

ISSN 0536-1036

DOI:10.37482/0536-1036

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Основан в 1833 г.

СПбГУПТД
НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ
ЦЕНТР
С-Петербург, ул.Ивана Черных, 4

2/380

2021

УДК 66.021.3.001.57:532.529

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-180-193

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКОРОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ИЗ ФОРСУНОК В СТРУЙНЫХ ГАЗОПРОМЫВАТЕЛЯХ ЦЕЛЛЮЛОЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА

С.В. Анискин, д-р техн. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-381X>

В.С. Куров, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [V-7289-2017](https://orcid.org/0000-0002-7168-9613)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7168-9613>

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095; e-mail: asv-47@mail.ru, vskurov18@mail.ru

Аннотация. Показано, что современное развитие технологии производства целлюлозы связано с совершенствованием оборудования систем «газ–жидкость», обеспечивающего основные технологические процессы варки целлюлозы и регенерации химических реактивов. Кроме того, это оборудование, предназначенное для рекуперации химических реактивов и снижения их выбросов в окружающую среду, является частью технологического процесса. Применение скрубберов в производстве целлюлозы имеет преимущества относительно других направлений, поскольку при этом используется замкнутый цикл регенерации варочного раствора. Исследования процессов, протекающих в скрубберах разного типа, становятся более многочисленными и фундаментальными. Одним из широко применяемых скрубберов с орошением газа струями капель является струйный газопромыватель, обладающий рядом положительных свойств: не создает сопротивления газовому потоку в газоходе, имеет тягодутьевые свойства вследствие эжекции. Только эти аппараты обеспечивают необходимые условия для устойчивости газового потока и струйного эффекта, позволяющего значительно повысить качество очистки выбросов. Для применения струйного эффекта и интенсификации работы технологического оборудования требуется описание процессов переноса вещества в струйных газопромывателях с учетом полидисперсной структуры капельного потока и особенностей дробления жидкости на капли центробежно-струйными форсунками. Научные работы, посвященные проблеме реализации струйного эффекта, показали необходимость исследования динамики дробления жидкости в центробежно-струйных форсунках, создающих заполненную каплями струю с большим углом раскрытия. Цель исследования – изучение скорости начального движения капель в области, расположенной непосредственно после участка дробления сплошной струи жидкости, вытекающей из форсунки. Для эксперимента применена фотографическая методика с двумя искровыми лампами. Одновременно контролировалось распределение плотности орошения. Результаты измерения распределений абсолютной скорости капель и плотности орошения сравнивались между собой и определялась функция распределения скорости жидкости в поперечном сечении газо-жидкостной струи струйного газопромывателя. На основе полученных данных разработана теоретическая модель, позволяющая установить начальную скорость движения капель центробежно-струйных форсунок – показатель необходимый для разработки новых струйных газопромывателей. Результаты могут быть применены для совершенствования технологических процессов производства целлюлозы.

Для цитирования: Анискин С.В., Куров В.С. Динамические характеристики скорости истечения жидкости из форсунок в струйных газопромывателях целлюлозного производства // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 180–193. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-180-193

Ключевые слова: производство целлюлозы, газожидкостное оборудование, струйный газопромыватель, струя, капли.

Введение

Целлюлозное производство основано на сложных химико-технологических процессах, для реализации которых применяют разнообразное оборудование [18]. Множество технологических процессов протекает с переносом вещества из газовой среды в жидкую среду и обратно [14]: десорбции и абсорбции, испарения и конденсации, пиролиза черного щелока и поглощения газовых выбросов в скрубберах. К газожидкостному оборудованию относятся варочные и содорегенерационные котлы, выпарные станции, растворители плава и др. Технологические процессы в реакторах газ–жидкость сопровождаются значительными выбросами в атмосферу [8, 10, 17]. Для их снижения установлены нормативные ограничения [11, 21, 29], разрабатываются оборудование и технологии его применения [22, 36, 37, 45]. Совершенствование производства целлюлозы – актуальная задача, которая неразрывно связана с развитием газожидкостного оборудования [2, 5]. Наиболее перспективны, особенно для крупных источников, исследования очистки газовых выбросов в полых скрубберах с капельным орошением в виде струй [6, 19, 34, 39].

Одним из широко применяемых скрубберов с орошением газа струями капель является струйный газопромыватель (СГП) – Jet scrubber. Это прямой аппарат с капельным орошением из форсунок, который может иметь как цилиндрическую форму, так и форму трубы Вентури [20, 27, 33, 42]. В этом устройстве капли двигаются по направлению газового потока со скоростью превышающей скорость газа [23, 28, 32].

СГП обладают рядом преимуществ по сравнению с другими технологическими аппаратами газ–жидкость. К их числу относится простая конструкция полого скруббера и возможность использования эжекции газа, которая создает тягодутьевой напор. Кроме того, в СГП при определенных условиях может возникать так называемый струйный эффект [1], повышающий качество очистки газа. Причина возникновения этого эффекта заключается в том, что изменение концентрации сорбируемого газа в СГП происходит не только в результате абсорбции каплями [16], но и в ходе диффузионного переноса сорбируемого газа в поперечном направлении. Эффект возникает потому, что диффузионный перенос в СГП может быть направлен в сторону области с более высокой плотностью орошения, где интенсивность абсорбции выше.

Традиционно СГП имеет форму трубы значительного размера. На рис.1 изображен СГП корпорации GEA [38], предназначенный для очистки газов от вредных примесей, производительностью – до 30 000 м³/ч. Диаметр скруббера (*DN*) может достигать 1 м, а высота (*b*) – 8,65 м. Форсунки для орошения установлены на верхней крышке колонны.

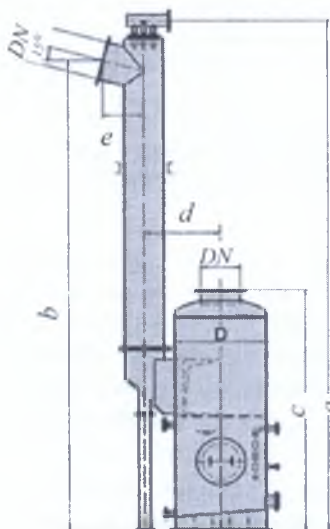


Рис. 1. Схема стандартного аппарата корпорации GEA: a – высота; b – высота входного патрубка; c – высота каплеуловителя; d – расстояние между осями скруббера и каплеуловителя; DN – диаметр корпуса скруббера

Fig. 1. GEA standard unit diagram: a – height; b – height of the inlet pipe; c – height of the droplet separator; d – distance between the scrubber and droplet separator axes; DN – diameter of the scrubber body

В целях уменьшения размеров СГП и увеличения их эффективности разрабатываются комбинированные аппараты со струйным орошением. Новый более компактный аппарат [13] с использованием струйного фильтра представлен на рис. 2.

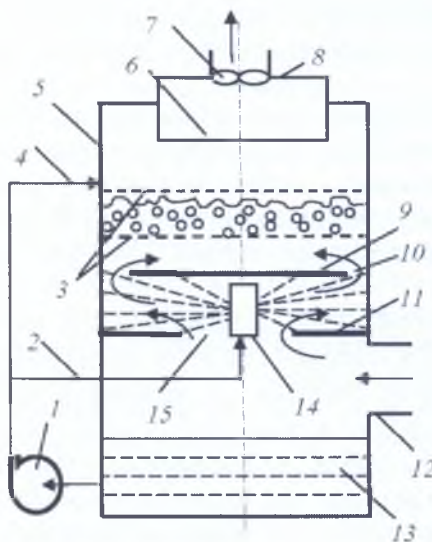


Рис. 2. Схема газоочистного аппарата со струйным фильтром: 1 – насос; 2 – линия подачи раствора на форсунки; 3 – пенный слой; 4 – линия подачи раствора в пенный слой; 5 – корпус; 6 – каплеуловитель; 7 – вентилятор; 8 – выходная труба; 9 – крышка; 10 – щелевой зазор; 11 – диафрагма; 12 – входная труба; 13 – емкость с раствором; 14 – форсунки; 15 – струйный фильтр

Fig. 2. Diagram of a gas purifying device with a jet filter: 1 – pump; 2 – line for supplying solution to the nozzles; 3 – foam layer; 4 – line for supplying solution to the foam layer; 5 – body frame; 6 – droplet separator; 7 – fan; 8 – outlet pipe; 9 – cover; 10 – slotted gap; 11 – diaphragm; 12 – inlet pipe; 13 – container with solution; 14 – nozzles; 15 – jet filter

Струйный фильтр, являющийся модификацией СГП, расположен между крышкой и диафрагмой. Капельное орошение осуществляется радиально направленными струями из центробежно-струйных форсунок, установленных на оси аппарата.

В данной конструкции струйный фильтр, используемый в сочетании с пенным слоем, позволяет повысить эффективность аппарата – струйно-пенного массообменного фильтра. По данным НПО ИМХОТЕП, такой аппарат был приобретен Сегежским ЦБК и множеством других предприятий.

Объекты и методы исследования

Для создания новых, более эффективных, обладающих струйным эффектом, компактных аппаратов необходимо проведение детальных исследований процессов, протекающих в СГП: дробления жидкости на капли из цельнофакельных форсунок [12, 24, 25, 35], движения полидисперсного капельного потока [40, 43, 44] и струйного эффекта [1].

В работе по исследованию десорбции сероводорода [4] подробно изучено дробление струи жидкости на капли с помощью центробежно-струйной форсунки, создающей сплошную капельную струю в форме конуса. Установлено, что дробление потока на капли происходит в два этапа с появлением фрагментарного участка в виде пены и занимает определенное время до образования полидисперсного капельного потока. Показано, что распределение капель по размеру имеет ограничение сверху [46].

В [15] отмечено, что движение мелких капель существенно отличается от движения крупных. Первые смещаются относительно траекторий движения вторых в сторону оси капельной струи. Существует вероятность их столкновений, что может, изменяя распределение плотности орошения, приводить к коалесценции капель.

В работе [3] представлена модель коалесценции капель в струе центробежно-струйной форсунки, которая позволяет рассчитывать изменение распределения плотности орошения.

Исследование образования и движения струй жидкости в СГП показало, что перемещение полидисперсного потока капель в значительной степени зависит от условий дробления струи при истечении жидкости из сопла форсунки и от начальной скорости капель.

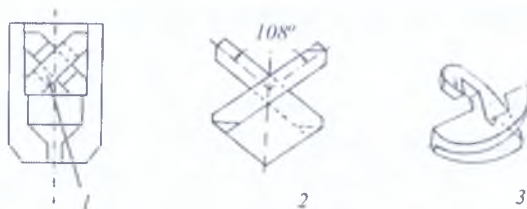
Существующий способ определения скорости истечения образующихся капель [4] не учитывает влияние области дробления струи, где осуществляется постепенный переход от сплошной струи жидкости к капельной. Это может приводить к существенным ошибкам при создании необходимых условий для использования струйного эффекта в полидисперсных потоках СГП систем газ-жидкость.

Основная цель исследования – изучение скорости истечения струи центробежно-струйной форсунки в СГП целлюлозного производства.

Схема центробежно-струйной форсунки [7] приведена на рис. 3.

Рис. 3. Крестообразные вкладыши: 1 – фирма «Варкау»; 2 – патент Валина; 3 – патент Боуэна

Fig. 3. Cross-shaped inserts: 1 – Varkaus firm; 2 – Valin's patent; 3 – Bowen's patent



Основным элементом, образующим струю форсунки, является вкладыш (1–3), имеющий разную технологию изготовления. Он предназначен для формирования тангенциальной скорости вращения потока жидкости перед сопловым отверстием. Вращение потока жидкости позволяет увеличить угол

раскрытия выходящей струи, влияет на распределение плотности орошения и коэффициент расхода [33]. Расчеты этих характеристик являются сложной и недостаточно проработанной задачей.

В данной работе исследование скорости истечения струи центробежно-струйной форсунки проведено эмпирически путем измерения распределения абсолютной скорости движения капель фотографическим методом [9, 26, 31, 41] на близком расстоянии от области дробления струи. Дополнительно, в этом же месте, определено распределение плотности орошения.

На рис. 4 изображена схема стенда для измерения скорости капель. Фотографировали движущиеся капли воды в струе центробежно-струйной форсунки с сопловым отверстием 3 мм, углом раскрытия 48° , под давлением 0,2; 0,6; 1,0 МПа, на расстоянии 10 см от сопла форсунки, со средним объемным содержанием жидкости 0,001. Струя имела форму осесимметричного конуса с круглым поперечным сечением. С помощью фотоаппарата и двух ламп делали двойные фотографии на одном кадре с выдержкой 1 мкс и задержкой 20...40 мкс под контролем осциллографа и частотомера и точностью 0,5 %. Смещение капель увеличивало ошибку измерения до 5,5 %.

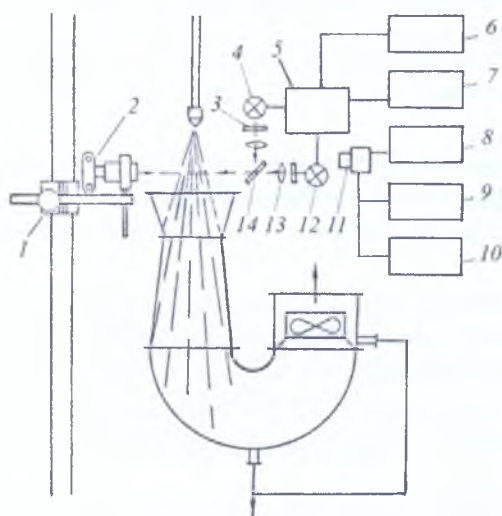


Рис. 4. Схема стенда для измерения скорости капель: 1 – координатник; 2 – фотоаппарат; 3 и 13 – красный и синий светофильтры; 4 и 12 – искровые лампы; 5 – система запуска; 6–8 – блоки питания; 9 – частотомер; 10 – запоминающий осциллограф; 11 – фотоэлектронный умножитель; 14 – полупрозрачное зеркало

Fig. 4. Diagram of the trial facility for measuring the speed of drops: 1 – transverse gear; 2 – camera; 3 and 13 – red and blue filters; 4 and 12 – spark lamps; 5 – starting system; 6–8 – power supplies; 9 – frequency meter; 10 – memory oscilloscope; 11 – photomultiplier; 14 – translucent mirror

Плотность орошения характеризует распределение расхода жидкости по сечению струи, состоящей из капель после участка дробления [30]:

$$I = \frac{\partial Q_{\text{ж}}}{\partial s}, \quad (1)$$

где I – плотность орошения, м/с; $Q_{\text{ж}}$ – объемный расход жидкости, м³/с; s – площадь орошения, м².

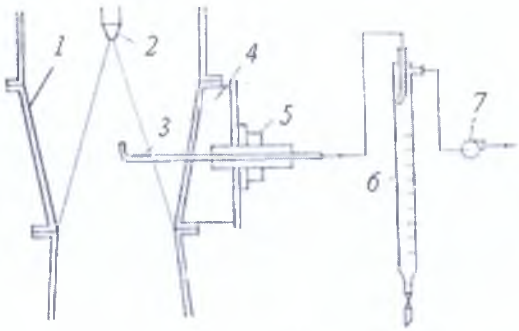
Относительная плотность орошения i – величина безразмерная, определяется как отношение плотности орошения I в точке площади поперечного сечения струи к среднему значению плотности орошения $\bar{I}$ в этом же сечении:

$$i = I / \bar{I}. \quad (2)$$

На рис. 5 изображен стенд для измерения плотности орошения с помощью специальной трубки с калиброванным входным отверстием диаметром 3 мм. Уловленные капли вместе с воздухом попадали в сепаратор, где определяли их объем, отмечали время заполнения сепаратора.

Рис. 5. Стенд для измерения распределения плотности орошения: 1 – корпус СГП; 2 – форсунка; 3 – трубка для отбора проб; 4 – щель для трубки; 5 – координатник; 6 – сепаратор; 7 – насос

Fig. 5 Stand for measuring the irrigation density distribution: 1 – jet scrubber body; 2 – nozzle; 3 – sampling tube; 4 – tube slot; 5 – transverse gear; 6 – separator; 7 – pump



Плотность орошения вычисляли по следующей формуле:

$$I = \frac{4V_b}{t\pi D_t^2}, \tag{3}$$

где V_b – объем воды в сепараторе; t – время отбора пробы; D_t – диаметр сопла форсунки.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 6 представлены результаты измерения абсолютной скорости движения капель в поперечном сечении струи жидкости, распыленной центробежно-струйной форсункой. Они обозначены кружками.

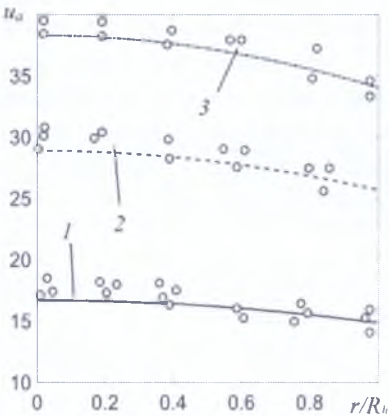
Для построения графика использовали цилиндрические координаты, такие же, как и при проведении измерений. Из распределения результатов измерений следует, что максимум абсолютной скорости при всех значениях давления совпадает с осью струи. Интерполяция результатов измерений представлена на рис. 6 в виде сплошных линий. Для интерполяции использовали простую тригонометрическую функцию следующего вида:

$$u_a = u_{am} \cos \left(\arctg \left(\frac{r}{h} \right) \right), \tag{4}$$

где u_{am} – максимальное значение абсолютной скорости жидкости; r – цилиндрическая координата радиуса струи; h – расстояние от сопла до уровня измерения.

Рис. 6. Распределение абсолютной скорости капель u_a по относительному радиусу сечения струи r/R_h (R_h – максимальный радиус нормального сечения струи на расстоянии h от сопла) при давлении жидкости $P_{ж}$, МПа: 1 – 0,2; 2 – 0,6; 3 – 1,0

Fig. 6. Distribution of the absolute speed of drops u_a over the relative radius of the jet section r/R_h (R_h – maximum value of the normal jet section radius at distance h from the snout) at a liquid pressure $P_{ж}$, МПа: 1 – 0.2; 2 – 0.6; 3 – 1.0



Функцию (4) можно записать в более простом виде через угол отклонения точки измерения от оси φ :

$$\varphi = \arctg\left(\frac{r}{h}\right). \quad (5)$$

На рис. 7 для удобства сравнения изображены результаты измерения плотности орошения в тех же координатах, что и функции распределения скоростей на рис. 6. Видно, что распределение плотности орошения существенно отличается от распределения скорости, представленного на рис. 6. Максимум не совпадает с осью струи, находится на некотором расстоянии.

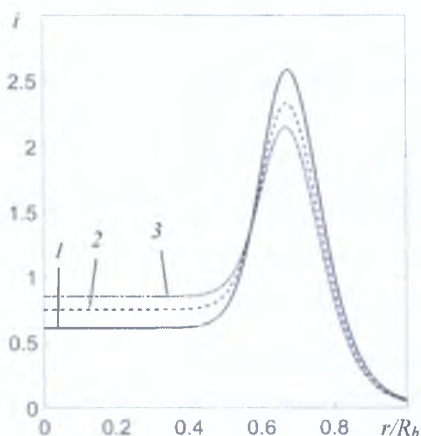


Рис. 7. Распределение относительной плотности орошения i по относительному радиусу сечения струи r/R_h при давлении жидкости $P_{\text{ж}}$, МПа: 1 – 0,2; 2 – 0,6; 3 – 1,0

Fig. 7. Distribution of the relative irrigation density i over the relative radius of the jet section r/R_h at a liquid pressure $P_{\text{ж}}$, MPa: 1 – 0.2; 2 – 0.6; 3 – 1.0

Для интерполяции результатов измерения использовали следующую функцию:

$$i = \frac{a}{1 + b\left(\frac{r}{R_h}\right)^k} - \frac{c}{1 + d\left(\frac{r}{R_h}\right)^k}, \quad (6)$$

где a, b, c, d, k – константы.

Сравнение кривых (рис. 6 и 7) показывает, что распределение скорости капель на участке дробления с высокой плотностью орошения не связано с распределением плотности орошения, это независимые параметры. Отсюда следует, что распределение абсолютной скорости капель одинаково для любого распределения плотности орошения и скорость может быть определена по формуле (5). Вероятно, что это справедливо только в области дробления жидкости на капли при высокой средней плотности орошения.

На основе полученных результатов разработана теоретическая модель определения скорости течения жидкости и газа на участке дробления жидкости центробежно-струйной форсункой. Рассмотрим участок, на котором плотность орошения высока настолько, что скорости жидкости и газа можно принять равными между собой:

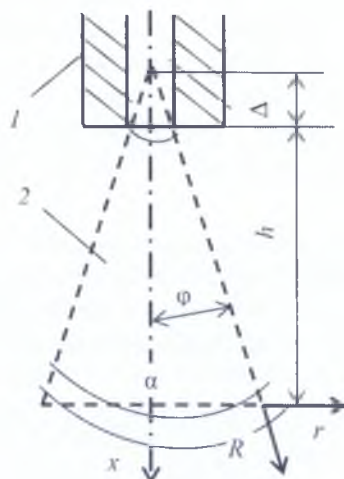
$$u_x = v_x \quad u_r = v_r; \quad (7)$$

где u – скорость жидкости; v – скорость газа; x и r – индексы осей цилиндрических координат.

На рис. 8 представлена схема истечения жидкости из сопла на участке дробления.

Рис. 8. Схема истечения жидкости из сопла центробежно-струйной форсунки: 1 – сопло форсунки; 2 – область дробления струи

Fig. 8. Diagram of liquid flow from the snout of a centrifugal-jet nozzle: 1 – snout of the nozzle; 2 – area of splitting the jet



Из сопла вытекает сплошная струя жидкости, область дробления которой имеет форму цилиндрического конуса. На схеме использованы цилиндрические координаты, соответствующие условиям измерения, и сферические координаты, необходимые для анализа результатов измерений.

Используя условие (7), запишем уравнение сохранения количества движения газожидкостной струи в интегральном виде:

$$\rho_{\text{ж}} \int_0^{r_c} u_{xc}^2 r \, dr = \int_0^{r_c} (\rho_{\text{ж}} \beta u_x^2 + \rho_{\text{г}} v_x^2) r \, dr, \quad (8)$$

где $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{г}}$ – плотность жидкости и газа соответственно; r_c – радиус отверстия сопла; u_{xc} – скорость жидкости в сечении сопла; β – объемное содержание жидкости; u_x – скорость жидкости; v_x – скорость газа.

Как следует из рис. 8, снижение скорости жидкости в направлении радиуса струи может быть связано с увеличением длины пути жидкости до сечения h на границе струи. Рассмотрим это более подробно. Предположим, что на одинаковом расстоянии от сопла, по поверхности сферы радиусом R , скорость движения капель u_{aR} тоже одинакова:

$$u_{aR} = \text{const}. \quad (9)$$

В этом случае дополнительное торможение происходит на расстоянии ΔR , которое определяется формулой

$$\Delta R = h \left(\frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}} - 1 \right). \quad (10)$$

При условии (9) торможение на участке ΔR должно быть равно изменению скорости по радиусу – формула (5). Расчеты по уравнению (8) для условий экспериментальных измерений показали, что изменение скорости по радиусу действительно связано с увеличением длины пути. Разница между расчетной и экспериментальной скоростью составила 4,16 %, что сравнимо с ошибкой измерения.

Из этого следует, что изменение скорости обусловлено торможением, вызванным эжекцией газа, а неравномерность распределения скорости жидкости, определенную формулой (5), можно считать возникающей при истечении жид-

кости из сопла. Полученный результат подтверждает правомерность применения уравнений (5) и (7) для всей области дробления струи.

Чтобы воспользоваться уравнением (5), необходимо найти максимальную скорость жидкости в сечении сопла, которая связана с давлением жидкости перед форсункой $P_{\text{ж}}$. Известна формула для определения средней скорости жидкости [12]:

$$\bar{u}_{\text{xc}} = \mu \sqrt{\frac{2P_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}}, \quad (11)$$

где μ – коэффициент расхода жидкости.

Используя эмпирическое уравнение (5), получим выражение для осевой составляющей скорости жидкости:

$$u_{\text{xc}} = u_{\text{am}} (\cos \varphi)^2. \quad (12)$$

где u_{am} – абсолютная максимальная скорость жидкости в плоском поперечном сечении струи.

Учитывая постоянство расхода жидкости в газожидкостной струе и полученное уравнение (12), определяем зависимость средней скорости истечения жидкости из сопла от максимальной скорости абсолютного движения жидкости:

$$\bar{u}_{\text{xc}} = \frac{2}{R} u_{\text{amc}} \int_0^R (\cos(\varphi))^2 r dr, \quad (13)$$

где u_{amc} – абсолютная максимальная скорость жидкости в плоском поперечном сечении сопла.

Полученное уравнение (14) можно проинтегрировать и представить в следующем виде:

$$\bar{u}_{\text{xc}} = u_{\text{amc}} \frac{\ln \left(1 + \left(\operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right)^2 \right)}{\left(\operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right)^2}. \quad (14)$$

Учитывая равенства (11) и (14), получим искомое уравнение для определения максимального значения скорости:

$$u_{\text{amc}} = \mu \frac{\left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^2}{\ln \left(1 + \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^2 \right)} \sqrt{\frac{2P_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}}. \quad (15)$$

Адекватность полученных уравнений подтверждают сравнения расчетов значений u_{amc} , использованных для построения интерполяционных кривых на рис. 6, с результатами измерений.

Выводы

1. Проведено экспериментальное измерение скорости движения капель, образующихся при дроблении жидкости в центробежно-струйной форсунке.
2. Получена функция распределения скорости капель в сечении струи жидкости.
3. Установлено, что распределение скорости капель в области их дробления не зависит от распределения относительной плотности орошения.

4. Построена математическая модель, которая позволяет определять скорости течения газа и жидкости в области дробления струи на капли центробежно-струйной форсункой в струйных газопромывателях целлюлозного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анискин С.В. Струйный эффект очистки газа в прямоточном распылительном аппарате // ЖПХ. 2010. Т. 83, № 6. С. 966–970. [Aniskin S.V. Jet Effect of Gas Treating in a Uniflow Sprinkling Apparatus. *Zhurnal Prikladnoi Khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2010, vol. 83, no. 6, pp. 966–970]. DOI: [10.1134/S1070427210060170](https://doi.org/10.1134/S1070427210060170)
2. Анискин С.В. Проблема развития систем газ–жидкость в ЦБП и возможность применения струйных газопромывателей // Целлюлоза, бумага, картон. 2016. № 1. С. 56–62. [Aniskin S.V. The Problem of Development of Gas-Liquid Systems in the Pulp and Paper Industry and the Possibility of Using Jet Scrubbers. *Tsellyuloza, bumaga, karton*, 2016, no. 1, pp. 56–62].
3. Анискин С.В. Столкновение капель при распыливании жидкости в струйном газопромывателе // Междунар. науч. период. изд. по итогам междунар. науч.-практ. конф. МНПК–66 «Новая наука: от идеи к результату». Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2016. № 2-3. С. 152–155. [Aniskin S.V. Collision of Droplets during Liquid Atomization in a Jet Scrubber. *International Scientific Periodical Based on the Results of the International Scientific and Practical Conference MNPK-66 "New Science: From Idea to Result"*. Sterlitamak, AMI Publ., 2016, no. 2-3, pp. 152–155].
4. Анискин С.В., Куров В.С. Исследование условий десорбции сероводорода при дроблении жидкости центробежно-струйной форсункой // Вестн. СПбГТУД. Сер. 1. 2018. № 4. С. 55–60. [Aniskin S.V., Kurov V.S. The Study of Hydrogen Sulfide Desorption Conditions during the Fragmentation of the Liquid by Centrifugal-Jet Nozzle. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizayna. Seriya 1* [Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and technical science], 2018, no. 4, pp. 55–60].
5. Братчиков Г.Г. Очистка газовых выбросов в целлюлозно-бумажной промышленности. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 255 с. [Bratchikov G.G. *Purification of Gas Emissions in the Pulp and Paper Industry*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 255 p.].
6. Галустов В.С. Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике. М.: Энергоатомиздат, 1989. 240 с. [Galustov V.S. *Direct-Flow Spraying Apparatuses in Heat Power Engineering*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 240 p.].
7. Галустов В.С., Анискин С.В., Михайлов Е.А. Распыливающие устройства с заполненным факелом для орошения тепло- и массообменных аппаратов. Обзорная информация. Сер. ХМ-1. М.: Химия, 1984. 33 с. [Galustov V.S., Aniskin S.V., Mikhaylov E.A. *Spraying Devices with a Filled Flare for Irrigation of Heat and Mass Transfer Apparatuses. Overview Information. Series KhM-1*. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 33 p.].
8. Гусакова М.А., Цыганов С.П., Мискевич И.В., Личутина Т.Ф. Экологическая оценка производства целлюлозно-бумажной продукции в ОАО «Монди Сыктывкарский ЛПК» // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2008. № 7. С. 70–75. [Gusakova M.A., Tsyganov S.P., Miskevich I.V., Lichutina T.F. Ecological Assessment of Pulp and Paper Production at Mondi Syktyvkar. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2008, no. 7, pp. 70–75].
9. Леончик Б.И., Маякин В.П. Измерения в дисперсных потоках. М.: Энергия, 1971. 248 с. [Leonchik B.I., Mayakin V.P. *Measurements in Dispersed Flows*. Moscow, Energiya Publ., 1971. 248 p.].
10. Личутина Т.Ф., Гусакова М.А., Вишнякова А.П. Оценка фактического состояния газовых выбросов в атмосферу на предприятиях ЦБП Северо-Запада России

в соответствии нормативам ЕС // Целлюлоза, бумага, картон. 2009. № 3. С. 69–74. [Lichutina T.F., Gusakova M.A., Vishnyakova A.P. Assessment of Real State of Gas Emissions into the Atmosphere at the Pulp and Paper Industry Enterprises of the North-West of Russia in Accordance with EU Standards. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2009, no. 3, pp. 69–74].

11. Наилучшие существующие технологии в целлюлозно-бумажной промышленности. СПб.: Экология и бизнес, 2004. 509 с. [*The Best Existing Technologies in the Pulp and Paper Industry*. Saint Petersburg, Ekologiya i biznes Publ., 2004. 509 p.].

12. Пажу Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. М.: Химия, 1984. 254 с. [Pazhi D.G., Galustov V.S. *Fundamentals of Liquid Spraying Techniques*. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 254 p.].

13. Патент 2688761С1 Российская Федерация, МПК. В 01 D 47/4. Пенный массо-обменный аппарат / С.В. Анискин, А.Г. Запорожец; заявитель и патентообладатель С.В. Анискин, А.Г. Запорожец; № 2018144394/04; заявл. 14.12.2018; опубл. 22.05.2019, Бюл. № 15. [Aniskin S.V., Zaporozhets A.G. *Foam Mass Exchange Apparatus*. Patent RF, no. RU 2688761 C1, 2019].

14. Пен Р.З. Технология целлюлозы: в 2 т. Т. 1. Производство сульфатной целлюлозы. Красноярск: СибГТУ, 2000. 236 с. [Pen R.Z. *Pulp Technology*: In 2 Vol. Vol. 1. Sulphate Pulp Production. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2000. 236 p.].

15. Протодьяконова О.И., Анискин С.В., Кадашев Ю.И. Влияние полидисперсного состава капель на гидродинамику газожидкостной струи // ЖПХ. 2001. Т. 74, № 12. С. 1994–2000. [Protod'yakonova O.I., Aniskin S.V., Kadashevich Y.I. Effect of Polydisperse Drop Composition on Hydrodynamics of Gas-Fluid Jet. *Zhurnal Prikladnoi Khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2001, vol. 74, no. 12, pp. 1994–2000]. DOI: [10.1023/A:1015546807859](https://doi.org/10.1023/A:1015546807859)

16. Рамм В.М. Абсорбция газов. М.: Химия, 1976. 655 с. [Ramm V.M. *Absorption of Gases*. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 655 p.].

17. Ситтиг М. Защита окружающей среды в целлюлозно-бумажной промышленности. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 280 с. [Sittig M. *Pulp and Paper Manufacture: Energy Conservation and Pollution Prevention*. Translated from English. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ., 1977. 280 p.].

18. Технология целлюлозно-бумажного производства: в 3 т. Т. 1, ч. 1. Древесное сырье и производство полуфабрикатов. СПб.: ЛТА, 2002. 424 с. [*Technology of Pulp and Paper Production*: In 3 Vol. Vol. 1, Part 1. Wood Raw Materials and Production of Semi-Finished Products. Saint Petersburg, LTA Publ., 2002. 424 p.].

19. Торф А.И., Прохоров Б.В., Пасечник С.П., Максимов В.Ф. Пылеулавливание мокрым способом в сульфатно-целлюлозном производстве. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1980. Вып. 7. 32 с. [Torf A.I., Prokhorov B.V., Pasechnik S.P., Maksimov V.F. *Wet Dust Collection in Sulphate Pulp Production*. Moscow, VNIPIEIllesprom Publ., 1980, vol. 7, p. 32].

20. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю. Очистка газов мокрыми фильтрами. М.: Химия, 1975. 216 с. [Uzhov V.N., Val'dberg A.Yu. *Purification of Gases with Wet Filters*. Moscow, Khimiya Publ., 1975. 216 p.].

21. Федеральный закон «Об охране окружающей среды»: от 10.01.2002 N 7-ФЗ. Доступ из правовой системы «КонсультантПлюс». [*Federal Law "On Environmental Protection" Dated on January 1, 2002 No. 7-FZ*].

22. Широков С.Н., Ермаков А.В. Современный подход к проектированию установок газоочистки // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2005. № 1. С. 37–39. [Shirokov S.N., Ermakov A.V. The Current Approach to Designing Gas-Cleaning Equipment. *Khimicheskoe i Neftegazovoe Mashinostroenie* [Chemical and Petroleum Engineering], 2005, no. 1, pp. 37–39]. DOI: [10.1007/s10556-005-0054-1](https://doi.org/10.1007/s10556-005-0054-1)

23. Agrawal K.S. Performance of Venturi Scrubber. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2013, vol. 7, iss. 11, pp. 53–69.
24. Al-Sarkhi A., Hanratty T.J. Effect of Pipe Diameter on the Drop Size in a Horizontal Annular Gas–Liquid Flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 2002, vol. 28, iss. 10, pp. 1617–1629. DOI: [10.1016/S0301-9322\(02\)00048-4](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(02)00048-4)
25. Beji T., Zadeh S.E., Maragkos G., Merci B. Influence of the Particle Injection Rate, Droplet Size Distribution and Volume Flux Angular Distribution on the Results and Computational Time of Water Spray CFD Simulations. *Fire Safety Journal*, 2017, vol. 91, pp. 586–595. DOI: [10.1016/j.firesaf.2017.03.040](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.040)
26. Breton K., Fleck B.A., Nobes D.S. A Parametric Study of a Flash Atomized Water Jet Using a Phase Doppler Particle Analyzer. *Atomization and Sprays*, 2013, vol. 23, iss. 9, pp. 799–817. DOI: [10.1615/AtomizSpr.2013007728](https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.2013007728)
27. Costa M.A.M., Ribeiro A.P.R.A., Tognetti E.R., Aguiar M.L., Gonçalves J.A.S., Coury J.R. Performance of a Venturi Scrubber in the Removal of Fine Powder from a Confined Gas Stream. *Materials Research*, 2005, vol. 8, no. 2, pp. 177–179. DOI: [10.1590/S1516-14392005000200016](https://doi.org/10.1590/S1516-14392005000200016)
28. Das S.K., Biswas M.N. Studies on Ejector-Venturi Fume Scrubber. *Chemical Engineering Journal*, 2006, vol. 119, iss. 2-3, pp. 153–160. DOI: [10.1016/j.ccej.2006.03.019](https://doi.org/10.1016/j.ccej.2006.03.019)
29. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe. *Official Journal of the European Union*, 2008, pp. 1–44.
30. Fathikalajahi J., Taheri M., Talaie M.R. Theoretical Study of Nonuniform Droplets Concentration Distribution on Venturi Scrubber Performance. *Particulate Science and Technology*, 1996, vol. 14, iss. 2, pp. 153–164. DOI: [10.1080/02726359608906691](https://doi.org/10.1080/02726359608906691)
31. Fore L.B., Ibrahim B.B., Beus S.G. Visual Measurements of Droplet Size in Gas-Liquid Annular Flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 2002, vol. 28, iss. 12, pp. 1895–1910. DOI: [10.1016/S0301-9322\(02\)00121-0](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(02)00121-0)
32. Gamisans X., Sarra M., Lafuente F.J. Fluid Flow and Pumping Efficiency in an Ejector-Venturi Scrubber. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2004, vol. 43, iss. 2, pp. 127–136. DOI: [10.1016/S0255-2701\(03\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(03)00104-1)
33. Gamisans X., Sarra M., Lafuente F.J., Azzopardi B.J. The Hydrodynamics of Ejector-Venturi Scrubbers and Their Modelling by an Annular Flow/Boundary Layer Model. *Chemical Engineering Science*, 2002, vol. 57, iss. 14, pp. 2707–2718. DOI: [10.1016/S0009-2509\(02\)00171-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00171-9)
34. Gonçalves J.A.S., Costa M.A.M., Aguiar M.L., Coury J.R. Atomization of Liquids in a Pease-Anthony Venturi Scrubber: Part II. Droplet Dispersion. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, vol. 116, iss. 1-2, pp. 147–157. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2004.08.030](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.030)
35. Guerra V.G., Gonçalves J.A.S., Coury J.R. Experimental Investigation on the Effect of Liquid Injection by Multiple Orifices in the Formation of Droplets in a Venturi Scrubber. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, vol. 16, iss. 1, pp. 351–359. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2008.03.101](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.101)
36. Han Z., Liu B., Yang S., Pan X., Yan Z. NO_x Removal from Simulated Marine Exhaust Gas by Wet Scrubbing Using NaClO Solution. *Journal of Chemistry*, 2017, vol. 2017, art. 9340856. DOI: [10.1155/2017/9340856](https://doi.org/10.1155/2017/9340856)
37. Harry-Ngei N., Ubong I., Ede P.N. A Review of the Scrubber as a Tool for the Control of Flue Gas Emissions in a Combustion System. *European Journal of Engineering Research and Science*, 2019, vol. 4, no. 11, pp. 1–4. DOI: [10.24018/ejers.2019.4.11.1561](https://doi.org/10.24018/ejers.2019.4.11.1561)
38. Jet Scrubbers. *Official Website of the GEA Group Aktiengesellschaft*. 2020. Available at: <https://www.gea.com/en/products/emission-control/gas-scrubbers/jet-scrubbers.jsp> (accessed 05.12.20).

39. Kandar T.K., Vhora S.F., Iyer K., Prabhu S.V. Experimental Investigation of the 700 MWe Containment Spray System Spray Nozzles/System. *Atomization and Sprays*, 2017, vol. 27, iss. 8, pp. 665–690. DOI: [10.1615/AtomizSpr.2017019352](https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.2017019352)
40. Pak S.I., Chang K.S. Performance Estimation of a Venturi Scrubber Using a Computational Model for Capturing Dust Particles with Liquid Spray. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, vol. 138, iss. 3, pp. 560–573. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2006.05.105](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.105)
41. Puentes N.A.G., Zoccal J.V.M., Guerra V.G., Coury J.R., Gonçalves J.A.S. Use of a Short Duration Electronic Flash in the Study of the Trajectory of Liquid Jet in a Pease-Anthony Venturi Scrubber. *Materials Science Forum*, 2010, vol. 660-661, pp. 537–542. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.660-661.537](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.660-661.537)
42. Shilyaev M.I., Khromova E.M. Modeling of Heat and Mass Transfer and Absorption-Condensation Dust and Gas Cleaning in Jet Scrubbers. *Mass Transfer – Advances in Sustainable Energy and Environment Oriented Numerical Modeling*. Ed. by H. Nakajima. Rijeka, Croatia, InTech, 2013, pp. 163–194. DOI: [10.5772/53094](https://doi.org/10.5772/53094)
43. Srilatha C., Morab V.V., Mundada T.P., Patwardhan A.W. Relation between Hydrodynamics and Drop Size Distributions in Pump–Mix Mixer. *Chemical Engineering Science*, 2010, vol. 65, iss. 11, pp. 3409–3426. DOI: [10.1016/j.ces.2010.02.035](https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.02.035)
44. Sundararaj S., Selladurai V. Flow and Mixing Pattern of Transverse Turbulent Jet in Venturi-Jet Mixer. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2013, vol. 38, no. 12, pp. 3563–3573. DOI: [10.1007/s13369-013-0643-9](https://doi.org/10.1007/s13369-013-0643-9)
45. Tran T.A. Research of the Scrubber Systems to Clean Marine Diesel Engine Exhaust Gases on Ships. *Journal of Marine Science: Research & Development*, 2017, vol. 7, iss. 6, art. 243. DOI: [10.4172/2155-9910.1000243](https://doi.org/10.4172/2155-9910.1000243)
46. Yoon S.S. Droplet Distribution at the Liquid Core of a Turbulent Spray. *Physics of Fluids*, 2005, vol. 17, iss. 3, art. 035103. DOI: [10.1063/1.1852577](https://doi.org/10.1063/1.1852577)

DYNAMIC BEHAVIOR OF LIQUID FLOW RATE FROM NOZZLES IN JET SCRUBBERS OF PULP PRODUCTION

Sergei V. Aniskin, Doctor of Engineering, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-381X>

Victor S. Kurov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [V-7289-2017](https://orcid.org/0000-0002-7168-9613),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7168-9613>

Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; e-mail: asv-47@mail.ru, vskurov18@mail.ru

Abstract. It is shown that the modern development of pulp production technology is associated with the development of gas-liquid systems equipment. Such equipment provides the main technological processes of pulp cooking and regeneration of chemical reagents. Furthermore, this equipment, designed to recover chemical reagents and reduce their emissions into the environment, is part of the technological process. The use of scrubbers in pulp production has an advantage over many other industries, since it uses a closed liquor regeneration cycle. Currently, studies of the processes occurring in scrubbers of different types are becoming more numerous and fundamental. This paper is devoted to the development of jet scrubbers. These devices have a number of properties that do not have scrubbers of other types. They do not create resistance to the gas flow in the flue; they have a gravitational property due to ejection. Only jet scrubbers create the necessary conditions for the stability of the gas flow and have a jet effect that allows to significantly increase the efficiency of emissions cleaning. To implement the jet effect and intensify the technological equipment operation it is required to describe transfer processes in jet scrubbers with regard to polydisperse structure of drop

flow and features of liquid splitting up into drops by centrifugal-jet nozzles. Scientific works devoted to the problem of realization of the jet effect showed the need to study the dynamics of liquid splitting in centrifugal-jet nozzles, which create a drop-filled jet with a large opening angle. The research purpose is to study the speed of the initial movement of drops in the area immediately after the splitting section of the continuous jet of liquid flowing from the nozzle. A photographic technique with two spark lamps was used for the experiment. At the same time, the distribution of irrigation density was controlled. The results of measuring the distributions of absolute speed of drops and irrigation density were compared with each other and the function of liquid speed distribution in the cross section of the gas-liquid jet of the jet scrubber was determined. Based on the obtained data, a theoretical model was developed to determine the initial speed of drops of centrifugal jet nozzles, an indicator required for the development of new jet scrubbers. The results can be applied to improve the technological processes of pulp production.

For citation: Aniskin S.V., Kurov V.S. Dynamic Behavior of Liquid Flow Rate from Nozzles in Jet Scrubbers of Pulp Production. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 180–193. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-180-193

Keywords: pulp production, gas-liquid equipment, jet scrubber, jet, drops.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare that there is no conflict of interest

Поступила 05.03.20 / Received on March 5, 2020
