

УДК 69.0597

А.В.ГЕЛЕТА, О.В.АРХИПОВ, канд. техн. наук
Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РУЧНЫХ УДАРНО-ВРАЩАТЕЛЬНЫХ МАШИН ПРИ БУРЕНИИ БЕТОНА

Приводятся данные о производительности бурения в бетоне шпуров с помощью ручных электрических ударно-вращательных машин нового поколения.

При строительстве, реконструкции, реставрации и ремонте железобетонных зданий и сооружений возникает необходимость образования в строительных конструкциях отверстий и проемов для прокладки различных коммуникаций, а также шпуров для установки металлических анкеров, закрепляемых клеевыми композициями.

При небольших объемах работ (например, образовании единичных отверстий) производительность процесса обычно не имеет существенного значения. При значительных объемах этих работ (например, при установке в бетоне металлических цилиндрических [1] и особенно плоских и профильных анкеров [2], требующих последовательного бурения ряда близко расположенных шпуров, образующих линейную или другую конфигурацию) производительность бурения оказывает решающее влияние на продолжительность, трудоемкость, стоимость работ и обязательно учитывается в технологических расчетах.

Исследованию процесса бурения бетона посвящены работы многих авторов [3-9 и др.]. В них установлены зависимости производительности бурения от различных факторов, в первую очередь от диаметра отверстий, класса бетона, технических характеристик оборудования и режимов его работы. Однако в последние годы отечественные ("Фиолент", Украина) и особенно зарубежные ("Бош", "Бленд энд Декер", "Макита" и др.) производители бурового оборудования и инструмента постоянно совершенствуют свою продукцию, выпуская на рынок большую номенклатуру высококачественных машин и инструментов. Современные бурильные ударно-вращательные машины нового поколения обладают более высокой производительностью, долговечностью, надежностью, универсальностью, возможностью переназначивания режимов работы в широком диапазоне и другими эффективными качествами. При использовании этих машин в строительных технологических процессах необходимо решить следующие задачи:

выбрать из большого перечня однотипных моделей наиболее эффективную машину. Эта задача рассмотрена в [10]. В частности, с помощью предложенных авторами [10] обобщенных комплексных

мощью предложенных авторами [10] обобщенных комплексных характеристик проведена сравнительная оценка 18 моделей ручных электрических ударно-вращательных машин; установлены наиболее технически совершенные модели HR2410-set24 ("Макита", Япония), KD900RE ("Бленд энд Декер", Англия), МСУ6-13-2РЭ ("Фиолент", Украина) и другие, обеспечивающие бурение шпуров диаметром до 30 мм;

определить производительность выбранных моделей, так как ранее опубликованные данные относились к машинам предыдущих поколений или к менее производительным.

Ниже приведены результаты экспериментов по бурению в бетоне шпуров для установки металлических анкеров различного сечения (круглого, прямоугольного, комбинированного).

Бурение производили в летний период при температуре наружного воздуха $t = 26-28^{\circ}\text{C}$, относительной влажности $\varphi = 70\%$, барометрическом давлении $P = 746$ мм рт. ст. с помощью ручных электрических ударно-вращательных машин. Краткие технические характеристики машин приведены в табл.1. В качестве бурильного инструмента применяли стандартные долотчатые буры по бетону диаметром 10, 16, 20, 24 мм с твердосплавными пластинами.

Таблица 1 – Краткие технические характеристики ручных электрических ударно-вращательных машин, использованных в эксперименте

Модель, фирма, страна-производитель	Максимальный диаметр шпура по бетону, мм	Мощность, Вт	Количество ударов в минуту	Масса, кг
МСУ6-13-2РЭ ("Фиолент", Украина)	20	750	3000	2,7
HR2410-set24 ("Макита", Япония)	24	680	4900	2,3

Давление подачи не превышало 5 кг. Шпуры пробуривали в бетонных образцах размером 400×400×400 мм. Класс бетона В7,5 и В25.

Стабильные условия эксперимента позволяют уменьшить количество факторов, определяющих скорость бурения, до трех – диаметр, глубина шпура, класс бетона. Влияние остальных факторов проявляется в так называемом «белом шуме».

Таким образом, необходимо экспериментально определить зависимость в виде

$$V = f(D, H, P), \quad (1)$$

где V – скорость бурения шпура, мм/мин; D – диаметр шпура (принимаемый по диаметру бура), мм; H – глубина шпура, мм; P – предел

прочности бетона, кг/см^2 .

Наиболее распространенные диаметры шпуров, применяемые на практике, – 10, 16, 20, 24 мм. Предел прочности бетона наиболее распространенных конструкций, в которых производится заделка закладных деталей, составляет $100 \div 300 \text{ кг/см}^2$. Глубина заделки закладных деталей (глубина шпура) равна 5-10 диаметров шпура ($H = 5D \div 10D$).

Для бетона с пределом прочности 100 кг/см^2 был выполнен предварительный эксперимент по определению общего вида зависимости $V = f(D)$, $V = f(H)$.

С помощью указанного выше оборудования проводили бурение шпуров диаметром $D=10$ мм и глубиной $H = 2,5; 5,0; 7,5; 10,0D$. Количество пробуренных шпуров для каждой глубины равно 7. Результаты этого исследования приведены на рис.1.

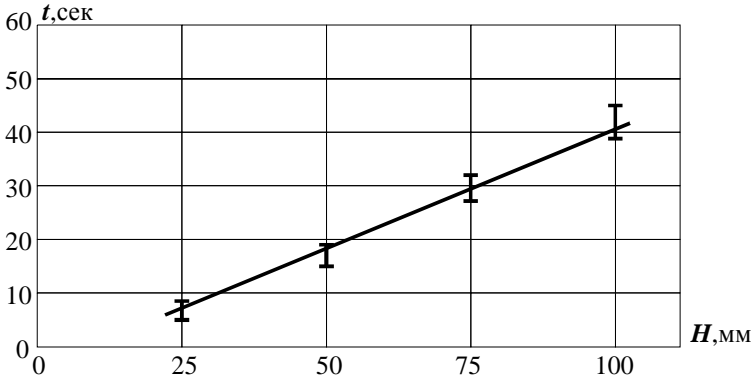


Рис.1 – Зависимость времени бурения шпура t от глубины H

Для всех диаметров шпуров для этой марки бетона определяли глубину шпура, пробуренного за одну минуту, т.е. V (мм/мин). Результаты этого исследования представлены на рис.2.

Как следует из результатов исследований, во-первых, скорость бурения в интересующем нас диапазоне практически не зависит от глубины шпура, т.е. $V(H) = const$. Это позволяет упростить искомую зависимость за счет уменьшения переменных до двух, т.е.

$$V = f(D, P). \quad (2)$$

Во-вторых, зависимость скорости бурения от диаметра шпура $V(D)$, (мм/мин) имеет нелинейный характер.

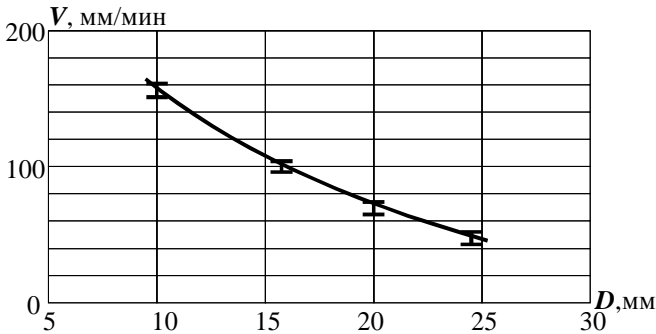


Рис.2 – Зависимость скорости бурения от диаметра шпура $V = f(D)$.

Как известно из литературы [11-14], теория планирования эксперимента и регрессионный анализ позволяют довольно точно описать зависимость в виде (2) нелинейным регрессионным уравнением

$$V(X_1, X_2) = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_{11} X_1^2 + a_{22} X_2^2 + a_{12} X_1 X_2, \quad (3)$$

где X_1, X_2 – безразмерные кодированные переменные, принимающие значения ± 1 ; a_i – искомые коэффициенты регрессионного уравнения.

В соответствии с теорией планирования эксперимента [12-14], переход от физических переменных D и P к нормированным безразмерным переменным X_1 и X_2 осуществляется через основные характеристики плана эксперимента, представленные в табл.2, по зависимостям

$$X_1 = \frac{D - D_{cp.}}{\Delta D}; \quad X_2 = \frac{P - P_{cp.}}{\Delta P}, \quad (4)$$

$$x_{cp.} = \frac{x_{max} + x_{min}}{2}; \quad \Delta x = \frac{x_{max} - x_{min}}{2}. \quad (5)$$

Таблица 2 – Основные характеристики плана эксперимента

Характеристика	D , мм	P , кг/см ²
Основной уровень (x_{cp})	20	200
Интервал варьирования (Δx)	4	100
Верхний уровень (+1)	24	300
Нижний уровень (-1)	16	100

Таким образом,

$$X_1 = \frac{D - 20}{4}; \quad X_2 = \frac{P - 200}{100}. \quad (6)$$

В специальной литературе подробно рассмотрены различные регрессионные модели и планы экспериментов для них [11-14], правила проведения регрессионного анализа и т.д. Исходя из этого, в табл.3 приведена матрица центрального композиционного плана эксперимента, составленная в соответствии с указаниями [14], установленными в табл.2 уровнями варьирования и полученными значениями функции отклика V .

В каждой серии опытов эксперимент проводили семь раз, определяли среднее значение функции отклика V_{cp} . Значение V_{cp} округлялось до 0,1. В результате обработки опытных данных коэффициенты регрессионного уравнения (3) найдены методом наименьших квадратов в матричной форме записи, т.е.

$$a = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (7)$$

Полученное регрессионное уравнение имеет вид

$$V(X_1, X_2) = 68,4 - 23,2X_1 - 5,8X_2 + 4,4X_1^2 - 2,3X_2^2 + 3,8X_1X_2. \quad (8)$$

Следующим этапом является проведение регрессионного анализа для полученного уравнения, который заключается в проверке воспроизводимости опытов, определении значимости коэффициентов уравнения регрессии, в проверке адекватности данного уравнения.

Воспроизводимость опытов устанавливали по критерию Кохрена. Для этого необходимо вычислить дисперсию воспроизводимости по формуле

$$S_i^2 = \frac{1}{k-1} \times \sum_{j=1}^k (Y_{ij} - \tilde{Y}_i)^2, \quad (9)$$

где S_i^2 – дисперсия параллельных опытов при одинаковых условиях; k – число параллельных опытов ($k=7$); \tilde{Y}_i – среднее значение k опытов.

Опыты считаются воспроизводимыми, если наибольшая из оценок дисперсии к сумме всех дисперсий

$$G_{расч.} = \max S_i^2 / \sum_{i=1}^N S_i^2 \quad (10)$$

или расчетное значение критерия Кохрена будет меньше табулированного значения, т.е.

$$G_{расч.} \leq G_{табл.} \quad (11)$$

В формуле (10) величина N означает количество серий опытов, которое равно 7. Табулированное значение $G_{табл.}=0,471$ [12] соответствует доверительной вероятности $P=0,95$ (т.е. в 95% случаев опыты считаются воспроизводимыми) и числу степеней свободы $f_1 = N \times (k - 1) = 54$. Так как $G_{расч.} = 0,23 < G_{табл.}$, то опыты считаются воспроизводимыми.

Для определения значимости коэффициентов уравнения (8) по критерию Стьюдента нужно рассчитать сумму квадратов ошибок по формуле

$$S_{estimate} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k (Y_{ij} - \tilde{Y}_i)^2, \quad (12)$$

где Y_{ij}, \tilde{Y}_i – значение функции отклика единичного измерения и среднее значение для точек плана.

Затем после определения дисперсии ошибок наблюдений по формуле

$$s^2 = \frac{S_{estimate}}{k \times f_1} \quad (13)$$

можно перейти к оценке значимости коэффициентов уравнения регрессии с выполнением условия

$$|a_i| \geq s_i \times t_{кр}, \quad (14)$$

где $|a_i|$ – модуль коэффициента регрессии; $t_{кр}$ – критическое значение критерия Стьюдента [12-14], определяемое по числу степеней свободы f_1 и доверительной вероятности $P=0,95$ ($t_{кр}=2,01$); s_i – оценки дисперсий коэффициентов, определяемые по формуле

$$s_i = s \times \sqrt{c_{i, j=i}}, \quad (15)$$

где $c_{i, j=i}$ – диагональные элемента дисперсионной матрицы

$$C = (X^T X)^{-1}.$$

В нашем случае условие (14) не выполняется для коэффициента

при X_2^2 уравнения (8), т.е. уравнение (8) окончательно имеет вид

$$V(X_1, X_2) = 68,4 - 23,2X_1 - 5,8X_2 + 4,4X_1^2 + 3,8X_1X_2. \quad (16)$$

Адекватность этого уравнения проверяем по критерию Фишера [14]. Для этого необходимо определить сумму квадратов, характеризующих неадекватность уравнения по формуле

$$S_{defekt} = \sum_{i=1}^N k \times (\bar{Y}_i - \tilde{Y}_i)^2, \quad (17)$$

где \bar{Y}_i – значение скорости бурения, рассчитанное по зависимости (16).

Данная сумма квадратов имеет число степеней свободы

$$f_2 = N - n - 1, \quad (18)$$

где n – число членов регрессионного уравнения за исключением свободного члена ($n=4$).

Уравнение является адекватным, если выполняется условие

$$F_{расч.} < F, \quad (19)$$

где F – теоретическое значение критерия Фишера [14] для доверительной вероятности $P=0,95$ и числа степеней свободы f_1 и f_2 , $F=2,78$; $F_{расч.}$ – расчетное значение критерия Фишера, определяемое по формуле

$$F_{расч.} = \frac{S_{defekt} / f_1}{S_{estimate} / f_2}. \quad (20)$$

Так как $F_{расч.} = 0,459 < F = 2,78$, то уравнение регрессии (16) является адекватным.

Таким образом, приведенные данные о производительности бурения в бетоне шпуров диаметром $D=10\div 24$ мм и глубиной $H \leq 10D$ с помощью современных ручных электрических ударно-вращательных машин существенно уточняют ранее опубликованные данные, относящиеся к аналогичным машинам предыдущих поколений, и могут быть рекомендованы для использования в технологических расчетах при разработке проектов производства работ, содержащих значительные объемы бурения по бетону, в частности, при установке в бетон металлических анкеров на клеях.

В дальнейшем целесообразно провести аналогичные экспериментальные исследования для определения производительности бурения

по бетону современными перфораторами. Требуется также разработка эффективной технологии образования в бетоне щелевых и профильных шпуров для установки металлических анкеров некруглого сечения.

1. Золотов М.С., Шутенко Л.Н., Золотов С.М., Скляров В.А. Анкерные крепления в бетоне // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.15. – К.: Техніка, 1998. – С.39-43.
2. Кутовой Э.Н., Гелета А.В. Особенности образования в железобетонных конструкциях шпуров для заделки плоских металлических анкеров // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.25. – К.: Техніка, 2000. – С.89-93.
3. Нохрина Л.А. Устройство скважин для заделки в бетон анкеров акриловыми клеями // Тез. докл. IV Украинской науч.-техн. конференции «Применение пластмасс в строительстве и городском хозяйстве». – Харьков, 1996. – С.100-102.
4. Нохрина Л.А., Золотов М.С. Технические средства образования скважин в бетоне для заделки анкеров с помощью клеев // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.10. – К. Техніка, 1997. – С.81-84.
5. Воздвиженский Б.И., Сидоренко А.К., Скортеков А.Л. Современные способы бурения скважин. – М.: Недра, 1992. – 246 с.
6. Механизмы и машины ударного, вращательно-ударного действия // Сб. статей под ред. Родионова И.В. – Новосибирск, 1963. – 209 с.
7. Бесчастный А.В., Касаточкин А.В. Технология алмазного сверления железобетона. – М.: Стройиздат, 1980. – 104 с.
8. Ряшенцев Н.П. и др. Ручные электрические машины ударного действия. – М.: Недра, 1970. – 192 с.
9. Пфуль Б.В. Малая механизация в строительстве. – М.: Стройиздат, 1970. – 287 с.
10. Гелета А.В., Кутовой Э.Н. Сравнительная оценка основных эксплуатационных параметров ручных электрических ударно-вращательных машин // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДГУБА, 2001.
11. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 496 с.
12. Слаутин С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. – Л.: Химия, 1975.
13. Фадлер Ю.П., Марков Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1971.
14. Хартман К. и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. – М.: Мир, 1977. – 532 с.

Получено 12.12.2002

УДК 624.018

Ю.В.ГЛАЗУНОВ, канд. техн. наук
Харьковская государственная академия городского хозяйства

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНА ПРИ МНОГОКРАТНО ПОВТОРЯЮЩЕМСЯ ДЕЙСТВИИ НАГРУЗКИ

Рассматриваются основные понятия механики разрушения бетона, сформулированы положения теории прочности высокопрочных бетонов. Приводятся результаты исследования работы бетона при действии многократно повторяющихся (циклических) нагрузок.