

УДК 532.52; 532.5.013.4
DOI: 10.15372/PMTF202315353

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ И ДРОБЛЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ КОАКСИАЛЬНОЙ МИКРОСТРУИ

М. Н. Рябов, О. А. Гобызов, Р. Х. Абдрахманов, А. В. Бильский

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mails: mihamach@mail.ru, Oleg.a.g.post@gmail.com, abrio fh@mail.ru, bilsky@itp.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования распада струи, состоящей из двух соосных струй несмешивающихся жидкостей, при вариации расходов фаз. В качестве рабочих жидкостей использовались дистиллированная вода и смесь полиметилсилоксанов. Определены режимы распада струи и типы образующихся капсул, а также размеры однокамерных капсул, образующихся под действием капиллярной неустойчивости. Измерены собственные частоты поверхностной неустойчивости.

Ключевые слова: коаксиальная струя, несмешивающиеся жидкости, неустойчивость Рэлея — Плато, разрушение струи

Введение. Струйные течения встречаются во многих технологических процессах, а их исследованию посвящено большое количество работ в области механики жидкости и газа. Закономерности истечения и разрушения струй однородных жидкостей изучены достаточно хорошо, в то время как исследование более сложных конфигураций струйных течений, в том числе струй неньютоновских жидкостей и двухфазных струй, продолжается. В настоящей работе проводится исследование истечения двухфазной коаксиальной струи из двухконтурного микросопла. В англоязычной литературе такие течения часто называются композитными либо составными струями. Составная струя, представляющая собой многофазное течение, образована двумя или более совместно движущимися фазами. В отличие от течений в каналах, в том числе в микроканальных устройствах [1, 2], в которых течение ограничено стенками канала, на внешней границе струи формируется свободная поверхность. В этом случае имеет место течение с двумя поверхностями раздела: жидкость — жидкость и жидкость — газ (рис. 1). Подобные течения встречаются при производстве оболочек и капсул для фармацевтики и медицины [3, 4], а также при создании скаффолдов для выращивания тканей и функциональных материалов [5, 6]. Кроме того, рассматриваемые течения находят применение в аддитивных технологиях с использованием композитных полимерных чернил [7, 8]. В указанных областях в основном применяются микроструи, для которых характерны низкие скорости и ламинарный режим течения. Для повышения эффективности этих и ряда других технологий актуальными являются исследования, в которых определяются основные закономерности, проявляющиеся в процессах истечения и разрушения составных струй. К числу основных характеристик истечения относятся длина струи до начала распада, размеры образующихся капель и характерные частоты отрыва капель. Определение длины струи необходимо для задания рабочих

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 21-19-00732).

© Рябов М. Н., Гобызов О. А., Абдрахманов Р. Х., Бильский А. В., 2024

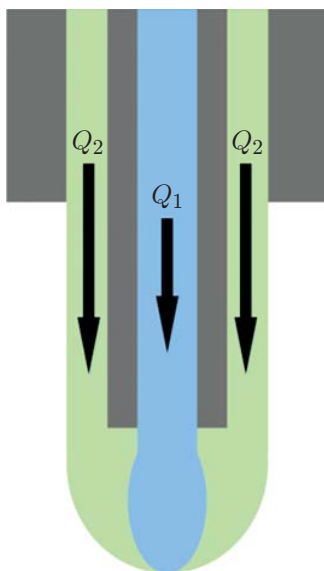


Рис. 1. Схема истечения составной струи из двухконтурного коаксиального сопла (Q_1 , Q_2 — расходы жидкости через аксиальный и аннулярные каналы соответственно)

расстояний между распыляющим устройством и подложкой; размеры образующихся капель задают характерные масштабы печатаемых структур; частоты отрыва позволяют определить временные масштабы осаждения материала, а также управлять размерами образующихся капель путем наложения внешних периодических возмущений [9].

Для струй характерны несколько типов неустойчивости, приводящих к их возмущению и распаду. Изгибная неустойчивость [10] проявляется в отклонении траектории струи от прямолинейной. При наличии малых возмущений на межфазных границах могут развиваться неустойчивости Кельвина — Гельмгольца [11], Рэлея — Тейлора [12] и Рэлея — Плато [13]. Неустойчивость первого типа проявляется при наличии больших поперечных градиентов продольной компоненты скорости. Неустойчивость Рэлея — Тейлора реализуется, как правило, при наличии ускорения, направленного от одной фазы к другой по нормали к межфазной поверхности. Неустойчивость третьего типа, являющаяся капиллярной неустойчивостью более общего типа, возникает под действием сил поверхностного (межфазного) натяжения и может наблюдаться на двух поверхностях коаксиальной составной струи. Под действием этой неустойчивости в случае одной границы раздела амплитуда возмущений на межфазной поверхности увеличивается, что в конечном счете приводит к распаду струи на отдельные капли. Исследованию таких процессов посвящены фундаментальные теоретические работы Рэлея [14], К. Вебера [15] и С. Томотики [16]. В [14] получено дисперсионное соотношение, связывающее длину волны распространяющейся неустойчивости и инкремент нарастания ее амплитуды, без учета влияния вязкостей фаз. В работе [15] исследовано развитие неустойчивости струи с учетом вязкости. В [16] рассмотрено развитие неустойчивостей на цилиндрической поверхности, разделяющей две жидкие фазы с различной вязкостью.

Характеристики процесса истечения струй в пространство, заполненное другой жидкостью, изучались в работах [17, 18]. В [17] определены основные режимы распада струй, их длина до распада и характеристики образующихся капель при вариации расхода дисперсной фазы для различных пар несмешивающихся жидкостей. В работе [18] изучалась устойчивость струй в спутном потоке жидкости при различной относительной скорости

фаз. Рассматривался ламинарный режим распада струи. Обнаружено, что значения длины струй и диаметра образующихся капель хорошо согласуются с соответствующими значениями, полученными в результате анализа неустойчивости в случае одинаковых скоростей струй, и различаются в случае истечения струи в неподвижную среду.

Количество работ, посвященных экспериментальному исследованию составных, в частности коаксиальных, струй, сравнительно невелико, что, вероятно, обусловлено сложностью их формирования и исследования. В работе [19] изучен распад составной струи на отдельные капли, определены основные режимы распада струи и условия, при которых происходит развитие синусоидальных и варикозных неустойчивостей. Расход несущей среды (внешняя фаза) не задавался и полностью определялся расходом дисперсной (внутренней) фазы: внешняя фаза увлекалась потоком внутренней (изначально затопленной) фазы. В работе [20] изучен процесс образования оболочек, заполненных газом, при вариации расхода и определены частоты образования структур ядро — оболочка (капсул, заполненных газом). Показано, что с увеличением расхода осевой фазы частота образования капсул возрастает.

В работах [21, 22] численно исследовались процессы истечения и разрушения составной коаксиальной струи в спутном потоке жидкости. Получены зависимости длины участка устойчивости струи и характерного времени формирования капель от ряда параметров, включая числа Вебера и Рейнольдса, отношение скоростей осевой и кольцевой фаз (при фиксированной скорости спутного потока) и т. д.

В указанных выше работах выделяются два основных режима истечения струи: капельный и струйный, главное различие которых заключается в том, что в капельном режиме формирование составных капель (капсул) начинается непосредственно за срезом сопла, в то время как в струйном режиме формирование капель происходит на значительном расстоянии от сопла, а между срезом сопла и областью формирования капель образуется коаксиальная струя. Также отмечается, что переход от капельного режима к струйному имеет непрерывный характер, при этом реализуются промежуточные капельно-струйные режимы.

Следует отметить, что численные и экспериментальные исследования составных струй в основном проводились при сравнительно малых числах Рейнольдса и Вебера, а исследуемые режимы течения были близки к режиму перехода от капельного течения к струйному. Например, в [20, 21] числа Рейнольдса и Вебера, рассчитанные по радиусу осевого канала и параметрам жидкости осевой фазы, составляли соответственно

$$\text{Re}_1 = \frac{\rho_1 v_1 D_1}{\mu_1} < 150, \quad \text{We}_1 = \frac{\rho_1 v_1^2 D_1}{\sigma_1} < 20.$$

В данной работе рассматривается процесс ламинарного истечения и распада составной струи со свободной границей при различных значениях расходов фаз. Основными измеряемыми в экспериментах характеристиками струи были длина струи до распада, частота образования однокамерных составных капель (капсул) и их диаметры. Кроме того, рассматривались режимы распада струи и типы образующихся многокамерных капсул. Особенностью данной работы является исследование течения при сравнительно больших числах Рейнольдса и Вебера, а также значительное различие вязкостей осевой и кольцевой фаз. Такие условия истечения имеют практическое значение. Типичной прикладной задачей является заключение менее вязкого материала (например, действующего вещества в медицине или наполнителя при создании сложноструктурированных материалов) в оболочку из более вязкого материала.

1. Экспериментальный стенд и измерительная система. Для формирования составных струй было спроектировано двухконтурное коаксиальное микросопло. Рабочая

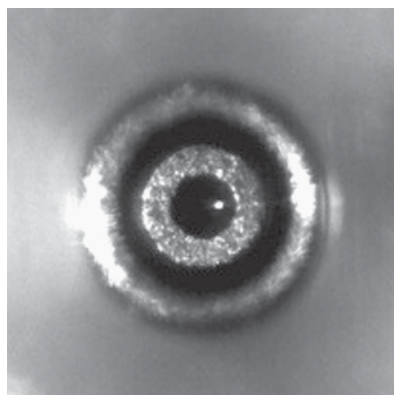


Рис. 2. Фронтальное изображение сопла

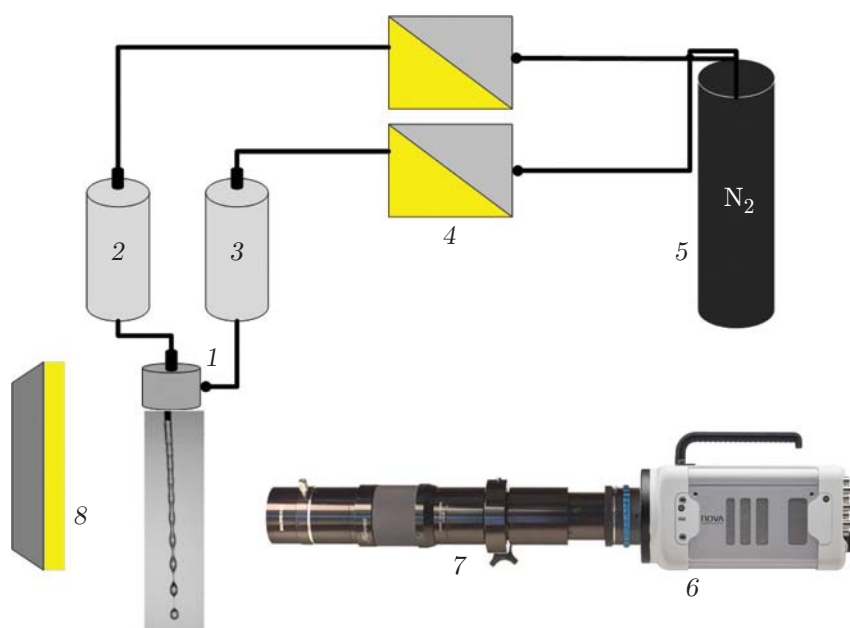


Рис. 3. Схема экспериментального стенда:

1 — сопло, 2, 3 — напорные баки, 4 — регуляторы давления, 5 — питающий баллон, 6 — КМОП-камера, 7 — длиннофокусный микроскоп, 8 — диодный осветитель

часть сопла представляет собой пару соосно установленных игл из нержавеющей стали с плоским срезом. Диаметр внутреннего (аксиального) канала равен $d_1 = 200$ мкм, внешний диаметр внешнего (аннулярного) канала — $d_2 = 600$ мкм, ширина зазора — 100 мкм. Игла внутреннего канала устанавливалась в позиционирующее устройство, позволяющее задавать высоту и положение оси в плоскости среза. Погрешность установки внутреннего канала относительно внешнего составляла 5 мкм. Фронтальное изображение среза сопла представлено на рис. 2. Срез аксиального канала устанавливался на расстоянии от среза аннулярного канала, приближенно равном одному калибру внутреннего канала, с целью исключения взаимного влияния расходов фаз.

Принцип работы сопла заключается в независимом вытеснении жидкостей в аннулярный и аксиальный каналы из напорных питающих баков (рис. 3). Вытеснение осуществлялось путем подачи в напорные баки малорастворимого газа (технический азот), давление вытеснения задавалось парой прецизионных контроллеров-регуляторов давле-

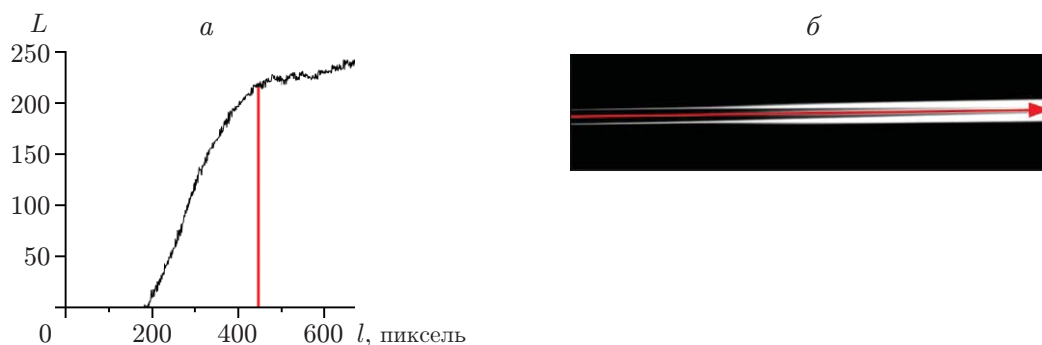


Рис. 4. Среднеквадратичное отклонение (а) и распределение (б) яркости изображения вдоль оси струи l

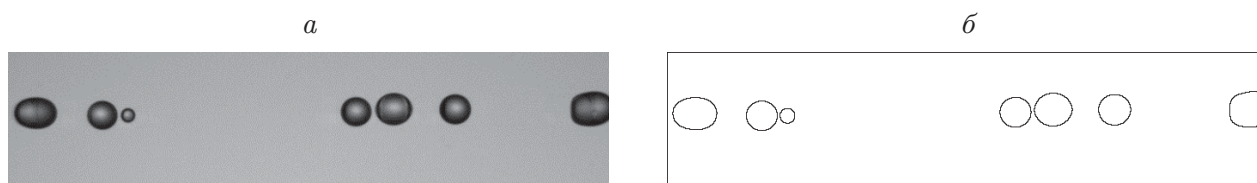


Рис. 5. Изображения капель до обработки (а) и после обработки (б)

ния Bronkhorst El-Press, подключенных к общему питающему баллону через фильтры-редукторы и управляемых с помощью компьютера.

В качестве основной методики исследований использовалась высокоскоростная тепловая визуализация с большим оптическим увеличением. Применяемая оптическая схема позволила визуализировать процессы распада струи и определить положение межфазных границ в образующихся капсулах. Регистрация изображений велась с помощью КМОП-камеры (КМОП — комплементарная структура металл — оксид — полупроводник) Photron Nova S12 (разрешение 23 мкм/пиксель). Фокусировка изображения проводилась длиннофокусным микроскопом Infinity Distamax K2. Диодный осветитель, оснащенный линзой Френеля, использовался для создания фоновой подсветки в непрерывном режиме работы. Для каждого режима истечения съемка проводилась на двух участках: начальном участке струи (непосредственно за срезом сопла) и в области формирования капель. В каждом режиме истечения кадры регистрировались с частотой 15 кГц.

Полученные картины течения обрабатывались набором цифровых алгоритмов. Для определения длины участка, на котором разрушается струя, на изображении выделялся участок, соответствующий связной области, начинающейся от среза сопла. При различном соотношении расходов фаз длина струи варьировалась и, как правило, превышала длину области измерения. В этом случае измерительная область смещалась, и величина смещения учитывалась при определении длины. Длина участка устойчивости струи определялась по стандартному отклонению значения яркости от среднего в серии изображений вдоль оси симметрии струи (рис. 4). Координата точки перегиба кривой, отвечающей уровню сигнала стандартного отклонения L , соответствовала концу участка устойчивости струи.

Для измерения размеров образовавшихся капсул применялась процедура определения замкнутых границ в области течения после распада струи. По найденным контурам восстанавливалось распределение капсул по размерам (рис. 5). Рассматривались частицы, для которых отношение полуосей находилось в диапазоне $0,8 \div 1,0$, что соответствует слабодеформированным и сферическим капсулам. Далее по распределению капель (рис. 6)

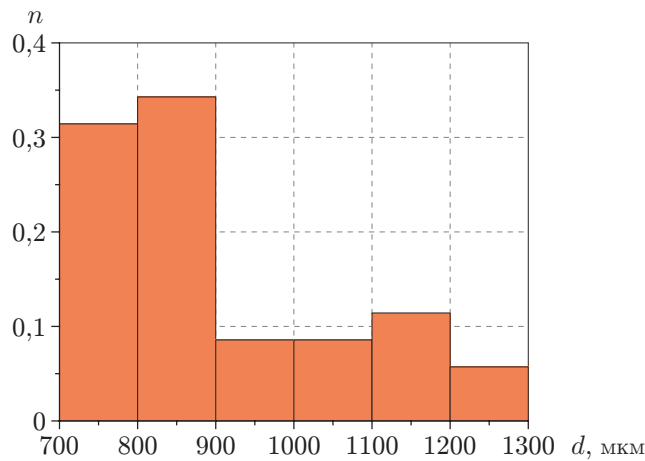


Рис. 6. Распределение капель по размерам при $Q_1 = 0,18$ мл/с, $Q_2 = 0,14$ мл/с (n — доля капель, d — диаметр капель)



Рис. 7. Область распада струи (выделенная область — область, в которой подсчитывалось количество переключений яркости)

определялось медианное значение, которое принималось в качестве характерного размера капсулы, образующейся при распаде струи. Меньшие размеры соответствовали образующимся каплям-сателлитам, бóльшие — коалесцирующим и многокамерным капсулам.

Для определения частоты образования капсул вдоль оси струи в области распада использовался встроенный в программное обеспечение PFV4 счетчик событий на изображении (рис. 7). Для этого на траектории распространения капель помещалась область, в которой подсчитывалось количество переключений яркости выше (ниже) порогового значения. По количеству событий определялась частота появления капсул, соответствующая развитию неустойчивости.

2. Рабочие жидкости и варьируемые параметры. В данной работе в качестве пары рабочих жидкостей использовались дистиллированная вода и смесь полиметилсилоксанов с различной молекулярной массой и вязкостью 100 сСт. Выбор жидкостей обусловлен возможностью изменять вязкость в широком диапазоне для физического моделирования составных течений с использованием полимерных чернил. Параметры рабочих жидкостей приведены в таблице (ρ — плотность, μ — молекулярная вязкость, $\sigma_{\text{п}}$, $\sigma_{\text{м}}$ — поверхностное и межфазное натяжения).

Регулируемыми параметрами являлись задаваемые независимо расходы жидкостей через аксиальный (Q_1) и аннулярный (Q_2) каналы. Построены зависимости расхода жид-

Рабочая жидкость	ρ , кг/м ³	μ , сСт	$\sigma_{\text{п}}$, мН/м	$\sigma_{\text{м}}$, мН/м
Дистиллированная вода	991	1	70	35
Полиметилсилоксан	940	100	23	

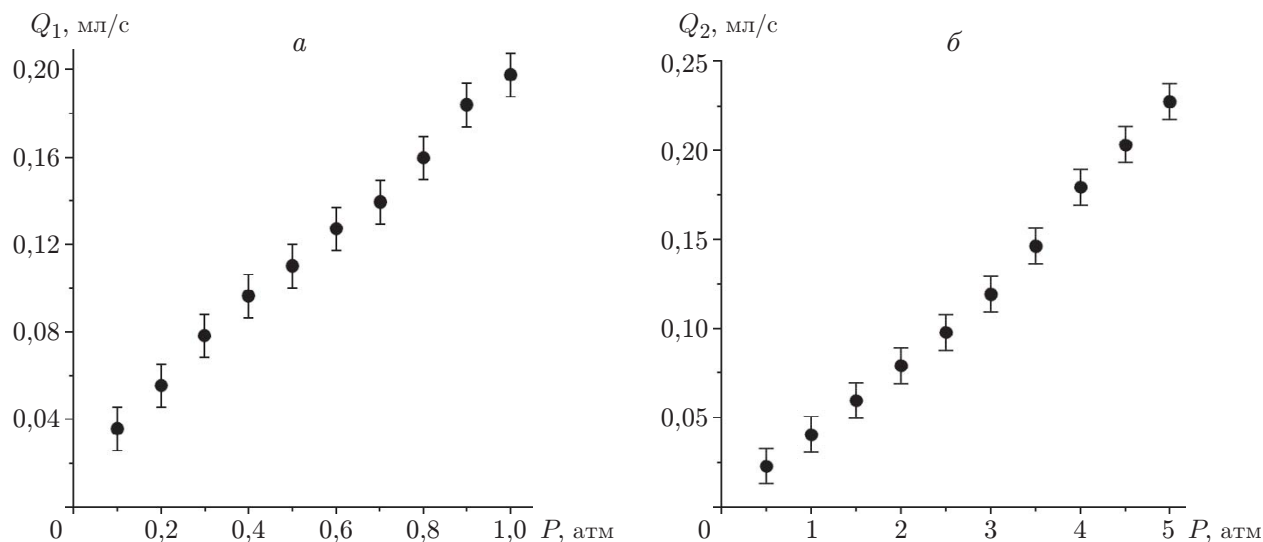


Рис. 8. Зависимости расходов фаз через аксиальный (а) и аннулярный (б) каналы от давления вытеснения P

кости от приложенного давления. Измерение расходов через контуры проводилось как при совместном истечении фаз, так и при истечении их по отдельности путем определения времени заполнения объема калиброванной тары. В случае режима совместного истечения фаз дополнительно проводилась их сепарация. Сравнение результатов измерений в случае совместного истечения фаз и истечения одной фазы показало, что они хорошо согласуются. Это позволяет сделать вывод об отсутствии взаимного влияния расходов фаз. Погрешность определения расхода составляла приблизительно 10 %. Калибровочные кривые для фаз, истекающих по отдельности, представлены на рис. 8. Видно, что зависимость расхода от давления вытеснения является линейной.

Рабочий диапазон расходов выбирался таким образом, чтобы реализовывался ламинарный режим истечения. При $Q_1 > 0,2$ мл/с ($Re_1 = 1250$) происходила турбулизация потока и возникала изгибная неустойчивость. Отношение расходов изменялось в 10 раз и находилось в диапазоне $0,63 < Q_2/Q_1 < 6,30$. Числа Рейнольдса и Вебера, рассчитанные по характеристикам осевой фазы, находились в диапазонах $224 < Re_1 < 1250$, $3,5 < We_1 < 110,0$, при этом числа Рейнольдса и Вебера для кольцевой фазы были меньше:

$$1,5 < Re_2 = \frac{\rho_2 v_2 D_2}{\mu_2} < 8,7, \quad 1,6 < We_2 = \frac{\rho_2 v_2^2 D_2}{\sigma_2} < 52,0.$$

3. Результаты исследования. Ниже определяются параметры разрушения струи в кольцевом и струйном режимах.

3.1. Длина струи до начала разрушения. В рассматриваемом диапазоне расходов разрушение струи происходило в двух режимах: капельном и струйном. На рис. 9 представлена карта режимов распада струи, на рис. 10 — зависимость длины участка струи, на котором происходит ее распад, от соотношения расходов фаз Q_2/Q_1 . Капельный режим характерен для малых значений расходов обеих фаз. Область капельного режима ограничена диапазонами расходов $Q_1 = 0,035 \div 0,096$ мл/с и $Q_2 = 0,040 \div 0,079$ мл/с.

Анализ данных показал, что длина участка устойчивости струи возрастает с увеличением расхода как аксиальной, так и кольцевой фазы. Это можно объяснить увеличением суммарного импульса истекающей струи в обоих случаях. Полученные результаты согласуются с известными данными о длине участка струи, на котором происходит ее

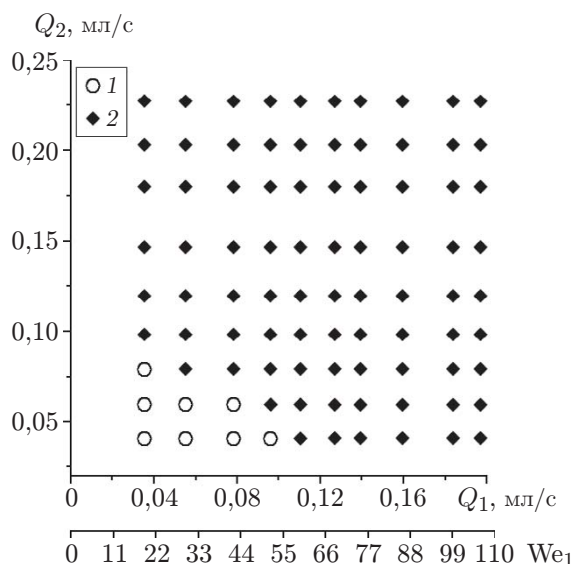


Рис. 9

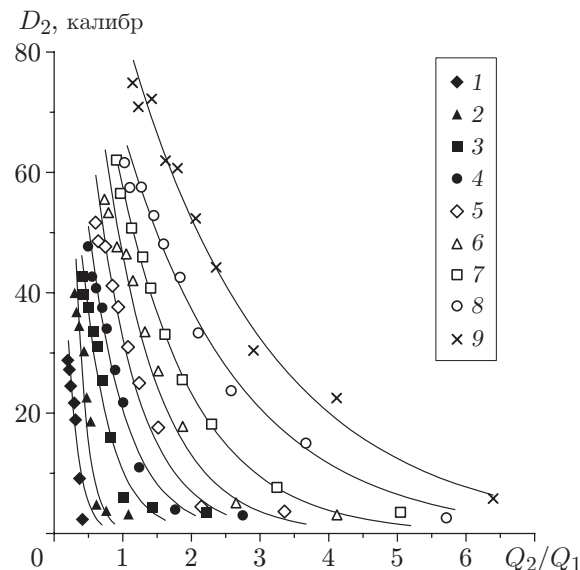


Рис. 10

Рис. 9. Капельный (1) и струйный (2) режимы истечения составной струи

Рис. 10. Зависимость длины участка устойчивости струи D_2 от соотношения расходов фаз: 1 — $Q_2 = 0,04$ мл/с, 2 — $Q_2 = 0,06$ мл/с, 3 — $Q_2 = 0,08$ мл/с, 4 — $Q_2 = 0,10$ мл/с, 5 — $Q_2 = 0,12$ мл/с, 6 — $Q_2 = 0,14$ мл/с, 7 — $Q_2 = 0,18$ мл/с, 8 — $Q_2 = 0,20$ мл/с, 9 — $Q_2 = 0,22$ мл/с

распад (см. [17]). В струйном режиме зависимость длины струи от соотношения расходов достаточно точно аппроксимируется экспоненциальной зависимостью, однако каждому значению Q_2 соответствуют свои значения коэффициента при показателе экспоненты и свободного коэффициента.

3.2. Диаметры капсул. На рис. 11 представлены результаты измерений диаметров образующихся однокамерных капсул в зависимости от диаметра струи и расхода Q_1 . Значение коэффициента пропорциональности между размерами образовавшихся однокамерных капсул и диаметром соответствующей основной струи хорошо согласуется с теоретически полученным значением коэффициента пропорциональности для длины волны неустойчивости с максимальным инкрементом нарастания. Среднее значение коэффициента пропорциональности линейной аппроксимации при различных значениях расхода Q_2 , приблизительно равное 1,04, отличается от теоретически определенного значения в случае капиллярной неустойчивости, приблизительно равного 1,89 [21].

Зависимость диаметра капсул от Q_1 достаточно точно аппроксимируется степенной функцией. Среднее значение показателя степени составило $-0,32$. Диаметр образующихся капсул уменьшается с ростом расхода аксиальной фазы Q_1 и слабо увеличивается с ростом Q_2 . Уменьшение диаметра обусловлено действием поверхностных и объемных сил на нераспавшуюся струю: ускорение струи в поле силы тяжести и силы поверхностного натяжения приводят к уменьшению площади сечения, вследствие чего изменяется диаметр образующихся капсул. Также существенное влияние оказывает ускорение аннулярной фазы за счет межфазного трения. Увеличение диаметра при увеличении расхода Q_2 объясняется увеличением объема поступающей аннулярной фазы.

Анализ экспериментально полученных изображений разрушающейся струи показал, что при распаде струи образуются как однокамерные, так и многокамерные капсулы. Выделены три режима образования капсул: 1) режим с генерацией однокамерных капсул;

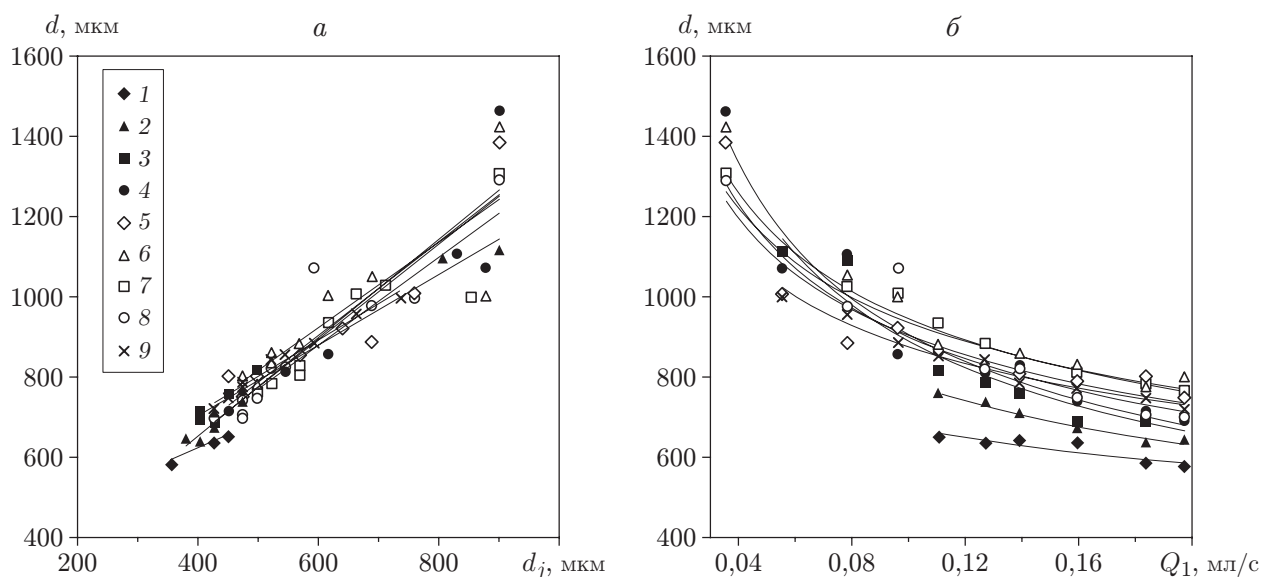


Рис. 11. Зависимости размеров капсул d от диаметра струи d_j (а) и расхода осевой фазы Q_1 (б): 1 — $Q_2 = 0,04$ мл/с, 2 — $Q_2 = 0,06$ мл/с, 3 — $Q_2 = 0,08$ мл/с, 4 — $Q_2 = 0,10$ мл/с, 5 — $Q_2 = 0,12$ мл/с, 6 — $Q_2 = 0,14$ мл/с, 7 — $Q_2 = 0,18$ мл/с, 8 — $Q_2 = 0,20$ мл/с, 9 — $Q_2 = 0,22$ мл/с

2) режим с бимодальным распределением капсул по количеству камер; 3) режим с образованием капсул с различным количеством камер (рис. 12).

В работах [21, 22] возникновение многокамерных капсул объясняется значительным различием времен формирования капель осевого и кольцевого течений: в осевой струе формируются несколько капель, которые затем инкапсулируются в крупной капле кольцевой фазы.

В описываемых в данной работе экспериментах в основном наблюдается иной режим формирования многокамерных капсул. На начальном этапе формируются однокамерные капсулы, соединенные перетяжками. В ряде случаев последовательность перетяжек связывает цепочку капель с основной струей. Далее, перетяжка может либо разрушиться, либо, наоборот, начать сокращаться и утолщаться, в результате чего разделенные перетяжкой капсулы сливаются в одну многокамерную капсулу (рис. 13, 14). Результат процесса (разделение либо коалесценция) зависит от формы и динамики отрывающихся от струи капсул, а также от баланса вязких и поверхностных сил в области перетяжки. Также следует отметить, что формирование четко выраженных протяженных лигаментов, вероятно, обусловлено относительно большой вязкостью жидкости кольцевой фазы ($\mu = 100$ сСт). Известно, что при разрушении струй вязких жидкостей формируются перетяжки большой протяженности [23, 24].

3.3. Частота образования капсул. Под частотой образования капсул понимается количество однокамерных капсул, формируемых струей за 1 с (без учета коалесценции). Число коалесцирующих и многокамерных капсул было пропорционально числу односвязных включений дисперсной фазы. На рис. 15 представлена зависимость частоты образования капсул ω от расхода аксиальной фазы Q_1 . Видно, что частота образования капсул практически не зависит от расхода аннулярной фазы Q_2 .

Анализ результатов измерений показал, что полученные собственные частоты струи достаточно точно аппроксимируются линейной функцией. Таким образом, для контроля распада составной струи необходимо задавать частоты внешних возмущений, пропорциональные расходу.

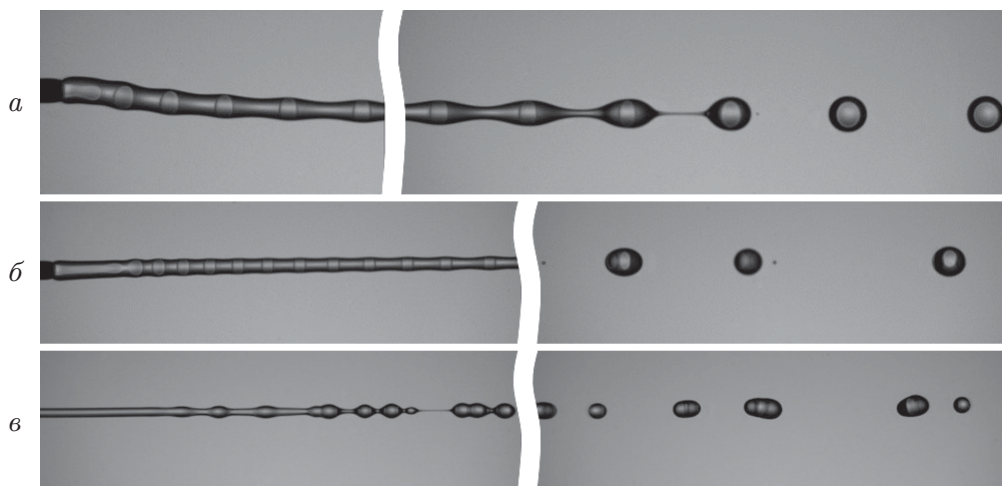


Рис. 12. Режимы формирования капсул:

a — режим 1 ($Q_1 = 0,035$ мл/с, $Q_2 = 0,2$ мл/с), *б* — режим 2 ($Q_1 = 0,05$ мл/с, $Q_2 = 0,18$ мл/с), *в* — режим 3 ($Q_1 = 0,2$ мл/с, $Q_2 = 0,12$ мл/с)

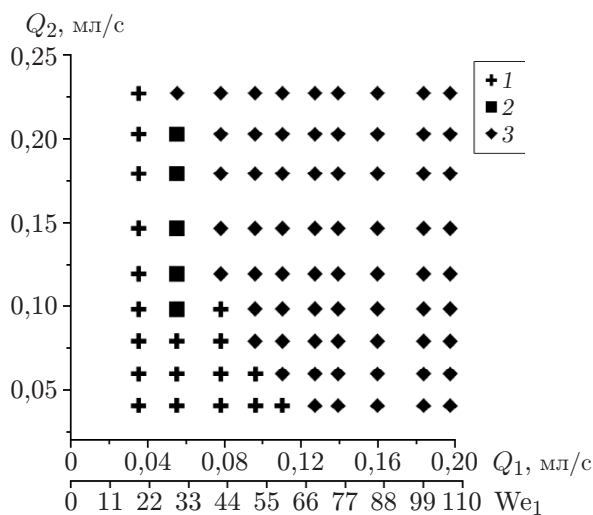


Рис. 13

Рис. 13. Режимы формирования капсул:

1 — режим 1, 2 — режим 2, 3 — режим 3

Рис. 14. Процесс коалесценции после формирования капель:

a — $t = 0$, *б* — $t = 2,7$ мс, *в* — $t = 5,7$ мс

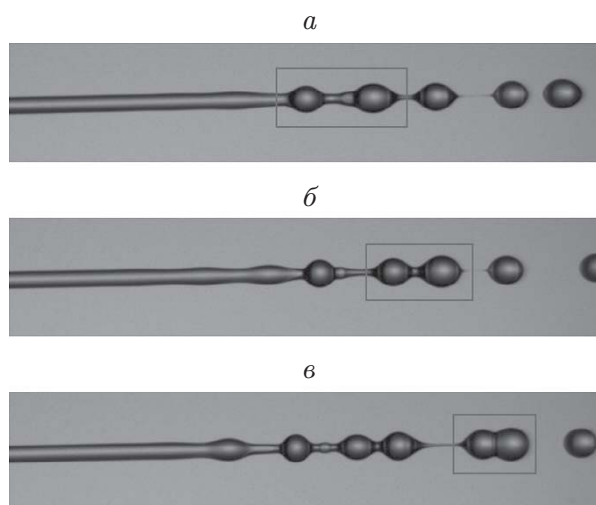


Рис. 14

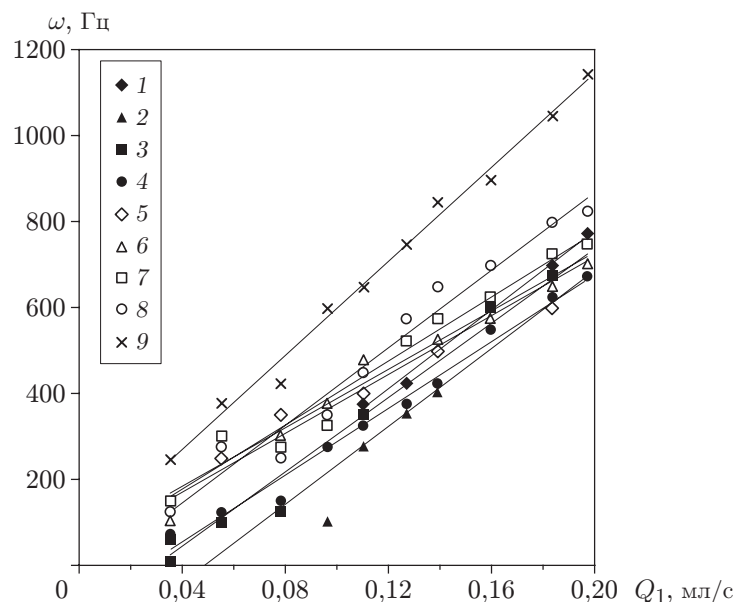


Рис. 15. Зависимость частоты образования капсул от расхода аксиальной фазы:

1 — $Q_2 = 0,04$ мл/с, 2 — $Q_2 = 0,06$ мл/с, 3 — $Q_2 = 0,08$ мл/с, 4 — $Q_2 = 0,10$ мл/с, 5 — $Q_2 = 0,12$ мл/с, 6 — $Q_2 = 0,14$ мл/с, 7 — $Q_2 = 0,18$ мл/с, 8 — $Q_2 = 0,20$ мл/с, 9 — $Q_2 = 0,22$ мл/с

Закключение. Экспериментально исследовано истечение двухфазной составной струи из коаксиального микросопла в диапазонах значений числа Рейнольдса $Re_1 = 224 \div 1250$ и числа Вебера $We_1 = 3,5 \div 110,0$, определены основные характеристики ее развития и распада. Динамика распада составной струи в исследованном диапазоне параметров определяется в основном расходом аксиальной фазы. Увеличение расхода аксиальной фазы приводит к увеличению частоты образования капель и соответствующему уменьшению диаметра составной струи, а увеличение расхода кольцевой фазы — наоборот, к уменьшению частоты образования капель (увеличению диаметра струи). Зависимость частоты образования капель от расхода аппроксимируется линейной зависимостью, зависимость размера образующихся капсул от расхода — степенной зависимостью. Устойчивый процесс генерации однокамерных капсул достигается при капельном режиме распада струи, а также при малых значениях расхода Q_1 . При умеренных и больших значениях расхода наблюдается коалесценция капсул с образованием многокамерных капсул. С увеличением расхода Q_1 частота образования капсул растет, что объясняется увеличением скорости. Воздействие поверхностного натяжения приводит к уменьшению площади сечения и уменьшению диаметра образующихся капсул, что в совокупности с постоянным расходом приводит к росту частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Utada A. S., Fernandez-Nieves A., Stone H. A., et al. Dripping to jetting transitions in coflowing liquid streams // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 99, N 9. 094502.
2. Utada A. S., Lenceau E., Link D. R., et al. Monodisperse double emulsions generated from a microcapillary device // Science. 2005. V. 308, N 5721. P. 537–541.
3. Abate A. R., Thiele J., Weitz D. A. One-step formation of multiple emulsions in microfluidics // Lab Chip. 2011. V. 11, N 2. P. 253–258.
4. Bennacef C., Desobry-Banon S., Linder M., et al. Study and optimization of core-shell capsules produced by annular jet breaking coextrusion // Colloids Surfaces A. Physicochem. Engng Aspects. 2021. V. 629. 127475.

5. **Zhang Y., Liu X., Zeng L., et al.** Polymer fiber scaffolds for bone and cartilage tissue engineering // *Adv. Funct. Materials*. 2019. V. 29, N 36. 1903279.
6. **Moroni L., De Wijn J. R., Van Blitterswijk C. A.** 3D fiber-deposited scaffolds for tissue engineering: influence of pores geometry and architecture on dynamic mechanical properties // *Biomaterials*. 2006. V. 27, N 7. P. 974–985.
7. **Li T., Zhai D., Ma B., et al.** 3D printing of hot dog-like biomaterials with hierarchical architecture and distinct bioactivity // *Adv. Sci.* 2019. V. 6, N 19. 1901146.
8. **Wang X., Jiang M., Zhou Z., et al.** 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective // *Composites. Pt B. Engineering*. 2017. V. 110. P. 442–458.
9. **Хомутов Н. А., Семенова А. Е., Белоногов М. В. и др.** Особенности разрушения микроструи разбавленного полимерного раствора на основные и спутниковые микрокапли под действием внешнего вибрационного воздействия // *Журн. техн. физики*. 2023. Т. 93, № 1. С. 37–47.
10. **Taylor G. I.** Instability of jets, threads, and sheets of viscous fluid // *Applied mechanics: Proc. of the 12th Intern. congress of applied mechanics, Stanford (USA), Aug. 26–31, 1968*. Berlin; Heidelberg: Springer, 1969. P. 382–388.
11. **Lee H. G., Kim J.** Two-dimensional Kelvin — Helmholtz instabilities of multi-component fluids // *Europ. J. Mech. B. Fluids*. 2015. V. 49. P. 77–88.
12. **Sharp D. H.** An overview of Rayleigh — Taylor instability // *Physica D. Nonlinear Phenomena*. 1984. V. 12, N 1–3. P. 3–18.
13. **Papageorgiou D. T.** On the breakup of viscous liquid threads // *Phys. Fluids*. 1995. V. 7, N 7. P. 1529–1544.
14. **Lord Rayleigh.** On the capillary phenomena of jets // *Proc. Roy. Soc. London*. 1879. V. 29, N 196–199. P. 71–97.
15. **Weber C.** Zum zerfall eines flüssigkeitsstrahles // *Z. angew. Math. Mech.* 1931. Bd 11, N 2. S. 136–154.
16. **Tomotika S.** On the instability of a cylindrical thread of a viscous liquid surrounded by another viscous fluid // *Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.* 1935. V. 150, N 870. P. 322–337.
17. **Skelland A. H. P., Johnson K. R.** Jet break-up in liquid-liquid systems // *Canad. J. Chem. Engng.* 1974. V. 52, N 6. P. 732–738.
18. **Wu W. D., Patel K. C., Rogers S., et al.** Monodisperse droplet generators as potential atomizers for spray drying technology // *Drying Technol.* 2007. V. 25, N 12. P. 1907–1916.
19. **Hertz C. H., Hermanrud B.** A liquid compound jet // *J. Fluid Mech.* 1983. V. 131. P. 271–287.
20. **Kendall J. M.** Experiments on annular liquid jet instability and on the formation of liquid shells // *Phys. Fluids*. 1986. V. 29, N 7. P. 2086–2094.
21. **Van Vu T., Homma S., Tryggvason G., et al.** Computations of breakup modes in laminar compound liquid jets in a coflowing fluid // *Intern. J. Multiphase Flow*. 2013. V. 49. P. 58–69.
22. **Van Vu T., Homma S., Wells J. C., et al.** Numerical simulation of formation and breakup of a three-fluid compound jet // *J. Fluid Sci. Technol.* 2011. V. 6. P. 252–263.
23. **Чашечкин Ю. Д., Прохоров В. Е.** Трансформации перемычки в процессе отрыва капли // *ПМТФ*. 2016. Т. 57, № 3. С. 16–31.
24. **Kowalewski T. A.** On the separation of droplets from a liquid jet // *Fluid Dynamics Res.* 1996. V. 17. P. 121–145.

*Поступила в редакцию 1/VIII 2023 г.,
после доработки — 1/VIII 2023 г.
Принята к публикации 4/VIII 2023 г.*