

УДК 532.555

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО РАЗМЕРА ВЯЗКОЙ СТРУИ ПРИ ЕЕ ИСТЕЧЕНИИ ИЗ КАПИЛЛЯРНОГО КАНАЛА

© 2024 г. А. А. Сафронов*, А. А. Коротеев, А. Е. Агафонов, А. Л. Григорьев, Н. И. Филатов

АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва, Россия

*e-mail: a.a.safir@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.05.2024 г.

После доработки 11.06.2024 г.

Принята к публикации 11.06.2024 г.

Радиусы отверстия капиллярного канала и истекающей из него струи в общем случае различны. Трение жидкости о стенки канала приводит к параболическому распределению скорости, в то время как малые касательные напряжения на границе свободной струи обуславливают выравнивание скоростного профиля. Диссипативные эффекты влияют как на длину участка установления профиля скорости, так и ее осредненное по радиусу значение, а также установившийся радиус струи. Ранее соответствующая задача теоретически решалась в осесимметричном приближении. Однако при малых значениях числа Рейнольдса условие симметрии не выполняется из-за возникновения участка изгибного течения. Помимо этого, в струях, истекающих с малой скоростью, возникают явления глобальной и граничной неустойчивости капиллярного течения. Совокупность нелинейных взаимосогласованных эффектов приводит к несимметричной относительно оси деформации профиля скорости на участке установления и неоднозначности зависимости радиуса струи от числа Рейнольдса. В работе впервые представлены результаты экспериментального изучения зависимости установившегося радиуса высоковязких струй от скорости при возникновении участка изгибного течения.

Ключевые слова: капиллярная гидродинамика, вязкая струя, самопроизвольный изгиб струи, самоиндуцированный капиллярный распад.

DOI: 10.31857/S1024708424050054 EDN: NQXKBT

Истечение струй из капиллярных каналов встречается во многих технических приложениях. Одной из важных решаемых задач является генерация мелкодисперсных капельных потоков с заданными характеристиками. Размер капель, формирующихся в результате капиллярного распада струи, зависит от ее радиуса. При ламинарном течении профиль скорости жидкости на выходе из канала близок к параболическому. Далее касательные напряжения на границе жидкости исчезают, поле скорости на переходном участке в окрестности выходного сечения канала перестраивается и в дальнейшем скорость жидкости в струе принимает постоянное значение. Закономерности изменения профиля скорости зависят от значения числа Рейнольдса $Re = 2r_0\rho u_0/\mu$, где ρ и μ — плотность и динамическая вязкость жидкости, u_0 — осредненная скорость жидкости в канале, r_0 — радиус канала. Ранее установлено, что в маловязкой струе осредненная скорость жидкости увеличивается в $4/3$ раз, а радиус струи на удалении от выходного сечения канала равен $r_\infty = (3/4)^{1/2}r_0$. Если вязкостью пренебречь нельзя, а значение числа Рейнольдса достаточно велико, конечная скорость будет меньше, а радиус струи больше асимптотических значений. В работе [1] данный вопрос исследовался теоретически и экспериментально для осесимметричной струи в предположении, что $Re \gg 1$. Результаты анализа показали, что $r_\infty/r_0 = 1$ в случае $Re \approx 16$. При меньших $Re - r_\infty > r_0$, а при $Re > 16 - r_\infty < r_0$.

В работе [2] проведено исследование отношения r_∞/r_0 для $Re < 16$. В линейном приближении проведен анализ закономерностей развития возмущений поля скорости струи в окрестности выхода капиллярного канала. Определены волновое число ответственных за протекание переходных процессов возмущений,

а также фактор их роста. Результаты расчетов, выполненных с использованием теоретической модели, а также проведенные эксперименты характеризуют мультстабильность поведения системы. По мнению авторов [2] линейная модель не позволяет дать исчерпывающее описание истечения из-за сложностей переходных процессов на выходе канала. В работах [3–5] предпринималась попытка численного определения профиля скорости струи на выходе в осесимметричном приближении. Однако из-за ряда принципиальных трудностей в полной мере решить поставленную задачу не удалось. Исследование влияния капиллярных эффектов на закономерности истечения высокоскоростных вязких струй проводилось в работе [6]. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментом показало лишь качественное соответствие полученных результатов. Ряд эффектов, включая колебания, сопровождающие установление профиля скорости, описать не удалось. Влияние капиллярного мениска в окрестности выходного сечения канала на изменение профиля скорости в высокоскоростной струе исследовано в работе [7].

В представленной работе рассмотрены закономерности истечения из капиллярного канала вязкой струи с малой скоростью при значениях числа Вебера $We = r_0 \rho u_0^2 / \sigma$ (σ — поверхностное натяжение), близких к единице. Актуальность исследования обусловлена разработкой капельных холодильников — излучателей (КХИ) — бескаркасных систем отвода низкопотенциального тепла в циклах космических энергетических установок большой мощности [8–10]. Концепция КХИ основана на использовании радиационного охлаждения свободно распространяющегося в космосе мелкодисперсного капельного потока для излучения тепла. Капли горячего сверхвысоковакуумного теплоносителя создаются генератором, а остывшие собираются в уловителе. При уменьшении скорости капель, возрастает время их полета. За счет этого можно увеличить размер капель при сохранении перепада температуры в излучателе. Увеличение размера повышает технологичность и снижает стоимость КХИ. Для создания генераторов «медленных» капель необходимо решение ряда задач, связанных с исследованием капиллярных течений.

НИЗКОСКОРОСТНОЕ КАПИЛЛЯРНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ СТРУИ

В работах [11,12] продемонстрировано существование глобальной неустойчивости в капиллярной струе, истекающей с малой вязкостью. Теоретический анализ развития неустойчивости проводился с помощью методики, разработанной А.Г. Куликовским; полученные результаты получили экспериментальное подтверждение. В работе [13] исследован самоиндуцированный капиллярный распад струи под действием граничной неустойчивости. Возмущения возникают в результате отрыва от струи зародышей капель. Короткие волны движутся против течения к выходу канала и при отражении от него из-за эффекта Доплера изменяют длину волны. Часть спектра сформировавшихся таким образом длинноволновых возмущений растет в соответствии с закономерностями теории конвективной неустойчивости. Их развитие приводит к распаду струи, в результате которого генерируются новые бегущие волны. В результате анализа процесса в линейном приближении обоснована многозначность функции зависимости длины распадающейся струи от скорости. Экспериментальные исследования подтвердили этот результат. В работе [14] проведено численное моделирование закономерностей самоиндуцированного распада вязких струй. Работа [15] направлена на проведение комплекса исследований влияния вязкости на граничную скорость перехода режима конвективной неустойчивости струйного течения к абсолютной неустойчивости. Показано, что вблизи границы абсолютной неустойчивости в капиллярном течении возникают явления, приводящие к изгибу струи. Применительно к концепции создания КХИ в работе [10] исследованы закономерности самопроизвольного изгиба вязкой струи, истекающей из капиллярного канала в вакуум в условиях микрогравитации. Показано, что определяющим механизмом формирования изгибного течения струи является действие вязких сил.

Механизм формирования изгибного течения связан с протеканием процессов установления профиля скорости в жидкости за срезом канала. Если характерная длина установления профиля скорости в струе равна L , а смещение оси струи относительно оси форсунки в этой точке составляет δ (рис. 1), величина вязких сил, действующих вдоль оси струи $F_v \sim \mu u_0 r_0^2 / L$. Момент этой силы, искривляющей струю и усиливающий малое начальное возмущение, $M_v \sim \delta \cdot F_v$. При наличии изгиба поле скорости жидкости в струе деформируется с возникновением нескомпенсированного напряжения, инициирующего противодействующий изгибу момент. Считая малой кривизну струи k , можно получить величины разности «пробега» жидких частиц на краях струи из-за изгиба $\sim 2r_0 k L$, противодействующего ему напряжения $\tau_{op} \sim r_0 \mu (dk/dt)$ и соответствующего момента $M_{op} \sim r_0^3 \tau_{op}$. Когда кривизна мала можно использовать приближенное со-

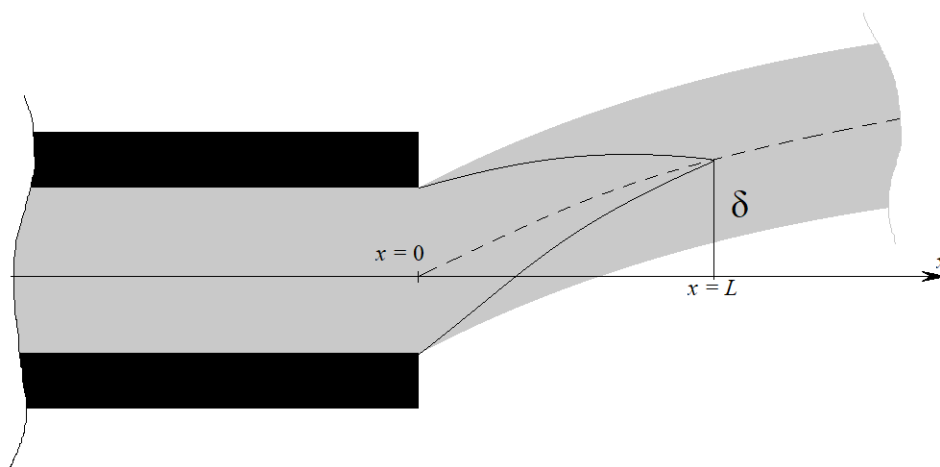


Рис. 1. Схема изгибного течения струи.

отношение $k \sim \delta/L^2$ и получить выражение для скорости изменения δ на начальной стадии изгиба струи, характеризующее линейное возрастание малого начального изгибного возмущения:

В нелинейной стадии вязкому изгибающему моменту противодействуют силы поверхностного натяжения и инерции. В итоге формируется стационарное изгибное течение струи.

Из рассмотренного выше следует, что изгиб струи сопровождается деформацией поля скорости в области переходного течения при установлении профиля скорости струи. В то же время характеристики явления изгиба зависят от длины струи, связанной с особенностями ее самоиндуцированного распада. Дополнительным осложняющим фактором является нелинейность перечисленных процессов.

Закономерности медленных струйных течений исследовались экспериментально. Помимо критериев Рейнольдса и Вебера, использовалось число Онезорге $Oh = \mu/(r_0 \rho \sigma)^{1/2}$ (отношение сил вязкости и поверхностного натяжения). Критерии связаны соотношением $2 \cdot We^{1/2} = Re \cdot Oh$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ

Струи создавались путем механического вытеснения жидкости из резервуара через капиллярные каналы с помощью винтового механизма, приводимого шаговым двигателем. Метод получения струй позволял с высокой точностью поддерживать расход жидкости на заданном уровне.

Эксперименты проводились при различных температурах с вакуумным маслом ВМ1-С и растворами глицерина в воде. Вязкость измерялась вискозиметром, поверхностное натяжение — тензиометром. Внутренний диаметр вертикальных (отклонение от направления действия силы тяжести не более 0.3°) капиллярных каналов из нержавеющей стали составлял 0.50 мм, внешний — 0.785 мм. Съемка осуществлялась цифровым микроскопом высокого разрешения; на диаметр струи на цифровых снимках приходилось ~ 90 пикселей. При обработке экспериментальных данных граница струи на цифровом снимке определялась по методике [13], основанной на расчете второй производной яркости пикселей в направлении, перпендикулярном границе струи. Пример фотографии струи и оцифрованных значений координат ее границы приведен на рис. 2.

Минимальная скорость истечения соответствовала значению, при котором еще наблюдается устойчивое формирование струи; максимальная составляла 2 м/с и определялась особенностями экспериментальной установки. Длина канала превышала 50 радиусов. Максимальное значение числа Рейнольдса в экспериментах ~ 40 , т.е. ниже границы перехода к турбулентному режиму.

В экспериментах измерялась зависимость отношения установившегося радиуса струи к радиусу капиллярного канала форсунки r_{st}/r_0 от Re для струй с различным значением Oh . Погрешность измерения r_{st}/r_0 не превышала 2%, определения Re — 3%, Oh — 2%. При генерации струи веретенообразной формы (рис. 3) установившимся радиусом считалось его наибольшее значение в окрестности среза канала.

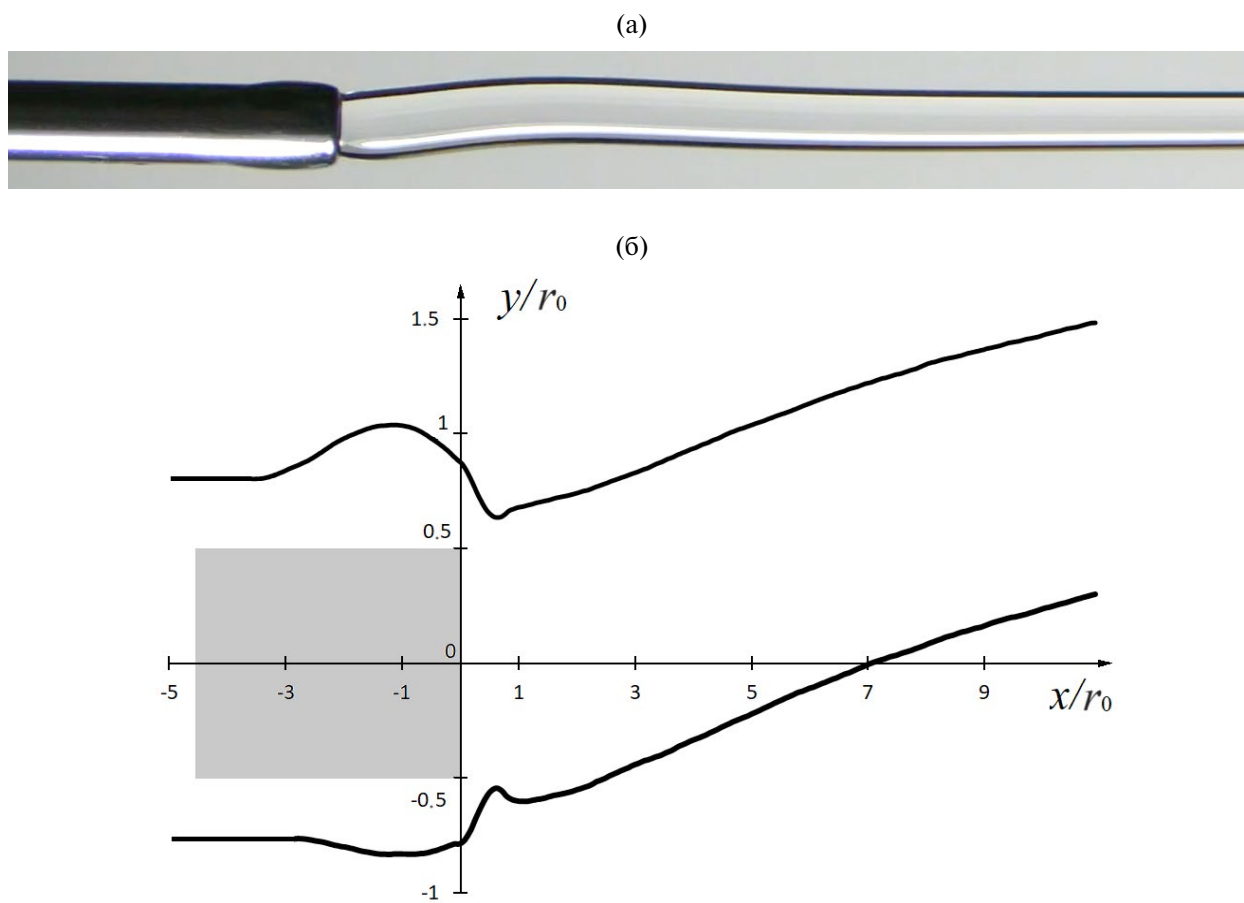


Рис. 2. Изгибное течение вязкой струи при $Re = 2.35$, $Oh = 3.2$ (а) и положение границы струи (обезразмеривание по радиусу), $x = 0$ — срез канала (б); расширение границы при $x < 0$ обусловлено формированием мениска на форсунке.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты экспериментальных измерений зависимости r_{sf}/r_0 от Re для различных Oh представлены на рис. 4. Результаты экспериментальных исследований при $Re > 8$ соответствуют представленным в работах [1, 2, 6]. В частности, в проведенных экспериментах отношение $(r_{sf}/r_0) = 1$ при $Re \approx 16$. Однако при меньших значениях числа Рейнольдса наблюдались не только несоответствие результатов данным работ [1, 2, 6], но и многозначность экспериментально полученной зависимости $r_{sf} = r_{sf}(r_0, Re)$.

При $Re < 7$ эта зависимость разделялась на две кривые (рис. 4б). Значениям $Oh = 0.5$ и $Oh = 0.25$ соответствует значительно большее отношение r_{sf}/r_0 нежели $Oh > 3$. В некоторых случаях при одном значении Re радиус струй с различными Oh отличался в полтора раза. Качественное объяснение этому следующее. При малых Oh и u_0 распад струи происходил в результате действия механизма граничной неустойчивости, из-за чего длина струи составляла $\sim 10r_0$ (рис. 5). Струи с большим значением Oh имели длину в десятки раз больше. При этом, как видно из рис. 2, характерная длина волны изгибного возмущения превышала $10r_0$. Из-за малой длины в струях с умеренным значением Oh изгибное возмущение с амплитудой, достаточной для деформации поля скорости в переходном слое не формируется.

На рис. 4в приведены результаты, полученные для струй с $Oh > 3$. В этом случае также наблюдается разделение зависимости на две кривые. Все точки, соответствующие кривой с меньшим значением отношения $r_{sf}/r_0(Re)$ получены в эксперименте со струей с $Oh = 7.5$. Эти результаты представлены на отдельном графике рис. 4г. Видно, что разделение зависимости на ветви происходит в окрестности $Re = 1$, где при больших значениях Oh величина изгиба струи может превышать 15° .



Рис. 3. Струя веретенообразной формы.

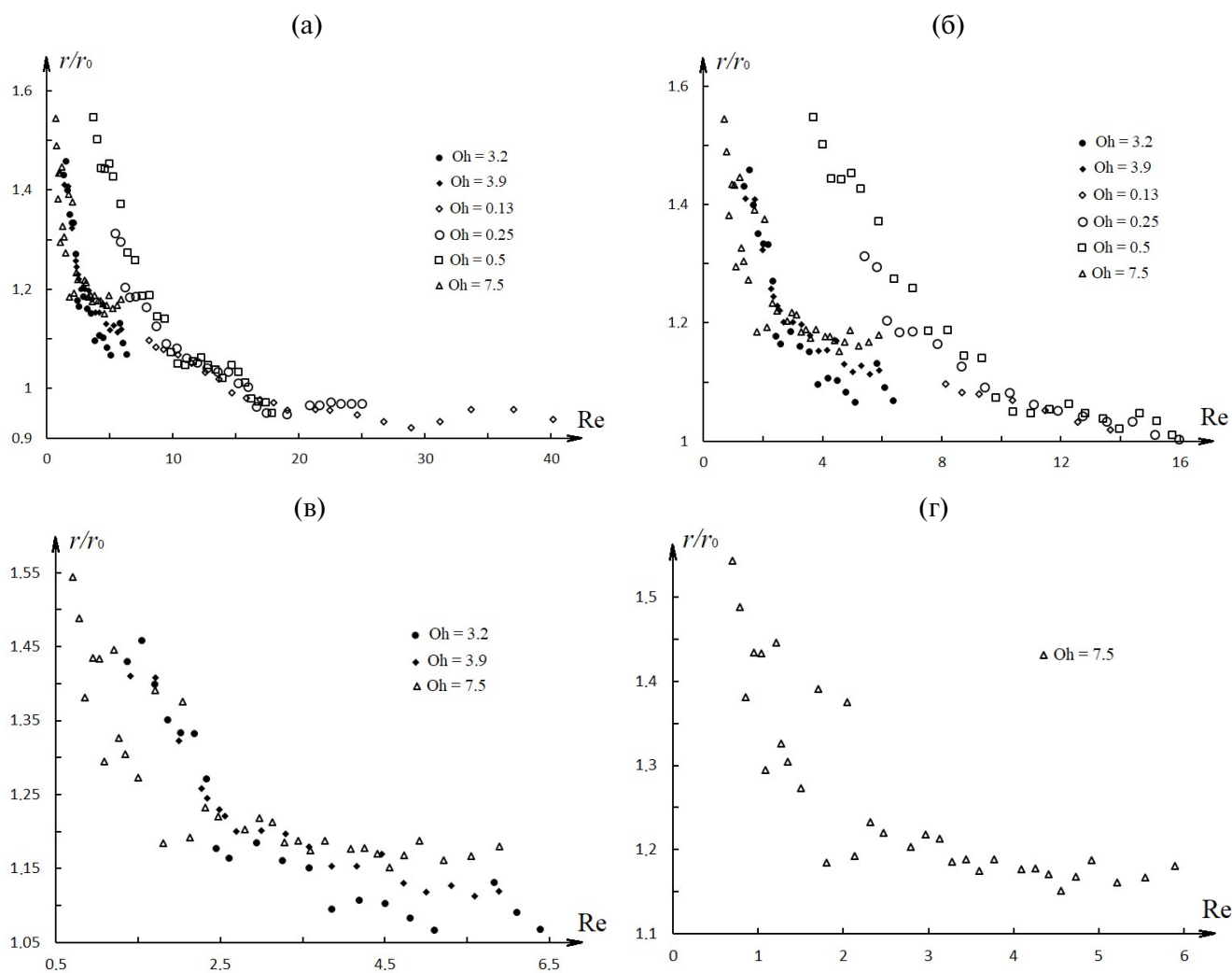
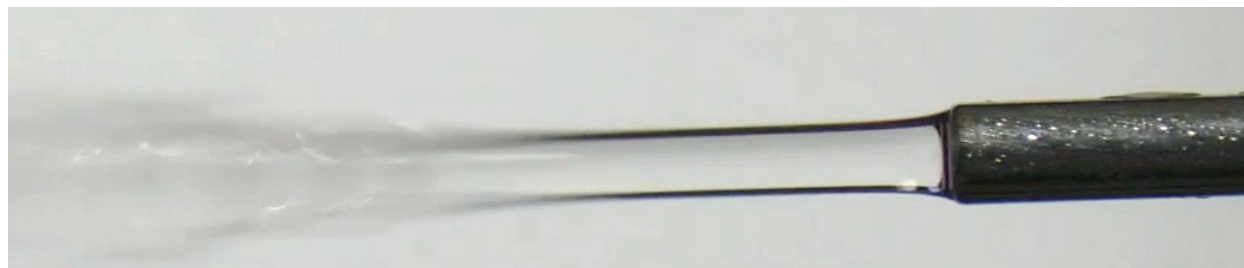
Рис. 4. Результаты экспериментальных измерений зависимости r_{sp}/r_0 от Re для различных значений Oh , представленные в различных масштабах.

Рис. 5. Струя малой длины.

Различные квазистационарные состояния изгибного течения соответствуют разным значениям r_{sp}/r_0 при одном и том же Re. При изгибном течении вязкой струи предположение осесимметричного течения, традиционно используемое для анализа закономерностей установления профиля скорости в струе, не является корректным как из-за изгиба оси, так и потому, что в области переходного течения радиус кривизны оси соизмерим с радиусом струи, а ее профиль не является круговым (см. рис. 2).

Представленные результаты получены в условиях нормальной силы тяжести. Аналогичные эксперименты в условиях микрогравитации как правило проводились с маловязкими жидкостями ($Oh \sim 10^{-3}$ [13]). Результаты экспериментов с $Oh \sim 1$ представлены лишь в работе [15] для двух серий экспериментов, посвященных исследованиям качественных характеристик капиллярного течения. Решение задачи экспериментального изучения закономерностей изгибных течений вязких струй в условиях микрогравитации приобретает в этой связи особую актуальность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты свидетельствуют о том, что при значениях Re, сравнимых с единицей, закономерности перестройки поля скорости в струе, истекающей из форсунки, определяются не только соотношением сил инерции и вязкости, но также и действием силы поверхностного натяжения, один из механизмов влияния которой связан с явлением изгибного течения. Характерная длина волны изгибного возмущения, описанного в данной работе, а также наблюдаемого в экспериментах в условиях микрогравитации [15], превышает $\sim 10r_0$. Если длина распадающейся под действием механизма граничной неустойчивости струи оказывается меньше этого значения, изгибное течение не формируется, а поле скорости близко к осесимметричному. При уменьшении величины поверхностного натяжения длина струи возрастает и в ней формируются изгибные возмущения. При этом переход от параболического к практически постоянному радиальному распределению скорости происходит в результате развития не осесимметричных возмущений, что приводит к заметному (десятки процентов) изменению радиуса струи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Middleman S., Gavis J. Expansion and contraction of capillary jets of Newtonian liquids // *Physics of Fluid*. 1961. N. 4. I. 355. P. 355–359.
2. Simon L., Wronski G., Wronski S. The shape of low-speed capillary jets of Newtonian liquids // *J. Fluid Mech*. 1966. V. 35. P. 1. P. 185–198.
3. Krut N.P., Cuvelier C., Segal A., Zanden J. A total linearization method for solving viscous free boundary flow problems by the finite element method // *International journal for numerical methods in fluids*. 1988. V. 8. I. 3. P. 351–363.
4. Brasseur E., Fyrrillas M.M., Georgiou G.C., Crochet M.J. The time-dependent extrudate-swell problem of an Oldroyd-B fluid with slip along the wall // *J. Rheol*. 1998. V. 42. P. 549–566.
5. Mitsoulis E., Georgiou G., Kountouriotis Z. A study of various factors affecting Newtonian extrudate swell // *Computers & Fluids*. 2012. V. 57. P. 195–207.
6. Georgiou G.C., Papanastasiou T.C., Wilkes J.O. Laminar Newtonian jets at high Reynolds number and high surface tension // *AIChE Journal*. 1988. V. 34. N. 9. P. 1559–1562.
7. Chesnokov Y.G., Razumovskij N.A. Free surface of a high speed capillary jet // *Applied Scientific Research*. 1998. V. 59. P. 77–88.
8. Сафронов А.А. Радиационное остывание немонодисперсного капельного потока в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе // *Инженерно-физический журнал*. 2024. Т. 97. №1. С. 20–28.
9. Коротеев А.А., Сафронов А.А., Филатов Н.И., Григорьев А.Л., Хлынов А.В. Исследование генераторов капель бескаркасных систем теплоотвода в космосе // *Космическая техника и технологии*. 2023. №1(40). С. 83–94.
10. Сафронов А.А., Коротеев А.А., Филатов Н.И., Григорьев А.Л. Изгиб вязкой струи, истекающей из капиллярного отверстия // *Инженерно — физический журнал*. 2022. Т. 95. № 1. С. 72–79.
11. Yakubenko P.A. Capillary instability of an ideal jet of large but finite length // *European Journal of Mechanics. B, Fluids*. 1997. V. 16. N. 1. P. 39–48.
12. Yakubenko P.A. Global capillary instability of an inclined jet // *Journal of Fluid Mechanics*. 1997. V. 346. I. 10. P. 181–200.

13. Umemura A., Osaka J., Shinjo J. Coherent capillary wave structure revealed by ISS experiments for spontaneous nozzle jet disintegration // *Microgravity Sci. Technol.* 2020. V.32. P. 369–397.
14. Сафронов А.А., Коротеев А.А., Григорьев А.Л., Филатов Н.И. Моделирование самоиндуцированного капиллярного распада струи вязкой жидкости. *Известия высших учебных заведений // Прикладная нелинейная динамика.* 2023. Т. 31. № 6. С. 673–685.
15. Vihinen I., Honohan A.M., Lin S.P. Image of absolute instability in a liquid jet // *Physics of Fluids.* 1997. 9(11). P. 3117–3119.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE TRANSVERSE SIZE OF A VISCOUS JET FLOWING OUT OF A CAPILLARY CHANNEL

A. A. Safronov*, A. A. Koroteev, A. E. Agafonov, A. L. Grigor'ev, and N. I. Filatov

Keldysh Research Center, Moscow, 125438 Russia

**e-mail: a.a.safr@yandex.ru*

The radii of the orifice of a capillary channel and a jet flowing out of it are generally different. Fluid friction on the channel walls leads to the parabolic velocity distribution, while small shear stresses at the free jet boundary are responsible for the velocity profile equalization. Dissipation has an effect on both the length of the region, where the velocity profile is settled, and its radius-average value, as well as on the steady-state jet radius. Previously, the corresponding problem was theoretically solved in the axisymmetric approximation. However, the symmetry condition is not fulfilled in the case of small Reynolds numbers, owing to the occurrence of a bend flow region. Moreover, in the jets flowing out at a low velocity there occur the phenomena of global and boundary instability of the capillary flow. The totality of the nonlinear, mutually-agreed effects leads to velocity profile deformation, such that it becomes asymmetric with respect to the axis in the region, where its value is settled, and the nonuniqueness of the Reynolds-number dependence of the jet radius. The results of an experimental investigation of the dependence of the steady radius of highly viscous jets on the outflow velocity are for the first time presented for the case in which the bend flow region arises.

Keywords: capillary fluid dynamics, viscous jets, spontaneous jet bending, self-induced capillary breakdown.