

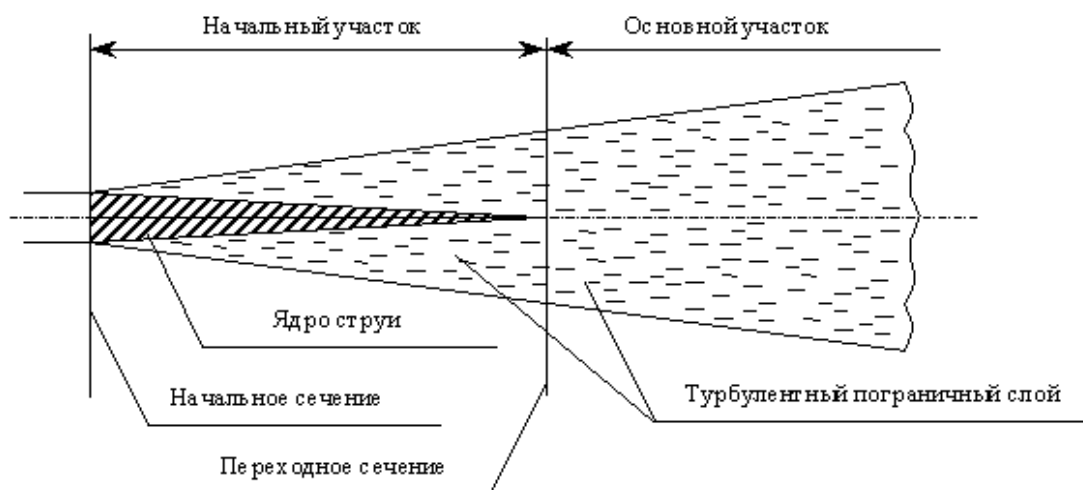
*Ю.Н. Сенчихин, канд. техн. наук, доцент,  
И.Н. Грицына, канд. техн. наук, доцент, С.А. Виноградов  
(Национальный университет гражданской защиты Украины)*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ УСТОЙЧИВОСТИ УЛЬТРАСТРУИ

Предложены математические зависимости для определения длины сплошного участка струи, проведена оценка протяженности сплошного участка ультраструи, рекомендовано учитывать ее при расчетах дальности подачи ультраструй.

**Ключевые слова:** ультраструя, длина сплошного участка струи.

**Постановка проблемы.** Течение распыленных струй жидкости в воздухе можно схематически представить в виде, изображенном на рис. 1.

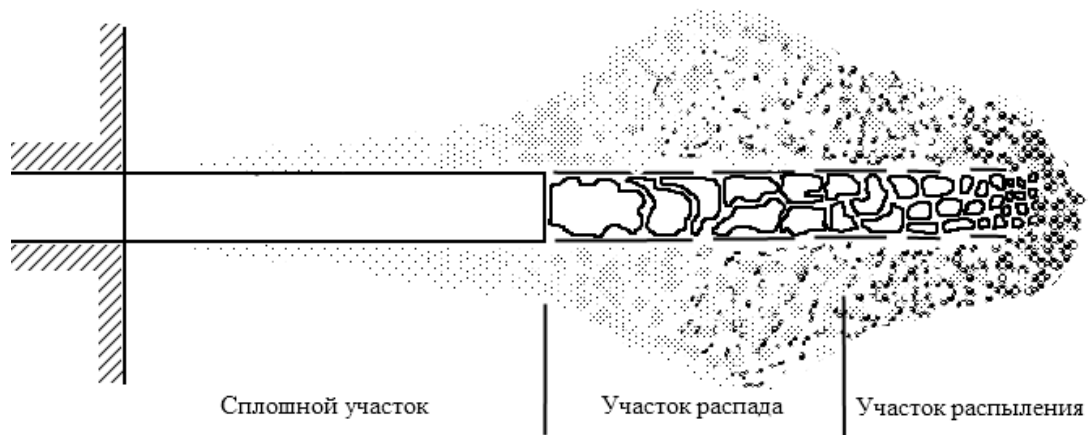


**Рис. 1.** Схема течения тонкораспыленной струи

Однако процесс распространения ультраструй имеет отличную от менее скоростных жидкостных струй природу. Для случая истечения ультраструй характерна схема, изображенная на рис. 2.

В отличие от распыленной струи жидкости, в ультраструе присутствует сплошной участок, на котором происходит незначительная потеря массы струи, но целостность ее не меняется. Начальные параметры струи изменяются незначительно. Далее ультраструя ведет себя как обычная распыленная струя и можно использовать известные соотношения для определения дальности подачи.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Для определения дальности полета тонкораспыленных струй жидкости проведено множество экспериментальных и теоретических исследований, построено несколько зависимостей [1 - 4]. В работе [5] проведены расчеты сплошного участка ультраструи. Работы по определению дальности подачи ультраструй не проводились.

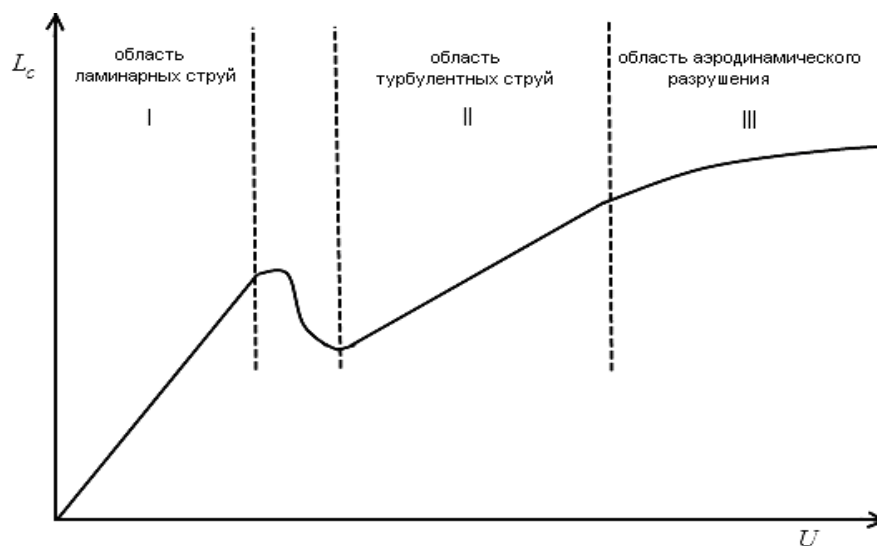


*Рис. 2. Схематическое изображение ультраструи*

**Постановка задачи и ее решение.** Применение для определения дальности подачи ультраструи известных моделей без учета протяженности сплошного участка, приводит к значительным погрешностям в расчетах и не адекватному отображению процесса распространения струи.

Для оценки дальности подачи ультраструй вначале необходимо определить длину сплошной части, после чего можно рассматривать струю как распыленную.

Проведенные экспериментальные исследования [6] позволили получить график устойчивости жидкой струи в виде зависимости длины сплошного участка струи от скорости ее истечения (рис. 3). Исследователи выделяют три скоростных области истечения: область ламинарных струй I, область турбулентных струй II и область аэродинамического разрушения струи III. Согласно скоростным характеристикам ультраструи, для нее характерен участок III.



*Рис. 3. Зависимость длины неразрушенного участка струи от скорости ее истечения*

На данный момент для расчета длины неразрушенной части струи существует несколько зависимостей.

Так, в [4] экспериментально получена зависимость

$$L_c = 442 \cdot We^{-0.71} \rho_c^{-1.21} M^{0.308} d_c, \quad (1)$$

где  $We = \frac{U^2 \rho_c d_c}{\sigma}$  – критерий Вебера,

$\rho_c$  – плотность жидкости,

$d_c$  – диаметр струи.

Критерий

$$M = \frac{\mu_c^2}{\rho_c d_c \sigma}, \quad (2)$$

где  $\mu_c$  – динамический коэффициент вязкости жидкости,

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Для малоскоростной струи в [2] искомая величина найдена в виде соотношения

$$L_c = 8,46U \sqrt{\frac{\rho_c d_c}{8\sigma}}. \quad (3)$$

Для оптимизации расчета длины сплошной части струи при турбулентном режиме истечения, установлена зависимость [6]

$$L_c = 1,7d_c \cdot We^{0,5} (Re \cdot 10^{-4})^{-0,625}, \quad (4)$$

где  $Re$  – число Рейнольдса.

В [7] сделано предположение, что длина неразрушенного участка турбулентной струи не зависит от плотности окружающей газовой среды, а определяется числом Вебера  $We$ . При  $\sqrt{We} < 20$

$$L_c = 3,27d_c \sqrt{We}, \quad (5)$$

а при  $\sqrt{We} > 35$

$$L_c = (55 + 1,085\sqrt{We})d_c. \quad (6)$$

Пересечение двух зависимостей при  $\sqrt{We_{кр}} = 25$  указывает на наличие критического режима, соответствующего переходу от ламинарного распада струи к турбулентному. Значение  $We_{кр}$  зависит от степени турбулентности, т.е. от геометрии соплового канала.

Однако влияние плотности газовой среды на разрушение жидкой струи может оказаться существенным при давлении  $p=10^5$  Па.

В [3] предложена методика расчета длины неразрушенной струи жидкости, которую можно использовать для определения длины сплошной части струи для участка III рис. 3. По данной методике вначале определяются критические скорости истечения для разных случаев распада по формуле (1)

$$U_{01-02} = \frac{A_{1-2} \left[ \frac{\rho_c d_c \sigma}{2\mu_c^2} \left( \frac{\mu_c}{\mu_g} \right)^{0,5} \right]^{-0,58}}{\frac{\mu_c}{\sigma} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_c}}}, \quad (7)$$

где  $A$  – коэффициент, определяющийся характером распада струи (для  $U_{01}$   $A_1=4$  – распад в результате симметричных колебаний без воздействия окружающей среды; для  $U_{02}$   $A_2=15$  – распад в результате развития волнообразных колебаний, обусловленных воздействием внешней среды),

$\rho_c$  – плотность жидкости,

$d_c$  – диаметр струи,

$\mu_c$  – динамический коэффициент вязкости жидкости,

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости,

$\mu_g$  – динамический коэффициент вязкости воздуха,  $\rho_g$  – плотность воздуха.

После этого определяется критические времена начала распада, отсчитанное от момента истечения струи

$$T_{01-02} = \frac{A_{1-2} \left[ \left( 0,1 \frac{\sigma \rho_c d_c}{\mu_c^2} \right)^{3/2} + \left( 0,1 \frac{\sigma \rho_c d_c}{\mu_c^2} \right) \right]}{\frac{\sigma^2 \rho_c}{27 \mu_c^3}} \quad (8)$$

Для ультраструй характерен распад в результате развития волнообразных колебаний. Поэтому далее для определения фактического времени начала распада используется скорость  $U_{02}$ :

при  $U < U_{02}, T = T_{02};$  (9)

при  $U > 1,1U_{02}, T = \frac{0,17T_{02}}{\frac{U}{U_{02}} - 1}.$  (10)

где  $U$  – скорость истечения струи.

Длина сплошного участка струи определяется из соотношения

$$L_c = UT. \quad (11)$$

Анализ результатов расчетов по изложенной методике (табл. 1) показывает, что длина сплошного участка струи достигает 145 калибров ( $L_c/d_c$ ), поэтому данный участок необходимо учитывать при определении дальности подачи ультраструй.

**Таблица 1**

*Зависимость времени начала распада струи и длины сплошного участка от скорости истечения*

| Скорость $U$ , м/с | Время начала распада $T$ , с | Длина сплошного участка струи $L_c$ , м |
|--------------------|------------------------------|---|
| 500                | 0,0029                       | 1,45                                    |
| 1000               | 0,00145                      | 1,455                                   |
| 1500               | 0,00096                      | 1,42                                    |

**Выводы.** Таким образом, расчет длины сплошного участка ультраструи необходимо проводить по формулам (7-11). Оценка протяженности сплошного участка по предлагаемым зависимостям для ультраструй показывает, что длина неразрушенной части струи находится в диапазоне 140÷145 калибров.

#### Список литературы:

- 1. Абрамов Ю.А.** Моделирование процессов в пожарных стволах / Абрамов Ю.А., Росоха В.Е., Шаповалова Е.А. – Харьков: Фолио, 2001. – 195 с.
- 2. Витман Л.А.** Распыливание жидкости форсунками / Витман Л.А., Кацнельсон Б.Д., Палеев И.И. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 62 с.
- 3. Взаимодействие жидких струй с атмосферой** / [сост. В.В. Воронина] – М.: ЦАГИ, 1988. – 195 с.
- 4. Балістика** крапель розпилених рідин / Ольшансткий В.П., Ольшанський С.В., Ларін О.М., Фомін Є.О. – Біла Церква: вид. Пшонківський, 2006. – 124 с.
- 5. Noumi M.** Flow characteristics and impact phenomena of pulsed water jets / Noumi M., Yamamoto K. – Chicago (Illinois), 1976. – Paper B4. – P. 47-58 (Proc. 3rd International Symposium on Jet Cutting Technology).

**6. McCarthy M.J.** Review of stability of liquid jets and the influence of nozzle design / McCarthy M.J., Molley N.A. – Chem. Engineering J., 1974, vol. 7, p. 1-20.

**7. Phinney R.E.** Breakup of a turbulent liquid jet in a low-pressure atmosphere / Phinney R.E. – Amer. Inst. Of Chem. Engineers J., 1975, vol. 21, N 5, p. 25-29.

*Ю.М. Сенчихін, І.М. Грицина, С.А. Виноградов*

### **ВИЗНАЧЕННЯ ЗОНИ СТІЙКОСТІ УЛЬТРА СТРУМЕНЯ**

Запропоновані математичні залежності для визначення довжини суцільної ділянки струменя, проведена оцінка довжини суцільної ділянки ультраструменя, рекомендовано враховувати її при розрахунку дальності подачі ультраструменя.

**Ключові слова:** ультраструмінь, довжина суцільної ділянки струменя.

*Y.N. Senchikhin, I.N. Hritsyna, S.A. Vinogradov*

### **DETERMINATION STABILITY ZONE OF HIGH-SPEED WATER JETS**

Proposed mathematical dependences for determination of the length of continuous area of jet are described. Estimations for the choice of optimum ratio for the calculation of continuous part of high-speed water jets are conducted.

**Key words:** high-speed water jets, length of continuous area of jet.

