

## ДИНАМИЧЕСКАЯ АНТИКУМУЛЯТИВНАЯ ЗАЩИТА. II

Б. В. Войцеховский, В. Л. Истомин, В. А. Рыжаков

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Исследованы различные варианты динамической антикумулятивной защиты и влияние ее параметров на глубину проникания кумулятивной струи в преграду.

## ВВЕДЕНИЕ

Ранее было исследовано влияние антикумулятивного слоя динамической защиты, состоящего из двух металлических пластин и слоя взрывчатого вещества между ними, на глубину проникания в преграду кумулятивной струи (в дальнейшем называемой просто струей), проходящей через этот слой [1]. Эти исследования показали существенную зависимость глубины проникания струи от угла между направлением ее движения и нормалью к поверхности металлических пластин, т. е. от взаимного расположения антикумулятивного слоя и кумулятивного заряда.

На основе проведенных исследований был разработан ряд вариантов принципиальных схем динамической антикумулятивной защиты.

Работа выполнена в 1959–1963 гг.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МОДИФИКАЦИЙ АНТИКУМУЛЯТИВНОГО СЛОЯ

1. Простейшая модификация динамической антикумулятивной защиты показана на рис. 1. Антикумулятивный слой, состоящий из двух металлических пластин и слоя ВВ между ними, лежит на поверхности преграды, т. е. нижняя пластина уже является частью преграды. Этот случай близок ко второму антикумулятивному слою, описанному в работе [1], где толщина нижней стальной пластины равна 50 мм. Угол между направлением движения струи и нормалью к поверхности этого слоя равен  $\alpha$ .

В табл. 1 представлены результаты, полученные для антикумулятивного слоя с толщиной слоя взрывчатого вещества (ВВ) 10 мм. В опытах использовались кумулятивные заряды с медными и стальными конусами (диаметр конуса 70 мм, угол раствора  $26^\circ$ ). В качестве

ВВ в заряде и антикумулятивном слое использовался сплав тротила с гексогеном в соотношении 1 : 1, кроме описываемого в этом пункте опыта, в котором в антикумулятивном слое это соотношение составляло 9 : 1. В отсутствие антикумулятивной защиты глубина проникания кумулятивной струи в преграду таких зарядов со стальным конусом составляла 260 мм, а с медным — 360 мм в экспериментах, описываемых в данном пункте, и 400 мм — в экспериментах, описанных в пп. 2 и 3 при расстоянии между зарядом и преградой 200 мм (в табл. 1 эти данные не приведены). В последнем случае увеличение глубины проникания струи связано с модернизацией самого заряда, но не конуса. Отметим, что среднеквадратичное отклонение глубины проникания струи в преграду не превышало 10 %.

Данные табл. 1 показывают влияние толщины верхней стальной пластины на глубину проникания при  $\alpha = 60^\circ$ . Расчеты выполнены на основе теории динамической антикумулятивной защиты, изложенной в статье [1]. Видно, что оптимальная толщина верхней пластины равна 10 мм. Однако проведенные ранее опыты показали, что для антикумулятивного слоя с толщиной верхней пластины 10 мм, нижней — 50 мм, а слоя ВВ — 10 мм глубина проникания струи была значительно меньше (100 мм). Это еще раз указывает на су-

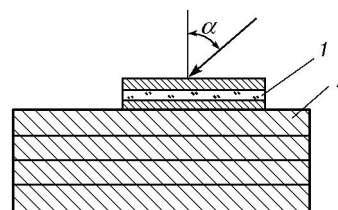


Рис. 1. Схема экспериментов:

1 — антикумулятивный слой, 2 — преграда; стрелка указывает направление движения струи

Таблица 1  
Влияние толщины верхней пластины антикумулятивного слоя  
на глубину проникания струи в преграду

Номер опыта	Материал конуса	Толщина пластины, мм	Глубина проникания, мм	
			эксперимент	расчет
1	Сталь	5	165	165
2		6	165	165
3		8	150	155
4		10	150	145
5		12	150	145
6	Медь	10	225	230

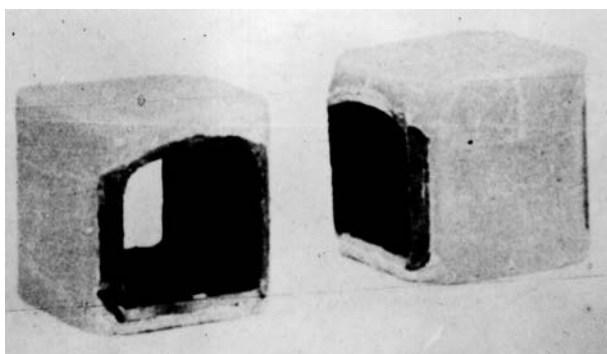


Рис. 2. Двухслойные трубки антикумулятивного слоя

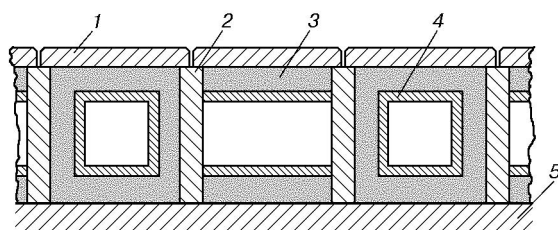


Рис. 3. Схема антикумулятивного слоя с двухслойными трубками:

1 — верхняя пластина, 2 — боковая стенка, приваренная к преграде 5, 3 — ВВ, 4 — металлическая стенка трубки

ществленную роль нижней пластины в снижении глубины проникания струи в преграду. На наш взгляд, это связано с тем (как и показывают расчеты), что верхняя (более «быстрая») пластина успевает провзаимодействовать, как правило, с «головной» частью струи, а нижняя («медленная») — только с «хвостовой».

В экспериментах с данной модификацией

динамической антикумулятивной защиты при использовании заряда с медным конусом при  $\alpha = 60^\circ$  остаточная глубина проникания составила 225 мм (см. табл. 1), т. е. 62,5 % полной глубины проникания струи (без антикумулятивной защиты), что сопоставимо с результатом для зарядов со стальным конусом (57,7 %).

2. Для уменьшения влияния угла встречи между антикумулятивным слоем и струей на глубину ее проникания в преграду можно использовать слой, содержащий двухслойные трубки (круглого или квадратного сечения), состоящие из металлического внутреннего слоя (темная область на рис. 2) и наружного слоя ВВ (светлая область). В этом случае всегда найдется не только основной угол  $\alpha$ , но и дополнительный  $(90^\circ - \alpha)$ , что и позволяет уменьшить влияние угла  $\alpha$  за счет взаимодействия струи с боковой стороной трубки. Двухслойные трубки закладываются в специальные ячейки (рис. 3) и образуют пространственный антикумулятивный слой, который располагается прямо на поверхности преграды. При этом двухслойные трубки в плоскости располагаются в шахматном порядке: торец трубки соседствует с боковой поверхностью трубки в соседней ячейке, что уменьшает возможность передачи детонации от одной ячейки к другой. Толщина боковых стенок ячеек 5 мм. Результаты опытов представлены в табл. 2. В этих экспериментах размеры ячеек в плане составляли  $50 \times 50$  мм, толщина нижнего и бокового слоев ВВ 3 мм. Толщина бокового слоя металла равнялась толщине нижнего слоя, а толщина крышки ячейки, которая тоже является частью антикумулятивного слоя, — 5 мм. Угол взаимодействия струи со слоем  $60^\circ$ .

Таблица 2

Глубина проникания струи в преграду при взаимодействии с пространственным антикумулятивным слоем

Высота ячейки, мм	Верхний слой ВВ, мм	Толщина пластины, мм		Глубина проникания, мм	
		верх	низ	эксперимент	расчет
45	3	1,5 (А)	1,5 (А)	180	200
		3,0 (А)	3,0 (А)	190	—
		1,5 (А)	4,5 (А)	180	—
		1,5 (А)	1,5 (С)	170	—
55	3	1,5 (А)	1,5 (А)	195	190
		3,0 (А)	3,0 (А)	170	140
		1,5 (А)	4,5 (А)	180	—
		1,0 (М)	1,0 (М)	150	—
55	5	2,5 (А)	3,0 (А)	140	140
		2,0 (М)	2,0 (М)	110	100
		2,0 (М)	2,0 (С)	155	—
		3,0 (С)	3,0 (С)	120	100

Примечание. Материал пластины: А — алюминий, М — медь, С — сталь.

Результаты экспериментов показывают, что глубина проникания струи от заряда с медным конусом при использовании алюминия в антикумулятивном слое составляет 45,0 % глубины проникания струи без динамической антикумулятивной защиты, что значительно меньше, чем в опыте со стальным конусом — 57,7 % (см. табл. 1). Из данных табл. 2 следует, что увеличение высоты ячеек антикумулятивного слоя на 10 мм с сохранением толщины верхнего слоя ВВ и алюминия в качестве металлического слоя не приводит к дальнейшему уменьшению глубины проникания струи. Не дает эффекта в этом случае и некоторая вариация толщины алюминия. Однако уменьшение глубины проникания струи в преграду (до 17,5 %) наблюдается при использовании в качестве металлического слоя меди, а более заметное уменьшение при дополнительном увеличении толщины верхнего слоя ВВ при использовании алюминия (28,5 %) и еще больше — для меди или стали (36 %). Это связано с тем, что время схлопывания ячейки увеличивается. И хотя в случае более тяжелых металлов скорость пластин меньше, импульс, воздействующий на струю, возрастает. А это значит, что распыление струи будет идти быстрее. В

табл. 2 приведены расчетные данные для ряда основных опытов, подтверждающие вышесказанное.

Для антикумулятивного слоя со стальными пластинами были выполнены эксперименты при  $\alpha = 45^\circ$ . Глубина проникания струи в преграду практически не изменилась (130 мм), что подтверждается и расчетом.

Отметим, что при взаимодействии данного пространственного антикумулятивного слоя со струей разрушалось 4 ÷ 5 ячеек системы динамической антикумулятивной защиты, представленной на рис. 3. При этом детонировали только две ячейки, через которые проходила струя, остальные разрушались за счет ударной волны от заряда и детонировавших ячеек.

3. Поскольку из всего антикумулятивного слоя со струей практически взаимодействует только полоска шириной, равной диаметру струи, целесообразно разместить ВВ в металлических трубках и разнести их по высоте для обеспечения движения их металлической оболочки после детонации ВВ. Фотография «трубчатого» антикумулятивного слоя представлена на рис. 4. Расположение трубок должно быть таким, чтобы струя обязательно взаимодействовала хотя бы с одной из них.

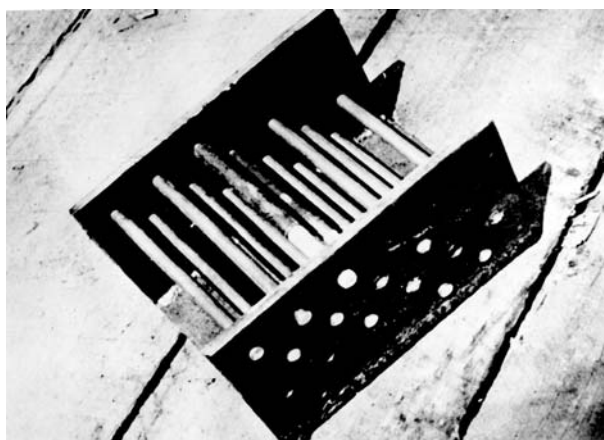


Рис. 4. Общий вид «трубчатого» антикумулятивного слоя

Для выявления «трубчатого» слоя, наиболее эффективно уменьшающего глубину проникания струи в преграду, были выполнены измерения (с использованием рентгенографии) скоростей разлета оболочек различных стальных трубок, заполненных ВВ. Результаты экспериментов представлены на рис. 5, *а*.

Однако основным фактором, определяющим глубину проникания струи в преграду, является не сама скорость металлической оболочки трубки антикумулятивного слоя, а создаваемый ею импульс. Боковой импульс согласно [1] определяется соотношением

$$P = \frac{\rho_{\text{п}} d \delta v_{\text{п}} \sin^2 \alpha}{(v_{\text{с}}/v_{\text{п}}) \cos \alpha \pm 1},$$

где  $v_{\text{п}}$  — скорость пластины,  $v_{\text{с}}$  — скорость струи,  $d$  — толщина пластины,  $\delta$  — диаметр струи,  $\rho_{\text{п}}$  — плотность материала пластины, знаки  $\pm$  относятся соответственно к верхней и нижней пластинам (или поверхностям трубки), воздействующим на струю.

С использованием данных рис. 5, *а* были построены временные зависимости импульсов  $P$  этих оболочек (рис. 5, *б*) для нижней части трубок (нижняя пластина). За единицу принят максимальный импульс трубки размера  $14 \times 2,5$  мм (третья трубка, далее номера трубок соответствуют номерам кривых на рис. 3). Соответствующие данные для верхней части трубок имеют аналогичный вид, но лежат, естественно, несколько ниже (на рис. 5, *б* не приведены). Скорость струи в данных расчетах принималась равной 5 км/с (средний участок струи). Из приведенных графиков видно, что

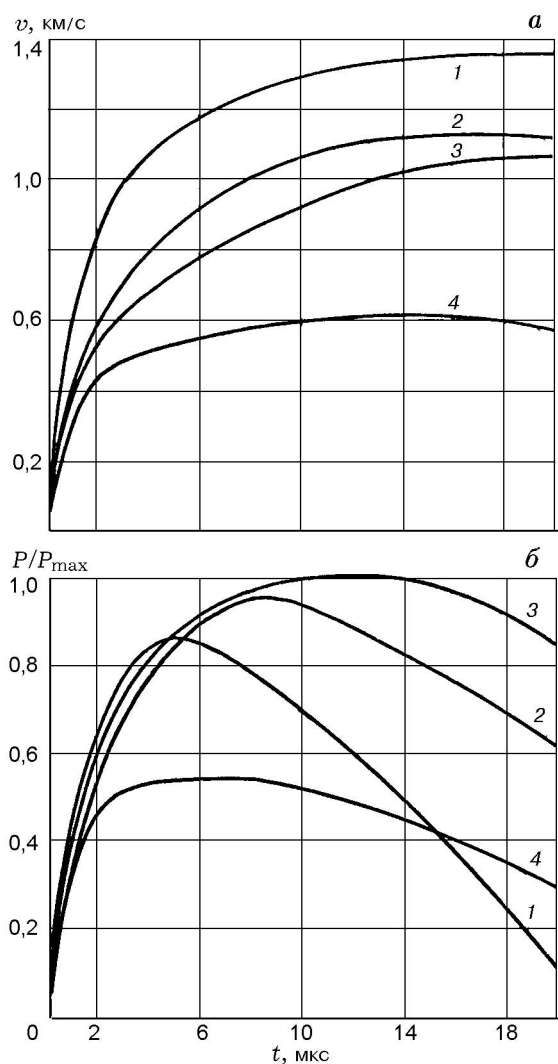


Рис. 5. Зависимость скорости (*а*) и импульса (*б*) оболочек различных трубок от времени:

размеры трубок: 1 —  $10 \times 1$  мм, 2 —  $11 \times 2$  мм, 3 —  $14 \times 2,5$  мм, 4 —  $14 \times 3,5$  мм

наибольшее воздействие на струю должна оказывать третья трубка, поскольку она создает максимальный импульс и, кроме того, имеет в верхней части зависимости небольшое «плато». Вторая трубка имеет второй по величине импульс, а наименьший импульс — у четвертой трубки. Все вышесказанное подтверждается экспериментами. Глубины проникания струи в преграду с «трубчатым» слоем, содержащим трубки 3, 2, 1 и 4 (см. рис. 5), оказались равными соответственно 115, 150, 165 и 180 мм. Таким образом, даже используя только выражение для бокового импульса, можно оценить эффективность того или иного варианта

антикумулятивного слоя.

Взаимодействие «трубчатого» слоя со струей под углом  $\varphi$ , образованным проекцией оси какой-либо трубки на плоскость преграды и вертикальной плоскостью, в которой движется струя, равносильно взаимодействию под новым углом встречи  $\gamma$ , который связан с углом  $\alpha$  соотношением

$$\operatorname{ctg}^2 \gamma = \operatorname{ctg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \varphi \cdot \operatorname{csec}^2 \alpha.$$

Например, для угла  $\alpha = 60^\circ$  при повороте на угол  $\varphi = 30^\circ$  новый угол встречи  $\gamma$  будет составлять  $49^\circ$ . Такое изменение угла встречи практически не влияет на глубину проникания струи в преграду, что и было подтверждено экспериментами.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты подтверждают высокую эффективность динамической антикумулятивной защиты по уменьшению глубины проникания кумулятивной струи в преграду. Даже в простейшем варианте такая защита позволяет значительно уменьшить глубину проникания струи, а исполь-

зование пространственного антикумулятивного слоя значительно уменьшает и влияние угла  $\alpha$ , и саму глубину проникания. Применение «трубчатого» слоя дает возможность резко сократить количество ВВ. Проведенные исследования показали, что разработанная ранее теория взаимодействия быстролетящих металлических пластин с кумулятивной струей позволяет рассчитывать остаточную глубину проникания струи в преграду после взаимодействия ее с антикумулятивным слоем различной конфигурации и дает возможность оценить наиболее эффективный слой, используя только зависимость бокового импульса от времени.

В заключение отметим, что в последнее время появилось много различных разработок по динамической защите (см., например, патенты [2, 3]), которые близки к вышеизложенным.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Войцеховский Б. В., Истомин В. Л. Динамическая антикумулятивная защита // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 6. С. 87–90.
2. Пат. Франции № 2136361. 13.03.71.
3. Пат. ФРГ № 2636595. 16.02.78.

*Поступила в редакцию 10/IV 2001 г.*