УДК 621.22

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ПОТОКА ЗАТОПЛЕННОЙ РАДИАЛЬНО-ЩЕЛЕВОЙ СТРУИ

EXPERIMENTAL STUDY OF AVERAGE FLOW VELOCITYIN SUBMERGED RADIAL-SLOT JET

Андрианов Николай Игоревич
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры строительства нефтяных и газовых скважин,
институт наук о земле,
Северо-Кавказский федеральный университет
ms.sngs@mail.ru

Аннотация. В процессах ремонта и бурения нефтяных и газовых скважин часто используются затопленные гидромониторные струи различных типов. До сих пор отсутствует единое представление о закономерностях движения затопленной струи радиально-щелевого (веерного) типа. В статье помещены результаты экспериментального исследования распространения веерной струи. Полученные математические зависимости позволяют оптимизировать технологию ее применения.

Ключевые слова: ремонт и бурение нефтяных и газовых скважин, затопленная радиально-щелевая струя, экспериментальное исследование.

Andrianov Nikolay Igorevitch
Ph. D., Associate Professor
of Oil and Gas Wells Construction,
Institute of Earth Sciences,
North-Caucasus Federal Univercity
ms.sngs@mail.ru

Annotation. Submerged hydraulic monitoring jets are often used in oil and gas wells repair and drilling processes. To present time there is no unified understanding about regularity of submerged radial-slot (fan kind) jet movement. The results of fan jet expansion experimental study are presented in paper. The resulting mathematical dependences permit to optimize technology of using.

Keywords: repair and drilling of oil and gas wells, submerged radial-slot jet, experimental study.

В ряде технологических операций строительства и капитального ремонта скважин используют сплошной гидравлический «экран», ориентированной перпендикулярно или под углом к оси скважины [1–5]. Указанный экран генерируется замкнутой по периметру поперечного сечения монитора кольцевой щелью с параллельными направляющими. Таким образом, в скважине действует затопленная плоская струя, радиально растекающаяся от оси колонны труб (скважины), именуемая в классической гидравлике радиально-щелевой или веерной.

Практика применения подобных «экранов» преимущественно базируется на эмпирическом подходе, так как в буровой гидравлике рассмотрено истечение жидкости только из плоских щелевых насадок, формирующих плоскопараллельные струи [6–8]. Классическая теория турбулентных струй [9] констатирует, что распределение радиальной скорости в плоскости симметрии веерной струи совпадает с законом распределения осевой скорости в случае осесимметричной струи, то есть убывает обратно пропорционально по мере удаления от источника, и предлагает аналитически полученную зависимость:

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{1{,}2 \cdot [r_0/(a \cdot b_0)]^{0{,}5}}{x/b_0}, \qquad (1)$$

где u_m – максимальная радиальная скорость веерной струи в рассматриваемой точке, находящейся в плоскости симметрии веерной струи;
u_0 – радиальная скорость струи при выходе из дисковой насадки;
r_0 – радиус диска;
b_0 – полуширина щели между дисками;
a – эмпирическая константа;
x – радиальная координата рассматриваемой точки, отсчитываемая от среза насадки.

Однако, известные экспериментальные данные Хескестада [9] хорошо согласуются с теоретическими только при $x/b_0 \rangle 100$. Кроме того, экспериментальные результаты были получены для одного соотношения $r_0/b_0 = 38{,}4$ при величине эмпирической константы a = 0,12, определенной аналитически для плоской струи, истекающей из бесконечной щели. Указанные обстоятельства предопределили необходимость проведения дополнительного исследования.

В первом приближении энергетические способности плоской струи, генерируемой кольцевой щелью, можно охарактеризовать закономерностью уменьшения ее скорости вдоль радиальных направлений, исходящих из полюса струи и равноотстоящих от поверхностей ее градиентного разрыва.

Теоретической предпосылкой решения поставленной задачи является известный вывод Г.Н. Абрамовича о сохранении количества движения в основном участке гидромониторной струи, позволяющий записать:

$$\rho \cdot v_0 \cdot Q_0 \cdot dt = \rho \cdot v \cdot Q \cdot dt\,, \tag{2}$$

где v_0, v – соответственно средняя скорость течения струи при выходе из насадки и на удалении от нее;
Q_0, Q – соответственно расход жидкости в струе при выходе из насадки и на удалении от нее;
ρ – плотность жидкости; dt – время.

Для струи, истекающей из замкнутой по периметру цилиндрического монитора щели, начальный расход составляет:

$$Q_0 = \pi \cdot \delta_0 \cdot d_0 \cdot v_0\,, \tag{3}$$

где δ_0 – раскрытость щели;

d_0 – наружный диаметр щели.

Полагая, что поперечные размеры затопленной струи по мере удаления от насадки прямопропорционально возрастают за счет вовлечения в нее жидкости из окружающей среды (рис. 1), можно записать:

$$Q = \pi \cdot (d_0 + 2 \cdot \ell) \cdot (\delta_0 + A \cdot \ell) \cdot v\,, \tag{4}$$

где ℓ – расстояние от щели до рассматриваемого сечения;
A – коэффициент, характеризующий расширение струи по ее течению.

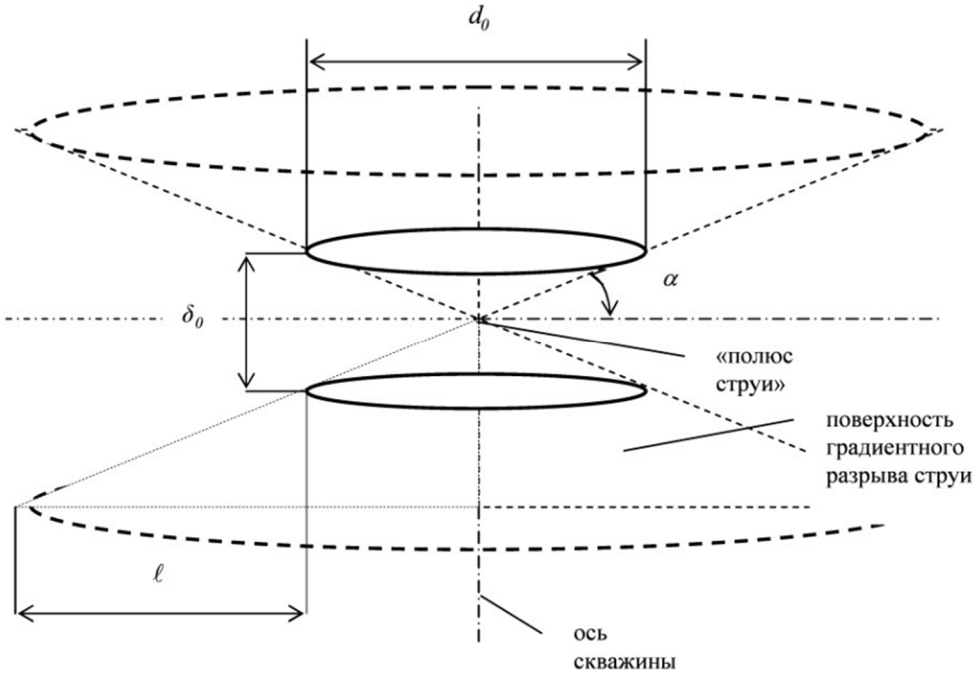

Рисунок 1 – Схема радиально-щелевой струи

Подстановка выражений (3) и (4) в (2) и учет известной связи между динамическим давлением и скоростью потока в струе дает искомую зависимость:

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^2 = \frac{p}{p_0} = \frac{\delta_0}{\delta_0 + A \cdot \ell} \cdot \frac{d_0}{d_0 + 2 \cdot \ell} = \frac{1}{1 + A \cdot \frac{\ell}{\delta_0}} \cdot \frac{1}{1 + 2 \cdot \frac{\ell}{d_0}}\,, \tag{5}$$

где p_0, p – динамическое давление в струе при выходе из насадки и на удалении от нее.

Следует отметить роль коэффициента А в выражении (5). Если считать величину А постоянной и независящей от геометрических характеристик кольцевой щелевой насадки d_0 и δ_0, выражение (5) сохраняет свой вид. Для сравнения, в классической теории турбулентных струй угол расширения веерной струи равен углу расширения бесконечной щелевой струи. Если считать коэффициент, характеризующий расширение струи по ее течению, зависящим от геометрических характеристик насадки согласно схеме, представленной на рисунке 1, его величина определяется выражением:

$$A_1 = 2 \cdot \mathrm{tg}\alpha = \frac{2 \cdot \delta_o}{d_o}, \tag{6}$$

где 2α – угол расширения струи в плоскости, проходящей через ось вращения образующих кольцевой щелевой насадки (совпадающую с осью колонны труб, включая гидромонитор, и, предположительно, скважины) и радиальное направление течения струи.

Подстановка (6) в (5) преобразует последнее к виду:

$$\frac{v}{v_0} = \frac{1}{1 + A_1 \cdot \frac{\ell}{\delta_0}}, \tag{7}$$

или

$$\frac{v}{v_0} = \frac{1}{1 + 2 \cdot \frac{\ell}{d_0}}. \tag{8}$$

По виду и физическому смыслу полученные выражения (7) и (8) схожи с классическим законом изменения осевой скорости в осесимметричной струе.

Практическое подтверждение аналитически полученной зависимости (5) может быть получено путем замера трубкой Пито скоростных напоров жидкости в струе исследуемого типа на разных удалениях от насадки. Указанный метод исследования требует введения поправки в выражение (5), учитывающей неизбежные потери напора в самой трубке и некоторое нарушение потока жидкости в струе, вызванное введением в него инородного тела. Кроме того, необходимость поправки обусловлена изменением метода измерений скорости в струе при проведении эксперимента: трубкой Пито на удалении от насадки и по выражению (3) с использованием величины Q_0, определяемой по времени истечения заданного объема жидкости, при выходе из насадки. Вышеуказанное позволяет записать выражения (5) и (7) в следующем виде:

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^2 = \frac{p}{p_0} = k \cdot \frac{\delta_0}{\delta_0 + A \cdot \ell} \cdot \frac{d_0}{d_0 + 2 \cdot \ell}, \tag{9}$$

$$\frac{v}{v_0} = \frac{k_1}{1 + A_1 \cdot \frac{\ell}{\delta_0}}, \tag{10}$$

где k и k_1 – поправочные коэффициенты, определяемые экспериментально.

Методика проведения опытов предусматривала установку заданного щелевого зазора в модели монитора; монтаж монитора в баке диаметром 335 мм; генерацию струи жидкости подачей сжатого воздуха в заполненную водой замкнутую емкость, соединенную с гидромонитором гибким шлангом (срабатываемый на мониторе перепад давления контролировался по манометру); замер скоростных напоров в струе на различных радиальных расстояниях от щели с помощью трубки Пито диаметром 5 мм.

Обработка результатов экспериментов заключалась в расчете начальной скорости струи v_0 из выражения (3), радиальных скоростей потока на удалении от насадки по определенным скоростным напорам:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}, \tag{11}$$

где g – ускорение свободного падения; h – измеренный скоростной напор, и нахождении коэффициентов в зависимостях (9) и (10) методом наименьших квадратов.

По окончании обработки экспериментальных данных полученные зависимости (9) и (10) соответственно приобрели вид, проиллюстрированный рисунком 2:

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^2 = \frac{1.472}{\left(1+0.012\cdot\frac{\ell}{\delta_0}\right)\cdot\left(1+2\cdot\frac{\ell}{d_0}\right)}, \quad (12)$$

$$\left(\frac{v}{v_0}\right) = \frac{0.748}{1+0.007\cdot\frac{\ell}{\delta_0}}. \quad (13)$$

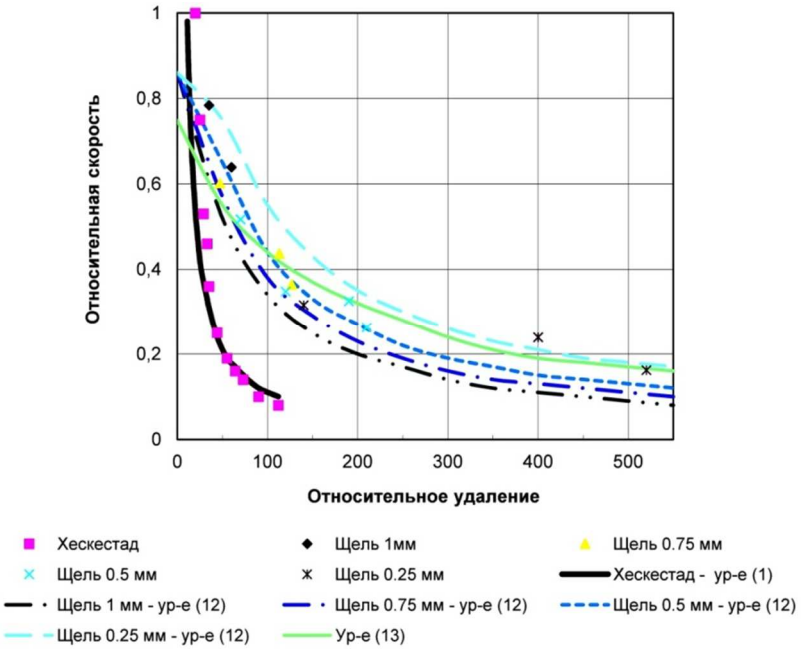

Рисунок 2 – Изменение средней скорости радиально-щелевой струи с удалением от насадки

Как видно, полученные результаты подтверждают ранее сделанный вывод об уменьшении осевой составляющей скорости струи по мере удаления от насадки, причем темп падения скорости снижается с увеличением раскрытости щелевого зазора. В проведенном исследовании не удалось выявить начальный участок струи с постоянной величиной скорости, длина которого по данным Хескестада составляет порядка $25\cdot\delta_0$. В результате левая часть полученных кривых пересекается с осью ординат при $v/v_0\langle 1$, в то время как аналитическая зависимость (1) имеет характер функции гиперболического типа, то есть бесконечно возрастает при $\ell/\delta_0 \to 0$. Невозможность выделения начального участка в проведенных опытах объясняется внесением значительных возмущений в струю в непосредственной близости от щелевой насадки при введении в нее трубки Пито. Теоретически затухание струи при $v/v_0 = 0{,}05$ ожидается на расстоянии $600\cdot\delta_0$ от насадки при подстановки данных Хескестада в выражение (1) и $9800\cdot\delta_0$ и $2000\cdot\delta_0$ при использовании выражений (12) и (13) соответственно.

Правота полученных экспериментальных зависимостей (12) и (13) подтверждается проведенными промысловыми работами по очистке каверны в разрушенной призабойной зоне скважины с применением гидромонитора, оснащенного насадкой исследуемого типа [10]. При технических характеристиках насадки $d_0 = 116$ мм, $\delta_0 = 2{,}1$ мм максимальный диаметр каверны достигал 900 мм, то есть параметр ℓ/δ_0 был равен 187.Начальная скорость истечения струи, задаваемая подачей насосов цементировочных агрегатов 0,01 м^3/с, составляла:

$$v_0 = \frac{0{,}01}{3{,}14\cdot 0{,}116\cdot 0{,}0021} = 13{,}1 \text{ м/с.}$$

На таком удалении от насадки по данным Хескестада скорость радиально-щелевой струи должна быть равной (с учетом принятых в проведенном исследовании обозначений):

$$v = \frac{1{,}2 \cdot \left[d_0/(a \cdot \delta_0)\right]^{0{,}5}}{2 \cdot \ell/\delta_0} \cdot v_0 = \frac{1{,}2 \cdot \left[116/(0{,}12 \cdot 2{,}1)\right]^{0{,}5}}{2 \cdot 187} \cdot 13{,}1 = 0{,}07 \text{ м/с},$$

что меньше минимально-необходимой скорости струи у стенки каверны, обеспечивающей начала эффективного выноса шлама из каверны.

Расчеты с использованием аналогичных исходных данных дают соответственно для полученных выражений (12) и (13) следующие результаты:

$$v = \sqrt{\frac{1{,}472}{(1 + 0{,}012 \cdot 187) \cdot (1 + 2 \cdot 392/116)}} \cdot 13{,}1 = 3{,}17 \text{ м/с},$$

$$v = \frac{0{,}748}{1 + 0{,}007 \cdot 187} \cdot 13{,}1 = 4{,}19 \text{ м/с},$$

которые относятся к области эффективного выноса шлама из каверны. Тем самым подтверждается правота выражений (12) и(13).

Расхождение результатов применения известной и полученных зависимостей скорее всего объясняется различием начальных условий формирования радиально-щелевой струи. Так как точное указание о величине параметра Рейнольдса для струи в работе [9] отсутствует, можно предположить, что экспериментальные данные Хескестада были получены при иных режимах истечения и движения жидкости в струе (вплоть до ламинарного).

Это предположение подтверждают результаты сравнения углов расширения границ струи, приведенные в таблице 1. По данным Хескестада указанная величина составляет 16°, что свидетельствует об интенсивном поперечном растекании струи вследствие низких осевых скоростей, а следовательно и малого значения принятого в исследовании параметра Рейнольдса. Углы расширения струи по результатам проведенных экспериментов не превышают 0,3°, что говорит о малом массообмене между ней и окружающей жидкостью вследствие высоких продольных скоростей.

Таблица 1 – Значения рассчитанных по геометрическим характеристикам насадкии определенных экспериментально углов расширения границрадиально-щелевой струи

Раскрытость щелевой насадки, мм	Диаметр щелевой насадки, мм	Величина параметра $2 \cdot \frac{\delta_0}{d_0}$	Угол расширения границ струи, град	
			Рассчитанный по геометрическим характеристикам насадки	Определенный по экспериментальным данным
Данные Хескестада				
–	–	0,026	1,5	16
Экспериментальны данные – выражение (12)				
1	42	0,048	1,4	0,3
0,75	42	0,036	1	0,3
0,5	42	0,024	0,7	0,3
0,25	42	0,012	0,3	0,3
Экспериментальны данные – выражение (13)				
0,25 ÷ 1	42	0,012 ÷ 0,048	0,3 ÷ 1,4	0,2

Анализ таблицы 1 позволяет также сделать вывод о неправомерности применения к радиально-щелевой струе понятия «полюс струи» и привязке его местоположения к точке, лежащей на пересечении оси и плоскости симметрии щелевой насадки, как показано на рисунке 1. Практически во всех случаях, за исключением результатов, соответствующих $\delta_0 = 0{,}25$ мм при использовании выражения (12), углы расширения границ струи, рассчитанные по геометрическим характеристикам насадки и определенные по экспериментальным результатам, не совпадают. Причем при малых начальных скоростях истечения (результаты Хескестада) гипотетические полюсы струи приходят в точки, принадлежащие радиальным отрезкам между наружным срезом насадки и ее осью симметрии (ось симметрии скважины). При больших начальных скоростях истечения положения гипотетических полюсов струи уходят за ось симметрии насадки и лишь при значительном увеличении скорости сходятся в точке, как показано на рисунке 1. Указанные обстоятельства позволяют предположить о существовании некого ядра истечения радиально-щелевой струи, размеры которого уменьшаются при увеличении начальной скорости истечения струи.

Анализ рисунка 2 свидетельствует, что в диапазоне проведенных экспериментальных исследований результаты, получаемые с помощью выражений (12) и (13) весьма близки по величинам. Поэтому закономерно возникает проблема выбора одного из них при планировании практической операции. Производя выбор, необходимо учитывать условия конкретного использования радиально-щелевой струи. Если струя остается неподвижной – выражения (12) и (13) равнозначны. При перемещении гидромонитора предпочтение следует отдать выражению (12), как содержащему параметр d_0, который в совокупности с параметром ℓ позволяет оценить отклоняющее воздействие на струю, возникающее вследствие приложения к ней перепада давления. В любом случае при экспериментальном анализе данных следует использовать выражение (12), как наиболее полно учитывающее значащие параметры процесса.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Для диапазона чисел Рейнольдса Re ≈ 3300 … 4000 получена зависимость изменения продольной составляющей средней скорости жидкости в радиально-щелевой струе.
2. Правота полученной зависимости подтверждена экспериментальными и промысловыми работами по очистке каверн от шлама с использованием радиально-щелевой струи.
3. Предположение о существовании «ядра истечения» при формировании радиально-щелевой струи требует создания полости перед щелевой насадкой при конструировании гидромонитора.

Литература:

1. Пустовойтенко И.П. Предупреждение и методы ликвидации аварий и осложнений в бурении. – М. : Недра, 1987. – 236 с.
2. Устройство для очистки внутренней поверхности обсадной колонны: а.с. 470589 СССР: МКИЗ Е 21 В 37/02 / Р.А. Максутов, Б.Е. Доброскок, Ю.А. Горюнов, В.В. Никитченко (СССР). – № 983328/22-3; заявл. 04.01.74; опубл. 15.05.75, Бюл. № 18. – 4 с. : ил.
3. Большой справочник инженера нефтегазодобычи / Под ред. У. Лайонза и Г. Плизга. – Пер. с англ. – СПб. : Профессия, 2009. – 640 с.
4. Дубенко В.Е., Андрианов Н.И. Новые технологиии инструмент для заканчивания и реконструкции скважин // Наука и техника в газовой промышленности. – 2013. – № 4. – С. 50–58.
5. Бабаян Э.В. Конструкция нефтяных и газовых скважин. Осложнение и их преодоление. – М. : Инфра-Инженерия, 2018. – 252 с.
6. Бабаян Э.В., Черненко А.В. Инженерные расчеты при бурении. – М. : Инфра-Инженерия, 2016. – 440 с.
7. Лайонз У., Картер Т., Лапейруз Н.Дж. Формулы и расчеты для бурения, добычи и капитального ремонта скважин : пер. с англ. / Под ред. Э.В. Бабаяна. – М. : Премиум Инжиниринг, 2013. – 343 с.
8. Бабаян Э.В. Буровая гидравлика. – М. : Инфра-Инженерия, 2018. – 200 с.
9. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. – М. : Эколит, 2011. – 716 с.
10. Дубенко В.Е., Андрианов Н.И., Шамшин В.И. Комплексная технология очистки и цементирования каверн // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2002. – № 3. – С. 22–27.

References:

1. Pustovoytenko I.P. Drilling accidents and complications prediction and elimination methods. – M. : Nedra, 1987. – 236 p.
2. Device for inner surface casing cleaning: a.s. 470589 USSR: MKI3 E 21 B 37/02 / R.A. Maksutov, B.E. Dobroskok, U.A. Gorynov, V.V. Nikitchenko (USSR). – № 983328/22-3; invent. 04.01.74; publ. 15.05.75, Bul. № 18. – 4 p. fig.
3. Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering / By edit. W. Lyons and G. Plisga. – Transl. from Engl. – SPb. : Professional, 2009. – 640 p.
4. Dubenko V.E., Andrianov N.I. New Technology and Tool for well completion and reconstruction // Science and Technology in the Gas Industry. – 2013. – № 4. – P. 50–58.
5. Babayan E.V. Oil and gas wells casing history.The complications predictions. – M. : Infra-Engineering, 2018. – 252 p.
6. Babayan E.V., Chernenko A.V. Engineers calculations in drilling. – M. : Infra-Engineering, 2016. – 440 p.
7. Lyons W., Carter T., Lapeyrose N.J. Formulas and calculations for drilling, production and workover : transl. from Engl. / By edit. E.V. Babayan. – M. : Premium Engineering, 2013. – 343 p.
8. Babayan E.V. Drilling Hydraulic. – M. : Infra-Engineering, 2018. – 200 p.
9. Abramovitch G.N. Theory of Turbulent Jet. – M. : Ecolit, 2011. – 716 p.
10. Dubenko V.E., Andrianov N.I., Shamshin V.I. Cleaning and Cementing Caves Complex Technology // Construction of Oil and Gas Wells on Land and Sea. – 2002. – № 3. – P. 22–27.