

УДК 533.7

## ВЛИЯНИЕ ВНЕЗАПНОГО РАСШИРЕНИЯ НА ДВУХФАЗНОЕ ТЕЧЕНИЕ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ

© 2019 г. Д. Чжанг<sup>а</sup>, А. Гоарзаде<sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup>Университет науки и технологии им. Халифа, Институт нефти, Факультет машиностроения, Абу Даби, Объединенные Арабские Эмираты

\* E-mail: agoharzadeh@pi.ac.ae

Поступила в редакцию 15.10.2017 г.

После доработки 12.07.2018 г.

Принята к публикации 24.10.2018 г.

Представлены результаты экспериментального исследования двухфазного течения жидкости и газа через внезапное расширение горизонтальной трубы. Спроектирован и изготовлен замкнутый гидравлический испытательный стенд с прозрачной секцией, предназначенный для исследования динамики снарядного (пробочного) режима потока при скачкообразном увеличении площади сечения. Характеристики горизонтальной водяной струи для одно- и двухфазного потока исследованы с использованием высокоскоростной фотографии. Скорость пузырей, измеренная в расширенной области трубы, сильно зависит от расходов как жидкости, так и газа. Явление внезапного схлопывания пузырей описано с помощью анализа фотографий и оценена толщина пленки жидкости. Построена карта режимов течения для расширения сечения трубы и приведены соответствующие картины течения. Представленные измерения обеспечивают возможность глубокого прорыва в понимании сути влияния внезапного расширения сечения трубы на поведение двухфазного газожидкостного потока.

**Ключевые слова:** двухфазное течение, внезапное расширение, визуализация потока, снарядный (пробочный) режим потока, карта режимов течения

**DOI:** 10.1134/S0568528119010171

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$C_d$	коэффициент;
$D$	внутренний диаметр трубы (м);
$g$	ускорение силы тяжести (м/с <sup>2</sup> );
$h$	толщина пленки пузырька (м);
$j$	поверхностная (приведенная) скорость (м/с);
$n$	показатель степени;
$M$	некоторая постоянная, зависящая от внутреннего диаметра трубы;
$N$	показатель преломления;
$P_{ext}$	внешнее давление в окрестности воздушного пузырька (Н/м <sup>2</sup> );
$P_{in}$	внутреннее давление воздуха в пузырьке (Н/м <sup>2</sup> );
$Q_a$	расход воздуха (м <sup>3</sup> /с);
$Q_w$	расход воды (м <sup>3</sup> /с);
$V$	скорость пузырька (м/с);
$V_a$	поверхностная скорость воздуха (м/с);
$V_w$	поверхностная скорость воды (м/с);
$v$	скорость движения разрыва пузырька (м/с);
$X$	горизонтальное расстояние от кромки выходного сечения трубки (м);
$Y$	вертикальное смещение от верхнего края трубки (м);
$\rho$	плотность жидкости (кг/м <sup>3</sup> );
$\sigma$	поверхностное натяжение на границе между водой и воздухом (Н/м <sup>2</sup> );
$\sigma_A$	отношение площадей.

---

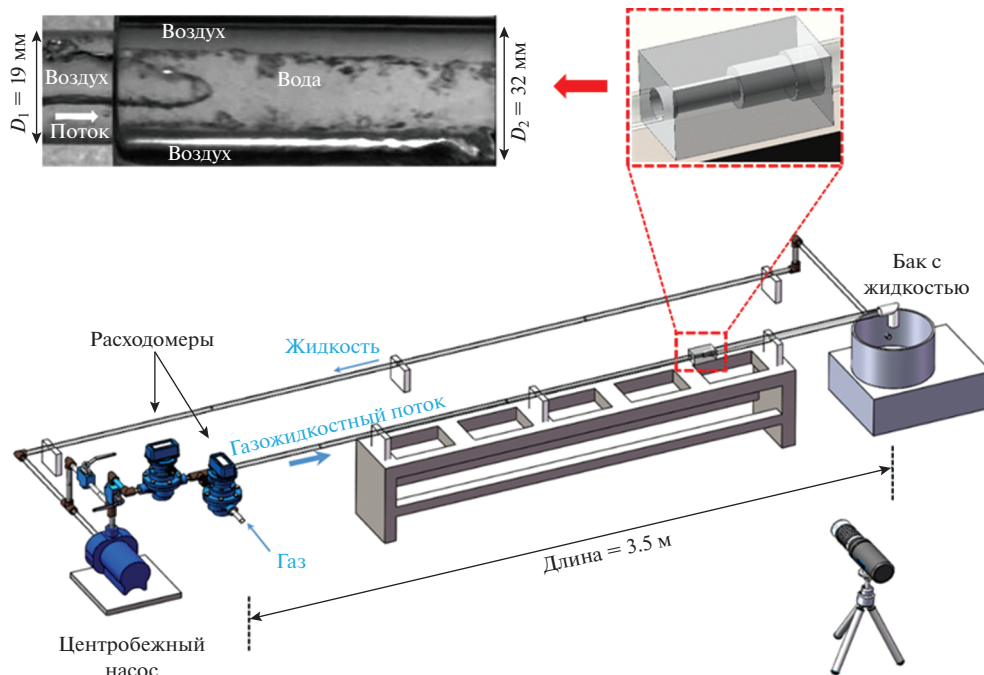
Нижние индексы:

1	величины вверх по потоку;
2	величины вниз по потоку;
<i>L</i>	жидкость;
<i>G</i>	газ.

---

Понимание основ двухфазного течения в круговых трубках имеет значительные приложения в процессах обеспечения течений в нефтяной промышленности, таких как транспорт двухфазных газожидкостных потоков в нефтяных скважинах и трубопроводах [1–3]. Начиная с 60-х гг. прошлого века, были выполнены обширные исследования двухфазных течений в прямых трубопроводах в связи с многочисленными приложениями в промышленности [4–19]. Карта режимов совместного течения воды и воздуха в горизонтальной трубе была построена теоретически в [4]. Построенная в [4] теоретическая модель предсказала области, в которых реализуются четыре специфические основные картины течения, а именно, снарядный (пробочный) режим, пузырьковый режим, эмульсионный режим и дисперсно-кольцевое течение, в зависимости от поверхностных (приведенных) скоростей воды и газа, свойств жидкости и внутреннего диаметра рассматриваемой трубы. Кроме того, на основании физических представлений предсказаны границы переходов от одного режима к другому на карте режимов течения. Впоследствии были выполнены многочисленные исследования влияния диаметра трубы и формы ее поперечного сечения на поведение двухфазных течений [7–18], были рассмотрены прямоугольные [5–8], квадратные [9–11], кольцевые [12–14] и треугольные [15, 16] сечения. Вплоть до настоящего времени исследование механизма двухфазных течений в прямой горизонтальной трубе все еще представляет собой значительные трудности в аспекте предсказания распределения фаз, взаимодействия между фазами, межфазных границ и их движение. При скачкообразном увеличении диаметра трубы эти задачи становятся доминирующими из-за появления градиентов давления и развития турбулентности. Первыми исследователями характеристик двухфазных течений при внезапном расширении трубы были Лоттес [17], Мендлер [18], Роми [19] и Ричардсон [20]. Несмотря на несколько попыток [21–28] предложить модели восстановления давления и предсказать структуру течения для двухфазного потока в горизонтальных трубах со скачкообразным увеличением диаметра, из-за сложности задачи для такого течения не существует какой-либо универсальной модели прогноза изменения давления и режима течения. Обычно для того, чтобы охарактеризовать двухфазное течение через внезапное расширение трубы, исследуют изменения восстановления давления и коэффициента потерь. Тем не менее для построения моделей течения, заслуживающих большего доверия, картина распределения двухфазного потока в возникающих областях является крайне важной для правильной оценки давления и сдвигового напряжения на стенке трубы [22]. Динамика двухфазной картины потока в области внезапного расширения и сжатия трубы исследовалась в [24]. В этом исследовании переходы от снарядного к эмульсионному режимам и от эмульсионного режима к кольцевому течению были рассмотрены на примере пароводяной смеси. Эта работа заложила основы изучения явления перехода от одного двухфазного режима течения к другому.

В [25] была проведена серия экспериментов по исследованию изменений картины течения в области внезапного расширения трубы. Внимание было сконцентрировано на неустойчивостях в двухфазном течении воздуха и воды, которые возникают в соседних областях вверх и вниз по потоку от внезапного расширения трубы. Более того, полученная карта режимов течения показала, что линии границ переходов для двухфазного потока в случае внезапного расширения не согласуются со случаем прямой трубы (прямоточного глушителя), за исключением области кольцевого течения из-за неустойчивости двухфазного потока. Это несоответствие справедливо для областей как вверх, так и вниз по потоку от сингулярного сечения. В [7] был выполнен эксперимент по исследованию картины течения и потери напора от трения в трубе для смеси воздуха и воды при внезапном расширении в маленьком канале прямоугольного сечения ( $3 \times 9$  мм<sup>2</sup>). Картина течения типа жидкой струи, как некоторое уникальное явление, наблюдалось при низком газосодержании и суммарном расходе  $100$  кг/м<sup>2</sup> · с. Картина течения типа струи вызывала осязаемое падение давления за особенностью. Причина этого падения давления состоит в сохранении импульса, когда течение типа жидкой струи проходит через область внезапного расширения. В [22] было исследовано поведение двухфазного потока в горизонтальной трубе применительно к распределению картины течения вблизи зоны вниз по потоку от внезапного расширения. Было отмечено, что как картина течения вниз по потоку, так и развивающаяся длина сильно зависят от отношения площадей сечения трубы и картины течения вверх по потоку. Наблюдалось повторяющееся явление деформации и распада газовых пузырей в этой расширяющейся



Фиг. 1. Экспериментальная установка

области. В то время как интенсивные усилия исследований были посвящены изучению поведения переноса в двухфазном потоке в прямых трубах (прямоточных глушителях), гораздо меньшее внимание было сконцентрировано на двухфазном течении в трубе с усложненными условиями на стенке [26], такими как скачкообразные изменения внутреннего диаметра трубы вдоль оси трубопровода, особенно в горизонтальной трубе.

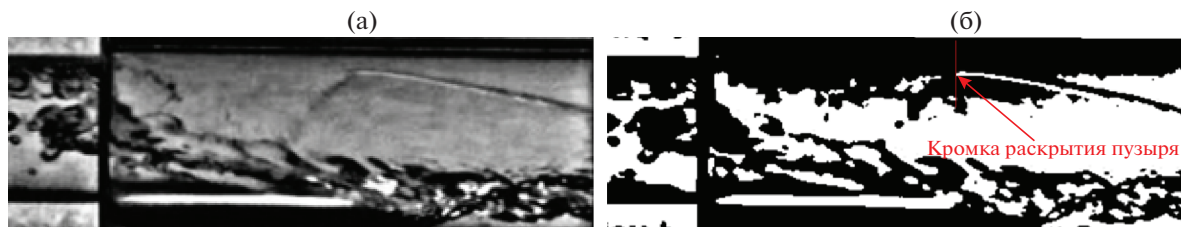
В настоящем исследовании прозрачная горизонтальная трубка, имеющая скачкообразно расширяющийся диаметр в некотором сечении, была использована для изучения двухфазного (жидкость–газ) потока в сингулярном сечении. Целью являлось исследование поведения и распределения картины течения в снарядных (пробочных) режимах из-за многочисленных приложений такого режима потока в нефтяной промышленности [28]. В частности, скорость пузырей в расширенной области, явление разрушения (разрыва, эксплозии) пузырей, характеристики горизонтальной водяной струи и карты режимов течения были исследованы с помощью высокоскоростной фотографии и последующей обработки изображений пакетом MATLAB.

## 1. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### 1.1. Экспериментальная установка

В настоящем исследовании экспериментальная установка (фиг. 1) состоит из горизонтальной прозрачной трубки длиной 3.5 м, сделанной из плексигласа, в которой имелось скачкообразное увеличение диаметра (расположенное в двух метрах от входного сечения), центробежного насоса и воздушного компрессора, предназначенных для создания двухфазного потока внутри трубы, бака для рабочей жидкости и нескольких датчиков, чтобы регулировать и наблюдать расходы как жидкости, так и газа.

Внутренние диаметры прозрачной трубки перед и за внезапным расширением диаметра составляют 19 и 32 мм соответственно (фиг. 1). Рабочими веществами являются вода в качестве жидкости и воздух в качестве газа. Вода прокачивается центробежным насосом (максимальный расход  $2 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ), поток измеряется цифровым массовым расходомером GPI09 с диапазоном измерений от 0 до  $6.7 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ . Емкость для жидкости сделана из оргстекла и имеет высоту 1.2 м и общий объем  $0.25 \text{ м}^3$ . В настоящем исследовании емкость была заполнена водой в качестве рабочего вещества при температуре  $25^\circ\text{C}$  с плотностью  $997.05 \text{ кг}/\text{м}^3$  и динамической вязкостью  $0.89 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ . Воздух подавался компрессором, оснащенным регулятором расхода воздуха. Расход воздуха измерялся цифровым расходомером для воздуха Cole Parmer CP5990 с диапазоном измерений от 0 до  $8.3 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ . Показания расходомера базировались на стандартных давлениях и



Фиг. 2. Обработка изображений течения в снарядном (пробочном) режиме в области расширения ( $Q_{W3} - Q_{A1}$ ) (а) полутоновое изображение; (б) бинарное изображение

температуре. В данном эксперименте диапазоны расхода воды и воздуха составляли от  $1 \times 10^{-4}$  до  $5.8 \times 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с и от  $1.3 \times 10^{-5}$  до  $5.8 \times 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с соответственно. Для однородного смешения воды и воздуха, в 0.1 м перед входом в прозрачную трубку был установлен специально спроектированный двухфазный миксер. Для ослабления влияния центробежного насоса на колебания потока четыре опоры были смонтированы вдоль трубопровода с целью предотвращения его вибрации. Для минимизации преломляющего эффекта кривизны стенок на визуализацию течения рабочая секция была обработана специальной машинкой в плексиглазовый квадрат с коэффициентом преломления  $N = 1.48$ .

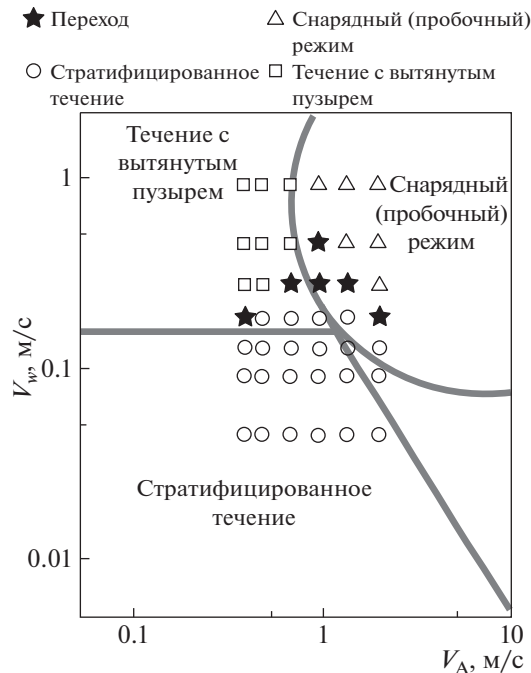
### 1.2. Визуализация течения и обработка изображений

Высокоскоростная CCD-камера (Photron, модель FASTCAM SA3) использовалась для записи высококачественных цифровых изображений, иллюстрирующих различные картины двухфазного течения. Метод светорассеяния использован для двумерного изображения течения в снарядном (пробочном) режиме, изображенном на фиг. 1. Световое табло 160 LED было использовано для освещения белой бумаги на задней стороне рабочей секции и двумерное изображение картины двухфазного течения было зарегистрировано высокоскоростной камерой. CCD-камера расположена на расстоянии 1.8 м от передней стороны рабочей секции. Снимки размером  $1024 \times 512$  пиксел, соответствующие полю зрения  $27 \times 13.5$  см<sup>2</sup>, были получены на частоте 2000 кадров в секунду и были затем переданы с высокоскоростной камеры через линию передачи данных на компьютер, используемый для обработки изображений. Полученные изображения анализировались для измерения скорости движения пузырей и скорости движения их разрыва с погрешностью измерения  $\pm 0.17$  мм, что соответствовало  $\pm 1$  пикселю на полученных изображениях. Для определения значений характеристик двухфазного течения и обработки записанных изображений использовался пакет MATLAB. Цветные изображения были конвертированы в полутоновые (фиг. 2а) и бинарные (фиг. 2б), чтобы установить местонахождение кромки раскрытия пузыря.

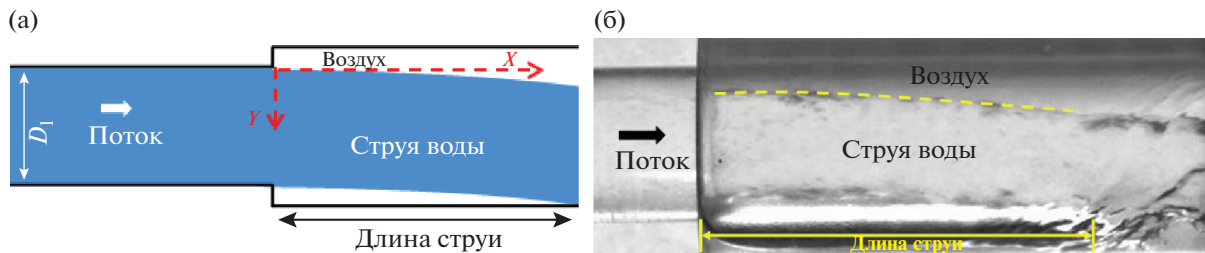
## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 2.1. Обоснование эксперимента

Для проверки результатов, полученных на описанной выше экспериментальной установке, прямая прозрачная трубка с внутренним диаметром  $D = 19$  мм и длиной 3.5 м была использована для получения картин двухфазного течения, которые сравнивались с эталонными картами режимов течения [4]. Наблюдались четыре разных картины течения (фиг. 3). Добавленные точки представляют собой полученные экспериментальные результаты для картин течения, тогда как заштрихованные зоны соответствуют карте режимов течения, имеющейся в литературе [4]. Из рассмотрения точек, обозначенных кружками и соответствующих стратифицированным течениям, можно сделать вывод, что граница перехода между течением с вытянутыми пузырьками и стратифицированным течением смещается вверх. Это отклонение может быть обусловлено разницей между внутренним диаметром трубки в настоящем исследовании ( $D = 19$  мм) и предыдущим экспериментом ( $D = 25$  мм) [4]. Граница перехода между течением с вытянутыми пузырьками и снарядным (пробочным) режимом согласуется с границей, определенной на эталонной карте. Среди этих картин течения настоящее исследование сконцентрировано на течении в снарядном (пробочном) режиме, поскольку это наиболее часто встречающаяся картина течения в нефтегазовой промышленности [28].



**Фиг. 3.** Сопоставление наблюдаемых картин течения для экспериментальной установки, используемой в настоящем исследовании, с эталонными результатами. Замечание: добавленные точки представляют собой экспериментальные данные, полученные для картин течения, тогда как заштрихованные зоны соответствуют имеющейся карте режимов, полученной экспериментально в [4]



**Фиг. 4.** Струя воды в расширенной области ( $Q_{W3} = 3.7 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $Q_{A0} = 0 \text{ м}^3/\text{с}$ ) (а) Механическое представление (б) Изображение, полученное высокоскоростной камерой

2.2. Характеристики струи жидкости

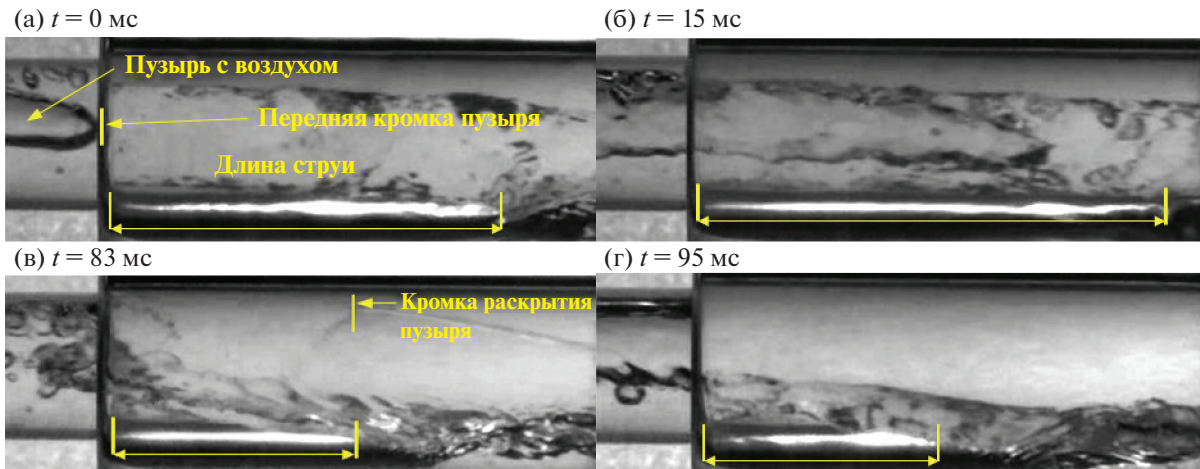
**2.2.1. Траектория струи жидкости.** В данной системе струя жидкости для однофазного течения определяется потоком жидкости, испускаемой из меньшей трубки в расширенную область (фиг. 4а). В расширенной области струя жидкости окружена газом. Верхняя часть струи жидкости гладко искривлена вниз из-за действия силы тяжести и становится волнистой, когда струя соударяется с дном. Чтобы охарактеризовать поведение струи жидкости, траектория верхней границы раздела измерялась и сравнивалась с аналитическим уравнением, полученным ранее.

Форма верхней границы раздела визуализировалась с помощью обработки изображений и значения кривизны определялись с помощью пакета MATLAB.

Усредненная траектория получена и обозначена пунктирной линией на фиг. 4б. В литературе траектория горизонтальной струи жидкости, вытекающей из трубки в открытую систему, может быть смоделирована траекторным методом Пердье [29] с помощью следующего уравнения:

$$Q_{water} = \frac{c_d}{4} \pi D^2 \sqrt{\frac{gX^n}{2Y}}$$

где  $D$  – внутренний диаметр трубки,  $X$  – горизонтальное расстояние от кромки внешнего края трубки,  $Y$  – вертикальное смещение от верхнего выходного сечения трубки,  $C_d$  – коэффициент, связанный с расходом, и  $n = 2$  – показатель степени величины  $X$ .



Фиг. 5. Временная и пространственная развертка процесса изменения длины двухфазной струи воды: (а)  $t = 0$  мс, (б)  $t = 15$  мс, (в)  $t = 83$  мс, (г)  $t = 95$  мс

В данном эксперименте уравнение (2.1) может быть использовано в случае малого диаметра трубки  $D = 19$  мм, когда вертикальное смещение выражается следующим образом:

$$Y = C_d^2 \times \frac{M}{Q_{water}^2} X^n \quad (2.2)$$

Показатель степени  $n$  и коэффициент  $C_d$  можно оценить, используя уравнение (2.2) для различных расходов воды от  $Q_{w1} = 3 \times 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с до  $Q_{w9} = 5.7 \times 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с. Было найдено, что траектория струи жидкости, представленная на фиг. 5б, может быть описана уравнением (2.2) с постоянным показателем степени  $n = 1.73$ .

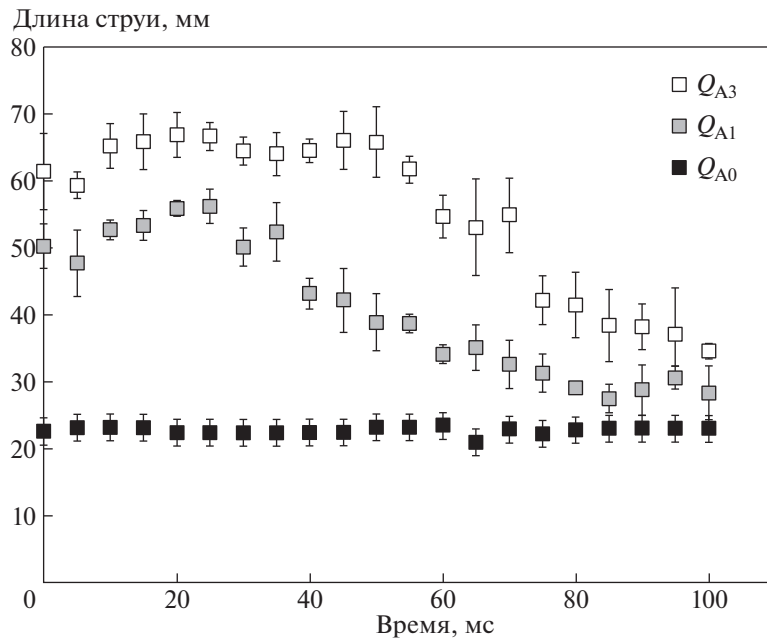
Показатель степени  $n$  прямо связан с силой тяжести. Когда струя воды ударяет по внутренней поверхности трубки, направление струи воды изменяется и возникает возвратное течение. Исходная струя воды, падающая сверху, может подняться из-за возвратного течения воды, которое вызывает изменение силы, воздействующей на траекторию струи.

В табл. 1 приведены значения коэффициента  $C_d$  для различных значений расхода воды. Как было предсказано в предыдущих исследованиях [30], коэффициент  $C_d$  зависит от расхода воды.

**2.2.2. Длина струи жидкости.** Расстояние от места резкого расширения трубки до места, где струя воды ударяется о дно трубки, называется “длиной струи” и представляется блестящим белым промежутком, который исчезает, когда струя ударяет в нижнюю часть трубки. Для однофазного течения длина струи постоянна, если расход зафиксирован. Однако для двухфазного течения длина струи меняется во времени из-за существования пузырей воздуха. Для эксперимента с двухфазным течением струя воды с пузырьками воздуха наблюдалась при внезапном расширении сечения при выходе из трубки меньшего диаметра (фиг. 5). В результате длина струи была больше по сравнению с системой, состоящей из струи одной жидкости. Начальное время опре-

Таблица 1. Измеренные значения  $C_d$  для разных  $Q_w$  (при  $Q_{A0} = 0$  м<sup>3</sup>/с)

Измерения	Расход воды ( $\times 10^4$ м <sup>3</sup> /с)	Значение коэффициента $C_d$
$Q_{w0}$	0	0
$Q_{w1}$	3.0	0.48
$Q_{w2}$	3.3	0.53
$Q_{w3}$	3.7	0.58
$Q_{w4}$	4.0	0.64
$Q_{w5}$	4.3	0.69
$Q_{w6}$	4.7	0.74
$Q_{w7}$	5.0	0.80
$Q_{w8}$	5.3	0.85
$Q_{w9}$	5.7	0.90



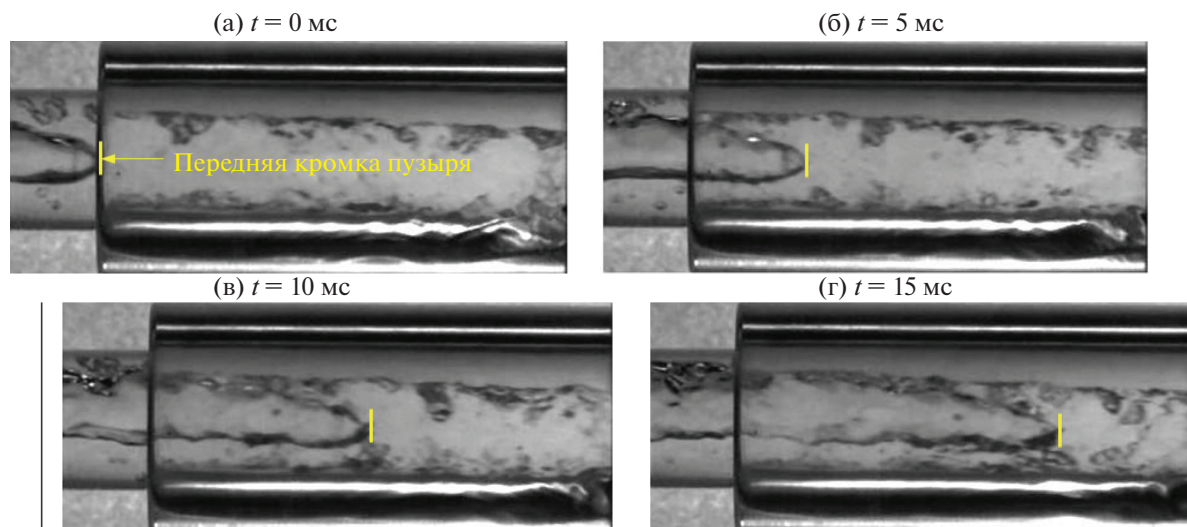
Фиг. 6. Длина струи воды для заданного расхода воды  $Q_{W3} = 3.7 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

деляется моментом, когда передняя кромка воздушного пузыря касается сечения со ступенькой расширения (фиг. 5а). В течение нескольких первых миллисекунд воздушный пузырь выходит из трубки меньшего сечения и движется слева направо вместе со струей воды (фиг. 5б). Он движется в расширенной области, всплывает в верхнее положение внутри струи воды и взрывается из-за роста ограниченной по размерам площади. Это взрывное явление изображено на фиг. 5в. После взрыва пузыря двухфазная струя ударяется о нижнюю стенку трубки и стекает в нижней части трубки, образуя волнообразное стратифицированное течение (фиг. 5г).

На фиг. 6 изображена эволюция длины струи как функция времени для заданного постоянного расхода воды  $Q_{W3} = 3.7 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ . Можно видеть, что для однофазного течения длина струи жидкости приблизительно постоянна и имеет среднее значение 24 мм. В случае двухфазного течения ( $Q_{a2} = 2.2 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ) в рассматриваемой системе длина струи меняется со временем и ее поведение может быть связано с четырьмя стадиями явления взрыва пузыря: (1) в течение первых 20 мс пузырь воздуха входит в область внезапного расширения трубки, что приводит к небольшому увеличению длины струи воды (из-за движущей силы пузырька воздуха в струе воды). (2) На интервале от 20 до 80 мс пузырек воздуха продолжает входить в область внезапного расширения, образуя большой пузырь воздуха в верхней части струи воды, где движущая сила меньше по сравнению со стадией (1). Тем временем этот пузырь, занимая основную часть в средней части струи, имеет вокруг себя более тонкий слой воды, который не может поддерживать струйное течение. В результате длина струи устойчиво уменьшается. (3) На 80 мс происходит событие взрыва пузыря из-за ограничения на поверхностное натяжение жидкости. (4) После 80 мс длина струи испытывает флуктуации, но всегда остается больше длины струи в однофазном течении. В случае расхода воздуха  $Q_{a3} = 4.8 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  характерные особенности с точки зрения временной эволюции подобны случаю  $Q_{a2} = 2.2 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ . Однако из-за большей силы инерции, вызванной высоким расходом воздуха, для  $Q_{a3} = 4.8 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  длина струи становится больше и критические точки каждой стадии смещаются на более позднее время.

### 2.3. Скорость пузырька в области расширения

Поведение течения в снарядном (пробочном) режиме, когда оно входит в область расширения трубки, визуализировано на фиг. 7. Начальное время ( $t = 0$  мс) связано с моментом времени, когда край переднего фронта пузыря воздуха начинает проникать в ступеньку расширения на фиг. 7а. Изображения записывались каждые 5 мс, чтобы показать движение пузыря в области расширения.



Фиг. 7. Временная и пространственная развертка процесса движения пузыря воздуха через внезапное расширение (а)  $t = 0$  мс, (б)  $t = 5$  мс, (в)  $t = 10$  мс, (г)  $t = 15$  мс

Изображения на фиг. 7 показывают, как пузырь воздуха плывет в верхнем положении в струе воды, после того как он выходит из трубки с меньшим сечением, двигаясь слева направо вместе с водой.

Для измерения движения пузыря в расширенной области было исследовано влияние расхода воздуха на смещение пузыря. При постоянном расходе воды ( $Q_{W3} = 3.7 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ) расход воздуха  $Q_A$  изменяется от  $Q_{A2} = 2.2 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  до  $Q_{A3} = 4.8 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ . Фигура 8а иллюстрирует линейный рост смещения пузырька со временем. Таким образом, наклон кривых дает постоянную скорость, которая возрастает при увеличении расхода воздуха.

В табл. 2 приведена скорость пузырька в области расширения трубки, определенная из фиг. 8а для разных расходов газа.

Оценки ошибок измерения смещения пузырька показывают, что динамика пузырьков вблизи области расширения горизонтальной трубки находится под сильным воздействием расхода воздуха.

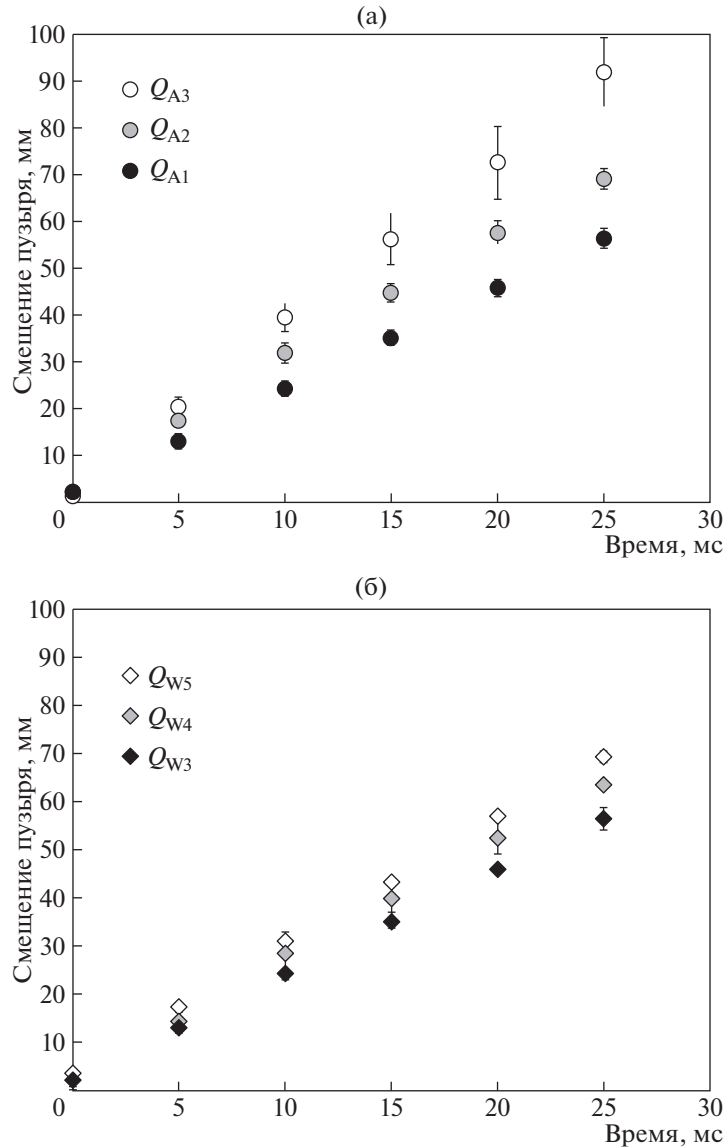
Влияние расхода воды на смещение пузырька было исследовано таким же образом, как это было сделано для влияния расхода воздуха. При постоянном расходе воздуха ( $Q_{A2} = 2.2 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ) расход воды  $Q_W$  изменялся от  $Q_{W3} = 3.7 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  до  $Q_{W5} = 4.3 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ . Фигура 8б показывает, что линейное соотношение между смещением пузырька и временем также справедливо при заданном расходе воздуха. В табл. 3 приведена измеренная скорость пузырька в области расширения трубки, определенная из фиг. 8б. Из табл. 2 и 3 можно видеть, что скорость пузырька сильно зависит от расходов как воды, так и воздуха. Увеличение расхода или воды, или воздуха может инициировать большее смещение пузырька.

Постоянная скорость пузырька при различных расходах воздуха (или воды) в области расширения трубки может быть объяснена изменением давления. Давление в двухфазном течении убывает в трубке с меньшим сечением до края области внезапного расширения. В области расширения давление на оси остается постоянным [22]. Такой нулевой градиент давления может объяснить постоянство скорости пузырька в данной специфической области.

Таблица 2. Измеренные значения скорости пузырька для разных  $Q_A$  (при  $Q_{W3} = 3.7 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ )

Измерения	$Q_A (\times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с})$	$V (\text{м}/\text{с})$
$Q_{A0}$	0	0
$Q_{A1}$	2.2	2.2
$Q_{A2}$	3.5	2.8
$Q_{A3}$	4.8	3.6





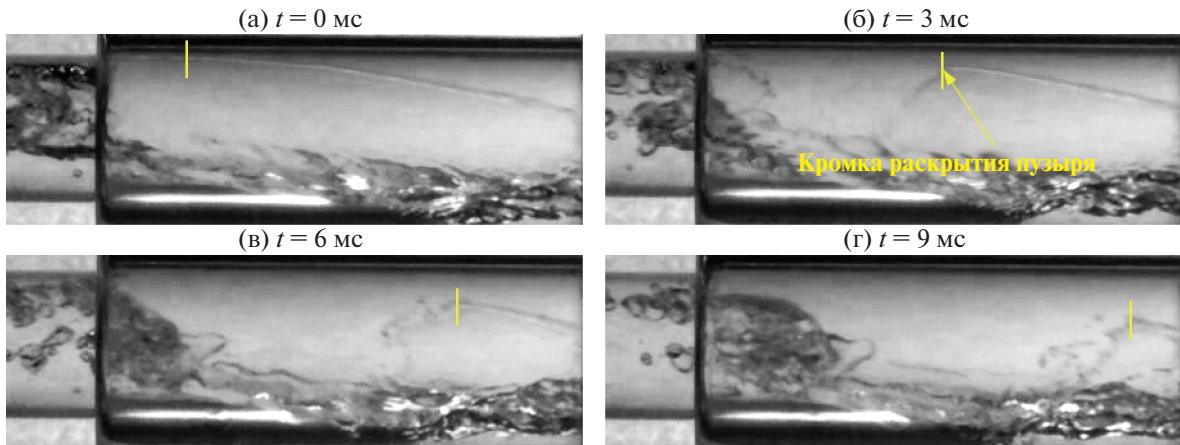
**Фиг. 8.** Измеренное смещение пузырька (в мм) как функция времени (в мс): (а) при заданном расходе воды  $Q_{W3} = 3.7 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ , (б) при заданном расходе воздуха  $Q_{A2} = 2.2 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

#### 2.4. Явление взрыва пузырька

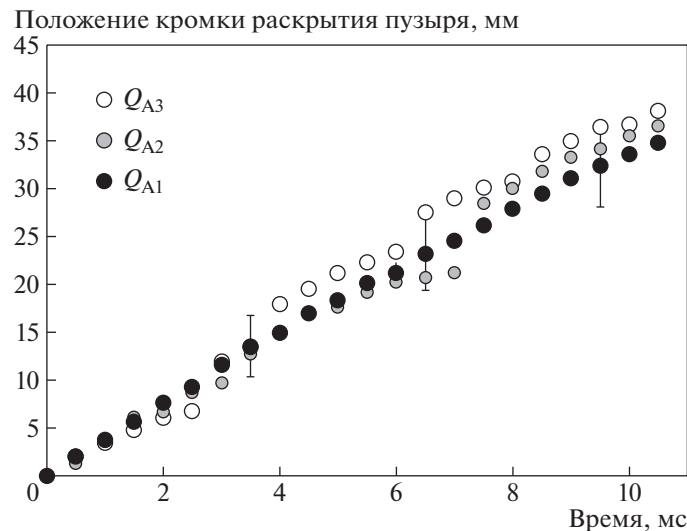
По мере того, как течение в снарядном (пробочном) режиме распространяется сквозь внезапное расширение трубки, пузырек воздуха лопаается через несколько секунд после входа в эту область из-за его расширения в ограниченной области. На фиг. 9 изображена временная последовательность этого взрывного явления, представляющего собой слияние пришедшего газового пузыря с верхней областью газа. Точка отсчета зарегистрированного времени (фиг. 9а) соответствует моменту времени, когда пузырек воздуха еще не поврежден. В этот момент времени пузы-

**Таблица 3.** Измеренные значения скорости пузырька для разных  $Q_W$  (при  $Q_{A2} = 2.2 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ )

Измерения	$Q_W (\times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с})$	$V (\text{м}/\text{с})$
$Q_{W3}$	3.7	2.2
$Q_{W4}$	4.0	2.5
$Q_{W5}$	4.3	2.6



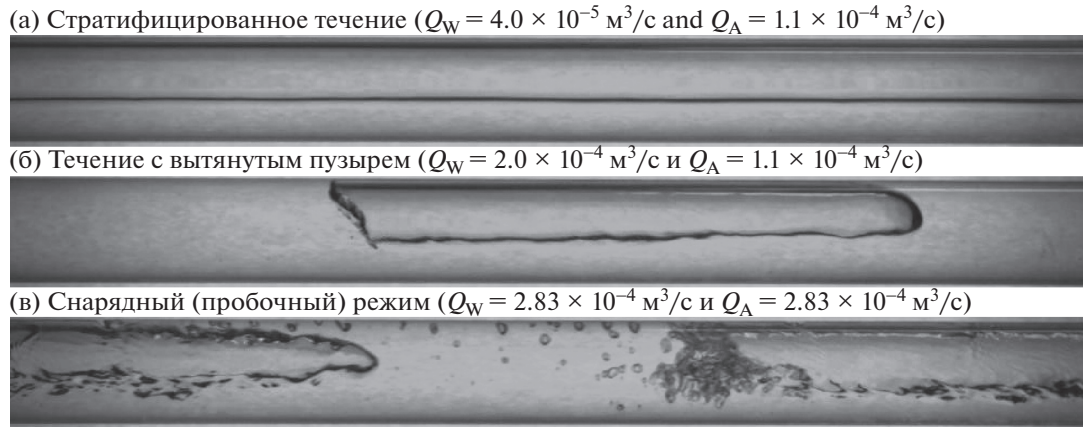
Фиг. 9. Временная и пространственная развертка процесса эксплозии пузыря воздуха на внезапном расширении (а)  $t = 0$  мс, (б)  $t = 3$  мс, (в)  $t = 6$  мс, (г)  $t = 9$  мс



Фиг. 10. Измеренные скорости движения разрыва пузыря (в мм) как функции времени (в мс) для постоянного расхода воды  $Q_{W3} = 3.7 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

рек отделен от верхней стенки трубки тонкой пленкой воды. Сразу же после этого мгновения (фиг. 9б) соответствующая тонкая пленка разрывается, оставляя открытую область на верхней части пузыря. Теперь воздух в пузыре находится в прямом контакте со стенкой трубки. Кромка раскрытия пузыря прослеживается с интервалом 3 мс и ее положение отмечено на фиг. 9б–9г.

Положение кромки раскрытия пузыря определяется местом, где пузырь лопается вблизи верхней части прозрачной трубки, как показано на фиг. 9а. Это положение берется за начало отсчета явления разрыва пузыря. Кромка раскрытия пузыря прослеживается для того, чтобы измерить его скорость, которую называют “скоростью движения разрыва пузыря”. После разрыва (эксплозии) граница разорвавшегося пузыря распространяется во времени и пространстве и может быть отчетливо видна на фиг. 9б–9г. С помощью обработки изображений положение кромки раскрытия пузыря и соответствующее время были измерены и представлены на фиг. 10 для постоянного расхода воды  $Q_{W3} = 3.7 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ . Скорость движения разрыва пузыря находится из наклонов этих двух кривых. Ее усредненная величина равна 3.6 м/с с погрешностью  $\pm 0.3$  м/с. По наблюдениям скорость движения разрыва пузыря остается постоянной и на нее не влияют изменения расхода воздуха или воды. Этот экспериментальный результат согласуется с аналитическим исследованием [30], в котором была предсказана постоянная величина скорости движения разрыва пузыря и предложено соотношение, связывающее скорость движения разрыва пузыря  $v$  с поверхностным натяжением  $\sigma$ , плотностью жидкости  $\rho$  и толщиной пленки пузыря  $h$ .



**Фиг. 11.** Режимы течения перед внезапным расширением: (а) стратифицированное течение ( $Q_W = 4.0 \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $Q_A = 1.1 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ); (б) течение с вытянутым пузырьком ( $Q_W = 2.0 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $Q_A = 1.1 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ); (в) снарядный (пробочный) режим течения ( $Q_W = 2.83 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $Q_A = 2.83 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ )

Используя значение скорости движения разрыва пузыря  $v = 3.6 \text{ м/с}$ , полученное в данном эксперименте, толщина пленки пузыря  $h$  может быть вычислена с помощью уравнения (2.3), где  $\sigma = 71.97 \times 10^{-3} \text{ Па}$  и  $\rho = 997 \text{ кг/м}^3$  при температуре  $25^\circ\text{C}$ .

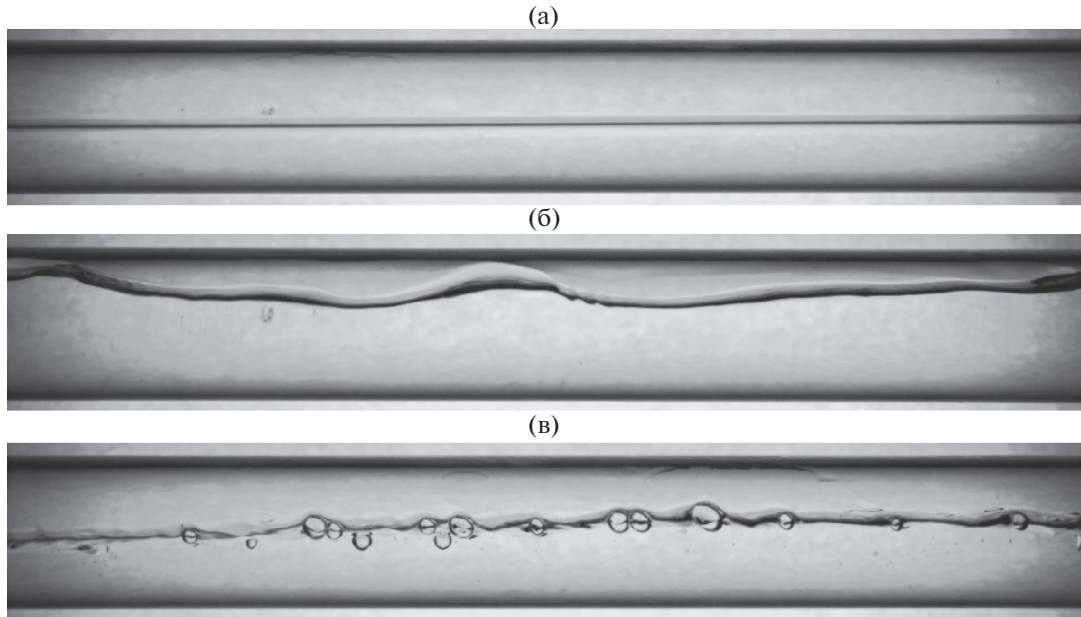
Полученное значение толщины пленки пузыря  $h = 1.18 \times 10^{-5} \text{ м}$  имеет тот же порядок, как и вычисленное ранее [31].

Явление взрыва пузыря можно объяснить неустойчивым равновесием между тремя силами: (1) поверхностное натяжение на границе между воздухом и водой ( $\sigma$ ), (2) внутреннее давление воздуха в пузырьке ( $p_{in}$ ) и (3) внешнее давление в среде, окружающей пузырек воздуха ( $p_{ext}$ ). При постоянном поверхностном натяжении на границе между воздухом и водой  $\sigma = 71.97 \times 10^{-3} \text{ Па}$  (при температуре  $25^\circ\text{C}$ ), единственными параметрами, изменяющимися в пространстве и времени, являются  $p_{in}$  и  $p_{ext}$ .

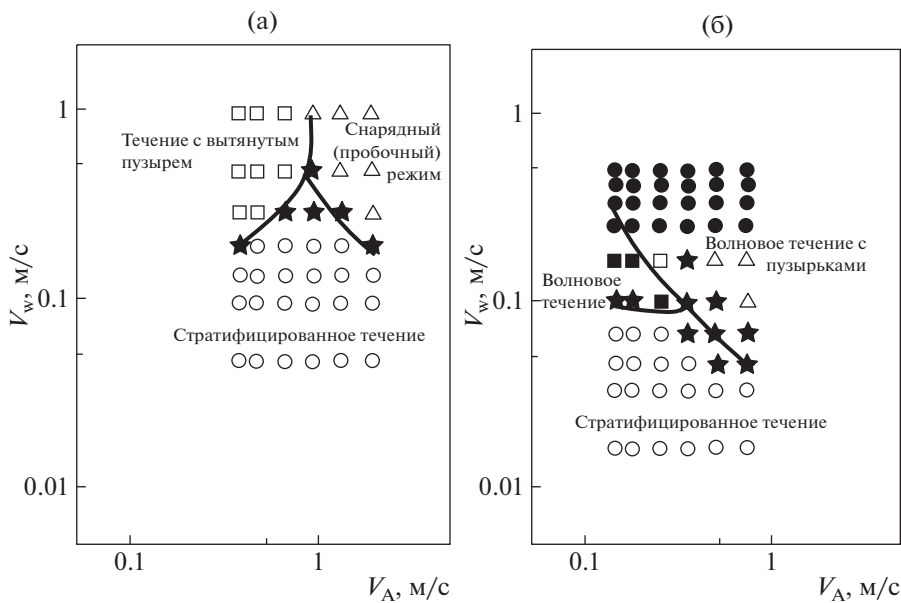
Согласно наблюдениям, процесс развития взрыва пузыря имеет четыре стадии. Первая стадия соответствует времени, при котором пузырек воздуха, сжатый водой и внутренней стенкой трубы, находится в области перед внезапным расширением. Вторая стадия начинается в тот момент, когда пузырь входит в область внезапного расширения. Длинный пузырь может разделиться на две части: одна в области перед внезапным расширением (трубка с маленьким сечением), тогда как вторая часть находится позади внезапного расширения, что является более неустойчивым из-за меньших ограничений, обусловленных стенкой трубы. Более того, за внезапным расширением верхняя часть пленки пузыря подвергается воздействию воздуха. В результате равновесие устанавливается прежде, чем внезапное расширение закончилось. Воздушный пузырь расширяется из-за того, что внутреннее давление больше суммы внешнего давления и поверхностного натяжения. Третья стадия определяется мгновением, когда передний край пузыря ударяется о слой воды, сформировавшийся вблизи донной стенки внутри трубы. В этом положении струя воды ударяется в стенку, разлетается брызгами и больше не может вынуждать воздушный пузырь двигаться вперед. В это же время задняя кромка пузыря входит в область внезапного расширения, приводя к увеличению объема пузыря воздуха в области расширения. Из-за расширения пузыря воздуха пленка, ограничивающая пузырек, стремится стать тоньше. Одновременно вода в пленке стекает вниз из-за силы тяжести, что приводит к наиболее тонкой пленке в верхней части пузыря. Четвертая стадия определяется мгновением, в которое верхняя часть жидкой пленки пузырька больше не может удерживать воздух в пузырьке и поэтому образуется брешь в верхней части пузыря, вызывая взрыв. Из-за этого пленка пузырька разрывается, отгибаясь внутрь по причине поверхностного натяжения, созданного молекулами воды.

### 2.5. Влияние расширения диаметра трубки на карту режимов течения и картины течения

Для исследования влияния внезапного расширения трубки на картину течения высокоскоростная камера снимала картины течения в двух фиксированных положениях вдоль горизон-



**Фиг. 12.** Режимы течения за внезапным расширением: (а) стратифицированное течение ( $Q_W = 4.0 \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $Q_A = 1.1 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ); (б) течение с вытянутым пузырьком ( $Q_W = 2.0 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $Q_A = 1.1 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ); (в) снарядный (пробочный) режим течения ( $Q_W = 2.83 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $Q_A = 2.83 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ )



**Фиг. 13.** Карта режимов течения для горизонтальной трубы (а) перед внезапным расширением ( $D = 19 \text{ мм}$ ) (б) за внезапным расширением ( $D = 32 \text{ мм}$ )

тальной оси трубы: 1) в 10 см перед внезапным расширением в области вверх по потоку и 2) в 120 см от внезапного расширения в области вниз по потоку. Картины течения вверх и вниз по потоку от расширения трубы проиллюстрированы и сравниваются на фиг. 11 и 12. При малых расходах соответствующие картины течения, определяемые стратифицированным режимом течения, не подвергаются воздействию расширенной области трубы (фиг. 11а и 12а). Однако, когда

расходы как воды, так и воздуха возрастают, внезапное расширение сильно влияет на картины течения, изменяя характеристики потока. Когда отличительным признаком течения вверх по потоку является присутствие вытянутых пузырей (фиг. 11б), результирующая картина течения представляет собой волновое течение с увеличенным волновым периодом (фиг. 12б). Когда течение вверх по потоку происходит в снарядном (пробочном) режиме (фиг. 11в), соответствующая картина, возникающая вниз по потоку от внезапного расширения, представляет собой волновое течение с небольшими захваченными пузырьками воздуха (фиг. 12в).

На фиг. 13а изображена карта режимов двухфазного течения перед внезапным расширением. Сплошные линии изображают границы режимов течения. Можно видеть, что внезапное расширение не влияет на режим течения вверх по потоку, поскольку карта режимов течения, воспроизведенная на фиг. 13а, аналогична той, что приведена на фиг. 3 и использована для обоснования эксперимента.

На фиг. 13б изображена карта режимов течения вниз по потоку за внезапным расширением. Можно видеть, что верхняя граница режима стратифицированного течения расположена при меньшей поверхностной скорости воды. Кроме того, как режим течения с вытянутым пузырем, так и снарядный (пробочный) режим течения сменяются волновым течением и волновым течением с пузырьками, поэтому можно утверждать, что внезапное расширение имеет существенное влияние на карту режимов течения и их границы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты экспериментального исследования снарядного (пробочного) течения в прозрачной горизонтальной трубке с внезапным расширением.

Найдено, что скорость пузырьков в области расширения сильно зависит от расходов как воды, так и воздуха. Рассмотрено поведение воздушного пузыря, движущегося через внезапно расширяющуюся трубу. Описано явление взрыва пузыря и измерена его скорость. Взрыв пузыря существенно влияет на поведение течения, приводя к изменению длины жидкой струи. Кроме того, влияние внезапного расширения трубы на профиль траектории струи воды исследовано как экспериментально, так и теоретически, и модель выпуска воды из трубы модифицирована на основании полученных экспериментальных данных. Наконец, построены карты режимов течений для областей вверх и вниз по потоку, которые указывают на существование спускового механизма значительного изменения картины течения за счет внезапного расширения трубы. Результаты экспериментов обеспечивают возможность фундаментального проникновения в суть влияния внезапного расширения сечения на характеристики двухфазного газожидкостного потока в горизонтальной трубке. Дальнейшие исследования будут сконцентрированы на исследовании изменений давления, вызванных внезапным расширением сечения трубы, и измерении локальной скорости струи воды в области расширения с помощью PIV метода (оптического метода измерения полей скорости жидкости или газа в выбранном сечении потока).

Работа выполнена при поддержке Института нефти Университета науки и технологии им. Халифа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Balakhrisna T., Ghosh S., Das G., Das P.K.* Oil-water flows through sudden contraction and expansion in a horizontal pipe – Phase distribution and pressure drop // *Int. J. Multiphase Flow*. 2010. V. 36. P. 13.
2. *Kleinstreuer C.* Two-Phase Flow: Theory and Applications. CRC Press, 2003.
3. *Tong L.S., Tang Y.S.* Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow. CRC Press, 1997.
4. *Taitel Y., Dukler A.* A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow // *AIChE J.* 1976. V. 22. P. 47.
5. *Xu J., Cheng P., Zhao T.* Gas-liquid two-phase flow regimes in rectangular channels with mini/micro gaps // *Int. J. Multiphase Flow*. 1999. V. 25. P. 411.
6. *Messa G.V., Malavasi S.* Computational investigation of liquid-solid slurry flow through an expansion in a rectangular duct // *J. Hydrol.* 2014. V. 62. P. 234.
7. *Chen I.Y., Liu C.-C., Chien K.-H., Wang C.-C.* Two-phase flow characteristics across sudden expansion in small rectangular channels // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2007. V. 32. P. 696.
8. *Chen I.Y., Chu M.-C., Liaw J.-S., Wang C.-C.* Two-phase flow characteristics across sudden contraction in small rectangular channels // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2008. V. 32. P. 1609.

9. *Coleman J.W., Garimella S.* Two-phase flow regimes in round, square and rectangular tubes during condensation of refrigerant R134a // *Int. J. Refrig.* 2003. V. 26. P. 117.
10. *Chung P.M.-Y., Kawaji M., Kawahara A., Shibata Y.* Two-phase flow through square and circular microchannels: effect of channel geometry // *ASME/JSME 2003 4th Joint Fluids Summer Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2003. P. 1459.
11. *Coleman J.W., Garimella S.* Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1999. V. 42. P. 2869.
12. *Ohtake H., Ohtaki H., Koizumi Y.* Frictional pressure drop and two-phase flow pattern of gas-liquid two-phase flow in circular and rectangular minichannels // *4th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*. American Society of Mechanical Engineers, 2006. P. 1181.
13. *Yang C.-H.* Two-phase flow pressure drop in circular small channels with abrupt contraction and expansion // *The University of North Dakota. ProQuest Dissertations Publishing*, 2015. P. 1600290.
14. *Roul M.K., Dash S.K.* Two-phase pressure drop caused by sudden flow area contraction/expansion in small circular pipes // *Int. J. Numer. Methods Fluids*. 2011. V. 66. P. 1420.
15. *Zhao T., Bi Q.* Co-current air-water two-phase flow patterns in vertical triangular microchannels // *Int. J. Multiphase Flow*. 2001. V. 27. P. 765.
16. *de Bertodano M.A.L., Lahey R.T., Jr., Jones O.C.* Turbulent bubbly two-phase flow in a triangular duct // *Nucl. Eng. Des.* 1994. V. 146. P. 93.
17. *Lottes P.* Expansion losses in two-phase flow // *Nucl. Sci. Eng.* 1961. V. 9. P. 26.
18. *Mendler O.J.* Sudden Expansion Losses in Single and Two-Phase Flow // *PhD dissertation*. University of Pittsburgh, Pennsylvania, 1963.
19. *Romie F.* Private Communication to P. Lottes, American Standard Co., 1958 (see Lottes 1961).
20. *Richardson B.L.* Some problems in horizontal two-phase two-component flow // *Purdue University. ProQuest Dissertations Publishing*, 1959. P. 5901640.
21. *Пахомов М.А., Терехов В.И.* Применение эйлерова подхода при моделировании структуры течения в восходящем монодисперсном пузырьковом потоке в трубе // *ПМТФ*. 2016. Т. 57. № 3. С. 49–59.
22. *Ahmed W.H., Ching C.Y., Shoukri M.* Development of two-phase flow downstream of a horizontal sudden expansion // *Int. J. Heat Fluid Flow*. 2008. V. 29. P. 194.
23. *Пахомов М.А., Терехов В.И.* Моделирование турбулентного неизотермического полидисперсного пузырькового течения за внезапным расширением трубы // *Теплофиз. Аэромех.* 2016. Т. 23. № 5. С. 721–728.
24. *McGee J.W.* Two-Phase Flow through Abrupt Expansions and Contractions // *PhD Thesis*. University of North Carolina at Raleigh, 1966.
25. *Yang Y.Z., Li G.J., Zhou F.D., Chen X.J.* The effect of sudden change in pipe diameter on flow patterns of air-water two-phase flow in vertical pipe. (II) Sudden-expansion cross-section // *Chin. J. Chem. Eng.* 2001. V. 9. P. 221.
26. *Yang Y.Z., Li G.J., Zhou F.D., Chen X.J.* The effect of sudden change in pipe diameter on flow patterns of air-water two-phase flow in vertical pipe. (I) Sudden-contraction cross-section // *Chin. J. Chem. Eng.* 2001. V. 9. P. 116.
27. *Пахомов М.А., Терехов В.И.* Структура течения в неизотермическом закрученном газокapельном потоке за внезапным расширением трубы // *Изв. РАН. МЖГ*. 2016. № 1. С. 69–78.
28. *Barnea D., Taitel Y.* A model for slug length distribution in gas-liquid slug flow // *Int. J. Multiphase Flow*. 1993. V. 19. P. 829.
29. *Greve F.W., Zucrow M.J.* Measurement of pipe flow by the coordinate method // *J. Am. Water Works Assoc.* 1925. V. 13. P. 306.
30. *Culick F.* Comments on a ruptured soap film // *J. Appl. Phys.* 1960. V. 31. P. 1128.
31. *Spiel D.E.* On the births of film drops from bubbles bursting on seawater surfaces // *J. Geophys. Res. Oceans*. 1998. V. 103. P. 24907.