

УДК 532.542.2

П. В. Булат¹, К. Н. Волков¹, Л. П. Грачев², И. И. Есаков², П. Б. Лавров², М. Е. Ренев¹

Воздействие электронного пучка и внешнего электрического поля на пропано-воздушную смесь

Рассматривается влияние предварительной ионизации горючей смеси и возбуждения ее молекул под воздействием электронного пучка и внешнего электрического поля на интенсивность процессов горения смеси при различных скоростях ее возбуждения. Приведены результаты расчета температуры сухой и влажной пропано-воздушных смесей при их воспламенении. Даны рекомендации по применению облучения дозвукового течения такой смеси электронным пучком во внешнем электрическом поле для увеличения эффективности ее горения.

Ключевые слова: *плазмо-химическая модель, химические реакции, плазменное горение, электронный пучок, электрическое поле.*

¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им Д. Ф. Устинова. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-ая Красноармейская, 1; ²Московский радиотехнический институт РАН. 117519, г. Москва, Варшавское шоссе, 132; э-почта: dsci@mail.ru.

Введение. Для повышения эффективности сгорания углеводородных топлив их подвергают различного рода воздействиям, в частности, воздействию пучков электронов и внешнего электрического поля, а также их совместному воздействию [1, 2]. В работе [3] рассматривается изменение параметров обтекания шара пропано-воздушной смесью с использованием электронного пучка, инжектированного через сопло Лавалля, при одновременном воздействии на это течение электрического разряда. В работе [4] обсуждается применение электронного пучка для активации воздуха с целью его дальнейшего использования в горючей пропано-воздушной смеси. Появление колебательно- и электронно-возбужденных частиц в такой смеси улучшает процесс ее горения и снижает время воспламенения [5].

Система химических реакций в пропано-воздушной смеси, приведенная в работах [6, 7], удовлетворительно описывает процессы ее горения при атмосферном давлении и температурах выше 1500 К. Нагрев электронов плазмы, образующейся в атомарном газе при инъекции в него быстрых электронов, рассматривается в работах [8–10]. При

описании воздействия плазмы или пучка электронов на пропано-воздушную смесь необходимо учитывать электронно-молекулярные, электронно-ионные и ионно-ионные взаимодействия в ней с участием продуктов воздействия быстрых электронов на молекулы пропана, поскольку плазма в ионизованном газе оказывает специфическое химическое воздействие на его молекулы [11–16].

Пары воды, присутствующие в горючей смеси оказывает существенное влияние на кинетику реакций образования в ней ионов и на скорость ее нагрева. Предварительные расчеты плазмы сухой пропано-воздушной смеси, образованной в результате действия на смесь пучка электронов или несамостоятельного электрического разряда показали, что, при нагреве такой смеси в ней нарабатываются до момента ее воспламенения пары воды, концентрация которых составляет 1–2%, что необходимо учитывать при моделировании плазмы смеси.

В настоящей работе приведены результаты расчетов нагрева и воспламенения пропано-воздушной смеси по модели, учитывающей наличие паров воды в смеси и их реагирование, а также по модели сухой смеси, в которой отсутствуют реакции с молекулами воды. Расчеты проводились для плазмы пропано-воздушной смеси, созданной пучком электронов или под воздействием несамостоятельного электрического разряда. Рассматривалась эволюция температуры в сухой и влажной пропано-воздушных смесях, а также в сухом и влажном воздухе при одних и тех же условиях внешнего воздействия. Исследовалось влияние паров воды в пропано-воздушной смеси на ее воспламенение в различных условиях.

Плазмо-химическая модель. В расчетах использовалась кинетическая схема химических реакций в пропано-воздушной смеси, объединенная с кинетической схемой воздуха, возбужденного электронным пучком во внешнем электрическом поле. Для исследования кинетики горения пропано-воздушной смеси за основу выбрана система химических реакций из работы [6], дополненная обратными реакциями (74 реакции, включающие водородно-кислородную цепочку, гидропероксильные и пероксидные реакции, реакции пропана, реакции I-пропила, N-пропила и пропена, реакции этилена, этила и винила, кетонные реакции, реакции метила и формальдегида) и стандартным уравнением энергии с энтальпиями, рассчитанными на основе данных работы [7]. Химия воздуха взята из программы расчета его плазмы [4, 16], согласно которой плазма воздуха включает 20 компонентов (нейтральные частицы, электроны, положительные и отрицательные ионы) и в нем происходит 120 плазмохимических реакций.

При моделировании влажной пропано-воздушной смеси предполагалось, что она состоит из следующих компонентов: положительных ионов O^+ , O_2^+ , O_4^+ , H^+ , H_2^+ , OH^+ ,

HO_2^+ , H_2O^+ , $\text{O}_2^+(\text{H}_2\text{O})$, H_3O^+ , $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})$, $\text{H}_3\text{O}^+(\text{OH})$ и $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_2$, отрицательных ионов O^- , O_2^- , O_3^- , H^- и OH^- , атомов O и H, молекул H_2 , O_2 , H_2O и O_3 , свободных радикалов OH, HO_2 и H_2O_2 , молекул $\text{O}(^1\text{D}_1)$, $\text{O}(^1\text{S}_0)$ и $\text{O}_2(^1\Delta_g)$ в возбужденном состоянии, электронов и компонентов воздушной плазмы. В расчетах кроме реакций с участием этих компонентов учитывались рекомбинации каждого положительного иона с каждым отрицательным ионом [17]. Модель такой смеси включает реакции трех-тельного прилипания ионов к молекулам O_2 в присутствии молекул H_2O в качестве третьего тела, перезарядку и ионно-ионную рекомбинацию положительных и отрицательных ионов.

Константы скоростей химических реакций в пропано-воздушной смеси определялись на основе метода Фланнери [15] с учетом их зависимости от температуры и давления [16, 18]. В плазмо-химической модели смеси учитывалось охлаждение плазменных электронов в упругих и неупругих столкновениях с молекулами воды, кислорода и азота при возбуждении их колебательных и вращательных степеней свободы [19].

Константы скоростей электронно-молекулярных взаимодействий в воздухе и в пропано-воздушной смеси (как в сухой, так и во влажной) определялись с учетом возбуждения молекул, их ионизации, прилипания молекул друг к другу и их отлипания. На основе решения уравнения Больцмана с учетом сечений электронно-молекулярных процессов в пропане, кислороде и азоте определялись константы скоростей ионизации молекул и их прилипания. Эти константы отличаются незначительно от констант указанных процессов в воздухе при концентрации пропана в нем, меньшей 10%, что позволяет использовать константы скоростей электронно-молекулярных процессов, полученных для воздуха, в расчете плазмы пропано-воздушной смеси при концентрациях пропана в ней, имеющих практический интерес (т. е. при концентрациях, соответствующих бедной и стехиометрической смесям).

Начальное давление газа в пропано-воздушной смеси полагалось равным 1 атм, а ее температура — 290 К. Рассматривался электронный пучок с плотностью тока 10^{-5} – 10^{-3} А/см² при $W = 10^{17}$ – 10^{19} эВ/(см³·с). Расчеты проводились в термодинамическом приближении. Максимальная удельная энергия, подводимая к смеси импульсом ионизации заданной мощности длительностью 40 мкс в электрическом поле напряженностью 3 кВ/см составляла 1 Дж/см³.

Результаты расчетов. Расчеты проводились для пропано-воздушной смеси с парами воды и для сухой пропано-воздушной смеси, а также для плазмы, созданной в пропано-воздушной смеси пучком электронов, и для плазмы в такой смеси, созданной под воздействием несамостоятельного электрического разряда. Тенденции, наблюдаемые при

воздействии электронного пучка и несамостоятельного электрического разряда на сухие смеси, имели место и в смесях с парами воды.

Состав смеси. В плазме, образующейся в сухой пропано-воздушной смеси в результате воздействия на нее пучка электронов, основными нейтральными частицами являются N_2 , H_2O , NO и CO , что указывает на практически полное выгорание молекулярного кислорода в процессе его диссоциации на атомы и в ходе химических реакций, приводящих, в частности, к накоплению молекул NO в смеси. До воспламенения смеси основными заряженными частицами в ней являются отрицательные ионы O_3^- и положительные ионы H_3O^+ , а после ее воспламенения — электроны и положительные ионы H_3O^+ и $C_2H_3^+$, концентрации которых увеличивается с увеличением температуры смеси из-за замедления электронно-ионной рекомбинации в ней.

При воздействии несамостоятельного электрического разряда на сухую пропано-воздушную смесь основными нейтральными частицами в плазме смеси являются N_2 , H_2O , NO и CO (как и в случае воздействия на такую смесь электронным пучком). До воспламенения смеси основными заряженными частицами в ней являются отрицательные ионы O_2^- и H_2O и положительные ионы $C_2H_3^+$ и $C_3H_5^+$, а после воспламенения — электроны и положительные ионы $C_2H_3^+$. Основными нейтральными частицами смеси после ее воспламенения являются N_2 , H_2O , NO и CO , что свидетельствует о неравновесности процессов в плазме при образовании молекул NO , мешающих превращению CO в CO_2 . Состав продуктов сгорания смеси принципиально отличается от состава воздуха, что следует учитывать при моделировании ее горения и анализе результатов измерений.

Ионные составы сухой и влажной смесей, подвергнутых воздействию несамостоятельного электрического разряда, существенно различны. Во влажной смеси до воспламенения присутствуют ионы O_2^- , H_2O , $C_2H_3^+$ и $C_3H_5^+$, в то время как в сухой смеси до воспламенения — ионы O_2^- и H_3O^+ . После воспламенения смесей основные заряженные частицы, входящие в состав их плазмы, оказываются одинаковыми — это электроны и положительные ионы $C_2H_3^+$ (происходит разрушение отрицательных ионов и отлипание от них электронов). Достаточно высокие концентрации электронов в плазме смеси поддерживают ее возбуждение и обеспечивают реализацию джоулева нагрева смеси после воспламенения. Появление тяжелых водных кластеров в смеси приводит к медленной ионно-ионной рекомбинации в ней на начальной стадии накопления радикалов в смеси и замедляет ее воспламенение.

Распределение температуры в смеси. Результаты расчетов воздействия электронного пучка мощностью $W=10^{18}$ эВ/(см³·с) на пропано-воздушную смесь

представлены на рис. 1. Время нагрева плазмы влажной смеси, образованной в результате воздействия на нее пучка электронов, меньше примерно на порядок величины по сравнению с временем нагрева плазмы сухой смеси в одинаковых условиях. При этом по свойствам воспламенения сухая смесь близка к сухому воздуху, а влажная смеси — к влажному воздуху.

Время нагрева плазмы влажной смеси, образованной в результате воздействия на нее несамостоятельного электрического разряда, меньше примерно на порядок величины по сравнению с временем нагрева плазмы сухой смесью в одинаковых условиях (рис. 2).

При возбуждении горючей смеси происходит сначала ее нагрев до температуры порядка $T=1200$ К, а затем воспламенение с достижением максимальной температуры $T=2700$ К. Плазменный эффект снижения времени воспламенения смеси в модели, не учитывающей ионно-молекулярные реакции в смеси с участием молекул пропана, достигает двух раз (сравнение касается расчетов воспламенения и авто-воспламенения при температуре $T=1500$ К). Часть времени источник плазмы работает как нагреватель.

Результаты расчетов эволюции температуры различных пропано-воздушных смесей под воздействием несамостоятельного электрического разряда и электронного пучка представлены на рис. 3. В рассматриваемых условиях смесь нагревается до температуры $T=2290$ К в течение $8.5 \cdot 10^5$ мкс. Такое же время занимает задержка воспламенения смеси с содержанием пропана 6%, что объясняется снижением количества кислорода в смеси, необходимого для эффективного горения. При возбуждении смеси электрическим разрядом и электронным пучком задержка воспламенения смеси с содержанием пропана 4% составляет $7.5 \cdot 10^5$ и $8 \cdot 10^5$ мкс соответственно.

Время воспламенения смеси. Расчеты воспламенения пропано-воздушной смеси без учета наличия в ней реакций с участием ионов и плазменных реакций пропана дают наименьшее время ее воспламенения. Сравнение этих расчетов с расчетами, учитывающими плазмохимические реакции в смеси, указывает на замедляющую роль этих реакций. Роль накопления активных радикалов в смеси в результате ионно-ионной и электронно-ионной рекомбинаций, которые идут сравнительно медленно на начальном этапе возбуждения смеси, в системе плазмохимических реакций в смеси не ясна. Анализ механизмов этих реакций показывает, что время воспламенения смеси уменьшается в основном за счет реакций с участием ионов N_2^+ и O_2^+ .

Расчеты показали, что время воспламенения первоначально холодной стехиометрической сухой пропано-воздушной смеси, подвергнутой воздействию электронного пучка мощностью $W = 10^{18} - 10^{19}$ эВ/(см³·с), составляет $9 \cdot 10^5 - 1.0 \cdot 10^5$ мкс, а ее температура достигает $T=2600$ К. В случае воздействия на такую смесь

несамостоятельного разряда во внешнем электрическом поле напряженностью $E=3$ кВ/см время воспламенения смеси составляет $7 \cdot 10^4 - 1.0 \cdot 10^4$ мкс, т. е. уменьшается в 10 раз по сравнению с ее возбуждением электронным пучком, и температура смеси достигает $T=2800$ К.

Время воспламенения первоначально холодной стехиометрической пропано-воздушной смеси, содержащей пары воды, оказалось равным $2 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^5$ мкс при ее возбуждении электронным пучком мощностью $W=10^{18} - 10^{19}$ эВ/(см³·с). В этом случае температура смеси достигает $T=2600$ К. В случае воздействия на смесь несамостоятельного разряда во внешнем электрическом поле напряженностью $E=3$ кВ/см время воспламенения смеси составляет $10^4 - 10^5$ мкс, т. е. уменьшается от 2 до 3 раз по сравнению с ее возбуждением электронным пучком, и температура смеси достигает $T=2700$ К. Разница между временами воспламенения пропано-воздушной смеси, содержащей пары воды, электронным пучком и несамостоятельным электрическим разрядом связывается с понижением температуры плазмы смеси во втором случае.

Обобщение результатов. Результаты расчетов воспламенения пропано-воздушной смеси в нормальных условиях представлены в табл. 1. Вариант 1 в таблице соответствует расчетам, в которых использованы система реакций пропана и воздуха (без плазменных реакций молекул пропана) и плазмо-химические реакции в сухом воздухе. Вариант 2 соответствует расчетам, в которых использованы система реакций пропана и воздуха (без учета реакций плазмы водяного пара), плазмо-химические реакции в сухом воздухе и плазмо-химические реакции компонентов пропана. Вариант 3 соответствует расчетам, в которых использованы система реакций пропана и воздуха, плазмо-химические реакции во влажном воздухе и плазмо-химические реакции компонентов пропана.

Заключение. Проведены исследования по выбору констант скорости электронно-молекулярных взаимодействий в воздухе, а также в сухой и влажной пропано-воздушных смесях с учетом возбуждения и ионизации молекул смеси, их прилипания и отлипания. Создана обобщенная модель и программа расчета параметров плазмы пропано-воздушной смеси, образующейся в смеси под воздействием на внешнего электрического поля, электронного пучка или электронного пучка во внешнем электрическом поле. Комплексное воздействие электронного пучка и внешнего электрического поля на пропано-воздушную смесь значительно ускоряет процессы ее горения. Проведены расчеты для различных скоростей возбуждения пропано-воздушной смеси электронным пучком и электронным пучком во внешнем электрическом поле, указывающие на появление диссоциированных и электронно-возбужденных молекул воздуха в смеси и на высокую степень возбуждения этих молекул в широком диапазоне параметров пучковой

плазмы. Согласно расчетам нестехиометрических смесей, добавление пропана в воздух увеличивает концентрацию частиц плазмы в нем. Комплексное воздействие электронного пучка и внешнего электрического поля на пропано-воздушную смесь приводит к значительному повышению ее температуры, стабилизирует процесс ее горения и увеличивает скорость сгорания смеси. Такой же эффект наблюдается и для бедной горючей смеси.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в ходе реализации проекта «Создание опережающего научно-технического задела в области разработки передовых технологий малых газотурбинных, ракетных и комбинированных двигателей сверхлегких ракет-носителей, малых космических аппаратов и беспилотных воздушных судов, обеспечивающих приоритетные позиции российских компаний на формируемых глобальных рынках будущего», № FZWF-2020-0015.

Обозначения

E – напряженность электрического поля, кВ/см; t – время, с; t_{ign} – время воспламенения смеси газов, с; T – температура, К; T_{cr} – температура смеси после воспламенения; W – мощность возбуждения смеси, эВ/(см³·с). Индексы: cr — критический; ign — воспламенение.

Литература

1. Булат П. В., Волков К. Н., Грачев Л. П., Есаков И. И., Лавров П. Б. Влияние давления и состава топливной смеси на ее воспламенение подкритическим стримерным разрядом, распределенным по длине камеры сгорания. *Инженерно-физический журнал*. 2022. Т. 95. № 4. С. 947–954.
2. Афанасьев В. В., Кузьмин А. К., Аbruков С. А., Подымов В. Н., Ильин С. В. К вопросу воспламенения топ-ливовоздушной смеси высокоскоростной струей плазмы. *Инженерно-физический журнал*. 1994. Т. 67. № 5–6. С. 424–427.
3. Klimov A., Biturkin V., Kuznetsov A., Tolkunov B., Vystavkin N., and Vasiliev M. External and internal plasma-assisted combustion. *AIAA Paper*. 2004. Article ID 2004-1014.
4. Ardelyan N. V., Bychkov V. L., Gromov V., and Kosmachevskii K. V. Application of two plasma ignition enhancement methods of propane-air mixture. *AIAA Paper*. 2006. Article ID 2006-612.
5. Starikovskiy A. and Aleksandrov N. Plasma-assisted ignition and combustion. *Progress Energy Combust. Sci.* 2013. Vol. 39, No. 1. Pp. 61–110.

6. **Petrova M. V., Varatharajan B., and Williams F. A.** Detailed and reduced-chemistry descriptions for ignition and detonation of propane. *ASME Paper*. 2003. Article ID GT2003-38057.
7. **Westbrook C. K. and Chase L. L.** *Chemical Kinetics and Thermochemical Data for Combustion Applications*. UCID-17833. Lawrence Livermore Laboratory, 1978.
8. **Елецкий А. В., Кулагин В. Д.** *Расчет константы возбуждения резонансных состояний атомов в плазме, образованной электронным пучком*. Москва: Ин-т атомной энергии им. И. В. Курчатова, 1979.
9. **Бычков В. Л., Елецкий А. В.** Пучковая плазма высокого давления. *Химия плазмы*. 1985. Вып.12. С. 119–158.
10. **Бычков В. Л., Васильев М. Н., Коротеев А. С.** *Электронно-пучковая плазма: генерация, свойства, приложения*. Москва: Изд-во МГОУ «Росвузнаука», 1993.
11. **Foldiak G.** *Radiation Chemistry of Hydrocarbons*. Elsevier Scientific Publishing Company, 1981.
12. **Kossyi I. A., Kostinsky A. Y., Matveev A. A., and Silakov V. P.** Kinetic scheme of the non-equilibrium discharge in nitrogen-oxygen mixtures. *Plasma Sources Sci. Technol.* 1992. Vol. 1. Pp. 207–220.
13. **Arnold S. T., Morris R. A., and Viggiano A. A.** Reactions of O- with various alkanes — competition between hydrogen abstraction and reactive detachment. *J. Phys. Chem.* 1998. Vol. 102. No. 8. P. 1345–1348.
14. **Williams S., Miller T. M., Kighton W. B., Midey A. J., Arnold S. T., and Viggiano A. A.** Reactions and thermochemistry of alkyl ions, $C_nH_{2n+1}^+$ ($n=1-8$), in the gas phase. *AIAA Paper*. 2003. Article ID 2003-704.
15. **Фланнери М. Р.** *Газовые лазеры*. Под ред. И. МакДаниеля и У. Нигэна. Москва: Мир, 1986. С. 177–215.
16. **Ardelyan N., Bychkov V., Kosmachevskii K., Chuvashv S., and Malmuth N.** Modeling of plasmas in electron beams and plasma jets for aerodynamic applications. *AIAA Paper*. 2001. Article ID 2001-3101.
17. **Бычков В. Л., Юровский В. А.** Моделирование пучковой плазмы паров воды. *Теплофизика высоких температур*. 1993. Т. 31. № 1. С. 8–17.
18. **Смирнов Б. М.** *Ионы и возбуждённые атомы в плазме*. Москва: Атомиздат, 1974, **Ness K. F. and Robson R. E.** Transport properties of electrons in water vapor. *Phys. Rev. A*. 1988. Vol. 38. Pp. 1446–1456.

**Таблица 1. Результаты расчетов воспламенения пропано-воздушной смеси
подвергнутой различным внешним воздействиям**

№	W , эВ/(см ³ ·с)	E , кВ/см	T_i , мкс	T_c , К	Основные ионы до воспламенения	Основные ионы после воспламенения	Основные нейтральные частицы до воспламенения	Основные нейтральные частицы после воспламенения (без учета N ₂)
1	10 ¹⁸	3	3.0·10 ⁴	2335	O ₂ ⁻ (11.21) NO ⁺ (11.23)	e(11.9) NO ⁺ (11.9)	C ₂ H ₄ (17.44) H ₂ (17.24)	NO(18.49) H ₂ O(18.49) CO(18.48)
	10 ¹⁹	3	8.3·10 ³	2375	O ₂ ⁻ (11.65) NO ⁺ (11.65)	e(12.26) NO ⁺ (12.26)	C ₂ H ₄ (17.61) H ₂ (17.4)	NO(18.48) H ₂ O(18.49) CO(18.48)
2	10 ¹⁸	0	8.8·10 ⁵	2580	O ₃ ⁻ (13.42) H ₃ O ⁺ (13.44)	e(14.48) H ₃ O ⁺ (14.23) C ₂ H ₃ ⁺ (14.21)	NO(15.87) H ₂ O(16.11) H ₂ (15.87)	NO(18.71) H ₂ O(18.49) CO(18.48)
	10 ¹⁹	0	1.1·10 ⁵	2560	O ₃ ⁻ (13.68) H ₃ O ⁺ (13.69)	e(14.71) H ₃ O ⁺ (14.41) C ₂ H ₃ ⁺ (14.48)	NO(15.97) H ₂ O(16.15) H ₂ (16.01)	NO(18.71) H ₂ O(18.48) CO(18.48)
	10 ¹⁸	3	6.8·10 ⁴	2800	O ₂ ⁻ (11.10) H ₃ O ⁺ (11.07)	e(16.02) C ₂ H ₃ ⁺ (16.01)	NO(14.84) H ₂ O(15.31) H ₂ (14.84)	NO(18.71) H ₂ O(18.48) CO(18.48)
	10 ¹⁹	3	1.4·10 ⁴	2800	O ₂ ⁻ (11.56) H ₃ O ⁺ (11.58)	e(16.09) C ₂ H ₃ ⁺ (16.09)	NO(14.8) H ₂ O(15.29) H ₂ (14.83)	NO(18.69) H ₂ O(18.47) CO(18.44)
3	10 ¹⁸	0	2.2·10 ⁶	2570	O ₂ ⁻ 2[H ₂ O](14.25) C ₂ H ₃ ⁺ (13.57) C ₃ H ₅ ⁺ (13.87)	e(14.45) C ₂ H ₃ ⁺ (14.46)	H ₂ O(16.61) C ₂ H ₄ (16.65)	NO(18.62) H ₂ O(18.60) CO(18.48)
	10 ¹⁹	0	2.7·10 ⁵	2600	O ₂ ⁻ 2[H ₂ O](14.24) C ₂ H ₃ ⁺ (13.56) C ₃ H ₅ ⁺ (13.91)	e(14.50) C ₂ H ₃ ⁺ (14.60)	H ₂ O(17.82) C ₂ H ₄ (17.81)	NO(18.62) H ₂ O(18.63) CO(18.48)
	10 ¹⁸	3	1.05·10 ⁶	2680	O ₂ ⁻ 2[H ₂ O](14.20) C ₂ H ₃ ⁺ (13.53) C ₃ H ₅ ⁺ (13.91)	e(14.57) C ₂ H ₃ ⁺ (14.74)	H ₂ O(17.79) C ₂ H ₄ (17.76)	NO(18.61) H ₂ O(18.63) CO(18.48)
	10 ¹⁹	3	1.2·10 ⁵	2680	O ₂ ⁻ 2[H ₂ O](14.20) C ₂ H ₃ ⁺ (13.53) C ₃ H ₅ ⁺ (13.91)	e(14.59) C ₂ H ₃ ⁺ (14.75)	H ₂ O(17.83) C ₂ H ₄ (17.85)	NO(18.61) H ₂ O(18.63) CO(18.48)

Примечание: цифры в скобках — степень n при концентрации основных компонентов смеси, равной 10^n см^{-3} .

Рис. 1. Временные зависимости плазмы воздуха (1), влажного воздуха (2), сухой пропано-воздушной смеси (3) и пропано-воздушной смеси с парами воды (4) при возбуждении электронным пучком мощностью $W=10^{18}$ эВ/(см³·с)

Рис. 2. Временные зависимости температуры плазмы несамостоятельного разряда в воздухе (1), влажном воздухе (2), сухой пропано-воздушной смеси (3) и пропано-воздушной смеси с парами воды (4) при напряженности внешнего электрического поля $E=3$ кВ/см

Рис. 3. Временные зависимости температуры пропано-воздушных смесей с концентраций пропана 0 (1), 2 (2), 4 (3) и 6% (4) при их возбуждении несамостоятельным электрическим разрядом и распределения температуры электронной компоненты таких смесей с содержанием пропана 0 (5) и 6% (6)

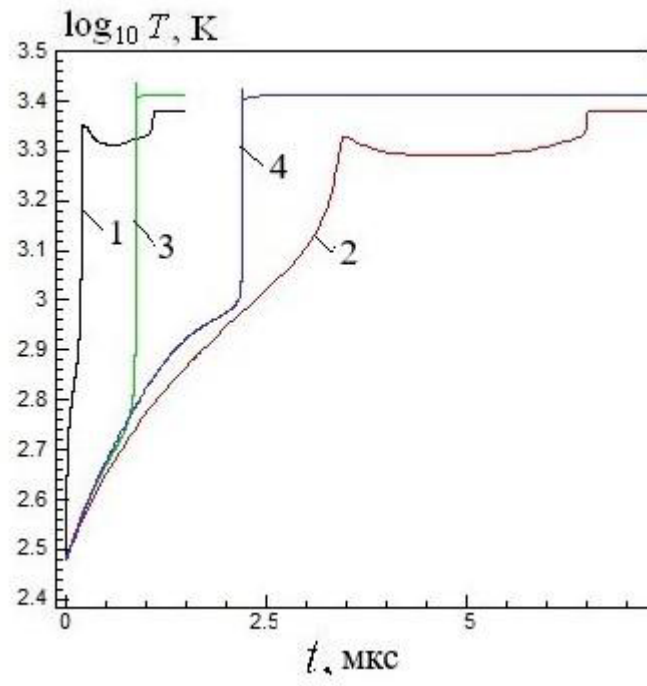


Рис. 1.

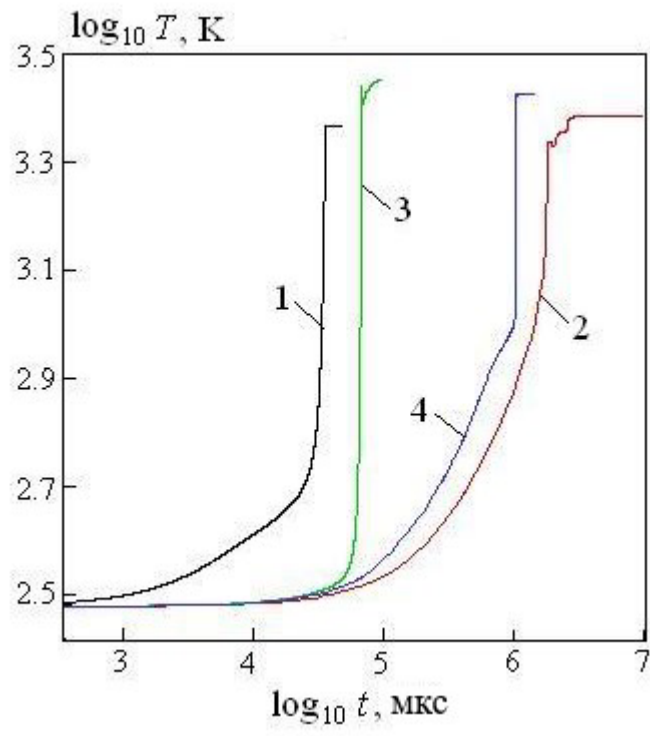


Рис. 2.

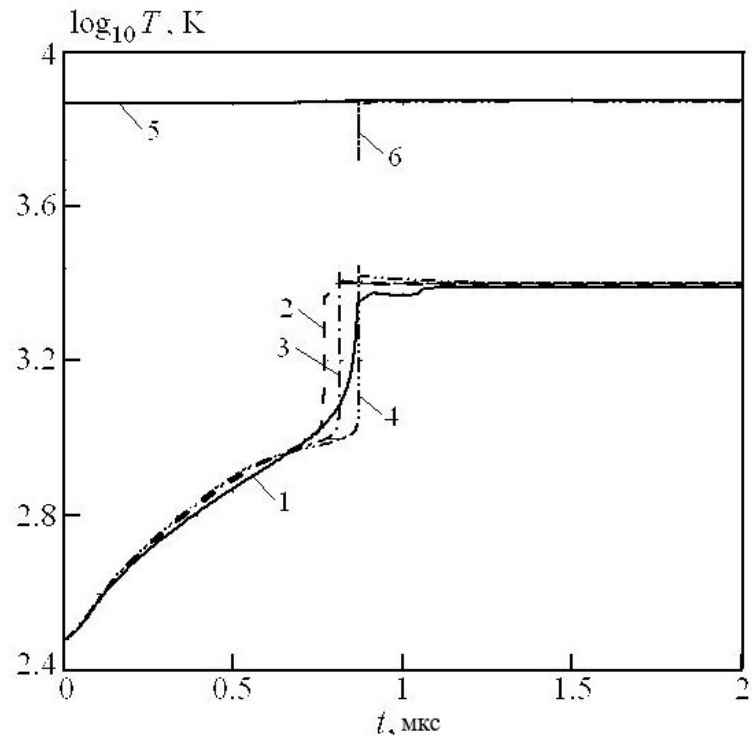


Рис. 3.