

## Метод определения параметров струйного потока жидкости при бурении с размывом

Юшков И. А.<sup>1</sup>, Якименко Д. С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ДонНТУ, Донецк, Украина

<sup>2</sup> ООО «Экометан», Донецк, Украина

Поступила в редакцию 21.02.11, принята к печати 18.03.11.

### Аннотация

Рассматриваются условия формирования струйного потока жидкости, применяемого для размыва мягких пород при бурении скважин. Предлагается уточнение выражений для определения скорости в плоскости забоя. Описан новый подход к решению уравнений движения струйного потока жидкости в зоне смешения смежных струй. Приведен пример использования программ расчета для построения геометрической и скоростной картины потока жидкости.

Ключевые слова: струйный поток, размыв, смежные струи, зона смешения, скорость.

На кафедре технологии и техники геологоразведочных работ Донецкого национального технического университета проводятся исследования, направленные на создание буровых

снарядов, реализующих гидравлический способ бурения в мягких породах. Эти исследования показывают, что применение струйных потоков жидкости может являться определенным резервом для повышения производительности проводимых буровых работ.

Примером эффективного использования буровых снарядов, реализующих энергию струй жидкости для размыва грунтов, являются погружные установки многорейсового бурения, разработанные на кафедре ТТГР ДонНТУ. Другая область применения этого способа разрушения горных пород – посадка обсадных колонн путем непрерывного разрушения и вымыва шлама из под башмака снаряда [1].

Имеющийся опыт применения струйных потоков при морском бурении неглубоких скважин в рыхлых донных отложениях континентального шельфа показал, что при использовании средненапорных буровых насосов эффективный размыв наблюдается только в несвязных или слабосвязных грунтах. В более плотных грунтах скорость углубления снаряда резко снижается, что вынуждает использовать другие технологических подходы [2].

Одной из возможных причин неэффективности действия струйных потоков в плотных глинистых грунтах являются конструктивные недочеты гидромониторной насадки, которые в свою очередь связаны с

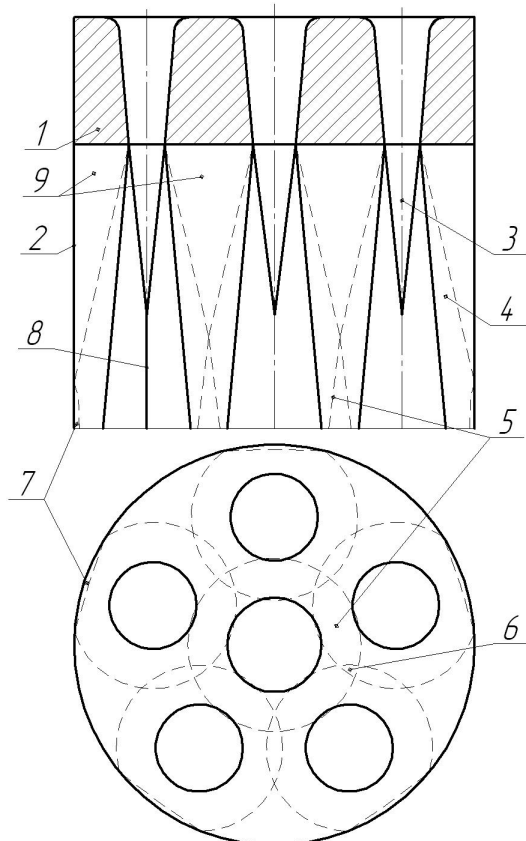


Рис. 1. Условная схема формирования многоструйного потока в гидромониторном узле бурового снаряда

несовершенством существующих методик определения скоростных параметров потока жидкости в плоскости забоя, т.е. на выходе из бурового снаряда.

В предыдущих публикациях по этой теме приводилось достаточно подробное изложение математических подходов для описания скорости течения в основных зонах многоструйного потока, вытекающего из гидромониторной насадки 1 (рис. 1) во внутреннюю полость снаряда 2: зонах потенциальных ядер 3 одиночных струй, на оси струи 8 вне начального участка, зонах пристеночного течения 7, зонах расширения струи 4, зонах возвратного течения 9 [3, 4].

Для определения скорости в зоне смешения (участки 5 и 6 на рисунке 1) имеется последовательность решения, предложенная Г.Гертлером для слоя смешения двух плоских одинаково направленных потоков и предусматривающую ввод функции тока для упрощения преобразований уравнения движения [5]. Однако использованное им для подстановки выражение турбулентного трения неприменимо для описания круглых струй. При смешивании трех- и более круглых струй рациональнее использовать зависимость Л. Прандтля, которая вместе с методикой расчета Г. Гертлера позволит решить поставленную задачу.

Поскольку формообразующие струи имеют круглое сечение, поля скорости в зоне смешения описываются системой дифференциальных уравнений движения и неразрывности потока жидкости, записанной в цилиндрической системе координат [7]:

$$u \frac{\partial u}{\partial z} + v \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho c^2 z^2 \left( \frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} = 0$$

где  $u$  – продольная скорость в зоне смешения,  
 $v$  – поперечная скорость в зоне смешения,  
 $\rho$  – плотность среды струйного потока,  
 $z$  – продольная координата потока,  
 $r$  – радиус зоны смешения,  
 $c$  – постоянная.

Для решения задачи будем считать, что величина продольной скорости превышает поперечную скорость потока. Область смешения одинаково направленных струй имеют особенную форму, образованную границами расширяющихся струй (рис. 2). Поэтому для задания граничных условий под радиусом слоя смешения будем понимать некоторое конечное расстояние вдоль условной характерной линии тока между точками, в которых скорости предельно близки к скоростям образующих потоков.

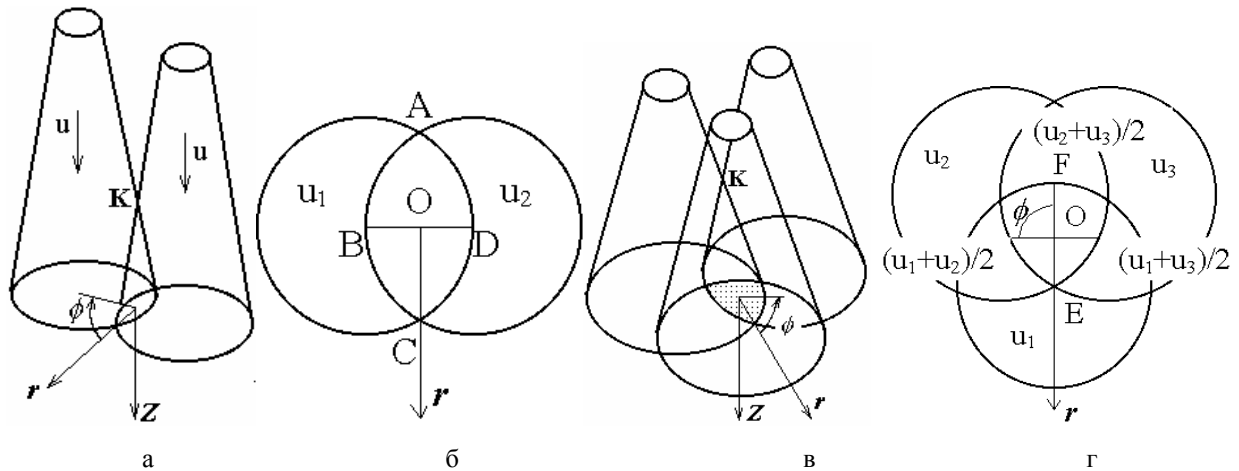


Рис. 2. Схема зон смешения двух и трех одинаково направленных струй

Для двухструйного течения характерной линией тока является линия BD (рис. 2,б), поэтому граничные условия для системы уравнений (1) имеют вид:

$$u_u = u_1 \text{ при } r = r_{гp1}, \quad u_u = u_2 \text{ при } r = r_{гp2}. \quad (2)$$

где  $u_u$  – избыточная продольная скорость в зоне смешения.

Для трехструйного потока принимаем направление линии тока - вдоль линии EF (рис. 2,г), считая при этом, что скорость в точке E больше, чем в точке F. Для трехструйного потока граничные условия будут иметь вид:

$$u_u = u_1 \text{ при } r = r_{rp1}, \varphi=0^\circ, \quad u_u = \frac{u_2 + u_3}{2} \text{ при } r = r_{rp2}, \varphi=180^\circ. \quad (3)$$

Так как смешанные потоки обладают свойствами, характерными для пограничного слоя свободных струй [6], то для уравнения движения (1) вводим также граничные условия:

$$v = 0|_{r=0} \quad \frac{\partial u_u}{\partial r} = 0|_{r=0} \quad \frac{\partial v}{\partial r} = 0|_{r=0}. \quad (4)$$

Исследованиями М.Альбертсона, Е.Фертмана функция распределения скорости показана как отношение избыточной скорости к разности скоростей смешивающихся потоков. Избыточная скорость, в нашем случае, представляет собой превышение продольной скорости в произвольной точке зоны смешения над средней по сечению скоростью и выражается зависимостью [5]:

$$\frac{u_u}{U_p} = \frac{u - \frac{2u_{1i} + u_{2i} + u_{3i}}{4}}{u_{1i} - \frac{u_{2i} + u_{3i}}{2}} = f\left(\frac{r - r_{0,5}}{r_{rp1} - r_{rp2}}\right) = f(\xi_i). \quad (5)$$

где  $U_p$  – разность скоростей смешивающихся потоков,

$r_{0,5}$  – координата точки смешанного потока, в которой  $u_u = U_p$ ,

$\xi$  – безразмерная координата, отражающая характер изменения размеров зоны смешения,

$f(\xi_i)$  – искомая функция распределения.

Это означает, что безразмерное значение скорости в любом слое зоны (между произвольными  $i$  и  $i+1$  линиями тока) будет одинаковым, а профили - подобными.

Для понижения порядка дифференциального уравнения движения в теории пограничного слоя используют функцию тока, связанную с векторным уравнением неразрывности потока [6, 7]. Введем функцию тока  $\psi(z, r)$  в нашем случае описывающую траекторию движения линий тока на участке смешения, с помощью которой на основе уравнения неразрывности получаем для составляющих скорости:

$$u_u = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad (6)$$

$$v = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} = -\frac{1}{r} \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial z} \right).$$

причем для поперечной составляющей скорости производная от функции тока рассматривается как сложная функция.

Проинтегрировав первое из выражений (6), получаем функцию тока в виде выражения  $\psi = \int u_u r \cdot dr$ . Преобразуя выражение (5) помощью замены переменных  $\xi = \frac{r}{zK_\alpha}$ , представим функцию тока в виде:

$$\psi = \int U_p \cdot f(\xi) \cdot \xi K_\alpha z \cdot K_\alpha z d\xi = K_\alpha^2 z^2 U_p \int f(\xi) \xi d\xi.$$

где  $K_\alpha$  - коэффициент, определяемый опытным путем для уточнения границ расширения зоны смешения.

Приняв  $F(\xi) = \int f(\xi) \xi d\xi$ , получаем  $\psi = K_\alpha^2 z^2 U_p F(\xi)$ , где  $F(\xi)$  – безразмерная функция тока на участке смешения струй. Таким образом, продольная и поперечная составляющие осредненной скорости (6), выраженные с помощью функции тока, в безразмерном виде выглядят как:

$$\frac{u_u}{U_p} = \frac{F'}{\xi} \quad (7)$$

$$\frac{v}{U_p} = K_\alpha F' - \frac{2K_\alpha}{\xi} F \quad (8)$$

В этих выражениях  $F'(\xi)$  – производная безразмерной функции тока по переменной  $\xi$ . Продифференцировав  $u$  и  $v$  по  $z$  и  $r$ , для скоростных компонентов уравнения движения получим следующее:

$$u \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{U_p^2}{\xi^2 z} F'^2 - \frac{U_p^2}{\xi z} F'' F',$$

$$v \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{U_p^2}{\xi z} F'' F' - \frac{U_p^2}{\xi^2 z} F'^2 - \frac{2U_p^2}{\xi^2 z} F'' F + \frac{2U_p^2}{\xi^3 z} F' F'.$$

Преобразование вязкостного компонента уравнения движения с принятым для исключения эмпирических коэффициентов соотношением  $K_\alpha = \sqrt[3]{c^2}$ , приводит к выражению:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial r} = \frac{2U_p^2}{\xi^5 z} \left( F''' F'' \xi^3 - 2F''^2 \xi^2 + 4F'' F' \xi - F''' F' \xi^2 - 2F'^2 \right).$$

Произведя подстановку всех составляющих в уравнение (1), после преобразований получаем дифференциальные уравнения:

$$F''' \xi^2 - 2F'' \xi + 2F' + F \xi^2 = 0, \quad (9)$$

$$F - F'' \xi \neq 0.$$

Отметим, что полученный вид уравнения отличается от известных в теории свободной турбулентности преобразований уравнения движения. Таким образом, принятая нами последовательность преобразований позволила вместо уравнения в частных производных (1), получить однородное линейное дифференциальное уравнение третьего порядка с переменным коэффициентом  $\xi$  и не зависящее от  $U$  и  $z$ .

Полученное выражение (9) является уравнением третьего порядка, поэтому для полной определенности решения достаточно трех граничных условий, для назначения которых используем принятую выше замену переменных на  $\xi$ . Приведем граничные условия (2) - (4) к безразмерному виду, для чего разделим обе части равенств на разность скоростей смешивающихся потоков и преобразуем их. С учетом (7), (8), получаем для трех струй:

$$\frac{F'(\xi)}{\xi} = 1 + \frac{1}{2} \frac{2u_1 - u_2 - u_3}{2u_1 + u_2 + u_3} = 1 + \frac{1}{2} \beta \quad \text{при } \xi = \xi_{ГР1}, \quad (10)$$

$$\frac{F'(\xi)}{\xi} = 1 - \frac{1}{2} \frac{2u_1 - u_2 - u_3}{2u_1 + u_2 + u_3} = 1 - \frac{1}{2} \beta \quad \text{при } \xi = \xi_{ГР2}$$

для двухструйных потоков:

$$\frac{F'(\xi)}{\xi} = 1 + \frac{1}{2} \frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} = 1 + \frac{1}{2} \gamma \quad \text{при } \xi = \xi_{ГР1}, \quad (11)$$

$$\frac{F'(\xi)}{\xi} = 1 - \frac{1}{2} \frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} = 1 - \frac{1}{2} \gamma \quad \text{при } \xi = \xi_{ГР2}$$

и общее для двух случаев:

$$\frac{F'(\xi)}{\xi} = 1, \quad F' - \frac{2F}{\xi} = 0, \quad F=0 \quad \text{при } \xi = 0. \quad (12)$$

Величины  $\beta$  и  $\gamma$  представляют собой безразмерную разность соответственно трех и двухструйных смешивающихся потоков.

Вид граничных условий устанавливает пропорциональное простирание ширины зоны смешения на половину величины безразмерной разности смешивающихся потоков относительно точки, в которой скорость смешанного потока равна средней скорости.

Используя аналитическое соотношение (1), преобразуем (7) в зависимость для определения продольной скорости в зоне смешения трех смежных потоков, выражение которой выглядит как:

$$u = \frac{2u_1 + u_2 + u_3}{4} \left( 1 + 2 \frac{2u_1 - u_2 - u_3}{2u_1 + u_2 + u_3} \frac{F'(\xi)}{\xi} \right), \quad (13)$$

Для смешения двух струй получена зависимость, откорректированная для круглых потоков:

$$u = \frac{u_1 + u_2}{2} \left( 1 + 2 \frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} \frac{F'(\xi)}{\xi} \right), \quad (14)$$

где  $\frac{F'}{\xi}$  представляет собой общий закон распределения скорости в зоне смешения.

Отметим, что формула (14) отличается от известного выражения Г. Гертлера [6] видом функции распределения скорости в зоне смешения. В обобщенном виде зависимость можно представить как:

$$\frac{u}{U} = 1 + \gamma \cdot \frac{F'(\xi)}{\xi}, \quad \frac{u}{U} = 1 + \beta \cdot \frac{F'(\xi)}{\xi}.$$

Оценивая полученные выражения, отметим, что скорость смешанного потока зависит от величины безразмерной разности скоростей смешанных потоков  $\beta$  или  $\gamma$ . Изменяясь от 0 (при равенстве скоростей  $u_1 = u_2 = u_3$ ) до 1 (при  $u_2 = 0$  и  $u_3 = 0$ ), значения  $\beta$  и  $\gamma$  влияют на функцию распределения  $\frac{F'}{\xi}$ .

На рис. 3 показаны безразмерные профили скорости, полученные по формулам (13), (14) для различных значений  $\beta$  ( $\gamma$ ), а также результаты опытных измерений скорости (при  $\gamma = 0,336$ ), приведенные к безразмерному виду. Для любого значения  $\beta$  или  $\gamma$  распределение скорости принимает значение средней  $\frac{u}{U} = 1$  в одном и том же месте струйного потока. Исходя из граничных условий (10) и (11), положение этой точки и определяет безразмерную координату  $\xi_0 = 0$ .

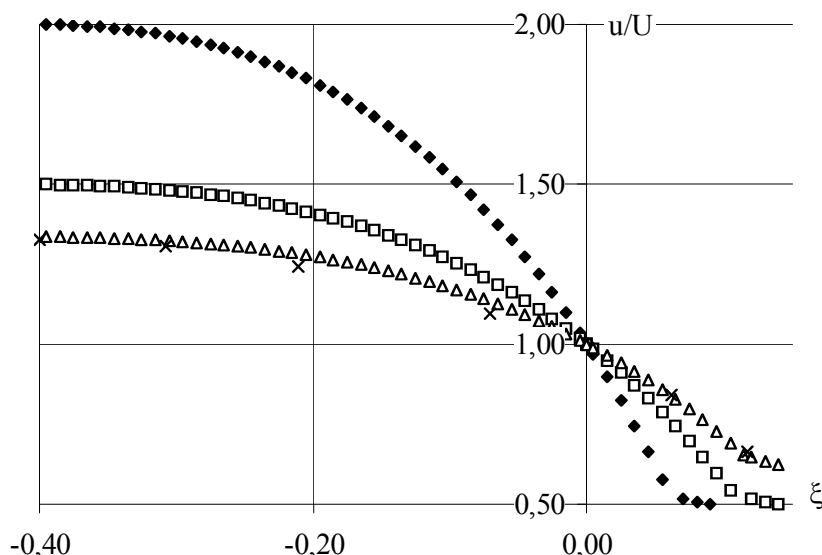


Рис. 3. Изменение безразмерной скорости в зоне смешения в зависимости от безразмерной разности скоростей смешивающихся струйных потоков для  $\beta$  ( $\gamma$ ) = 1 ( $\diamond$ ), 0,5 ( $\square$ ), 0,336 ( $\Delta$ ),  $\times$  - по опытным данным автора

Границы смешанных потоков, составляют для двух струй  $\xi_{гр1} = -0,4054$ ,  $\xi_{гр2} = 0,1146$ , а для трех -  $\xi_{гр1} = -0,0934$  и  $\xi_{гр2} = 0,065$ . Различные абсолютные значения  $\xi_{гр}$  показывают на несимметричность участка смешения: стрела сегмента зоны больше со стороны более скоростной струи.

Хорошая сходимость теоретических и опытных значений скорости достигается при  $K_\alpha = 0,386$  для двухструйного и  $K_\alpha = 0,891$  для трехструйного потока. Коэффициент  $K_\alpha$  отражает поправки на принятые при выводе уравнений движения расположение координатных осей и некоторые допущения. Полный угол расширения смешанного потока двух и трех струй, определенный по формуле:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{1}{K_\alpha} \cdot \frac{r}{z}\right),$$

составляет для зоны смешения соответственно двух струй  $\cong 11,42^\circ$  и трех струй  $\cong 8,08^\circ$ . Полученные значения границ потока показывают, что ширина участка смешения двух струй больше, чем трехструйного потока.

Анализируя основные этапы преобразований уравнения (1) отметим, что при выборе любой системы координат (вдоль любой другой линии тока, отличной от принятой) резульативные зависимости будут иметь вид, аналогичный выражениям (13), (14). Величина безразмерной координаты  $\xi_{зр}$  сохраняет свое значение в любом сечении зоны смешения, поскольку расстояние  $z$  до исследуемой точки потока отсчитывается от точки контакта струй (точка К на рис. 2,а и 2,в). С приближением рассматриваемого сечения к полюсу зоны, значение  $r$  уменьшается, а  $z$  увеличивается, обеспечивая постоянство величины  $\xi_{зр}$  для каждого сегмента (участка) смешения.

Полученные зависимости позволили откорректировать использовавшуюся ранее методику [8], а для автоматизации проектировочных расчетов был разработан ряд программ, вид которых приведен на рисунках 4 и 5.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2				12/12/5	14/3	10/12/5	10/12/6	10/12/7	10/12/8	10/14/5	12/14/4
3	Кол-во окружных отверстий	$n_{окр}$		4	3	4	5	6	7	4	3
4	Внутр. Диам. Обс. Колонны	$d_{сн}$	м	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113
5	Радиус зоны активного размыва струи	$r_{нер}$	м	0,0076	0,0088	0,0067	0,0073	0,0062	0,0056	0,0076	0,0105
6	Диаметр окружных отверстий	$d_o$	м	0,012	0,014	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,012
7	Диаметр центрального отверстия	$d_ц$	м	0,012	0,014	0,012	0,012	0,012	0,012	0,014	0,014
8		$\Phi$		1,2	1,8	1,2	1,3	1,1	1	1,2	1,5
9		$a$		0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
10	расстояние от плоскости насадки до забоя	$z$		0,09	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,1
11	Граничный угол расширения струи	$\alpha_2$	град	13	13	13	13	13	13	13	13
12	Граничный угол зоны активного размыва	$\alpha_{нер}$	град	4,8016	7,1814	4,8016	5,1996	4,4031	4,0042	4,8016	5,9941
13	Граничный угол зоны смешения двух струй	$\alpha_{см}$	град	6,94	6,94	6,94	6,94	6,94	6,94	6,94	6,94
14											
15											
16		$L_{доп}$	м	0,0242	0,0227	0,0216	0,0223	0,0208	0,0201	0,0242	0,0297
17		$L_{окр}$	м	0,0487	0,0565	0,0533	0,042	0,0353	0,0298	0,0521	0,0573
18		$L_{рад}$	м	0,0309	0,0267	0,0338	0,0332	0,0343	0,0349	0,0319	0,027
19											

Рис. 4. Интерфейс программы для расчета геометрических параметров гидромониторных насадок

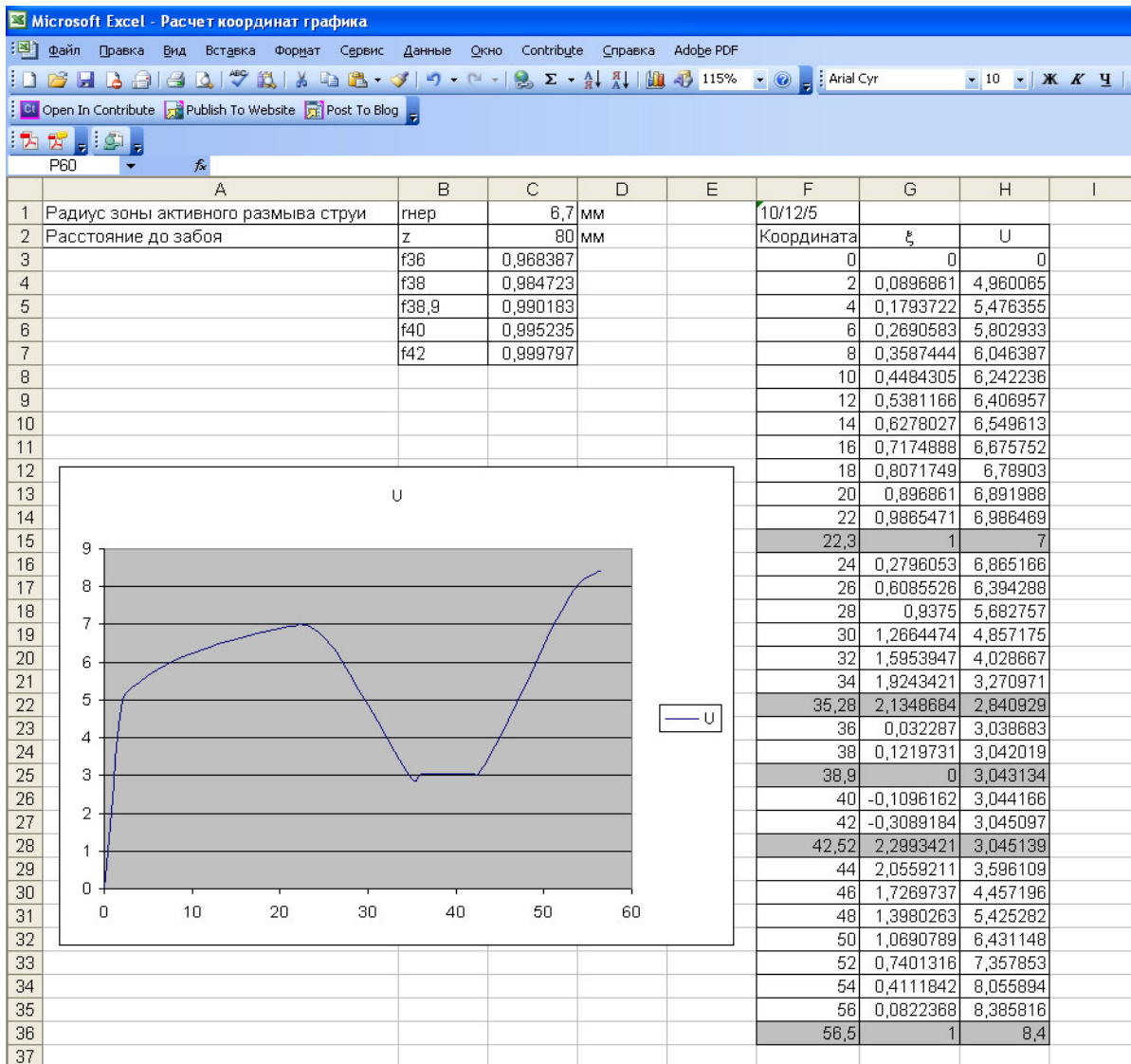


Рис. 5. Интерфейс программы для расчета скорости струйного потока в плоскости забоя скважины

С помощью уточненной методики расчета была разработана модель струйного потока жидкости, истекающего из корпусной трубы диаметром 127 мм бурового снаряда для посадки обсадных колонн с помощью размыва. Пример увязки геометрических параметров конструкции гидромониторной насадки узла размыва, параметров развивающегося многоструйного потока и скорости потока жидкости на выходе из бурового снаряда показан на рис. 6.

Таким образом, принятая последовательность преобразования системы уравнений движения жидкости (1) позволяет получить выражение для определения продольной скорости в области смешения трехструйного потока, уточнить выражение для смешения двухструйного потока, определить границы и форму зон смешения.

Уточненная методика определения скоростных параметров струйного потока позволяет проектировать конструкцию узла размыва снаряда, реализующего гидравлический способ бурения. Используя разработанные программные продукты можно определить требуемое количество, размеры и схему расположения гидромониторных отверстий, обеспечивающих требуемую скорость в плоскости забоя и перекрытие внутренней полости корпусной трубы бурового снаряда потоком жидкости.

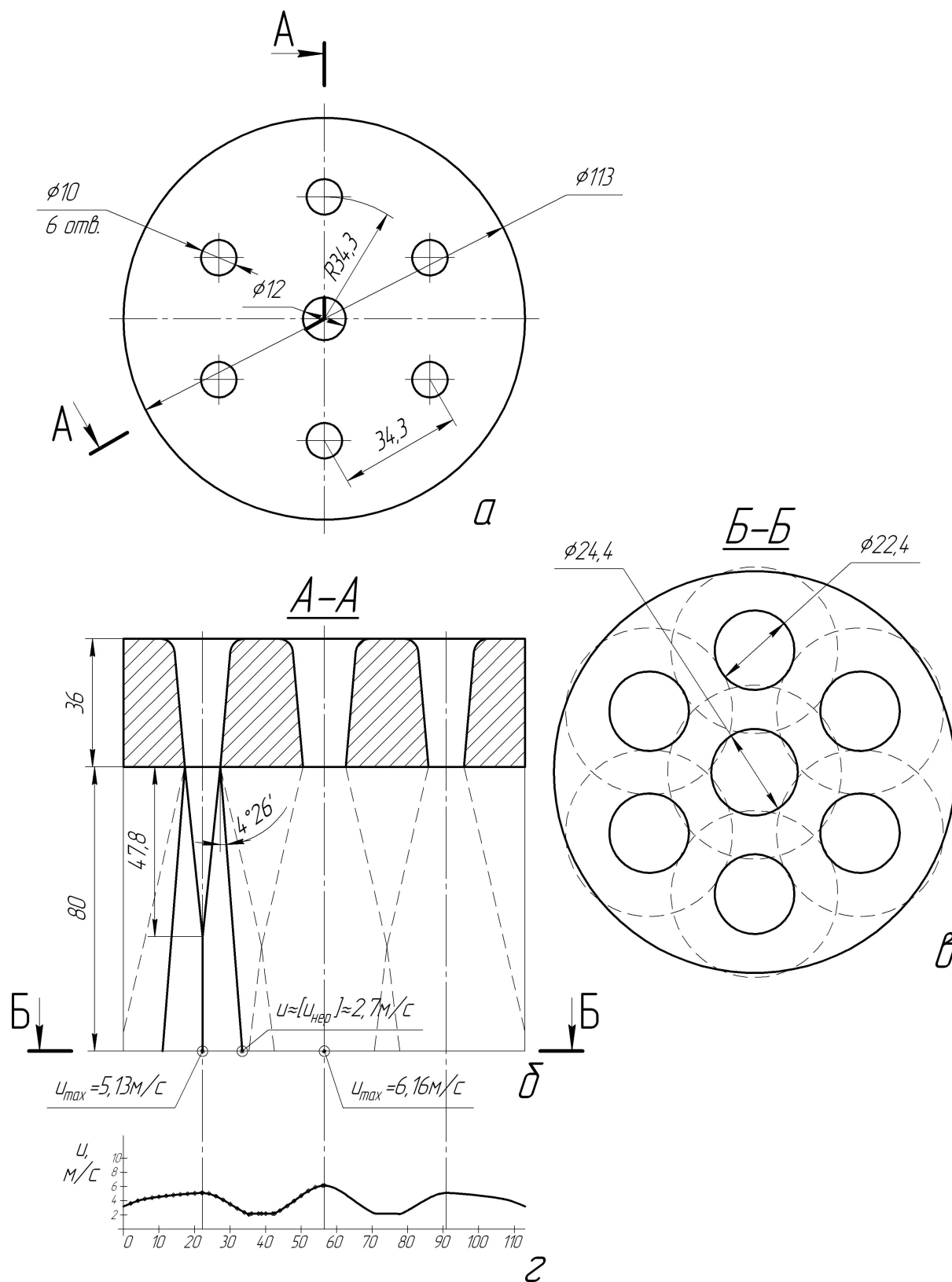


Рис. 6. Пример расчетной схемы для определения геометрических и скоростных параметров формирующегося многоструйного потока:

- а – схема размещения гидромониторных отверстий по сечению бурового снаряда;
- б – схема развития многоструйного потока в продольном сечении;
- в – схема формирования многоструйного потока в плоскости забоя скважины;
- г – профиль скорости потока в плоскости забоя скважины.



### Библиографический список

1. Пристрій для буріння свердловин з обсадкою: пат. 26210 Україна: МПК(2006) E21B 7/20 / О.С.Юшков, І.О.Юшков, Д.С.Якименко; Донец. нац. техн. ун-т (Україна). - Заявл. 24.04.2007; опубл. 10.09.2007; бюл. № 14, 2007 р.
2. Калиниченко, О.И. Опыт разработки и применения гидроударных буровых снарядов и установок при бурении инженерно-геологических скважин на шельфе / О.И.Калиниченко, А.В.Хохуля, П.В.Зыбинский, А.А.Каракозов, П.Л.Комарь, С.Н.Парфенюк // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна»/ДонНТУ. - 2010.- Вип.11(161). - С. 58 – 68.
3. Юшков, И.А. Определение скорости потока в зоне смешения нескольких гидромониторных струй при бурении подводных скважин /И.А.Юшков //Наукові праці ДонДТУ. Серія гірничо-геологічна /ДонДТУ. - 2001. -Вип.23.- С. 80 – 84.
4. Юшков, И.А. О влиянии зоны смешения смежных струй на профиль скорости потока при гидравлическом бурении /И.А.Юшков //Сб. науч. трудов НГУ /Днепропетровск: РИК НГУ, 2003.- Т. 1, №17.- С. 520 – 524.
5. Абрамович Г. Н., Гиршович Т.А., Крашенинников С. Ю. Теория турбулентных струй. – М.: Наука, 1984. – 716 с.
6. Бай Ши-И. Теория струй. – М.: Физматгиз, 1960. – 326 с.
7. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 711 с.
8. Юшков, И.А. Гидравлическое бурение гидрогеологических скважин с одновременной обсадкой ствола / И.А.Юшков, А.С.Юшков, Д.С.Якименко // Науковий вісник національного гірничого університету, №7.- Дніпропетровськ, 2009.- С. 28-33.

© Юшков И. А., Якименко Д. С., 2011.

### Анотація

Розглядаються умови формування струминного потоку рідини, яка використовується для розмиву м'яких порід при бурінні свердловин. Пропонується уточнення виразів щодо визначення швидкості у площині вибою. Надано опис нового підходу до рішення рівнянь руху струминного потоку рідини у зоні змішання суміжних струменів. Наведено приклад використання програм розрахунку щодо отримання геометричної та швидкісної картини потоку рідини

Ключові слова: струминний потік, розмив, суміжні струмені, зона змішання, швидкість.

### Abstract

The conditions of forming liquid stream, which are used for washing soft breeds out while well-drilling are examining. Clarification of expressions for speed determination on the coalface is offered. The new approach in zone of contiguous streams mixing is describing. An example of using calculation programs is making for the construction of geometrical and speed picture of liquid stream.

Keywords: jet stream, wash-out, adjacent jets, zone mixing jet, speed.