

УДК 534.222.2

ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В ВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ПОЛИПРОПИЛЕНА

С. М. Фролов^{1,2,3,*}, В. И. Звегинцев⁴, В. С. Аксенов^{1,2}, И. В. Билера⁵, М. В. Казаченко^{1,6},
И. О. Шамшин^{1,3}, П. А. Гусев^{1,7}, М. С. Белоцерковская^{3,8}

Представлено академиком РАН А.А. Берлиным 17.12.2018 г.

Поступило 17.12.2018 г.

Предложен новый способ определения детонационной способности горючего: на основании измеренных значений длины и времени перехода горения в детонацию (ПГД) в эталонной импульсно-детонационной трубе (ЭДТ). В качестве горючего использован гранулированный полипропилен (ГП). Спроектирован и изготовлен испытательный стенд с ЭДТ и газогенератором для получения продуктов пиролиза ГП при температуре разложения до 800 °С. Проведены эксперименты по изучению ПГД в воздушных смесях продуктов пиролиза ГП. Показано, что продукты пиролиза ГП обладают детонационной способностью, близкой к таковой у сжиженного углеводородного газа (СУГ) марки ПБА – пропан-бутан автомобильный – в стехиометрической смеси с воздухом при нормальных условиях.

Ключевые слова: детонационная способность, эталонная импульсно-детонационная труба, гранулированный полипропилен, продукты пиролиза, топливно-воздушная смесь, переход горения в детонацию.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524882162-166>

В настоящее время решение задачи о повышении энергоэффективности процесса горения в силовых установках высокоскоростных летательных аппаратов связывают с созданием детонационных двигателей [1]. В таких двигателях химическая энергия топлива преобразуется в полезную работу расширения за счёт его сжигания в режиме управляемой детонации, а соответствующий термодинамический цикл называют циклом Зельдовича [2]. Мы впервые предлагаем решать эту задачу, используя управляемую детонацию продуктов пиролиза твёрдого топлива в воздухе. До сих пор такой подход рассматривался лишь применительно к дефлаграционному горению [3–10].

Важнейшая характеристика, определяющая перспективы применения твёрдых топлив в детонационном двигателе – их детонационная способность. Относительную детонационную способность топливно-воздушных смесей (ТВС) обычно оценивают по энергии прямого инициирования детонации и по размеру ячейки многофронтной детонации. Определение этих параметров сопряжено с трудностями и с большими погрешностями измерений.

На основе наших предшествующих исследований [11] мы предлагаем новый способ определения детонационной способности топлива: по длине и/или времени ПГД в одинаковых условиях с помощью ЭДТ. Кроме ЭДТ в состав испытательного стенда входят система подачи воздуха, газогенератор, смеситель, устройства управления, зажигания и регистрации: ионизационные зонды (ИЗ) и высокочастотные датчики давления (ДД).

Эталонная импульсно-детонационная труба включает камеру сгорания и три секции: секцию ускорения пламени, винтовую секцию и рабочую секцию (рис. 1). Сжатый воздух периодически подается в смеситель, в котором происходит его смешение с горючим газом, непрерывно поступающим из газогенератора. Расход воздуха определяется по изменению давления в воздушном ресивере. Расход горючего газа оценивается по времени полного разложения навески твёрдого топлива в газогенераторе. Из смесителя перемешанная ТВС подается в камеру сгорания ЭДТ, где она поджигается автомобильной свечой. Образованное пламя проходит в секцию

¹Институт химической физики им. Н.Н. Семенова
Российской Академии наук, Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет
МИФИ, Москва,

³Научно-исследовательский институт системных
исследований Российской Академии наук, Москва

⁴Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской
Академии наук, Новосибирск

⁵Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева
Российской Академии наук, Москва

⁶Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский
университет), Москва

⁷Объединенный институт высоких температур Российской
Академии наук, Москва

⁸Институт автоматизации проектирования Российской
Академии наук, Москва

* E-mail: sergei@frolovs.ru

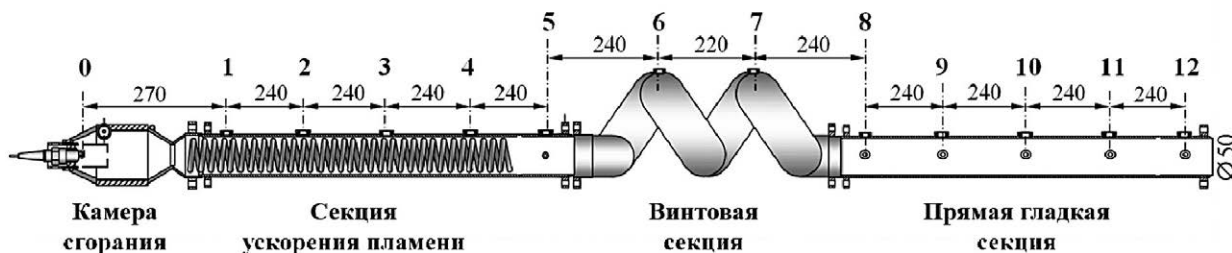


Рис. 1. Схема ЭДТ с указанием базовых расстояний в мм: 0 – место зажигания, 1–12 – сечения установки ИЗ и/или ДД.

ускорения пламени, в которой установлена спираль Щёлкина, навитая из стальной проволоки.

За секцией ускорения пламени расположена винтовая секция, в которой происходит газодинамическая фокусировка волн сжатия и возникают очаги самовоспламенения, что, в конечном счёте, может привести к ПГД по механизму [12] и дальнейшему распространению детонации. Винтовая секция представляет собой трубу, свитую в два витка.

Рабочая секция ЭДТ – прямая гладкая труба – предназначена для измерений параметров получаемых волн горения и детонации. К концу секции прикреплена дополнительная секция трубы, направляющая продукты горения в систему вентиляции (на рис. 1 не показана).

На схеме ЭДТ указаны номера контрольно-измерительных сечений – мест установки ИЗ и ДД – и расстояния между ними. По длине трубы расположено 12 таких сечений. В сечениях 1–7 и 10 установлены только ИЗ, а в сечениях 8, 9, 11 и 12 установлены ИЗ и ДД. Принцип действия ИЗ и методика измерения описаны в [13]. С помощью ИЗ определяется мгновенное положение пламени с точностью ± 2 мм. С помощью ДД определяется мгновенное положение волны давления с точностью ± 6 мм.

В качестве твёрдого топлива используется вторичный ГП. Термическое разложение ГП происходит в газогенераторе – цилиндрическом реакторе из нержавеющей стали. Газогенератор помещается в муфельную печь, нагреваемую до температуры разложения T_d , которая контролируется термопарой с точностью ± 5 °С. Характеристики газогенератора определены в диапазоне температур 650 °С $\leq T_d \leq 800$ °С при навеске ГП массой 15 г.

Хроматографический анализ состава газообразных продуктов пиролиза ГП показал, что они в основном состоят из пропилена (до 39%), метана (до 21%), этилена (до 17%), изобутена (до 14%), этана (до 12%) и пропана (до 4%).

Эксперименты по определению детонационной способности ТВС проводятся по следующей мето-

дике. Сначала задается циклограмма работы стенда. Настройка рабочего цикла проводится исходя из того, что горючий газ подается в ЭДТ непрерывно, а воздух – порционно. Длительность подачи воздуха подбирается по его расходу так, чтобы подаваемый в трубу объём газов был больше объёма трубы. После зажигания подача воздуха кратковременно прекращается, а затем опять возобновляется. Пауза в подаче воздуха предусмотрена, чтобы обеспечить «пробку» из продуктов пиролиза между новой порцией свежей ТВС и продуктами горения предыдущего цикла. После этого цикл с подачей воздуха, зажиганием и паузой повторяется заданное число раз («выстрелов»). Установка работает в автономном режиме до полной выработки твёрдого топлива в последовательных выстрелах.

По расходам воздуха и горючего газа определяли массовое соотношение «воздух–горючее» L_o . Напомним, что для стехиометрических ТВС на основе углеводородов типа авиационного керосина $L_{o,ст} \approx 15$. Зная T_d и L_o , а также начальную температуру воздуха $T_a \approx 20$ °С, можно оценить температуру ТВС на входе в ЭДТ: $T_m \approx (T_d + L_o T_a) / (1 + L_o)$.

На рис. 2 показан пример первичных записей ИЗ (пунктирные кривые) и ДД (сплошные кривые) для одного из выстрелов в опыте с ТВС на основе продуктов пиролиза ГП. Отсчёт времени ведётся от момента зажигания. Моменты резкого отклонения записей ИЗ вниз от нулевой линии соответствуют приходу фронта пламени в то или иное контрольное сечение (см. точку и стрелку для сечения 5). Аналогично моменты резкого отклонения записей ДД вверх от нулевой линии соответствуют приходу волны давления в то или иное контрольное сечение (см. точку и стрелку для сечения 8). Зная расстояния всех контрольных сечений от источника зажигания, на основе рис. 2 можно построить зависимости скорости фронта пламени и волны давления от пройденного расстояния и определить длину L_{DDT} и время t_{DDT} ПГД. В соответствии с [14] детонация возникает там, где временная задержка между приходом волны

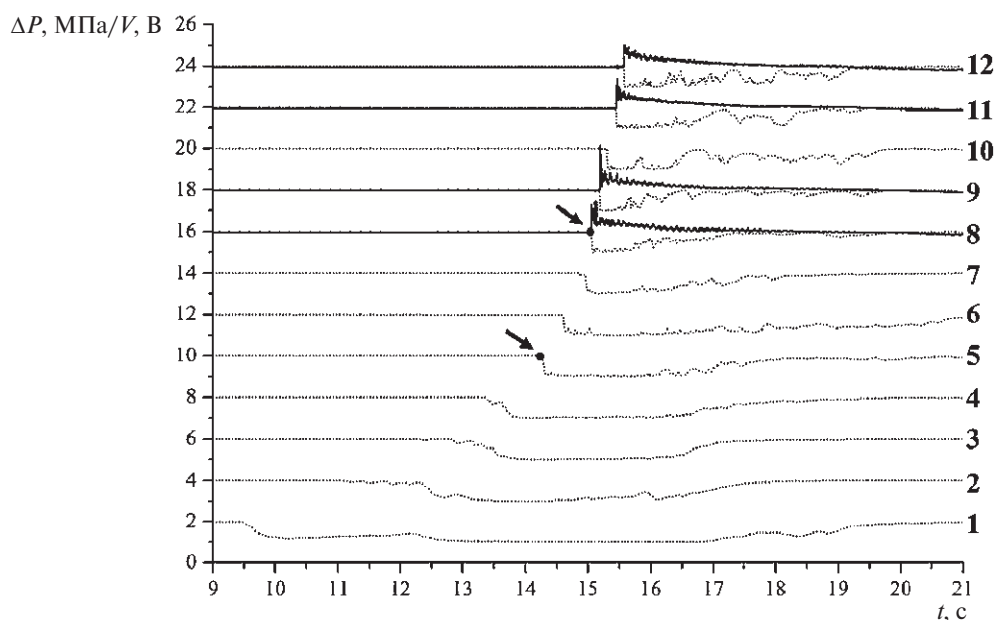


Рис. 2. Первичные записи ИЗ (напряжение V в В) в контрольных сечениях 1–12 (пунктирные кривые) и ДД (избыточное давление ΔP в МПа) в контрольных сечениях 8, 9, 11 и 12 (сплошные кривые) для одного выстрела в опыте с ТВС на основе продуктов пиролиза ГП при температуре разложения 700°C .

Таблица 1. Результаты нескольких экспериментов по ПГД в ТВС на основе метана, СУГ и продуктов пиролиза ГП

№ опыта / топливо	89 СУГ	59 ГП	38 ГП	39 ГП	40 ГП	61 ГП	82 метан
Температура разложения T_d , $^\circ\text{C}$	–	653	705	703	710	804	–
Начальное давление воздуха в ресивере, МПа	–	0,37	0,40	0,37	0,33	0,40	–
Конечное давление воздуха в ресивере*, МПа	–	0,31	0,37	0,33	0,30	0,33	–
Расход воздуха (средний), г/с	–	2,5	2,7	2,4	2,2	2,9	–
Расход горючего (средний), г/с	–	0,2	0,2	0,2	0,2	0,26	–
Массовое соотношение «воздух/горючее» L_0	15,3	12,1	13,5	11,8	11,2	11,0	17,3
Коэффициент избытка воздуха α	1,00	0,81	0,90	0,79	0,74	0,74	1,00
Относительная масса твёрдого остатка, %	–	4,9	7,3	7,3	7,3	18,0	–
Количество выстрелов	6	8	8	10	6	6	6
Оценочная температура ТВС на входе в ЭДТ T_m , $^\circ\text{C}$	20	68	74	73	77	85	20
L_{DDT} , м	~2	~2	~2	~2	~2	~2	~2
t_{DDT} , мс	12,9	12,9	10,6	11,2	11,7	8,6	15,1
Среднее значение скорости детонации, м/с	1800	1730	1800	1800	1800	1770	1715

Примечание. * Равновесное давление после выдержки в течение 5 мин.

давления и фронта пламени не превышает 100 мкс, т.е. ТВС самовоспламеняется вследствие ударного сжатия. В сечениях 8, 9, 11 и 12 временной задержки между сигналами ИЗ и ДД уже практически нет, т.е. в рабочей секции распространяется ДВ. В данном примере $L_{DDT} \approx 2$ м и $t_{DDT} \approx 15$ мс.

В таблице приведены результаты типичных опытов с ПГД в ТВС на основе продуктов пиролиза ГП при $650^\circ\text{C} \leq T_d \leq 800^\circ\text{C}$, а также опытов со стехиометрическими ТВС на основе метана и СУГ марки ПБА – пропан-бутан автомобильный. Эксперименты с метаном и с СУГ проводились для отладки

методики и для получения сравнительных данных. В отличие от продуктов пиролиза ГП, которые подавались в ЭДТ в нагретом состоянии, ТВС на основе метана и СУГ подавались в ЭДТ при комнатной температуре. В таблице указаны все важнейшие параметры опытов и результаты измерений L_{DDT} и t_{DDT} , а также средние значения скорости детонации.

Опыты 38, 39 и 40 проведены при $T_d \approx 700^\circ\text{C}$. Из таблицы видно, что значение L_0 от опыта 38 к опытам 39 и 40 уменьшалось от 13,5 до 11. Если учесть, что $L_{0,st} \approx 15$, то во всех указанных опытах ТВС

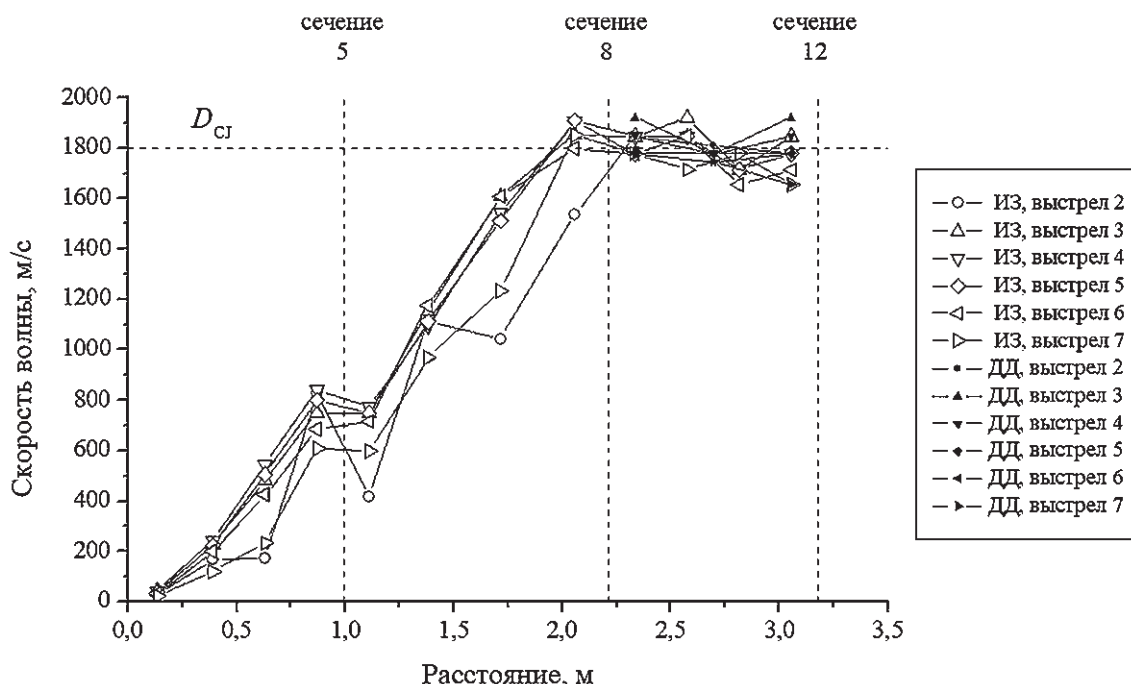


Рис. 3. Зависимости скорости фронта пламени и волны давления от пройденного расстояния для шести последовательных выстрелов 2–7 в опыте 40 с ТВС на основе продуктов пиролиза ГП.

суммарно переобогащена горючим: коэффициент избытка воздуха $\alpha = L_o / L_{o,ст} < 1$. Температура ТВС на входе в ЭДТ в этих опытах $T_m \approx 75^\circ\text{C}$.

Продемонстрируем на примере рис. 3 для опыта 40, как в ЭДТ от выстрела к выстрелу ускоряется пламя. На рис. 3 показаны зависимости скорости фронта пламени и волны давления от пройденного расстояния для шести последовательных выстрелов 2–7. Все шесть выстрелов были детонационными: в них зарегистрирован ПГД и последующее распространение ДВ с постоянной скоростью на уровне 1700–1870 м/с в рабочей секции ЭДТ. Во всех выстрелах ПГД происходил между сечениями 7 и 8 на выходе из винтовой секции, т.е. $L_{DDT} \approx 2$ м. Длина ПГД L_{DDT} изменялась незначительно, несмотря на изменение состава ТВС от выстрела к выстрелу. В опытах 38 и 39 получены такие же значения для L_{DDT} . Что касается времени ПГД, то оно оказалось минимальным в опыте 38 ($t_{DDT} \approx 10,6$ мс) и максимальным в опыте 40 ($t_{DDT} \approx 11,7$ мс), т.е. обогащение ТВС горючим, как и ожидалось, уменьшает её детонационную способность.

В опытах 59 и 61, проведённых при $T_d \approx 650^\circ\text{C}$ и 800°C , также зарегистрированы ПГД и распространение ДВ в рабочей секции ЭДТ с квазистационарной скоростью 1650–1800 м/с и 1650–1900 м/с соответственно. В этих опытах ПГД также происходил между сечениями 7 и 8 на выходе из винтовой секции

ЭДТ, т.е. $L_{DDT} \approx 2$ м. Если сравнить время ПГД в опытах 59, 40 и 61, то оно оказалось минимальным в опыте 61 ($t_{DDT} \approx 8,6$ мс) и максимальным в опыте 59 ($t_{DDT} \approx 12,9$ мс), т.е. повышение температуры разложения T_d от 650 до 800°C , увеличивает детонационную способность ТВС.

В опытах с ТВС стехиометрического состава на основе метана и СУГ также получен ПГД с $L_{DDT} \approx 2$ м, однако время ПГД t_{DDT} составило 13 и 15 мс соответственно. При этом в метановоздушной ТВС зарегистрирован предельный (спиновый) режим детонации. Это означает, что детонационная способность ТВС на основе продуктов пиролиза полипропилена при температурах разложения T_d от 650 до 800°C сопоставима или даже превышает детонационную способность стехиометрической ТВС на основе СУГ при нормальных условиях.

Таким образом, нами предложен новый способ определения детонационной способности топлива: на основании измеренных значений длины и времени ПГД в ЭДТ. Важнейшая отличительная черта ЭДТ – её работа в импульсно-периодическом режиме, так что за один опыт набирается достаточная статистика для определения длины и времени ПГД. Проведены эксперименты по изучению ПГД в воздушных смесях продуктов пиролиза ГП. Показано, что в смесях с воздухом, обогащённых горючим ($0,73 \leq \alpha \leq 0,90$), при нормальном давлении и по-

вышенной начальной температуре (70–90 °С) продукты пиролиза ГП обладают детонационной способностью, близкой к детонационной способности СУГ в стехиометрической смеси с воздухом при нормальных условиях.

Благодарности. Авторы признательны М.С. Французову за руководство дипломной работой М.В. Каченко.

Источники финансирования. Работа частично выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18–08–00076а) и частично за счёт субсидий, выделенных ИХФ РАН и ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН на выполнение государственного задания по темам 0082–2016–0011 и 0065–2019–0005 с номерами государственной регистрации АААА–А17–117040610346–5 и АААА–А19–119011590092–6 соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов С.М. Импульсные детонационные двигатели. М.: Торус Пресс. 2006.
2. Frolov S.M., Aksenov V.S., Ivanov V.S. // Int. J. Hydrogen Energy. 2015. V. 40. № 21. P. 6970–6975.
3. Zvuloni R., Gany A., Levy Y. // J. Propulsion. Power. 1988. V. 5. № 1. P. 32–37.
4. Ben-Yakar A., Natan B., Gany A. // J. Propulsion Power. 1998. V. 14. № 4. P. 447–455.
5. Lv Z., Xia Z. X., Liu B., Liu Y. C. // J. Propulsion Power. 2015. V. 31. № 1. P. 6.
6. Внучков Д.А., Звегинцев В.И., Лукашевич С.В., Наливайченко Д.Г. // Горение и взрыв. 2017. Т. 10. № 4. С. 51–56.
7. Hadar I., Gany A. // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1992. V. 17. P. 70–76.
8. Pei X., Wu Z., Wei Z., Liu J. // J. Propulsion Power. 2013. V. 29. № 5. P. 1041–1051.
9. Pei X., Hou L. // Acta Astronautica. 2014. V. 105. № 2. P. 463–475.
10. Аульченко С.М., Звегинцев В.И. // Горение и взрыв. 2017. Т. 10. № 4. С. 57–62.
11. Фролов С.М., Аксенов В.С., Басевич В.Я. // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44. № 2. С. 285–292.
12. Frolov S.M. // J. Loss Prevention Proc. Ind. 2005. V. 19. № 2/3. P. 238–244.
13. Фролов С.М., Аксенов В.С., Дубровский А.В., Зангиев А.Э., Иванов В.С., Медведев С.Н., Шамшин И.О. // ДАН. 2015. Т. 465. № 1. С. 62–67.
14. Басевич В.Я., Фролов С.М., Посвянский В.С. // Химическая физика. 2005. Т. 24. № 7. С. 60–70.

DEFLAGRATION-TO-DETONATION TRANSITION IN AIR MIXTURES OF POLYPROPYLENE PYROLYSIS PRODUCTS

S. M. Frolov^{1,2,3}, V. I. Zvegintsev⁴, V. S. Aksenov^{1,2}, I. V. Bitera⁵, M. V. Kazachenko^{1,6}, I. O. Shamshin^{1,3}, P. A. Gusev^{1,7}, M. S. Belotserkovskaya^{3,8}

¹Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation

³Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

⁴Khrstianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

⁵Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

⁶Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

⁷Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

⁸Institute for Computer Aided Design, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Presented by Academician of the RAS A.A. Berlin December 17, 2018

Received December 17, 2018

A new method for determining the detonability of fuel is proposed based on the measured values of the detonation run-up distance and time in the standard pulsed detonation tube (PDT). Granulated polypropylene (GP) was used as a fuel. A test bench with the PDT and a gas generator was designed and manufactured for the preparation of the GP pyrolysis products at a decomposition temperature of up to 800 °C. Experiments on deflagration-to-detonation transition in air mixtures of pyrolysis products of the GP showed that such mixtures exhibit detonability close to that of liquefied hydrocarbon gas (LPG) of the propane-butane automobile brand in a stoichiometric mixture with air under normal conditions.

Keywords: detonability, standard pulsed detonation tube, granulated polypropylene, pyrolysis products, fuel–air mixture, deflagration-to-detonation transition.