

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОПАН-БУТАНА В УСТАНОВКАХ ДЕТОНАЦИОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Т. П. Гавриленко, В. Ю. Ульяницкий

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, nikolaev\_@academ.org

Экспериментально получены обширные данные по длине участка перехода горения в детонацию (ПГД) для большого спектра взрывчатых газовых смесей ацетилена, пропан-бутана и метана с кислородом в трубе с постоянным и сужающимся сечениями. Установлено, что для исследованных топливно-кислородных смесей длину ПГД можно сократить до одного калибра трубы, используя объемную систему препятствий, размер и расстояние между которыми соизмеримы с размером ячейки многофронтной детонации в этих смесях. Установлено, что оптимальной для напыления является взрывчатая смесь пропан-бутана с кислородом, в которой доля пропан-бутана составляет  $\approx 25\%$ .

Ключевые слова: переход горения в детонацию, детонация, напыление.

### ВВЕДЕНИЕ

В существующих установках детонационного напыления используются ацетиленокислородные взрывчатые смеси при начальном давлении 1 атм. Они отличаются высокой скоростью детонации, высокой температурой и высоким динамическим напором газового потока за фронтом детонационной волны. Для инициирования детонации в этих смесях требуется относительно малая энергия, и практически во всех этих смесях длина участка перехода горения в детонацию намного меньше диаметра ствола. Однако использование взрывчатых смесей на основе ацетилена требует соблюдения повышенных требований к технике безопасности, поскольку детонация в ацетиленокислородных смесях (при начальном давлении 1 атм) распространяется по зазорам менее 0.1 мм и, кроме того, ацетилен способен детонировать в отсутствие окислителя.

В связи с этим существующие конструкции установок детонационного напыления сильно усложнены введением огнепреградителей, инертногазовых затворов и других устройств, предотвращающих проскок детонации в магистрали, подводящие ацетилен. Для детонационного напыления приоритетными параметрами являются температура и динамический напор продуктов детонации ( $P_{дин}$ ), которые непосредственно связаны со скоростью фронта детонации:  $P_{дин} \approx \rho(0.45D_{ЧЖ})^2/2$ , где  $\rho$  — плотность продуктов детонации,  $D_{ЧЖ}$  — скорость фронта детонации Чепмена — Жуке (ЧЖ).

Известно [1], что скорость детонации смесей пропана, бутана, пропан-бутана и метана с кислородом незначительно отличается от скорости детонации ацетиленокислородных смесей. Из-за трения и теплопотерь в стенки трубы экспериментальные значения скорости детонации отличаются от рассчитанных [1]. Измеренные скорости детонации в этих смесях представлены на рис. 1.

При максимальной скорости детонации термодинамические характеристики газового потока за фронтом детонации в сравниваемых взрывчатых смесях практически одинаковы, а

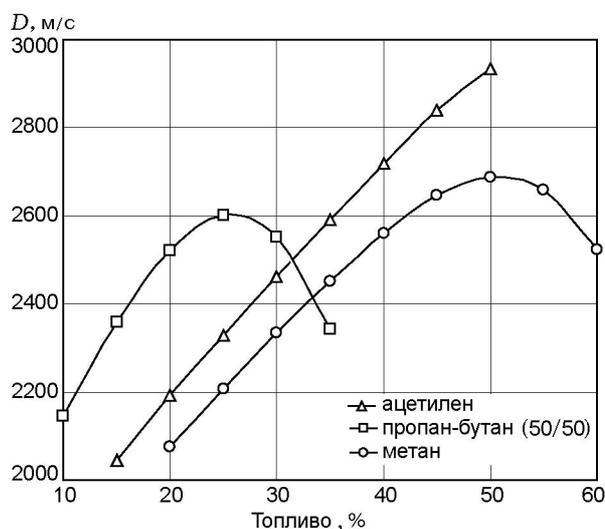


Рис. 1. Экспериментально измеренная скорость детонации в смесях кислорода с ацетиленом, пропан-бутаном и метаном

динамический напор максимально возможный. Однако, при максимальной скорости детонации в смесях на основе ацетилена и метана в продуктах детонации содержится свободный углерод в виде сажи, наличие которого может отрицательно сказаться на качестве покрытий. Практически приемлемыми (отсутствует сажа) для детонационного напыления можно считать следующие составы взрывчатых смесей:  $\text{CH}_4 + \text{O}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2 + 1.3\text{O}_2$ , ПБ +  $3\text{O}_2$ . Сравнение значений  $P_{\text{дин}}$  продуктов детонации смеси на основе пропан-бутана и смесей допустимого состава (отсутствие сажи) на основе метана и ацетилена показывает, что смесь на основе пропан-бутана не уступает по этому параметру смесям на основе ацетилена и практически на 50 % превосходит смеси на основе метана.

Однако привлекательность динамических характеристик продуктов детонации во взрывчатых смесях на основе пропан-бутана и метана значительно снижается из-за существенно большей протяженности участков перехода горения в детонацию (ПГД) в этих смесях. Более того, для одной и той же смеси при одинаковых условиях инициирования и начальном давлении длина участка ПГД нестабильна. Для технических приложений такая нестабильность и значительная длина участка ПГД неприемлемы, поскольку невозможно рассчитать процесс разогрева и разгона частиц порошка в стволе установки детонационного напыления (УДН), что делает процесс напыления непредсказуемым.

Способы стабилизации и сокращения длины участка ПГД являются чисто эмпирическими и состоят в загромождении сечения трубы в области инициирования (и вдоль нее) турбулизирующими элементами различных конструкций.

Для объяснения процесса ПГД выдвинуты различные механизмы [2–7], но в настоящее время не существует ни одной модели инициирования детонации путем поджига, которая позволяла бы рассчитать длину участка ПГД во взрывчатых газовых смесях хотя бы с точностью до порядка величины.

Имеющиеся экспериментальные данные по ПГД немногочисленны и разрозненны. Пока не предложено даже каких-либо эмпирических соотношений между параметрами детонации и процесса ПГД. Для конкретного состава газовой взрывчатой смеси каждый раз (или при изменении геометрических размеров кана-

ла) необходимо исследовать процесс ПГД экспериментально.

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы ацетиленокислородные смеси, используемые в установках детонационного напыления, заменить смесями на основе пропан-бутана и метана; для этого было необходимо разработать устройство, позволяющее максимально сократить длину участка ПГД в конкретной взрывчатой смеси.

В моделях [8–10] прямого инициирования детонации (ПГД отсутствует) установлено, что минимальная энергия источника инициирования с достаточной для эксперимента точностью коррелирует с размером ячейки на фронте детонации ЧЖ для конкретного состава и начального давления взрывчатой газовой смеси. С учетом этого была разработана и экспериментально апробирована конструкция ускорителя ПГД, которая полностью решает проблему стабилизации и сокращения длины участка ПГД в смесях, привлекательных для использования в установках детонационного напыления.

## ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты с использованием в качестве топлива ацетилена, пропан-бутана (ПБ) и метана проводили в трубе постоянного сечения диаметром 20 мм. В смесях на основе пропан-бутана длину перехода горения в детонацию измеряли также в трубе переменного сечения. Начальный участок трубы диаметром 50 мм и длиной 600 мм переходил по конусу с углом  $4^\circ$  в трубу диаметром 22 мм. Схема эксперимента приведена на рис. 2.

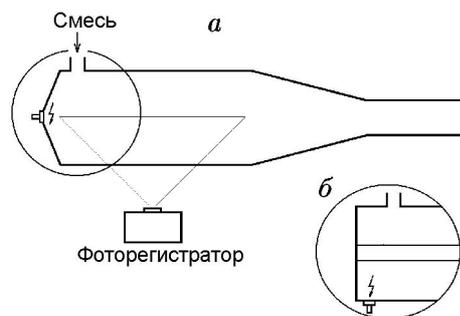


Рис. 2. Схема постановки эксперимента: а — с центральным поджигом, б — с боковым поджигом и трубкой по оси трубы

Проведено три серии опытов:

- а) с центральным поджигом смеси (рис. 2, а),
- б) с боковым поджигом,
- в) с боковым поджигом и с осевой вставкой (имитирующей схему подачи порошка в ствол) диаметром 12 мм и длиной 850 мм (рис. 2, б).

Для составления смесей использовали технические газы: ацетилен, пропан-бутан, кислород, метан и азот. Взрывчатую смесь готовили в специальной емкости с принудительным перемешиванием и затем вводили в предварительно вакуумированную детонационную трубу. Для поджига применяли электронную систему зажигания, которая используется в двигателях внутреннего сгорания. Фоторегистрацию процесса проводили через прозрачное продольное окно в боковой стенке трубы. При составлении смесей варьировали соотношение топлива и окислителя, исследовали также влияние разбавления смеси азотом.

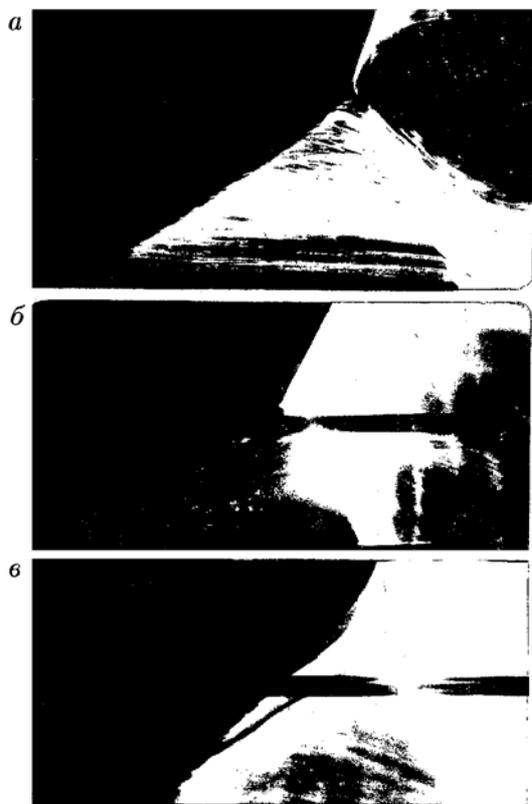


Рис. 3. Типичные фоторегистрограммы процесса ПГД:

а — смесь  $C_2H_2 + 2.5O_2$ , б — смесь ПБ +  $3O_2$  — центральный поджиг с осевой трубкой, в — смесь ПБ +  $3O_2$  — боковой поджиг с осевой трубкой

Типичная фоторегистрограмма процесса приведена на рис. 3. Непосредственно моменту ПГД соответствует тройная точка, в которой наблюдается резкий излом линии, соответствующий фронту распространения ускоряющегося пламени, и появляется линия обратного наклона, соответствующая ретонационной волне. Измерения показывают, что скорость фронта пламени перед тройной точкой не превышает 500 м/с для всех исследованных смесей.

Результаты измерения длины участка ПГД в смесях при различных соотношениях топлива и окислителя приведены на рис. 4. Каждая точка на графиках соответствует среднему значению длины ПГД, зарегистрированной не менее чем в шести опытах. Разница между максимальным и минимальным значениями не превышает 10%. Следует отметить, что максимальное значение, как правило, реги-

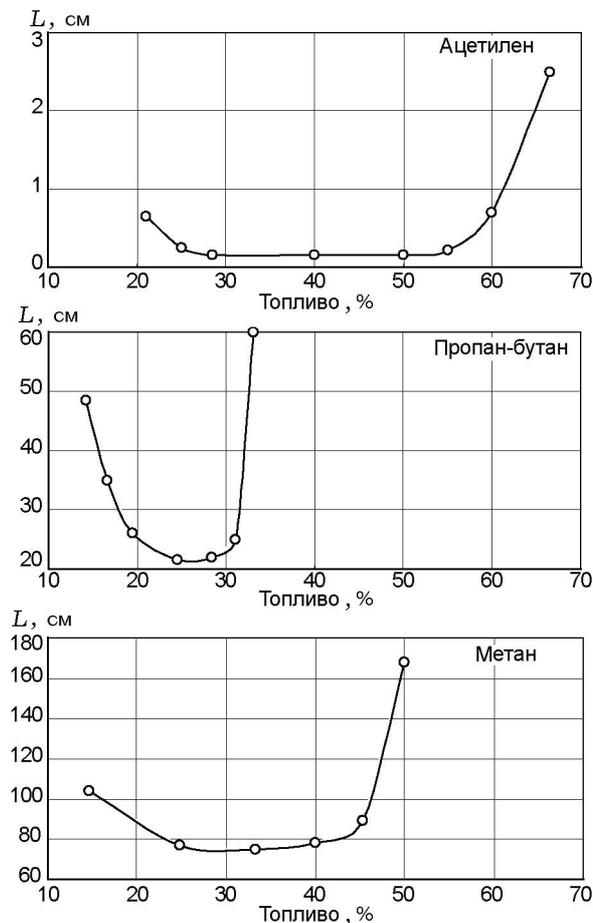


Рис. 4. Результаты измерений длины ПГД для разных смесей:

сплошная линия — центральный поджиг

стрируется в первом опыте, а в последующих постепенно падает. При многократном (более 10 раз) заполнении трубы одной и той же смесью и иницировании детонации длина ПГД может сократиться в два раза. Этот факт хорошо известен экспериментаторам, но подробно не исследован. Поэтому до регистрации процесса ПГД трубу «промывали» (заполняли исследуемой взрывчатой смесью и возбуждали детонацию) не менее пяти раз.

Эксперименты показали, что для смесей на основе ацетиленов в широком диапазоне соотношений между ацетиленом и кислородом длина ПГД ( $L$ ) не превышает одного диаметра ствола, т. е. 20 мм. А в смесях, реально используемых в детонационных установках (состав смеси от эквимолярного до стехиометрического), выбранная система зажигания обеспечивает условия, близкие к условиям прямого иницирования. Длина ПГД составляет около 1 мм. Разбавление смеси азотом увеличивает длину ПГД, однако она начинает заметно превосходить диаметр трубы только при сильном разбавлении, когда скорость детонации существенно падает.

Результаты экспериментов со смесями на основе пропан-бутана ( $\text{ПБ} + n\text{O}_2$ ) описываются характерной U-образной зависимостью  $L$  от концентрации горючего в смеси с минимумом в окрестности соотношения между горючим и кислородом  $n = 3$ , что соответствует «оптимальному» составу смеси:  $\text{ПБ} + 3\text{O}_2$  (см. рис. 4). При «оптимальном» составе смеси длина ПГД не менее 220 мм, что равно 11 диаметрам узкой трубы или 4.5 диаметрам начальной части конической трубы (50 мм). Разброс значений  $L$  от опыта к опыту не превышал диаметра трубы (50 мм). При разбавлении смеси «оптимального» состава кислородом наблюдалось монотонное плавное увеличение  $L$ . При  $n = 7$  длина ПГД превышала 600 мм (30 диаметров узкой трубы или 12 диаметров широкой). При обогащении смеси «оптимального» состава топливом свыше 25 % длина ПГД резко увеличивалась. Уже при  $n = 1.8$  переход горения в детонацию не наблюдался ни в широкой, ни в узкой трубе. На фоторазвертке фиксировался процесс медленного горения со скоростью, не превышающей 500 м/с, иногда детонация возникала при отражении фронта горения от поверхности переходного конуса или от торца трубы.

При перемещении точки поджига на боко-

вую поверхность трубы вблизи задней торцевой стенки (рис. 2, б) и введении цилиндрической трубки-вставки по оси трубы длина ПГД заметно не изменялась.

Разбавление пропан-бутановых смесей азотом показало, что даже малые добавки  $\text{N}_2$  резко увеличивают длину ПГД. Так, добавка 14 %  $\text{N}_2$  к смеси «оптимального» состава ( $\text{ПБ} + 3\text{O}_2$ ) увеличивала  $L$  в 1.5 раза, а при добавке 20 %  $\text{N}_2$  длина ПГД превышала длину трубы с расширенной начальной частью. Для смеси  $\text{ПБ} + 4\text{O}_2$  к такому же результату приводила добавка 15 %  $\text{N}_2$ , для  $\text{ПБ} + 5\text{O}_2$  — 10 %  $\text{N}_2$  и для  $\text{ПБ} + 6\text{O}_2$  всего 5 %  $\text{N}_2$ . Характер переходного процесса как при боковом, так и при центральном поджиге был таким же, как и в смесях без добавки азота.

Результаты экспериментов с метаноокислородными смесями показали (см. рис. 4), что длина ПГД в них значительно больше, чем для смесей на основе пропан-бутана. О том же свидетельствует и сравнение критических энергий иницирования  $E^*$  [8]. Следует отметить, что самая большая энергия иницирования необходима для возбуждения детонации смесей с высокоочищенным метаном [8]. Небольшие (порядка 1 %) добавки высокомолекулярных или ароматических углеводородов, водорода и т.п. заметно снижают длину ПГД метаноокислородных смесей. Поэтому для смесей на основе природного газа, содержащего, кроме метана, значительное количество примесей, длина ПГД меньше, чем для смесей на основе высокоочищенного метана, а при небольших добавках ацетиленов к природному газу длина ПГД может оказаться даже ниже, чем для смесей на основе пропан-бутана. Разбавление смесей на основе метана азотом более чем на 10 % приводит к тому, что детонация вообще не возбуждается в использованной постановке эксперимента.

### УСКОРИТЕЛЬ ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ

Длину участка перехода горения в детонацию можно существенно сократить, если в трубе вблизи источника иницирования устанавливать препятствия в виде сеток, спиралей, диафрагм, которые способствуют развитию турбулентности в газе перед фронтом пламени [11]. Процесс формирования детонации препятствиями в трубе сходен с процессом распространения стационарной детонации,

особенностью которого является наличие отдельных очагов горения на фронте детонации. Препятствия на стенке трубы [11] эффективно работают в легкодетонируемых смесях при низких начальных давлениях.

Если под «прямым» инициированием понимают процесс, в начальной стадии которого инициирующая волна заведомо детонационная, то при «слабом» инициировании (поджиге) инициирующая волна является слабой ударной волной с пологим спадом параметров за фронтом и скоростью, намного меньшей скорости детонации ЧЖ. Слабые ударные волны формируются неоднородным фронтом горения. В этом случае инициирование детонации сопровождается сначала адиабатическим зажиганием смеси, а затем переходом горения в детонацию.

При инициировании детонации слабыми ударными волнами воспламенение смеси может происходить непосредственно в проходящих ударных волнах [12, 13], в отраженных от крупных препятствий волнах и в зонах «разгрузки» волн, отраженных от мелких препятствий [12, 14].

Анализ экспериментальных данных по возбуждению детонации на препятствиях [12, 14] показал:

— при размерах препятствий больше  $5a$  ( $a$  — размер ячейки во фронте детонации ЧЖ) возбуждение детонации происходит непосредственно в отраженных слабых ударных волнах, — при размерах препятствий  $(1 \div 5)a$  — в зонах «разгрузки» отраженных ударных волн, — при размерах меньше  $a$  — в проходящих ударных волнах.

На основании изложенных выше результатов измерений длины участка ПГД и результатов работ по «прямому» инициированию детонации [8–10, 14–16] был создан ускоритель ПГД [17] для взрывчатых газовых смесей, имеющих значительную протяженность участка ПГД. Принципиальным отличием предложенного устройства является исчисление размеров препятствий (или отверстий в перегородках), вводимых в область инициирования, в размерах ячейки детонации ЧЖ для конкретного состава и начального давления смеси.

Ускоритель ПГД представляет собой набор дисков с круглыми отверстиями. Размер отверстия, по существу, равен размеру ячейки во фронте детонации ЧЖ для взрывчатой смеси конкретного состава при начальном давлении

1 атм. Число отверстий нарастает от первого диска к последнему. При сборке напротив отверстий каждого диска устанавливаются перемычки предыдущего и последующего дисков. На диаметре последнего (от точки поджига) диска должно быть не менее семи отверстий, согласно [16]. Конструкция в сборе представляет собой объемную систему проходов и препятствий, расходящихся под острым углом от точки поджига на всё сечение ствола.

При поджиге в ячейке первого диска еще не сгоревшая смесь приходит в движение под действием давления продуктов горения и турбулизуется на препятствиях первых дисков, вызывая принудительную турбулизацию пламени. Сильно турбулизованное пламя ускоряется и генерирует волны сжатия, которые при отражении от препятствий (уже на средних дисках конструкции) создают новые очаги воспламенения. В результате процесс горения искусственно многократно интенсифицируется и практически имеет объемный характер, что приводит к возникновению сильных ударных волн в отверстиях последних дисков конструкции. Такие ударные волны способны самостоятельно воспламенить смесь, и при столкновении на выходе из ускорителя эти волны возбуждают детонацию сразу по всему сечению трубы.

В этом процессе на стадии, непосредственно предшествующей детонации, основную роль играет самовоспламенение смеси, именно поэтому размер очагов воспламенения должен быть сравним с размером ячейки  $a$  во фронте детонации ЧЖ при начальном давлении 1 атм.

Выбор размера ячейки пространственной решетки ускорителя ПГД равным размеру ячейки во фронте детонации ЧЖ связан с тем, что процессы во фронте детонации ЧЖ аналогичны процессам, происходящим при распространении пламени по каналам пространственной решетки ускорителя ПГД.

Схема ускорителя ПГД представлена на рис. 5. Острый угол наклона периферийных каналов решетки к оси обусловлен тем, что при угле наклона, приближающемся к прямому, происходит резкое расширение сечения канала, по которому распространяется пламя. Это приводит к сильной боковой разгрузке продуктов горения. При этом резко понижаются температура и давление во фронте пламени. В результате возможно полное затухание горения вместо его ускорения.

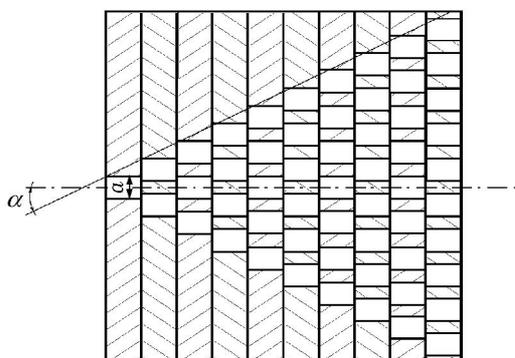


Рис. 5. Схема ускорителя ПГД

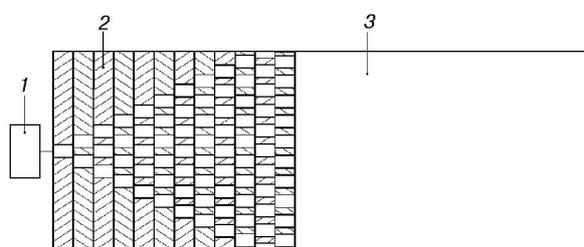


Рис. 6. Расположение ускорителя ПГД в стволе установки:

1 — узел инициирования, 2 — детонационная камера, 3 — ускоритель ПГД

Ускоритель ПГД устанавливается вблизи источника поджига (рис. 6). Для создания ускорителя для конкретной газовой смеси необходимо знать размер ячейки во фронте детонации ЧЖ этой смеси. Величину ячейки можно рассчитать по формулам работы [15], но лучше (и легче) определить экспериментально по следовым отпечаткам на закопченной стенке трубы.

Ускоритель ПГД [17] сокращает длину участка ПГД в смесях пропан-бутана с кислородом до величины, не превышающей одного калибра ствола, при содержании в смеси 15 ÷ 30 % топлива без увеличения габаритов установки детонационного напыления. Производительность установки детонационного напыления при этом сохраняется.

Экспериментально установлено, что приближение размеров ячейки пространственной решетки ускорителя ПГД к размеру ячейки во фронте детонации ЧЖ приводит к наибольшему сокращению длины ПГД.

Предложенная конструкция ускорителя ПГД позволяет использовать любые труднодетонируемые газы (метан, пропан, бутан и другие) в качестве компонентов взрывчатой сме-

си. Раньше эти газы не использовались, поскольку в существующих установках напыления длина ствола меньше длины ПГД в смесях на основе этих газов. Более того, использование этих газов гарантированно обеспечивает безопасную эксплуатацию установок детонационного напыления.

## ВЫВОДЫ

- В результате проведенных экспериментов получены обширные данные по длине участка ПГД для большого спектра взрывчатых смесей на основе ацетилена, пропан-бутана и метана с кислородом.

- Разработана и экспериментально апробирована конструкция ускорителя ПГД. Принципиальным отличием предложенной конструкции является использование экспериментально установленной связи размера ячейки пространственной решетки ускорителя с размером ячейки на фронте детонации ЧЖ для конкретной взрывчатой смеси.

- Установлено, что оптимальными рабочими смесями для детонационного напыления являются смеси на основе пропан-бутана. По динамическому напору продуктов детонации смеси пропан-бутана с кислородом не уступают традиционно используемым смесям ацетилена с кислородом и превосходят метанокислородные в 1,5 раза. Максимальный динамический напор соответствует смеси 25 % ПБ + 75 %  $O_2$ . При использовании смесей пропан-бутана с кислородом в установках детонационного напыления следует исключить возможность обогащения смеси топливом свыше 30 %, чтобы избежать появления сажи в стволе установки. Для смесей на основе ацетилена и метана с кислородом этот предел составляет около 40 %.

- Предложенный ускоритель ПГД сокращает длину участка ПГД в смесях пропан-бутана с кислородом до величины, не превышающей одного калибра ствола, при содержании в смеси 15 ÷ 30 % топлива без увеличения габаритов установки детонационного напыления. Производительность установки детонационного напыления при этом сохраняется.

Авторы посвящают эту работу светлой памяти Юрия Аркадьевича Николаева, в свое время принимавшего активное участие в обсуждении и систематизации результатов этой работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев Ю. А., Фомин П. А. О расчете равновесных течений химически реагирующих газов // Физика горения и взрыва. — 1982. — Т. 18, № 1. — С. 66–72.
2. Oppenheim A. K., Urtiew P. A. Experimental observations of the transition to detonation in explosive gas // Proc. Roy. Soc. A. 1966. — V. 295. — P. 13–28.
3. Зельдович Я. Б., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М., Сивашинский Г. М. Развитие детонации в неравномерно нагретом газе // Журн. прикл. механики и техн. физики. — 1970. — № 2. — С. 76–82.
4. Smirnov N. N., Nikitin V. F., Boichenko A. P., et al. Control of deflagration to detonation transition in gaseous systems // Control of Detonation Processes / G. Roy (Ed.). — Moscow: ELEX-KM Publ, 2000. — P. 2–6.
5. Khokhlov A. M., Oran E. S., Thomas G. O. Numerical simulation of deflagration-to-detonation transition: The role of shock-flame interactions in turbulent flames // Combust. and Flame. — 1999. — V. 117. — P. 323–339.
6. Мешков Е. Е. Неустойчивость на ускоряющейся границе двух газов // Изв. АН СССР. МЖГ. — 1969. — № 5. — С. 151–158.
7. Richtmyer R. D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids // Commun. Pure and Appl. Math. 8. — 1960. — V. 13, N 2. — P. 297–319.
8. Васильев А. А., Николаев Ю. А., Ульяницкий В. Ю. Критическая энергия инициирования многофронтной детонации // Физика горения и взрыва. — 1979. — Т. 15, № 6. — С. 94–104.
9. Ульяницкий В. Ю. Замкнутая модель прямого инициирования газовой детонации с учетом неустойчивости. I. Точечное инициирование // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 3. — С. 101–113.
10. Ульяницкий В. Ю. Замкнутая модель прямого инициирования газовой детонации с учетом неустойчивости. II. Неточечное инициирование // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 4. — С. 79–89.
11. Щелкин К. И. Два случая нестационарного горения // Журн. эксперим. и теор. физики. — 1959. — Т. 36, № 2. — С. 600–609.
12. Гавриленко Т. П. Переход горения в детонацию в смесях на основе ацетилена // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 5. — С. 148–149.
13. Васильев А. А. Оценка критических условий перехода горения в детонацию // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 2. — С. 91–96.
14. Ульяницкий В. Ю. О роли «вспышки» и соударения поперечных волн в формировании многофронтной структуры детонационных волн в газах // Физика горения и взрыва. — 1981. — Т. 17, № 2. — С. 127–133.
15. Васильев А. А., Николаев Ю. А. Модель ячейки многофронтной газовой детонации // Физика горения и взрыва. — 1976. — Т. 12, № 5. — С. 744–754.
16. Васильев А. А., Григорьев В. В. Критические условия распространения газовой детонации в резко расширяющихся каналах // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 5. — С. 117–125.
17. Ульяницкий В. Ю., Васильев А. А., Гавриленко Т. П., Краснов А. Н., Николаев Ю. А. Ствол устройства для газового напыления покрытий: А. с. № 1072320. — 1983.

*Поступила в редакцию 15/II 2010 г.,  
в окончательном варианте — 6/VIII 2010 г.*