

НЕПРЕРЫВНАЯ ДЕТОНАЦИЯ В РЕЖИМЕ ЭЖЕКЦИИ ВОЗДУХА. ОБЛАСТЬ СУЩЕСТВОВАНИЯ

Ф. А. Быковский, С. А. Ждан, Е. Ф. Ведерников

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, bykovskii@hydro.nsc.ru

Приведены результаты экспериментального исследования непрерывной спиновой и пульсирующей детонации водородовоздушной смеси в проточной кольцевой камере диаметром 306 мм с расширением сечения канала в режиме эжекции воздуха. При варьировании площади проходного сечения щели для подачи воздуха, количества и площади отверстий в форсунках горючего, размера ресивера горючего и начального давления горючего определена область существования детонационных режимов в координатах «размер щели подачи воздуха — удельный расход водорода». Для данной камеры и топлива установлена ширина щели подачи воздуха (10 ÷ 12 мм), при отклонении от которой область существования детонационных режимов сужается. Обнаружена необходимость установки уступа в тракте подачи воздуха. Также выяснено, что существует оптимальная геометрия отверстий форсунок, расширяющая область существования детонационных режимов. Грубое смешение водорода с воздухом, как и слишком быстрое их смешение, сужает область существования детонации. При увеличении расхода водорода установлена следующая последовательность процессов: горение переходит в продольную пульсирующую детонацию, затем в непрерывную спиновую, далее снова в пульсирующую и наконец в обычное горение. Проведены испытания длительной работы камеры без охлаждения.

Ключевые слова: эжекция воздуха, водородовоздушная смесь, непрерывная спиновая детонация, пульсирующая детонация, проточная камера сгорания, структура течения, область существования.

ВВЕДЕНИЕ

Первые результаты по детонационному сжиганию ацетилена и водорода в режиме эжекции кислорода приведены в [1–3], а сжигания водорода в режиме эжекции воздуха — в [4, 5]. Исследования показали принципиальную возможность реализации указанных режимов в камерах проточного типа. При этом расходы эжектируемого окислителя увеличивались по сравнению с режимами стационарного истечения в типичном эжекторе [6] как при истечении холодного водорода, так и при его горении. Длительность экспериментов составляла около 0.6 с.

Цель данной работы — определить область существования непрерывной спиновой и пульсирующей детонации топливно-воздушных смесей в режиме эжекции воздуха в проточной кольцевой камере по удельным расходам компонентов, размерам щели для подачи воздуха и отверстий в форсунках

горючего, а также провести испытания в длительном режиме работы. В качестве горючего использовался водород.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследования проводили в осесимметричной кольцевой проточной камере (диаметром $d_c = 306$ мм) с расширением площади проходного сечения на выходе (рис. 1 [5]). Минимальное расстояние от основания конуса до наружной стенки $\Delta = 23$ мм, а минимальная площадь сечения камеры $S_\Delta = \pi(d_c - \Delta)\Delta = 204$ см². Ширина кольцевой щели варьировалась: $\delta = 3, 6, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20$ или 23 мм (при $\delta = \Delta$). В различных экспериментах применяли три типа форсунок, отличающихся числом и размером отверстий: F1 — $200 \times 1 \times 1$ мм, F2 — $200 \times 0.5 \times 0.4$ мм и F3 — $400 \times 0.3 \times 0.25$ мм. В ряде экспериментов при $\delta = \Delta = 23$ мм дополнительно подавался водород со стороны внутренней стенки (на рис. 1 показано штриховой стрелкой). Форсунка на внутренней стенке по числу отверстий и площади их сечения соответствовала форсунке F3. Водород поступал из ресиверов объемом $V_{r,f} = 3.2, 13.3$ или 43 л (на

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы Президиума РАН № 2.6, Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-01-00203) и фонда Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (НШ 5770.2010.1).

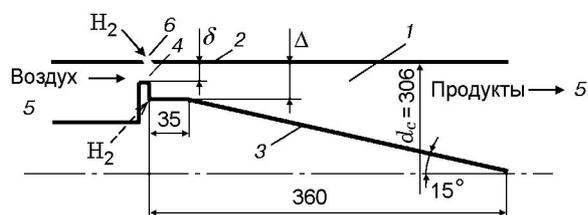


Рис. 1. Схема камеры:

1 — кольцевая камера, 2 — наружная стенка, 3 — конусная стенка, 4 — кольцевая щель, 5 — окружающее пространство, 6 — форсунка

рисунке не показаны) с начальным давлением $p_{r,f0} = (13 \div 50) \cdot 10^5$ Па. В зависимости от типа форсунки, времени эксперимента ($t \approx 0.6 \div 6$ с) и начального давления в ресивере расход водорода изменялся в диапазоне $G_f = 140 \div 0$ г/с, удельный расход водорода на входе в камеру — в диапазоне $g_f = G_f/S_\Delta = 6.86 \div 0$ кг/(с · м²), где S_Δ — площадь сечения кольцевого канала камеры у основания. Расходы вычисляли по методике [7]. Продукты сгорания образующейся смеси вытекали в атмосферу.

Порядок проведения экспериментов, запись давления в камере и фотографирование процесса фоторегистратором через продольные окна и кинокамерой описаны в работе [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Фоторегистрограмма, включающая в себя все виды сгорания: обычное турбулентное пламя, пульсирующую детонацию и непрерывную спиновую детонацию с поперечными детонационными волнами (ПДВ), представлена на рис. 2. Для того чтобы в одном эксперименте осуществить различные режимы, в данном опыте использовали ресивер малого объема $V_{r,f} = 3.2$ л при $\delta = 10$ мм ($S_\delta/S_\Delta = 0.455$) и форсунке F2. Здесь $S_\delta = \pi(d_c - \delta)\delta$ — площадь сечения щели подачи воздуха.

После инициирования процесса в камере развивалось обычное горение (дорожка 1, область A, $g_f = 1.75 \rightarrow 1.44$ кг/(с · м²)). Затем появлялась продольная неустойчивость с периодическими ($f \approx 1.6$ кГц) вспышками образующейся смеси у торца камеры (дорожка 2, область D, $g_f = 1.44 \rightarrow 1.36$ кг/(с · м²)), переходящая в непрерывную спиновую детонацию с ПДВ, имеющими детонационный фронт BC (дорожки 3–6, $g_f = 1.36 \rightarrow 0.75$ кг/(с · м²)). На дорожках 3–5 зафиксирована одна ПДВ ($n =$

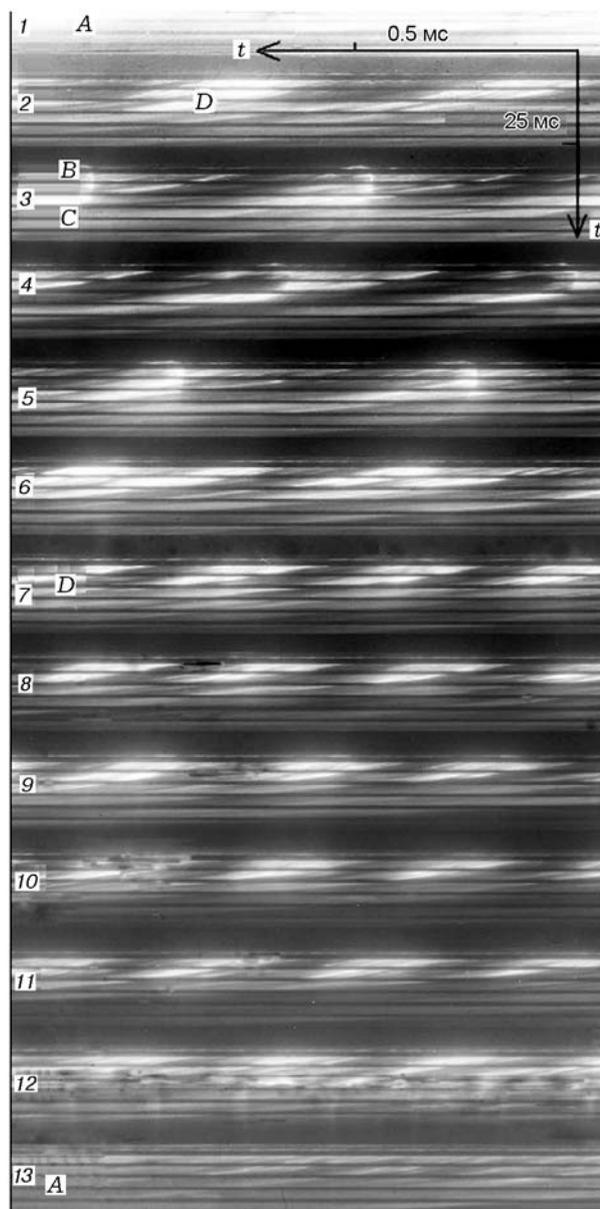


Рис. 2. Фоторегистрограмма режимов сгорания водородовоздушной смеси:

$V_{r,f} = 3.2$ л, $\delta = 10$ мм, форсунка F2, $p_{r,f} = (20 \rightarrow 4) \cdot 10^5$ Па, $g_f = 1.75 \rightarrow 0.23$ кг/(с · м²), $t = 10 \rightarrow 345$ мс, ширина светлой и темной полосок (одного окна и перегородки) — 60 мм

1), движущаяся слева направо со скоростью $D = 1.5 \rightarrow 1.36$ км/с. Скорость вычислена относительно наружной стенки кольцевого канала, стрелка указывает уменьшение скорости детонации от третьей до пятой дорожки. На дорожке 6 иногда зарождается вторая ПДВ ($n = 2$), поэтому появляется неустойчи-

вость волн по структуре, а их скорость снижается ($D \approx 1.27$ км/с). В диапазоне дорожек 7–12 опять реализуются регулярные ($f \approx 2.5$ кГц) вспышки образующейся смеси (область D , $g_f = 0.75 \rightarrow 0.34$ кг/(с·м²)). Наконец, в камере устанавливается преимущественно обычное горение со слабо заметными неоднородностями свечения с частотой $f \approx 2.4 \pm 0.1$ кГц ($g_f < 0.34$ кг/(с·м²)). При использовании ресиверов объемом $V_{r,f} = 13.3$ и 43 л развитие процесса от момента инициирования до появления волн практически не меняется, а периоды существования перечисленных выше режимов увеличиваются, так как замедляется опорожнение ресиверов.

Типичные осциллограммы давлений в ресиверах водорода ($p_{r,f}$) и в камере (p_c) представлены на рис. 3. Отсчет времени начинался с момента запуска компьютерной системы. Истечение водорода из ресивера наступало через $16 \div 25$ мс, а подрыв смеси в камере — еще через 10 мс. Начальные расходы из всех ресиверов одинаковы [7] — $G_{f0} \approx 57$ г/с. Очевидно, текущие расходы быстрее уменьшаются из ресивера малого объема (кривая 1), поэтому время протекания процесса ограничено. Однако в этом случае эксперимент все равно достаточно информативен, так как процесс исследуется в широком диапазоне расходов (см. рис. 2). Осциллограмма 1 фиксирует давление в ресивере в течение $t = 0.64$ с, в то время как на фоторегистрограмме рис. 2 отображен процесс за время $t \approx 0.35$ с. По всей длине камеры зареги-

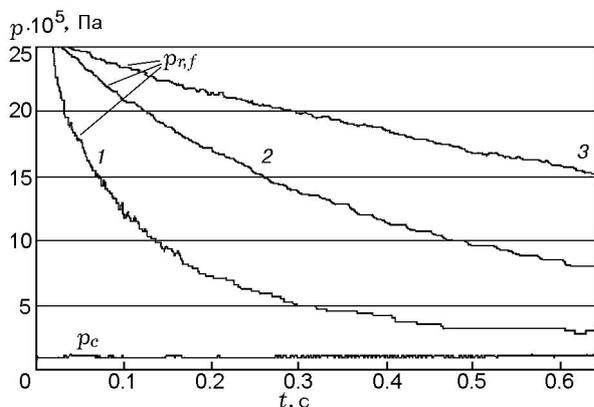


Рис. 3. Осциллограммы давления в ресиверах (1–3) и камере (p_c):

1 — $V_{r,f} = 3.2$ л, 2 — 13.3 л, 3 — 43 л; форсунка F2 (осциллограмма 1 соответствует фоторегистрограмме на рис. 2)

стрированы практически одинаковые давления во всех режимах — $p_c \approx (0.98 \pm 0.02) \cdot 10^5$ Па.

Систематические эксперименты, в которых варьировались ширина щели для подачи воздуха δ (площадь проходного сечения щели S_δ) и удельный расход водорода g_f , позволили определить область существования непрерывной детонации водородовоздушной смеси в режиме автоэжекции воздуха. Для поиска этой области устанавливали определенную ширину щели δ и измеряли удельный расход водорода g_f , который регулировался начальным давлением в ресивере $p_{r,f0}$. На рис. 4 в координатах (δ, g_f) и ($S_\delta/S_\Delta, g_f$) представлены области существования детонационных режимов при использовании форсунки F2 и ресивера объемом $V_{r,f} = 13.3$ л.

Область существования непрерывной спиновой детонации с сильными ПДВ (заштрихованная замкнутая область на рис. 4, $n = 1$) ограничена минимальной ($\delta_{\min} = 9$ мм) и максимальной ($\delta_{\max} = 18$ мм) шириной кольцевых щелей для подачи воздуха, которые соответствуют отношению площадей $S_\delta/S_\Delta = 0.41$ и $S_\delta/S_\Delta = 0.796$. С увеличением ширины щели от значения $\delta = 12$ мм область существования данного режима постепенно сужалась. Минимальные расходы водорода $g_{f,\min} = 0.6$ кг/(с·м²) соответствуют $\delta = 10$ мм ($S_\delta/S_\Delta = 0.455$), а максимальные $g_{f,\max} = 3.06$ кг/(с·м²) — ширине $\delta = 12$ мм ($S_\delta/S_\Delta = 0.542$). С увеличением или уменьшением размера щели от $\delta = 10 \div 12$ мм ($S_\delta/S_\Delta \approx 0.5$) область существования режима с ПДВ по

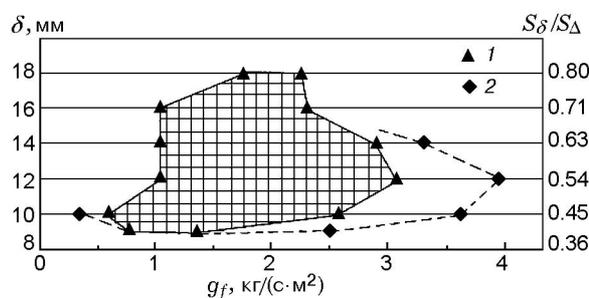


Рис. 4. Область существования непрерывной спиновой и пульсирующей детонации водородовоздушной смеси в режиме эжекции воздуха: форсунка F2, ресивер $V_{r,f} = 13.3$ л; 1 — граничные точки области с сильными ПДВ (заштрихованная замкнутая область, $n = 1$), 2 — внешние граничные точки области с пульсирующими волнами



Рис. 5. Фоторегистрограммы непрерывной спиновой детонации водородовоздушной смеси в режиме эжекции воздуха при длительной работе камеры:

$V_{r,f} = 43$ л, $\delta = 10$ мм, форсунка F2; $t = 1.2$ с, $g_f = 1.2$ кг/(с·м²); $D = 1.44$ км/с, $n = 1$

удельному расходу водорода g_f сокращалась. Для каждого значения δ за пределами существования режима непрерывной спиновой детонации с одной ПДВ появлялся неустойчивый режим с двумя ПДВ, который переходил в режим пульсирующей детонации (область между точками 1 и 2), а затем в режим обычного горения.

В экспериментах, проведенных с использованием ресиверов объемом $V_{r,f} = 3.2$ и 13.3 л, весь процесс сжигания фиксировался на фотопленку в течение ≈ 0.45 с. Этого времени достаточно для реализации и изучения режимов детонации и горения (фиксировалось около тысячи оборотов или пульсаций волн), но его не хватает для убедительного подтверждения того, что детонация будет продолжаться до тех пор, пока в камеру подается горючее. Интересно было также оценить возможности неохлаждаемой камеры по тепловым нагрузкам при огневых испытаниях.

Испытания в режиме длительной работы камеры (до 6 с) проводили с форсункой F2 при ширине щели $\delta = 10$ мм. Использовался ресивер емкостью $V_{r,f} = 43$ л с начальным давлением водорода $p_{r,f0} = 25 \cdot 10^5$ Па. Длительность процесса сжигания определялась по свечению продуктов в окнах камеры, регистрируемому цифровой фотокамерой с периодом между кадрами 33.3 мс. За время эксперимента газ полностью вытекал из ресивера.

Начальные части типичных осциллограмм давления в ресивере водорода и в камере приведены на рис. 3 (кривая 3 и p_c соответственно). Фоторегистрограммы начала эксперимента не отличались от приведенных на рис. 2: после инициирования наступало горение, затем — высокочастотная неустойчивость с переходом в пульсирующий режим детонации и наконец, через 0.06 с от момента инициирования, начинался непрерывный спиновый режим детонации, наблюдаемый по всей ширине пленки (до $t \approx 0.45$ с). Программный часовой механизм экспериментальной установки позволял фиксировать процесс на фотопленку спустя 1 с

после инициирования. На рис. 5 приведен фрагмент фоторегистрограммы через 1.2 с после инициирования. Видно, что устойчивый режим с ПДВ продолжается. Он не заканчивается до конца регистрации ($t \approx 1.45$ с после инициирования). За это время одна ПДВ совершила около 2200 устойчивых оборотов по окружности камеры. Причем при уменьшении удельного расхода в 2.1 раза ($g_f = 2.55 \rightarrow 1.2$ кг/(с·м²)) скорость детонации оставалась практически постоянной — $D = 1.46 \pm 0.02$ км/с. Лишь при переходе от пульсирующей детонации к ПДВ скорость незначительно повышалась — $D = 1.5$ км/с.

По удельным расходам водорода ($g_f = 2.75 \rightarrow 0$ кг/(с·м²)) с учетом области существования режима с сильными ПДВ (см. рис. 4) определено, что непрерывная спиновая детонация в длительных экспериментах развивалась на протяжении 1/3 процесса сжигания. Затем примерно столько же, как мы предполагаем, основываясь на данных рис. 4, существовал режим с более слабыми ПДВ и продольной неустойчивостью горения (продольными детонационными волнами), и наконец последняя 1/3 процесса — обычное горение.

При этом стенки камеры благополучно выдерживали тепловые нагрузки. В конце опытов наблюдалось лишь разложение эпоксидного клея в месте контакта окна из органического стекла со стенкой камеры.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Следует отметить, что построенные области существования непрерывной детонации не являются универсальными, а соответствуют определенной форсунке (в данном случае F2) и, возможно, имеющейся камере. В случае форсунок, обеспечивающих грубое и недостаточное смешение для образования детонационно-способного слоя смеси (форсунка F1), в камере диаметром $d_c = 306$ мм непрерывный детонационный режим с эжекцией воздуха реали-

зовать не удалось. Не исключено, что камера большего диаметра обеспечит все необходимые условия для его реализации. Слишком хорошее смесеобразование (форсунка F3) также сужает область существования непрерывных детонационных режимов по δ и g_f (для форсунки F2 находится внутри области, изображенной на рис. 4). Сильные ПДВ реализованы только при установке щелей шириной $\delta = 9 \div 12$ мм ($S_\delta/S_\Delta \approx 0.5$) и удельных расходах водорода $g_f = 1 \div 2.56$ кг/(с·м²).

Таким образом, существует оптимальный режим смешения, при котором степень перемешивания компонентов обеспечивает развитие ПДВ и устраняет преждевременное выгорание смеси перед волной. Можно сказать, что форсунка F2 является наиболее подходящей из трех имеющихся, но нельзя утверждать, что она оптимальна. Для этого, как и для проведенного варьирования величины δ , необходимо испытать множество форсунок с различной геометрией отверстий.

Расчеты стационарной эжекции воздуха без реакции с водородом [6] указывают на существование минимального размера щели для подачи окислителя (δ_{\min}), при котором непрерывная спиновая детонация невозможна ввиду недостаточной концентрации воздуха в образующейся смеси — коэффициент избытка горючего выше предельного ($\phi > 2.7$) [8]. Большие значения δ снимают ограничения по концентрации воздуха, однако появляются трудности со смесеобразованием и наблюдается ослабление продольной волны RS [1], отражаемой от торцевой перегородки, определяющей размер щели δ (см. рис. 1). Поэтому вполне закономерно отсутствие детонации смеси в канале без торцевой перегородки ($\delta = \Delta = 23$ мм) и реализация в камере обычного турбулентного горения. Смесеобразование в этом случае играет второстепенную роль, так как установка добавочной форсунки на внутреннюю стенку камеры (см. рис. 1) обеспечивала хорошее смесеобразование (форсунки типа F3), но наблюдалось только обычное горение в широком диапазоне расходов g_f .

Камера показала свою жизнеспособность при достаточно длительной работе (до $t \approx 6$ с), в том числе в непрерывном спиновом режиме ($t \approx 2$ с). Возможности экспериментальной установки позволили осуществить фоторегистрацию ПДВ за время $t \approx 1.5$ с, в течение которого наблюдалась устойчивая непрерывная

спиновая детонация. Аппроксимируя ход кривых температуры поверхности стенки камеры в области распространения фронта ПДВ [9] на время нагрева $t = 2$ с, можно сказать, что температура стенки не поднимется выше 500 °С. Продолжительность испытаний ограничивается термостойкостью окон из оргстекла и их клеявого соединения со стенкой. В неохлаждаемой камере без окон длительность процесса можно увеличить в несколько раз.

ВЫВОДЫ

- Найдена область существования непрерывной детонации в режиме эжекции воздуха в координатах «размер щели для подачи воздуха — удельный расход водорода». Показано, что детонационный режим с ПДВ может быть реализован в течение длительного времени, определяемого временем подачи водорода в рамках пределов области существования.

- Для исследуемых камеры и топлива определена оптимальная площадь щели для подачи воздуха — около половины площади сечения кольцевого канала камеры.

- Выяснено, что существует оптимальная геометрия отверстий в форсунках, расширяющая область существования детонационных режимов.

- Камера в режиме эжекции воздуха может работать до 6 с без охлаждения (возможно, и больше).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная детонация в режиме нестационарной эжекции окислителя // Докл. АН. — 2009. — Т. 424, № 1. — С. 40–42.
2. **Bykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F.** Continuous spin detonation in the oxidizer ejection regime // Seventh Intern. Symp. on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, St. Petersburg, Russia, July 7–11, 2008. — V. II. — P. 84–93.
3. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная детонация в режиме автоколебательной подачи окислителя. 1. Окислитель — кислород // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 3. — С. 116–124.
4. **Bykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F.** Continuous detonation combustion of hydrogen in the regime of air ejection // Nonequilibrium processes: plasma, combustion, atmospheric phenomena / G. D. Roy, S. M. Frolov, A. M. Starik (Eds). — Moscow: Torus press, 2009. — P. 341–347.

5. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная детонация в режиме автоколебательной подачи окислителя. 2. Окислитель — воздух // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 2. — С. 102–111.
6. **Абрамович Г. Н.** Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1991. — Ч. 1.
7. **Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф.** Исследование непрерывной спиновой детонации водородокислородных смесей. 3. Методики измерения параметров потока и структура течения в камерах сгорания различной геометрии // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 4. — С. 87–97.
8. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная спиновая детонация топливно-воздушных смесей // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 4. — С. 107–115.
9. **Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф.** Тепловые потоки в стенку камеры сгорания при непрерывной спиновой детонации топливно-воздушных смесей // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 1. — С. 80–88.

Поступила в редакцию 12/V 2010 г.
