, \frac{H}{h}, \frac{\nu}{g^{1/2}h^{3/2}}, \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho}, \frac{l_i}{h}, \dots \right),$$

где  $V$  и  $\delta$  – соответственно начальная скорость плоской струи и ее толщина;  $H$  – уровень сопла над свободной поверхностью;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости воды;  $l_i$  – геометрические параметры установки;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха;  $\rho$  – плотность воды.

Эксперименты проводились при диапазонах величин определяющих параметров  $0.2 \leq \delta \leq 0.7$  см,  $6 \leq H \leq 22.5$  см,  $1.7 \leq V \leq 8$  м/с. Величины остальных параметров не менялись. Определенная часть полученных в этих опытах зависимостей для средних значений периода автоколебаний приведена в [6]. Во многих из них с ростом числа  $Fr$  среднее значение безразмерного периода стремится к значению, соответствующему частоте автоколебаний  $\approx 1/2$  Гц.

В [6] представлены результаты опытов с круглыми струями, имевшими относительные диаметры  $d/h = 0.3, 0.5, 0.7$ , при относительных расстояниях от сопла до поверхности воды  $H/h = 17, 10, 7$  и  $15 < Fr < 40$ . Эти зависимости представляют собой слабо возрастающие с ростом чисел  $Fr$  кривые. Качественное различие зависимостей для плоских и круглых струй может быть связано с наличием хорошо заметного на снимке (рис. 6) интенсивного обтекания свободного и затопленного участков круглой струи потоком жидкости, движущейся со сто-

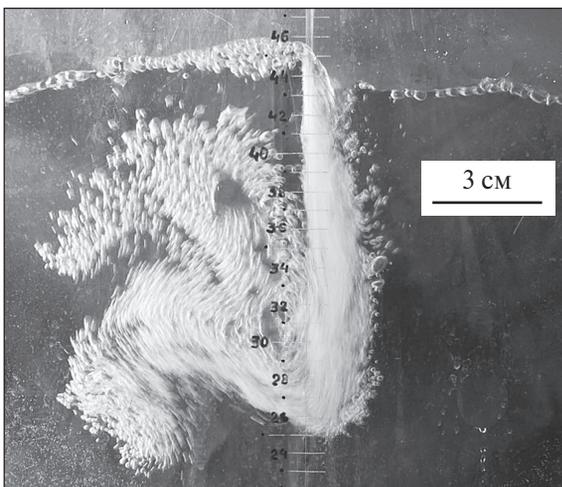


Рис. 6. Фотоснимок течения при проникании осесимметричной струи с  $d = 0.5$  см при  $H = 17$  см и  $V = 3.2$  м/с.

роны с более высоким уровнем свободной поверхности.

Следует заметить, что возникновение и существование изучаемых регулярных или квазирегулярных автоколебательных режимов не связано с наличием строгой симметрии у использованных установок. Согласно описанным механизмам их формирования, это локализованный эффект, связанный с действием силы тяжести на жидкость в области проникания вертикальной струи. Очевидно, что допустимая асимметрия установки не должна приводить к возникновению интенсивного поперечного потока в области проникания струи.

Конечно, вид получаемых зависимостей периода автоколебаний от определяющих параметров может зависеть и от конструктивных особенностей установки, и от методики проведения опытов (гистерезисные эффекты), и от места проникания в установку струй в жидкость. Об этом свидетельствуют, например, результаты опытов с прониканием свободных плоских вертикальных струй через разные участки свободной поверхности в симметричной установке или описываемые ниже опыты с коническими струями.

Приведем в заключение результаты исследования еще одного течения с автоколебательным режимом, возникающего в случае проникания через поверхность воды, находящейся в сосудах прямоугольной формы различного размера, свободных турбулентных водяных струй, вытекающих из конического щелевого сопла с вертикальной осью.

Обнаруженная в этих опытах характерная особенность течений – наличие регулярных автоколебательных режимов поперечного перемещения границ струйного купола с достаточно низкой частотой ( $\sim 3$  Гц). В основе механизма возникновения и существования таких режимов автоколебаний лежит регулярное изменение давления в подкупольном объеме, связанное с уносом эжектируемого струей воздуха из него с последующим возвращением со всплывающими пузырями, а также вследствие периодического изменения уровня жидкости под куполом при некоторых режимах из-за поперечных колебаний затопленного участка конической струи.

Основные определяющие параметры в этой задаче, кроме начальной толщины струи, – углы конусности, расход  $Q$  и высота  $H$  расположения сопла над поверхностью воды. От расхода  $Q$  зависит глубина проникания струи в воду, а силь-

ная зависимость периода автоколебаний от  $H$  связана с заметным изменением структуры конической струи по мере удаления от сопла. На рис. 7 показан общий вид такой струи. Период колебаний существенно зависит от того, какой участок струи оказывается погруженным в воду.

В разных диапазонах значений расхода  $Q$  зависимости периода автоколебаний от параметра  $H$  могут качественно различаться. Например, для струи с начальной толщиной  $\delta = 0.1$  см в диапазоне  $60 \leq Q \leq 250$  см<sup>3</sup>/с период плавно и непрерывно меняется с изменением  $H$ , а в диапазоне  $300 \leq Q \leq 380$  см<sup>3</sup>/с наблюдаются и бифуркационные смены режимов автоколебаний, и гистерезисные эффекты при проведении опытов с разной последовательностью изменения  $H$ . Наконец, в диапазоне  $375 \leq Q \leq 550$  см<sup>3</sup>/с также наблюдается бифуркационная смена режимов автоколебаний, но гистерезисные явления отсутствуют. Детальный анализ условий смены режимов автоколебаний и изучение характера возникающих при этом течений под водой и на ее поверхности сделан в работах [7–9]. В качестве иллюстрации общего вида течений, наблюдавшихся в этих опытах, на рис. 8 показан фотоснимок одного из них, существующего при  $Q = 450$  см<sup>3</sup>/с и  $H = 17$  см.

Описанные выше опыты проводились в сосудах прямоугольной формы с размерами 118×88×100 см. Аналогичные эксперименты в сосудах меньшего размера – 90×50×50 см не выяви-

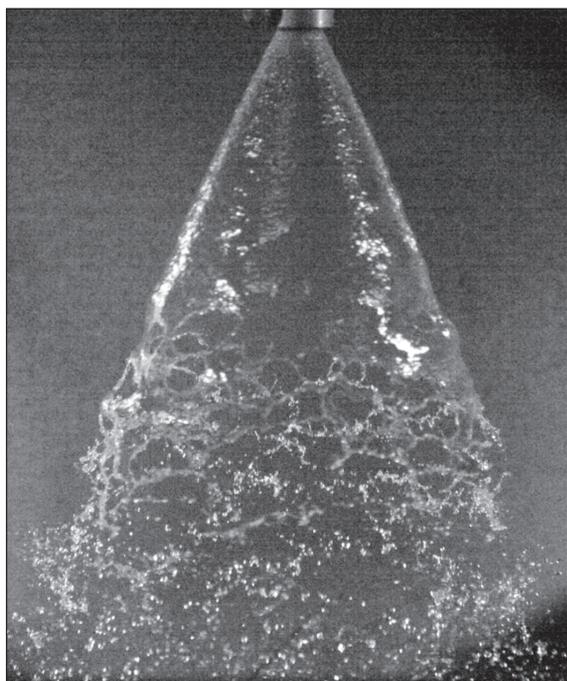


Рис. 7. Структура свободной конической струи при  $Q = 350$  см<sup>3</sup>/с.

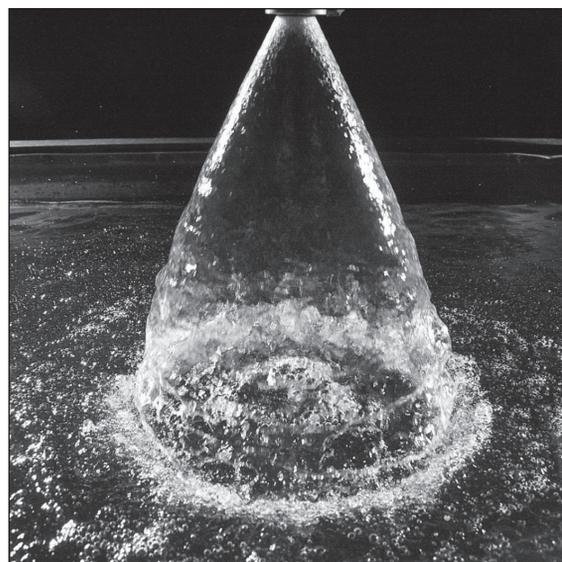


Рис. 8. Фотоснимок течения для  $Q = 350$  см<sup>3</sup>/с,  $H = 17$  см.

ли новых качественных эффектов, но еще раз показали, что периоды автоколебаний струи могут совпадать с одной из главных собственных частот колебаний стоячих волн на поверхности жидкости в сосуде.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации работы конических струйных аэраторов. Опыты показали, например, что при определенных режимах, близких к областям с бифуркационной сменой режимов автоколебаний, наблюдается резкое снижение эффективности процесса насыщения жидкости воздухом. Проведенное исследование указывает и на возможность использования струйных аэраторов конического типа в качестве генераторов в жидкости низкочастотных колебаний.

Представляется удивительным, что, несмотря на большое количество отечественных и зарубежных публикаций, посвященных исследованиям проникания жидких струй через свободную поверхность жидкости, ни в одной из них авторы настоящей работы не нашли информации о режимах течений, аналогичных описанным выше.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биркгоф Г. Гидродинамика. М.: Изд-во иностр. лит., 1954. 183 с. / Пер. с англ. Birkhoff G. *Hydrodynamics*. Princeton, 1950.
2. Гузевский Л.Г. Задача о плоском фонтане тяжелой жидкости // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1976. Т. 1. № 3. С. 85–93.

3. Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости. М.: Наука, 1979. 536 с.
4. Карликов В.П. Об истечении плоских струй весомой жидкости из-под свободной поверхности // Аннот. докл. VII Всесоюз. съезда по теорет. и приклад. механике. М.: Изд-во МГУ, 1991. С. 184.
5. Казеннов А.К., Карликов В.П., Хомяков А.Н., Чернявский Ф.Н., Шоломович Г.И. Способ фонтанирования жидкости А. с. 603431. 1977. Бюл. изобр. 1978. № 15.
6. Карликов В.П., Нечаев А.Т., Толоконников С.Л. Об автоколебательных режимах проникания вертикальных свободных турбулентных струй через поверхность жидкости // Изв. РАН. МЖГ. 2017. № 6. С. 24–30.
7. Карликов В.П., Толоконников С.Л. Об автоколебательных режимах проникания свободных конических тонкостенных турбулентных струй через поверхность жидкости // Изв. РАН. МЖГ. 2014. № 3. С. 65–73.
8. Карликов В.П., Толоконников С.Л. О зависимости периода автоколебаний купола конического струйного аэратора от ширины струи в выходном сечении кольцевого сопла // Вест. Моск. ун-та. Сер. 1, Математика, механика. 2014. № 3. С. 65–68.
9. Карликов В.П., Толоконников С.Л. О периоде автоколебаний куполов конических струйных аэраторов с разными углами конусности // Вест. Моск. ун-та. Сер. 1, Математика, механика. 2015. № 5. С. 60–64.
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.
11. 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.
12. Карликов В.П., Трушина О.В. Об автоколебаниях плоских затопленных фонтанов // Докл. РАН. 1998. Т. 361. № 3. С. 340–344.
13. Карликов В.П., Трушина О.В. Об автоколебательных режимах истечения плоских струй жидкости из-под свободной поверхности // Тр. МИАН. 1998. Т. 223. С. 52–62.
14. Карликов В.П., Трушина О.В., Шоломович Г.И. Об использовании автоколебательных режимов фонтанирования жидкости для бесконтактного измерения ее расхода в трубопроводах // Вестн. МГУ. Сер. 1, Математика, механика. 1999. № 6. С. 63–66.
15. Маклаков Д.В. Нелинейные задачи гидродинамики потенциальных течений с неизвестными границами. М.: Янус-К, 1997. 280 с.
16. Осипцов А.А. Автоколебания плоского фонтана при отсутствии начального затопления // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1, Математика, механика. 2005. № 2. С. 59–62.
17. Bin A.K. Gas entrainment by plunging liquid jets // Chem. Eng. Sci. J. Great Britain. 1993. V. 48. P. 3585–3630.
18. Deswal S., Verma D.V.S. Performance evaluation and modeling of a conical plunging jet aerator // Int. J. of Math., Phys. and Eng. Sciences. 2008. V. 2. Iss. 1. P. 335–339.
19. Kusabiraki D., Niki H., Yamagiwa K., Ohkawa A. Gas entrainment rate and flow pattern of vertical plunging liquid jets // Canadian J. Chem. Eng. 1990. V. 68. P. 893–903.

## Self-Oscillating Modes of Penetration of Free or Submerged Jets Through the Surface of a Liquid

V. P. Karlikov<sup>1,\*</sup>, A. T. Nechaev<sup>1</sup>, S. L. Tolokonnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Russia 119991

\*e-mail: karlikovvp@mail.ru

Received 16.09.2017

Accepted 26.12.2017

A brief review was conducted of the most significant results of studies performed at the Institute of Mechanics of Moscow State University regarding a new class of unsteady flow of incompressible fluid. Examples include such fluids arising upon the penetration of vertical submerged or free flat and axially symmetric water jets through the surface of water in relatively narrow channels, such as when free thin-walled water jets flowing from a conical slit nozzle with a vertical axis form in a rectangular vessel. A broad range of values of characteristic parameters was found to be generated by the previously unknown self-oscillating flow modes formed in the liquid. Different mechanisms for the occurrence of such modes and characteristics of the dependencies of the self-oscillation period on the main determining parameters were uncovered through empirical experiment and numerical modeling. These mechanisms and characteristics as well as possible applications of the obtained results are presented.

**Keywords:** free and submerged jets, penetration, self-oscillations.

**DOI:** 10.31857/S0321-0596462142-148