

УДК 624.132.204.1

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ ГРУНТОВ ПОДВОДНЫМИ СТРОИТЕЛЬНЫМИ МАШИНАМИ

Шаталов А.А., Часовщик Ю. Я. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

Выполнено моделирование процесса резания грунтов под гидростатическим давлением до 3 МПа. Установлен механизм взаимодействия рабочего органа машины с массивом породы; спрогнозирована сила сопротивляемости грунта подводному резанию в зависимости от величины гидростатического давления и геометрии разрабатывающего органа.

Ранее лабораторией подводно-технических работ ОИСИ совместно с экспериментальным участком треста «Южгидроспецстрой» разработаны, изготовлены и исследованы опытные образцы подводных землеройных машин: бульдозера и рыхлителя [1,2]. Результаты натурных испытаний подтвердили теоретические посылки на сопротивляемость грунтов резанию под водой на глубине до 15-20 м; предложена оптимальная геометрия рабочих ножей, понижающая энергоемкость процесса резания на 5-10 %.

Дальнейшие исследования работы подводных машин на глубинах шельфовой зоны потребовали применения математического и физического моделирования сопротивляемости грунтов подводному резанию [3,4,5], создания современных лабораторных стендов.

Известные конструкции экспериментальных стендов по исследованию сопротивляемости грунтов резанию позволяют получить данные по резанию грунтов в условиях естественной влажности или при гидростатическом давлении до 1,0 МПа.

Решение поставленных задач в настоящей работе осуществлялось на специальной модернизированной установке, позволяющей ступенчато изменять гидростатическое давление от 0,1 до 3,0 МПа [6].

Моделирование процесса резания грунтов на большой глубине представляется весьма сложной задачей. Практически невозможно в лабораторных условиях создать условия глубоководной среды с ее растительностью и животным миром, с воздействием течений и реакциями на изменения породы.

Главным ограничением при исследовании резания грунтов в гипербарических камерах следует считать то, что объем камеры

несоизмерим с бесконечно большим пространством океана. Это и обуславливает возможность имитации только некоторых параметров глубоководной среды, наиболее существенно влияющих на процесс резания грунтов. Некоторые ограничения в строительстве больших испытательных камер связаны с техническими, а также экономическими соображениями. В настоящее время камеры диаметром порядка 3 м. представляют собой большую редкость. Основные конструктивные особенности гипербарических камер, разработанных исследователями для моделирования условий глубоководной среды, подробно рассмотрены Д. Стэуивом [7].

При испытании подводной техники допускается, что в гипербарической камере невозможно накопить запас энергии, который может быть сопоставимым с энергией океана. Запас потенциальной энергии камеры состоит из энергии, аккумулированной в конечном объеме сжатой жидкости и накопленной в стенках испытательной камеры за счет их упругости. Исходя из этого, замечено, что процесс разрушения образцов в условиях испытательной камеры проходит медленнее, чем при погружении их на соответствующую глубину в океан. Уменьшение влияния указанного фактора возможно при условии увеличения объема испытательной камеры по сравнению с исследуемым образцом. При этом возникают осложнения, связанные с необходимостью поддержания необходимого гидростатического давления, что вызывает повышение производительности обеспечивающего насоса или применения пневмогидравлических аккумуляторов.

Однако любой из указанных способов не исключит нежелательный эффект, а лишь только сможет понизить его влияние. Этим и определяются существенные отличия испытательных процессов в гипербарической камере и в естественных условиях глубоководной среды.

Ввиду того, что целью испытаний подводных грунтов в лабораторных условиях является проверка результатов измерения их свойств, полученных при атмосферном давлении, настройка зондирующих устройств, изучение сил разрушения фунтов при наличии гидростатического давления, испытательные гипербарические камеры в настоящее время представляются совершенно незаменимыми.

В соответствии с задачами исследования процесса подводного резания грунтов, залегающих в пределах континентального шельфа, появилась необходимость создания специальной экспериментальной установки [6.8.10]. При проектировании моделирующей установки

возникли задачи выбора кинематических и динамических параметров процесса, а также определения физико-механических характеристик грунта и жидкой среды. С целью установления в модели этих физических величин проведены исследования условий процесса, определены критерии подобия и условия моделирования [4].

Движущийся рабочий орган в подводных условиях в процессе резания грунта встречает сопротивления жидкой и грунтовой среды. Движение надгрунтовой части рабочего органа можно упрощенно рассматривать, как задачу о поступательном движении твердого тела с постоянной скоростью внутри безграничной массы жидкости. Считая жидкость несжимаемой, в дальнейшем будем учитывать свойства инерции и вязкости жидкости.

Суммарные силы, действующие со стороны грунта и жидкости на рабочий орган, зависят от физико-механических свойств грунта, геометрических и кинематических условий процесса и от возмущенного движения жидкости. В целом сопротивление рабочему органу можно представить как функцию следующих определяющих параметров процесса:

$$P = f(l, c, v, \mu, \alpha, H, \gamma_b, \eta, P_{rg}, g),$$

где l - определяющие линейные размеры, м;

c - сцепление грунта, МПа;

v - линейные скорости рабочего органа, м/с;

γ - объемная масса грунта, кг/м³;

f, μ - коэффициенты внутреннего и внешнего трения;

α - угол, определяющий направление скорости рабочего органа, рад;

H - высота столба жидкости (глубина резания под водой), м;

γ_b - плотность жидкости (масса, приходящаяся на единицу ее объема), кг/м³;

η - коэффициент внутреннего трения жидкости или вязкость (измеряется силой трения, возникающей между двумя слоями с площадью равной единице), кг с/м²;

P_{rg} - гидродинамическое сопротивление жидкости передвижению рабочего органа, Н;

g - ускорение свободного падения, м/с².

Для быстрейшего прогнозирования основных закономерностей процесса резания грунтов в условиях высокого гидростатического давления на ограниченном количестве образцов обратимся к методу математического планирования эксперимента.

На основе идей современной математики и кибернетики он позволяет осуществить новый подход к важнейшему элементу исследования – эксперименту с познанием явлений на эмпирическом уровне, т.е. на уровне накопления и непосредственного обобщения наблюдаемых фактов [3.5]. Из определения эмпирического уровня познания ясно, что на этом уровне решение любой задачи всегда опирается на информацию о конкретной технико-экономической ситуации. Эта информация может быть получена при наблюдении (изучение объекта без вмешательства в его нормальное функционирование) и эксперименте (изучение объекта при целенаправленном воздействии на его параметры), а также при изучении опыта других исследователей и производственного опыта.

Преимущество математического моделирования заключается, главным образом, в том, что число «активных» экспериментов, по сравнению с традиционными методами, сокращается в двадцать раз, причём достоверность информации не только не уменьшается, а увеличивается. Некоторые трудности моделирования исключаются при введении ограничения: должна как можно точнее описывать лишь поведение системы в конкретной ситуации. Тогда можно исходить из принципа максимальной начальной простоты поведения модели, а не искать в каждой задаче специальные математические формы связей между факторами X , и опожкм Y .

В результате анализа априорной информации и предварительно поставленного поискового эксперимента составлена таблица 1, в которой приводятся изменения уровней факторов; в качестве нереманных величии выбраны следующие:

$X_1 = P_{гд}$ - гидростатическое давление; $X_2 = h$ - глубина резания;

$X_3 = \delta$ - угол резания; $X_4 = b$ - ширина среза.

Таблица 1.

Уровни факторов	+1	0	-1
X_1 , МПа	2,0	1.0	0,1
X_2 , мм	5.25	3.5	1,75
X_3 , град	80°	60°	40°
X_4 , мм	42	28	14

Согласно принятым для проведения экспериментов уровням факторов разработан специальный набор тензометрических резцов.

После получения результатов экспериментов проводится расчет средних значений Y_4 по каждой строке, а также определяются суммы по вертикальным столбцам матрицы.

Далее последовательно рассчитываются промежуточные значения ρ_i и коэффициенты регрессии b_i . На следующем этапе проводится определение ошибки воспроизводимости экспериментов S_{ε} , по следующей формуле:

$$S_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{f_{\varepsilon}}}$$

где $\sum \Delta^2$ — сумма квадратов разностей значений отклонений эксперимента по центральным точкам;

$f_{\varepsilon} = n - 1$, где n — количество центральных точек.

Расчет ошибок коэффициентов модели выполняется с учетом ошибки воспроизводимости эксперимента S_{ε} при этом критические значения коэффициентов $b_{кр}$ определяется по формуле:

$$B_{кр} = t * T_i * S_{\varepsilon},$$

где t — величина критерия Стьюдента, с помощью которого при ортогональном планировании определяется доверительный интервал для каждого T_i — того коэффициента регрессии.

В качестве меры адекватности уравнения регрессии принимается так называемая дисперсия адекватности, характеризующая рассеивание результатов экспериментов относительно предсказанных уравнением регрессии для изучаемого участка поверхности отклика объекта.

$$S_{ад} = \frac{SS_M}{f_{ад}}$$

где SS_M — сумма квадратов отклонений средних значений откликов от предсказываемых уравнением регрессии;

$f_{ад}$ — число степеней свободы модели:

$$f_{ад} = N_M - L$$

где N_M — общее количество экспериментальных точек;

L — число коэффициентов, входящих в уравнение регрессии после отбрасывания незначимых коэффициентов.

Проверка статистической гипотезы об однородности оценок двух дисперсий S_{ε}^2 и $S_{ад}^2$ с числом свободы f_{ε} и $f_{ад}$ осуществляется с помощью F - критерия Фишера:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{\varepsilon}^2}$$

В случае, если полученное значение критерия Фишера меньше табличного следует считать, что полиномиальная модель адекватно описывает процесс резания.

Выводы. Высокая стоимость и трудоемкость натурных исследований, необходимых для оптимизации рабочих процессов подводных землеройных машин, свидетельствуют в пользу физического и математического моделирования процесса резания грунтов под гидростатическим давлением.

Обоснована возможность прогнозирования сопротивляемости фунтов подводному резанию по экспериментальным данным, полученным на моделирующей установке.

Усовершенствована методика инженерного расчета силы подводного резания в условиях гидростатического давления, ранее полученная согласно теории статике сыпучей среды [9].

Литература

1. Лобанов В.А., Шаталов А.А., Наместников С.К. Подводный бульдозер. Транспорт, транспортное строительство, 1979, №3, с. 15-17.
2. Лобанов В.А., Шаталов А.А., Наместников С.К. Подводный рыхлитель-планировщик. М., Машиностроение, Строительные и дорожные машины, 1979, № 5, с. 9-10.
3. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М., Статистика, 1974, 192 с.
4. Моисеенко В.Г., Шаталов А.А., Лобанов В.А. Обоснование методики физического моделирования подводного резания грунтов. Новосибирск, Известия вузов, «Строительство и архитектура», 1981, № 12, с. 118-122.
5. Вознесенский В.А., Шаталов А.А. Математическое моделирование процесса резания грунтов под гидростатическим давлением. Севастополь, тез. доклада всесоюзной конференции Океанотехника, 1981, с. 61-62.
6. Шаталов А.А., Моисеенко В.Г., Колин В.М. Стенд для исследования подводного резания грунтов. А.с. №1738936 (СССР), опуб., в БИ № 21, 1992.
7. Освоение глубин океана (сб. материалов). Сокр. перевод с англ., Воениздат, 1971, 320 с.
8. Недорезов Н.А., Шаталов А.А. Модернизированный стенд для исследования подводной разработки грунтов. М., Машиностроение «Строительные и дорожные машины», 1996.
9. Шаталов А.А. К вопросу теоретического обоснования процесса подводного резания грунтов. М., Машиностроение «Строительные и дорожные машины», 1980, № 1, с. 9-10.
10. Шаталов А.А. Модернизация процесса исследования подводной разработки грунтов. Киев, сб. «Гірничні будівельні та меліоративні машини», 2000, № 56, с. 58-60.