

**В. Д. ЗАХМАТОВ**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры “Экстремальные процессы в материалах и взрывобезопасность”, Институт военно-технического образования и безопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29; e-mail: zet.pulse@gmail.com)

УДК 654.924.5

## РАСПЫЛЕНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ОГНЕТУШАЩЕГО ПОРОШКА И ВОДЫ ВЫСТРЕЛОМ ИЗ СТВОЛОВ ИЛИ ЗАЛПОМ ИЗ МНОГОСТВОЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ

Рассматриваются результаты преимущественно экспериментальных исследований процессов распыления огнетушащих порошков и огнетушащих жидкостей — воды выстрелом из ствольных устройств и залпом из многоствольных модулей. Получены эмпирические зависимости начальной скорости, конечной дальности и площади эффективного огнетушащего воздействия фронта газопорошкового вихря и газоводяного шквала от соотношения масс распылительного порохового заряда и распыляемого огнетушащего состава, конструкции ствола, количества и схем расстановки стволов, участвующих в залпе. Обоснован механизм распространения и аэродинамического разрушения импульсного газодисперсного континуума. Найден оптимальный диапазон массовых соотношений, позволяющих достичь максимальных значений дальности и площади распыления и тушения для определенного калибра и длины стволов.

**Ключевые слова:** экспериментальное моделирование; природные вихри; песчаные бури; огнетушащий порошок; водяной шквал; распыление выстрелом; распыление залпом; ствольная система; многоствольный модуль; динамика многофазных реагирующих сред; ударная волна; горение.

**DOI:** 10.18322/PVB.2015.24.07.61-70

### Введение

С 1979 г. в целях разработки принципиально новых пожарных и защитных стационарных ствольных систем, многоствольных модулей, переносных и возимых вручную стволов и мобильных многоствольных модулей на гусеничных и колесных шасси проводились полигонные исследования в реальном масштабе и времени по струйному распылению огнетушащих и защитных порошков (ОП), жидкостей (ОЖ), гелей, сыпучих, вязких агентов и материалов выстрелами из ствольных систем и залпами из многоствольных модулей (ММ) [1, 2]. С 1992–1994 гг. на практике применяется ряд конструкций многоствольных пожарных установок, в частности 50-ствольная установка “Импульс-3” на шасси танка. Более 15 таких установок успешно эксплуатируются в объектовых пожарных частях, охраняющих атомные электростанции (Чернобыль, Балаково), нефтегазовые разработки, перерабатывающие заводы, хранилища (Уфа, Кумертау, Башкортостан; Сызрань, Самарская обл.; Гнедино, Черниговская обл.; Полтава), химические производства на территории России и Украины (Норильск, Черкассы). По мощности и огнету-

шащей эффективности воздействия они многократно превосходят наиболее совершенные образцы традиционных пневматических и гидравлических пожарных машин [3]. Однако тушение крупных пожаров, например лесных и промышленных, требует более точного определения начальных и текущих параметров процесса распространения газодисперсного вихря для составления таблиц данных по огнетушащему вихревому распылению выстрелами и залпами из нескольких стволов [4, 5]. Основная цель, которая при этом преследуется, — повышение стабильности распыления ОП и ОЖ (повторяемость от распыления к распылению таких параметров, как дальность распыления и площадь накрытия), повышение равномерности накрытия при соблюдении необходимой концентрации распыляемого состава для выполнения функциональной задачи, например тушения очагов пожара. Это позволит не только улучшить параметры струйного метания и повысить эффективность тушения, но и, главным образом, осуществить более эффективное наведение на цель операторами импульсных многоствольных модулей.

Для теоретического описания импульсной газодисперсной струи, образующейся при выбросе порошка из ствола, наиболее приемлемы методы механики многофазных сред [5–7]. Однако значительные сложности при математическом моделировании нестационарного двухфазного потока, в частности отсутствие точных данных по взаимодействию фаз потока между собой и с окружающей средой, не дают возможности создать корректную модель рассматриваемого процесса [8–10]. В [2, 3] приведены результаты исследований метания огнетушащего порошка марок ПСБ-3 и “Пирант-А” из относительно коротких (длиной до 10 калибров) труб, имеющих калибры 100, 130 и 200 мм.

Следующая серия экспериментов проводилась на хорошо оборудованном полигоне с масштабными ровными бетонными площадками, траверсами и комплексом современной измерительной аппаратуры для испытания партий специальных промышленных изделий. ОП распылялся выстрелом из непригодных для штатных испытаний (списанных) артиллерийских стволов калибром 76, 100, 122, 152 и 203 мм, длиной 10–35 калибров. Стандартные для этих артиллерийских систем гильзы снаряжали сначала пороховыми распылительными зарядами из быстросгорающих марок пороха, например дымного ДРП-1, используемого для салютных выстрелов, а затем ОП с размерами частиц 20–50 мкм. Для воспламенения зарядов применяли стандартные капсули-воспламенители, используемые в артиллерийских гильзах. Заряд размещали на дне гильзы и плотно изолировали пыжом из слоя картона и пороллона толщиной 20 мм. При этом массу навески порошка выбирали таким образом, чтобы гильза была заполнена на 80–90 % внутреннего объема. Зарядку артиллерийского орудия осуществляли по обычной схеме холостого выстрела. Артиллерийские орудия располагали на ровной бетонированной площадке возле траверса так, чтобы распыление осуществлялось в пределах бетонированной площадки и можно было наблюдать визуально и посредством видеосъемки фиксировать процесс распыления.

Рассмотрение ускорения диспергируемого агента — жидкого, порошкового или гранулированного — в рамках теории механики многофазных сред [4, 6] позволяет следующим образом описать процессы образования и распространения огнетушащей двухфазной газодисперсной струи. При ударе волны пороховых газов в зоне релаксации (за передним скачком параметров) масса агента постепенно прогревается и вовлекается в движение, а пороховые газы при этом притормаживаются. Динамические и тепловые возмущения, вносимые частицами агента в несущую газовую фазу, догоняют передний ударный фронт газа, проходящий сквозь порошковую массу, и вызывают

его затухание. Если представить массу агента в стволе в виде ряда слоев, то волна газов проходит сквозь каждый из них лишь частично, словно сквозь полупроницаемую стенку. В процессе проникновения пороховых газов происходит ускорение диспергированной массы агента и на выходе из ствола образуется однородная двухфазная струя. При этом часть продуктов взрыва обгоняет поток и образует ударный газовый фронт, за которым движется спутная газодисперсная часть струи, или струйный вихрь. Ударный фронт быстро теряет скорость под действием аэродинамического сопротивления. Газодисперсная струя сначала подпирает газовый фронт, а затем обгоняет его. После уравнивания скоростей частиц агента и частиц газа последние, как более мелкие, быстро теряют скорость и отстают. Теперь уже структурный скелет частиц агента во фронте струи действует на газовую волну подобно подпирающему полупроницаемому поршню. Лишь с этого момента встречный поток воздуха проникает внутрь струи, вытесняя пороховые газы и тормозя поток, но проникновение и торможение происходит значительно медленнее, чем в водяной или порошковой струе, в которой отсутствует несущая газовая фаза.

Текущие параметры газодисперсной струи определяли по материалам киносъемки. Камеру располагали перпендикулярно траектории движения струи на одной высоте со стволом — 1,5 м над бетонным покрытием. Для определения расстояния использовали масштабные реперы высотой 2 м, устанавливаемые на расстоянии 5 м друг от друга. Для стволов каждого калибра проведено по пять опытов.

Измерения начинали через 62,5 мс после выстрела, поскольку именно с этого момента по материалам киносъемки можно было с необходимой точностью определить скорость потока. Анализировать характер изменения скорости потока в период времени  $t < 62,5$  мс не представлялось возможным, так как большую часть этого временного отрезка поток движется в канале ствола.

Установлены изменения во времени текущих значений дальности распространения фронта газодисперсного вихря  $L$  (м) и площади его эффективного воздействия  $S$  (м<sup>2</sup>) в зависимости от массы порохового заряда при распылении 10 кг мелкодисперсного ОП из ствола калибром 198 мм и длиной 2000 мм (10 калибров) (рис. 1). На рис. 2 показана зависимость дальности распространения газовой воды, полученной при распылении выстрелом 10 л технической воды, и площади его эффективного воздействия от начальной скорости фронта.

Исследована зависимость изменения начальной и текущей скорости и дальности распространения фронта вихря от массового соотношения  $p = m/M$  (где  $m$  — масса порохового заряда;  $M$  — масса мета-

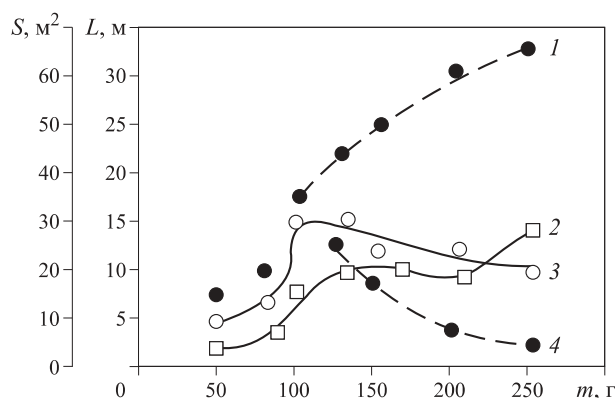


Рис. 1. Зависимость дальности движения газопорошкового конгломерата (2, 3) и площади его эффективного огнетушащего воздействия (1, 4) от массы заряда  $m$ : 1, 3 — расчетные; 2, 4 — экспериментальные

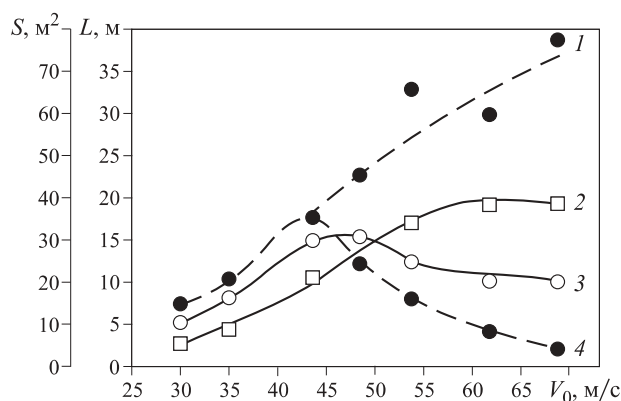


Рис. 2. Зависимость дальности движения газовой воды шквала (2, 3) и площади его эффективного воздействия (1, 4) от начальной скорости распыления  $V_0$ : 1, 3 — расчетные; 2, 4 — экспериментальные

емого огнетушащего состава). Анализ полученных данных в рамках теории механики многофазных сред [4, 6] позволяет предложить следующие версии механизма импульсного распыления выстрелом. При  $p = 0,021$  процесс формирования газопорошковой струи (смещение фаз и энергообмен — проникновение пороховых газов в цилиндрическую массу огнетушащего порошка и ускорение дисперсной фазы) завершается в стволе, так как сразу за его срезом начальная скорость газопорошковой струи  $V_0 = 25$  м/с начинает уменьшаться.

Равномерная структура газодисперсной струи и сравнительно низкая скорость  $V_0$  обуславливают малую дальность распространения струи. При  $p = 0,033$  зафиксировано изменение характера распространения газодисперсной струи. За срезом ствола в течение 0,03 с скорость фронта струи  $V_0 = 45$  м/с продолжает незначительно увеличиваться (до 50 м/с), а затем в течение 0,4 с наблюдается падение скорости, торможение и разрушение струи. При этом за летящим фронтом, движение которого останавливается не далее чем за 20 м от среза ствола, остается спутная

струя с более низкой скоростью, уменьшающейся по мере удаления от фронта. Анализ киноматериалов позволяет предположить, что фронт струи состоит из плотной массы ОП или ОЖ, подпрессованной взрывной волной в стволе. За его срезом спутная газодисперсная струя, содержащая несущую скоростную газовую фазу, придает ускорение уплотненному фронту до момента выравнивания их скоростей. Этот процесс подобен механизму разрушения падающей капли в поднимающемся встречном потоке воздуха [4, 6]. На конечном этапе полета струи происходит полное разрушение фронта струи, увеличение его диаметра в 1,5–2 раза и резкое торможение. Этот эффект можно объяснить потерей аэродинамической устойчивости фронта струи и проникновением воздуха внутрь фронта, что вызывает его быстрое разрушение, распыление и торможение.

При  $p = 0,04$  увеличение скорости фронта ОП или ОЖ до 100 м/с происходит за время 0,1 с, которое гораздо больше, чем в рассмотренном выше случае. Время существования и дальность полета конгломерата также в 1,5 раза больше, что можно объяснить более плотной и устойчивой аэродинамической структурой порошкового конгломерата. А вот интенсивность аэродинамического разрушения конгломерата, падение скорости и поперечные размеры потока значительно меньше, чем в предыдущем случае.

При  $p = 0,091$  характер процесса распространения потока резко изменяется. Сразу за срезом ствола при начальной скорости 120 м/с начинается ее резкое падение и интенсивное аэродинамическое разрушение газопорошковой струи. Из ствола вылетает не газодисперсный вихрь со сплошным фронтом, а несколько мелких конгломератов, а за ними — спутная неравномерная газодисперсная струя. Мелкие конгломераты быстро разрушаются, оставляя по траектории своего полета узкие, быстро разрушающиеся газодисперсные струйки.

Оптически плотная струйная среда, вылетающая из ствола вслед за конгломератами, быстро тормозится, разрушается и увеличивается в диаметре. Можно предположить, что сильная взрывная волна еще в стволе частично прорывается сквозь распыляемую массу. На остриях струй прорывающихся пороховых газов образуются спрессованные ими мелкие порошковые или жидкостные фрагменты. Таким образом, по характеру процессов распространения этих струй можно предположить наличие, по меньшей мере, трех основных механизмов распространения импульсного газодисперсного вихря.

При первом механизме относительно низкоскоростная струя как бы “выливается” из ствола. Она характеризуется отсутствием фронта и уплотненного взрывной волной в стволе порошкового конгломерата, поэтому на выходе из ствола сразу происходит ин-

тенсивное разрушение и торможение струи под действием аэродинамического сопротивления. Струя такого вида распространяется параллельно площади горения, покрывает значительную площадь и осаждается на ней в виде равномерного слоя порошка, не возмущая (не турбулизируя) при этом поверхность горящего материала. Такое воздействие в наибольшей степени эффективно при тушении розливов горящих жидкостей.

Второй механизм отличается от первого оптимальной интенсивностью взрывной волны, которая обеспечивает формирование в канале ствола конгломерата из ОП, устойчивого к аэродинамическому воздействию (рис. 3), что дает следующие преимущества:

- защиту струи от разрушительного аэродинамического и тормозящего воздействия, что стабилизирует процесс торможения и разрушения струи;
- увеличение дальности подачи струи и площади огнетушащего или другого защитного воздействия порошкового потока [1, 2], которое обеспечивается преимущественно фронтом потока. Главным косвенным показателем действия фронта является характер напыления порошка по площади воздействия.

Такие газопорошковые вихри обладают универсальным огнетушащим действием: могут создавать удлиненные, плоские, изолирующие завесы (газопорошковые среды), заполняющие заданные ограниченные объемы. Вихри с мощным уплотненным фронтом эффективны для тушения развитого горения конденсированных материалов и сложных горящих поверхностей, когда необходимо обеспечить напыление огромного множества частиц огнетушащего состава, проникающих в обугленный высокотемпературный поверхностный слой горящего материала.

Третий механизм отличается наиболее интенсивным распылением и торможением газодисперсной

струи. Разрушение массы ОП (ОЖ) начинается, видимо, еще в стволе, когда струи пороховых газов прорывают слой ОП (ОЖ), поэтому на срезе ствола образуется газодисперсная струя без уплотненного фронта и со значительной объемной долей несущей газовой фазы. Структура струи и механизм ее распространения ближе к первому механизму, но в отличие от него за срезом ствола струя подвергается не только аэродинамическому, но и внутреннему газодинамическому разрушающему воздействию. В результате данный механизм характеризуется наиболее интенсивным процессом разрушения и торможения струи. Вследствие высокой скорости распространения значительного запаса кинетической энергии и предположительно мультивихревой структуры (газовые струи с малой объемной долей порошка, мелкие порошковые конгломераты, газопорошковая струя со значительной объемной долей порошка) такая неоднородная нестационарная газопорошковая струя в наибольшей степени пригодна для объемного огнетушащего или взрывопредотвращающего воздействия, особенно в замкнутых ограниченных объемах.

Анализ наблюдений за процессом импульсного распыления — визуальных и по материалам видеосъемки — позволяет описать данный процесс следующим образом. При выбросе ОП (ОЖ) или низкоплотных гранул сорбента из ствола образуется равномерный, газодисперсный, вихревой, локальный фрагмент (континуум, если пользоваться терминологией механики многофазных сред) с мощной несущей газовой фазой. Кинетическая энергия газодисперсного фрагмента позволяет ему распространяться на значительное расстояние и сохранять целостность своей структуры на протяжении почти всей длины траектории полета. На всем протяжении траектории полета происходит равномерное аэродинамическое разрушение с боковой поверхности этого газодисперсного фрагмента с сопутствующим эффектом проникающего, равномерного напыления капель (частиц,



Рис. 3. Реализация второго механизма — распыление 20 кг песка выстрелом из трех стволов на дальность до 45 м

гранул) на значительной площади, например на пленке розлива нефти на поверхности водоема. Фрагмент как бы скользит по поверхности пленки, оставляя за собой равномерное сплошное покрытие гранулами сорбента участка пленки, чаще всего каплевидного, расширяющегося по траектории от среза ствола. Такое воздействие обеспечивает хороший контакт гранул с нефтяной пленкой и, соответственно, эффективное впитывание нефти порами гранул.

Изменение массы распылительного заряда позволило получить зависимости площади и дальности распыления от данного параметра. Их анализ показал наличие явно выраженных диапазонов оптимальных значений массы распылительного заряда и соответствующих начальных скоростей распыления, при которых достигаются наибольшие и стабильные значения площади и дальности эффективного воздействия. Отмечено, что от начальных значений массы зарядов и скорости распыления до указанного диапазона их оптимальных величин происходит устойчивое возрастание дальности распыления, площади равномерного покрытия и, соответственно, повышение эффективности локализации (нейтрализации) нефтяной пленки. После достижения максимальных оптимальных значений из указанного диапазона начинают проявляться различия в дальности и площадях распыления и эффективности функционального воздействия. Эти различия возрастают по мере дальнейшего повышения начальной скорости распыления  $V_0$ .

При малых значениях  $m$  и  $V_0$  площадь распыления  $S_p$  увеличивается по мере повышения начальной скорости распыления  $V_0$  и в результате практически совпадает с площадью эффективного воздействия  $S$ . Однако после некоторого значения  $V_0$ , обеспечивающего максимальные значения дальности  $L_{p,p}$  и площади  $S_{p,p}$  равномерного распыления, эти величины главных функциональных характеристик импульсного распыления сначала стабилизируются в относительно небольшом диапазоне  $V_0$ , а затем начинают снижаться по мере дальнейшего увеличения  $V_0$ . При этом все более возрастает разница между продолжающей увеличиваться замедляющимся темпом площадью фрагментарного распыления  $S_{p,ф}$  (что обеспечивает лишь малоэффективную фрагментарную локализацию и дезактивацию нефтяной пленки  $S$ ), прогрессивно уменьшающейся площадью сплошного распыления  $S_{сп}$  и, соответственно, площадью эффективного сплошного воздействия, локализующего и дезактивирующего нефтяную пленку. При этом условием эффективного воздействия является равномерное распределение сорбента по поверхности нефтяной пленки при удельном расходе от 15 до 25 г/м<sup>2</sup>.

Это происходит по той причине, что характер распыления изменяется: появляется эффект фрагментарности, т. е. несплошного и неравномерного накрытия площади распыляемыми гранулами или накрытия ряда участков с малой плотностью, с удельным расходом менее минимального, обеспечивающего полную локализацию нефтяной пленки на единице площади. По мере дальнейшего роста массы заряда и начальной скорости распыления увеличивается суммарная площадь фрагментарного и сокращается суммарная площадь сплошного распыления при удельном расходе более минимального и, соответственно, снижается эффективность функционального воздействия. Важно, что при этом прогрессивно уменьшается абсолютная величина площади сплошного эффективного распыления и функционального воздействия (тушения, локализации и дезактивации). Установление закономерности возрастания, стабилизации и последующего уменьшения площади эффективного воздействия по мере возрастания начальной скорости распыления позволяет утверждать, что достоверно определен рабочий практический диапазон значений начальных параметров потока, обеспечивающих оптимальное, т. е. наиболее эффективное, импульсное функциональное воздействие (локализацию и нейтрализацию) на разливы нефти.

Получены зависимости дальности распространения струеобразных вихрей из стволов различных длин и калибров от параметра  $V_0$ . Из них видно, что оптимальным является диапазон значений  $V_0 = 60 \div 100$  м/с, причем оптимальные значения  $V_0$  возрастают с увеличением калибра ствола. При увеличении длины ствола заметно возрастает дальность распространения струи при определенной величине  $V_0$ . Это дает основание сделать вывод о том, что увеличение массы метаемого порошка и времени взаимодействия в стволе пороховых газов с метаемым агентом повышает степень уплотненности конгломерата и, как следствие, аэродинамическую устойчивость фронта вихря — его живучесть на траектории полета.

Таким образом, установлено, что имеется оптимальный диапазон массовых соотношений метательного заряда и метаемого огнетушащего состава, позволяющий достичь максимальной дальности подачи газопорошковой струи. Этот диапазон справедлив для различных калибров и длин стволов. Длительность процесса распространения газопорошковой струи, ее аэродинамического разрушения, торможения и превращения в малоподвижное газопорошковое облако не превышает 0,5–0,6 с. Этот показатель справедлив для различных масс распыляемых порошков. Данные результаты дают возможность оптимизировать процесс создания газопорошковых струй и определить время их функционального воздействия.

Анализ распыления агентов выстрелом из одного ствола позволил сделать следующие выводы:

1. В данных сериях экспериментов удалось однозначно определить оптимальные диапазоны значений  $V_0$  и  $m$  для определенной массы распыляемого защитного агента (воды, порошка или сорбента). Эти диапазоны обеспечивают недостижимую другими методами и техникой дальность распыления выстрелом из одного ствола или залпом из системы стволов массы агента в определенном диапазоне значений  $V_0$  и  $m$  и равномерное распределение его на значительной площади (до  $10\text{--}10^4\text{ м}^2$ ) при диапазоне удельных расходов, обеспечивающих сплошной масштабный эффект тушения, локализации или нейтрализации. Например, 1,5 кг сорбента распыляются на расстояние до 12 м и равномерно распределяются по площади до  $35\text{ м}^2$  при диапазоне удельных расходов от 15 до  $25\text{ г/м}^2$ . Поэтому данный режим распыления можно классифицировать как эффективный и оптимальный. Внимательный осмотр зоны нефтяного разлива, покрытой равномерным слоем распыленного сорбента, показал, что большая часть гранул сорбента (до 80–90 %) эффективно впитывает и перерабатывает нефтяную пленку менее чем за 2 ч, как и в случае ручного распыления сорбента. При этом потери сорбента в пределах 10–20 % от исходной распыляемой массы в 5–20 раз меньше, чем потери при распределении сорбента на площади  $35\text{ м}^2$  традиционным методом — вручную с помощью лопаты или совка. Залповое распыление сорбентов демонстрирует высокую дальность и значительные масштабы распыления (рис. 4), практически недостижимые при использовании пневматической и механической техники.

2. Установлены предельные значения дальности и площади импульсного распыления жидких, порошковых, низкоплотных гранулированных агентов из одного ствола, которые невозможно (и нецелесообразно) значительно повысить путем простого увеличения массы распыляемого состава и распылительного заряда, а также начальной скорости распыления  $V_0$ . Данные показатели значительно превышают ранее имевшиеся, но очевидно, что они недостаточно велики, чтобы обеспечить широкое практическое применение новой техники для тушения и защиты. Необходимо искать новые пути для более значительного повышения основных показателей эффективности импульсного распыления огнетушащих и защитных агентов.

Анализ предшествующих исследований показал наибольшую перспективность залпового распыления для увеличения дальности и площади импульсного распыления агентов [1, 2] (см. рис. 4). Серия экспериментов проводилась с целью определения возможности посредством залпового распыления уве-



Рис. 4. Фрагменты импульсного распыления 1,5 кг биосорбента плотностью  $0,15\text{ г/см}^3$  из одного ствола (а) и залпового распыления 7,5 кг биосорбента из пяти стволов (б)

личить дальность и площадь распыления агентов (жидких, порошковых, гранулированных) по цели: на горящую площадь, в токсичное или радиоактивное облако, на нефтяную пленку и др. Наибольшее практическое значение имели зависимости изменения дальности и площади распыления агентов по цели от расстояния между соседними стволами, участвующими в залпе, и их общего количества.

Испытания проводились в широком диапазоне погодных и климатических условий — от спокойной погоды до ветреной, с часто меняющимися направлением и скоростью ветра, что достаточно хорошо имитирует реальную, наиболее вероятную обстановку открытого моря. При этом из-за сильного ветра затруднительно корректно фиксировать динамику изменения размеров и формы фронта вихря, насыщенного каплями, частицами или гранулами агента. Поэтому фиксировались только визуально наблюдаемые и фиксируемые на видео очевидные результаты функционального воздействия: площадь и дальность распыления агента на поверхности земли или по цели (потушенной площади или покрытой слоем гранул сорбента поверхности водоема с фрагментами нефтяной пленки).

Сначала экспериментально определялось оптимальное расстояние между двумя соседними стволами, инициируемыми одновременно в одном залпе. Анализ полученных данных позволил установить,

что оптимальными схемами расстановки стволов в залпе являются: в одном ряду — соседние через 1 ствол и в двух рядах — шахматная расстановка. Для определения оптимального количества стволов, участвующих в залпе из многоствольного модуля, выбраны следующие структурные схемы их расстановки:

- 2 ствола в одном ряду, находящиеся через 1 ствол;
- 3 ствола в одном ряду, находящиеся через 1 ствол;
- 4 ствола в “шахматной” компоновке: по 2 в различных рядах;
- 5 стволов в “шахматной” компоновке, расположенные снизу вверх: 3 + 2;
- 6 стволов по 3 в каждом ряду, расположенные один над другим по вертикали и через 1 ствол по горизонтали;
- 7 стволов, расположенные снизу вверх: 4 + 3;
- 8 стволов, расположенные снизу вверх: 4 + 4;
- 9 стволов, расположенные снизу вверх: 5 + 4.

Таким образом, очевидно, что при количестве стволов более пяти экспериментально установленные оптимальные расстояния между ними в одном горизонтальном ряду и в соседних рядах по вертикали нарушаются пропорционально увеличению количества стволов в залпе. Это не может не сказаться отрицательно на конфигурации получаемого при залпе газодисперсного вихревого фрагмента и на площади его эффективного воздействия. Анализ результатов экспериментов данной серии убедительно показал главное преимущество импульсного залпового распыления — свойственное только газодисперсным вихрям взаимное усиление и слияние при оптимальном взаимодействии его элементов. Такое взаимодействие позволяет повысить масштабы суммарного воздействия вихря в 1,5–2,5 раза по сравнению с арифметической суммой площадей воздействий его отдельных элементов. Это преимущество позволяет значительно увеличить дальность функционального воздействия вихря до 53 м (в 4,5 раза больше

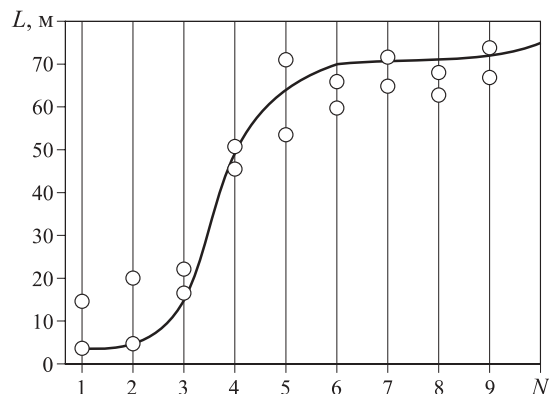


Рис. 5. Зависимость дальности распыления от количества стволов  $N$ , участвующих в залпе

по сравнению с распылением выстрелом из одного ствола) и площадь равномерного распыления биосорбента до 450 м<sup>2</sup> при залпе из пяти стволов, расположенных в шахматном порядке (в 2,3 раза больше, чем сумма отдельных площадей эффективного воздействия при последовательном распылении из пяти стволов). Для сравнения, залповое воздействие боевых ракет или снарядов увеличивает масштабы их площади поражения не более чем в 1,5 раза по сравнению с арифметической суммой площадей поражения такого же количества отдельных взрывов ракет и снарядов. Дальность их полета при залпах не увеличивается. Есть основания предположить, что импульсно-распылительные ММ с боеприпасами для них вполне сравнимы по надежности, стабильности и масштабам воздействия с современными реактивными системами залпового огня.

Для версии распыления низкоплотного сорбента установлено оптимальное количество стволов от 4 до 6 в залпе из ММ–10, что позволяет обеспечить максимальную площадь равномерного накрытия биосорбентом при его минимальном удельном расходе от 15 до 25 г/м<sup>2</sup> (рис. 5). Визуальный регулярный, с интервалом 10 мин, осмотр разлива нефтепродукта, покрытого гранулами биосорбента, в течение 3 ч



Рис. 6. Испытания 9-, 20- и 30-ствольных модулей в Китае



после распыления позволил зафиксировать эффективную работу более 90 % распыленной массы биосорбента.

Фронт потока скользит по поверхности нефтяной пленки, имея с ней непосредственный контакт по всей траектории своего распространения, и происходит проникающее сплошное напыление — внедрение частиц адсорбента в слой нефтяной пленки по всей ее площади, над которой проходит фронт потока. Такой метод напыления адсорбента является универсальным для распыления самых различных видов сорбентов по площади экологически вредного разлива или горячей жидкости. Распыление жидких агентов по заданному объему возможно также с помощью импульсных систем распыления. Импульсный вихрь широким фронтом проходит по всему заданному объему, при этом равномерно распыляется агент, который движется не только поступательно, но и вихреобразно, что значительно повышает эффективность тушащего, локализирующего, нейтрализующего действия частиц агента по объему экологически опасного газа или аэрозоля.

Достаточно убедительные испытания были проведены в декабре 2014 г. с целью демонстрации возможностей суммарного действия различных ММ по созданию многократной защиты опасного участка. В испытаниях участвовали три ММ: ММ-20 — первый залп с дистанции 100 м, ММ-30 — второй залп с дистанции 120 м, ММ-9 — третий залп с дистанции 85 м (рис. 6). Модельный очаг был потушен первым же залпом, а следующие два лишь продемонстрировали реальную, технически несложную и недорогую реальную возможность многократной, надежной, безотказной, программируемой и гибко управляемой

защиты заданного опасного участка. Защита может быть осуществлена комбинированным способом, включающим: 1) разрушение и охлаждение обугленной высокотемпературной поверхности горения; 2) ингибирование; 3) сбивание пламени; 4) изолирование от доступа теплового потока и кислорода. Это может быть достигнуто путем программируемого распыления различных огнетушащих составов залпами по различным схемам с заданными интервалами.

Таким образом, анализ экспериментальных результатов позволил получить эмпирические зависимости начальной скорости, конечной дальности и площади эффективного огнетушащего воздействия фронта газопорошкового вихря и газовойдыного шквала от соотношения масс распылительного порохового заряда и распыляемого огнетушащего состава, конструкции ствола, количества и взаимной расстановки стволов, участвующих в залпе. Обоснован механизм распространения и аэродинамического разрушения импульсного газодисперсного континуума. Найден оптимальный диапазон массовых соотношений, позволяющих достичь максимальных значений дальности и площади распыления и тушения для определенного калибра и длины стволов. Убедительно показана высокая перспективность дальнейших исследований ММ и их практического применения при защите крупноразмерных цехов, ангаров, нефтедобывающих платформ, открытых технологических установок, танкеров, оснащения аварийно-спасательных кораблей и шасси пожарных и военных машин для создания новых мобильных пожарных и аварийно-спасательных машин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Silnikov M. V., Chernyshov M. V.* The interaction of Prandtl-Meyer wave and quasi-one-dimensional flow region // *Acta Astronautica*. — 2015. — Vol. 109. — P. 248–253. DOI: 10.1016/j.actaastro.2014.11.010.
2. *Uskov V. N., Chernyshov M. V.* Extreme shockwave systems in problems of external supersonic aerodynamics // *Thermophysics and Aeromechanics*. — 2014. — Vol. 21, No. 1. — P. 15–30. DOI: 10.1134/s086986431401003x.
3. *Silnikov M. V., Chernyshov M. V., Uskov V. N.* Two-dimensional over-expanded jet flow parameters in supersonic nozzle lip vicinity // *Acta Astronautica*. — 2014. — Vol. 97. — P. 38–41. DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.12.010.
4. *Захматов В. Д.* Техника многоплановой защиты. — Киев : ИПМ АН СССР, 1991. — 124 с.
5. *Захматов В. Д., Цикановский В. Л., Кожемякин А. С.* Струйное метание огнетушащих порошков из стволов // *Физика горения и взрыва*. — 1998. — Т. 34, № 1. — С. 106–110.
6. *Нугматулин Р. И.* Динамика многофазных сред: в 2 ч. — М. : Наука, 1987. — Т. 1. — 464 с.; т. 2. — 360 с.
7. *Захматов В. Д.* Ударно-волновые механизмы импульсного пожаротушения // *Сб. докладов 3-го Минского международного colloквиума по физике ударных волн, горения и детонации*. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова, 12–15 ноября 2013 г. — Минск, 2013. — С. 100–101.
8. *Авдеевский В. С., Ашратов Э. А., Иванов А. В., Пирумов У. Г.* Газодинамика сверхзвуковых неограниченных струй. — М. : Машиностроение, 1989. — 320 с.

9. Дулов В. Г., Лукьянов Г. А. Газодинамика процессов истечения. — Новосибирск: Наука, СО АН СССР, 1984. — 234 с.
10. Bernal L. P., Roshko A. Streamwise vortex structure in plane mixing layer // Journal of Fluid Mechanics. — 1986. — Vol. 170, No. 1. — P. 499–525. DOI: 10.1017/s002211208600099x.

Материал поступил в редакцию 19 декабря 2014 г.

**Для цитирования:** Захматов В. Д. Распыление мелкодисперсного огнетушащего порошка и воды выстрелом из стволов или залпом из многоствольных модулей // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 7. — С. 61–70. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.07.61-70.

English

## PULSE PULVERIZATION OF THIN-DISPERSED EXTINGUISHING POWDER AND WATER BY SHOOT OR VOLLEY OUT OF MULTI-BARRELS MODULES

**ZAKHMATOV V. D.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Extreme Processes in Materials and Explosion Safety Department, Institute of Military Engineering and Safety Research of Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University (Politeknicheskaya St., 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; e-mail address: zet.pulse@gmail.com)

### ABSTRACT

There are investigated the dates of zero speed, maximal range and area of extinguishing influence of the fronts of gas-powder whirly and gas-water squall, created with jet's configuration pulse pulverize and spray out of barrels by shoot and volley. There are proposed the mechanisms of flight and air-destroy of gas-dispersive fronts of whirly and squall. There are showed optimal diapason of maximal values of range and area of: uniform and fragmentary powder's pulverization or water's spray and extinguishing for definitude calibers and long of barrels. There are showed most perspective way of increase range and area of uniform extinguishing — volley spray. It regime showed optimal diapason of maximal values of range and area despite of amount of barrels in the volley. There are proposed same way of improvement traditional fire-hoses by creation and experimental investigation of new unit, made of two and over hoses, closely and parallel mounted, for joint intermediation of neighbored jets.

**Keywords:** experimental modeling; natural whirlwinds; sand storms; extinguishing powder; water squall; pulse-shoot pulverization; volley pulverization; barrel system; multi-barrels module; dynamics of the multiphase reacting environments; shock wave; combustion.

### REFERENCES

1. Silnikov M. V., Chernyshov M. V. The interaction of Prandtl-Meyer wave and quasi-one-dimensional flow region. *Acta Astronautica*, 2015, vol. 109, pp. 248–253. DOI: 10.1016/j.actaastro.2014.11.010.
2. Uskov V. N., Chernyshov M. V. Extreme shockwave systems in problems of external supersonic aerodynamics. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21, no. 1, pp. 15–30. DOI: 10.1134/s086986431401003x.
3. Silnikov M. V., Chernyshov M. V., Uskov V. N. Two-dimensional over-expanded jet flow parameters in supersonic nozzle lip vicinity. *Acta Astronautica*, 2014, vol. 97, pp. 38–41. DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.12.010.
4. Zakhmatov V. D. *Tekhnika mnogoplanovoy zashchity* [Technique of multi-purpose protection]. Kiev, IPM AN USSR Publ., 1991. 124 p.
5. Zakhmatov V. D., Tsikanovskiy V. L., Kozhemyakin A. S. Struynoye metaniye ognetyushashchikh poroshkov iz stvolov [Jet propellant of extinguishing powders from barrels]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1998, vol. 34, no. 1, pp. 106–110.
6. Nigmatulin R. I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase mediums]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Part 1, 464 p. Part 2, 360 p.

7. Zakhmatov V. D. Udarno-volnovyye mekhanizmy impulsnogo pozharotusheniya [Shock-wave mechanism of pulse extinguishing]. *Sb. докладов 3-go Minskogo mezhdunarodnogo kollokviuma po fizike udarnykh voln, goreniya i detonatsii. Institut teplo- i massoobmena im. A. V. Lykova, 12–15 noyabrya 2013 g.* [Book of reports of 3<sup>rd</sup> Minsk International Colloquium for Physics of Blow Wave, Combustion and Detonation. Institute of Heat-mass Transfer named A. V. Lykov, 12–15 November 2013]. Minsk, 2013, pp. 100–101.
8. Avduevskiy V. S., Ashratov E. A., Ivanov A. V., Pirumov U. G. *Gazodinamika sverkhzvukovykh neobratimyykh struy* [Gas-dynamics of high-speed jets]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1989. 320 p.
9. Dulov B. G., Lukyanov G. A. *Gazodinamika protsessov istecheniya* [Gas-dynamic of fluid process]. Novosibirsk, Nauka Publ., Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1984. 234 p.
10. Bernal L. P., Roshko A. Streamwise vortex structure in plane mixing layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 1986, vol. 170, no. 1, pp. 499–525. DOI: 10.1017/s002211208600099x.

**For citation:** Zakhmatov V. D. Raspyleniye melkodispersnogo ognetushashchego poroshka i vody vystrelom iz stvolov ili zalpom iz mnogostvolnykh moduley [Pulse pulverization of thin-dispersed extinguishing powder and water by shoot or volley out of multi-barrels modules]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 7, pp. 61–70. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.07.61-70.



# Издательство «ПОЖНАУКА»

## Предлагает книги

### А. Я. Корольченко, Д. О. Загорский КАТЕГОРИРОВАНИЕ ПОМЕЩЕНИЙ И ЗДАНИЙ ПО ВЗРЫВОПОЖАРНОЙ И ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ



В учебном пособии изложены принципы категорирования помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности, содержащиеся в современных нормативных документах. На примерах конкретных помещений рассмотрено использование требований нормативных документов к установлению категорий. Показана возможность изменения категорий помещений путем изменения технологии или внедрения инженерных мероприятий по снижению уровня взрывопожароопасности и повышению надежности технологического оборудования и процессов.

Пособие рассчитано на студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям “Пожарная безопасность”, “Безопасность технологических процессов и производств”, “Безопасность жизнедеятельности в техносфере”, студентов строительных вузов и факультетов, обучающихся по специальности “Промышленное и гражданское строительство”, сотрудников научно-исследовательских, проектных организаций и нормативно-технических служб, ответственных за обеспечение пожарной безопасности.

121352, г. Москва, а/я 43; тел./факс: (495) 228-09-03; e-mail: mail@firepress.ru