МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Алексей Михайлович БУБЕНЧИКОВ[1]
Евгений Борисович БРАЗОВСКИЙ[2]
Никита Сергеевич КОНЬКОВ[3]

УДК 51-7

ФОРМА ВОРОНКИ ОТ ВЗРЫВА ЗАРЯДА В ПЛАНЕ ИМЕЮЩЕГО КОНФИГУРАЦИЮ ПРЯМОУГОЛЬНИКА*

[1] доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
Региональный научно-образовательный математический центр,
Национальный исследовательский Томский государственный университет
bubenchicov_am@mail.ru

[2] аспирант, кафедра теоретической механики,
механико-математический факультет,
Национальный исследовательский Томский государственный университет;
ведущий инженер,
Инженерно-технический центр ООО «Газпром трансгаз Томск»
kondraten.kondraten@mail.ru

[3] доцент, Научно-образовательный центр И. Н. Бутакова,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет;
заместитель директора,
Инженерно-технический центр ООО «Газпром трансгаз Томск»
n.s.konkov@gmail.com

* Работа выполнена при поддержке Эндаумент-фонда ТГУ (Национальный исследовательский Томский государственный университет)

© ФГАОУ ВО Тюменский государственный университет

Цитирование: Бубенчиков А. М. Форма воронки от взрыва заряда в плане имеющего конфигурацию прямоугольника / А. М. Бубенчиков, Е. Б. Бразовский, Н. С. Коньков // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2022. Том 8. № 3 (31). С. 126-139.
DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-3-126-139

Аннотация

В данной работе с использованием твердо — жидкостной модели грунта, методов и положений теории потенциальных течений, а также аппарата аналитических функций построено аналитическое решение задачи о выбросе грунта при взрыве заряда, расположенного на поверхности для случая, когда этот заряд в плане имеет форму прямоугольника, у которого длина намного превышает его ширину. Отличительной особенностью полученного решения является то что в рамках сформированной математической модели оно является точным, имеет конечную форму и выражено в элементарных функциях.

Ключевые слова

Гидродинамика, воронка выброса, комплексные переменные, горизонтально расположенный заряд, поверхностный заряд, идеальная жидкость, теория струй, проходка траншей.

DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-3-126-139

Введение

Данная работа является продолжением двух работ, ранее опубликованных авторами по этой тематике в которых найдены новые решения задач о выбросе грунта при взрыве заглубленного горизонтально расположенного прямого шнурового заряда [1], а также в случае вертикально расположенного заглубленного заряда прямоугольной формы длина которого намного превышает его высоту [2].

Мы исходим из того, что специалисты по гидродинамике, интересующиеся вопросами конформных отображений, воспользуются ссылками на недавно опубликованные наши статьи в части введения в тему исследования [1, 2]. Поэтому на вопросах важности решаемых нами задач остановимся совсем кратко. Задача определения формы воронки оставляемой взрывом имеет важное значение при разработке грунтов природного залегания методом взрыва в хозяйственной государственной деятельности.

Еще в 1946 г. М. А. Лаврентьевым была предложена оригинальная гидродинамическая трактовка явления кумуляции, в соответствии с которой при огромных давлениях, возникающих в момент взрыва, металл можно рассматривать как идеальную несжимаемую жидкость; после этого, используя уравнения гидродинамики, можно было рассчитать динамику струи металла и вычислить пробивной эффект. За работы в области кумуляции Лаврентьев был

в 1949 г. удостоен Сталинской премии. В 1960-х гг. эта теория была предложена им для грунтов природного залегания [6].

Суть гидродинамической модели состоит в следующем. В определенной окрестности расположения заряда взрыв формирует колоссальные деформации, существенно превышающие предельные деформации текучести материала. Поэтому в этой зоне, грунт ведет себя как идеальная несжимаемая жидкость. На некотором удалении от источника это превышение сходит на нет. Точки где это происходит образуют некоторую поверхность, которую и называют границей воронки взрыва или формой воронки. По другую сторону от границы воронки грунт не разрушается в силу того, что импульс, который доходит до этих точек затухает и становится меньше сил, удерживающих элементы породы в неподвижном состоянии.

Для расчетов формы воронок с неизвестной границей от взрыва широко и успешно используют математический аппарат теории аналитических функций и потенциальных течений, применяя методы аналогичные тем что используют для решения задач о течении идеальной жидкости со свободной границей [4, 7, 8], многократно использованной в теории фильтрации и классической гидродинамике.

От расчетных границ, фактические контуры воронки отличаются более пологой формой. Привести в соответствие с практикой длину воронки можно правильно подобрав параметр (c), характеризующий свойства разрабатываемого грунта.

В эпицентре взрыва грунт ведет себя как сжимаемая среда и даже как плазма. Однако учет этих качеств вряд ли изменит теоретически найденную форму воронки. Упомянутый выше параметр (c) является единственной характеристикой грунта представленной в математической модели. Минимизируя количество параметров задачи мы существенно упрощаем ее математическое описание. Это дает возможность построить ее аналитическое решение в замкнутой форме.

Целью данной научной работы является:

1) определение формы воронки от взрыва плоского заряда, расположенного на поверхности и в плане имеющего конфигурацию прямоугольника у которого длина намного превышает ширину;

2) построение графиков границ воронки взрыва, линий тока и линий равного потенциала при помощи составленной программы, интерпретирующей построенное аналитическое решение.

Методы

При проводимых научных исследованиях в рамках импульсно — гидродинамической постановки задачи для твердо-жидкостной модели взрыва были использованы аппарат и методы аналитических функций, положения Теории Струй и Теории Функций Комплексного Переменного, методы Конформного Отображения, аппарат Теории Потенциальных Течений и Теории Аналитических Функций.

Результаты исследования и их обсуждение

Постановка задачи

Рассматривается задача в твердо-жидкостной импульсной постановке о взрыве поверхностного заряда. Заряд действует как равномерно распределенные по поверхности грунта источники, с интенсивностью φ_0. В плане вся совокупность распределения этих источников представляет собой прямоугольник, ширина которого равна удвоенному расстоянию AB. Это изображено на рис. 1.

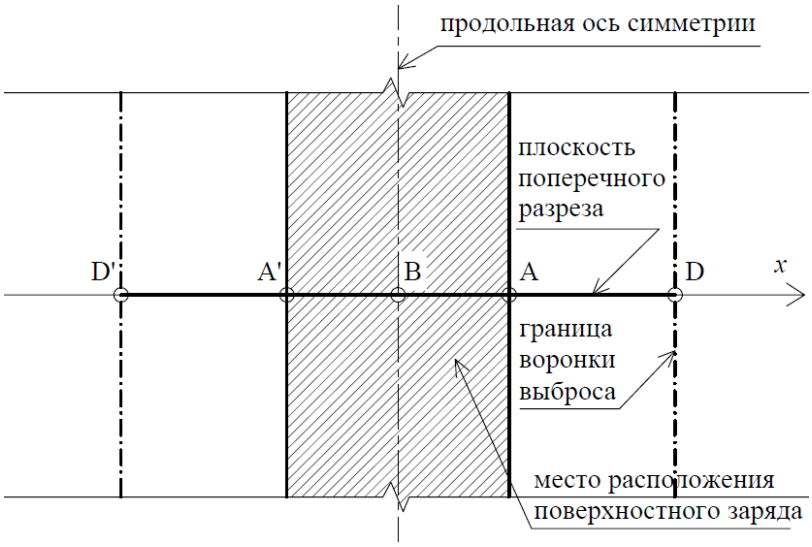

Рис. 1. Схема расположения поверхностного заряда в плане (вид сверху)

Fig. 1. The layout of the surface charge in the plan (top view)

В процессе решения настоящей задачи нам необходимо определить границу воронки выброса. Этой границей будет линия тока при условии, что $v = c$. На рис. 1 граница воронки выброса на поверхности обозначена пунктиром.

На рис. 2 показана геометрия области течения, изображенная в плоскости поперечного разреза, перпендикулярного длине заряда, т. е. по ширине заряда. Поскольку наша схема является симметричной, то рассматриваем только правую часть плоскости поперечного разреза.

Начнем с того, что комплексный потенциал течения представляется в следующем виде:

$$w(z) = \varphi(x, y) + i\psi(x, y)\,.$$

Тогда скорость, исходя из теории аналитических функций будет выглядеть как производная от потенциала:

$$\frac{dw}{dz} = \frac{\partial\varphi}{\partial x} + i\frac{\partial\psi}{\partial x} = \frac{\partial\varphi}{\partial x} - i\frac{\partial\varphi}{\partial y} = u - iv\,.$$

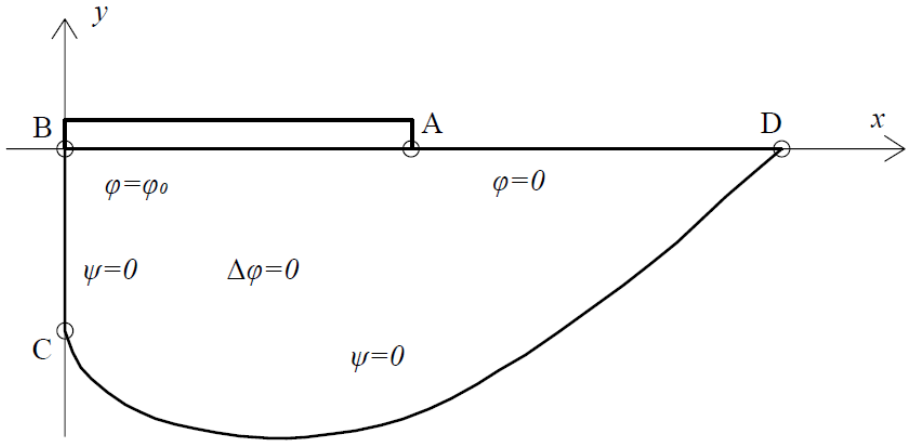

Рис. 2. Геометрия области течения *Fig. 2.* Geometry of the flow area

Далее определим граничные условия для потенциальной функции $\varphi(x, y)$ и функции тока $\psi(x, y)$.

Поскольку давление на открытой поверхности грунта AD равно нулю, то и потенциальную функцию удобнее взять нулевой,

$$\varphi = 0\,, \text{на } AD. \tag{1}$$

На неизвестной границе CD, которую нам предстоит найти используем условие:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial n} = 0\,, \text{на } CD. \tag{2}$$

В нашей модели линия CD представляет собой непроницаемую стенку. Из-за того, что среда, перемещающаяся вдоль стенки, является идеальной жидкостью, для скорости на этой границе следует принять постоянство ее модуля:

$$\left|\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}z}\right| = c. \tag{3}$$

На линии тока BCD функция тока равна нулю. На линии представляющей поверхность заряда AB потенциальная функция равна величине потенциальной функции начального импульса. Соответственно эти условия будут выглядеть так:

$$\psi = 0\,, \varphi = \varphi_0\,. \tag{4}$$

Причем, на участке BC и BA скорость направленна вниз, а на участке AD — вверх.

Остановимся подробнее на физическом смысле этих условий.

Потому как по линии AD на грунт давит только атмосферное давление, то скорость на ней направлена вверх.

Модуль скорости в точке (A), вследствие разрыва потенциала, должен иметь бесконечное значение.

Функция тока ψ на линии BCD, которая есть линия тока, равна нулю. Модуль скорости на отрезке DC не меняется и равен (c).

Скорости направлены в соответствии со значением аргументов комплексной скорости. Расход жидкости зависит от значения $\varphi = \varphi_0$ на отрезке AB. Количество этого расхода в два раза меньше мощности источника по причине рассматривания нами половины течения.

Итак, подведем итог постановки задачи. Учитывая граничные условия (1) − (4), необходимо определить аналитическую функцию $w(z)$ в области ABCD и неизвестный участок границы воронки CD. В качестве исходных данных, характеризующих мощность заряда следует принять величину начального импульса φ_0, а также и величину модуля скорости на криволинейной границе выемки (c). Таким образом параметр $c = |dw/dz|$ имеет двойное назначение, поскольку характеризует и грунт, и заряд. Ширина заряда d является чисто геометрическим параметром, поскольку сказывается лишь на форме воронки.

Решение задачи

На рис. 3 показано, что для этой задачи область течения ABCD имеет вид вертикальной полосы в плоскости комплексного потенциала w.

Источник импульсного воздействия (AB) в плоскости w располагается на вертикальной линии для которой потенциальная функция равна величине потенциальной функции начального импульса $\varphi = \varphi_0$. При этом точка (A) уходит в бесконечность. Границе воронки в плоскости w соответствует линия CD расположенная внизу полуполосы. Одной из целей решения является нахождение положения точки (C).

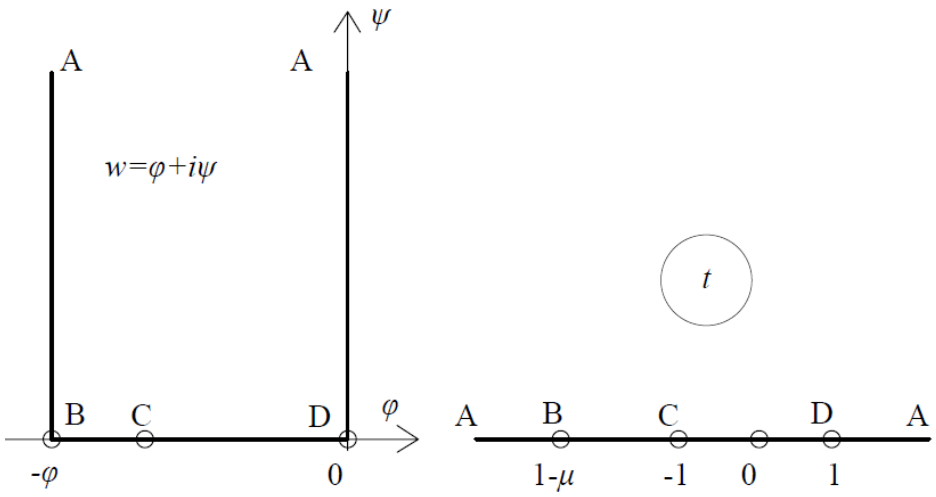

Рис. 3. Область комплексного потенциала и вспомогательной переменной t

Fig. 3. The area of the complex potential and the auxiliary variable t

На рис. 4 можно видеть область значений функции $idw/dz = v + iu$, которую мы называем плоскостью скоростей.

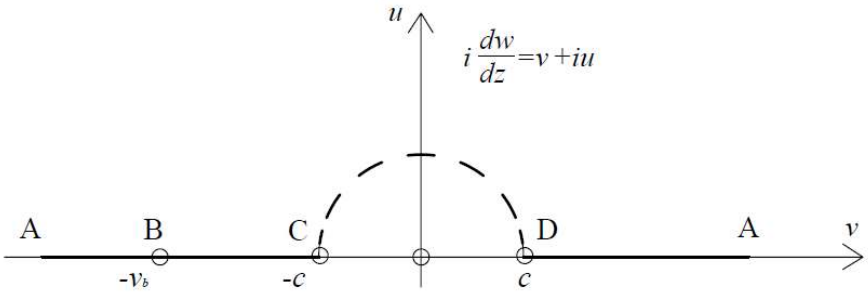

Рис. 4. Область функции $idw/dz = v + iu$

Fig. 4. Function area $idw/dz = v + iu$

Рассмотрение ситуации в этой плоскости дает некоторые преимущества. Несложная геометрия области решения с границами в виде прямых линий и полуокружности с радиусом (c). Центр полуокружности радиуса (c) одновременно является началом координат изображенного графика. Границе воронки будет соответствовать представленная полуокружность. На рис. 4 она изображена пунктирной линией. Горизонтальная ось v вещественная. На ней справа от вертикальной оси (u) проходящей через начало координат (положительная часть), расположен участок открытого грунта DA. На ней же, но слева от вертикальной оси (u) (отрицательная часть), находится участок расположения источника импульсного воздействия AB. Точка (A) также уходит в бесконечность, что соответствует бесконечной скорости в этой части плоскости.

Итак, нами построены области комплексного потенциала $w = \varphi + i\psi$ (рис. 3) и функции $idw/dz=v+iu$ (рис. 4). И та, и другая достаточно просты. Теперь нам надо выбрать какую-либо область, желательно еще более простую и выполнить конформное отображение уже известных областей скорости и комплексного потенциала на область нового комплексного параметра. Такой *параметрической* областью является верхняя полуплоскость комплексного переменного t. Эта область представлена на правой части рис. 3.

В области вспомогательной переменой t периметр течения ABCD расположен на вещественной оси. Всегда можно так выбрать масштаб преобразования, чтобы граница воронки CD находилась на вещественной оси t в пределах от «-1» до «+1». В таком случае участок открытого грунта DA будет располагаться на вещественной оси t в пределах от 1 до ∞. Заряд взрывчатого вещества будет располагаться левее точки $1 - \mu$, где $\mu > 2$ — некоторый параметр, от которого зависит форма воронки взрыва. Параметр μ и параметр ширины заряда d будут в последующем связаны нами определенной формулой.

Отображение области комплексного потенциала w (рис. 3) на верхнюю полуплоскость t осуществляется функцией:

$$t = 1 - \mu \cdot sin^2\left(\frac{\pi w}{2\varphi_0}\right). \quad (5)$$

Производная *dw/dt* из формулы (5) будет такой:

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{\varphi_0}{\pi\sqrt{(1-t)(t+\mu-1)}}. \quad (6)$$

Для дальнейших преобразований воспользуемся функцией вида $t + \sqrt{t^2 - 1}$. С ее помощью получается фигура, которая идентична области функции *idw/dz*, изображаемой на рис. 4. Получилось это потому, что все точки вещественной оси по модулю *t* большие чем ноль остаются на этой вещественной оси, а отрезок вещественной оси с точками верхней полуплоскости *t* по модулю меньшими чем ноль переводится в полукруг единичного радиуса. В итоге полученная фигура совпадает с областью *idw/dz*, показанной на рис. 4. Точность совпадения этих фигур определяется масштабным множителем (*c*).

$$i\frac{dw}{dt} = c\left(t + \sqrt{t^2 - 1}\right). \quad (7)$$

Далее вычисляем *dz/dw*, и имеем:

$$\frac{dz}{dw} = \frac{i\left(t-\sqrt{t^2-1}\right)}{c}.$$

По правилам дифференцирования имеем:

$$\frac{dz}{dw} = \frac{dz}{dt}\frac{dt}{dw}.$$

Если исходить из того, что производную *dz/dt* будет легче находить, чем производную *dw/dt*, то от переменной дифференцирования *w* следует перейти к *t* и в дальнейшем определять *z* как функцию параметра *t*:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{i\left(t-\sqrt{t^2-1}\right)}{c}\frac{dw}{dt}.$$

Заменим в полученном соотношении элемент *dw/dt* на его выражение из формулы (6) и получим следующую формулу:

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{i\varphi_0}{\pi c}\frac{t-\sqrt{t^2-1}}{\sqrt{(1-t)(t+\mu-1)}} = -\frac{\varphi_0}{\pi c}\frac{t-\sqrt{t^2-1}}{\sqrt{(t-1)(t+\mu-1)}}. \quad (8)$$

Теперь нам достаточно вычислить интеграл от правой части формулы (8). Нам потребуются начальные условия, их мы получим если будем знать для некоторого значения параметра *t* значение *z*. Воспользуемся тем что в точке (B) физической плоскости (рис. 2) координаты области течения (z) обращаются в ноль. Этой точке в плоскости параметрического переменного (*t*) соответствует точка $t = 1 - \mu$. Это заключение дает нам право представить уравнение (8) в следующем виде:

$$z = -\frac{\varphi_0}{\pi c} \cdot \int_{1-\mu}^{t} \frac{t-\sqrt{t^2-1}}{\sqrt{(t-1)(t-1+\mu)}}dt. \quad (9)$$

Чтобы данный интеграл вычислить в явном виде произведем замену переменного t на (u): $u = \sqrt{t-1-\mu}$. Производя соответствующие вычисления, придем к следующей формуле:

$$\frac{z}{d} = \frac{\varphi_0}{\pi c d} \cdot \left(\frac{2\sqrt{(t-1+\mu)}}{\sqrt{(t-1)}+\sqrt{(t+1)}} + (\mu-2)\ln\left(\sqrt{\frac{\mu-2}{\mu}} \cdot \frac{\sqrt{(t-1+\mu)}+\sqrt{(t-1)}}{\sqrt{(t-1+\mu)}+\sqrt{(t+1)}} \right) \right). \quad (10)$$

Если $t \to \infty$, то z должно обращаться в d, т. е. в полуширину слоя заряда. Отсюда, вычисляя предел в формуле (10) получим:

$$1 = \frac{\varphi_0}{\pi c d} \cdot \left(1 + (\mu-2) \cdot \ln \sqrt{\frac{\mu-2}{\mu}} \right). \quad (11)$$

Несколько слов о параметре μ. Физического смысла этот параметр не имеет. И вводится он нами только для того, чтобы обеспечить возможность аналитических преобразований. Математически параметр μ есть корень уравнения (11).

Введем новый параметр b. В составе формулы (11) он выглядит так:

$$b = \frac{\varphi_0}{\pi c d}. \quad (12)$$

Как видно из формулы (12) параметр b включает в себя следующие характеристики: φ_0 — мощность заряда, c — прочность грунта, d — ширина слоя заложения заряда. Основываясь на формулах (11) и (12) нами составлена вычислительная программа, определяющая $\mu = \mu(b)$, то есть считающая μ как функцию безразмерного параметра b.

Уравнение границы воронки можно также получить из общего решения (10). Для этого в нем нужно положить, что параметр t пробегает вещественные значения в пределах от –1 до +1. При этом величина $\sqrt{(t-1)}$ принимает на этом участке чисто мнимое значение, и всё выражение (10) получается комплексным. Отделяя вещественную и мнимую части, получим:

$$\left.\begin{aligned} \frac{x}{d} &= \frac{\varphi_0}{\pi c d} \cdot \left(\sqrt{(t+\mu-1)(t+1)} + (\mu-2) \cdot \ln\left(\frac{\sqrt{\mu-2}}{\sqrt{t+\mu-1}+\sqrt{t+1}} \right) \right); \\ \frac{y}{d} &= \frac{\varphi_0}{\pi c d} \cdot \left(\sqrt{(t+\mu-1)(t+1)} - (\mu-2) \cdot \operatorname{arctg}\left(\sqrt{\frac{1-t}{t+\mu-1}} \right) \right) \end{aligned}\right\}. \quad (13)$$

Полученное решение справедливо, когда параметр $b = \varphi_0/\pi c d$ имеет значение большее единицы; тогда μ будет > 2, как это следует из уравнения (11). В этом случае в зоне разрушения имеется конечный участок оси симметрии (BC).

Существует, однако, и другое решение, которое реализуется при $b < 1$, т. е. при малой мощности заряда. Воронка в этом случае начинается не от оси симметрии, а непосредственно с поверхности заряда. Решение (10) тогда нужно изменить следующим образом. Точки (B) и (C) при этом совпадают, поэтому следует взять $\mu = 2$. Далее, поскольку теперь воронка не проходит через начало

координат, нужно добавить к решению (10) неизвестную константу *l/d*, которая будет определять начало воронки. Таким образом, решение получается в виде:

$$\frac{z}{d} = \frac{l}{d} + \frac{\varphi_0}{\pi c d} \cdot \frac{2\sqrt{t+1}}{\sqrt{t-1}+\sqrt{t+1}}.$$

Постоянную *l/d* можно определить из условия, что при $t \to \infty$: $z/d \to 1$. Тогда получим:

$$\frac{z}{d} = 1 + \frac{\varphi_0}{\pi c d} \cdot \frac{\sqrt{t+1}-\sqrt{t-1}}{\sqrt{t+1}+\sqrt{t-1}}. \quad (14)$$

Граница воронок тогда представляется в виде:

$$\frac{z}{d} = 1 + \frac{\varphi_0}{\pi c d} \cdot \left(t - i\sqrt{1-t^2}\right), -1 < t < 1. \quad (15)$$

Откуда видно, что они являются кругами радиуса $b < 1$, с центром на краю заряда $z/d = 1$.

Результаты расчета по формулам (10) или (15) при различных значениях параметра $b = \varphi_0/\pi c d$ показаны на рис. 5.

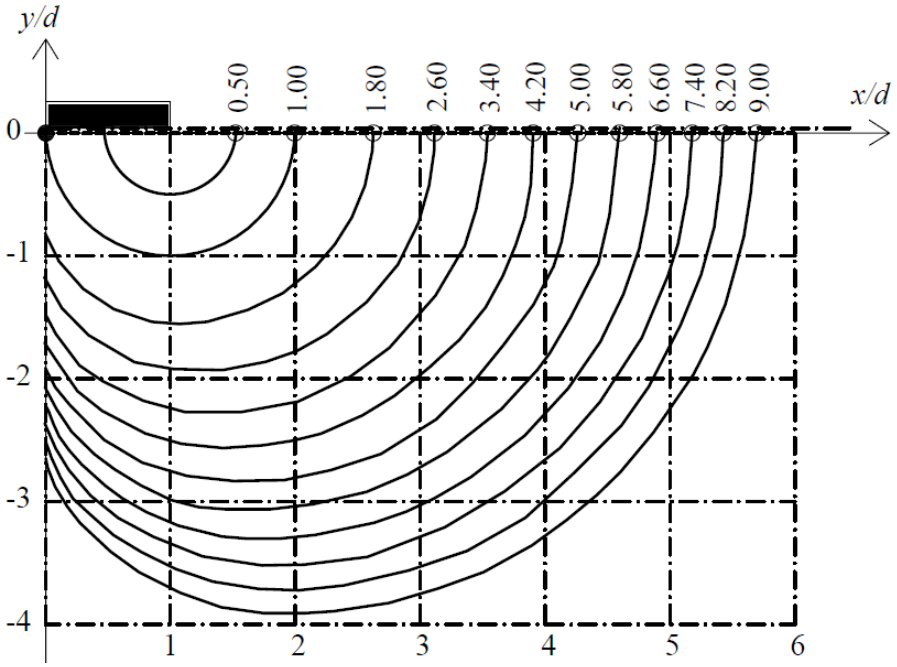

Рис. 5. Формы воронок от поверхностного взрыва для различных значений параметра: $b = \varphi_0/\pi c d$

Fig. 5. Funnel shapes from surface explosion for different parameter values: $b = \varphi_0/\pi c d$

В этой задаче линии равного потенциала и линии тока можно также рассчитать, поскольку имеется явное выражение для *z/d*. Задавая горизонтальные и вертикальные линии в области комплексного потенциала *w* (рис. 3), отображаем их затем в физическую плоскость пользуясь для этого формулами:

$$t = 1 - \mu \cdot sin^2\left(\frac{\pi w}{2\varphi_0}\right)\ ;\ 1 = \frac{\varphi_0}{\pi c d} \cdot \left(1 + (\mu - 2) \cdot \ln\sqrt{\frac{\mu - 2}{\mu}}\right)\ ;$$

$$\frac{z}{d} = \frac{\varphi_0}{\pi c d} \cdot \left(\frac{2\sqrt{t-1+\mu}}{\sqrt{t-1}+\sqrt{t+1}} + (\mu - 2) \cdot \ln\left(\sqrt{\frac{\mu-2}{\mu}} \cdot \frac{\sqrt{t-1+\mu}+\sqrt{t-1}}{\sqrt{t-1+\mu}+\sqrt{t+1}}\right)\right).$$

Результат такого расчета для частного случая $S = \varphi_0/\pi c d = 8$, показан на рис. 6.

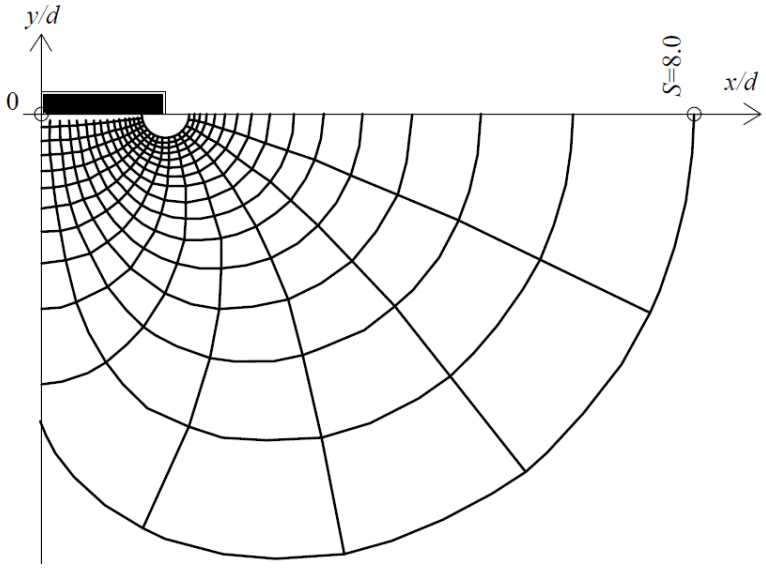

Рис. 6. Эквипотенциальные линии и линии тока от поверхностного взрыва для значения параметра: $S = \varphi_0/\pi c d = 8$

Fig. 6. Equipotential lines and current lines from the surface explosion for the parameter value: $S = \varphi_0/\pi c d = 8$

Заключение

В работе применена твердо-жидкостная модель взрыва, предложенная М. А. Лаврентьевым. В рамках этой математической модели получено и подробно проанализировано решение для задачи: взрыв заряда, расположенного на поверхности и в плане имеющего конфигурацию прямоугольника у которого длина намного превышает ширину.

Выбор этой задачи обусловлен тем, что она имеет точное аналитическое решение, причем в простой аналитической форме, в элементарных функциях.

После получения формы воронки выброса, для большей наглядности, представленные результаты были дополнены расчетом линий равного потенциала и линий тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бубенчиков А. М. Гидродинамическая модель воронки от взрыва заглубленным зарядом / А. М. Бубенчиков, Е. Б. Бразовский // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2022. Том 8. № 2 (30). С. 128-141. DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-2-128-141.
2. Бубенчиков А. М. Гидродинамическая модель воронки от взрыва вертикально расположенным заглублённым зарядом / А. М. Бубенчиков, Е. Б. Бразовский // Взрывное дело. 2022. № 135-92. С. 94-107.
3. Викторов С. Д. Концепция развития буровзрывных работ при разработке месторождений полезных ископаемых / С. Д. Викторов, В. М. Закалинский, И. Е. Шиповский, Р. Я. Мингазов // Взрывное дело. 2021. № 133-90. С. 100-112.
4. Гуревич М. И. Теория струй идеальной жидкости / М. И. Гуревич. Москва: Физматгиз, 1961. 496 с.
5. Закалинский В. М. О буровзрывных работах на больших глубинах / В. М. Закалинский, Р. Я. Мингазов // Взрывное дело. 2021. № 133-90. С. 113-121.
6. Кузнецов В. М. Математические модели взрывного дела / В. М. Кузнецов. Новосибирск: Наука, 1977. С. 84-127.
7. Лаврентьев М. А. Методы теории функций комплексного переменного: учебное пособие для унтверситетов / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. 4-е изд., испр. Москва: Наука, 1973. 736 с.
8. Милн-Томсон Л. М. Теоретическая гидродинамика / Л. М. Милн-Томсон; пер. с англ. А. А. Петрова и др.; под ред. Н. Н. Моисеева. Москва: Мир, 1964. 655 с.
9. Норов А. Ю. Проблема управления энергией взрыва при формировании развала взорванной горной массы на карьерах / А. Ю. Норов // Взрывное дело. 2020. № 129-86. С. 85-104.
10. Хохлов С. В. Исследование вопроса управления и контроля за смещением взорванной рудной массы / С. В. Хохлов, А. В. Баженова, В. А. Маккоев, Р. А. Рахманов, И. А. Аленичев // Взрывное дело. 2021. № 132-89. С. 59-76.

Alexey M. BUBENCHIKOV[1]
Evgeniy B. BRAZOVSKIY[2]
Nikita S. KONKOV[3]

UDK 51-7

THE SHAPE OF THE FUNNEL FROM THE EXPLOSION OF THE CHARGE IN THE PLAN HAVING THE CONFIGURATION OF A RECTANGLE*

[1] Dr. Sci. (Phys.- Math.), Professor,
Leading Researcher, Regional Scientific and Educational Mathematical Center,
National Research Tomsk State University
bubenchicov_am@mail

[2] Postgraduate Student,
Department of Theoretical Mechanics, Faculty of Mechanics and Mathematics,
National Research Tomsk State University;
Leading Engineer, Engineering and Technical Center
of Gazprom Transgaz Tomsk LLC
kondraten.kondraten@mail.ru

[3] Associate Professor, I. N. Butakov Scientific and Educational Center,
National Research Tomsk Polytechnic University;
Deputy Director, Engineering and Technical Center
of Gazprom Transgaz Tomsk LLC
n.s.konkov@gmail.com

Abstract

In this article, using a solid-liquid model of the soil, methods and provisions of the theory of potential flows, as well as the apparatus of analytical functions, an analytical solution

* This work was supported by the TSU Endowment Fund (National Research Tomsk State University)

Citation: Bubenchikov A. M., Brazovskiy E. B., Konkov N. S. "The shape of the funnel from the explosion of the charge in the plan having the configuration of a rectangle". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 8, no. 3 (31), pp. 126-139.
DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-3-126-139

© University of Tyumen

to the problem of ejection of soil during an explosion of a charge located on the surface is constructed for the case when this charge has the shape of a rectangle in the plan, whose length far exceeds its width. A distinctive feature of the obtained solution is that within the framework of the formed mathematical model, it is accurate, has a finite form and is expressed in elementary functions.

Keywords

Hydrodynamics, ejection funnel, complex variables, horizontally positioned charge, surface charge, ideal fluid, jet theory, trenching.

DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-3-126-139

REFERENCES

1. Bubenchikov A. M., Brazovskiy E. B. 2022. "Hydrodynamic model of a funnel from an explosion of a buried charge". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 8, no. 2 (30), pp. 128-141. DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-2-128-141[In Russian]
2. Bubenchikov A. M., Brazovskiy E. B. 2022. "Hydrodynamic model of a funnel from an explosion by a vertically located buried charge". Explosion Technology, no. 135-92, pp. 94-107. [In Russian]
3. Viktorov S. D., Zakalinsky V. M., Shipovskii I. E., Mingazov R. Ya. 2021. "The concept of development of drilling and blasting operations in the development of mineral deposits". Explosion Technology, no. 133-90, pp. 100-112. [In Russian]
4. Gurevich M. I. Theory of jets of an ideal liquid. Moscow: Fizmatgiz, 1961. 496 p. [In Russian]
5. Zakalinsky V. M., Mingazov R. Ya. 2021. "About drilling and blasting operations at large depths". Explosion Technology, no. 133-90, pp. 113-121. [In Russian]
6. Kuznetsov V. M. 1977. Mathematical models of explosive business. Novosibirsk: Nauka. Pp. 84-127. [In Russian]
7. Lavrentiev M. A., Shabat B. V. 1973. Methods of the theory of functions of a complex variable: study guide for universities. 4th ed., corrected. Moscow: Science. 736 p. [In Russian]
8. Milne – Thomson L. M. 1974. Theoretical hydrodynamics. Translated from English by A. A. Petrova et al. Edited by N. N. Moiseeva. Moscow: Mir. 655 p. [In Russian]
9. Norov A. Yu. 2020. "The problem of controlling the explosion energy during the formation of the collapse of the exploded rock mass in quarries". Explosion Technology, no. 129-86, pp. 85-104. [In Russian]
10. Khokhlov S. V., Bazhenova A. V., Makkoev V. A., Rakhmanov R. A., Alenichev I. A. 2021. "Investigation of the issue of management and control over the displacement of ore contours after the blast". Explosion Technology, no. 132-89, pp. 59-76. [In Russian]