

УДК 533.6.011

ЭФФЕКТ САДОВСКОГО

© 2024 г. В. В. Адушкин*

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия***E-mail: adushkin@idg.ras.ru*

На основе результатов физического моделирования рассмотрено взаимодействие воздушной ударной волны, вызванной приземным взрывом заряда ВВ, с теплым слоем. Показано, что наличие прогревного слоя обуславливает сильный эффект, связанный с качественным изменением эпюры давления в ударной волне, снижению амплитуды волны сжатия и увеличению ее длительности.

Ключевые слова: взрыв, ударная волна, амплитуда, длительность, нагретый слой, экспериментальные данные.

Для цитирования: Адушкин В.В. Эффект Садовского // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 3. С. 7–10. https://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_3_7

Введение

При установлении эффективности воздействия приземных ядерных взрывов в процессе проведения атмосферных ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне под руководством М. А. Садовского был установлен весьма интересный и важный с практической точки зрения эффект: сформированный при взрыве ударный фронт воздушной волны исчезал на некотором расстоянии от эпицентра взрыва. При этом возникал мощный газовый поток, который нагревал земную поверхность. Как было установлено, именно нагрев грунта и являлся причиной исчезновения ударного фронта волны.

Результаты испытаний показали, что под воздействием сформированного у земной поверхности мощного газового потока техника в результате взрыва перебрасывалась на значительные расстояния (десятки метров).

Этот эффект, получивший объяснение и интерпретацию в более поздних работах [Губкин, 1970; Артемьев и др., 1987], изучался в лабораторных условиях. В настоящей статье описываются результаты этих экспериментов.

Постановка эксперимента

При постановке лабораторного эксперимента учитывались известные результаты, полученные во взрывных ударных трубах с целью развития пристеночных возмущений, вызываемых излучением сильной ударной волны. Также были известны результаты опытов, в которых теплый слой создавался нагревом поверхности электрическим импульсом.

В нашем случае проводились лабораторные эксперименты, в которых приповерхностный слой создавался в результате горения, а также прогревом нихромой проволокой. В связи с некоторыми практическими задачами взаимодействия взрывной волны с теплым слоем, например, при пожарах, приведем некоторые количественные результаты, полученные в рассматриваемых лабораторных экспериментах.

Опыты по изучению взаимодействия воздушной ударной волны (ВУВ) с теплым слоем проводили в лабораторных условиях. В качестве источника взрыва использовались сферические заряды взрывчатого вещества (ВВ) массой $q = 0.02$ кг из сплава тротила с гексогеном плотностью 2370 кг/м³ и удельной энергией взрыва 4777 кДж/кг.

Регистрация ВУВ осуществлялась по пьезоэлектрическому методу – электронным осциллографом с частотой пропускания до 100 кГц и датчиками ножевого типа с собственной частотой 250–300 кГц и размером чувствительной части 10 мм.

Нагретый слой воздуха возникал на поверхности вертикально установленного стального щита высотой 2.5 м и шириной 1.5 м. С этой целью на щит наклеивали 2–3 слоя фильтровальной бумаги, которую обильно смачивали этиловым спиртом. Непосредственно перед взрывом бумагу поджигали электрической спиралью, в результате чего на поверхности щита возникал нагретый слой воздуха толщиной около 10 см. Температуру нагретого слоя, составляющую $\sim 1050^\circ \text{ К}$ определяли путем измерения скорости распространения звуковых волн с по известному соотношению:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}.$$

Скорость звука в нагретом слое, измеренная поперек потока, составила около 650 м/с. Из анализа продуктов горения этилового спирта в воздухе определялся средний молекулярный вес $\mu = 28 \text{ г/моль}$ и отношение удельных теплоемкостей $\gamma = 1.37$, величина $R = 8.3 \text{ Дж/}^\circ \text{ К}$. Заряд ВВ размещали на поверхности щита в верхней его части на высоте $H = 0.2 \text{ м}$. Пьезоэлектрические датчики располагались внутри прогретого слоя в нижней части щита на расстоянии 0.2–1 м от пола. Таким образом, ВУВ распространялась вдоль поверхности щита сверху вниз против потока горячих газов. Скорость этого потока, измеренная с помощью трубки Пито, достигала 25 м/с. Регистрация параметров ВУВ проведена в диапазоне расстояний от эпицентра $R_{\text{э}} = 0.5\text{--}2 \text{ м}$, т.е. $R_{\text{э}} = (2.5\text{--}10)H$. При этом максимальное давление на фронте ВУВ, в отсутствие нагретого слоя, изменялось $5 \cdot 10^5 \geq \Delta P \geq 2 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$ ($0.5 \geq \Delta P \geq 0.02 \text{ МПа}$), длина фазы сжатия ВУВ $0.2 \leq \lambda \leq 0.4 \text{ м}$.

Результаты физического моделирования

На рис. 1 приведены типичные осциллограммы изменения давления от времени в проходящей ВУВ без нагретого слоя (а) и при его наличии (б) при прочих равных условиях (датчик расположен на приведенном расстоянии $R_{\text{э}}/q^{1/3} = 2.6 \text{ м/кг}^{1/3}$ от эпицентра, заряд ВВ на приведенной высоте $H/q^{1/3} = 0.74 \text{ м/кг}^{1/3}$ от поверхности щита, т.е. $R_{\text{э}} = 3.5H$).

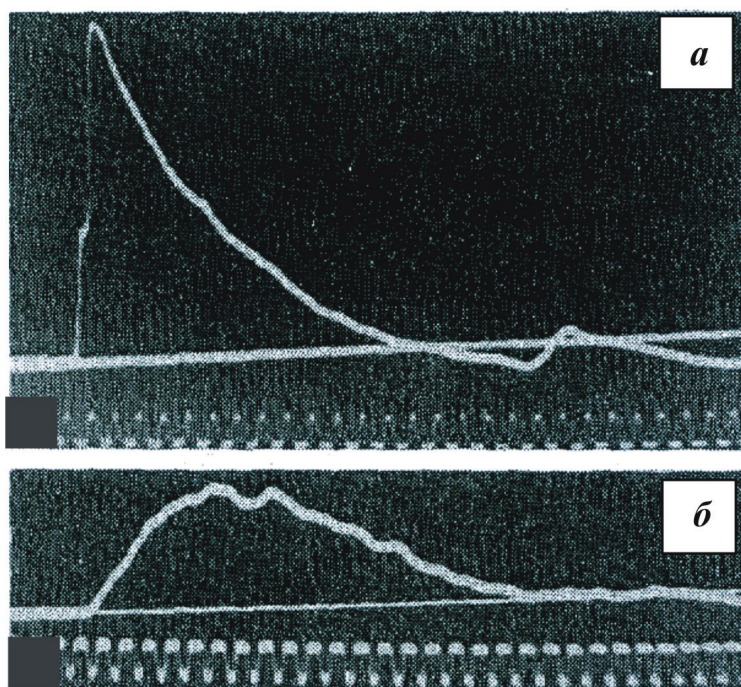


Рис. 1. Изменение профиля ВУВ под влиянием нагретого слоя: а – без нагретого слоя, б – при его наличии

Видно, что наличие нагретого слоя существенно изменяет профиль ВУВ – вместо резкого фронта наблюдается плавное нарастание давления в течение 0.3 от времени действия фазы сжатия и величина избыточного давления снижается в 2.5 раза.

При наличии нагретого слоя с температурой 1050° К происходит значительное, в 2.2–2.5 раза, снижение максимального давления и увеличение в 1.4–1.5 раза времени действия фазы сжатия ВУВ. В результате удельный импульс проходящей ВУВ не сильно, в среднем на 10%, уменьшается по сравнению со случаем, когда нагретый слой отсутствует.

В опытах с нагретым слоем при более низкой температуре (460° К), который образовали в пристеночной области раскаленным электрическим током нихромовой проволокой, установлено, что интенсивность ВУВ уменьшалась в среднем в 1.4 раза. С учетом результата удалось построить приблизительную зависимость максимального давления от температуры. Было получено, что с ростом температуры нагретого пристеночного слоя интенсивность ВУВ уменьшалась примерно так, что при каждом удвоении температуры величина ΔP снижается в 1.6 раза. В специальных опытах высокоскоростной фоторегистрацией была измерена массовая скорость газа за фронтом волны, распространяющейся по нагретому слою. С этой целью на различных расстояниях от эпицентра взрыва к стене, смоченной этиловым спиртом, прикрепляли ленту, пропитанную раствором NaNO_3 . Выше этой ленты пламя имело желтый цвет, ниже – голубой. Под воздействием волны граница желтого пламени перемещалась с массовой скоростью газа в сторону голубого. Измерения показали, что величина этой скорости в 2–3 раза выше массовой скорости воздуха в ударной волне в отсутствие нагретого слоя. Отсюда следует, что в условиях нагретого слоя величина динамического напора может оказаться выше, чем в отсутствие слоя. Электромагнитным импульсометром были проведены сравнительные измерения импульса обтекания тонкого плоского диска в присутствии нагретого слоя и без него. Соотношение между диаметром диска ($d = 3$ см) и длиной ВУВ составило $d/\lambda = 0.05\text{--}15$, что обеспечило необходимые условия процесса обтекания. Диск при помощи стержня длиной больше λ прикреплялся к поршню импульсометра. Измерения показали, что величина импульса динамического напора газа в волне, распространяющейся по нагретому слою, на 30%–50% выше соответствующего импульса при отсутствии нагретого слоя.

Были измерены также параметры ВУВ внутри нагретого слоя в зависимости от угла ее падения. Углом падения ВУВ считался угол α между нормалью к фронту и к твердой поверхности. Было получено, что при всех значениях угла падения амплитуда волны в нагретом слое значительно меньше, чем в его отсутствие. Это означает, что преломленная волна в нагретом слое всегда слабее падающей ВУВ. Причем снижение интенсивности зависит от угла падения. Так, при больших углах падения (более 40°), когда в отсутствие нагретого слоя наблюдается нерегулярный режим отражения, $\Delta P_{\text{нс}} = (0.4\text{--}0.5) \Delta P$; при уменьшении угла падения $\Delta P_{\text{нс}} = (0.6\text{--}0.8) \Delta P$. Оказалось также, что при наличии нагретого слоя на отражающей поверхности исчезает область повышенного давления в области критического угла (50° для падающей ВУВ, $\Delta P = 0.053$ МПа), соответствующего условиям тройной конфигурации (волны МАХА). Увеличение амплитуды в условиях данных опытов при наличии нагретого слоя с температурой 1050° К происходит примерно при $\alpha = 30^\circ$.

Заключение

Приведенные экспериментальные результаты наглядно показывают, что наличие прогревного слоя приводит к весьма сильным эффектам: качественному изменению зависимости давления от времени, снижению амплитуды ВУВ, увеличению длительности фазы сжатия, возрастанию массовой скорости газа за фронтом волны, увеличению импульса скоростного напора, уменьшению угла перехода от регулярного к нерегулярному отражению [Садовский, Адушкин, 1988].

В заключение следует отметить, что, используя известные положения теории энергетического и геометрического подобий, можно пересчитать полученные экспериментальные результаты при заданных в опыте значениях массы заряда и энергии взрыва на другие значения энергии взрыва или

массы заряда лишь при сохранении соотношения между толщиной теплого слоя, высотой подрыва при сохранении отношения температур теплого слоя и окружающего газа [Бергельсон и др.,1987].

Список литературы

Артемов В.И., Маркович И.Э., Немчинов И.В., Суляев В.А. Двумерное автомодельное движение сильной ударной волны над нагретой поверхностью // Доклады академии наук. 1987. Т. 293. № 5. С. 1082–1084.

Бергельсон В.И., Немчинов И.В., Орлова Т.И. Автомодельное развитие предвестника перед ударной волной, взаимодействующей с теплым слоем // ДАН СССР. 1987. Т. 296. № 3. С. 554–557.

Губкин К.Е. Распространение взрывных волн: Сб. Механика в СССР за 50 лет. М. : Наука, 1970. Т. 2. С. 289–311.

Садовский М.А., Адушкин В.В. Влияние нагретого пристеночного слоя на параметры ударных волн // ДАН СССР. 1988. Т. 300. № 1. С. 79–83.

THE SADOVSKY EFFECT

© 2024 V. V. Adushkin*

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: adushkin@idg.ras.ru*

Based on the results of physical modeling, the interaction of an air shock wave caused by a surface explosion of an explosive charge with a warm layer is considered. It is shown that the presence of a heating layer causes a strong effect associated with a qualitative change in the pressure diagram in the shock wave, a decrease in the amplitude of the compression wave and an increase in its duration.

Keywords: explosion, shock wave, amplitude, duration, heated layer, experimental data