

УДК 622. 232. 522. 24: 622. 031. 2

**ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ УСИЛИЯ ДЛЯ  
РАЗРУШЕНИЯ УГЛЯ ГИДРОИМПУЛЬСНОЙ СТРУЕЙ**

Бойко Н.Г., докт. техн. наук, профессор,

Геммерлинг О.А., ассистент

Донецкий национальный технический университет

*В работе установлен закон распределения вероятностей усилия и приведены его основные числовые параметры: математическое ожидание и дисперсия*

*In work the rule of probability distribution of effort was defined and its basic numerical parameters were adduced: expected value and dispersion*

**Проблема и ее связь с научными или практическими задачами.** Разработка крутых пластов Центрального района Донбасса осуществляется, как правило, этажным способом. Для подготовки нового очистного забоя необходимо пробурить скважину на высоту этажа. 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: давление импульсной струи, частоту следования импульсов и шаг разрушения угля.

Актуальность данной работы обусловлена, кроме того, необходимостью повышения направленности (неискривленности), производительности и безопасности проведения скважин на крутых и крутонаклонных пластах.

**Анализ исследований и публикаций.** 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. В работе [2] на основании полученного экспериментального материала представлены зависимости для определения потерь энергии струи при проведении скважины, так как 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] на основе полученного экспериментального материала доказано, что разрушение угольного массива происходит сколами. Получены параметры сколов при разрушении массива угля импульсной струей жидкости. В работе [5] рассмотрены вопросы по экспериментальному определению потерь давления импульсной струи. В работе [6] на основании экспериментального материала определена рациональная частота импульсной струи жидкости при разрушении угольного массива. В работе [7] исследовано изменение кинетической энергии импульсной струи жидкости при проведении скважин на крутых и крутонаклонных пластах.

**Постановка задачи.** Данная статья является продолжением указанных работ. Целью данного исследования является усовершенствование математической модели процесса взаимодействия гидроимпульсной струи с массивом угля при проведении скважин.

**Изложение материала и результаты.** Для обоснования параметров импульсной струи жидкости при проведении скважин необходимо определить усилие, необходимое для разрушения угольного массива. Зная необходимое усилие, определяется давление на выходе генератора импульсной струи.

При разработке математической модели процесса взаимодействия импульсной струи с разрушаемым массивом угля приняты следующие допущения:

1. Прочностные свойства разрушаемого угля – сопротивляемость угля резанию – является случайной величиной с распределением вероятности по закону Гаусса [1, 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 среднеквадратичное 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  $k_u=1,4-3,5$ ;  $A_p$  – сопротивляемость угля резанию.



2. Разрушение угля происходит сколами с распределением вероятностей их длины, не противоречащих закону Вейбулла [1, 8]

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

где  $a, b, c$  - параметры распределения, учитывающие соответственно масштаб, форму и сдвиг кривой распределения;  $l_{ск}$  - 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 (рис. 1), запишем в виде

$$F = \begin{cases} k k_{ос} A_{ру} l_{ск}; & 0 \leq l_{ск} < l_{ск1}; \\ k k_{ос} A_{ру} l_{ск1} \frac{l_{ск2} - l_{ск}}{l_{ск2} - l_{ск1}}; & l_{ск1} \leq l_{ск} < l_{ск2}; \\ 0; & l_{ск2} \leq l_{ск} \leq l_{ск3}; \end{cases} \quad (3)$$

где  $k$  - коэффициент, учитывающий условия разрушения угля импульсной струей;  $k_{ос}$  - коэффициент, учитывающий ослабление угольного пласта трещинами.

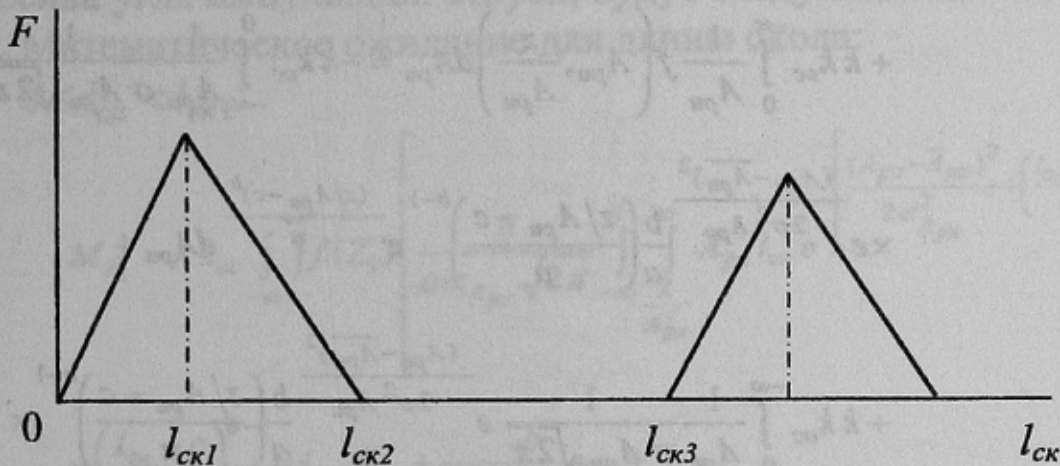


Рисунок 1. Сила при разрушении массива угля импульсной струей

Тогда, с учетом выражений (1) и (2) для  $f(A_{ру})$  и  $\bar{\omega}(l_{ск})$ , приняв, что  $Z = A_{ру} l_{ск}$ , получим выражение закона распределения усилия, необходимого для разрушения массива угля импульсной струей

$$\begin{aligned}
 F(A_{pu}, l_{ck}) &= k k_{oc} \iint_D f(A_{pu}, l_{ck}) dA_{pu} dl_{ck} = \\
 &= k k_{oc} \left[ \int_{-\infty}^0 \int_{\frac{z}{A_{pu}}}^{\infty} f(A_{pu}, l_{ck}) dA_{pu} dl_{ck} + \int_0^{-\infty} \int_{-\infty}^{\frac{z}{A_{pu}}} f(A_{pu}, l_{ck}) dA_{pu} dl_{ck} \right] = \\
 &= \frac{k k_{oc} b}{a \sigma_{A_{pu}} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 \int_{\frac{z}{A_{pu}}}^{\infty} A_{pu} l_{ck} e^{-\left[ \frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left( \frac{l_{ck} - c}{a} \right)^b \right]} \left( \frac{l_{ck} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck} + \\
 &+ \frac{k k_{oc} b}{a \sigma_{A_{pu}} \sqrt{2\pi}} \int_0^{-\infty} \int_{-\infty}^{\frac{z}{A_{pu}}} A_{pu} l_{ck} e^{-\left[ \frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left( \frac{l_{ck} - c}{a} \right)^b \right]} \left( \frac{l_{ck} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck}.
 \end{aligned} \quad (4)$$

Дифференціюючи вираження (4) по  $Z$ , отримаємо щільність розподілення сили, необхідного для руйнування масива угля імпульсною струєю

$$\begin{aligned}
 f_1(Z) &= -k k_{oc} \int_{-\infty}^0 \frac{1}{A_{pu}} f\left(A_{pu}, \frac{z}{A_{pu}}\right) dA_{pu} + \\
 &+ k k_{oc} \int_0^{-\infty} \frac{1}{A_{pu}} f\left(A_{pu}, \frac{z}{A_{pu}}\right) dA_{pu} = -k k_{oc} \int_{-\infty}^0 \frac{1}{A_{pu}} \frac{1}{\sigma_{A_{pu}} \sqrt{2\pi}} \times \\
 &\times e^{-\frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2}} \frac{b}{a} \left( \frac{z/A_{pu} - c}{a} \right)^{b-1} e^{-\frac{(z/A_{pu} - c)^b}{a}} dA_{pu} + \\
 &+ k k_{oc} \int_0^{-\infty} \frac{1}{A_{pu}} \frac{1}{\sigma_{A_{pu}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2}} \frac{b}{a} \left( \frac{z/A_{pu} - c}{a} \right)^{b-1} \times \\
 &\times e^{-\frac{(z/A_{pu} - c)^b}{a}} dA_{pu}; \quad 0 \leq l_{ck} < l_{ck1};
 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 f_2(Z) &= k k_{oc} \frac{l_{ck1} l_{ck2}}{l_{ck2} - l_{ck1}} A_{pu} - k k_{oc} \frac{l_{ck1}}{l_{ck2} - l_{ck1}} \times \\
 &\times \int_{-\infty}^0 \frac{1}{A_{pu}} f\left(A_{pu}, \frac{z}{A_{pu}}\right) dA_{pu} + k k_{oc} \int_0^{-\infty} \frac{1}{A_{pu}} f\left(A_{pu}, \frac{z}{A_{pu}}\right) dA_{pu} = \\
 &= k k_{oc} \frac{l_{ck1} l_{ck2}}{l_{ck2} - l_{ck1}} A_{pu} - k k_{oc} \frac{l_{ck1}}{l_{ck2} - l_{ck1}} \times \\
 &\times \int_{-\infty}^0 \frac{1}{A_{pu}} \frac{1}{\sigma A_{pu} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma^2 A_{pu}}} \frac{b}{a} \left(\frac{z/A_{pu} - c}{a}\right)^{b-1} \times \\
 &\times e^{-\frac{(z/A_{pu} - c)^b}{a}} dA_{pu} + k k_{oc} \int_0^{-\infty} \frac{1}{A_{pu}} \frac{1}{\sigma A_{pu} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma^2 A_{pu}}} \times \\
 &\times \frac{b}{a} \left(\frac{z/A_{pu} - c}{a}\right)^{b-1} e^{-\frac{(z/A_{pu} - c)^b}{a}} dA_{pu}; \quad l_{ck1} \leq l_{ck} < l_{ck2};
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$f_3(Z) = 0; \quad l_{ck2} \leq l_{ck} \leq l_{ck3}. \tag{7}$$

Тогда числовые параметры усилия, необходимого для разрушения массива угля импульсной струей, будут следующими:

1. Математическое ожидание для длины скола:

$$- 0 \leq l_{ck} < l_{ck1}:$$

$$\begin{aligned}
 M_{F_1} &= k k_{oc} \int_{-\infty}^{\infty} \int f(Z_1) \left[ \frac{b}{a \sigma A_{pu} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 \int_{\frac{Z}{A_{pu}}}^{\infty} A_{pu} l_{ck} e^{-\left[\frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma^2 A_{pu}} + \left(\frac{l_{ck} - c}{a}\right)^b\right]} \times \right. \\
 &\times \left. \left(\frac{l_{ck} - c}{a}\right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck} + \frac{b}{a \sigma A_{pu} \sqrt{2\pi}} + \right. \\
 &\left. + \int_0^{-\infty} \int_{-\infty}^{\frac{Z}{A_{pu}}} A_{pu} l_{ck} e^{-\left[\frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma^2 A_{pu}} + \left(\frac{l_{ck} - c}{a}\right)^b\right]} \left(\frac{l_{ck} - c}{a}\right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck} \right] dA_{pu} dl_{ck}.
 \end{aligned} \tag{8}$$



$$-l_{ck1} \leq l_{ck} < l_{ck2}:$$

$$M_{F_2} = k k_{oc} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(Z_2) \left[ \frac{b}{a \sigma_{A_{pu}} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 \int_{\frac{Z}{A_{pu}}}^{\infty} A_{pu} l_{ck} e^{-\left[ \frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left( \frac{l_{ck} - c}{a} \right)^b \right]} \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{l_{ck} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck} + \frac{b}{a \sigma_{A_{pu}} \sqrt{2\pi}} + \right. \\ \left. + \int_0^{\frac{Z}{A_{pu}}} \int_{-\infty}^{\infty} A_{pu} l_{ck} e^{-\left[ \frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left( \frac{l_{ck} - c}{a} \right)^b \right]} \left( \frac{l_{ck} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck} \right] dA_{pu} dl_{ck}. \quad (9)$$

$$-l_{ck2} \leq l_{ck} \leq l_{ck3}:$$

$$M_{F_3} = 0. \quad (10)$$

## 2. Дисперсия для длины скола:

$$-0 \leq l_{ck} < l_{ck1}:$$

$$D_{F_1} = k k_{oc} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \left( \frac{b}{a \sigma_{A_{pu}} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 \int_{\frac{Z}{A_{pu}}}^{\infty} A_{pu} l_{ck} e^{-\left[ \frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left( \frac{l_{ck} - c}{a} \right)^b \right]} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left( \frac{l_{ck} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck} + \frac{b}{a \sigma_{A_{pu}} \sqrt{2\pi}} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \int_0^{\frac{Z}{A_{pu}}} \int_{-\infty}^{\infty} A_{pu} l_{ck} e^{-\left[ \frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left( \frac{l_{ck} - c}{a} \right)^b \right]} \left( \frac{l_{ck} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck} \right)^2 - \right. \\ \left. - M_{F_1} \right]^2 dA_{pu} dl_{ck}. \quad (11)$$

$$\div l_{ck1} \leq l_{ck} < l_{ck2}:$$

$$D_{F_2} = k k_{oc} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{b}{a \sigma_{A_{pu}} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 \int_{\frac{Z}{A_{pu}}}^{\infty} A_{pu} l_{ck} e^{-\left[ \frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left( \frac{l_{ck} - c}{a} \right)^b \right]} \times \right. \\ \times \left. \left( \frac{l_{ck} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck} + \frac{b}{a \sigma_{A_{pu}} \sqrt{2\pi}} \times \right. \\ \left. \times \int_{-\infty}^{\frac{Z}{A_{pu}}} \int_{-\infty}^{\infty} A_{pu} l_{ck} e^{-\left[ \frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left( \frac{l_{ck} - c}{a} \right)^b \right]} \left( \frac{l_{ck} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck} \right] - \\ - M_{F_2} \Big]^2 dA_{pu} dl_{ck}.$$

(12)

$$- l_{ck2} \leq l_{ck} \leq l_{ck3}:$$

$$D_{F_3} = k k_{oc} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{b}{a \sigma_{A_{pu}} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 \int_{\frac{Z}{A_{pu}}}^{\infty} A_{pu} l_{ck} e^{-\left[ \frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left( \frac{l_{ck} - c}{a} \right)^b \right]} \times \right. \\ \times \left. \left( \frac{l_{ck} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck} + \frac{b}{a \sigma_{A_{pu}} \sqrt{2\pi}} \times \right. \\ \left. \times \int_{-\infty}^{\frac{Z}{A_{pu}}} \int_{-\infty}^{\infty} A_{pu} l_{ck} e^{-\left[ \frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left( \frac{l_{ck} - c}{a} \right)^b \right]} \left( \frac{l_{ck} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck} \right] - \\ - M_{F_3} \Big]^2 dA_{pu} dl_{ck}.$$

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Впервые был получен закон распределения вероятностей усилия, необходимо-

го для разрушения массива угля импульсной струей жидкости, определено его математическое ожидание и дисперсия.

Полученные результаты используются при усовершенствовании математической модели процесса взаимодействия гидроимпульсной струи с массивов угля при проведении скважин. В дальнейшем планируется уточнение полученной математической модели путем проведения экспериментальных исследований в реальных шахтных условиях эксплуатации импульсных установок для проведения скважин.

Список источников:

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. 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.
5. Геммерлинг О.А. Определение потерь давления импульсной струей жидкости при прохождении ее через слой разрушенного угля. // Научные труды международной научно-технической конференции «Горное оборудование - 2005». - Донецк: ДонНТУ. - 2005. - С. 43-45.
6. Бойко Н.Г., Геммерлинг О.А. Определение рациональной частоты импульсной струи жидкости при разрушении угольного массива. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Випуск 101. Серія: гірничо-електромеханічна. - Донецьк: ДонНТУ. - 2005. - С.3-6.
7. Бойко Н.Г., Геммерлинг О.А. Исследование изменения кинетической энергии гидроимпульсной струи при проведении скважин на крутых и крутонаклонных пластах. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Випуск 104. Серія: гірничо-електромеханічна. - Донецьк: ДонНТУ. - 2006. - С. 10-16.
8. Исполнительные органы очистных комбайнов для тонких пологих пластов / Бойко Н.Г., Болтян А.В., Шевцов В.Г. и др. Донецк, «Донеччина», 1996. – 223 с.

*Дата поступления статьи в редакцию: 01.11.06*