

Ж. ЖУМАЕВ

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ПОДВОДНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГРУНТОВ ТЮБ-КАРАГАНСКОГО ЗАЛИВА КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Проведение экспериментальных исследований по копанию грунтов в подводных условиях [1], в том числе под гидростатическим давлением, на натуральных образцах экскаваторов с ковшом драглайна на дне Тюб-Караганского залива Каспийского моря связано с большими организационными, техническими и экономическими затруднениями. Наиболее целесообразным путем решения данной задачи является проведение экспериментов на стендовом оборудовании, позволяющем моделировать реальные условия разрушения грунтов под водой при наличии гидростатического давления, с применением методов физического моделирования и многофакторного планирования экспериментов. Это позволяет получить искомую информацию в наиболее короткие сроки и с меньшими затратами. Такие экспериментальные исследования процесса копания грунта под гидростатическим давлением прежде всего связаны с созданием специальных стендов.

В соответствии с программой экспериментальных исследований первоначально проведены эксперименты с периметрами ковша драглайна. В ходе эксперимента изменялись угол резания, прочность грунта и гидростатическое давление. Сопrotивляемость грунтов разрушению при механическом воздействии на них рабочих органов подводных землеройных машин может быть оценена на начальных этапах наиболее простым способом – резанием периметрами [2].

Параметры рабочей камеры и грунтового контейнера приняты из условий исключения влияния боковых стенок на протекаемый процесс. Минимальная глубина (толщина) грунта в грунтовом контейнере определялась экспериментально. Толщину слоя грунта h (рис. 1), которая складывается из глубины вдавливания штампа h_0 и толщины нижнего слоя h_x , вначале выбирают по максимальной величине. Проводят серию экспериментов по вдавливанию штампа при определенном гидростатическом давлении с фиксированной глубиной вдавливания, т.е. $h = \text{const}$, и не-

изменными другими условиями проводят с уменьшенным значением нижнего слоя h_x еще на определенное расстояние. Продолжают до тех пор, пока усилие внедрения не начнет расти, при этом изменяется и коэффициент вариации. Глубина нижнего слоя h_x , соответствующая изменению усилия вдавливания и коэффициента вариации, является предельной, дальнейшее уменьшение ее связано с проявлением действия масштабного фактора.

Сопrotивление грунта разрушению определялось измерением усилий резания и внедрения рабочего органа в грунт с помощью 0-образных тензозвеньев, датчики которые соединены согласно схеме, показанной на рис. 2. Тарировка тензозвеньев осуществлялась нагружением калиброванных грузов с одновременной регистрацией сигналов осциллограмм [3].

Опыты проводились на суглинистом грунте влажностью 14 %, со средним удельным сцеплением $C_0 = 9,5 \text{ Н/см}^2$, углом внутреннего трения грунта 16° . Прочность грунта оценивалась числом ударов ударником ДорНИИ.

Предварительная прочность грунта обеспечивается послойным его уплотнением. Пуск в работу осуществляется следующим образом. Подготовленный грунт с контейнером помещают в рабочую камеру, плотно закрывают люк. Заливают воду или другую жидкость в камеру. После наполнения камеры водой и выпуска воздуха из нее источником давления создается необходимое гидростатическое давление, которое фиксируется манометром и тензодатчиком. Затем производят внедрение штампа в грунт путем включения приводных гидроцилиндров, установленных на поворотной колонне. В это время выполняют запись усилий внедрения штампа в грунт. После окончания опыта снимают гидростатическое давление, поднимают штамп в исходное положение, сливают воду из камеры.

В соответствии с программой экспериментальных исследований вначале проведены экспе-

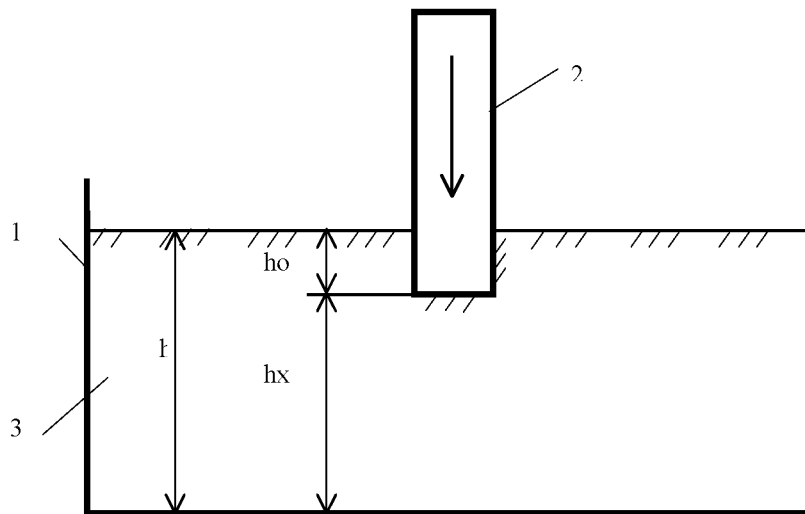


Рис. 1. Схема к определению параметров грунтового контейнера

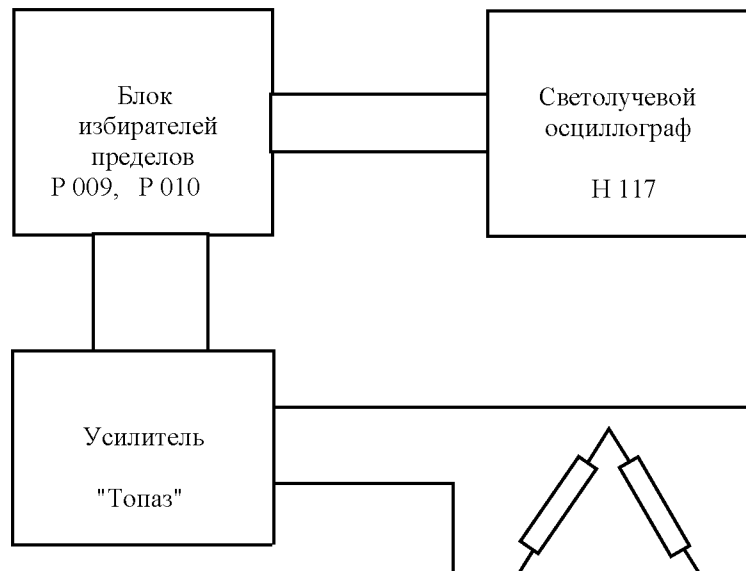


Рис. 2. Схема тензометрической записи

рименты с плоскими отвалами под гидростатическим давлением.

Методика исследований базировалась на методах многофакторного анализа. В качестве плана эксперимента был использован центральный композиционный план в условиях рандомизации при пяти факторах: прочности грунта, оцениваемой числом ударов плотномера ДорНИИ; глубине резания; угле резания; скорости резания и гидростатического давления.

В табл. 1 показаны факторы, влияющие на процесс копания грунтов в подводных условиях, и уровни их варьирования.

В следующей серии проведены экспериментальные исследования с ковшовыми рабочими

органами, обеспечивающими возможность проникания водной среды на контактную поверхность между грунтовым пластом и передней гранью ковша. Грунтовая стружка, отделенная ножами, передвигается по лобовым поверхностям ножа и отвала. При этом гидростатическое давление (оно повышается с увеличением глубины погружения) прижимает грунтовую стружку к лобовым поверхностям ножа и отвала, существенно повышая усилие копания грунта за счет роста сил трения между ними, а следовательно, и общую энергоёмкость разработки грунта под водой.

По мере перемещения стружки грунта по ножу и ковшу по сквозным щелям вода под действием гидростатического давления поступает на

Таблица 1. Факторы и уровни их варьирования

Факторы	Уровни варьирования				
	-2	-1	0	+1	+2
Прочность грунта, число ударов	1	2	3	4	5
Глубина резания, см	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Угол резания, град.	20	30	40	50	60
Скорость резания, см/с	0,001	2,0	4,0	6,0	8,0
Гидростатическое давление, МПа	0	0,25	0,5	0,75	1,0

лобовые поверхности ножа и ковша по направлениям, уравнивая гидростатическое давление на стружку грунта и соответственно уменьшая общее усилие копания до величины, характерной для копания на поверхности воды (на малой глубине погружения). Одновременно слой воды уменьшает трение грунта по металлу из-за эффекта смазки водой, что ведет к существенному снижению энергоемкости процесса копания грунта под водой. Оптимальные значения отверстий лежат в пределах 3–5 мм. Уменьшение диаметра от оптимального ведет к заклиниванию грунтов сквозных отверстий, что препятствует прониканию воды на лобовые поверхности ножа и ковша. Увеличение диаметра в большую сторону от оптимального сопровождается проскальзыванием части грунта по сквозным отверстиям.

Модернизированное устройство обеспечивает выравнивание гидростатического давления, действующего на грунтовую стружку, путем проникания воды через сквозные зазоры, образованные между торцовыми кромками пластин ножа и нижней кромкой отвала, на лобовые поверхности ножа и ковша. Водный слой между грунтовой стружкой и лобовыми поверхностями ножа и ковша существенно уменьшает трение грунта по металлу, что снижает энергоемкость копания ковшем драглайна при сохранении ровной поверхности дна Тюб-Караганского залива Каспийского моря.

Для проведения экспериментальных исследований грунт (средний суглинок и супесь) подготавливается в грунтовом контейнере. Глубина разработки грунта регулировалась высотой слоя грунта в контейнере. Грунт уплотнялся ударной трамбовкой и накатом до требуемой степени плотности, оцениваемой числом ударов динамического плотномера ДорНИИ. Коэффициент водонасыщения грунта находился в пределах 0,9,

что позволяло получать стабильную прочность грунта в контейнере.

Определялись следующие показатели статистических характеристик случайного процесса изменения сопротивлений копания: закон распределения; математическое ожидание; дисперсия; коэффициент вариации и корреляционные функции.

Для экспериментальной оценки изменения вертикальной составляющей сопротивления копания грунтов под гидростатическим давлением проведена серия экспериментов на стендах физического моделирования. Запись вертикальной составляющей сопротивления копания осуществляется с помощью Г-образного тензозвена, которое обеспечивает раздельную запись горизонтальной и вертикальной составляющих [5].

В качестве плана эксперимента принят центральный композиционный рототабельный план с тремя факторами: глубина копания h (X_1), прочность грунта C (X_2), гидростатическое давление p (X_3). Параметром отклика является составляющая сопротивления копания грунтов (табл. 2).

Таблица 2. Действующие факторы и уровни их варьирования

Факторы	Уровни варьирования				
	-1,682	-1	0	+1	+1,682
Глубина резания h , см	0,5	0,9	1,5	2,1	2,5
Прочность грунта C , удар	1	2,2	3	4,2	5
Гидростатическое давление P , МПа	0	0,2	0,5	0,8	1,0

Математическое описание процесса разрушения грунтов под гидростатическим давлением для рототабельного центрально-композиционного плана может быть дано в виде следующего уравнения регрессии:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{12} \cdot b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{11} \cdot X_1^2 + b_{22} \cdot X_2^2 + b_{33} \cdot X_3^2. \quad (1)$$

Коэффициенты модели определяются по следующим формулам:

$$b_0 = P \sum_{n=1}^N Y_n - Q \sum_{i=1}^n \sum_{n=1}^N X_{in}^2 \cdot Y_n ;$$

$$b_i = R \sum_{n=1}^N X_{in} \cdot Y_n ;$$

$$b_{ik} = W \sum_{n=1}^N Y_n \cdot X_{in} \cdot X_{kn} ;$$

$$b_{ii} = S \sum_{n=1}^N X_{in} \cdot Y_n + T \sum_{i=1}^n \sum_{n=1}^N X_{in}^2 \cdot Y_n - V \sum_{n=1}^N Y_n , (2)$$

где b_o – свободный член уравнения регрессии; b_{ii} – коэффициент регрессии при квадратичном члене i -го фактора; b_i – коэффициент линейной регрессии для i -го фактора; b_{ik} – коэффициент парного взаимодействия i -го и k -го факторов; n – число факторов; N – число вариантов в матрице планирования с учетом повторов центральной

точки; $\sum_{n=1}^N Y_n$ – сумма значений выходов для всех

вариантов матрицы планирования;

$\sum_{i=1}^n \sum_{n=1}^N X_{in}^2 \cdot Y_n$ – сумма произведений квадрата

уровня каждого фактора в n -м варианте матри-

цы на выход Y_n ; $\sum_{n=1}^N Y_n \cdot X_{in}$ – алгебраическая

сумма произведений выхода каждого варианта на уровень i -го фактора в этом варианте для всех

вариантов плана; $\sum_{n=1}^N Y_n \cdot X_{in} \cdot X_{kn}$ – алгебраи-

ческая сумма произведений выходов каждого варианта на уровень i -го и k -го факторов в этом варианте для всех N вариантов плана;

$\sum_{n=1}^N X_{in}^2 \cdot Y_n$ – сумма произведений квадрата

уровня в каждом n -м варианте матрицы планирования на выход Y_n в этом варианте для всех N вариантов; P, Q, R, T, W, V – постоянные величины для каждого плана.

Значимость коэффициентов регрессионной модели определялась по критерию Стьюдента [6]:

$$t_i = \frac{|b_i|}{S(b_i)} \geq t_{cr} , (3)$$

где t_{cr} – критическое значение t при уровне значимости α и f .

Однородность дисперсии воспроизводимости проверялась по критерию Кохрена:

$$G_E = \frac{S_{max}^2}{\sum_{i=1}^n S_i^2} \leq G_{cr} , (4)$$

где G_{cr} – критическое значение однородности дисперсии; S_{max}^2 – максимальное значение диспер-

сии воспроизводимости; $\sum_{i=1}^n S_i^2$ – суммарное значение дисперсии воспроизводимости.

Проверка полученной регрессионной модели на адекватность проводилась по критерию Фишера:

$$F_E = \frac{S_{na}^2}{S_y^2} \leq F_t , (5)$$

где S_{na}^2 – дисперсия неадекватности,

$$S_{na}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_r - Y_o)^2 - \sum_{i=1}^n (Y_c - \bar{Y}_c)^2}{(N - d) - (n - 1)} ; (6)$$

S_y^2 – дисперсия воспроизводимости,

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_c - \bar{Y}_c)^2}{n - 1} , (7)$$

где Y_r – значение параметра отклика, вычисленное по регрессионной модели; \bar{Y}_c – среднее значение выхода в центральной точке плана; N – количество экспериментальных точек; d – количество значимых факторов модели; n – количество повторных (параллельных) опытов в центральной точке.

Модель адекватна, если опытное значение критерия Фишера меньше или равно табличному значению F распределения.

Для проведения экспериментальных исследований грунт (средний суглинок и супесь) подготавливается в грунтовом контейнере. Глубина разработки грунта регулировалась высотой слоя грунта в контейнере. Грунт уплотнялся ударной трамбовкой и накатом до требуемой степени плотности, оцениваемой числом ударов динамического плотномера ДорНИИ. Водонасыщение грунта находилось в пределах 0,9, что позволяло



Рис. 3. Измерительно-записывающая аппаратура

получить стабильную прочность грунта в контейнере.

Скорость копания грунтов измерялась контактным способом при помощи датчика, установленного на конструкции приводного механизма ра-

бочего органа. Параметры процесса копания грунта под гидростатическим давлением регистрировались при помощи комплекта тензометрической аппаратуры (рис. 3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Тургумбаев Ж.Ж., Жумаев Ж. Методика экспериментальных исследований процесса подводного копания грунтов // Международная научно-техническая конференция «Инновации в образовании, науке и технике», Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова. Бишкек, 22 июня. 2006. С.116.
2. Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами. М.: Машиностроение, 1971. 357 с.
3. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. М.: Мир, 1992. 381 с.
4. Жумаев Ж. Исследование грунтового фона эксплуатации землеройных машин и физико-механических характеристик грунтов Тюб-Караганского залива Каспийского моря // Вестник КазНТУ. 2005. №6. С.10-13
5. Зеленин А.Н., Карасев Г.Н., Красильников Л.В. Лабораторный практикум по резанию грунтов. М.: Высшая школа, 1969. 310 с.
6. Хартман К., Лецкий Э., Шеффер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: Мир, 1977. 552 с.

УДК 624.131.37

КазАТК

Поступила 02.05.2006 г.