

УДК 621.13.3

О.В. Стаховский<sup>1</sup>, К.В. Корытченко<sup>1</sup>, М.Л. Угрюмов<sup>2</sup>, Ю.А. Скоб<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный технический университет «ХПИ», Харьков<sup>2</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

## СПОСОБ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ В НЕОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

*Предложено новое техническое решение, позволяющее осуществлять инициирование детонации в неограниченном объеме. В основу решения положен метод индукционного ускорения, применяемый в данном случае для ускорения газового потока за фронтом ударной волны. Влияние динамики ускорения газового потока на термодинамические параметры газа за фронтом волны исследовано путем математического моделирования выхода ударной волны из трубы в условиях принудительного изменения скорости выхода струи. Математическая модель позволяет выявить необходимый режим ускорения струи в зависимости от диаметра детонационной трубы и детонационных свойств среды.*

*инициирование детонации, неограниченный объем*

### Введение

Для решения задачи разминирования минных полей объемным взрывом с формированием детонационно-способной смеси в струе отработавших газах силовой установки танка разработано компактное устройство периодического инициирования детонации в неограниченном объеме без использования твердых взрывчатых веществ. В основу технического решения было положено применение детонационной трубы, снабженной устройством импульсного ускорения газового потока за фронтом детонационной волны в период выхода волны в неограниченный объем.

Условия перехода плоской детонации в сферическую исследовались, например, в работе [1]. Установлено, что имеется критический диаметр детонационной трубы, при котором осуществляется дальнейшее развитие детонации в неограниченном объеме. Этот диаметр зависит от размера детонационной ячейки  $\lambda$  и составляет около  $(12 \div 13)\lambda$ , а для некоторых смесей и более. В детонационных трубах процесс перехода горения в детонацию осуществляется на расстоянии, равном нескольким диаметрам трубы. Поэтому, для инициирования детонации в неограниченном объеме при размере детонационной ячейки около 50 мм требуется применение детонационных труб длиной в несколько метров. Такие размеры труб приводят к нецелесообразности их применения для инициации детонации в разрабатываемом способе разминирования.

Условия струйного инициирования детонации в неограниченном объеме исследовались, например, в работе [2]. Механизм струйного инициирования детонации пока является предметом обсуждений. Тем не менее, установлено, что интенсификация вихрей способствует возникновению детонации. Известно, что недорасширенная струя, в процессе своего истечения, формирует области «обратного» течения, что приводит к крупномасштабной турбу-

лентности. Поэтому, в разрабатываемом устройстве предусматривается формирование пересжатой детонационной волны на выходе из трубы, дополнительное импульсное сжатие которой осуществляет плазменный «поршень».

В данной работе представлены результаты математического моделирования развития ударной волны при выходе из трубы в неограниченном пространстве, получаемое при разных режимах принудительного импульсного ускорения потока за волной, с целью определения условий, при которых обеспечивается поддержание интенсивности ударной волны со сферическим фронтом на период прохождения волной длины детонационной ячейки.

### Принцип инициации сферической детонации ускоряемой струей

Полагается, что срыв сферической детонации при инициации детонации с помощью детонационных труб вызван следующей причиной. При выходе из трубы плоская ударная волна переходит в сферическую. При этом изменяется закон затухания ударной волны в зависимости от пройденного расстояния. То есть, интенсивность волны уменьшается не обратно пропорционально пройденному расстоянию, а обратно пропорционально квадрату расстояния. Это приводит к тому, что необходимая интенсивность ударной волны не удерживается на период прохода расстояния, соответствующего длине детонационной ячейки. Это является главным фактором, ведущим к срыву детонации.

По аналогии возникновения детонации в детонационной трубе, где детонационная волна появляется за счет увеличения интенсивности пакета волн сжатия, в разрабатываемом устройстве при выходе ударной волны из детонационной трубы 1 в потоке продуктов детонации создается плазменный «поршень» 2, который электродинамически ускоряется и поджимает продукты детонации к сферическому фронту волны (рис. 1). Очевидно, что в этом случае

скорость движения поршня  $U_1$  должна быть больше скорости распространения ударной волны  $U_2$ . За счет этого компенсируется падение давления за фронтом волны в процессе ее распространения.

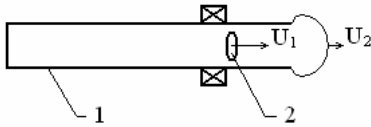


Рис. 1. Схема устройства, реализующего инициацию сферической детонации ускоряемой струей.

### Математическая модель

**Основные уравнения.** В результате структурного анализа течения и декомпозиции полной математической модели рассматриваемого газодинамического процесса было принято допущение о том, что основное влияние на процесс оказывает конвективный массообмен. Для описания процессов смешения двухкомпонентного газа в рассматриваемом случае достаточно использовать усеченные уравнения Навье-Стокса, полученные путем отбрасывания вязких членов (приближение Эйлера с источниковыми членами) [3]. Коэффициент турбулентной диффузии в уравнении изменения концентрации примеси определялся согласно алгебраической модели, предложенной М.Е. Берляндом. Расчетной областью является параллелепипед с прямолинейными образующими, расположенный в правой декартовой системе координат. Расчетная область разбивается на пространственные ячейки, причем размеры граней подбираются в соответствии с характерным размером особенностей расчетной области (шероховатости обтекаемой поверхности, размерностью обтекаемых объектов). В расчетной области объект исследования представлен в форме насадка. Истечение газа происходит из отверстия насадка с заданным расходом.

**Граничные и начальные условия, алгоритм численного решения.** Граничные условия на входе задавались на поверхностях граней вычислительных ячеек, которые примыкают к границам расчетной области и через которые в расчетную область поступает атмосферный воздух. Набегающий поток на входе определялся величинами: полной энтальпии, функции энтропии, направлением вектора скорости потока; относительной массовой плотностью примеси  $Q$  ( $Q \leq 1$ , если поступает газообразное вещество примеси). В ячейках с истечением газа задавался закон изменения расхода примеси на проницаемых границах. В выходных областях задавалось атмосферное давление. В начальный момент времени во всех «газообразных» ячейках расчетной области принимаются параметры окружающей среды. Разработан алгоритм численного решения основных уравнений на базе законов сохранения с использованием схемы распада произвольного разрыва. Совокупность газодинамических параметров во всех ячейках в любой момент времени определялась в рамках интегроинтерполяционного метода С.К. Годунова [4]. Устойчивость конечно-разностной схемы обеспечивается за счет выбора величины шага по времени.

### Результаты моделирования

Результаты моделирования истечения струи при законах с возрастающим и уменьшающимся расходами газа представлены на рис. 2 – 4. Для этих случаев, законы изменения скорости на срезе детонационной трубы задавались в виде:

$$U_{11}(t) = U_0(50U_0t + 1)^{3/5} \text{ при } t \leq 40 \mu\text{s}$$

$$\text{and } U_1 = \text{const при } t > 40 \mu\text{s.} \quad (1)$$

$$U_{12}(t) = U_0(50U_0t + 1)^{-3/5}, \quad (2)$$

где  $U_0 = 800 \text{ m/s}$ .

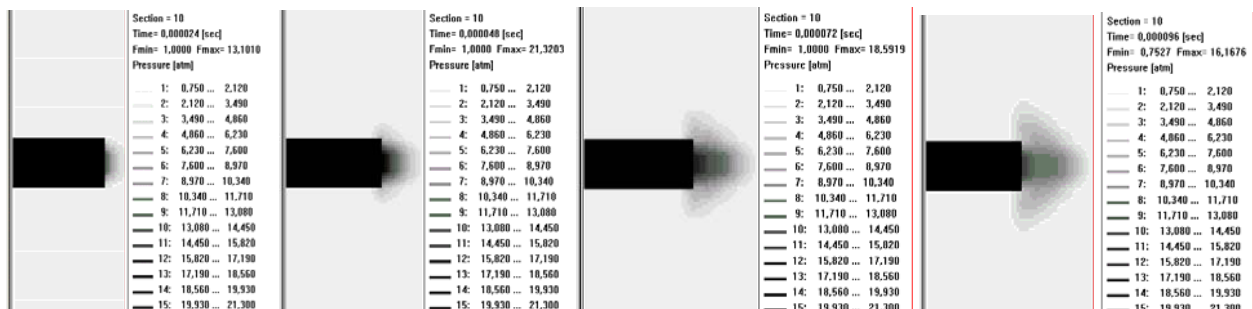


Рис. 2. Изменение поля давления в струе при истечении газа на срезе сопла со скоростью  $U_1(t)$

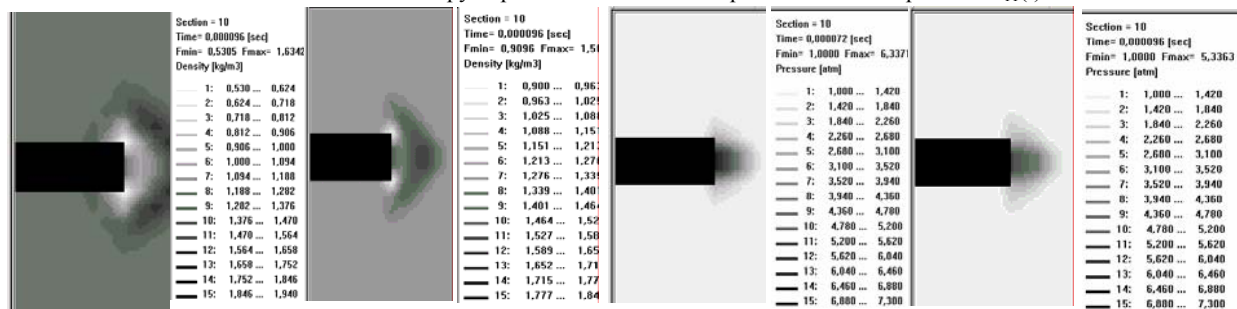


Рис. 3. Сравнение полей плотности при разной динамике истечения струй (слева –  $U_{11}(t)$ , справа –  $U_{12}(t)$ )

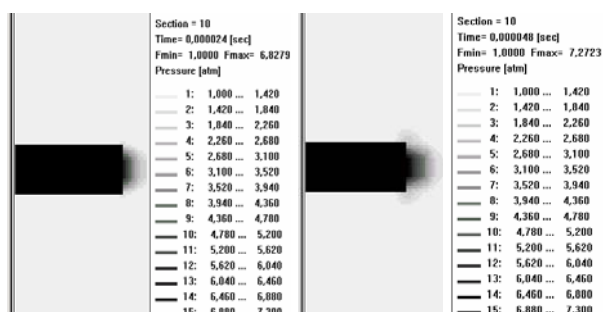


Рис. 4. Изменение поля давления в струе при истечении газа на срезе сопла со скоростью  $U_{12}(t)$

При этом полагалось, что значение плотности газа на срезе сопла поддерживалось постоянным. Диаметр выходного сопла был равен 100 мм. В результате сравнения параметров газа, получаемых в процессе развития ускоряемых и не ускоряемых струй в неограниченном пространстве, было установлено, что форма поверхностей возмущенных областей газа на один и тот же момент времени практически совпадает. Но, при этом имеются качественные отличия внутри областей возмущения. Интенсивный импульсный подпор газа за передним фронтом струи обеспечивает кратковременное «удержание» термодинамических параметров газа при сферическом фронте распространения возмущений. Скорость расширения области возмущения в случае ускорения потока возрастает незначительно. Это приводит к увеличению градиентов термодинамических параметров газа в области за сферическим фронтом ударной волны.

### Экспериментальное исследование

Проведены экспериментальные исследования динамики истечения струи с диаметром соплового отверстия 2 мм. Интенсивное импульсное ускорение потока в данном случае обеспечивалось в результате токового разогрева газа импульсной дугой. Плотность газа в разрядной полости была выше плотности газа в области истечения. Объем полости был подобран таким образом, что бы за время истечения газа в период его импульсного ускорения падение плотности произошло не более чем на 10%. Динамика развития струи приведена на рис. 5.

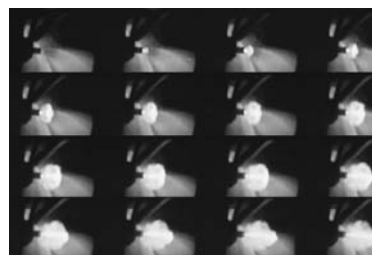


Рис. 5. Развитие импульсно ускоряемой плазменной струи в окружающей атмосфере. Время между кадрами – 8 мкс

Результаты эксперимента качественно подтверждают предположение, что интенсивное импульсное поджатие потока приводит к изменению формы струи. Наблюдается практически полусферическое распространение области возмущения.

### Выводы

Реализация ускорения потока за фронтом ударной волны в детонационной трубе позволяет реализовать инициацию детонации в неограниченном объеме с помощью труб малого диаметра.

Разработанная математическая модель позволяет выявить необходимый режим ускорения струи в зависимости от диаметра детонационной трубы, в результате которого обеспечивается «удержание» интенсивности формируемой сферической ударной волны на период прохождения волной длины детонационной ячейки.

### Список литературы

1. Kees van Wingerden et al. (1999). Detonation in pipes and in the open. Petro Chemical Congress. – <http://www.safetynet.de/Publications/articles/CMRNov99.pdf>.
2. Thomas G. et al. (2000). Some observations of the jet initiation of detonation. Combustion and Flame. 120: 392.
4. Landau LD, Lifshits EM (1986). Teoreticheskaja fizika: Gidrodinamika. Nauka, Gl. red. fiz-mat. lit., Moscow.
6. Godunov SK et al. (1976). Chislennoje modelirovanije zadach gazovoj dinamiki. Nauka, Gl. red. fiz-mat. lit., Moscow.

Поступила в редколлегию 11.03.2008

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. А.Н. Довбня, Научно-технический центр «Ускоритель», Харьков.

### СПОСІБ ІНІЦІАЦІЇ ДЕТОНАЦІЇ В НЕОБМЕЖЕНОМУ ПРОСТОРІ

Стаховський О.В., Коритченко К.В., Угрюмов М.Л., Скоб Ю.А.

Запропоновано нове технічне рішення, що дозволяє здійснювати ініціацію детонації в необмеженому об'ємі. В основу рішення покладено метод індукційного прискорення, вживаний в даному випадку для прискорення газового потоку за фронтом ударної хвилі. Вплив динаміки прискорення газового потоку на термодинамічні параметри газу за фронтом хвилі досліджений шляхом математичного моделювання виходу ударної хвилі з труби в умовах примусової зміни швидкості виходу струменя. Розроблена математична модель дозволяє виявити необхідний режим прискорення струменя залежно від діаметру детонаційної труби і детонаційних властивостей середовища, при якому здійснюється ініціація детонації.

**Ключові слова:** ініціація детонації, необмежений об'єм.

### A METHOD OF INITIATION OF DETONATION IS IN UNLIMITED SPACE

Stahovskiy O.V., Korytchenko K.V., Ugryumov M.L., Skob Yu.A.

New technical solution, allowing to carry out initiation of detonation in an unlimited volume, is offered. The method of induction acceleration, applied in this case for the acceleration of gas stream after front of shock wave, is fixed in basis of decision. Influence of dynamics of acceleration of gas stream on the parameters of thermodynamics of gas after front of wave is explored by the mathematical design of output of shock wave from a pipe in the conditions of the forced change speed of output of stream. The mathematical model allows to expose the necessary mode of acceleration of stream depending on the diameter of detonation pipe and properties of detonations of environment.

**Keywords:** initiation of detonation, unlimited volume.