

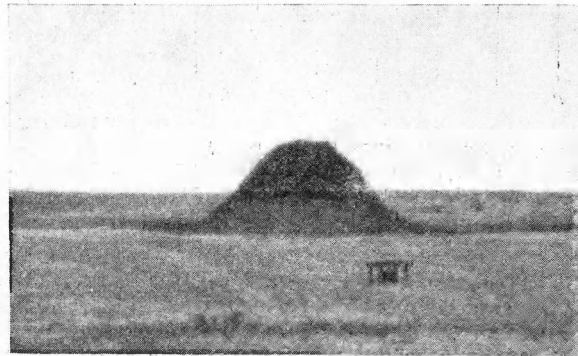
КИНЕМАТОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВЗРЫВОВ

Л. К. Белопухов

(Москва)

Практика научных исследований подземного взрыва показала, что эту задачу можно решать только комплексно, применяя различные способы исследования.

В данной работе для изучения явлений, происходящих при подземном взрыве, был использован кинематографический метод. Этот метод сам по себе не нов. Сравнительное его удобство и простота, легкость расшифровки получаемых результатов уже давно привлекали исследователей к использованию в экспериментальной работе метода киносъемки, особенно для изучения таких явлений, где имеет место значительное перемещение твердой среды. Однако в применении к изучению выброса грунта при подземном взрыве до последнего времени киносъемку было трудно назвать методом исследования. Это объясняется тем, что непосредственно из анализа кинокадров процесса выброса еще не выявляется существо явления. Только использование данных, полученных другими способами, позволило киносъемке стать действенным методом изучения, который в этой задаче можно теперь применять самостоятельно, и полученные при его помощи результаты использовать для расчетных формул выброса.



Фиг. 1. Взрыв заряда весом 1000 кг в глине на глубине 7 м

Всего нами было проведено около 100 киносъемок подземных взрывов в различных мягких грунтах в лабораторных и полевых условиях. В лабораторных условиях взрывы производились в сухом и влажном песке (веса зарядов составляли 0.22 и 23 г). При этом использовалась сверхскоростная лупа времени СФР-1.

В полевых условиях в суглинке и супеси взрывались заряды весом от 1 до 10 кг. В лесовидном суглинке были проведены опыты с зарядами весом 10, 100 и 1000 кг, и в глине — 100, 1000, 10 000 кг и 1000 т. В полевых условиях использовались киноаппараты СКС-1, АКС-1, АКС-2, АКС-3 и «Конвас».

В опытах со всеми грунтами и различными весами зарядов глубина их залегания колебалась от глубины взрыва, близкого к поверхности, до глубины взрыва в условиях «камуфлета». Большая часть киносъемок взрывов в полевых условиях была проведена в экспедиции АН СССР по изучению крупных подземных взрывов, проводимых Союзвзрывпромом.

Результаты опытов и их анализ. Качественная картина внешних явлений, происходящих при выбросе грунта подземным взрывом, имеет общие черты при различных масштабах взрывов и различных видах мягких грунтов.

Наиболее существенным фактом при этом является то, что начальная стадия внешней картины выброса при всех исследованных взрывах — это подъем грунта над зарядом в виде сплошной неразрушенной оболочки — купола (фиг. 1). В этой стадии грунт ведет себя как сплошная непрерывно деформирующаяся среда. В полевых условиях на практике часто бывает, что из-за недостаточно тщательно произведенной «забойки» (заделывания отверстия, через которое в грунт был помещен заряд взрывчатого вещества) газообразные продукты взрыва, прорываясь наружу по трещинам в забойке, мешают наблюдать начальную стадию явления и маскируют подъем грунта в виде сплошного купола. Продолжительность этой начальной стадии тем больше, чем больше вес заряда и чем глубже происходит взрыв. Порядок времени, в которое продолжается начальная стадия, можно охарактеризовать величиной 0.1 сек. для взрыва заряда весом в 1 т на глубине не более 5 м. По истечении этого времени начинается разрушение купола. Начинается оно всегда с вершины купола, а затем распространяется по всей поверхности.

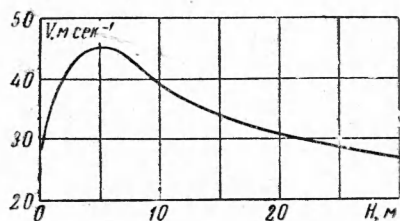
В результате разрушения купола сплошной до этого грунт превращается в рой летящих кусков. Эти куски двигаются далее с полученной в начальной стадии энергией в замедляющем поле силы тяжести, испытывая сопротивление воздуха.

Таким образом, детальные киносъемки опытных взрывов позволили выявить существенную черту в явлении выброса — подъем грунта в начальной стадии в виде сплошного купола. Дальнейшие исследования показали, что изучение характера движения грунта на этой стадии позволяет установить ряд закономерностей, важных

для создания физической схемы явлений, происходящих при выбросе, и путей расчета параметров воронки выброса.

В этой статье будут изложены наиболее существенные факты, полученные в результате рассмотрения кинематических характеристик движения грунта в начальной стадии выброса.

Зависимость скорости движения от высоты подъема грунта имеет сходный вид при различных взрывах. Одна из таких зависимостей, полученная для движения грунта в эпицентральной направлении, показана на фиг. 2. Кривая имеет ясно выраженный максимум. Такой характер зависимости скорости подъема грунта получил объяснение



Фиг. 2. Зависимость скорости движения эпицентральной точки от высоты подъема грунта при взрыве заряда весом 1000 кг на глубине 7 м

в работе Ромашова и др. [1]. В результате обработки большого числа данных о движении грунта, полученных при помощи кинометодики, было установлено, что начальная и максимальная скорости движения грунта являются функциями относительного заглубления заряда $x/c^{1/3}$, т. е. подчиняются закону подобия «одной трети» в широких пределах изменения весов заряда и глубин их заложения. Для каждого вида грунта эти функции можно представить в виде простых степенных зависимостей вида

$$V = A \left(\frac{x}{c^{1/3}} \right)^{-n}, \quad (1)$$

где x — заглубление заряда, c — его вес.

Величины A и n зависят от вида грунта. Для песка они составляют 9.0 и 2.4, соответственно, для лессовидного суглинка — 8.0 и 3.0, для суглинка и супеси — 16.0 и 2.0, для глины — 22.0 и 1.8. При этом, если заглубление заряда взято в метрах, вес заряда — в килограммах, скорость будет иметь размерность метр в секунду. Эти данные относятся не только к зависимостям для скорости движения в эпицентральной направлении. Скорость движения других точек поверхности также описывается зависимостями вида (1), и значения коэффициентов A и n остаются прежними, только под величиной x в этих зависимостях следует теперь понимать расстояние точки поверхности от центра взрыва.

При изучении движения неэпицентральных точек поверхности грунта важным был вопрос о направлении этого движения. Дело в том, что в начальной стадии выброса при движении грунта в виде сплошного купола верхняя его граница представлена на фотографиях непрерывной линией, на которой не различаются отдельные участки грунта. Поэтому в ряде специальных опытов отдельные точки грунта помечались различными способами, так что на киноснимке было зафиксировано перемещение этих точек. Оказалось, что направление движения грунта не совпадает с радиальным направлением от центра взрыва. Обработка экспериментальных результатов показала, что отдельные участки поверхности грунта движутся по направлениям, которые сходятся в точке, лежащей ниже центра взрыва (для глины на глубине, примерно в 2 раза превышающей глубину заложения заряда).

Данные о скоростях движения грунта можно использовать для оценки кинетической энергии грунта, выбрасываемого при взрыве. При этом мы воспользовались экспериментальным результатом, полученным Ромашовым, по которому следует, что скорости движения грунта над зарядом, неодинаковые вначале, вслед за тем выравниваются. Это выравнивание происходит к моменту достижения поверхностью грунта максимальной скорости. Этот факт позволяет распространить данные о скоростях движения поверхности грунта на весь слой грунта над зарядом.

Используя формулы (1), можно получить выражение для кинетической энергии движения грунта. Интегрируя это выражение в пределах радиуса взрывной воронки, нашли, что кинетическая энергия выбрасываемого грунта составляет в зависимости от глубины заложения для глины 9—12%, для лессовидного суглинка 2—4% от энергии заряда. Существенным моментом при этом является сравнительно малая величина дольки кинетической энергии грунта. Основная часть энергии взрыва в мягких грунтах затрачивается, как показано в работе [1], на необратимые пластические деформации грунта.

Обработка данных киносъемок позволила выявить следующий факт.

Если силуэты куполов поднимающегося грунта вычертить в координатах, отнесенных к глубине заложения заряда, то для определенного типа грунта купола разных взрывов совпадут между собой.

Следовательно, если на одной и той же глубине взрывать заряды различного веса, то для всех этих взрывов скорости грунтовых куполов совпадут между собой. При разных весах зарядов будет изменяться лишь скорость подъема купола, но не его форма. Геометрически подобные купола (одинаковые в координатах, относимых к глубине заложения заряда) достигаются в различные моменты времени в соответствии с разной скоростью движения грунта при этих взрывах. В пределах применимости закона по

добия «одной трети» эти времена должны быть пропорциональны кубическим корням из весов зарядов.

Следует иметь в виду, что описываемый факт совпадения грунтовых куполов при взрыве зарядов различного веса имеет место лишь в сравнительно небольшой области глубин заложения зарядов, и распространять его на более глубокие или более мелкие взрывы нельзя. Эта область глубин заложения заряда лежит между $0.4 \sqrt[3]{c}$ и $0.7 \sqrt[3]{c}$ (4 и 7 м для взрывов зарядов весом в 1 т).

Этот результат очень наглядно выявляет различие между собой отдельных типов грунтов по отношению к выбросу. Например, у лессового грунта «обобщенный купол» более крутой и, соответственно этому, объем грунта, охваченного движением, меньше, чем у глины. Чем более крутой «обобщенный купол выброса», тем меньший размер занимает область грунта, в которой его частицы приобретают в результате взрыва скорости, достаточные для выброса за пределы взрывной воронки, следовательно, тем меньше полезный эффект взрыва. Поэтому геометрические характеристики обобщенных куполов выброса должны быть определенным образом связаны с параметрами взрыва на выброс — в виде коэффициентов, характеризующих свойства грунта по отношению к выбросу, они могут войти в расчетные формулы, связывающие вес заряда и размеры воронки, образующиеся при взрыве этого заряда.

Не вдаваясь в характер этой связи, приведем здесь некоторые данные о геометрических характеристиках обобщенных куполов выброса.

На фиг. 3 в функции от высоты купола, отнесенной к глубине заложения заряда, представлены значения относительных объемов грунтовых куполов. График показывает, что для разных грунтов эти объемы резко различаются — у глины объем купола значительно больше, чем у лессовидного суглинка.

Кинематика движения грунта при опытно-1000-тонном взрыве имела свои особенности.

Этот взрыв был произведен в сложных грунтовых условиях — первые 10 м от поверхности занимал лессовый грунт, и только ниже уже залегала глина (взрыв происходил на глубине 40 м от поверхности земли). Тем не менее, построение для этого взрыва силуэтов куполов выброса в координатах, отнесенных к глубине заложения заряда, и сравнение с силуэтами куполов других взрывов показало, что 1000-тонный взрыв нужно сопоставлять с взрывами, проведенными в глине.

Основное отличие кинематики 1000-тонного взрыва от кинематики более мелких по масштабу взрывов заключалось в меньшей величине скорости выброса, чем следовало бы ожидать согласно закону подобия «одной трети». Соответственно этому, меньшим было и значение кинетической энергии выбрасываемого грунта (8% от всей энергии взрыва вместо 12% для взрывов зарядов меньшего веса на таком же относительном заглублении).

Этот факт хорошо согласуется с данными об уменьшенной эффективности 1000-тонного взрыва, выраженной в величине объема выброшенного грунта, приходящегося на единицу веса взрывчатого вещества. Эффективность 1000-тонного взрыва была примерно в 1.5 раза меньше, чем эффективность других, более мелких по масштабу взрывов.

Таким образом, при этом взрыве уже не соблюдался энергетический принцип подобия «одной трети».

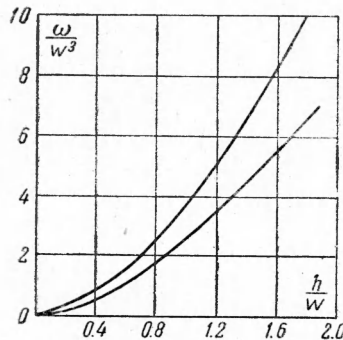
Для выяснения роли силы тяжести, следствием действия которой было это отклонение, существенным является то обстоятельство, что скорости выброса грунта при 1000-тонном взрыве близки к начальным скоростям движения грунта при более мелких взрывах.

Данные о скоростях движения грунта в начальной стадии выброса можно использовать для изучения вопроса о дальности разлета грунта при подземном взрыве. После разрушения грунтового купола рой кусков грунта разлетается по баллистическим законам. Зная начальные параметры разлета, можно получить выражение для максимальной дальности разлета (без учета сопротивления воздуха движению кусков грунта). Для глины оно имеет вид

$$L_{\max} = 0.53 x + 10.5 \left(\frac{x}{\sqrt[3]{c}} \right)^4 \quad (2)$$

где x — глубина залегания заряда в грунте, в м; c — вес заряда, в кг.

Сравнение этой формулы с опытными данными показало, что она дает хорошее согласие с опытом:



Фиг. 3. Зависимость объема купола поднимающегося грунта от высоты (в относительных координатах). Верхняя кривая — для глины; нижняя — для лесса

- а) для взрывов, проводимых на глубине большей, чем $0.6 \sqrt[3]{c}$;
 б) для взрыва 1000-тонного заряда.

В остальных случаях опытные данные были меньше рассчитанных по формуле. Такое расхождение объясняется замедляющим действием силы сопротивления воздуха на движения кусков грунта. Это действие для кусков грунта размером 10—20 см существенно при скоростях движения, больших 30 м/сек (что имеет место при взрывах заряда на глубине, меньшей чем $0.6 \sqrt[3]{c}$). Что касается взрыва заряда весом 1000 т, то при этом взрыве размер разлетающихся кусков грунта был настолько велик (несколько метров в поперечнике), что действие силы сопротивления воздуха было несущественно и при скоростях движения, близких к 100 м/сек , которыми обладали эти куски.

Таким образом, формула (2) представляет собой верхнюю границу для максимальной дальности разлета грунта в идеальных условиях (однородный грунт, равномерное действие взрыва по всем направлениям и др.).

При определении безопасных расстояний по разлету грунта необходимо учитывать реальные условия проведения взрывов, которые могут увеличить дальность разлета по отдельным направлениям, например, неоднородность грунта или наличие ветра.

Поступило 10 X 1960

ЛИТЕРАТУРА

1. Ромашов А. Н., Родионов В. Н., Сухотин А. П. Взрыв в неограниченной легко уплотняющейся среде. ДАН, 1958, т. 123, № 4.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ

А. Я. Апин, И. М. Воскобойников
 (Москва)

Одной из важных задач теории детонации является расчет параметров детонационной волны в ВВ, для которого известна лишь химическая формула. Гидродинамическая теория детонации позволяет для определения скорости детонации D , массовой скорости u , давления p , удельного объема v и температуры T продуктов взрыва составить систему из пяти уравнений: три закона сохранения (массы, количества движения и энергии), условие Чепмена — Жуке и уравнение состояния.

От того, насколько удачен выбор уравнения состояния продуктов взрыва, зависят совпадение результатов расчета с экспериментом и сложность проведения самого расчета. Сравнение экспериментальных данных [1,2] с результатом расчета по большому числу используемых в настоящее время уравнений состояния продуктов взрыва [3,4,5] не позволяет ни одно из них считать удовлетворительным.

Ввиду этого было решено обойти необходимость введения уравнения состояния продуктов взрыва, используя эмпирические зависимости.

На основании экспериментальных значений давления и температуры продуктов взрыва гексогена, тэна, нитрометана и нитроглицерина была предложена [1] формула вычисления температур детонации

$$T = 4.8 \cdot 10^{-9} p v (v - 0.20) M$$

где T — температура в $^{\circ}\text{K}$, p — давление в *барах*, v — удельный объем продуктов взрыва в $\text{см}^3/\text{г}$, M — средний молекулярный вес продуктов взрыва. Эта зависимость была проверена на большом числе ВВ, и ошибка расчета по ней не превышала 200°K .

Большое число данных об измерении массовых скоростей продуктов взрыва показало, что ее можно рассчитывать по выражению $u = D/(k + 1)$, где k — коэффициент, не зависящий от плотности заряжения ВВ и меняющийся от одного ВВ к другому от 2.4 до 3.0. Использование в расчетах для всех ВВ значения 2.7 не приводит к ошибке более чем 5%, в то время как ошибка опыта обычно составляет до 3%. Если $u = D/(k + 1)$, то из уравнения сохранения массы $v = kv_0/(k + 1)$.

Измеренные и рассчитанные по формуле (1) температуры детонации позволяют записать выражение для внутренней энергии продуктов взрыва E как функцию давления и температуры. Нами была сделана попытка представить это выражение в виде

$$E = \int c_v dT + f(p)$$

где c_v — молярная теплоемкость продуктов взрыва в идеальном газовом состоянии [3]. Для проверки этого предположения были вычислены значения $f(p)$ на 1 моль продуктов взрыва гексогена 1 и тэна 2 при разных начальных плотностях заряда.