

СТРУКТУРНО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ВОДОПОЛИМЕРНОЙ СТРУИ

А.В. Погребняк

ИФНТУНГ; 76019, г. Ивано-Франковск, ул. Карпатская, 15; тел. (0342) 727158,
e-mail: Pogrebnyak.AV@mail.ru

Проведено комплексне вивчення структури і динаміки водополімерного високошвидкісного струменя. Отримані експериментальні дані дозволили запропонувати розрахункову залежність у безрозмірному вигляді для визначення початкових ділянок та діаметрів струменів водних розчинів різних концентрацій і молекулярних мас ПЕО з урахуванням реальних параметрів струменоформуючої голівки. З метою встановлення особливостей динаміки водополімерних струменів вивчені їх енергетичні можливості, які оцінювали за силою впливу струменя на сталеву перешкоду.

Обґрунтовано використання структурних та динамічних характеристик водополімерних струменів при встановленні раціональних параметрів обладнання для перфорації обсадних колон нафтогазових свердловин.

Ключові слова: водополімерний струмінь, початкова ділянка, якість струменя, струменоформуюча голівка, розчин поліетиленоксиду.

Проведено комплексное изучение структуры и динамики водополимерной высокоскоростной струи. Полученные экспериментальные данные позволили предложить расчетную зависимость в безразмерном виде для определения начальных участков и диаметров струй водных растворов разных концентраций и молекулярных масс ПЭО с учетом реальных параметров струеформирующей головки. С целью установления особенностей динамики водополимерных струй, изучены их энергетические возможности, которые оценивались по силе воздействия струи на стальное препятствие.

Обосновано использование структурных и динамических характеристик водополимерных струй при установлении рациональных параметров оборудования для перфорации обсадных колон нефтегазовых скважин.

Ключевые слова: водополимерная струя, начальный участок, качество струи, струеформирующая головка, раствор полиэтиленоксида.

A complex study of the structure and dynamics of a water-polymer high velocity jet was performed. Analysis of the photographs of jets of aqueous polyethylene oxide solution indicates that the use of PEO addition into water leads to a significant increase in the initial sections of the water-polymer jet, which characterizes the quality of its formation, and leads to compactness due to a reduction of its diameter. The obtained experimental data made it possible to propose dependence for determining the dimensionless value of the initial sections of jets of aqueous PEO solutions of different concentration and molecular mass of PEO, taking into account the real parameters of the jet-forming head. The study of changes in the energy capabilities of water-polymer jets, estimated by the force of the jet impact on the steel obstacle, made it possible to establish the features of their dynamics. The obtained experimental data explain the change nature in the cutting properties of the water-polymer jet as a function of the distance between the surface of the cut material that is cut and the cut of the nozzle.

The use of structural and dynamic characteristics of water-polymer jets is substantiated when establishing rational parameters of equipment for water-polymer for perforations of oil and gas well casing strings.

Key words: water-polymer jet, initial section, jet quality, jet-forming head, polyethylene oxide solution.

Постановка проблеми. При перфорировании обсадных колон нефтегазовых скважин в качестве режущего органа используется высокоскоростная тонкая струя жидкости. От свойств рабочей жидкости зависит способность получения необходимых гидродинамических характеристик гидроструи, обеспечивающих максимальную производительность с наименьшими энергозатратами на формирование струи. Минимизация энергетических затрат, прежде всего, должна обеспечиваться за счет понижения рабочего давления жидкости перед соплом до самого низкого его значения при сохранении технологических требований к разрезаемому материалу. Поэтому выбор типа и состава рабочей жидкости является одним из основных вопросов, которые необходимо решать при разработке технологического процесса гидроструйной обработки материалов резанием и, в

частности, при перфорировании обсадных колон нефтегазовых скважин.

В качестве рабочей жидкости при гидроструйной обработке материалов и перфорировании обсадных колон нефтегазовых скважин [1] используется вода и вода с добавками абразива – песка [2]. Введение в режущую водяную струю абразивных добавок, существенно расширяет технологические возможности обработки материалов. Это позволяет вести обработку материалов при относительно низких давлениях, обеспечивая при этом такую же производительность, что и при водоструйной обработке с формированием струи при более высоких давлениях. Вместе с тем гидродинамические параметры (скорость, распыл, длина начального участка) таких водоабразивных струй ухудшаются. Это приводит к увеличению ширины реза и энергоемкости процесса. Важно, что при этом

наблюдается интенсивное изнашивание элементов струеформирующей головки, главным образом сопла, в результате чего возникает необходимость частой их замены. Также должна учитываться необходимость проектирования специальных режущих головок с возможностью ввода абразивных добавок в жидкую струю.

Анализ последних исследований и публикаций. К решению задачи повышения эффективности процесса гидроструйной обработки материалов резанием можно подойти, используя для этого наблюдаемые «аномалии» во входной области струеформирующего сопла [3–4] в их гидродинамическом поведении. Поэтому повысить эффективность процесса гидрорезания можно, если режущую материал водяную струю заменить на водополимерную [5–7]. Было установлено, что глубина реза в материале довольно резко возрастает с увеличением концентрации ПЭО в водополимерной струе и достигает максимума при достижении оптимальной величины. Для ПЭО молекулярной массы $3 \cdot 10^6$ оптимальная концентрация равна $0,015 \div 0,020\%$, а для молекулярных масс $4 \cdot 10^6$ и $6 \cdot 10^6$ – $0,007 \div 0,01\%$ и $0,0015 \div 0,0020\%$ соответственно. При гидроструйной обработке материалов равная глубина реза может быть достигнута при использовании водяных и водополимерных струй с давлением $45 \div 65\%$ от давления воды при их обработке водяной струей, а при одинаковом исходном давлении наблюдается увеличение глубины и скорости реза в 1,5–2,5 раза. Эксперимент показал, что качество поверхности разрезов в материале при его разрезании водополимерной струей существенно выше, чем при разрезании водяной и водоабразивными струями. Таким образом, экспериментальные данные свидетельствуют о том, что водополимерная струя обеспечивает высокую производительность, что свидетельствует об особом механизме взаимодействия водополимерной струи с разрезаемым материалом.

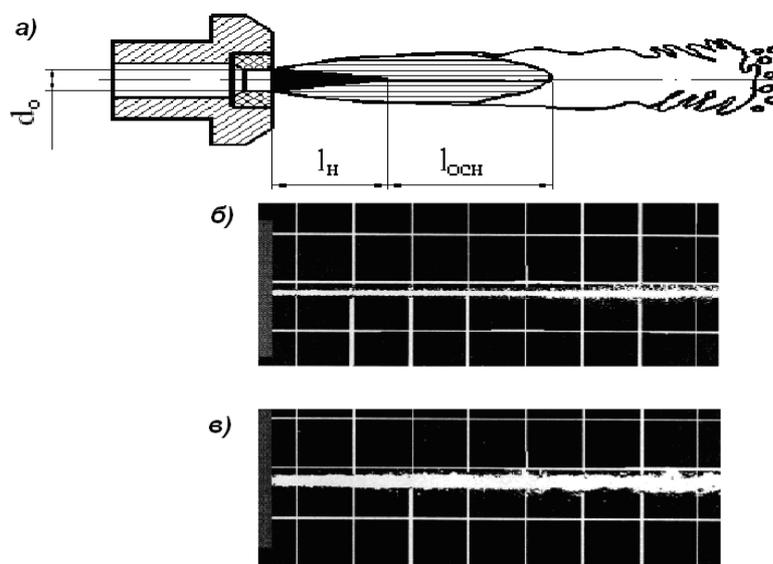
Наши современные представления о процессе гидроструйной водополимерной обработки материалов резанием далеки от совершенства. В гидродинамике гидрорезания водополимерными струями совершается переход от накопления экспериментальной информации к пониманию сущности механизма гидроструйной водополимерной обработки материалов. Для решения технической задачи по разработке процесса гидроструйной водополимерной обработки материалов резанием, а также принципов проектно-расчетных проработок оборудования для его реализации необходимо установление условий формирования водополимерной струи и закономерностей ее взаимодействия с материалом при вариации концентрации и молекулярной массы полимера. Имеющиеся экспериментальные данные [8,9] свидетельствуют, что режим работы и параметры гидроструйной обработки материалов резанием, а также производительность гидрорежущего оборудования, режущим органом которого является тонкая

струя воды, должны непосредственно зависеть от структуры струи и её гидродинамических параметров.

Целью данной работы является изучение структурных и динамических характеристик водополимерной струи, имеющих определяющее значение в понимании природы аномально высокой режущей ее способности.

Изложение основного материала. Эксперимент показал, что режим работы и параметры процесса гидроструйной водополимерной обработки материалов резанием непосредственно зависят от структуры (качества) струи и изменения её гидродинамических параметров. Изучение структуры и динамики даже водяной [9], а тем более высокоскоростной водополимерной струй – один из наиболее сложных вопросов гидродинамики [10]. Из-за особенностей движения жидкой струи в воздухе, а также отсутствия необходимой измерительной аппаратуры характеристики этих струй и их структура изучены еще недостаточно. Однако, имеющиеся результаты исследований водяных струй [9–14] все же позволяют составить общее представление о тех процессах, которые происходят при формировании гидрорежущей струи и её истечении в атмосферу. Струя рабочей жидкости на выходе из сопла струеформирующей головки состоит из сплошной струи, которая расширяется по определенному закону и капиллярного потока с плотностью, убывающей в радиальном направлении от оси струи. Непосредственно на выходе из сопла в струе формируется ядро постоянных скоростей конусообразной формы, называемое начальным участком струи (рис. 1а). Вдоль длины начального участка l_n имеет место потенциальное (безвихревое) течение воды. При этом скорость и динамическое давление во всех точках потенциального ядра струи сохраняют постоянные значения: $\Delta P_m = \Delta P_0 = \text{const}$; $V_n = V_0 = \text{const}$ (здесь ΔP_0 – давление воды в сопле, т.е. перед цилиндрическим участком сопла; ΔP_m – осевое динамическое давление; V_0 – усредненное значение скорости струи на выходе из сопла; V_n – осевая скорость струи по длине начального участка).

Под влиянием избыточного статического давления, турбулентных возмущений и выхода газообразной компоненты, которая присутствует в рабочей жидкости, происходит расширение струи, вызывающее увеличение её диаметра и изменение внутренней структуры. За пределами начального участка струи в результате её расширения и распада осевая продольная скорость и динамическое давление постепенно уменьшаются по некоторой гиперболической зависимости, а динамическое давление и скорость в сечении струи резко снижаются по кривой Гауса от своего максимального значения до минимального в пограничной области. Этот участок струи $l_{осч}$ (за пределами начального участка l_n), на котором струя сохраняет высокую плотность и компактность, называют основным участком струи [11]. В пределах основно-



$$M_{\text{ПЭО}} = 4 \cdot 10^6, C_{\text{ПЭО}} = 0,007\%$$

Рисунок 1 – Схема (а) структуры водополимерной струи, фотографии струи водного раствора ПЭО (б) и водной струи (в), которые вытекают из сопла с диаметром $0,35 \cdot 10^{-3}$ м при давлении 100 МПа

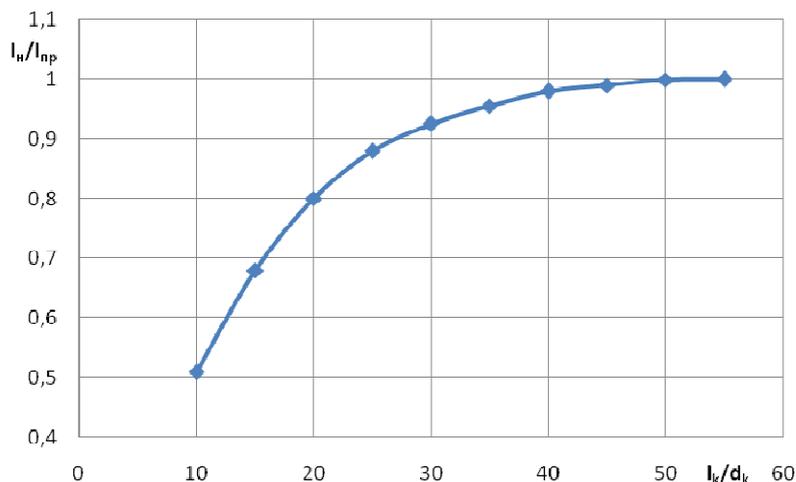


Рисунок 2 – Зависимость безразмерной длины начального участка от безразмерной длины проточного канала струеформирующей головки

го участка сохраняется высокая плотность струи при низких значениях угла расширения границ струи. Начальный и основной участки в сумме составляют рабочий участок струи [6, 8].

Основной структурной характеристикой гидроструи является длина начального участка l_n . С помощью безразмерной величины длины начального участка l_n/d_0 (где d_0 – диаметр отверстия сопла) может быть интегрально оценено качество формирования водяной и водополимерной струй, которое зависит от формы профиля, а для водополимерной струи еще от молекулярной массы ПЭО и его концентрации (рис. 1б). Фотография струи водного раствора ПЭО свидетельствует о том, что использование добавок ПЭО в воду приводит к существенно увеличению начального участка у водополимерной струи, который характеризует качество ее формирования, и увеличению компактности за счет уменьшения ее диаметра.

Турбулентность потока жидкости на входе в сопло струеформирующей головки зависит от длины прямолинейного участка подводящего канала. Результаты экспериментальных исследований влияния длины подводящего канала на качество формирования струи жидкости высокого давления, полученные в работах [8,12], приведены на рис. 2 (где $l_{пр}=(l_n)_{max}$ – максимальное значение длины начального участка гидроструи, l_k – длина проточной части подводящего канала, d_k – диаметр подводящего канала).

Видно, что при длине подводящего к соплу канала гидрорежущей струеформирующей головки $l_k > 25d_k$, достигается гашение инициированной ранее турбулентности порядка 90%. Увеличение длины проточного канала до $l_k > 40d_k$ практически не дает положительного эффекта. При этом в качестве критерия оценки качества формирования водяной струи использован параметр $l_n/(l_n)_{max}$, т.е. отношение теку-

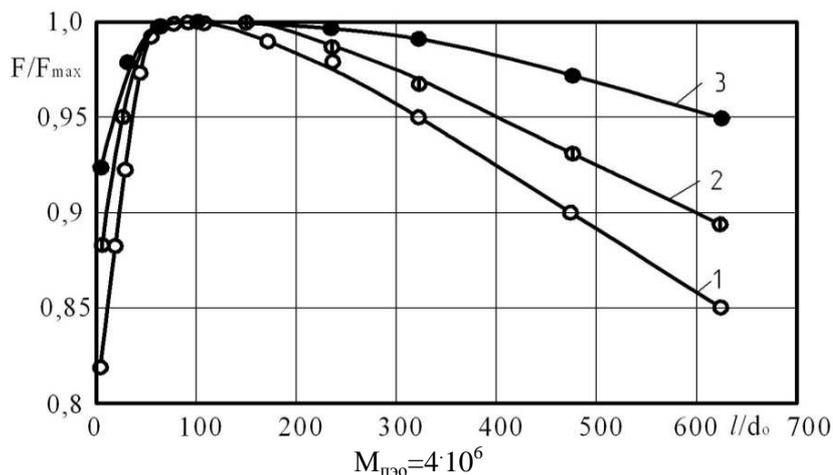


Рисунок 3 – Распределение силы воздействия водяной струи (1), струи 0,003% водного раствора ПЭО (2) и 0,007% водного раствора ПЭО (3) на препятствие по оси потока

шего значения длины начального участка струи к его максимально возможному значению, который характеризует снижение уровня турбулентности водного потока при увеличении безразмерной длины прямолинейного проточного канала струеформирующей головки.

Уравнение для расчета безразмерной длины начального участка водяной струи имеет вид [13, 14]:

$$\frac{l_{н,c}}{d_0} = 25 \left(\frac{d_0}{R_{az}} \right)^{1/6} \lg K_{II} \times \left(1 - 1,25 \exp \left(-0,095 \cdot \frac{l_k}{d_k} \right) \right), \quad (1)$$

где R_{az} – параметр шероховатости внутренней поверхности струеформирующей головки по ГОСТ2789-73 и ГОСТ2.309-73, мкм. Коэффициент поджатия потока в струеформирующей головке гидрорежущей установки принимается равным 10 при $l_k/d_0 > 10$.

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений безразмерной величины начальных участков водяной и водополимерной струй были выполнены с использованием экспериментально полученного распределения силы F действия водяной и водополимерной струй на металлическую преграду по оси потока (рис. 3). Полученные экспериментальные данные с достаточной точностью описываются следующим выражением:

$$\frac{l_{н,c}}{d_0} = \frac{l_n}{d_0} \cdot \dot{\epsilon} \cdot \theta_c, \quad (2)$$

где $\dot{\epsilon}$ – продольный градиент скорости во входной области сопла,

θ_c – время релаксации водного раствора ПЭО.

Подставив уравнение (1) в (2), получим уравнение для определения безразмерной величины начальных участков струй водных растворов ПЭО разных концентраций и молекулярных масс ПЭО с учетом реальных параметров струеформирующей головки в виде:

$$\frac{l_{н,c}}{d_0} = 25 \left(\frac{d_0}{R_{az}} \right)^{1/6} \lg K_{II} \times \left(1 - 1,25 \exp \left(-0,095 \cdot \frac{l_k}{d_k} \right) \right) \cdot \dot{\epsilon} \cdot \theta_c. \quad (3)$$

Влияние молекулярной массы ПЭО и его концентрации в уравнении (3) учитывается зависимостью времени релаксации θ_c водных растворов по известным молекулярным характеристикам ПЭО:

$$\theta_c = \begin{cases} \theta_0 \exp(k), & \text{при } k < 1 \\ \theta_0 \frac{\exp(k)^{2/3}}{k^{1/3}}, & \text{при } k > 1 \end{cases} \quad (4)$$

где $[\eta]_0 \cdot C_{ПЭО} = k$,

$[\eta]_0$ – характеристическая вязкость водного раствора ПЭО,

$C_{ПЭО}$ – концентрация ПЭО в водополимерной струе,

θ_0 – время релаксации водного раствора ПЭО при экстраполяции на бесконечное разбавление [7].

При $\dot{\epsilon} \theta_c < 1$ начальный участок водополимерной струи $l_{н,c}$ равен начальному участку водяной струи l_n . Формула (3) имеет следующие границы применимости: водные растворы ПЭО должны удовлетворять критерию концентрированности по Дебаю – $[\eta]_0 \cdot C < 1$, а величина произведения продольного градиента скорости $\dot{\epsilon}$ на время релаксации θ_c водного раствора ПЭО удовлетворять условию – $1 \leq \dot{\epsilon} \theta_c < 10$. Было получено, что среднее значение коэффициента вариации при использовании зависимости (3) составило $K_{вар} = 13\%$, что свидетельствует о достаточной сходимости расчетных значений безразмерных величин длин начального участка водополимерных струй с экспериментально полученными.

Таблица – Экспериментальные и расчетные значения диаметра струи водного раствора ПЭО на разных расстояниях от среза сопла ($C_{\text{пэо}}=0,007\%$, $M_{\text{пэо}}=4 \cdot 10^{-6}$)

$d_0, 10^{-3}\text{м}$	$l_0, 10^{-3}\text{м}$	$l_{н,с}/d_0$	$d_{с,с}, 10^{-3}\text{м}$	$(d_{с,с}), 10^{-3}\text{м}$
0,35	5	50	0,35	0,34
	10		0,39	0,36
	20		0,44	0,37
	50		0,47	0,40
	100		0,57	0,50
	200		0,67	0,63
	400		0,87	0,86
0,60	5		0,61	0,60
	10		0,64	0,63
	20		0,72	0,72
	50		0,90	0,89
	100		1,03	1,11
	200		1,39	1,40
	400		1,95	1,99
	500	2,19	2,17	

Важной характеристикой гидроструи является её диаметр на различных расстояниях от среза сопла. Диаметр гидроструи определяет ширину реза в материале. Зависимость безразмерного диаметра тонкой водяной струи от расстояния до среза сопла, полученная в работах [9, 12] имеет вид:

$$\frac{d_c}{d_0} = K_1 \frac{(l_0/d_0)^{0,65}}{l_n/d_0} + 1, \quad (5)$$

где

$$K_1 = 2,718(d_0)^{0,5}.$$

Выражение (5) можно использовать и для определения диаметра $d_{с,с}$ струй водного раствора ПЭО, если в нем длину начального участка водяной струи l_n заменить на длину начального участка водополимерной струи $l_{н,с}$. При этом влияние концентрации и молекулярной массы ПЭО, также как и в формуле (3), будет учитываться зависимостью (4).

Результаты сопоставления экспериментальных ($d_{с,с}$)_э и расчетных значений диаметров струи $d_{с,с}$ водного раствора ПЭО концентрации 0,007% и $M_{\text{пэо}}=4 \cdot 10^{-6}$ с использованием зависимостей (5) и (3) для расчета диаметра водополимерной струи $d_{с,с}$ показывает (см. табл.), что за счет учета реальных безразмерных величин начального участка струи водного раствора ПЭО среднее значение коэффициента вариации составило $K_{\text{вар}}=9,8\%$. Этим подтверждается адекватность расчетных зависимостей (5) и (3) экспериментальным данным.

Если струя воды с заданной производительностью обеспечивает высококачественный разрез в материале при $l_0=l_{\text{опт}}$, то струя водного раствора ПЭО позволяет получить при сохранении производительности ту же глубину реза и тоже качество поверхности реза на расстоянии более $15 \cdot l_{\text{опт}}$. Это дает возможность резать не только толстые образцы, но и образ-

цы, конфигурация которых не позволяет подвести их поверхность непосредственно к струеформирующей головке или получать необходимые технологические параметры при значительно меньших давлениях.

Технологические возможности начального и основного участков водополимерной струи не одинаковые. Так, при разрезании материалов наиболее эффективный рабочий участок струи, равный сумме начального и основного участков. Поэтому размеры начального участка высокоскоростной струи жидкости имеют важное значение при разработке процесса гидроструйной водополимерной обработки пищевых продуктов резанием. В первую очередь, от размеров рабочего участка гидроструи будет зависеть глубина реза в материале, естественно, при давлении струи жидкости на единицу поверхности разреза, превышающем предел прочности материала. За пределами рабочего участка гидроструя теряет устойчивость и приобретает извилистую форму. Этот участок гидроструи $l_{\text{пул}}$ называют пульсирующим и в технологии гидрорезания материалов является практически нерабочим.

В настоящее время полностью не выяснен характер изменения силы воздействия водополимерной струи в зависимости от удаления препятствия от сопла. По этому поводу даже для водяной струи существуют противоречивые точки зрения. Одни исследователи считают [15], что сила воздействия струи на препятствие существенным образом уменьшается с увеличением расстояния от среза сопла. Другие считают [12], что полная длина водяной струи может быть разбита на два участка: начальный участок, где сила воздействия струи на препятствие возрастает и достигает (на некотором расстоянии от сопла) максимального значения, и следующий участок, на всем протяжении которого эта сила сохраняется неизменной. Для во-

Выводы

дополимерных струй данные, показывающие зависимость силы воздействия струи на препятствие от расстояния до сопла, кроме работы [6], отсутствуют. Поэтому опыты, о которых говорится ниже, были поставлены с целью установления особенностей динамики водополимерных струй, выяснив которые можно было бы разобраться в имеющихся противоречивых экспериментальных данных. Устранение данных противоречий необходимо для обоснования механизма микроразрушения в материалах и получения корректной взаимосвязи между параметрами процесса гидрорезания, без чего невозможно установление рациональных параметров оборудования для водополимерной обработки материалов резанием.

Энергетические возможности водополимерной струи оценивались по измеряемой силе воздействия струи на стальное препятствие, на котором были закреплены тензодатчики. Препграда была изготовлена со стального (Ст3) листа с размерами $(220 \times 220 \times 3) \cdot 10^{-3}$ м. Между плоскостью препграды и столом гидрорежущей установки был зазор $5 \cdot 10^{-2}$ м.

Результаты, которые показывают развитие силы воздействия гидроструи с разным содержанием ПЭО на препятствие по оси потока в безразмерных координатах представлены на рис. 3. Полученные экспериментальные данные описываются, по крайней мере, двумя участками с линейным изменением силы воздействия гидроструи на препятствие. Видно, что максимальное значение силы воздействия F_{\max} водополимерной струи на плоское препятствие зависит от концентрации ПЭО в водополимерной струе и находится в интервале безразмерных расстояний от сопла $30 < l_0/d_0 < 300$. Сравнение распределения силы действия гидроструи на препятствие по оси потока (рис. 3) с её структурными особенностями (рис. 1б) показывает, что область $l_0/d_0 < 100$ относится к начальному участку струи, а область $30 < l_0/d_0 < 300$ – к основному участку.

Экспериментальные данные по динамике водополимерной струи целиком объясняют характер изменения режущих свойств струи в зависимости от расстояния между поверхностью материала, который разрезается, и срезом сопла. Становится понятным, почему в одних случаях глубина реза с увеличением диаметра сопла возрастает, а в других – уменьшается. Учитывая данные рис. 3, приходим к выводу, что если расстояние от сопла до поверхности материала меньше размеров начального участка водополимерной струи, то увеличение диаметра выходного отверстия сопла будет приводить к уменьшению глубины реза. Если же расстояние от сопла до поверхности материала приближается к размерам основного участка водополимерной струи или превышает его, то тогда глубина реза будет возрастать с увеличением диаметра сопла при неизменном перепаде давления.

1. Установленные особенности структуры и динамики водополимерной высокоскоростной струи, позволили получить расчетные зависимости длины начального участка струи, который характеризует качество ее формирования, и диаметра водополимерной струи от расстояния до среза сопла от молекулярной массы и концентрации ПЭО в водополимерной струе.

2. Полученные экспериментальные данные подтверждают необходимость использования структурных и динамических характеристик водополимерных струй при установлении рациональных параметров оборудования для перфорации обсадных колон нефтяных скважин.

3. Задачами дальнейших исследований является получение расчетной зависимости для определения глубины реза от физико-механических свойств разрезаемых материалов и режущих параметров водополимерной струи с учетом качества ее формирования.

Литература

1 Бойко В.С. Довідник з нафтогазової справи / В.С. Бойко, Р.М. Кондрат, З.С. Яремійчук; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. – Львів, 1996. – 620 с.

2 Пат. 74608 Україна, МПК В 03 В 4/00. Спосіб різання матеріалів високошвидкісним гідроабразивним струменем / [Пономаренко Е.В., Погребняк А.В., Наумчук М.В.]. – № u201202141, Бюл. № 21. – 2012.

3 Pogrebnyak A.V. Structure formation in polyethyleneoxide solution streaming through jet-shaping head while cutting food products [Text] / A.V. Pogrebnyak, Yu.F. Ivanyuta // Scientific journal NRU ITMO Series: Processes and equipment. – 2015. – No 1(23). – P. 138–141.

4 Deynichenko G.V. The nature of increased cutting ability of a polyethylene oxide solution jet while processing food products [Text] / G.V. Deynichenko, A.V. Pogrebnyak A. V., Yu.F. Ivanyuta // Scientific journal NRU ITMO Series: Processes and equipment. – 2015. – No 3(25). – P. 6–13.

5 Pogrebnyak A.V. Research of the process of hydrocutting food products [Text] / A.V. Pogrebnyak, G.V. Deynichenko // Scientific journal NRU ITMO Series: Processes and equipment. – 2016. – No 3(29). – P. 48–62.

6 Погребняк А.В. Высокоэффективное гидрорезание твердых пищевых продуктов и материалов / А.В. Погребняк [Текст] // Управление реологическими свойствами пищевых продуктов. – М.: Московский гос. ун-т пищ. производств, 2008. – С. 173–179.

7 Волошин В.С. Экологическая технология создания водозащитных экранов / В.С. Волошин, В.Г. Погребняк. – Донецк: Ноулидж, 2010. – 482 с.

8 Заплетніков І.М. Структура і динаміка струменя гідро різки [Текст] / І.М. Заплетніков, А.В. Погребняк // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2010. – Вип. 10. – С. 3–13.

9 Никонов Г.П. Исследование динамики и структуры тонкой струи воды с давлением 500 ат. / Г.П. Никонов Г.П., С.С. Шавловский, В.В. Хныкин; ИГД им. А.А. Скочинского. – М., 1969. – 38 с.

10 Научная школа Ивана Лукича Повха (к 100-летию со дня рождения) / Под общ. ред. Ступина А.Б. – Донецк: ДонНУ, 2009. – 317 с.

11 Шавловский С.С. Влияние угла конусности и длины цилиндрического участка насадки на компактность струи [Текст] / С.С. Шафровский, В.Е. Бафталовский // Технология добычи угля подземным способом. – 1971. – №12. – С. 87–92.

12 Шавловский С.С. Основы динамики струй при разрушении горного массива / С.С. Шавловский. – М.: Наука, 1979. – 174 с.

13 Бафталовский В.Е. Влияние качества обработки насадки на компактность водяных струй в автомодельном режиме истечения [Текст] / В.Е. Бафталовский // Науч. труды ИГД им. А.А. Скочинского. – 1977. – Вып.150. – С. 97–105.

14 Мерзляев В.Г. Физико-технические основы гидроструйных технологий в горном производстве / В.Г. Мерзляев, В.Е. Бафталовский; ФГУП ННЦ ГП ИГД им. А.А. Скочинского. – М., 2004. – 645 с.

15 Рабинович Е.З. Гидравлика / Е.З. Рабинович. – М.: Недра, 1974. – 296 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
25.04.17*

*Рекомендована до друку
професором **Чудиком І.І.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
докт. фіз.-мат. наук **Пащенко О.В.**
(ФТІ НАН України, м. Київ)*