

УДК 631.51:62-822

**Н.В. Савченко, аспир.****О.М. Яхно, д.т.н.***Национальный технический университет Украины «КПИ»***Н.Г. Шкарабура, к.т.н.***Черкасский институт пожарной безопасности*

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРУЕФОРМИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА КОМПАКТНОСТЬ СТРУИ**

*Исследованы конструктивные параметры струеформирующих насадок, оказывающие существенное влияние на энергетические характеристики струи, и получены критерии, характеризующие компактность струи*

**Введение.** Эффективность и безопасность являются основными критериями при выборе любых технологических процессов в промышленности. Струйные технологии, получившие в настоящее время широкое применение в различных отраслях промышленности, обеспечивают безопасность работ и высокую производительность процессов резания и разрушения материалов при минимальных затратах энергии.

В качестве режущего инструмента при применении данной технологии используется струя жидкости стационарного или нестационарного действия. Согласно проведенному нами анализу [8], более эффективным является применение нестационарных струй.

Создание и формирование нестационарных струй осуществляется с помощью генераторов пульсаций, которые в настоящее время применяются в таких областях промышленности, как: горнорудная – для разрушения твердых материалов (горных пород любой крепости и полезных ископаемых) [2]; металлургическая и энергетика – для разрушения монолитов шлаков, очищение поверхности теплоэнергетического оборудования [3]; легкая – для резки бумаги, картона, ткани, кожи, керамических материалов [4] в установках используемых для пожаротушения [7]; пищевая – для резки замороженных продуктов [9] и др.

На сегодняшний день в отечественной и зарубежной литературе существуют многочисленные исследования, исходя из которых генераторы пульсаций принято подразделять по физическим особенностям на устройства ударного и безударного действия. Широкую область применения получили устройства ударного действия.

**Анализ существующих исследований.** Гидродинамические параметры струи, характеристики её движения и распада зависят от условий и факторов, при которых происходит формирование потока жидкости в подводящих каналах силового устройства (генератора) и струеформирующем устройстве.

Рациональная конструкция струеформирующего устройства обеспечивает снижение энергоёмкости процесса гидродинамического воздействия на твердый материал и способствует обеспечению эффективного использования подводимой потенциальной гидравлической энергии (давление жидкости на входе в струеформирующее устройство), которая создается генератором и передается через струеформирующую насадку (сопло) струе, преобразуясь в кинетическую энергию жидкости.

Качественные гидродинамические характеристики струи оцениваются компактностью, которая обеспечивается условиями формирования струи.

На основании опытных данных [1] условия компактности позиционно систематизируем и представим в виде таблицы (табл. 1).

Как известно [2], компактность струи характеризуется длиной начального участка. Она зависит от множества факторов, основными из которых являются начальные параметры струи и условия ее формирования. Величина начального участка струи в значительной мере определяет характер изменения всех динамических и структурных характеристик по ее длине.

По результатам экспериментальных исследований, проведенных Бафталовским В.Е., для случая применения давлений свыше 40 МПа была получена эмпирическая зависимость для определения начального участка:

$$l_H = 0,235d_0^{0,69}l_2^{0,69}d_1^{0,43}D^{-0,15}\left(\frac{p_0}{\gamma}\right)^{-0,073}, \quad (1)$$

где  $p_0$  – давление на входе в насадку;  $d_0$  – диаметр насадки на выходе;  $l_2$  – длина успокоителя;  $l_3$  – расстояния от входа в устройство до успокоителя;  $D$  – диаметр проточного канала устройства.

Таблица 1

*Классификация струй по условиям компактности*

№ позиции	Наименование позиции	Условие
1	некомпактные струи	$l_H \leq 30d_0$
2	недостаточно компактные струи	$30d_0 < l_H \leq 50d_0$

3	компактні струї	$50d_0 < l_H \leq 70d_0$
4	весьма компактні струї	$70d_0 < l_H \leq 90d_0$
5	висококомпактні струї	$l_H > 90d_0$

**Постановка і рішення задачі.** Задачею статті являються аналіз і дослідження основних критеріїв і параметрів, характеризуючих компактність струї на початковому участку. Основне напрямлення дослідження – вплив конструктивних параметрів насадки на компактність при різних значеннях підводного тиску.

В якості критерія компактності з достаточною достовірністю приймаємо симплекс геометричного подобию  $\frac{l_n}{d_0}$  (відношення довжини початкового участку струї  $l_n$  к діаметру вихідного отвору  $d_0$  насадки).

Установлено [1], що симплекс геометричного подобию зв'язаний з числом Рейнольдса, функціональною залежністю  $\frac{l_n}{d_0} = f(Re)$ . Для струй стаціонарного дії при значеннях підводного тиску до 40 МПа ця залежність має вигляд  $\frac{l_n}{d_0} = A - B Re$  [2]. Якщо значення підводного тиску вище 40 МПа, то течія рідини переходить в автотельний режим і симплекс  $\frac{l_n}{d_0}$  не залежить від  $Re$ .

Згідно з проведеним нами аналізом, в кінцевому підсумку довжину компактною частини струї  $l_n$  розглянемо як функцію, залежачу від швидкості виходу  $v$ , густоти  $\rho$  і в'язкості  $\mu$  робочої рідини, підводного тиску  $P$ , вихідного діаметра насадки  $d_0$ , частоти пульсацій  $n$  (в разі нестационарного потоку).

$$l_n = f(p, d_0, v, \rho, \mu, n). \quad (2)$$

Використовуючи аналіз розмірностей [6], замінемо представлену функцію залежністю між критеріями подобию:

$$\frac{l_n}{d} = x \cdot \frac{Eu^{k_3}}{Re^{k_4} Ho^{k_6}}. \quad (3)$$

Таким чином, шукана функція представлена, відповідно до  $\pi$ -теоремою, в вигляді співвідношень між чотирма комплексними

величинами, в данном случае  $\frac{l_n}{d}$  – симплекс геометрического подобия;

$\frac{P}{g^2 \rho} = Eu$  – критерий Эйлера, отражающий влияние перепада давления

на движение жидкости;  $\frac{\mu}{g \cdot d \cdot \rho} = Re^{-1}$  – критерий Рейнольдса,

отражающий влияние силы трения на движение жидкости;

$\frac{n \cdot d}{g} = \frac{d}{g \cdot t} = Ho^{-1}$  – критерий гомохронности, учитывающий

неустановившийся характер движения в нестационарных потоках, числовые значения коэффициента  $x$  и показателя степени  $\kappa_3, \kappa_4, \kappa_6$  (должны определяться опытным путем).

Необходимо отметить, что при использовании в качестве рабочей неньютоновской жидкости, обладающей упругими свойствами (водополимерные струи), необходимо учитывать ее реологические особенности, которые существенно влияют на картину течения на начальном участке. Механическая работа протекания вязкоупругой жидкости через насадку затрачивается не только на вязкую диссипацию и изменение кинетической энергии потока, но так же и на накопление в жидкости упругой энергии. Существование упругой энергии в потоке значительно влияет на длине начального участка. В этом случае последняя является функцией не только числа Рейнольдса,

Эйлера, гомохронности, но и числа Вайсенберга  $W = \frac{K_1}{K} \left( \frac{3v_{xcp}}{H} \right)^{m,n}$ , то

есть:

$$l_n = \gamma(n)Re + \varphi(n, m)W; \tag{4}$$

$$\frac{l_n}{d} = x \cdot \frac{Eu^{\kappa_3}}{Re^{\kappa_4} Ho^{\kappa_6} W^{\kappa_5}}, \tag{5}$$

где  $\kappa_5$  – коэффициент, характеризующий реологические свойства рассматриваемых жидкостей;  $W$  – критерий Вайсенберга, учитывает эластичные свойства жидкости.

Далее более подробно проведем анализ параметров, оказывающих влияние на формирование компактной струи.

Так длина  $l_k$  и диаметр  $d_k$  подводящего канала оказывают существенное влияние на окончательный результат формирования водяных струй в насадках. При этом следует отметить влияние коэффициента поджатия потока  $K_n = d_k / d_0$ . Увеличение  $K_n$  потока в

насадке приводит к увеличению длины струи, а следовательно, возрастает время её формирования. Тем самым создаются условия, при которых происходит более полное осреднение продольных скоростей, и уменьшается интенсивность поперечных пульсаций скоростей потока жидкости в насадке. Компактная струя может быть сформирована при значении  $K_n \geq 6$  [5]. Согласно исследованиям [6], значение величины поджата потока  $K_n$  не должно превышать значения 10–15. Большее значение способствует ухудшению компактности и других гидродинамических характеристик струи, так как следствием превышения этих значений являются значительные потери напора жидкости в силовых устройствах и низкие показатели гидродинамических параметров струи.

Факторы, влияющие на компактность струи в начальном участке, осуществляют следующие функции:

$p_0$  – определяет величину скорости внешнего течения и градиент давления пограничного слоя, с ростом его значения возрастает общий уровень турбулентности в насадке;

$\alpha$  – оказывает существенное влияние на длину насадки, а следовательно – на градиент давления  $\frac{dp_0}{dl}$ . Увеличение угла конусности приводит к росту поперечной составляющей скорости и ухудшает условия выравнивания профиля скоростей основного течения, одновременно с этим (при соблюдении условия  $20^\circ > \alpha > 10^\circ$ ) он способствует росту устойчивости пограничного слоя в насадке;

$R_z$  – рост шероховатости, приводит к негативному влиянию на ламинарность пограничного слоя;

$\frac{dp_0}{dl}$  – критерий воздействия основного течения на пограничный слой (падение давление по длине струи), обеспечивает возрастание устойчивости ламинарного пограничного слоя при уменьшении давления в направлении движения потока.

Градиент давления можно представить как функцию, зависящую от таких параметров  $\Delta p = f(v_{cp}; d_0; l_n; \mu; \rho; g)$ . Отсюда определим, что помимо критериев подобия  $Eu$ ,  $Re$  градиент давление характеризуется критерием Фруда, который устанавливает подобие потоков в поле действия массовых сил.

Высокая степень компактности струи обеспечивается многоступенчатым профилем насадки, благодаря которому на выходе из насадки эпюра скоростей струи принимает практически прямоугольную форму.

Проведенные нами исследования позволили сделать вывод, что к основным параметрам выбора насадок для формирования компактных струй можно отнести такие:

- рациональная форма профиля проточной части насадки – конусно-цилиндрическая;
- оптимальное значение угла конусности  $\alpha = 13\text{--}14^\circ$ , длины цилиндрической части –  $4d_0$ ;
- материал для изготовления насадок – специальные легированные стали (40х13), а так же вольфрамкобальтовые сплавы.

В ряде случаев необходимо размещение струеформирующих устройств в ограниченном пространстве, что вызывает необходимость разработки конструкций насадок с уменьшенными линейными размерами, при условии сохранения высокой компактности струи. Данным условиям удовлетворяет насадка с двумя углами конусности, представленная на рис. 1.

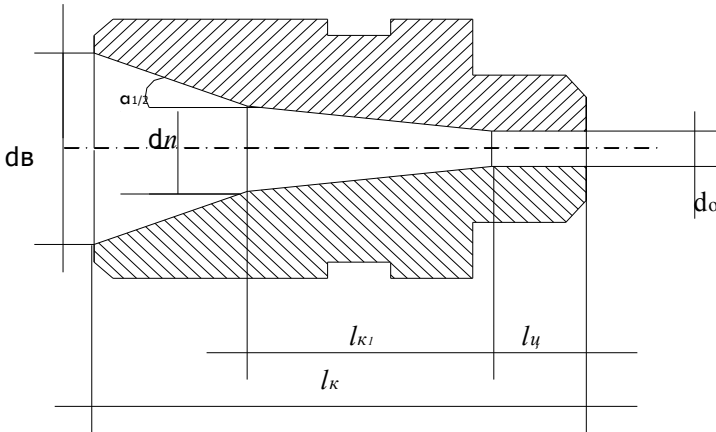


Рис. 1. Конструкция двухконусной насадки

При разработке конструкции двухконусной насадки для малогабаритных струеформирующих устройств на первом этапе необходимым условием является определение основных переходных параметров ее сечения. Расчетные формулы, приведенные в работах [6], сведен в таблицу 2.

Для уменьшения величины возмущений, вносимых в поток в местах стыковки, необходимо обеспечить в местах стыка режим

течения с гидравлически гладкими стенками. Согласно исследованиям [2], приведенное условие возможно осуществить, обеспечив минимальный диаметр проточного канала струеформирующего устройства  $d_{\min}$ , в котором сохраняется режим течения с гидравлически гладкими стенками, то есть  $Re = (Re)_{кр}$ .

Таблиця 2

Расчетные формулы для определения переходных параметров сечения насадок

Определяемый параметр	Формула	Условные обозначения
Безразмерная величина средней скорости	$\frac{\bar{v}_i}{\bar{v}_0} = \frac{d_0^2}{d_i^2}$	$v_i$ – средняя скорость потока в произвольном сечении конусной части насадки на расстоянии $l_i$ от выходного сечения; $v_0$ – средняя скорость струи на вылете из насадки на выходе
Диаметр конусной части насадки на расстоянии $l_i$	$d_i = d_0 + 2\text{tg}(\alpha/2)l_i$	$d_0$ – диаметр насадки на выходе
Безразмерные значения скорости потока в конусной части насадки	$\frac{\bar{v}_i}{\bar{v}_0} = \frac{1}{(1 + 2\text{tg}(\frac{\alpha}{2})\frac{l_i}{d_0})^2}$	
Длина переходного конуса насадки	$l_n = \frac{d_0(K_n - 3,1)}{2\text{tg}(\frac{\alpha}{2})}$	$d_i = d_n = K_n d_0$ , где $d_0 = d_n$ ; $l_i = l_n$
Длина насадки	$l_0 = \frac{d_0(K_n - 3,1)}{2\text{tg}(\frac{\alpha}{2})} + 8,5d_0 + l_u$	$\alpha = 20-30^\circ$ – угол конусности переходного конуса; $l_u = 3-4 d_0$ – длина цилиндрического участка на выходе из насадки
Уравнение образующей переходного конфузора	$y = \frac{d_n}{2} - \text{tg}(\frac{\alpha}{2})x$	$d_n = 3,1d_0$ – переходный диаметр конфузора насадки
Уравнение образующей основного конфузора	$y = (\frac{d_0}{2} - \text{tg}(\frac{\alpha}{2})l_n) - \text{tg}(\frac{\alpha_1}{2})x$	
Длина переходного участка конфузора	$l_n = \frac{(\frac{d_s - d_0}{2}) - \text{tg}(\frac{\alpha}{2})l_k}{\text{tg}(\frac{\alpha}{2}) - \text{tg}(\frac{\alpha_1}{2})}$	$l_k$ – общая длина насадки



Окончание таблицы 2

Диаметр переходного конфузора	$d_n = d_e - 2l_n \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)x$	$d_e$ – входной диаметр
-------------------------------	--	-------------------------

$(Re)_{np}$  – предельное значение числа Рейнольдса, при котором сохраняется режим течения с гидравлически гладкими стенками.

Значение  $d_{\min}$  определяется как:

$$d_{\min} = \frac{(Re)_0 d_0}{(Re)_{np} \nu} = \frac{438 p_0^{0,5} d_0^2}{(Re)_{np} \nu}, \quad (6)$$

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;  $(Re)_0$  – число Рейнольдса на выходе из насадки.

Полученные зависимости для расчета параметров конструкции струеформирующих насадок рассчитаны на давление рабочей жидкости до 50 МПа, но в настоящее время в промышленности стали все чаще работать на давлениях до 250 МПа. Повышение давлений рабочей жидкости до такого значения требует дополнительных исследований профиля проточной части струеформирующих насадок. В основу концепции разработки профилей для высококачественного формирования струй жидкости с исходным давлением до 250 МПа положены следующие соображения. Преобразования потенциальной энергии потока в кинетическую энергию струи в значительной степени зависят от времени, за которое это преобразование происходит. То есть существует некоторое минимальное значение времени, при котором это преобразование может быть осуществлено при сохранении высокой устойчивости пограничного слоя на выходе из насадки и при допустимой величине искажений в основном течении. Как фактор, от которого зависит время прохождения потока через насадку, кроме профиля проточной части, выступает длина насадки.

Активно влиять на время прохождения и режимы формирования потока жидкости в каждой ступени насадки позволяет использование идеи ступенчатого преобразования потенциальной энергии в кинетическую энергию струи.

По схеме двухступенчатого профиля проточной части насадки (рис. 2) можно проследить основные изменения характеристик жидкостного потока на этапах формирования высокоскоростной струи жидкости. Первоначальный разгон жидкостного потока происходит в конфузоре первой ступени с углом конусности  $\alpha_1$ . При этом происходит первичное выравнивание эпюры продольных скоростей

потока жидкости после прохождения через успокоитель, обнуление радиальных скоростей жидкостного потока, создание запаса устойчивости пограничного слоя на входе в основной разгонный участок, снижение исходного уровня потенциальной энергии на входе в основной разгонный участок. Динамические характеристики процесса разгона на этом участке определяются величиной угла  $\alpha_1$  и

значением отношения  $\frac{D_{cp}}{d_0}$ .

При прохождении потоком цилиндрического участка первой ступени диаметром  $D_{cp}$  и длиной  $L_{cp}$  пульсации поперечной скорости и другие турбулентные возмущения осредняются и частично рассеиваются, в свою очередь, радиальная составляющая скорости жидкостных частиц потока обнуляется.

На следующем этапе в двухконусном диффузоре второй ступени насадки происходит основной разгон жидкости. Параметрами этого участка являются: угол конусности  $\alpha_2$ , длина  $L_1$  и сопряженный с ними цилиндрический участок насадки длиной  $L_0$ . На этом этапе достигается превращение потенциальной энергии жидкостного потока в кинетическую энергию струи.

К характеристикам потока жидкости, позволяющим оценить кинематику и динамику процесса формирования струй в насадках с различным профилем, следует относить следующие функциональные

зависимости:  $\frac{v^2}{2g} = f(x)$  – изменение кинетической энергии по длине

насадки;  $a = \frac{dv}{dt}$  – ускорение потока жидкости в насадке, которую

можно представить в следующем виде:

$$a = 2 \frac{v_0^2 r_0^4 \operatorname{tg} \alpha}{r^5}. \quad (7)$$

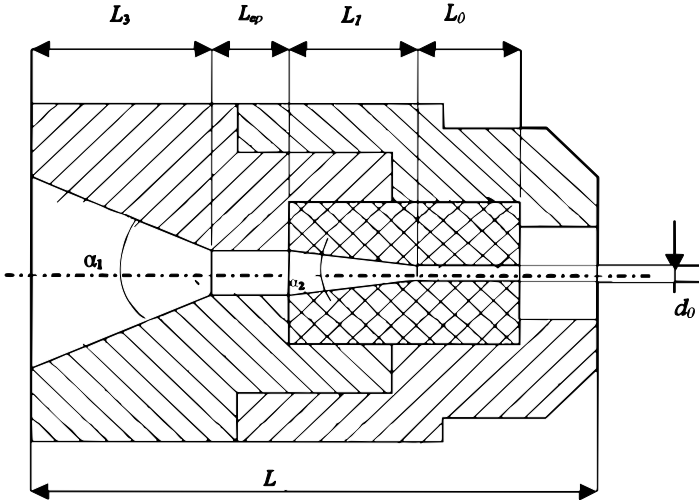


Рис. 2. Конструкция двухступенчатых насадок

Для подтверждения преимущества двухступенчатой конструкции насадки рассмотрим полученную нами зависимость, которая характеризует изменение энергии по длине насадки (рис. 3). Как видно из полученной зависимости, на пути разгона перед первой ступенью (на расстоянии до 5 мм) происходит еле заметное нарастание энергии. Затем в первой ступени поле радиальных и осевых скоростей потока выравнивается непосредственно перед интенсивным нарастанием кинетической энергии во второй ступени насадки, что особенно важно при использовании давлений воды более 100 МПа.

При этом значение энергии на выходе из цилиндрического участка первой ступени составляет менее 3 % от значения энергии струи при вылете. В цилиндрическом участке второй ступени наблюдается выравнивание максимального значения энергии. Можно заключить, что разделение разгонного участка насадки на две ступени выполняется в соответствии с принципом ступенчатой релаксации накопленных турбулентных возмущений потока жидкости в цилиндрических участках первой и второй ступеней.



**Выводы.** Согласно проведенным исследованиям можно сделать следующие выводы:

- основными критериями, характеризующими компактность струи, являются  $E_u$ ,  $Re$  и  $Ho$  при условии импульсного течения, а так же критерия  $W$  при использовании неньютоновских жидкостей. Если значение подводимого давления свыше 40 МПа, тогда течение жидкости переходит в автомодельный режим, и компактность струи не зависит от  $Re$ ;

- преимуществом конусно-цилиндрического профиля, по сравнению с другими, является интенсивное увеличение абсолютных значений градиента давления, которое способствует ламинизации пограничного слоя на входе в цилиндрический участок насадки;

- согласно проведенному анализу профиля насадок можно заключить, что двухступенчатый профиль, в отличие от насадок двухконусных, обеспечивает плавный разгон потока, а также создает условия для повышения компактности и продолжительности длины начального участка формируемой струи за счет увеличения времени преобразования энергии.

Рис. 3. Изменение значения кинетической энергии по длине двухступенчатой насадки при значении подводимого давления свыше 100 МПа

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. *Абрамович Г.И.* Турбулентные свободные струи жидкостей и газа. – М.: Госэнергоиздат, 1948. – 288 с.
2. *Шавловский С.С.* Основы динамики струй при разрушении горного массива. – М.: Наука, 1979. – 174 с.
3. Исследование гидравлического разрушения угля: Коллективная монография. – М., 1966.
4. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
5. *Шлихтинг Г.* Возникновение турбулентности. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
6. *Бафталовский В.Е.* Вопросы повышения компактности водяных струй // Совершенствование добычи угля гидравлическим способом. Научные сообщения. – Вып. 134. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1975. – С. 46–53.
7. *Бафталовский В.Е.* Влияние качества обработки насадки на компактность водяных струй в автомодельном режиме истечения // Науч. тр. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1977. – Вып. 150. – С. 97–105.
8. Савченко Н.В., Яхно О.М. Гидродинамические способы создания пульсирующих струй для гидроразрушения твердых

матеріалов // Вісник Сумського державного університету. – № 12. – 2003.

САВЧЕНКО Наталя Валерьевна – аспірантка кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки Національного технічного університету України “КПІ”.

Научные интересы:

– исследование особенностей формирования импульсной струи в насадках для жидкостей различного состава.

Тел.: 8(044) 454-96-14

ЯХНО Олег Михайлович – доктор технічних наук, професор, завідуючий кафедрою прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки Національного технічного університету України “КПІ”.

Научные интересы:

– гидромеханика, тепло и массообмен в процессах и аппаратах химической технологии.

Тел.: 8(044) 241-76-54

ШКАРАБУРА Николай Григорьевич – кандидат технічних наук, ректор Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобилья.

Научные интересы:

– исследование гидродинамики пожарных струй.

Тел.: 8(0472) 36-16-19

Подано 14.03.2006