

УДК 533.6.011.6

**М.Н. Гамрекели**

Гамрекели Михаил Николаевич родился в 1940 г., окончил в 1963 г. Уральский государственный лесотехнический институт, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры охраны труда Уральского государственного лесотехнического университета. Имеет около 100 научных работ в области исследования тепломассообмена в дисперсных средах, энергосбережения в процессах и аппаратах химической технологии, переработки промышленных отходов.



### СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ И ВРЕМЯ ИХ ПРЕБЫВАНИЯ В ГАЗОДИСПЕРСНОЙ КРУГЛОЙ СТРУЕ

В ходе анализа экспериментальных данных о скорости движения осевых капель газодисперсного факела, образуемого при истечении круглой струи, получены сведения о характере движения фаз, а также формулы для расчета их скоростей и времени пребывания в факеле.

*Ключевые слова:* газодисперсная струя, капли, газовая фаза, скорость движения, время пребывания.

Скоростное истечение газодисперсной струи, характер ее развития в рабочей камере, относительные скорости фаз и уровень турбулентности являются факторами интенсификации тепломассообмена в технологических аппаратах. Эти вопросы явились предметом нашего исследования, результаты которого представлены в настоящей статье.

Эксперименты проводили в цилиндрической камере при распыливании воды пневматической форсункой внутреннего смешения. Скорость капель в факеле определяли с помощью двух фотодатчиков, расположенных на разных расстояниях от форсунки, по смещению точек минимумов кривых фототока на осциллограммах (рис.1) при пульсирующей подаче жидкости плунжерным насосом-дозатором. Объектом исследования были капли, перемещающиеся по оси газодисперсного факела, поскольку они обладают наибольшей скоростью, максимально удалены от источника внешнего теплоподвода к факелу в промышленном теплообменном аппарате, что определяет дальнобойность факела и, соответственно, размеры аппарата. Минимумы фототока соответствовали прохождению мимо датчика пиковой порции при подаче жидкости, которая снижала



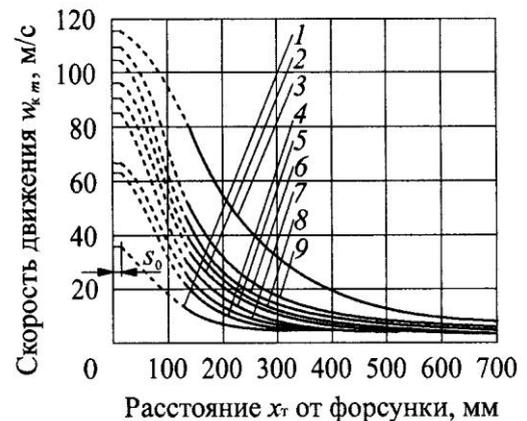
Рис. 1. Циклограммы истечения жидкости из сопла (1) и движения группы капель (2)

светопрозрачность факела, создавая своеобразную метку в виде повышенной концентрации капель в газе. При каждом режиме распыливания, используя механизм отсечки для предотвращения слияния капель, проводили их отбор на предметные стекла, покрытые слоем прозрачной иммерсионной среды. Предметные стекла с каплями фотографировали в проходящем свете с масштабом увеличения 35,3. Для каждого режима рассчитывали средний объемно-поверхностный диаметр капель, который использовали в дальнейшем для анализа аэродинамики газодисперсного факела и теплообмена.

На рис. 2 приведены графики изменения скорости  $w_{km}$  осевых капель в зависимости от текущего расстояния от среза сопла форсунки до оси струи  $x_T$ . На графиках пунктиром нанесены также участки кривых изменения скорости, полученные в результате экстраполяции расчетных скоростей газодисперсной смеси от значений на срезе сопла  $w_{см0}$  на начальном участке постоянной скорости  $s_0$  по оси струи до значений, измеренных экспериментально.

Принято допущение о том, что обмен количеством движения порции жидкости при повышенной концентрации капель в факеле с соответствующим объемом газа происходит непосредственно на срезе сопла. Применяя скорость адиабатического истечения  $w_{ад}$ , рассчитанную по методике [3], оп-

Рис. 2. Скорость движения групп капель по оси факела — данные измерений; - - - экстраполированные значения): 1 – 3 –  $m_k = 10$  кг/ч; 4 – 6 – 15; 7 – 9 – 20 кг/ч; 1, 4, 7 –  $m_{г.р}/m'_k = 0,5$ ; 2, 5, 8 – 0,8; 3, 6, 9 – 1,0



ределяли скорость смеси с учетом подтвержденных расчетами энергетических потерь в камере смешивания форсунки и при истечении струи:

$$w_{см0} = \frac{0,9m_{г.р} w_{ад}}{m_{г.р} + m_{ж}}. \quad (1)$$

Экспериментальные данные по скоростям движения осевых капель обобщены зависимостью

$$w_{km} = 0,014 w_{см0} \frac{m_{г.р}}{m_{ж}} \left( 10^3 \frac{d_0}{x_T} \right)^{1,33}. \quad (2)$$

Здесь  $m_{г.р}$ ,  $m_{ж}$  – массовый расход распыливающего газа и жидкости;

$d_0$  – диаметр отверстия истечения форсунки.

При пульсирующей подаче жидкости в формулах (1), (2) использовали значение  $m_{ж} = m_{ж \max}$ , соответствующее пику пульсации расхода.

Зависимость (2) может быть применима для следующих интервалов исследованных параметров:  $w_{см0} = 35,4 \dots 110,0$  м/с; удельный расход распыливающего газа  $g' = m_{г,р}/m_{ж} = 0,21 \dots 0,66$  кг/кг; отношение  $x_r/d_0 = 48 \dots 245$ .

В газодисперсном факеле наблюдается скольжение фаз. Авторы работы [6] с помощью киносъемки исследовали скорость движения капель по длине газодисперсного факела в цилиндрической камере. По характеру движения капель разного размера было установлено, что их скорость не совпадает со скоростью газовой фазы. Относительное движение капель в газе было подтверждено в [5] смещением капель от их потенциальных траекторий при распыливании жидкости в горячей камере.

При достаточно большой концентрации жидкости, что характерно для пневматического распыливания, процесс торможения капель должен оказывать определенное влияние на характер замедления расширяющейся газовой струи и уровень турбулентности. Для оценки уровня турбулентности применяют коэффициент пропорциональности  $a_c$ , характеризующий структуру струи.

В работе [1] теоретически рассмотрена струя, содержащая примеси, как свободная газовая струя, поскольку при обычном соотношении массовых расходов объем распыливающего воздуха превосходит объем примеси в  $10^2 - 10^3$  раз. Кроме того, по мере удаления от форсунки это отношение увеличивается многократно за счет присоединения к струе воздуха из окружающего пространства. Принято допущение, что по всей длине факела в результате обмена количеством движения скорости частичек примеси и газа равны, т.е. нет скольжения фаз, а коэффициент структуры  $a_c$  остается таким же, как у свободной газовой струи. Поэтому автор [1] считая, что движение мелких взвешенных частиц в струе подчиняется движению газа, т.е. их скорость совпадает со скоростью газа в струе, предложил выражение для описания закономерности расширения свободной осесимметричной струи, содержащей взвесь (принято  $a_c = 0,066$ , как для чисто газовой струи):

$$\frac{a_c x_r}{r_0} = 0,96 \frac{w_0}{w_m} \sqrt{\frac{1 + g'_{уд}}{1 + 0,56 g'_{уд} \frac{w_m}{w_0}}}. \quad (3)$$

Здесь  $a_c$  – коэффициент структуры струи;

$r_0$  – начальный радиус струи;

$w_0$  – начальная скорость газа;

$g'_{уд}$  – концентрация примеси жидкости в виде капель в распыливаемом газе.

Позднее автор [2] признал, что допущения об отсутствии скольжения фаз и постоянстве коэффициента структуры газодисперсной струи не-

корректны. Однако теоретическое выражение, использованное в этой работе [2], показало, что одновременное истечение из сопла газа и жидкости своеобразно отражается на законе затухания свободной газодисперсной струи. В этом случае импульс струи увеличивается за счет импульса примеси, и затухание скорости газовой фазы происходит медленнее, чем чисто газовой струи. Формула (3) удобна при оценке скольжения фаз, интенсивности торможения капель и косвенно может быть применена для оценки уровня турбулентности газовой струи по экспериментально определенным значениям скоростей осевых капель.

В данной статье проанализированы результаты, полученные нами. Экспериментальные данные вводили в правую часть выражения (3). В соответствии с полученными результатами рассчитывали коэффициент структуры струи  $a_c$  из левой части выражения. Так как скорость осевых капель определяли по меткам пиковых расходов, то при расчетах принимали  $g'_{уд} = m_{ж\ max}/m_{г.р.}$ , а начальную скорость струи рассчитывали как скорость смеси по уравнению (1) при  $m_{ж\ max}$ . Параметр  $g'_{уд} = 1/g'$ .

В наших опытах концентрация примесей в струе  $g'_{уд} = 1,5 \dots 4,8$  кг/кг. На (рис. 3) показано изменение относительных скоростей осевых капель  $w_{к\ m}$  по длине факела. Нанесена также классическая кривая изменения скорости чисто газовой струи [1]. Зависимость связывает осевую

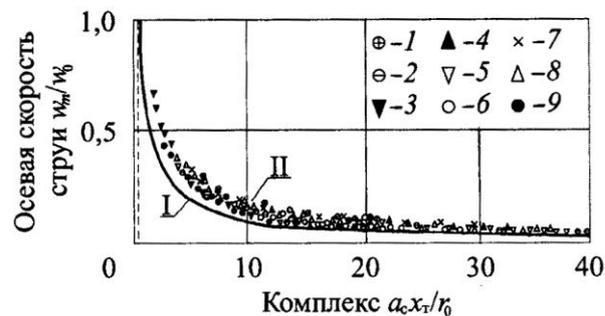


Рис. 3. Изменение осевой скорости круглых струй: I — газовая струя; II — область экспериментальных данных для газодисперсной струи (см. обозначения 1–9 в подписи к рис. 2)

скорость  $w_{mT}$  в текущем сечении со скоростью истечения первичной струи  $w_0$  на срезе сопла:

$$w_{mT} = w_0 \frac{0,96}{\frac{a_c x_T}{r_0}}. \quad (4)$$

Из рис. 3 следует, что относительное снижение скорости примеси (капель) происходит менее интенсивно, чем чисто газовой струи при той же начальной скорости истечения.

Полученные из выражения (3) значения коэффициента  $a_c$  характеризуют (рис. 4) отклонение движения распыленной струи от свободной турбулентной газовой струи, для которой  $a_c = 0,066$ . Установлено, что коэффициент  $a_c$  не остается постоянным по длине струи и зависит от концентрации примеси жидкости в газе и расстояния до среза сопла. Расположение опытных точек (рис. 3, 4) показывает, что в начале основного участка струи



( $a_c < 0,066$ ) капли несколько опережают газовую струю. Затем их относительная скорость увеличивается. Создаются условия вторичного дробления капель за пределами сопла форсунки. В дальнейшем при общей тенденции замедления фаз происходит сближение скоростей газа и капель. Увеличение коэффициента  $a_c$  по длине струи характеризует интенсивное снижение скорости капель в результате торможения. Характер расположения опытных точек показывает, что относительные скорости капель в газе зависят от приобретенного каплями при распыливании количества движения. Капли, обладающие более высоким начальным импульсом (кривые 2, 4, 7, 8), интенсивно тормозятся, что подтверждается ростом  $a_c$ . Происходит переход энергии движения капель в энергию турбулентных вихрей газа. Затем, по мере уменьшения разности скоростей фаз при развитии факела, интенсивность торможения уменьшается. Капли с меньшим начальным импульсом тормозятся менее интенсивно.

По мере удаления от среза сопла происходит дальнейшее приближение значений коэффициента структуры струи к значению  $a_c = 0,066$ , что является результатом снижения относительной скорости фаз и приближения характера развития газодисперсного факела к закономерностям свободной газовой струи.

Данные многочисленных измерений в широких пределах изменения параметров ( $ax_T/r_0 = 4,3 \dots 63,8$ ;  $w_{km}/w_{cm0} = 0,031 \dots 0,670$ ;  $g' = 0,21 \dots 0,66$  кг/кг), аппроксимируются функцией равнобочной гиперболы  $xy = b^2/2$  (где  $x = a_c x_T/r_0$ ;  $y = w_{km}/w_{cm}$ ), со среднеквадратическим отклонением  $\pm 7,5$  %.

Получена формула для расчета коэффициента структуры газодисперсной струи:

$$a_c = 1,61 \frac{r_0}{x_{km}} \frac{w_{cm0}}{w_{km}}. \quad (5)$$

Для многих тепломассообменных аппаратов с газовыми струями целесообразно знать среднее время пребывания среды в факеле, которое, как показали наши расчеты, может быть учтено коэффициентом усреднения скорости в сечении  $k_v = 0,28$  в формуле (4).

Представим среднюю скорость в текущем сечении газового факела  $\bar{w}_{ф.т}$  как отношение пути перемещения элементарной газовой ячейки за элементарный промежуток времени и выполним интегрирование. В результате получим формулу для расчета времени пребывания элементарной ячейки газовой фазы при перемещении до текущего сечения в факеле:

$$\tau_T = \frac{a_c (x_T + x_0)}{0,56 r_0 w_0}. \quad (6)$$

Время пребывания фазы за один ход  $\tau_n = \tau_T$  соответствует  $x_T = x_B$  (где  $x_B$  – расстояние до поперечного сечения встречи границ конуса факела со стенками камеры).

Для круглой осесимметричной струи время пребывания в зоне факела может быть определено по зависимости  $\tau_n = 34,8 / w_0$ . Это соответствует условиям наших экспериментов: диаметр камеры  $D_a = 0,3$  м;  $r_0 = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $x_B = 0,666$  м;  $a_c = 0,066$ .

Выполнен анализ экспериментальных данных, полученных при распыливании воды в аппарат с высокотемпературными стенками ( $t_{ст} = 400 \dots 900$  °С). Для испаряющегося газодисперсного факела наиболее точное расчетное время пребывания может быть получено при координате  $x_T$ , соответствующей границе полного испарения.

Теория турбулентных струй применялась ранее для оценки времени пребывания в факеле. В работе [4] экспериментально исследован газодисперсный факел, образуемый пневматической форсункой при очень больших удельных расходах распыливаемого газа  $g' = 5 \dots 10$  кг/кг. На основе зависимости (4), как и в [1], получена формула для расчета скорости осевых капель с учетом того, что при высокой дисперсности они имеют равную с газом скорость:

$$\tau = \frac{x_B - x_n}{0,96 w_n} \left[ \frac{a_c (x_B - x_n)}{d_0} - 0,15 \right], \quad (7)$$

где  $x_n$  – расстояние до переходного сечения струи;

$w_n \approx w_{01}$  – скорость в переходном сечении струи;

0,15 – поправочное экспериментальное число.

Применение этой формулы ограничено, поскольку многие промышленные струйные аппараты работают при значительно меньших удельных

расходах газа и грубодисперсном распыливании. В этих случаях пренебрежение относительным движением фаз приводит к недопустимым погрешностям.

Скольжение капель в газе может быть учтено, если при расчете скорости и времени пребывания газовой ячейки в газодисперсном факеле по формулам (4), (6) применено предварительно рассчитанное по (5) значение коэффициента структуры струи.

Расчетное выражение для определения текущей скорости капель получено при интегрировании выражения (2) по  $dt$  от 0 до значения времени перемещения капли  $\tau_{km}$  на участке  $dx$  в пределах изменения расстояния от среза сопла форсунки от  $x_{\tau 1}$  до  $x_{\tau 2}$ :

$$\tau_{\tau} = \frac{m_{ж} (x_{\tau 2}^{2,33} - x_{\tau 1}^{2,33})}{318,7 m_{сm0} m_{г.р} d_0^{1,33}} \quad (8)$$

Область применения формулы (8) определяется пределами изменения параметров в выражении (2). Таким образом, представленные в статье формулы позволяют достаточно точно рассчитывать:

а) относительную скорость осевых капель в газодисперсном факеле, в зависимости от которой может быть определена интенсивность межфазного теплообмена;

б) необходимое время пребывания для испарения наиболее дальнобойных осевых капель, определяющих длину факельной зоны аппарата.

Результаты исследования движения фаз в газодисперсном факеле могут быть использованы при расчетах конструктивных размеров промышленных сушилок для производства кормовых дрожжей и лигносульфонатов, а также форсуночных камер для сжигания сгущенных щелоков и волоконсодержащих шламов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамович, Г.Н.* Теория турбулентных струй [Текст] / Г.Н. Абрамович. – М.: Физматгиз, 1960. – 360 с.
2. *Абрамович, Г.Н.* Теория турбулентных струй [Текст] / Г.Н. Абрамович [и др.]. – М.: Наука, 1984. – 716 с.
3. *Бахмачевский, Б.И.* Теплотехника [Текст] / Б.И. Бахмачевский [и др.]. – М.: Металлургиздат, 1963. – 608 с.
4. *Давитулиани, В.В.* Исследование эффективности прямоточной распылительной сушилки [Текст]: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / В.В. Давитулиани. – Воронеж, 1969. – 23 с.
5. *Тыныбеков, Э.К.* Автореф. дисс. ... канд. техн. наук [Текст] / Э.К. Тыныбеков. – М., 1967. – 27 с.
6. *Manning, W.P.* [Text] / W.P. Manning, W.H. Gauvin // A.I.Ch.E. Journal. – 1960. – N 6, vol. 2.

Уральский государственный  
лесотехнический университет

Поступила 15.04.05

*M.N. Gamrekely*

**Velocity of Liquid Drops Motion of and Duration of their Stay  
in Gas-dispersed Round Stream**

Data on phase motion nature for axial drops of gas-dispersed flame formed under the round stream outflow as well as formulas for calculation of their velocities and duration of their stay in the flame have been received in the course of analysis of velocity experimental data.

