УДК 532.536

ВИЗУАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ МИКРОСТРУИ В УЗКОМ КАНАЛЕ

Перепелица Б.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

Грант РФФИ 12-08-00257-а «Экспериментальное исследование течения мини- и микроструй в компактных устройствах».

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты визуальных исследований структуры потока при течении затопленной круглой микроструи в узком канале. Исследования выполнены при ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения. По данным фото и видео регистрации картины течения были выявлены характерные особенности режимов течения струи в узком плоскопараллельном канале. В потоке обнаружены характерные крупномасштабные вихревые структуры и зоны с интенсивным турбулентным перемешиванием. Показано, что переход от ламинарного режима течения струи к турбулентному режиму связан как с развитием варикозной и синусоидальной мод неустойчивости, так возможны и другие сценарии развития возмущений. Ламинарный и переходной режим течения характеризуется значительным ростом длины ламинарной зоны струи от числа Re. Для турбулентного режима течения эта зависимость менее выражена и длина ламинарной зоны струи уменьшается с ростом числа Re. Установлено, что фронт растекания жидкости на определенном расстоянии от ядра струи принимает форму круга, т.е. радиальная составляющая фронта растекания по всему периметру круга постоянная.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время интерес к изучению микротечений значительно возрос, что связано с развитием принципиально новых технологических устройств макро и микроразмеров. Исследование микрогидродинамики в мини- и микроканалах на фоне общей миниатюризации технических устройств играет определяющую роль при создании различных новых технологий. Небольшие размеры таких устройств и высокие коэффициенты параметры тепло и массообмена в них привлекают к ним большое внимание. Появилась возможность использования микроструй в таких процессах как микроохлаждение электронных устройств, микрообработка, производство нанопорошков, перемешивание микрообъемов растворов в химической и биологической промышленностях и т.д. В настоящее время количество работ по исследованию мини- и микроструй весьма ограниченно. Одной из причин сравнительно небольшого количества работ в этой области связано со сложностью экспериментальных измерений высокой точности в небольших устройствах сложной формы. Основными экспериментальными методиками, используемыми в работах по исследованию мини- и микротечений, были визуализация картины течения и измерения поля скорости с помощью термоанемометра и оптического метода PIV.

Одни из первых работ посвященных экспериментальному изучению устойчивости микроструи при малых числах Re, являются работа Viilu A., Reynolds A.J. и Becker H.A., Massaro T.A. В работах исследовалось течение затопленой свободной струи с выходным диаметром струи d_0 варьируемым в диапазоне от 130 до 450 мкм. В зависимости от сценария развития возмущений в струе автор классифицирует течение на четыре режима: устойчивое, течение с небольшим запасом устоичивости, течение близкое к устойчивому течению и неустойчивое течение. В работе Becker H.A., Massaro T.A., исследовалась микроструя жидкости с выходным диаметром d_0 = 350 мкм, при низких числах Рейнольдса, диапазон чисел Рейнольдса составлял от 10 до 300. В работе

более детально описаны пять видов возмущений возникающих в струе: a) возмущения порождаемые сдвигом, b) симметричные возмущения, соответствующие варикозной моде неустойчивости, c) синусоидальные возмущения, соответствующие антисимметричной моде, d) синусоидальные возмущения, приводящие к распаду струи в дальней области e) возмущения, возникающие случайным образом приводящие к распаду струи. Авторы указывают на наличие значительно затянутого ламинарного участка струи. О наличии аномального продолжительного ламинарного участка в микроструях свидетельствуют и ряд других работ [1-6]. Авторами работы [7] высказывается предположение, что наличие затянутого ламинарного участка в микроструе обуславливается наличием параболического профиля скорости на срезе сопла, вследствие чего неустойчивость Кельвина – Гельмгольца не развивается. В этих работах проводится детальное изучение круглых и плоских дозвуковых микроструй в поперечном акустическом поле. Показано, что характеристики восприимчивости ламинарной и турбулентной струй к акустическим возмущениям близки. Установлено, что изменение начальных условий формирования круглой ламинарной струи, а именно формирование на срезе сопла параболического профиля средней скорости, приводит к появлению области чисто ламинарного течения в струе, протяженность которой превышает десять калибров. Визуализационное исследование истечения плоской турбулентной струи в ячейке Хил – Шоу было проведено в работе [8] при следующих параметрах глубина ячеки Хил-Шоу h = 680 мкм и ширина сопла d = 6 мм. Авторами данной работы представлены картины течения, полученные с помощью визуализации, а также проведено сравнение с расчетом. В работе [9] Представлены результаты экспериментального исследования затопленных дозвуковых струй воздуха, истекающих из осесимметричных и плоских каналов в диапазоне чисел Рейнольдса 100−6000. Получены данные по визуализации картины течения и зоне ламинарно-турбулентного перехода. Результаты измерений сопоставлены с известными опытными данными для газовых макро- и микроструй. Показано, что координата перехода к турублентности для микроструй может достигать высоких значений, представлено обобщение опытных данных. Измерены характеристики микроструи с полностью развитыми пограничными слоями на выходе из сопла. Измерены профили скорости в ламинарной части микроструи, а так же профили скорости и турбулентных пульсаций в турбулентной области микроструи. В работе [10] сообщается о результатах визуальных исследований структуры потока, образующейся при истечении осесимметричной струи в затопленное пространство между двумя пластинами, расположенными на расстоянии h = 1.05мм. Исследования проведены в широком диапазоне чисел Рейнольдса от 160 до 10600. Наличие ограничивающих боковых стенок сильно влияет на картину течения. Анализ трековых картин течения показал большое разнообразие режимов течения с наличием характерных крупно- и мелкомасштабных структур. Ламинарный и переходной режим течения характеризуются наличием ламинарного участка струи, протяженность которого увеличивается с ростом числа Re. С ростом расхода вдоль струи начинают образовываться мелкие нестационарные вихревые структуры, которые обтекаются с внешней стороны медленным пульсирующим потоком жидкости. Расширение струи при этом незначительное. Турбулентный режим течения струи характеризуется крупномасштабными квази-двумерными структурами. Размеры и положение этих вихревых структур меняются с течением времени. Наличие затянутого ламинарного участка в микроструе предполагает существование иного сценария перехода от ламинарного режима течения к турбулентному. В настоящее время нет ответа на вопрос, почему в микроструе не происходит столь быстрого роста возмущений в слое смешения струи как в макро струе и влияние какого механизма приводит к распаду струи на столь значительном расстоянии от выхода из сопла.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальная установка представляла собой гидродинамический контур, состоящий из бака постоянного уровня, расходомера и рабочего участка. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Узкий канал, в который происходило истечение струи, представлял собой зазор между двумя стеклянными пластинами размером 220x260мм. Величина зазора (h) между пластинами составляла 0.83, 1.05 и 2мм. Все четыре боковые стенки канала были

© Перепелица Б.В.

открыты. Истечение струи происходило из 1) трубки с внешним диаметром 1.05 мм, внутренним 0.65 мм и длиною 50мм и 2) трубки с внешним диаметром 0.82 мм, внутренним 0.5 мм и длиною 55мм. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированая вода. В качестве рабочего участка исполизовался так же узкий канал изготовленный из двух стеклянных пластинок размером 110х140мм, помещенных вертикально в сосуд с водой.

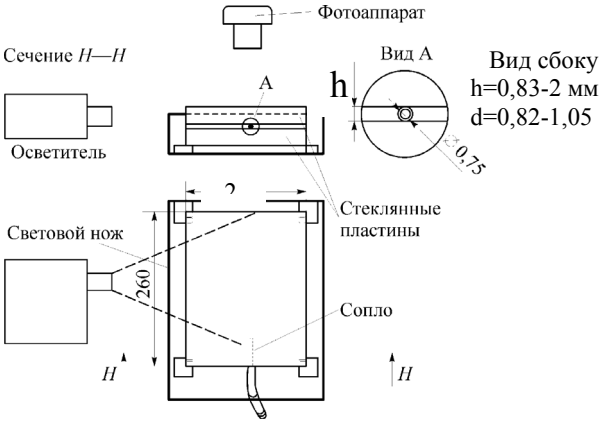

Рис.1 Схема экспериментальной установки.

В данном канале проводились визуальные исследования с использованием красителей. Расход воды через сопло поддерживался постоянным с помощью бака постоянного уровня. Средняя расходная скорость струи на выходе из сопла изменялась от 0.2 до 13.5 м/сек. Исследования проведены в диапазоне чисел Рейнольдса от 160 до 10600 (Re = WD/ν, где W - средняя расходная скорость, D - внутренний диаметр трубки, ν – кинематическая вязкость жидкости). Визуализация картины течения осуществлялась путем фото и видео регистрации картины течения. Для регистрации развития течения струи и ее структуры в жидкость добавлялись светорассеиваюшие частицы и краситель. Краситель использовался при исследовании эвалюционного процесса развития ламинарной круглой струи и механизма ее турбулизации. Зона наблюдения в случае горизонтально расположенного рабочего участка освещалась галлогеновой лампой накаливания с помощью «светового ножа». Для визуализации потока в воду добавлялись светорассеивающие алюминиевые частицы либо полистироловые шарики размером от 3 до 20 микрон. В этом случае достаточно длительная выдержка при съемке позволяла выделить траектории освещенных частиц на черном фоне и проанализировать осредненное течение и структуру потока. Анализ фотографий картины течения показал наличие характерных крупно- и мелкомасштабных движений и позволил выделить различные вихревые структуры. При исследовании картины течения с помощью видеокамеры окрашенная струя жидкости втекала в чистую воду или наоборот. Освещение подбиралось внешнее. Видеосьемка проводилась с частотой 50 кадров в секунду. Исследования проводились в диапазоне чисел Re от 100 до 5 000. Полученные распределения интенсивности красителя регистрировались на цифровую видеокамеру. Полученные таким образом яркостные картины течения представляли собой распределения красителя, осредненного по глубине канала. В ходе проведенного визуализационого исследования были получены серии изображений распределения красителя в потоке через 20 милисекунд.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Характерные фотографии потока при различных числах Рейнольдса приведены на рис. 2-6. Как для ламинарного, переходного режимов течения, так и для турбулентного, наблюдаются следующие характерные особенности потока. По обе стороны от струи на ее выходе из сопла образуются вращающаяся в противоположных направлениях пара вихрей (диполи) разделенных ядром струи. При ламинарном режиме течении струя на определенном расстоянии от сопла веерообразно растекается во все стороны. При небольших числах Re струя растекается на расстоянии 1-2 см от среза сопла (Рис 2). Течение стационарно во всей области. В нижней части веера линии тока резко меняют направление. Жидкость начинает течь в противоположном направлении, затем линии тока еще раз резко изгибаются и жидкость снова подхватывается струей. Происходит захват жидкости круглой струей. По бокам струи образуется пара вихрей, жидкость из которых практически не выносится. С ростом расхода начинают образовываться нестационарные вихревые структуры, которые обтекаются с

внешней стороны медленным пульсирующим потоком жидкости. В этом случае вокруг струи начинают образовываться мелкие вихревые структуры. Струя, как бы, покрывается чешуей. Расширение струи при этом незначительное. На Рис. 3 представлены мгновенные картины течения струи в узком канале при переходном режиме течения и приведены различные варианты развития неустойчивости.

Для исследования динамики эволюции струи в целом, вихрей, их взаимодействия междй собой проводилась запись этих процессов на видеокамеру. Картины получены при помощи визуализции краской, частота съемки 50 Гц. Увеличение расхода приводит к возникновению отчетливо видимых на кадрах видеосьемки быстрорастущих синусоидальных возмущений и формирования неустойчивого режима течения струи. В представленных визуализациях явно заметна начальная ламинарная зона, с длиной около 40 калибров. А так же показано развитие различных форм неустойчивости в ламинарной струе в начальных сечениях.

Расположение данных областей зависит от отношения между инерционными силами и силами вязкости в струе. С увеличением числа (Re=450) область струйного течения увеличивается и струя становится неустойчивой. При дальнейшем увеличении расхода (Re = 700) в струе возникают возмущения, которые приводят к калебаниям струи и ее развалу в конечной области. Колебания струи обусловлено развитием синусоидальной моды неустойчивости. С ростом числа Рейнольдса амплитуда этих колебаний растет и начинается появление различных вариантов развития неустойчивости. В дальнейшем развитии начинает преобладать синусоидальная неустойчивость, которая, в результате, приводит к разрушению ламинарной струи. Можно наблюдать различные варианты развития неустойчивости - синусоидальной, варикозной и перемежающей. На Рис.3а показано развитие случайного турбулентного воз-

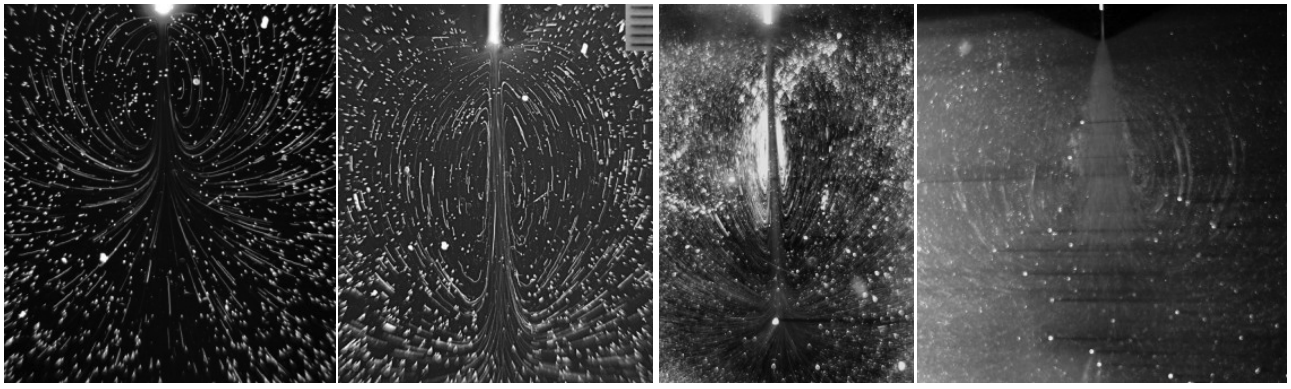

Рис.2 Картины течения микроструи при ламинарном и турбулентном режимах течения а), б), - (h = 1,05, d = 0.65, a) Re = 160, b) Re = 380) c), д), - (h = 0.82, d = 0.55, a) Re = 480, b) Re = 4080).

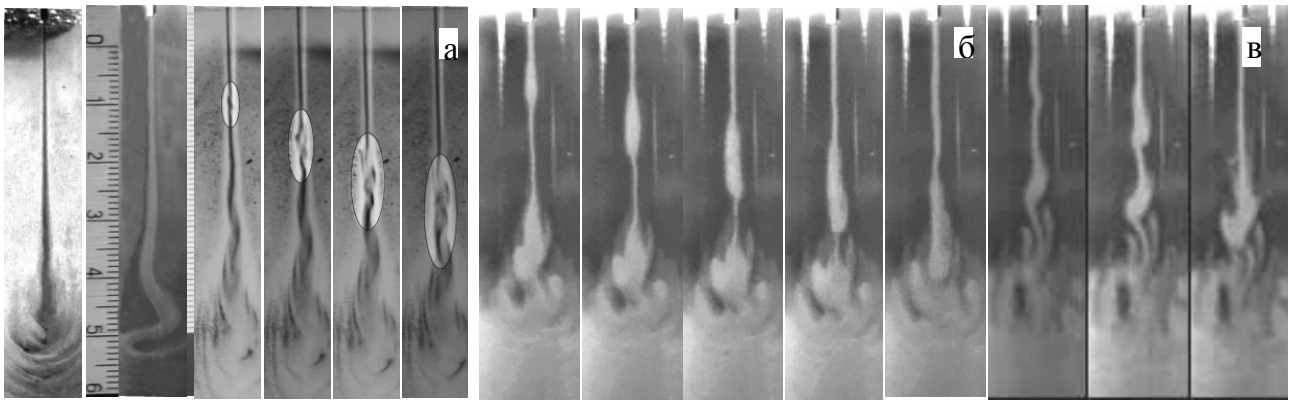

Рис.3 Различные варианты развития возмущений в микроструе в узком канале.

мущения во времени. Турбулентное возмущение довольно быстро разрастается в размере вниз по потоку. Наблюдаются и другие известные варианты развития неустойчивости течения струи. На Рис.3б приведен вариант симметричной (варикозной) неустойчивости, а на Рис.3в – несимметричной (синусоидальной) неустойчивисти. Скорость струи при возникновении таких возмущений составляет около 50см/сек. Во всех рассматриваемых случаях в низовье струи образуется область большого размера с интенсивным перемешиванием, что будет приводить к повышенному локальному теплообмену. Турбулизация струи инициирована различными пульсациями скорости, которые были первоначально слабыми, но затем усиливались вниз по потоку. С ростом расхода дальнобойность струи возрастает, и у ее устья начинают образовываться нестационарные вихревые структуры, которые обтекаются с внешней стороны медленным пульсирующим потоком жидкости (Рис.4).

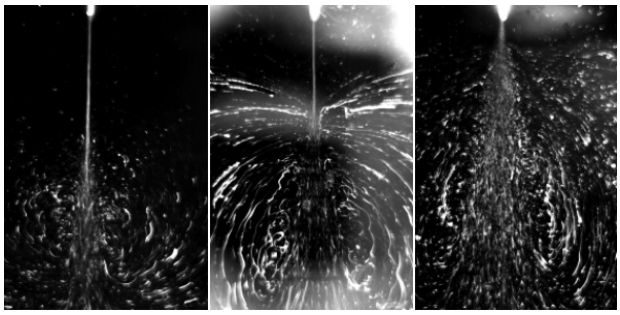

Рис.4 Картины течения микроструи в узком канале при переходном и турбулентном режиме течения.

В этом случае вокруг струи начинают образовываться мелкие вихревые структуры. Струя, как бы, покрывается чешуей. Расширение струи при этом незначительное. Иная картина течения наблюдается при турбулентном режиме истечения струи. При небольших числах Рейнольдса струя сохраняет достаточно продолжительный ламинарный участок, после которого начинается участок турбулентного струйного течения с наличием мелкомасштабных вихревых структур и образованием крупномасштабных вихрей по бокам струи. Размеры и положение этих вихревых структур меняется с течением времени (Рис.5). Как и в ламинарном режиме, эти структуры с внешней стороны обтекаются медленным внешним потоком, который замыкается на струю. В области образования этих вихревых структур ядро струи сужается и принимает извилистую форму. При высоких числах Рейнольдса (Re = 10600) происходит образование нескольких вихревых структур вниз по потоку. Положение этих вихрей изменяется со временем.

Струя начинает расширяться сразу по выходу из сопла по линейному закону. Угол расширения струи составляет 25 градусов. Ниже по потоку образуется характерная дорожка вихревых структур большего размера с высоким уровнем турбулентных пульсаций.

Визуализация картины течения показывает, что фронт растекания жидкости на определенном расстоянии от ядра струи принимает форму круга, т.е. радиальная составляющая фронта растекания по всему периметру круга постоянная. (Рис.6). Таким образом, средняя радиальная составляющая растекания фронта

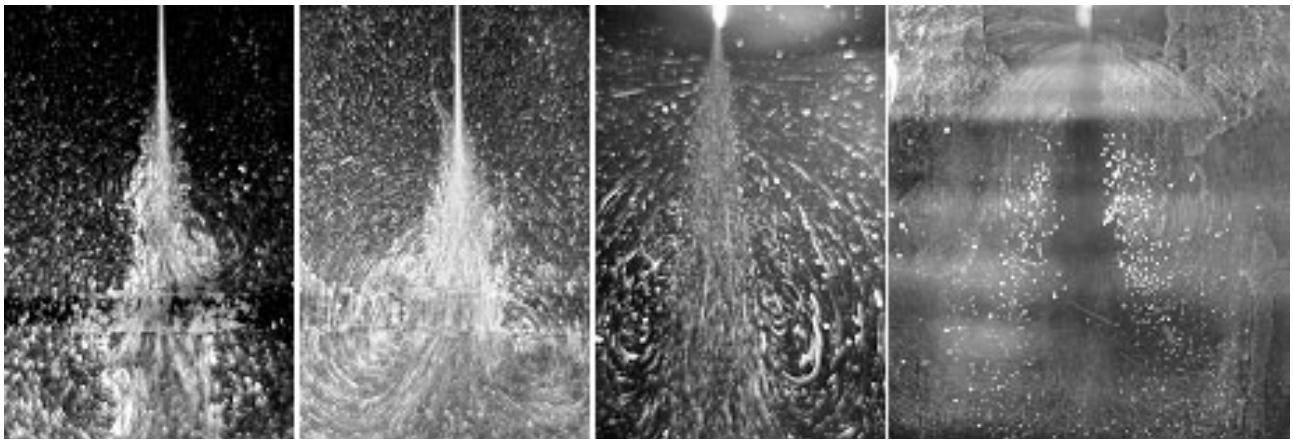

Рис.5 Картины течения микроструи в узком канале при турбулентном режиме течения (Re 1480 – 6200).

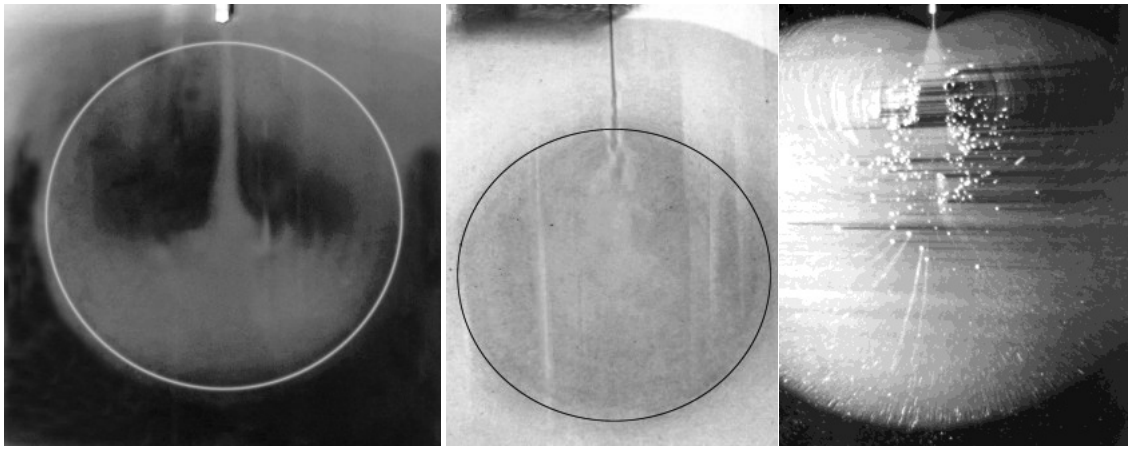

Рис.6 Картины течения микроструи в узком канале при лиминарном и турбулентном режимах течения (образование круга на переферии).

жидкости равна Q/2πR*h, т.е. убывает обратно пропорционально расстоянию от центра круга. Подобно этому, при растекании струи в большом обьеме, на определенном удалении от ядра струи, может формироваться шар с равной радиальной составляющей скорости. Для понимания особенностей течения затопленной струи в узкой щели требуется детальное измерение поля скорости во всех обнаруженных характерных областях потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования течения круглой микроструи в узкий канал были выявлены основные характерные режимы течения; ламинарный, ламинарный с двумерными вихревыми структурами, переходной режим и турбулентный режим течения. При ламинарном режиме течения поле течения струи в узком канале можно разделить на две области: инерционая область с возвратными течениями и область вязкого течения. Показано, что, начиная с числа Re 450, струя становится неустойчивой и возникают различного вида возмущения. Развитие синусоидальной неустойчивости приводит к формированию вихревых структур. Основной особенностью течения микроструи в узком канале является продолжительный ламинарный начальный участок струи. Переходной режим течения характеризуется распадом струи вследствие внезапной потери устойчивости. Переход к турбулентному режиму течения, сопровождается интесивным вовлечением внешней жидкости в ядро струи и ее распадом. С увеличением числа Ренольдса при турбулентном режиме течении, длина ламинарного участка струи уменьшается и точка распада струи приближается к соплу. Установлена следующая закономерность растекания жидкости на переферии. Жидкость растекается по кругу за исключением небольшой области около сопла. Таким образом, средния радиальная составляющая скорости растекания фронта жидкости равна Q/2πR*h. Подобно этому, при растекании круглой струи в большом обьеме на определенном удалении от нее может формироваться шар с равной радиальной составляющей скорости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gau, Shen C. H., Wang, Z. B. (2009), “Pecu-liar Phenomenon of Micro-Free-Jet Flow”, *Physics of Fluids*., Vol. 21,. No. 092001,. pp. 1–13.
2. C. J. Chang , C. H. Shen & Chie Gau (2013) Flow and Heat Transfer of a Micro Jet Impinging on a Heated Chip: Part I—Micro Free and Impinging Jet Flow, Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering, 17:1, 50-68,

© Перепелица Б.В.

3. C. J. Chang , H. T. Chen & Chie Gau (2013) Flow and Heat Transfer of a Microjet Impinging on a Heated Chip: Part II — Heat Transfer, Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering, 17:2, 92-111.
4. C. Gau, C.H. Shen, and Z.B. Wang, Peculiar Phenomenon of Micro-Free-Jet Flow, Physics of Fluids, Vol. 21, No. 9, Art no. 09 2001, 2009.
5. Koller-Milojevic D., Schneider W. Free and confined jets at low Reynolds numbers// Fluid Dynamics Research. – 1993 – 12. – pp. 307-322.
6. Dracos, T., Giger, M., and Jirka, G.H. Plane Turbulent Jets in a Bounded Fluid Layer // Journal of Fluid Mechanics. – 1992. – Vol. 241.P.587-614.
7. V. V. Kozlov, G. R. Grek, Yu. A. Litvinenko, et al., Vestn. NGU 5 (2), 28 (2010).
8. В. Д. Жак, В. А. Мухин, В. Е. Накоряков, С. А. Сафонов. Распространение затопленной струи в узкой щели.// ПМТФ. –1985 – Том 151. – № 3.
9. Lemanov V. V., Terekhov V. I., Sharov K. A., and A. A. Shumeiko A. A. An Experimental Study of Submerged Jets at Low Reynolds Numbers, ISSN 1063_7850, Technical Physics Letters, 2013, Vol. 39, No. 5, pp. 421–423.
10. Perepelitsa B.V. and Shestakov M.V. Spatial structure of the flow at round jet out flow into a narrow channel.// Thermophysics and Aeromechanics, 2009, Vol. 16, No. 1, pp. 226-229.