

## О вкладе в пробитие преграды хвостовых элементов кумулятивных струй

© С.В. Федоров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*По данным расчетов, пробивное действие кумулятивных зарядов можно существенно усилить, например, на 40...50 % в случае преграды из высокопрочной стали, если за счет повышения точности их изготовления уменьшить нижний порог скорости, при котором прекращается проникание хвостовых участков кумулятивной струи в преграду. Для экспериментального подтверждения этих данных предложено подробно исследовать пробивную способность хвостовых участков кумулятивных струй с использованием стержней-отсекателей из материала с высокой плотностью. Эти стержни, предназначенные для устранения более скоростной части струи, располагают на небольшом расстоянии от кумулятивного заряда (менее его диаметра). На основании численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред спрогнозированы возможные параметры стержней-отсекателей для получения уединенных «хвостов» кумулятивных струй с различными скоростями лидирующего элемента.*

**Ключевые слова:** взрыв, кумулятивный заряд, кумулятивная струя, пробивное действие, критическая скорость, эффективная скорость, стержень-отсекатель

**Введение.** Современные кумулятивные заряды (КЗ) с медной конической облицовкой кумулятивной выемки при использовании прецизионной технологии их изготовления способны пробивать высокопрочные стальные преграды толщиной примерно  $10d_0$  ( $d_0$  — диаметр заряда) [1–3]. Преграда пробивается высокоскоростной кумулятивной струей (КС), формирующейся при схлопывании облицовки под действием продуктов детонации заряда взрывчатого вещества [4, 5]. Сформировавшаяся КС при движении в свободном полете вследствие существующего в ней градиента осевой скорости сначала растягивается с сохранением сплошности, а затем по причине развития пластической неустойчивости распадается на множество отдельных, уже недеформирующихся (безградиентных) элементов [6–8]. Распределение скорости по длине КС обычно близко к линейному при скорости «головы» струи на уровне 10 км/с. К основным факторам, влияющим на пробивное действие КС при условии ее идеальной прямолинейности, относятся плотности материалов струи и преграды, прочностные свойства преграды и длина струи [2, 3].

Технологические погрешности изготовления КЗ, такие, например, как разнотолщинность облицовки в окружном направлении, некруглость поперечных сечений облицовки, разноплотность заряда взрывчатого вещества, смещение инициирующего узла от оси заряда и т. п.,

приводят к тому, что участки КС в момент формирования при схлопывании облицовки приобретают импульс в боковом (от оси заряда) направлении [2, 9–11]. Как следствие, происходит снижение пробивной способности КС, так как ее участки из-за бокового дрейфа отклоняются от строго соосного следования друг за другом (струи искривляется). В результате участки, находящиеся ближе к «хвосту», могут столкнуться со стенками отверстия в преграде, пробитого предыдущей частью струи, не достиг его дна и не проучаствовать в дополнительном углублении пробойны [12–15].

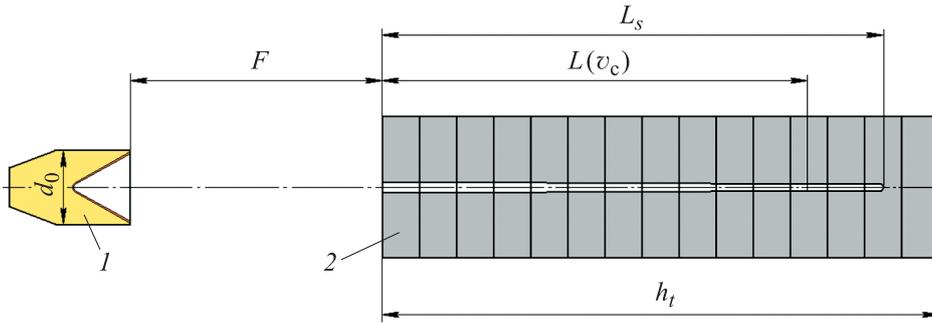
Для обеспечения высокого пробивного действия КЗ необходимо повышать уровень их прецизионности, что приводит к существенному удорожанию технологического процесса изготовления зарядов. В то же время ясно, что существует предельно возможная глубина пробития преграды, которая уже не может быть увеличена путем дальнейшего повышения точности изготовления КЗ. Предельно возможное пробитие КЗ обеспечивается в том случае, когда созданы условия для участка в углублении пробойны всеми способными к этому участками КС. Однако потенциальная пробивная способность различных участков КС неодинакова, и для хвостовых участков со скоростями ниже 3...4 км/с она существенно зависит от их скорости, снижаясь с уменьшением последней [2]. Поэтому для рационального выбора точности изготовления КЗ необходима информация о вкладе в общую глубину пробития преграды участков КС с различными скоростями.

Информация о пробивной способности хвостовых участков КС необходима и при выборе рациональных режимов внешних воздействий на КЗ, которые могут осуществляться на различных стадиях его функционирования и быть направлены на управление процессом распада КС в целях как снижения, так и повышения ее пробивного действия. К числу таких воздействий относятся, например, нагрев облицовки перед подрывом КЗ для повышения пластичности ее материала [16], а также электромагнитные воздействия в форме пропуска по КС электрического тока для ее преждевременного разрушения [17, 18] или в форме создания аксиального магнитного поля либо на пути движения струи для стабилизации ее растяжения и увеличения предельного удлинения [19, 20], либо в облицовке КЗ перед его подрывом, за счет чего, в зависимости от интенсивности поля, возможно достижение как положительного, так и отрицательного эффекта относительно глубины пробития преграды [21–23].

Цель настоящей работы — выбор и обоснование метода экспериментального определения пробивной способности хвостовых участков КС.

**Эффективная и критическая скорости кумулятивной струи.** При экспериментальных исследованиях пробивного действия различных участков КС на определенном удалении  $F$  от КЗ располагают

преграду толщиной  $h_i$  (рис. 1), составленную из отдельных пластин относительно небольшой толщины, между которыми устанавливают электроконтактные датчики. С их помощью определяют время пробития каждой пластины и, соответственно, скорость проникания КС при пробитии пластин, находящихся на различном удалении от лицевой поверхности преграды.



**Рис. 1.** Схема экспериментов по определению пробивного действия кумулятивного заряда:

1 — кумулятивный заряд; 2 — преграда из пластин с размещенными между ними электроконтактными датчиками;  $L_s$  — полная глубина проникания в стандартных условиях

Скорость струи затем восстанавливается по скорости проникания ее участков, обычно на основе модифицированного уравнения Бернулли [2], с пренебрежением прочностными свойствами материала КС (прочность материала струи обычно существенно меньше прочности преграды), приводящего к следующей взаимосвязи между указанными скоростями:

$$v = u + \sqrt{u^2/\gamma + v_{cr}^2}. \quad (1)$$

Здесь  $v$  — скорость участка КС;  $u$  — скорость проникания этого участка;  $\gamma$  — параметр, характеризующий соотношение плотностей материалов струи  $\rho_j$  и преграды  $\rho_t$ ,  $\gamma = \rho_j/\rho_t$ ;  $v_{cr}$  — критическая скорость струи, определяемая с использованием динамической твердости преграды  $H_d$  по формуле

$$v_{cr} = \sqrt{2H_d/\rho_j}, \quad (2)$$

и соответствующая скорости, при которой проникание КС прекращается вследствие прочностного сопротивления преграды.

По результатам проведения экспериментов в указанной постановке задачи может быть определена зависимость  $L(v)$ , где  $L$  — глубина пробития преграды частью КС со скоростями, которые выше