

Исследование геометрических параметров свободных жидкостных струй при течении в КСИА в условиях начального устойчивого режима работы

Агаев К.Э., Дужий А.Б., Новосёлов А.Г.

kirillmedvedev87@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный университет
низкотемпературных и пищевых технологий.

В статье приведены результаты исследования геометрических параметров свободных жидкостных струй. Определены минимальные скорости свободных струй, при которых начинается унос газовой фазы. Приведены теоретические и эмпирические зависимости для расчёта диаметра струи при работе КСИА в начальном устойчивом режиме.

Ключевые слова: КСИА, диаметр струи, начальный устойчивый режим.

Research of geometrical parameters of free liquid jets at leaking SJID in conditions of an initial steady operating mode

Agaev K.E., Dugiy A.B., Novoselov A.G.

kirillmedvedev87@mail.ru

Saint-Petersburg state university of refrigeration and food
engineering

In clause article results of research of geometrical parameters of free liquid jets are resulted. The minimal speeds of free jets at which ablation of a gas phase begins are certain. Theoretical and empirical dependences for calculation of diameter of a jet are brought at work SJID in an initial steady mode.

В предыдущей статье [1] была обоснована необходимость изучения гидродинамических характеристик газожидкостных потоков в вертикальных трубах кожухотрубных струйно-инжекционных аппаратов (КСИА) в условиях начального установившегося режима его работы (первый режим работы КСИА). Была определена нижняя граница области существования этого режима и получено эмпирическое уравнение для расчёта начальной приведённой скорости движения жидкости в опускной трубе. Входящие в это уравнение параметры, отражают лишь основные геометрические элементы КСИА, в частности, диаметры сопел и труб, а также длину труб. Применение этого уравнения ограничено диапазоном исследованных диаметров сопел и с некоторыми уточняющими поправками может быть расширено для более

широкого диапазона размеров труб КСИА [2]. Для получения более объективных математических зависимостей, основанных на анализе происходящих физических явлений, необходимо проведение комплексных исследований гидродинамики двухфазных потоков, что позволит в существенной мере расширить наши представления о происходящих физических процессах, связанных с уносом газа в первом режиме.

Основным рабочим органом в КСИА является свободная жидкостная струя, вытекающая из сопла определённой конструкции и, поступающая в объём жидкости, находящейся в опускной трубе.

Свободная струя жидкости, в конструкции КСИА, совмещает в себе три основных устройства, которые во многих конструкциях тепло-массообменных аппаратах выполняются отдельно. В нашем случае струя является: газонагнетателем, т.е. устройством, подающим газовую фазу в аппарат; диспергатором – устройством, разрушающим относительно большие газовые объёмы на мельчайшие, в виде газовых пузырей, и перемешивающим устройством, т.е. устройством передающим механическую энергию струи (кинетическую энергию) к газожидкостной смеси, образующейся в трубе. Отсюда становится очевидным, что изучение гидродинамических параметров свободной струи представляет собой одну из важных задач при создании научно-обоснованной методики расчёта струйных аппаратов, т.к. количество уносимого газа струёй в дальнейшем будет определять такие важнейшие характеристики газожидкостной смеси, как объёмное газосодержание φ_g и поверхность контакта фаз между газом и жидкостью, a .

Количество уносимого газа свободной струёй, Q_g , во многом зависит от геометрических размеров, состояния её свободной поверхности и скорости движения струи в точке входа в жидкость. В зависимости от того, какую структуру будет иметь поток жидкости на выходе из сопла, унос газа в объём жидкости может происходить, а может и не происходить. Для того, чтобы наглядно представить себе эту ситуацию, рассмотрим этапы «жизни» струи с момента «зарождения» до её разрушения («смерти»).

На рис. 1 представлено поэтапное изменение структуры, и формы поверхности струи, ограниченной постоянной длиной, что характерно для струйных аппаратов, предполагающих неизменные геометрические размеры. Этот рисунок (рис. 1) показывает последовательные изменения её структуры в зависимости от постепенного увеличения скорости истечения жидкости, v_0 . При этом постоянными остаются проходной диаметр сопла d_0 , его конфигурация и шероховатость внутренней (проходной) поверхности, а также длина струи L_c . На шкале скоростей условно отмечены реперные скорости, при которых будут наблюдаться существенные изменения в структуре и геометрии свободной поверхности струи.

Анализируя, наблюдаемые на рис. 1, изменения структуры и формы поверхности свободной струи, истечение жидкости из сопла можно разбить на несколько этапов.

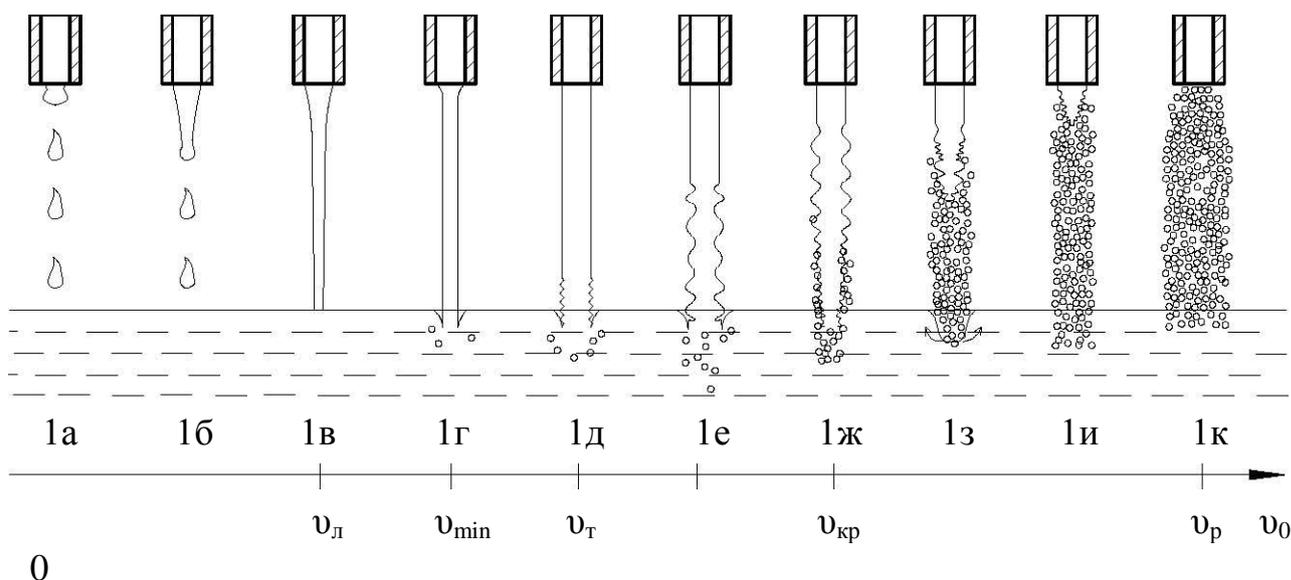


Рис. 1. Изменение структуры и формы свободной поверхности струи при изменении скорости истечения v_0 .

Этап 1. Капельное истечение. Скоростной диапазон существования этой области лежит в пределах от v_0 до $v_л$. В начале истечения струи, в обычном понимании жидкостного потока, нет. Истечение жидкости происходит каплями, (1а) причём, чем выше скорость, тем больше частота образования и отрыва отдельных капель. При определённой скорости истечения, в указанном выше диапазоне скоростей, струя начинает формироваться, однако длина её сплошной части не стабильна и после отрыва капли она резко уменьшается (1б). С приближением v_0 к $v_л$ длина струи увеличивается, и при достижении значения $v_л$ сплошная часть струи достигает свободной поверхности объёма жидкости (1в). С этого момента можно говорить о «рождении» свободной струи жидкости.

Этап 2. Ламинарные струи. При скорости истечения $v_0 = v_л$ наблюдаются струи, имеющие гладкую свободную поверхность, т.е. поверхность без видимых возмущений и направления движения всех частиц этой поверхности параллельно движению всех частиц струи. Скоростной диапазон существования таких струй предполагает наличие двух зон, область которых определяется формой самой струи. При v_0 близкой к $v_л$ струя (первая зона ламинарного течения), под действием сил тяжести и капиллярных сил будет вытягиваться и диаметр её d_c на некотором расстоянии от сопла будет меньше d_0 (1г). Это уменьшение будет тем больше, чем больше фиксированная длина L_c . С увеличением скорости истечения влияние сил тяжести на ускорение струи вырождается и $d_c = d_0$. Унос газа в этой скоростной зоне не наблюдается. Однако, при определённой скорости истечения $v_0 = v_{\min}$ глубина проникновения, пограничного слоя газа, окружающего ламинарную струю, внутрь объёма жидкости становится достаточной и по достижении этой скорости начинается процесс уноса газа (1д). С этого момента начинается работа струи во второй зоне скоростного режима, который будет определяться диапазоном скоростей истечения от $v_л$ до $v_т$.

В отличие от предшествующего случая, работа ламинарной струи характеризуется уносом газа в объём жидкости. Механизм уноса газа ламинарными струями недостаточно изучен. Тем не менее можно предположить, что унос газа становится возможным, если импульс пограничного ламинарного газового слоя будет достаточным для того, чтобы преодолеть сопротивление сил поверхностного натяжения жидкости и сил гидростатического давления. С увеличением скорости истечения, глубина проникновения пограничного газового слоя вместе со струёй увеличивается, но при достижении критической глубины, газовая плёнка, вошедшая в объём жидкости, разрушается на отдельные мелкие пузырьки турбулентными пульсациями жидкостных частиц.

Этап 3. Турбулентные струи. Дальнейшее увеличение скорости v_0 от значения $v_{л}$ до $v_{т}$ приводит к смене режимов течения струи от ламинарного к турбулентному. При достижении скорости $v_{т}$ многочисленные наблюдения показывают, что на выходе из сопла поверхность струи остаётся гладкой, т.е. струя движется в ламинарном режиме, но по приближении к точке входа струи в жидкость, на поверхности струи появляются возмущения («шероховатости»), 1д. Это связано с торможением частиц струи, имеющих большую скорость, жидкостными частицами, находящимися в объёме и имеющими значительно меньшую скорость движения.

С увеличением скорости истечения влияние концевых эффектов на состояние поверхности трубы распространяется постепенно по всей длине струи, что приводит к сокращению длины гладкой части струи и увеличению длины «шероховатой» её части 1с.

При достижении скорости истечения некоторого значения $v_{кр}$ начинается процесс разрушения струи, который выражается в отрыве частиц жидкости (капель) от основного потока (1ж). С этого момента струя начинает терять массу, а следовательно и импульс, который необходим для проведения процессов диспергирования и перемешивания газожидкостной смеси в рабочем объёме аппарата (1з) и (1и).

С увеличением v_0 , начиная от критической скорости, длина сплошной части струи начинала уменьшаться и при достижении $v_0 = v_p$ поток жидкости разрушается сразу на выходе из сопла (1к). Струя «умирает». Её длина $L_c = 0$.

Капельное истечение и струи, соответствующие значениям $v_0 = (v_{кр} \div v_p)$ не уносят достаточного количества газа для эффективного проведения массообменных процессов. Поэтому в ранее проводимых исследованиях [2÷5] авторы ограничивались изучением процессов инжектирования газа струями, вытекающими со скоростью в диапазоне от $v_{т} \div v_{кр}$.

В данной работе мы рассмотрели возможность использования струй для создания начального установившегося режима работы КСИА. Как было показано в работе [1]. Создание такого режима в КСИА не требует больших скоростей истечения жидкости из сопла. Очевидно, скоростной диапазон их применения будет лежать в пределах от v_{min} до $v_{т}$.

При работе КСИА в этом скоростном диапазоне наблюдения за формой и размерами струи показывают наличие её сужения по длине. Уменьшение

диаметра струи, в условиях сохранения её массы (потерь массы в ламинарных струях за счёт отрыва капель не происходит) может происходить лишь за счёт увеличения скорости струи. Здесь, как в напорном течении жидкости, соблюдается закон неразрывности потока, несмотря на отсутствие твёрдых стенок. Причиной увеличения скорости движения частиц жидкости является осязаемое влияние сил тяжести, обусловленных гравитационным полем. Таким образом, можно предположить, что скорость струи, входящая в объём жидкости v_c будет отличаться от скорости истечения жидкости из сопла v_0 .

Для того, чтобы определить скорость струи в точке входа её в рабочий объём нами была использована следующая зависимость, известная из механики движения твёрдых тел

$$v_c = \sqrt{v_0^2 + 2gL_c} \quad (1)$$

где v_0 – скорость истечения жидкости из сопла, м/с;

L_c – длина струи, т.е. расстояние между срезом сопла и точкой входа струи в жидкость, м.

Очевидно, предположить, что чем больше скорость истечения v_0 и меньше длина L_c , то влияние ускорения движения струи будет вырождаться. Для проверки данного предположения были рассчитаны значения v_c для используемых в КСИА диаметров сопел и постоянного значения $L_c = 150$ мм. Результаты расчётов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Вырождение скорости струи для различных диаметров сопел.

$d_0 \cdot 10^3$, м	v_0 , м/с	v_c , м/с	$d_0 \cdot 10^3$, м	v_0 , м/с	v_c , м/с	$d_0 \cdot 10^3$, м	v_0 , м/с	v_c , м/с
10	0,71	1,53	9	0,87	1,61	7,5	1,25	1,77
	0,9	1,56		1,11	1,7		1,59	2,05
	1,15	1,61		1,42	1,72		2,04	2,36
	1,53	1,72		1,89	2,02		2,72	2,82
	2,04	2,09		2,52	2,55		3,02	3,1
6	1,6	2,03	5	2,3	2,47			
	2,06	2,33		2,96	3,07			
	2,84	2,94		4,08	4,14			
	3,37	3,43		4,85	4,9			
	4,96	4,99		7,14	7,16			

Как видно из таблицы 1, увеличение скорости движения струи необходимо учитывать при изучении уноса газа струями жидкости, т.к. этот параметр во многом определяет Q_r . С другой стороны изменение скорости v_c тесно связано с другим не менее важным параметром в расчёте Q_r , диаметром струи d_c в точке входа её в объём жидкости. В отличие от v_c

параметр d_c поддаётся непосредственному измерению, что позволяет убедиться в правомерности, приведённых в таблице 1 расчётов.

Диаметр струи можно рассчитать исходя из следующих зависимостей

$$Q_{жс} = v_0 \cdot S_0 = v_c \cdot S_c = const \quad (2)$$

где S_0, S_c – площади поперечных сечений струи жидкости на выходе из сопла и в точке входа её в жидкость, соответственно, m^2

Считая, что площадь поперечного сечения струи в условиях ламинарного истечения из цилиндрического сопла представляет круг, то

$$S_c = \frac{\pi d_c^2}{4} \quad (3)$$

Тогда с учётом (1)

$$d_c = \sqrt{\frac{Q_{жс}}{0,785 \cdot \sqrt{v_0^2 + 2gL_c}}} \quad (4)$$

Таким образом, используя несложные зависимости (1÷4) появляется возможность предсказать геометрические размеры струи при изменении диаметра сопла и высоты установки сопла над опускающей трубой.

Проведённые расчёты позволили получить графики зависимости $d_c = f(L_c)$ для заданных расходов жидкости. Результаты этих расчётов представлены на рис. 2 для сопла $d_0 = 10$ мм в диапазоне расходов жидкости через сопло $Q_{жс} = (5,58 \div 12,56) \cdot 10^{-5} m^3/c$.

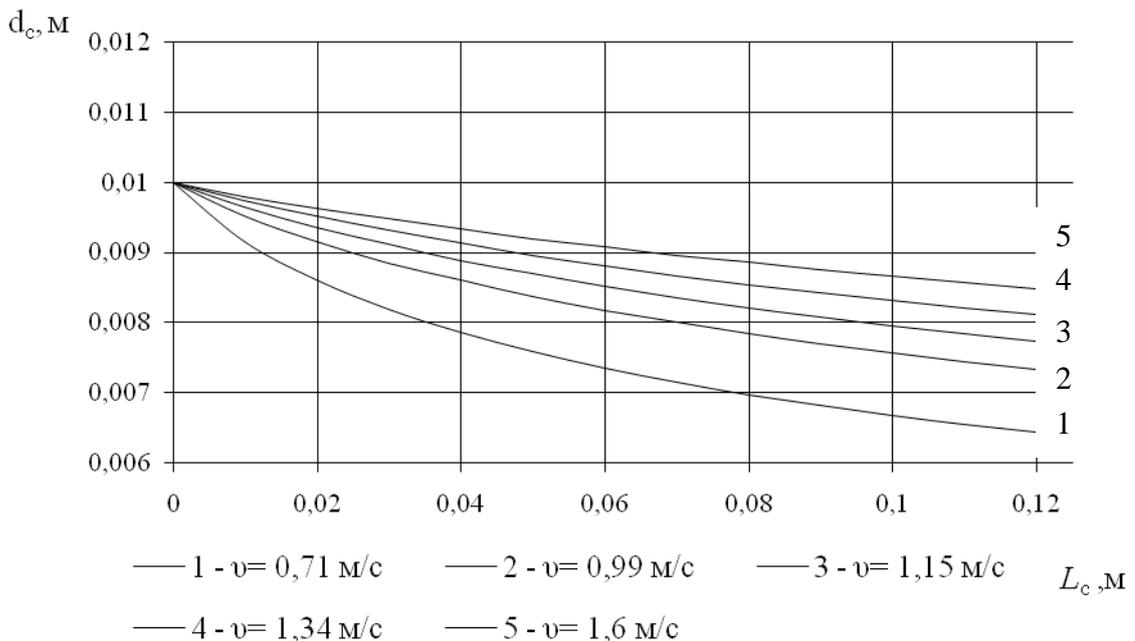


Рис. 2. Зависимость расчётных значений d_c от L_c при различных скоростях истечения из сопла $d_0 = 10$ мм.

Для оценки сходимости расчётных значений d_c с реальными значениями были выполнены экспериментальные измерения d_c фотографическим методом в сопоставленном диапазоне скоростей.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3. Измерение проводилось цифровой фотокамерой фирмы «Canon».

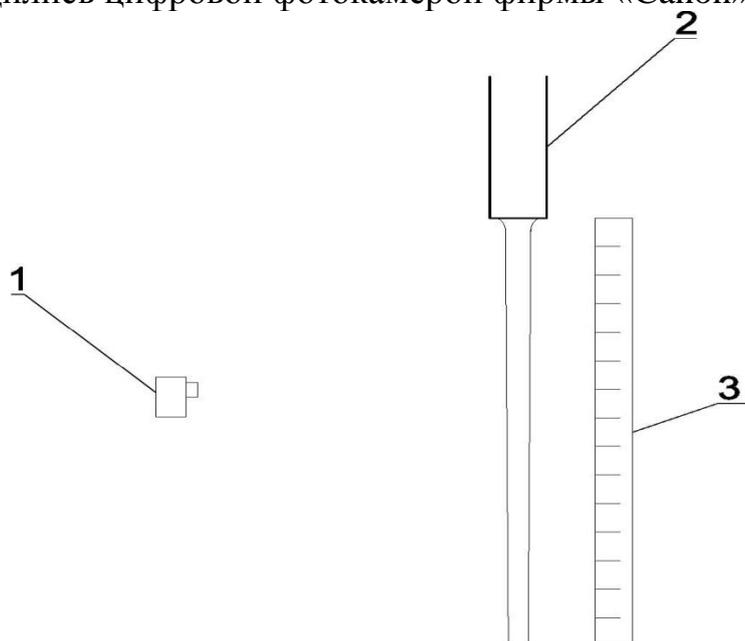


Рис. 3. Схема экспериментальной установки определения d_c методом фотографирования: 1 – фотокамера, 2 – жидкостное сопло, 3 – миллиметровая линейка.

Результаты экспериментальных данных представлены на рис. 4.

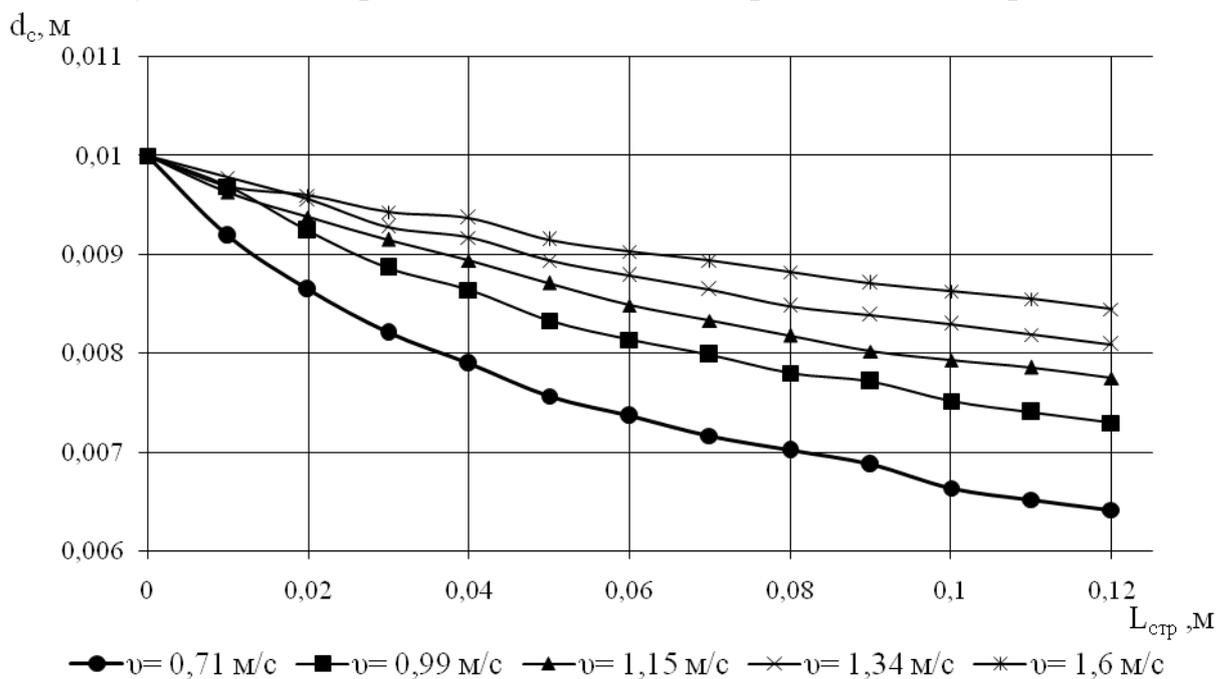


Рис. 4. Сравнение расчётных и экспериментальных значений d_c по формуле (3) и d_c , полученным методом фотографирования.

Максимальное отклонение расчётных данных от экспериментальных, составляет $\pm 3,9\%$, среднее отклонение не превышает $0,6\%$.

Таким образом, расчёт диаметра струи в точке её входа в опускную трубу с достаточной для инженерных расчётов точностью можно проводить по уравнению (4).

Список литературы.

1. Агаев К.Э., Сивенков А.В., Новосёлов А.Г. Структура газожидкостного потока в трубах КСИА в условиях начального устойчивого режима работы. Электронный научный журнал «Процессы и аппараты пищевых производств»/ ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, – Санкт-Петербург, 2012. – №1 – март.
2. Сивенков А.В., Гуляева Ю.Н., Новосёлов А.Г. Гидродинамика газожидкостных потоков в кожухотрубных струйно-инжекционных аппаратах (КСИА). 3. Гидродинамика КСИА проточного типа с повышенной производительностью по газовой фазе. // Известия СПбГУНиПТ. 2007, №2 – с. 14 – 16.
3. Сивенков А.В., Лебедева Т.Я., Новосёлов А.Г. Гидродинамика газожидкостных потоков в кожухотрубных струйно-инжекционных аппаратах (КСИА). 1. Гидродинамика КСИА без рециркуляции фаз. // Вестник МАХ, 2005, №3, с. 6 – 10.
4. Сивенков А.В., Гуляева Ю.Н., Лебедева Т.Я. К вопросу повышения производительности кожухотрубных струйно-инжекционных аппаратов по газовой фазе.// Сборн. работ студентов и аспирантов «Проблемы пищевой инженерии», СПб, СПбГУНиПТ, 2006, с. 143 – 147.
5. Сивенков А.В., Новосёлов А.Г. Гидродинамический расчёт движения двухфазных потоков в вертикальных трубах кожухотрубного струйно-инжекционного аппарата (КСИА) проточного типа с дополнительным соплом над сливной трубой (часть 1) // СПб., Известия СПбГУНиПТ, 2008, №2, с. 6 – 10.