

УДК 622.24.085.5

ЮШКОВ И.А. (ДонГТУ)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА В ЗОНЕ СМЕШЕНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ГИДРОМОНИТОРНЫХ СТРУЙ ПРИ БУРЕНИИ ПОДВОДНЫХ СКВАЖИН

Струйные движения занимают значительное место в теоретической и, особенно, в прикладной механике вязкой жидкости, а литература, посвященная им, обширна и разнообразна. Анализ имеющихся научных и практических разработок в этой области показал, что распространение в достаточно малой по диаметру трубе нескольких одинаково-направленных турбулентных струй исследователями детально не изучалось, очевидно, из-за отсутствия широкого практического применения решений данной задачи. В аэродинамике исследуется течение в одном канале встречных потоков, применяемое при расчетах проветривания шахтных стволов и горных выработок, но размеры выработок, влияющие на граничные условия уравнения движения, существенно ограничивают применимость результатов решения для течения во внутренней полости колонковой трубы. Смешивание нескольких потоков рассматривается в газодинамике (горение факела, смешение в камере сгорания), однако и в этом случае результаты решения неприменимы, поскольку рассматривают распространение сжимаемых сред переменной температуры и плотности.

Очевидно, для решения задачи о распространении гидромониторных струй в колонковой трубе требуется особый подход, позволяющий, обобщая имеющиеся выводы теорий струйного движения и задавая собственные начальные и граничные условия, получить характерную картину течения.

В теории турбулентных струй выделяют несколько видов течения: течение вблизи стенки (теория пограничного слоя), напорное течение по трубам, течение на удаленном от преград расстоянии (свободная турбулентность). Существует большое разнообразие в подходе к решению всех задач о струйном движении, сводимое к четырем основным группам:

- 1) точные решения уравнений движения жидкости;
- 2) решения, основанные на применении полуэмпирических или эмпирических положений;
- 3) численные методы решения уравнений;
- 4) статистические методы решения.

Отмечается [1, 2, 6, 8], что решению точными методами поддается лишь сравнительно небольшое число задач, связанных с различного рода струйными течениями в основном ламинарного характера. Кроме этого, вследствие сложности пульсационного движения сугубо теоретический расчет турбулентного течения практически невозможен и закономерности движения жидкости приходится искать лишь для осредненных по времени величин. Такой путь в сочетании с введением некоторых весьма вероятных полуэмпирических допущений дает возможность вычислить характеристики турбулентного течения в хорошем соответствии с опытом. Теория турбулентных течений, основанная на статистическом методе, отраженная в работах И. Бюргерса, Т. Кармана, Дж. Тейлора, Дж. К. Бэтчелора, И. О. Хинце, А. Н. Колмогорова, А. А. Фридмана, Л. Д. Ландау, являясь наиболее перспективной в общем плане, пока не привела к результатам, существенным в практическом отношении для расчета турбулентных струй, что особо подчеркивается самими авторами [3,4]. Сравнительно простой способ решения уравнений движения численными методами

не всегда возможен из-за сложности преобразования исходных уравнений и граничных условий к виду, обеспечивающему их решение. По этой причине основное внимание в настоящей работе уделяется изучению струйных течений, базирующихся на полуэмпирических теориях по методике, предложенной Г. Гертлером, В. Толлмином, Г. Шлихтингом и другими исследователями [8].

Силовые параметры потока жидкости, выходящего из бурового снаряда установки, должны обеспечивать надежное и бесперебойное разрушение горной породы. Как известно, при гидроструйном (гидромониторном) способе бурения разрушение происходит за счет энергии потока жидкости, воздействующей на массив. Струя, направленная на породу, вызывает в ней напряжения, концентрирующиеся главным образом в месте контакта струи с преградой (забоем), где происходит наибольшее разрушение грунта, выражающееся в виде воронки. Размеры и форма воронки изменяются в зависимости от величины силового воздействия струи и физико-механических свойств разрушаемых пород [5, 7].

В качестве основной силовой характеристики гидромониторных установок чаще всего используют силу удара (давления) жидкости, что не всегда удобно, в частности, для несвязных пород, поскольку при воздействии на них потока происходит лишь интенсивное нарушение целостности массива путем разъединения породы на частицы, а не их разрушение. Аналогичная картина разрушения происходит и с глинистыми грунтами, из которых поток жидкости «вырывает» отдельные конкреции - агрегаты грунтовой массы. Очевидно, что для мягких и рыхлых пород определяющим параметром гидравлического разрушения должно быть значение скорости жидкости, при которой происходит устойчивый размыв породы.

Скорость потока, при которой будет осуществляться размыв породы, необходимо

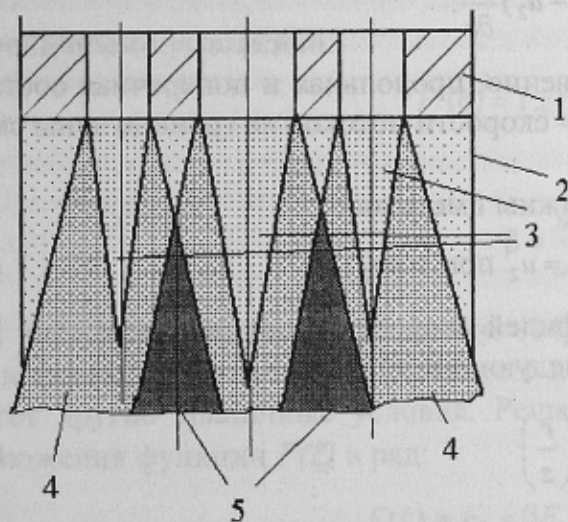


Рис. 1. Схема распространения турбулентных струй из гидромониторной насадки: 1 — гидромониторная насадка, 2 — колонковый набор бурового снаряда, 3 — потенциальное ядро струй, 4 — зона турбулентного расширения струи, 5 — зона смешения смежных струй

формировать установленным в колонковой трубе узлом со струеформирующими отверстиями или насадками. По предлагаемой технологической схеме буровой снаряд в процессе работы установки находится непосредственно на забое скважины, что не позволяет располагать гидромониторную насадку вблизи от края режущего башмака снаряда. Очевидно, положение гидромонитора должно определяться двумя факторами:

1. Максимальным перекрытием забоя скважины струями жидкости с профилем силы давления (скорости), равномерно распределенным по периметру.

2. Минимальным воздействием на распространяющийся поток внутренних стенок колонковой трубы.

Истечение из гидромониторной комбинированной насадки характеризуется как одинаково-направленное распространение нескольких осесимметричных турбулентных струй рабочей жидкости в ограниченном кольцевом пространстве колонковой трубы бурового снаряда (рис. 1).

Структура распространяющихся струй является комплексной, поскольку сочетает в себе несколько видов течения, рассматриваемых в теории пограничного слоя и теории свободной турбулентности. Расположение участков на схеме определено с учетом закона расширения затопленной струи.

Исследование турбулентной струи заключается в определении профилей скорости и геометрических размеров всех характерных зон струи в плоскости забоя и определении наиболее рационального взаимного расположения пограничных участков расширяющихся струй. Особый интерес представляет исследование зоны турбулентного смешивания нескольких струй, поскольку от значения скорости в пределах указанной зоны зависит вывод о целесообразности уменьшения либо увеличения размеров смешиваемых участков.

Выведем зависимость для определения продольной скорости u в зоне смешения, используя последовательность решения, предложенную Г.Гертлером для слоя смешения плоских спутных (одинаково-направленных) потоков.

Упрощенная система уравнений движения и неразрывности потока имеет вид:

$$u \frac{\partial u}{\partial z} + v \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} \tau_{rz}; \quad (1)$$

$$r \frac{\partial u}{\partial z} + r \frac{\partial v}{\partial r} = 0. \quad (2)$$

В выражении (1) используется напряжение трения, введенное по теории Л.Прандтля:

$$\tau_{rz} = \rho \chi_1 z (u_1 - u_2) \frac{\partial u}{\partial r}. \quad (3)$$

В формулах (1)–(3): u, v — соответственно, продольная и поперечная составляющие скорости течения жидкости; u_1, u_2 — скорости потоков на границе зоны смешения; χ_1 — эмпирическая постоянная.

Граничные условия данной задачи должны иметь вид:

$$u = u_1 \text{ при } r = r_1, \quad u = u_2 \text{ при } r = r_2. \quad (4)$$

Предположение о подобии всех профилей скорости в пограничном слое [8] для зоны смешения может быть выражено следующим образом:

$$\frac{u}{U_m} = f\left(\frac{r}{z}\right) \quad (5)$$

и означает, что вдоль любого прямолинейного луча, проведенного из полюса и лежащего в пределах струи, безразмерная скорость потока сохраняет постоянную величину.

Для интегрирования уравнений пограничного слоя при плоском как нестационарном, так и стационарном течении, сначала удовлетворим уравнению неразрывности (2), для чего вводим функцию тока $\psi(z, r, t)$, то есть полагаем:

$$u = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}; \quad v = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}. \quad (6)$$

Закон скоростей участка смешения с учетом (5):

$$u = U \cdot f(\xi), \quad (7)$$

где:

$$U = \sum_{i=1}^n u_i; \quad (8)$$

$$\xi = \frac{ar}{z}. \quad (9)$$

Используя (6), представим функцию тока в виде:

$$\psi = \int u \cdot r \cdot dr; \quad (10)$$

$$\psi = \int U f(\xi) \cdot \xi a z \cdot a z d\xi = a^2 z^2 U \int \xi f(\xi) d\xi. \quad (11)$$

Приняв

$$F(\xi) = \int \xi f(\xi) d\xi, \quad (12)$$

получаем:

$$\psi = a^2 z^2 U F(\xi), \quad (13)$$

Определив продольную и поперечную составляющие осредненной скорости в соответствии с (13), произведя замену переменных в уравнении (1) и некоторые преобразования, приходим к дифференциальному уравнению вида

$$F''' + 2aFF'' = 0, \quad (14)$$

с граничными условиями:

$$F'(\xi) = 1 \pm \beta \text{ при } \beta = \pm \infty, \quad (15)$$

где:

$$\beta = \frac{u_i - u_{i+1}}{u_i + u_{i+1}}. \quad (16)$$

Дифференциальное уравнение (14) совпадает по форме с дифференциальным уравнением, полученным Г.Гертлером и, независимо от него, Г.Блазиусом, однако имеет другие граничные условия. Решение уравнения (14) осуществляется путем разложения функции $F(\xi)$ в ряд:

$$F(\xi) = F_0 + \beta F_1 + \beta^2 F_2 + \beta^3 F_3 + \dots \quad (17)$$

Произведя необходимые преобразования, имеем следующее решение для n - числа смешиваемых струй:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n} \left(1 + \beta \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\xi} e^{-z^2} dz \right). \quad (18)$$



Рис. 2. Распределение скоростей потока в плоскости забоя скважины (до оси симметрии потока) Расстояние от плоскости насадки до забоя — 70 мм, внутренний диаметр колонкового набора — 90 мм, число гидромониторных отверстий — 6, диаметр центрального отверстия — 10 мм, диаметр оси расположения периферийных отверстий — 66 мм

1) в зоне, сформированной двумя одинаково-направленными струями, значение скорости смешанного потока превышает аналогичную величину, образованную в зоне турбулентного расширения струи;

2) значение скорости в зоне смешения зависит от скорости потоков, формирующих зону смешения.

Очевидно, что рациональным следует считать расположение струеформирующих отверстий в узле гидромониторных насадок, обеспечивающее наибольшее заполнение плоскости забоя подводной скважины участками смешанных спутных струй. Это должно обеспечить наиболее интенсивное бескерновое разрушение рыхлых донных отложений погружным буровым снарядом.

Библиографический список

1. Бай Ши-И. Теория струй. — М.: Физматгиз, 1960. — 326 с.
2. Вулис Л.А., Кашкаров В.П. Теория струй вязкой жидкости. — М.: Наука, 1965. — 432 с.
3. Каминер А.А., Яхно О.М. Гидромеханика в инженерной практике. — К.: Техніка, 1987. — 175 с.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. — М.: Наука, 1987. — 840 с.
5. Нурок Г. А., Агаева Э.И. Вопросы теории гидромониторной струи и гидравлического разрушения пород. — М.: Изд. МГИ, 1968. — 60 с.
6. Прандтль Л., Титъенс О. Гидро- и аэромеханика: В 2-х т. Т.2. — М. — Л.: ОНТИ, 1935. — 283 с.
7. Шавловский С. С. Основы динамики струй при разрушении горного массива. — М.: Наука, 1979. — 173 с.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. — М.: Наука, 1974. — 711 с.

На рис. 2 представлен размерный профиль распределения скорости, формируемый гидромониторным потоком на забое буримой скважины. Значения скорости в зоне смешения, расположенной для данных условий течения на отметке 12,5–26,3 мм, определены по формуле (14). Ряды данных 1–3 представляют собой картину распределения скорости, образованную периферийными отверстиями диаметром соответственно 8, 9 и 10 мм. Ряд 5 — зона смешения смежных струй в пределах исследуемого участка отсутствует; ряд 4 определяет вид профиля скорости в неразвитой зоне смешения.

Анализируя результаты исследования, нетрудно заметить, что: