

УДК 622.232.522.24: 622.031.2

Бойко Н. Г., Геммерлинг О. А., (Донецк, ДонНТУ)

Математическая модель процесса взаимодействия гидроимпульсной струи с разрушаемым массивом угля при проведении скважин

Разработка крутонаклонных и крутых пластов Центрального района Донбасса осуществляется, как правило, этажным способом. Высота этажа при этом составляет 120-150м. Для подготовки нового забоя необходимо пробурить скважину на эту длину. Одним из перспективных способов механизации процесса проведения скважин является гидравлический (с помощью импульсной струи жидкости). Для обеспечения высокопроизводительной работы гидроимпульсных установок необходимо обосновать ряд параметров импульсной струи.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью повышения производительности и точности проведения скважин на крутых и крутонаклонных пластах при подготовке нового очистного забоя и повышении безопасности труда в сравнении с существующими установками.

В работе [1] описаны недостатки традиционного механического способа бурения: искривление скважин, уход буровой головки в почву или кровлю пласта, заклинивание буровой головки и невозможность ее извлечения. Было предложено использование гидроимпульсной установки для проведения скважин. Ее использование лишено указанных недостатков. Также в работе определена необходимая сила для разрушения пласта. В работе [2] на основании полученного экспериментального материала представлены зависимости для определения потерь энергии струи при проведении скважины, т. к. при проведении скважины снизу вверх имеет место образование слоя угля между установкой и забоем. В работе [3] описан стенд для проведения исследований процесса взаимодействия гидроимпульсной струи с разрушаемым массивом угля. Был получен угольный образец, сжатый в двух плоскостях, что позволило приблизить его напряженное состояние к реальному состоянию в пласте угля. В работе [4] приведены закономерности разрушения угольного массива гидроимпульсной струей, даны аналитические описания глубины воронки, энергоемкости разрушения угля. В работе [5] доказано, на основе полученного экспериментального материала, что разрушение угольного массива происходит сколами. Получены параметры сколов при разрушении массива угля импульсной струей жидкости. В работах [6, 7] даны общие закономерности процесса гидроотбойки и результаты экспериментальных исследований процесса разрушения углицементного блока применительно к очистным установкам.

Настоящая статья является продолжением указанных работ. Целью данного исследования является разработка математической модели процесса взаимодействия гидроимпульсной струи с разрушаемым массивом угля при проведении скважин.

В разрабатываемой импульсной буровой установке бурение скважины осуществляется импульсной струей при давлении воды 22-28МПа. Характерной особенностью технологии проведения скважины импульсной установкой является то, что между установкой и забоем в установившемся режиме ее работы образуется слой разрушенного угля [1]. Высота образующегося разрушенного угля изменяется практически от 0 до 1 м. При прохождении слоя разрушенного угля часть энергии струи теряется. Таким образом, при определении параметров энергии струи на выходе генератора необходимо учитывать эти потери энергии [2].

Для принятой конструкции импульсной установки для проведения скважин, обусловленной технологией проведения скважин, характерным является то, что взаимодействие импульса струи жидкости происходит в плоскости перпендикулярной груди забоя. При этом разрушение пласта происходит: во-первых, путем сжатия массива угля и доведения касательных и растягивающих напряжений в массиве угля до предельных, во-вторых, разруше-

ние угля происходит путем отделения от пласта отдельных частиц, которые по аналогии [8] будем именовать “сколами”. При этом наиболее вероятными параметрами скола будут параметры, которые обусловлены трещиноватостью пласта. Таким образом, вероятно, разрушение угля при взаимодействии импульсной струи с пластом происходит так же, как при взаимодействии режущего инструмента исполнительного органа очистного комбайна с пластом. При этом образуется воронка в виде усеченного конуса, глубина которой зависит от энергии удара, прочностных свойств угля, трещиноватости пласта и других факторов, а форма поперечного сечения воронки близка к эллипсоидальной.

Описанный выше процесс взаимодействия импульсной струи с массивом пласта и образующиеся при этом воронки относятся к образованию первой воронки, которая может располагаться в любой точке забоя. При непрерывном круговом перемещении насадков генератора импульсной струи образуется сплошная щель [1]. Характерной особенностью разрушения угля при образовании второй и последующих воронок в пласте при воздействии на него импульсной струи является то, что разрушение пласта происходит при наличии второй обнаженной поверхности. Наличие указанной обнаженной поверхности ослабляет массив угля, и разрушение его происходит при меньших затратах энергии.

При разработке физической модели рабочего процесса взаимодействия импульсной струи с массивом угля примем следующие допущения:

1. Разрушение угля импульсной струей производится, во-первых, путем создания в массиве пласта касательных и растягивающих напряжений и доведения их до предельного, во-вторых, – сколами.
2. При прохождении импульсной струи через слой разрушенного угля, образующегося между пластом и насадками генератора, происходит потеря энергии струи [2].
3. Будем считать, что наличие твердых включений и породных прослоек мощностью до 10% от мощности пласта не влияют на процесс взаимодействия импульсной струи с массивом угля.
4. Наличие трещин в пласте и дополнительных обнаженных плоскостей, образующихся при разрушении пласта, будем учитывать путем соответствующего уменьшения прочностных свойств угля.

При разработке математической модели взаимодействия импульсной струи с пластом угля примем следующие допущения:

1. Прочностные свойства разрушаемого угля – сопротивляемость угля резанию – являются случайной величиной с распределением вероятности по закону Гаусса [8]:

$$f(A_{pu}) = \frac{1}{\sigma_{A_{pu}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2}} ; \quad (1)$$

где \bar{A}_{pu} , $\sigma_{A_{pu}}$ - соответственно математическое ожидание и средне квадратичное отклонение сопротивляемости угля резанию,

$$A_{pu} = k_u A_p;$$

k_u – коэффициент, учитывающий исходный материал угленакопления; для гумолитовых углей $k_u=1$, для сапропелитовых углей $k_u=1,4 \dots 3,5$ [8];

A_p – сопротивляемость угля резанию.

2. Разрушение угля производится сколами с распределением вероятностей их длины, не противоречащих закону Вейбулла [8]:

$$\varpi(l_{ck}) = \frac{b}{a} \left(\frac{l_{ck} - c}{a} \right)^{b-1} e^{\left(-\frac{l_{ck} - c}{a} \right)^b}; \quad (2)$$

где a, b, c - параметры распределения, учитывающие соответственно масштаб, форму и сдвиг кривой распределения;

l_{ck} - длина скола.

3. Усилие, необходимое для разрушения угля, является линейной функцией сопротивляемости угля резанию и длины скола.

4. Сопротивляемость угля резанию и длина скола угля являются независимыми случайными величинами.

Усилие, необходимое для разрушения массива угля импульсной струей, запишем в виде (рис. 1):

$$F = \begin{cases} k_{oc} A_{pu} l_{ck}; & 0 \leq l_{ck} < l_{ck1}; \\ k_{oc} A_{pu} l_{ck1} \frac{l_{ck2} - l_{ck}}{l_{ck2} - l_{ck1}}; & l_{ck1} \leq l_{ck} < l_{ck2}; \\ 0; & l_{ck2} \leq l_{ck} \leq l_{ck3}; \end{cases} \quad (3)$$

где k_{oc} - коэффициент, учитывающий ослабление угольного пласта трещинами.

Тогда параметры необходимой для разрушения массива угля силы будут следующими:

- математическое ожидание:

$$\bar{F} = \frac{b}{a \sigma_{A_{pu}} \sqrt{2\pi}} \int_{A_{pu1}}^{A_{pu2}} \int_{l_{ck1}}^{l_{ck2}} A_{pu} l_{ck} e^{-\left[\frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left(\frac{l_{ck} - c}{a} \right)^b \right]} \left(\frac{l_{ck} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck}. \quad (4)$$

- дисперсия:

$$D_F = \left(\frac{b}{a \sigma_{A_{pu}} \sqrt{2\pi}} \right)^2 \int_{A_{pu1}}^{A_{pu2}} \int_{l_{ck1}}^{l_{ck2}} (A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2 (l_{ck} - \bar{l}_{ck})^2 e^{-\left[\frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left(\frac{l_{ck} - c}{a} \right)^b \right]} \times \left(\frac{l_{ck} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck}. \quad (5)$$

где \bar{l}_{ck} - математическое ожидание длины скола.

Перейдем от силы, необходимой для разрушения пласта, к давлению импульсной струи. Для характеристики давления, необходимого для разрушения пласта, достаточно использовать в зависимости (3) только первое выражение, определяющее усилие необходимое для разрушения пласта. На основании этого можем записать:

$$P_n = \frac{\Omega}{d_n^2} A_{pu} l_{ck}. \quad (6)$$

где Ω - постоянный коэффициент: $\Omega = \frac{4 k_{oc}}{k \pi}$;

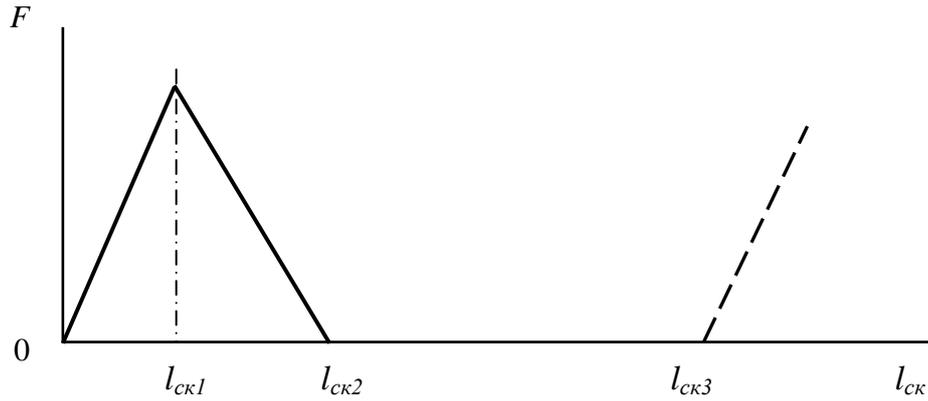


Рис. 1 - Сила при разрушении массива угля импульсной струей

k – коэффициент, учитывающий изменение площади контакта струи с массивом при прохождении через слой разрушенного угля, $k = 1, 0-1, 4$. Численное значение данного коэффициента получено экспериментальным путем, большее значение коэффициента соответствует максимальному слою разрушенного угля перед насадками генератора.

Поскольку ранее принято, что сопротивляемость угля резанию и длина скола массива являются независимыми случайными величинами, то совместная плотность распределения их вероятностей запишется в виде:

$$f(A_{pu}, l_{ck}) = \frac{b}{a \sigma_{A_{pu}} \sqrt{2\pi}} \int_{A_{pu1}}^{A_{pu2}} \int_{l_{ck1}}^{l_{ck2}} A_{pu} l_{ck} e^{-\left[\frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left(\frac{l_{ck} - c}{a} \right)^b \right]} \left(\frac{l_{ck} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck}. \quad (7)$$

Тогда математическое ожидание давления, необходимого для разрушения массива угля, будет иметь следующий вид:

$$\bar{P}_n = \left(\frac{\Omega b}{a \sigma_{A_{pu}} \sqrt{2\pi}} \right)^2 \int_{A_{pu1}}^{A_{pu2}} \int_{l_{ck1}}^{l_{ck2}} A_{pu} l_{ck} e^{-\left[\frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left(\frac{l_{ck} - c}{a} \right)^b \right]} \left(\frac{l_{ck} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck}. \quad (8)$$

Дисперсия давления, необходимого для разрушения массива угля:

$$D_{P_n} = \left(\frac{\Omega b}{a \sigma_{A_{pu}} \sqrt{2\pi}} \right)^2 \int_{A_{pu1}}^{A_{pu2}} \int_{l_{ck1}}^{l_{ck2}} (A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2 (l_{ck} - \bar{l}_{ck})^2 e^{-\left[\frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left(\frac{l_{ck} - c}{a} \right)^b \right]} \times \left(\frac{l_{ck} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck}. \quad (9)$$

В первом приближении с вероятностью 0,96 можно принимать, что максимальное давление, необходимое для разрушения массива угля:

$$P_{n \max} = \bar{P}_n + 2\sigma(A_{pu}, l_{ck}) \quad (10)$$

Необходимое давление на выходе генератора импульсной струи представляет собой сумму давления $\bar{P}_{н\max}$, необходимого для разрушения пласта, и потерь давления ΔP , обусловленных прохождением струи через слой разрушенного угля

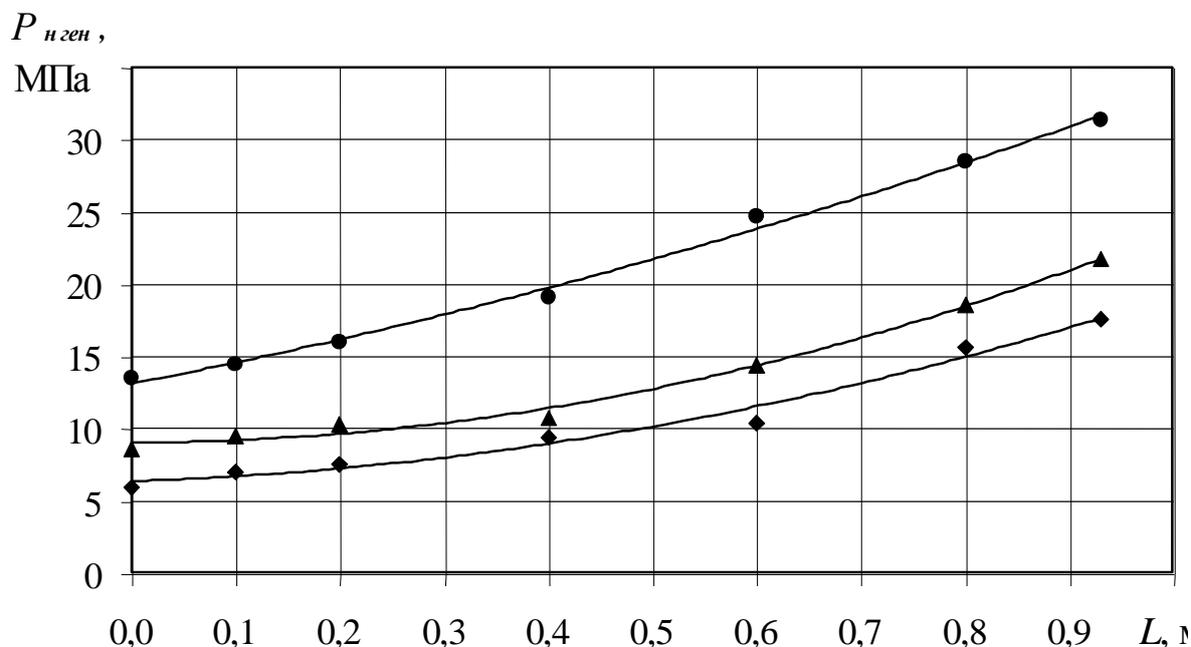
$$\bar{P}_{н\text{ ген}} = \bar{P}_{н\max} + \Delta P. \quad (11)$$

С учетом выражения (6) выражение (11) примет вид:

$$\bar{P}_{н\text{ ген}} = \frac{\Omega}{d_n^2} \bar{A}_{pu} \bar{l}_{ск} + \Delta P. \quad (12)$$

Из приведенного выражения следует, что необходимое давление на выходе генератора представляет собой сумму двух составляющих. Первое из которых – случайная величина с распределением вероятности не противоречащей закону Гаусса и Вейбулла. Вторая – практически детерминированная функция. Тогда, согласно [9], необходимое давление на выходе генератора есть нестационарная случайная функция. Нестационарность этой функции обусловлена изменением (непостоянством) ее второго слагаемого – потерь давления, как функции расстояния между насадком и забоем. Из приведенного выражения (12) также следует, что второе слагаемое ΔP является его математическим ожиданием. Нестационарность необходимого давления на выходе генератора, как случайной функции, обусловлено изменением ее математического ожидания. Такие функции, согласно [9], принято называть стационарными “в широком смысле слова”. Нестационарность функций такого рода может быть приведена к стационарным функциям путем их центрирования, т. е. путем вычитания от значений функции его математического ожидания.

Проверка адекватности производилась по математическому ожиданию. Результаты приведены на рис. 2. Погрешность для конкретных условий проведения эксперимента не превышает 10%.



● - диаметр насадка 8 мм, ▲ - диаметр насадка 10 мм, ◆ - диаметр насадка 12 мм.

Рис. 2 - Зависимости необходимого давления на выходе генератора от толщины слоя разрушенного угля

ВЫВОДЫ

1. Давление необходимое для разрушения массива угля на выходе генератора импульсной струи составляет для насадков диаметром: 8 мм – 22-34МПа; 10 мм – 13-24 МПа; 12 мм – 10-19 МПа. Большие значения давлений соответствуют максимальному слою разрушенного угля перед насадками генератора.

2. Необходимое давление на выходе генератора импульсной струи представляет собой нестационарную случайную функцию, случайный характер которой обусловлен:

- случайным характером разрушения угля с распределением вероятности по закону Гаусса;

- случайным характером длины скола угля с распределением вероятности по закону Вейбулла;

3. Нестационарность функции обусловлена изменением потерь давления, как функции расстояния от насадка до забоя. Потери давления, по данным проведенных исследований [2], – практически детерминированная функция, являющаяся математическим ожиданием случайной функции.

4. Нестационарность давления необходимого на выходе генератора, как случайной функции, может быть переведена в стационарную двухпараметрическую случайную функцию путем ее центрирования.

Полученные результаты используются при усовершенствовании существующих и при проектировании новых гидроимпульсных установок для проведения скважин на крутых и крутонаклонных пластах. В дальнейшем планируется уточнение полученной математической модели путем проведения дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойко Н. Г., Геммерлинг О. А. Обоснование параметров гидроимпульсной струи генератора установки для проведения скважин. // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Випуск 42. Серія: гірничо-електромеханічна. - Донецьк: ДонНТУ, 2002. - С. 54-57.

2. Бойко Н. Г., Геммерлинг О. А. Потери энергии гидроимпульсной струи и ее КПД. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Випуск 51. Серія: гірничо-електромеханічна. - Донецьк: ДонНТУ. - 2002. - С. 37-41.

3. Бойко Н. Г., Геммерлинг О. А. Стенд для исследования процесса взаимодействия гидроимпульсной струи с разрушаемым массивом угля. // Вісті Донецького гірничого інституту: Всеукраїнський науково-технічний журнал гірничого профілю. - 2002. - № 3 - С. 70-71.

4. Бойко Н. Г., Геммерлинг О. А. Исследование процесса взаимодействия импульсной струи жидкости с разрушаемым массивом угля. // Труды международной научно-технической конференции "Горная энергомеханика и автоматика". - Донецк: ДонНТУ. - 2003. - Т 2. - С. 32-37.

5. Геммерлинг О. А. Установление закономерностей разрушения угольного массива импульсной струей жидкости. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Випуск 83. Серія: гірничо-електромеханічна. - Донецьк: ДонНТУ. - 2004. - С. 64-70.

6. Исследование процесса гидроотбойки: Отчет о НИР / Донецкий политехн. ин-т; Руководитель Г. М. Тимошенко. Ч. 1 - 4. - Донецк, 1989. - 578 с.

7. Бугрик В. А. Разработка гидроимпульсного исполнительного органа нишевыемочной машины. Дис ... канд. техн. наук: 05.05.06. - Донецк, 1988. - 232 с.

8. Исполнительные органы очистных комбайнов для тонких пологих пластов / Бойко Н. Г., Болтян А. В., Шевцов В. Г., Марков Н. А. - Донецк: Донеччина, 1996. - 223 с.

9. Свешников А. А. Прикладные методы теории случайных функций. - М.: Наука, 1968. - 463 с.