

УДК 534.222.2

## ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ СПОСОБ СНИЖЕНИЯ УСИЛИЯ ПРОНИКАНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА В ГРУНТ

В. В. Боровиков, А. В. Быстров

Военная инженерно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197082 Санкт-Петербург

Разработан новый газодинамический способ снижения сопротивления грунтовой среды прониканию твердого тела. Показана физическая суть процесса. Даны теоретические основы масштабного моделирования. Представлены результаты экспериментальных исследований и выделен диапазон параметров, при которых способ эффективен.

Явление проникания тела в грунтовый массив часто рассматривается с позиций использования его в народнохозяйственных целях. Это связано с необходимостью установки свай, опор, прокладывания коммуникаций и пр. Для решения этих задач в настоящее время разработаны специальные технологии и технические средства их осуществления.

С точки зрения физики наиболее существенной особенностью процесса проникания является характер преодоления сопротивления грунтовой среды: динамический или статический. Согласно исследованиям [1] усилие сопротивления при динамическом проникании тела в грунт в общем виде записывается соотношением

$$F = AU^2 + BU + C,$$

где  $U$  — скорость проникания. Первая составляющая сопротивления  $A$ , пропорциональная квадрату скорости проникания, связана с инерционными эффектами в грунтовом массиве и нестационарностью процесса. Вторая составляющая  $B$  определяется вязкостными эффектами среды, а третья составляющая  $C$  представляет собой усилие противодействия среды при статическом проникании тела. Очевидно, что с точки зрения рационального использования энергоресурсов наиболее приемлем режим статического (квазистатического) проникания тела в грунт. Поэтому далее рассматривается именно статический режим.

Настоящая работа посвящена дальнейшему поиску путей снижения усилия лобового сопротивления проникания. Решение этого вопроса связано с использованием ранее разработанного авторами импульсного газодинамического способа перемещения сыпучих материалов за счет подачи в массив серии импульсов из заглубленных источников [2]. Перемещение возможно с образованием в массиве сыпучего материала как воронок выброса, так и камуфлетных полостей. Источники работают в режиме «бегущей волны», а волна перемещения сыпучего вещества направлена в противоположную сторону. В настоящей работе рассматривается режим перемещения с получением камуфлетных полостей.

Принципиальные особенности процесса проникания с газодинамическим снижением усилия механического силового привода показаны на рис. 1. Осесимметричное тело вращения в головной части имеет устройство дозирования газовых импульсов 1, предназначенное для формирования чередующихся газовых импульсов заданной длительности и подачи их к нескольким газовым коллекторам 2. Каждый коллектор имеет серию отверстий 3, расположенных на поверхности головной части 4 тела вращения в одном сечении относительно продольной оси. Импульсная подача газа в коллекторы обеспечивает реализацию газодинамических импульсов из отверстий в прилегающий массив грунта.

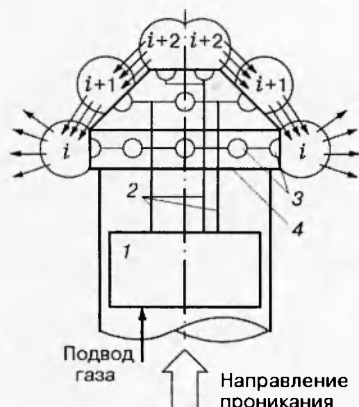


Рис. 1. Кинематика процесса при проникании твердого тела в грунт и газодинамическом смещении грунта с трассы проникания

Физическая суть процесса эволюции фрагментов грунтового массива определяется порядком подачи газовых импульсов. Так, в результате срабатывания  $i$ -го коллектора в окружающем массиве возникает серия камуфлетных полостей, которые сливаются и образуют торовое пространство. Образование каждой полости сопровождается паковкой частиц грунта и смещением их в радиальном направлении относительно продольной оси проникающего тела, т. е. в сторону от трассы проникания. После этого с задержкой по времени производится импульсная подача газа в  $(i + 1)$ -й коллектор. В результате образуется новое торовое пространство, а масса грунта, лежащая между ними, перемещается, заполняя собой предыдущее пространство, образованное газовым импульсом  $i$ -го коллектора. Затем подается импульс из  $(i + 2)$ -го коллектора и т. д. Таким образом, при непрерывном внедрении тела в массив с постоянной скоростью реализуется дополнительный механизм паковки и радиального смещения грунта от трассы проникания.

Экспериментальные исследования проводились при использовании в качестве модельного грунта просушенного кварцевого песка с 1,5 %-й массовой добавкой вакуумного масла [3]. Диаметр головной части тела вращения 0,07 м, число отверстий  $i$ -го и  $(i + 1)$ -го рядов составляло 6,  $(i + 2)$ -го ряда — 3.

В качестве основных факторов, определяющих механику развития процесса, рассматривались следующие безразмерные параметры.

Полная энергия газа в одиночном газодинамическом импульсе из одного отверстия по аналогии с [2] описывается зависимостью

$$\bar{E}_{\Sigma} = \frac{E_{\Sigma}}{(P_{\gamma} + P_a)a^3},$$

где  $a$  — характерное расстояние, которое соответствует расстоянию между рядами источников на головной части проникающего тела (в нашем случае  $a = 0,02$  м);  $E_{\Sigma}$  — полная работа газодинамического выброса с учетом степени расширения газа от зарядного давления газа  $P$  в источнике до давления в окружающем пространстве, определяемого суммой атмосферного  $P_a$  и горного  $P_{\gamma}$  давлений, — вычисляется по формуле

$$E_{\Sigma} = \frac{PV}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_a + P_{\gamma}}{P} \right)^{(k-1)/k} \right].$$

Здесь  $V$  — объем выброшенного в импульсе газа;  $k$  — показатель адиабаты.

Второй определяющий фактор процесса — время задержки до начала срабатывания источников последующего коллектора — устанавливается аналогично [2] зависимостью вида

$$\bar{T}_3 = \frac{T_3}{a} \sqrt{\frac{P_{\gamma} + P_a}{\rho}},$$

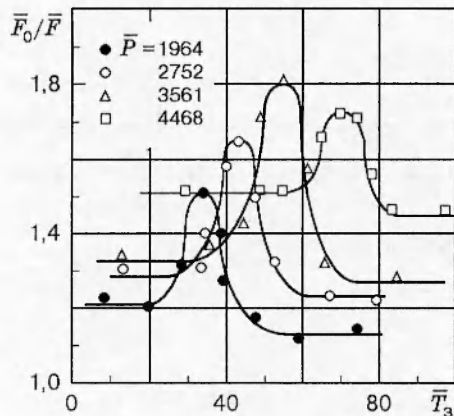


Рис. 2. Зависимость усилия проникания тела в грунт  $F_0/\bar{F}$  от времени задержки между срабатыванием источников газовой энергии  $T_3$  при  $\rho = 1490 \text{ кг/м}^3$ ;  $\bar{I}_d = 0,5$ ;  $\bar{E}_\Sigma = 0 \div 5$

где  $T_3$  — абсолютное значение времени задержки;  $\rho$  — плотность грунта.

Третий определяющий фактор — плотность сложения грунтового массива — изменяется в зависимости от типа грунта и глубины, на которой осуществляется процесс. Согласно [4] его значение определяется индексом плотности сложения:

$$\bar{I}_d = \frac{\rho_{\max}(\rho_i - \rho_{\min})}{\rho_i(\rho_{\max} - \rho_{\min})},$$

где  $\rho_i$ ,  $\rho_{\max}$ ,  $\rho_{\min}$  — текущее, а также максимально и минимально возможные значения плотности грунта.

Скорость проникания тела  $U$  находится из условия, что кинетическая энергия грунта, перемещаемого с трассы выведения, пропорциональна величине  $\rho u^2 a^3$ , где  $u$  — скорость перемещения грунтового массива у поверхности головной части тела. Из отношения кинетической энергии движения к масштабному значению полной энергии газодинамического выброса находим

$$U = u\rho^{0,5}/\sqrt{P_\gamma + P_a}.$$

Усилие проникания определялось отношением его абсолютного значения  $F$  к горному давлению на определенной глубине:  $F = F/P_\gamma$ . Усилие проникания без подачи газа обозначается переменной  $\bar{F}_0$ .

Проявление горного давления моделировалось догрузкой используемого в исследованиях массива кварцевого песка, а также предварительной укладкой его с заданной плотностью сложения, которая задавалась послойной (по 0,04 м) насыпкой и нагружением песка штампом заданной массы.

Диапазон изменения полной энергии газодинамического выброса из одного отверстия в головной части составлял  $E_\Sigma = 0,2 \div 4,1$  Дж; время задержки до начала срабатывания последующих источников  $T_3 = 0,03 \div 0,23$  с; индекс плотности сложения грунта  $\bar{I}_d = 0 \div 0,86$  при абсолютном значении плотности массива кварцевого песка  $\rho = 1350 \div 1600 \text{ кг/м}^3$ ; скорость проникания тела  $u = 0,005 \div 0,006 \text{ м/с}$ .

Результаты экспериментальных исследований процесса показывают, что существует ярко выраженный довольно узкий диапазон параметров, сочетание которых обеспечивает существенное (примерно в 1,7–1,8 раза) снижение усилия проникания. Характерные графики изменения усилия проникания в зависимости от времени задержки при нескольких значениях зарядного давления  $\bar{P}$  приведены на рис. 2. Полная энергия выброшенного в импульсе газа задавалась длительностью открывания  $i$ -го коллектора в отсечном устройстве. На графиках видно, что этот эффект снижения усилия проникания наиболее ярко проявляется в случае, когда реализуется режим перемещения массива с возникновением камуфлетных полостей.

При малой энергии газодинамических выбросов перемещения массива не происходит, а незначительная подача газа из головной части обуславливает режим псевдооживления массива. Это несколько снижает усилие проникания. Повышение интенсивности подачи газа связано с ростом камуфлетных полостей, которые при определенном расстоянии между источниками обеспечивают эволюцию массива. Усилие проникания при этом существенно снижается. При дальнейшем повышении количества подаваемого газа размеры камуфлетных полостей увеличиваются настолько, что газовые источники соседних газовых коллекторов оказываются в пределах этих полостей. Последующее срабатывание данных источников обуславливает выброс газа внутрь предыдущих камуфлетных полостей, что не вызывает смещения массива. Усилие проникания при этом возрастает. Однако данное усилие несколько слабее усилия, соответствующего меньшему количеству подаваемого газа. Это объясняется более высокой интенсивностью проявления псевдооживления.

Необходимо отметить следующую физическую особенность процесса. При проникании тела с подачей газа из головной части сопротивление прониканию оказывают как эффективные, так и нейтральные напряжения в массиве [5]. Эффективные напряжения обусловлены противодействием собственно грунтового массива как совокупности недеформируемых частиц, а нейтральные — давлением порового газа. Поэтому импульсная подача газа из головной части проникающего тела (в частном случае проводимого эксперимента из отверстий  $(i + 2)$ -го коллектора) вызывает некоторое импульсное повышение противодействия окружающей среды на шток механического привода. Доля этого усилия не превышает 5 %.

Анализ графиков и количественных результатов, полученных на ЭВМ с применением метода наименьших квадратов, позволил установить эмпирическую зависимость, которая с точностью до 20 % согласуется с экспериментом:

$$\frac{\bar{F}_0}{\bar{F}} = 0,9 \frac{(1 + 0,01 \bar{E}_\Sigma)^{1,5}}{(1 + 0,01 \bar{E}_\Sigma^{1,5}) \exp(0,8 I_d \ln I_d)} [1 + \bar{T}_z^{0,01} \exp(-0,1 T_z^{0,01})].$$

Разработанный газодинамический способ позволяет существенно снизить статическую составляющую усилия проникания тел в грунтовой массив. Полученные результаты могут использоваться при разработке технических устройств для реализации соответствующих технологий, а также при выборе режимов функционирования этих устройств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сагомоян А. Я. Проникание. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1974.
2. Боровиков В. В., Иванов А. С., Пивак Б. А. Импульсный газодинамический способ транспортирования сыпучих материалов // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1995. № 3. С. 44–52.
3. Блинов И. М., Вахрамеев Ю. С. Способ моделирования крупных взрывов на выброс микровзрывами ВВ // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 2. С. 102–109.
4. Иванов П. Л. Уплотнение малосвязных грунтов взрывами. М.: Недра, 1983.
5. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978.

Поступила в редакцию 23/VI 1997 г.