

УДК 532.5

## ИМПУЛЬСНО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ИХ МЕСТО В ИССЛЕДОВАНИИ ВЗРЫВА НА ВЫБРОС

ИЛЬИНСКИЙ Н. Б., ПОТАШЕВ А. В.

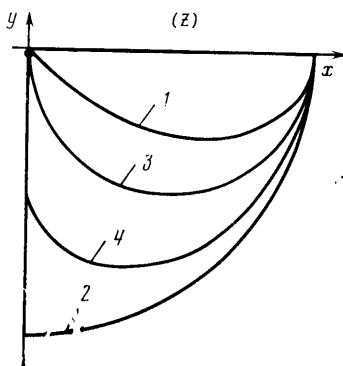
Существуют различные подходы к исследованию взрыва на выброс. Один из них состоит в обобщении опыта применения взрыва и экспериментальных данных и в построении на этой основе эмпирических формул (см., например, [1]). Получающиеся при этом формулы в основном позволяют рассчитывать взрывы на выброс в однородном полупространстве.

Другой подход заключается в создании математических моделей, описывающих основные процессы, происходящие при взрыве [2, 3]. При этом появляется возможность изучения влияния отдельных факторов на действие взрыва, но исследование сводится к решению сложных математических задач, требующих самых современных ЭВМ. Вследствие этого применимость таких моделей ограничена и используют их лишь для расчета единичных взрывов.

К числу сравнительно простых моделей, позволяющих оценивать влияние ряда факторов (таких, например, как геометрия области, в которой происходит взрыв, геометрия заряда или наличие неоднородностей в среде) на конечный результат, относятся импульсно-гидродинамические модели взрыва на выброс.

В настоящей работе на основе изучения имеющихся теоретических решений задач взрыва на выброс и сопоставления этих решений с экспериментальными данными делается попытка установить рамки применимости импульсно-гидродинамических моделей и вообще указать их место в исследовании задач взрыва на выброс.

**1. Импульсно-гидродинамические модели взрыва.** Суть рассматриваемых моделей заключается в использовании модели идеальной несжимаемой жидкости и импульсной постановки задач гидромеханики [4]. Существуют различные импульсно-гидродинамические модели взрыва на выброс. Одна из первых моделей, предложенная О. Е. Власовым [5], получила впоследствии название «жидкостной модели». Согласно этой модели считается, что под действием взрыва вся среда ведет себя как идеальная несжимаемая жидкость, а край выемки определяется как точка на свободной поверхности, в которой скорость  $v$  равна некоторому критическому значению  $v_*$ , называемому критической скоростью. Однако при этом остается открытым вопрос о том, как отыскивать всю границу выемки выброса. О. Е. Власовым [5, с. 128] в качестве такой границы было предложено считать линию, в каждой точке которой вектор скорости направлен в край выемки выброса. На фиг. 1 изображена правая половина границы выемки выброса, получающаяся при использовании такого подхода к исследованию взрыва поверхностного шнурового заряда (кривая 1).

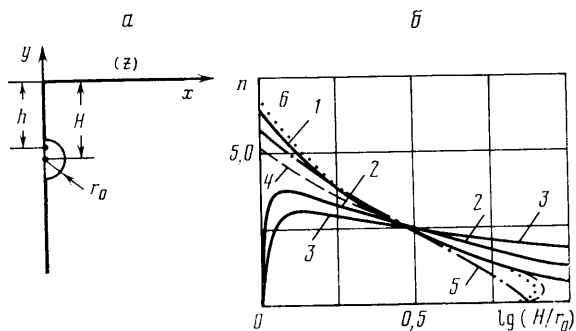


Фиг. 1

Имеются и другие подходы к отысканию границы выемки по жидкостной модели. Так, в ряде работ (например, [6]) предлагается отыскивать ее как линию, вдоль которой  $v=v_*$  (кривая 2). В то же время из

эксперимента известно, что граница выемки является поверхностью скольжения. Поэтому рядом авторов (например, [7]) предлагается отыскивать ее как линию тока, проходящую через край выемки (кривая 3).

М. А. Лаврентьевым была предложена струйная модель, получившая позднее название твердожидкостной модели. Суть ее в следующем. Среду, находящуюся под действием взрыва, следует считать идеальной несжимаемой жидкостью не во всей области, занятой грунтом, а лишь в некоторой ее части, расположенной вблизи ряда. На больших же расстояниях от заряда среда в движение не приходит, поэтому ее можно считать аб-



Фиг. 2

солютно твердым телом. Исходя из этого, в рамках твердожидкостной модели было предложено отыскивать границу выемки выброса как линию тока, вдоль которой  $v=v_*$  (кривая 4).

**2. Об определении характеристики среды и заряда в рамках импульсно-гидродинамических моделей.** В перечисленных выше моделях прочностной характеристикой среды является критическая скорость  $v_*$ . Согласно способу определения этой характеристики, приведенному в работе [8, с. 244, 249], считается, что разрушение происходит тогда, когда удельная кинетическая энергия частиц среды  $e=\rho v^2/2$  превышает предельную удельную энергию  $e_*=\sigma_*^2/2E$ , необходимую для разрушения среды ( $\sigma_*$  — предел текучести,  $E$  — модуль Юнга). Тогда из условия  $e=e_*$  величину  $v_*$  можно найти по формуле  $v_*=\sigma_*/\sqrt{\rho E}$ .

Изучим теперь вопрос о том, что является характеристикой взрывчатого вещества и самого заряда в рамках импульсно-гидродинамических моделей. Для этого рассмотрим задачу о взрыве шнурового заряда радиуса  $r_0$ , центр которого расположен на глубине  $H$  от поверхности грунта (фиг. 2, а). Значение потенциала на всей его поверхности можно считать постоянным ( $\varphi=-\varphi_0$ ) [5, с. 88].

Представив комплексный потенциал течения при  $H>r_0$  в виде [9]

$$w(z)=(q/2\pi)\ln[(z+ih)/(z-ih)] \quad (2.1)$$

$$h=\sqrt{H^2-r_0^2}, \quad q=2\pi\varphi_0/C, \quad C=\ln[(H+h)/r_0] \quad (2.2)$$

получим, что действие заглубленного шнурового заряда можно моделировать действием источника и стока мощности  $q$ , расположенных в точках  $z=-ih$  и  $z=ih$  соответственно. Зная значения  $\varphi_0$  и  $q$ , найдем также величину кинетической энергии  $W=\rho\varphi_0q/2$ , полученной средой при взрыве.

Таким образом, имеются три величины:  $\varphi_0$ ,  $q$  и  $W$ , которые характеризуют данный заряд, расположенный на заданной глубине. Возникает вопрос, какая из этих величин будет оставаться неизменной при изменении расположения заряда, т. е. при изменении величины  $H$ .

Сразу можно сказать, что величину  $q$  постоянной считать нельзя, так как при  $q = \text{const}$  и  $H \rightarrow r_0$ , т. е.  $h \rightarrow 0$ , из (2.1) следует, что при взрыве заряда, центр которого заглублен на величину радиуса, течение в среде не возникает, так как во всей области  $w(z) \equiv 0$ , что противоречит эксперименту.

Для того чтобы выяснить, какую из величин  $\varphi_0$  или  $W$  можно считать не зависящей от  $H$ , в работе [9] были проведены исследования, суть которых состоит в следующем. Если построить распределение скорости по свободной поверхности и найти точку, где  $v = v_*$ , то получим зависимости

$$n^2 = (2h\varphi_0/v_*C - h^2)/H^2 \quad (\varphi_0 = \text{const}) \quad (2.3)$$

$$n^2 = (2h\sqrt{W/\pi\rho C/v_* - h^2})/H^2 \quad (W = \text{const}) \quad (2.4)$$

где  $n = R/H$  — показатель действия взрыва,  $R$  — полуширина выемки выброса.

На фиг. 2, б приведены зависимости  $n = f(H/r_0)$ , построенные по формулам (2.3) (кривая 1) и (2.4) (кривая 2), а также зависимость, соответствующая случаю  $q = \text{const}$  (кривая 3). Для сравнения также построены зависимости  $n = f(H/r_0)$ , полученные из эмпирических формул

$$Q = K_i H^2 f_i(n), \quad Q = \pi r_0^2 \rho_0$$

$$f_1(n) = \frac{(1+n^2)^2}{3n+1}, \quad f_2(n) = \frac{1+n^2}{1-0,1n}, \quad f_3(n) = \frac{0,4+0,6n^3}{n+1}$$

где  $Q$  — удельный расход,  $\rho_0$  — плотность взрывчатого вещества; формулы для функций  $f_i(n)$ ,  $i=1-3$ , взяты из работ [10, 11, 1] соответственно. Значениям  $i=1-3$  соответствуют кривые 4-6.

Из рассмотрения этих кривых видно, что в качестве неизменной характеристики заряда правильнее считать величину  $\varphi_0$ , а не значение  $W$ , как это делалось ранее в ряде работ [5, 12, 13], при этом величины  $q$  и  $h$  следует определять по формулам (2.2). Кроме того, можно показать, что величина  $\varphi_0$  прямо пропорциональна радиусу  $r_0$  заряда ( $\varphi_0 = \alpha r_0$ ), т. е. за характеристику взрывчатого вещества в импульсно-гидродинамических моделях можно принимать величину  $\beta = \alpha \rho$ .

Определим теперь  $\varphi_0$ . На поверхности заряда имеем  $\varphi_0 = \left( \int_0^\tau p dt \right) / \rho$ .

Для практических оценок можно пользоваться приближенным выражением [4]  $\varphi_0 = p_1 \tau / \rho$ , где  $p_1$  — среднее давление, в качестве которого можно взять половину начального давления продуктов детонации [14], определяемого по формуле [15]  $p_0 = \rho_0 D^2 / (k+1)$  ( $D$  — скорость детонации,  $k$  — показатель изоэнтропы, причем для большинства конденсированных взрывчатых веществ  $k \approx 3$ ). Если теперь принять  $\tau = r_0 / D$ , то получим  $\varphi_0 = \rho_0 D r_0 / 2(k+1)\rho$  или  $\beta = \rho_0 D / 2(k+1)$ .

В ряде случаев, например при исследовании влияния на размеры выемки выброса размеров заряда, геометрии области, наличия неоднородности в среде и т. д., обязательно находить конкретные значения  $v_*$  и  $\varphi_0$ . Достаточно знать лишь безразмерную величину  $v_*' = v_* r_0 / \varphi_0 = v_* \rho / \beta$ .

Значение  $v_*'$  можно определить, проведя серию экспериментов по взрыву в полупространстве. Тогда, зная  $Q$  и  $\rho_0$ , найдем  $r_0 = \sqrt[3]{Q/\pi\rho_0}$ . Затем по  $H$  и соответствующему значению  $n$ , полученному в эксперименте, из формул (2.2) и (2.3) определим

$$v_*' = C [n^2 + 1 - (r_0/H)^2] / [2\sqrt{1 - (r_0/H)^2} (r_0/H)]$$

Далее нетрудно исследовать, как будут меняться параметры выемки при взрыве заряда из того же взрывчатого вещества в том же грунте при других значениях  $H$ ,  $r_0$  или при наличии непробиваемого дна и т. п.

Такой подход был применен при сопоставлении теоретических и экспериментальных данных для случая взрыва сосредоточенного заряда в однородном полупространстве [16]. Для этого предварительно были получены формулы для определения величины

$$n = \begin{cases} M[4\pi\varphi_0 r_0^2 (v_*')^{1/2}]^{-1}, & H=r_0 \\ [(qh'/2\pi\varphi_0 r_0 v_*')^{1/2} - h'^2]^{1/2}/H', & H>r_0 \end{cases}$$

$$M=4\cdot 5^{2/3}\pi\varphi_0 r_0^2, \quad h=(H^3-r_0^3)^{1/3}, \quad q=2\pi\varphi_0(aH+bh)r_0/(H+h-r_0),$$

$$a=5^{1/3}, \quad b=4-a, \quad h'=h/r_0, \quad H'=H/r_0,$$

где  $M$  — момент диполя, моделирующего поверхностный заряд,  $h$  — глубина заложения источника, моделирующего заглубленный заряд,  $q$  — мощность источника.

Сопоставление теоретических результатов с экспериментальными [17] приведено ниже, где  $n_1$  — значение  $n$ , найденное из эксперимента;  $n_0$  — теоретическое значение  $n$ ;  $\delta=(n_1/n_0-1)\cdot 100\%$ ,  $v_*'=1,978\cdot 10^{-4}$ :

$H/r_0$	1,00	1,92	2,89	4,35	8,21	12,07	15,96	19,82	23,66
$n_1$	26,76	15,26	10,97	7,99	5,40	4,10	3,31	2,78	2,39
$n_0$	24,54	15,33	11,28	8,39	5,33	4,05	3,30	2,81	2,45
$\delta, \%$	9,03	-0,42	-2,77	-4,70	1,16	1,38	0,46	-1,00	-2,21

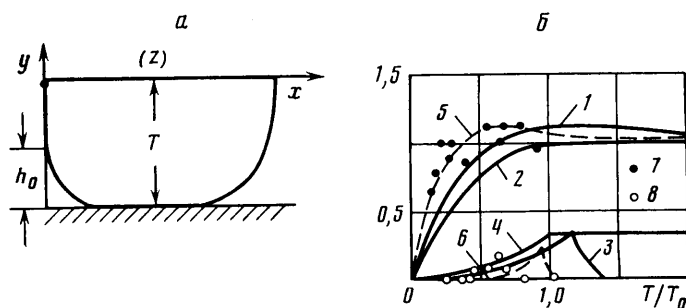
Из сопоставления результатов видно, что теоретические и экспериментальные значения и в случае сосредоточенного заряда находятся в хорошем соответствии друг с другом.

Таким образом, проведенные исследования дают право сделать вывод о возможности применения импульсно-гидродинамических моделей к изучению ряда задач взрыва на выброс.

**3. О применимости импульсно-гидродинамических моделей.** В рамках рассматриваемых моделей решено большое количество задач [8]. Для того чтобы исследовать вопрос о применимости этих моделей, остановимся кратко на результатах исследования трех классов задач взрыва на выброс.

К первому классу относятся задачи о взрыве в слое, подстилаемом непробиваемым дном [13, 18, 19]. Для примера рассмотрим задачу о взрыве шнуrowого заряда, моделируемого диполем с моментом  $M$ , на поверхности слоя толщины  $T$ . Требуется определить границу выемки выброса, если критическая скорость среды равна  $v_*$  (на фиг. 3, *a* изображена правая половина выемки, соответствующей твердожидкостной модели).

На фиг. 3, *б* построены зависимости, показывающие, как меняется величина  $R/R_0$  при изменении  $T/T_0$ , где  $R_0$  и  $T_0$  — полуширина и глубина выемки выброса при отсутствии дна (кривая 1 соответствует жидкостной модели, а кривая 2 — твердожидкостной). В случае жидкостной модели граница выемки строилась как линия  $v=v_*$ . Кривые 3 и 4 показывают



Фиг. 3

как ведет себя величина  $h_0/T_0$  при изменении  $T/T_0$  ( $h_0$  — высота центральной горки (см. фиг. 3, а)) по жидкостной и твердожидкостной моделям.

Из сравнения приведенных результатов видно, что при  $T < T_0$  величины  $R/R_0$  и  $h_0/T_0$  с ростом  $T$  увеличиваются по обеим моделям, причем максимальное отличие величин не превышает 15%. Однако при  $T > T_0$  величины, получающиеся по твердожидкостной модели, перестают изменяться. В то же время, согласно жидкостной модели, наличие дна влияет на размеры выемки даже в том случае, когда оно целиком расположено вне выемки выброса.

Для того чтобы выяснить, какая из моделей лучше согласуется с экспериментом при  $T > T_0$ , приведем результаты сопоставления теории и эксперимента в случае взрыва сосредоточенного заряда [19].

На фиг. 3, б приведены зависимости  $R/R_0 = f(T/T_0)$  (кривая 5) и  $h_0/T_0 = f(T/T_0)$  (кривая 6), полученные по жидкостной модели, а также экспериментальные данные (точки 7 соответствуют значениям  $R/R_0$ , точки 8 — значениям  $h_0/T_0$ ). Из сравнения приведенных результатов видно, что жидкостная модель находится в хорошем соответствии с экспериментом. Этот факт говорит о том, что она позволяет учитывать свойства той части среды, которая расположена вне выемки выброса, чего не позволяет твердожидкостная модель.

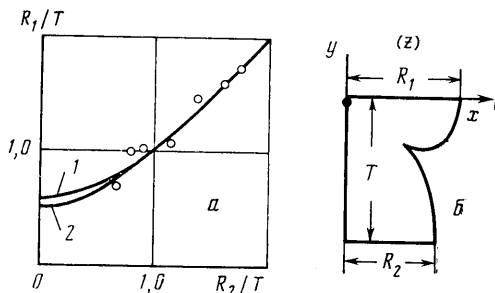
Другим классом задач, который позволяют исследовать импульсно-гидродинамические модели, являются задачи о пробивании преград [18, 20, 21].

На фиг. 4, а приведены результаты сопоставления теоретических и экспериментальных данных, получающихся при исследовании задачи о пробивании преграды поверхностным шнуровым зарядом (кривая 1 соответствует жидкостной модели, кривая 2 — твердожидкостной, точки — экспериментальным данным). Здесь  $R_1$  — полуширина пробоины сверху,  $R_2$  — полуширина пробоины снизу,  $T$  — толщина преграды (см. фиг. 4, б). Как видно, в случае задачи о пробивании преграды также наблюдается хорошее соответствие теории и эксперимента.

В качестве третьего класса рассмотрим задачи взрыва в слоистых средах, которые решены в ряде работ [22, 23]. Как показали проведенные исследования, выемки выброса, получающиеся с использованием твердожидкостной модели, качественно соответствуют экспериментальным выемкам: при более прочном нижнем слое (фиг. 5, а) как у теоретических, так и у экспериментальных выемок явно прослеживается участок на линии раздела слоев, величина которого при заглублинии заряда уменьшается; при более прочном верхнем слое (фиг. 5, б) наблюдаются выемки, ширина которых по свободной поверхности меньше ширины в нижнем слое.

Таким образом, к исследованию влияния слоистости среды на размеры и форму выемки выброса можно применять импульсно-гидродинамические модели, однако следует иметь в виду, что жидкостная модель позволяет учитывать лишь неоднородность по плотности, так как решение задачи по этой модели не зависит от величин критических скоростей нижних слоев.

Кроме перечисленных выше задач импульсно-гидродинамические модели позволяют исследовать также задачи о взаимодействии зарядов [24, 25], о взрыве зарядов переменного сечения [26], о взрыве в анизотропной среде [27] и др. При этом следует отметить, что исследование взаимо-

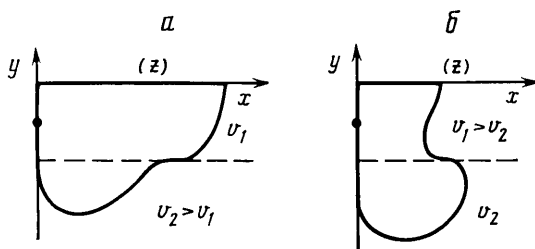


Фиг. 4

действия зарядов показало [25] возможность образования внутри выемки областей неразрушенного грунта, наличие которых наблюдается и в эксперименте.

Подводя итог изложенному выше, можно сделать следующие выводы.

Результаты, получающиеся с использованием различных импульсно-гидродинамических моделей, во многих случаях достаточно хорошо согласуются как между собой, так и с экспериментальными данными. Поэтому их можно использовать для качественного исследования влияния на ко-



Фиг. 5

нечный результат действия взрыва таких факторов, как геометрия области, где происходит взрыв, геометрия заряда, наличие взаимодействующих зарядов, неоднородность среды и другие. Причем при надлежащей параметризации можно получить не только качественные, но и количественные оценки.

При использовании различных импульсно-гидродинамических моделей следует учитывать, что области их применимости не полностью совпадают. Например, жидкостная модель позволяет учитывать влияние особенностей формы области, которые находятся не только внутри, но и вне выемки выброса, чего не допускает твердожидкостная модель и различные ее модификации. В то же время твердожидкостная модель дает возможность учитывать прочностную неоднородность среды, которую в рамках жидкостной модели учесть не удастся.

При использовании импульсно-гидродинамических моделей также следует учитывать тот факт, что они не позволяют учитывать влияние силы тяжести. Поэтому применять их следует в основном для оценки действия слабых или средних взрывов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технические правила ведения взрывных работ на дневной поверхности. М.: Недра, 1972. 240 с.
2. Броуд Г. Расчеты взрывов на ЭВМ. Подземные взрывы. М.: Мир, 1975. 163 с.
3. Действие ядерного взрыва. М.: Мир, 1971. 312 с.
4. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1973. 416 с.
5. Власов О. Е. Основы теории действия взрыва. М.: ВИА, 1957. 408 с.
6. Лаврик В. И., Лучко И. А. Гидродинамическое решение задачи о действии взрыва спаренных заглубленных зарядов.— В кн.: Аналитические методы в теории фильтрации и теплопроводности. Киев: Ин-т математики АН УССР, 1973, с. 45–53.
7. Кушнарев Д. М. Использование энергии взрыва в строительстве. М.: Стройиздат, 1973. 288 с.
8. Кузнецов В. М. Математические модели взрывного дела. Новосибирск: Наука, 1977. 264 с.
9. Ильинский Н. Б., Поташев А. В. О математическом моделировании энергетической характеристики заряда в импульсно-гидродинамических моделях взрыва на выброс.— Физ.-техн. пробл. разработки полезн. ископаемых, 1982. № 1, с. 41–50.
10. Кутузов Б. Н., Рубцов В. К., Валухин Ю. К., Страусман Р. Я. Проектирование взрывов. М.: Московск. горный ин-т, 1973. 112 с.
11. Азаркович А. Е., Яновский В. Н., Криворучко Р. А., Глушков М. Л. Экспериментальное исследование действия линейных зарядов выброса.— Горный журн., 1976, № 11, с. 31–35.

12. Кузнецов В. М. Гидродинамические модели взрыва в грунте.— В кн.: Некоторые проблемы математики и механики. Л.: Наука, 1970, с. 171—181.
13. Кузнецов В. М., Поляк Э. Б. Импульсно-гидродинамические схемы расчета взрыва на выброс шнуровых зарядов.— Физ.-техн. пробл. разработки полезн. ископаемых, 1973, № 4, с. 32—40.
14. Друкованый М. Ф., Комир В. М., Кузнецов В. М. Действие взрыва в горных породах. Киев: Наук. думка, 1973. 184 с.
15. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П., Челышев В. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. М.: Наука, 1975. 704 с.
16. Краснов В. К., Поташев А. В. О моделировании сферического заряда гидродинамическим источником или диполем при расчете взрыва на выброс.— Физ.-техн. пробл. разработки полезн. ископаемых, 1984, № 1, с. 20—24.
17. Обербек В. Р. Лабораторное моделирование ударного кратерообразования при помощи взрывчатых веществ.— В кн.: Механика образования воронок при ударе и взрыве. М.: Мир, 1977, с. 33—61.
18. Ильинский Н. Б., Поташев А. В., Рубиновский А. В., Фищенко П. А. Решение некоторых задач теории взрыва в импульсно-гидродинамической постановке.— В кн.: Тр. семинара по краевым задачам. Вып. 14. Казань: Казанск. ун-т, 1977, с. 98—109.
19. Иванов Б. А., Фищенко П. А. Влияние твердого дна на выемку выброса при взрыве сосредоточенного поверхностного заряда. НИИ мат. и мех. при ун-те. Казань, 1982, 13 с. Рукопись деп. в ВИНТИ 4.04.83, № 1154-83 Деп.
20. Кузнецов В. М. О взрыве на поверхности пластинки.— ПМТФ, 1962, № 3, с. 40—43.
21. Рубиновский А. В. О взаимодействии зарядов на поверхности преграды в струйной гидродинамической модели.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1980, № 6, с. 160—164.
22. Поляк Э. Б., Шер Е. Н. О форме воронки выброса при взрыве шнурового заряда в двухслойной среде.— ПМТФ, 1973, № 2, с. 143—146.
23. Ильинский Н. Б., Поташев А. В. Об импульсно-гидродинамических моделях взрыва на выброс в слоистых средах.— В кн.: Тр. семинара по краев. задачам. Вып. 16. Казань: Казанск. ун-т, 1979, с. 81—88.
24. Кузнецов В. М., Поляк Э. Б., Шер Е. Н. О гидродинамическом взаимодействии шнуровых зарядов ВВ.— ПМТФ, 1975, № 5, с. 93—101.
25. Ильинский Н. Б., Якимов Н. Д. О взаимодействии двух плоских шнуровых зарядов при взрыве на поверхности грунта.— ПМТФ, 1977, № 1, с. 147—151.
26. Ильинский Н. Б., Салимов Р. Б. Задача о взрыве поверхностного заряда переменной толщины.— Тр. Семинара по краев. задачам. Вып. 12. Казань: Казанск. ун-т, 1975, с. 76—83.
27. Ильинский Н. Б., Поташев А. В. Расчет выемок выброса, образующихся при взрыве в анизотропной среде.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1983, № 2, с. 3—9.

Казань

Поступила в редакцию:  
26.VI.1983г.