

КАЧЕСТВО ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОГО ПОТОКА ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОМ ПОДОГРЕВЕ ВОЗДУХА В УСТАНОВКЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ГОРЕНИЯ

В. А. Забайкин

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск, lab2@itam.nsc.ru

Исследовано качество высокоэнтальпийного потока воздуха применительно к моделированию натуральных параметров потока при изучении сверхзвукового горения. Показано, что используемый в экспериментах плазмотрон с газовихревой стабилизацией дуги способен в широком диапазоне давлений и температур обеспечивать уровень удельной эрозии электродов $10^{-7} \div 10^{-9}$ кг/Кл и концентрацию окиси азота менее 0,06 %, что практически не влияет на структуру течения и основные характеристики процесса воспламенения и горения.

Ключевые слова: плазмотрон, эрозия, сверхзвуковой поток, горение водорода.

Экспериментальные исследования процесса горения жидких и газообразных топлив в условиях высоких скоростей и температур имеют большое общенаучное и прикладное значение, в частности при разработке прямоточных двигателей. Для этого необходимы аэродинамические стенды, обеспечивающие высокий стабильный уровень подогрева рабочего газа (в первую очередь, воздуха), в том числе при повышенных давлениях. Существенными вопросами при любом способе подогрева являются получение равномерных профилей температур на входе в рабочую часть и внесение минимальных изменений в состав воздуха, что включает в себя как сохранение состава основных компонентов (O_2 , N_2), так и снижение уровня загрязнения посторонними примесями (в первую очередь, оксидами азота и продуктами эрозии элементов нагревателя).

Для достижения высоких температур широко применяются огневой подогрев газа (для этого чаще всего сжигают бензин или керосин, как, например, в [1], либо водород) и электродуговой способ при разряде батареи конденсаторов в установках импульсного типа (при этом возможен и дополнительный химический подогрев). Примером современной реализации подвода энергии от конденсаторов может служить высокоэнтальпийная импульсная труба с мультипликатором давления [2, 3]. Однако использование испаряющейся при разряде проволоочки создает уровень загрязнения не менее $1,4 \cdot 10^{-7}$ кг/Кл, и это без учета эрозии электродов и стенок разрядной камеры, оплавления кромок разрывной диафрагмы и образования

оксидов азота. По расчетным данным [3] массовая доля кислорода уменьшается при запуске импульсной трубы приблизительно на 1 %. К специфическим особенностям работы импульсных труб относятся также большие электрические токи разряда в форкамере, доходящие до 10^6 А, что приводит к наведению сильных электрических и магнитных полей и в ряде случаев требует экранирования испытываемых моделей.

При огневом способе подогрева основными загрязнителями становятся пары воды (особенно для водородного подогрева), а при использовании бензина или керосина — еще CO_x и, возможно, неполностью сгоревшие углеводороды. В любом случае влияние данного способа на такие параметры, как время задержки воспламенения и максимально достижимая температура при горении, может оказаться заметным [1]. По сравнению с «чистым» (кауперным) подогревом максимальная температура может отличаться на 200 К, а время задержки воспламенения — почти на порядок. Но стоит отметить такое достоинство огневого подогрева, как относительная техническая простота, особенно если не проводить последующего наислороживания потока.

Альтернативным способом подогрева является электродуговой с использованием плазмотронов. Этот способ отличается от огневого, кауперного, омического и других такими преимуществами, как быстрота выхода на режим, возможность длительной непрерывной работы при высоких температурах и возможность значительного изменения параметров воздушного (газового) потока от режима к режиму. В то

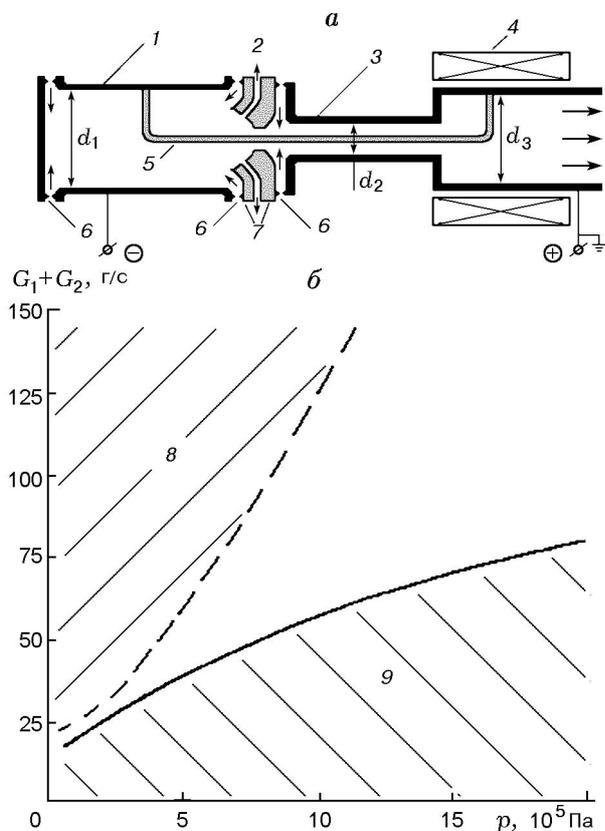


Рис. 1. Схема ЭДП (а) и диапазон его работы (б): 1 — катод, 2 — сброс части воздуха, 3 — анод, 4 — соленоид закрутки дуги, 5 — дуга, 6 — кольца тангенциальной подачи, 7 — пусковая вставка, 8 — область работы с минимальной эрозией катода, 9 — область аварийной работы ЭДП

же время электродуговой подогреватель представляет собой технически достаточно сложное устройство и требует мощного источника электропитания. При его работе в воздушной среде образуются оксиды, а в элементах конструкции, соприкасающихся с дугой, наблюдается эрозия поверхности, что влечет за собой появление посторонних примесей и может сказаться на протекании процессов горения.

В настоящей работе описаны пути снижения «отрицательных» сторон применения плазмотрона и достигнутые при этом результаты.

В качестве подогревателя на стенде сверхзвукового горения ИТПМ СО РАН используется электродуговой плазмотрон (ЭДП) линейной схемы, разработанный в Институте теплофизики СО РАН [4, 5] (рис. 1, а). Общий вид всего стенда представлен на рис. 2.

Газовоздушный тракт установки работает

от газгольдеров высокого давления (до 20 МПа) и включает в себя воздушный фильтр, ряд задвижек, редукторов, расходомерные участки и предохранительный клапан (на схеме не показаны). Непосредственно на установке воздух поступает частично в ЭДП, где происходит его нагрев, и частично в камеру смешения (форкамеру, П на рис. 2), где смешивается с горячим воздухом из ЭДП и доводится до требуемой в экспериментах температуры. После форкамеры воздух проходит через охлаждаемые переходник и сопло и поступает в исследуемый канал либо истекает в затопленное пространство. Переходник предназначен для установки сменных осесимметричных или плоских сопел. Все осесимметричные сопла являются профилированными, имеют единый выходной диаметр (50 мм) и рассчитаны на числа Маха 1,4; 2,2; 2,6; 3,1. Наиболее часто используются первые два, так как сопла с $M = 2,6$ и 3,1 при давлениях торможения $(4 \div 10) \cdot 10^5$ Па (штатный рабочий диапазон) формируют струю со значительным перерасширением (степень нерасчетности $n < 0,5$). Увеличение рабочего диапазона давления до $40 \cdot 10^5$ Па предусмотрено при последующей модернизации. Плоские сопла (на числа Маха $M = 1,5 \div 3$) монтируются вместе с прямоугольным каналом сечением 40×60 мм, изготовлены из меди и являются неохлаждаемыми. В канале имеется уступ высотой 40 мм. Боковые стенки для оптических наблюдений закрываются кварцевыми стеклами (описание прямоугольного канала см. в [6, гл. 8]).

Каналы с осесимметричными соплами набираются из отдельных секций длиной $20 \div 545$ мм и диаметром $50 \div 90$ мм. Используются как секции постоянного сечения, так и расширяющиеся, с углом раскрытия $1 \div 10^\circ$. Конфигурации ряда типичных исследуемых осесимметричных каналов представлены в [7]. Между переходником и сопловым блоком может устанавливаться вставка с инжекторами для подачи топлива по оси сопла, как показано на рис. 2. Применяемые способы подачи и соответствующий им характер выгорания описаны в [8]. В конце рабочей части находится сверхзвуковой кольцевой эжектор, после которого воздух поступает в шахту шумоглушения и выбрасывается в атмосферу.

Наиболее сложным и ответственным элементом системы подогрева воздуха является ЭДП. К нему предъявляются высокие требо-

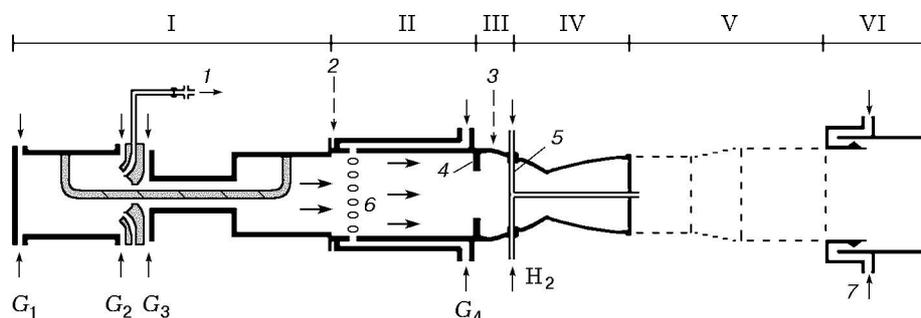


Рис. 2. Схема стенда сверхзвукового горения:

I — электродуговой подогреватель, II — форкамера, III — переходник, IV — сопловой блок, V — исследуемый канал или свободное пространство, VI — выхлопная система; 1 — сброс газа из катодной полости, 2, 3 — места ввода примесей до и после форкамеры, 4 — шайба, 5 — топливный инжектор, 6 — отверстия в «жаровой трубе» для подачи воздуха на подмешивание (G_4), 7 — подача воздуха в эжектор

вания, так как он должен обеспечить:

— подогрев газа в непрерывном режиме (≈ 1 мин) в диапазоне температур $1300 \div 2500$ К при давлении $0,5 \div 1$ МПа;

— время установления режима после запуска ≤ 1 с;

— минимальное количество посторонних примесей и продуктов, выделяемых в процессе нагрева;

— высокую повторяемость режимов работы;

— большой ресурс работы.

Данным требованиям отвечает ЭДП постоянного тока (комбинированной схемы) общей мощностью до 2 МВт. В его основе лежит конструкция трехкамерного плазмотрона ЭДП-143 с цилиндрическим катодом и анодом с уступом на выходе. Применение ступенчатого выходного электрода способствует быстрому выравниванию профилей температуры и скорости на выходе из плазмотрона [9]. В таком плазмотроне реализуется довольно сложная структура течения с зонами обратных токов и вращением потока. Катодное и анодное пятна дуги нестационарны, они перемещаются по окружностям катодной и анодной камер соответственно. Непрерывное перемещение пятен привязки дуги обеспечивает «размывание» тепловых потоков по большей поверхности электродов и тем самым снижает уровень эрозии и повышает ресурс электродов. Вращение и стабилизация катодного пятна осуществляются за счет тангенциальной подачи воздуха (G_1 и G_2) через кольца закрутки. Вращение и стабилизация анодного пятна обеспечиваются

как газодинамически — за счет тангенциальной подачи воздуха (G_3) и его срыва за уступом, так и путем наложения соленоидального магнитного поля (рис. 1, а, поз. 3, 4).

Выбранная газодинамическая схема подогревателя обеспечила сравнительно небольшие теплотери в стенку (в зависимости от режима общий КПД изменялся от 67 до 75 %). От данной схемы в значительной степени зависит уровень эрозии самого подогревателя, а значит, и общее количество примесей в потоке воздуха. Эрозии подвергаются анод и особенно катод в местах привязки дуговых пятен. В результате на поверхности электродов образуется кольцевая канавка (шириной $25 \div 30$ мм) с характерной зернистой структурой. Металл, испаряющийся из зоны привязки дуги, окисляется в плазмотроне и уносится затем в форкамеру и далее через сопло в исследуемую секцию. Так как электроды выполнены из меди, то продукты эрозии представляют собой мелкодисперсную пыль из оксидов меди. В данной конфигурации удельная эрозия определяется динамикой перемещения катодного и анодного пятен, которая, в свою очередь, зависит от соотношений и расходов воздуха в различные части ЭДП, тока, давления и геометрических размеров камер плазмотрона. Важную роль играет и организация хорошего охлаждения наиболее теплонапряженных частей плазмотрона, чему при отработке ЭДП и стенда было уделено большое внимание.

На рис. 1, б показаны области удовлетворительной и аварийной (с неустойчивым вращением дуги и повышенной эрозией) работы плаз-

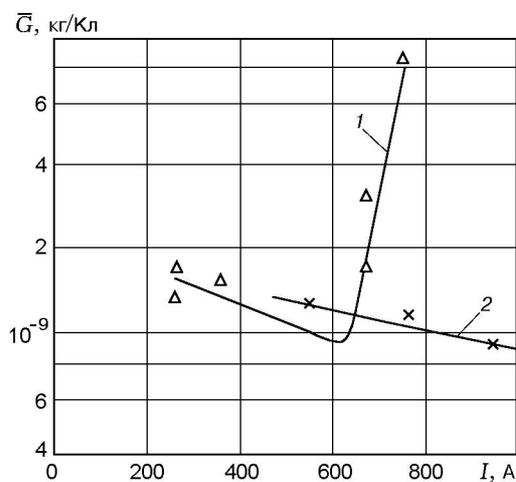


Рис. 3. Зависимость удельной эрозии медного катода от силы тока при атмосферном давлении:

1 — диаметр катодной камеры 0,05 м, 2 — 0,06 м [5]

мотрона, определенные опытным путем. Минимальной эрозии катода ($\approx 10^{-9}$ кг/Кл) соответствует соотношение расходов в катодную и анодную камеры $G_3 = (2 \div 5)(G_1 + G_2)$. (Обычно $G_1 = G_2$, но при значительной выработке центральной части катода соотношение этих расходов можно несколько изменить, что смещает зону выработки данного электрода и повышает общий ресурс ЭДП.)

Для экспериментальных установок, использующих электродуговой подогрев, чрезвычайно важен вопрос о работоспособности и уровне загрязнения воздуха при давлениях выше 10^5 Па, так как в основном плазмотроны рассчитаны на работу в условиях атмосферного давления. При повышении давления резко снижается устойчивость их работы, стабильность дуги и возрастает эрозия электродов. Работа плазмотрона данной схемы при атмосферном давлении позволяет реально поддерживать уровень удельной эрозии $\approx 10^{-9}$ кг/Кл (рис. 3) при диаметре катодной камеры $\geq 0,06$ м. Однако с повышением давления до $0,4 \div 0,5$ МПа эрозия быстро растет. Путем подбора геометрических параметров: диаметра катодной камеры d_1 (0,07 м), пусковой вставки d_4 (0,02 м), анодной проставки d_2 (0,039 м) и анода d_3 (0,06 м), а также соотношений и расходов воздуха G_1 , G_2 и G_3 — удалось в широком диапазоне токов (т. е. фактически мощности ЭДП) обеспечить уровень удельной эрозии в рабочих режимах не более 10^{-7} кг/Кл (рис. 4) во всем тре-

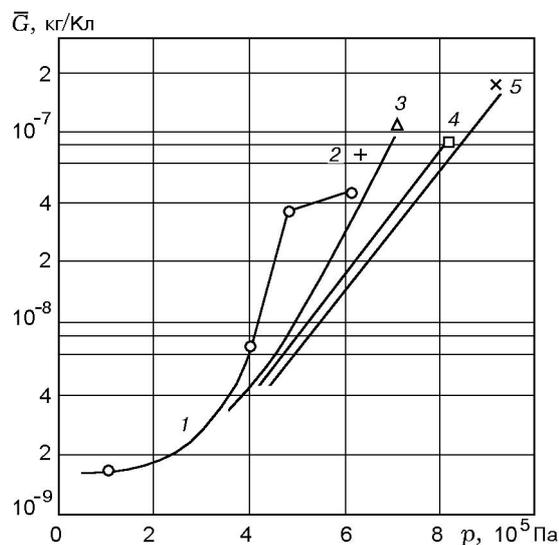


Рис. 4. Зависимость удельной эрозии от давления:

I , А: 1 — 650, 2 — 1500, 3 — 1570, 4 — 1450, 5 — 1400; $G_1 + G_2$, г/с: 1, 2 — 69, 3 — 85, 4 — 90, 5 — 105

буемом диапазоне рабочих параметров установки. При этом должны выполняться следующие соотношения (в системе СИ): $d_4 \approx d_1/2,5$; $d_4/d_2 \leq 0,6$; $d_3 \approx 1,5d_2$; $(G_1 + G_2)/pd_1 > 2 \cdot 10^{-6}$; $G_3 = (2 \div 5)(G_1 + G_2)$ [5].

Эрозия анодов в плазмотронах с медными цилиндрическими электродами существенно ниже, чем катодов [10]. Опыт эксплуатации плазмотрона на стенде сверхзвукового горения подтвердил этот факт: количество замен анода было приблизительно в три раза меньше, чем замен катода. При этом выработка стенок полости анода характеризуется равномерным износом.

Существенные особенности имеет процесс включения плазмотрона, главная из которых — невозможность запуска при рабочих давлениях. Часто применяемый (и использовавшийся на стенде первоначально) пуск плазмотрона вспомогательной дугой, инициируемой осциллятором, из-за необходимости пробоя разрядного промежутка возможен только при давлении до 0,09 МПа, что установлено опытным путем. После зажигания вспомогательной дуги между катодом и медной вставкой за счет ионизации воздуха во всем тракте плазмотрона зажигается основная дуга между анодом и катодом. При этом суммарный расход воздуха через ЭДП невелик (≤ 80 г/с — менее четверти расхода в рабочем режиме) и темпе-

ратуры на выходе из ЭДП могут превышать 5000 К. Износ электродов в этот момент также значителен. Путем последующего добавления воздуха плазмотрон выводится на заданный режим. Таким образом, общее время работы ЭДП в неоптимальном режиме могло составлять $5 \div 10$ с ($\approx 0,5$ с — собственно запуск ЭДП, затем время вывода оператором установки на заданный режим по давлению).

На основе накопленного опыта в рамках модернизации стенда вместо запуска посредством осциллятора был применен специальный подвижный электрод, при пуске кратковременно закорачивающий катод и пусковую вставку и тем самым вызывающий образование вспомогательной дуги. Это повысило надежность запуска, упростило всю систему, уменьшило электромагнитные помехи, влиявшие на регистрирующую аппаратуру, и, что особенно важно, позволило поднять начальное давление в воздушной системе при запусках до 0,3 МПа. А так как при зажигании основной дуги давление в форкамере резко увеличивается (на $0,3 \div 0,5$ МПа), в большинстве случаев этого оказалось достаточно для быстрого выхода на заданный режим ($\tau \leq 0,5$ с). Заметим, что при работе с исследуемыми каналами длительность работы на установившихся режимах составляла обычно 10 с.

Другим значительным моментом модернизации стала организация сброса части газа из катодной камеры (см. рис. 1, поз. 2) в атмосферу (в первоначальном варианте газ отводился, но затем снова поступал в общий поток перед форкамерой). В настоящее время этот газ выводится наружу через отверстия в медной вставке (поз. 7), отдельный расходомерный участок и электрическую развязку (см. рис. 2, поз. 1). Указанный отвод газа в плазмотроне играет важную для его работоспособности роль. Во-первых, он позволяет значительно (не менее чем вдвое) повысить суммарный расход воздуха $G_1 + G_2$ в катод и тем самым увеличить токовую нагрузку (а значит, мощность) и понизить эрозию до приемлемого уровня [5]. Во-вторых, большая часть продуктов эрозии катода из-за сепарации частиц к стенке электрода выносятся из катода, не попадая в форкамеру, что снижает уровень общего загрязнения воздуха.

Последний важный элемент улучшения качества потока — это форкамера (камера смешения), установленная сразу за плазмотроном.

Она состоит из внешней силовой цилиндрической оболочки и внутренней перфорированной вставки — «жаровой трубы». Холодный воздух (G_4) подается ближе к концу форкамеры и сначала проходит между силовой оболочкой и жаровой трубой, охлаждая ее, а затем через ряд отверстий (см. рис. 2, поз. 6) поступает внутрь форкамеры. Здесь он смешивается с горячим воздухом, выходящим из плазмотрона. Расположение и количество отверстий выбраны из условия обеспечения равномерно профиля температур и проверены прямыми измерениями [11]. На выходе из форкамеры находится шайба (см. рис. 2, поз. 4), создающая кольцевой уступ с зоной рециркуляции, что дополнительно улучшает наполнение температурного профиля. Заметим также, что в процессе смешения при достаточно длительном движении горячего воздуха по форкамере со скоростью $\approx 50 \div 70$ м/с, а это при длине форкамеры (вместе с переходником) 1 м происходит в среднем за $0,014 \div 0,02$ с, должны полностью релаксировать молекулы, возбужденные дугой плазмотрона. При таком времени пребывания газа в форкамере имеют место и рекомбинация либо окисление химически неустойчивых соединений, возможно образующихся в плазмотроне. Нейтральные соединения и инертные газы, как показано в [12], не влияют на последующие процессы горения в рабочей части установки.

Специально поставленные эксперименты по воздействию химически активных твердых частиц подтвердили положительное влияние форкамеры. В качестве примеси использовалась алюминиевая пудра с размером частиц $3 \div 6$ мкм. Пудра подавалась до и после форкамеры (см. рис. 2, поз. 2, 3). В первом случае вдув осуществлялся в высокотемпературную струю на стыке плазмотрона и форкамеры (расстояние от среза сопла 1070 мм), во втором — в дозвуковой части сопла (220 мм от среза, аналогично [12]). При подаче в сечение 1070 мм порошок полностью сгорал внутри форкамеры и на выходе из сопла формировался двухфазный сверхзвуковой воздушный поток с горячими инертными частицами Al_2O_3 . При последующей осевой подаче водорода визуальные наблюдения и регистрация оптико-механическим сканером интенсивности излучения водородного факела не выявили отличий от картины, наблюдаемой без запыления (рис. 5, а). При вдуве порошка Al на расстоя-

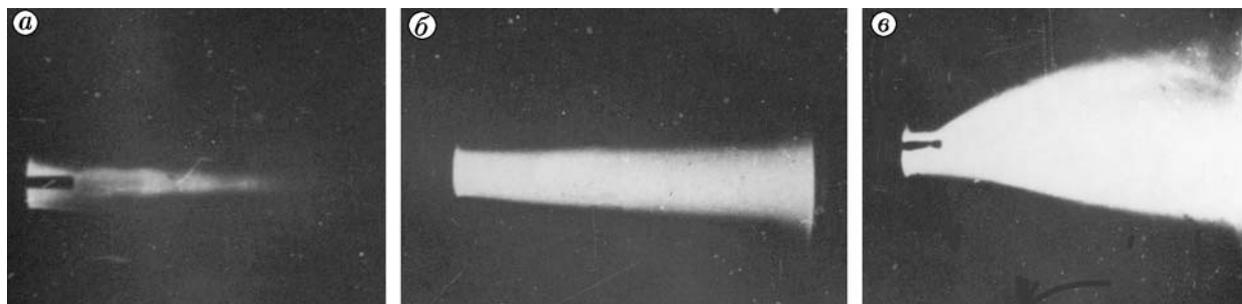


Рис. 5. Свечение алюминиевой пудры и взаимодействие ее с факелом водорода при подаче до и после форкамеры:

a — подача пудры до форкамеры; *б, в* — подача после форкамеры; *a, в* — дополнительно подается водород; *б* — без подачи водорода

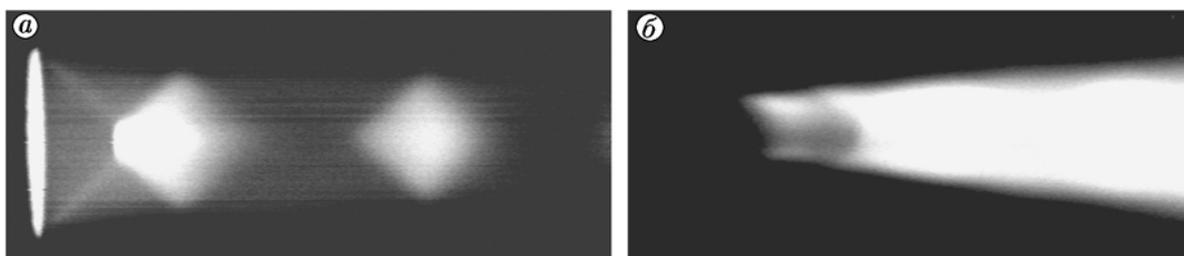


Рис. 6. Свечение пыли (*a*) при подсветке ее дугой плазмотрона и вид факела водорода (*б*) при температуре воздушной струи 2600 К

нии 220 мм (т. е. после форкамеры) картина резко изменяется. На данной длине Al не успевает полностью прореагировать и на выходе из сопла виден яркий факел горящего металла (рис. 5, *б* — подачи H_2 здесь нет). При дополнительной инъекции водорода по оси такого факела происходит интенсивное взаимодействие, выражающееся в существенном расширении горячей струи (рис. 5, *в*), чего не происходит при подаче порошка Al до форкамеры (1070 мм).

Наиболее характерным устойчивым соединением, образующимся при дуговом разряде, является NO. Приведенные в работе [13] данные позволяют считать, что влияние монооксида азота на реакцию окисления водорода (на время индукции) становится заметным при концентрации NO больше 2 %, а при концентрации 3 ÷ 5 % период индукции для стехиометрической смеси увеличивается более чем на порядок. Ингибирующее влияние NO существенно при низких температурах, однако при $T > 1200$ К (по данным расчетов тех же авторов) монооксид азота даже несколько снижает

задержку воспламенения, но разница эта незначительна.

На стенде была проведена экспериментальная проверка ряда факторов, влияющих на качество воздушного потока. В выходном сечении ЭДП при его отладке проводился газовый анализ. Измерялось содержание кислорода (первые эксперименты описаны в [11]), что косвенно (по уменьшению концентрации O_2) позволяет судить о возможном появлении оксидов (NO_x + оксиды металлов типа CuO и др.) и их верхней границе содержания. В трех точках отбора пробы не показали изменения содержания O_2 (точность измерений 0,01 %). В ядре струи ЭДП (две точки отбора) отмечено снижение содержания O_2 , но не более чем на 0,02 ÷ 0,03 %, что в самом неблагоприятном случае может означать здесь концентрацию NO около 0,06 %. Принимая во внимание данные работы [13], можно считать несущественным влияние монооксида азота на точность проведения экспериментов с горением водорода. К тому же это концентрация NO в центральной, наиболее загрязненной, области те-

чения. При учете всего потока средняя концентрация будет ниже. Концентрация NO значительно уменьшится и после прохождения газа через форкамеру: расход подмешиваемого в форкамеру газа (G_4) в зависимости от режима составляет $30 \div 45$ % суммарного расхода газа через ЭДП: $G_1 + G_2 + G_3$. Именно такая схема — подогрев воздуха в ЭДП до высокой температуры и дальнейшее перемешивание его с чистым холодным воздухом — рекомендована в [1] для снижения концентрации NO_x . Отметим, что газовый анализ проведен со схемой плазмотрона без сброса части газа в атмосферу из катодной камеры (первоначальный вариант ЭДП). Наличие сброса еще более понижает загрязнение воздуха посторонними примесями.

Другой обычно предполагаемый фактор загрязнения при использовании ЭДП — продукты его эрозии. Косвенно на это указывают эксперименты с высокой температурой ($T_0 \geq 2500$ К). На выходе из сверхзвукового воздушного сопла на таких режимах иногда видны отдельные элементы газодинамической структуры нерасчетной воздушной струи, обычно заметные только при теневой регистрации (рис. 6,а — снимок камерой технического зрения при максимально открытой диафрагме; выдержка $\tau \approx 10^{-2}$ с). Наиболее вероятно предположить, что это свечение пыли, присутствующей в воздухе, и продуктов эрозии электродов плазмотрона. В горячем воздухе раскаленные частицы могут светиться сами либо подсвечиваться через сопло светом дуги плазмотрона. Однако интенсивность свечения частиц настолько низка, что их спектр не удалось зарегистрировать даже при максимальной чувствительности прибора и настройке его на самую яркую зону свечения.

При аналогичных условиях ($T_0 = 2500 \div 2600$ К) была проведена регистрация спектра излучения пламени в видимой области длин волн. Схема подачи H_2 по оси сверхзвукового сопла показана на рис. 2 и подробно описана в [8]. Спектры излучения в первой «бочке» недалеко от места воспламенения, а также в дальней части факела представлены на рис. 7,а и 7,б соответственно (способ подачи H_2 — звуковая спутная струя, прямоточный инжектор [8], рис. 6,б — фотография факела). Отметим, что водородно-воздушное пламя без примесей в видимой области спектра не имеет линий излучения [14]. Однако на практике посторонние примеси в виде пыли самого разного состава

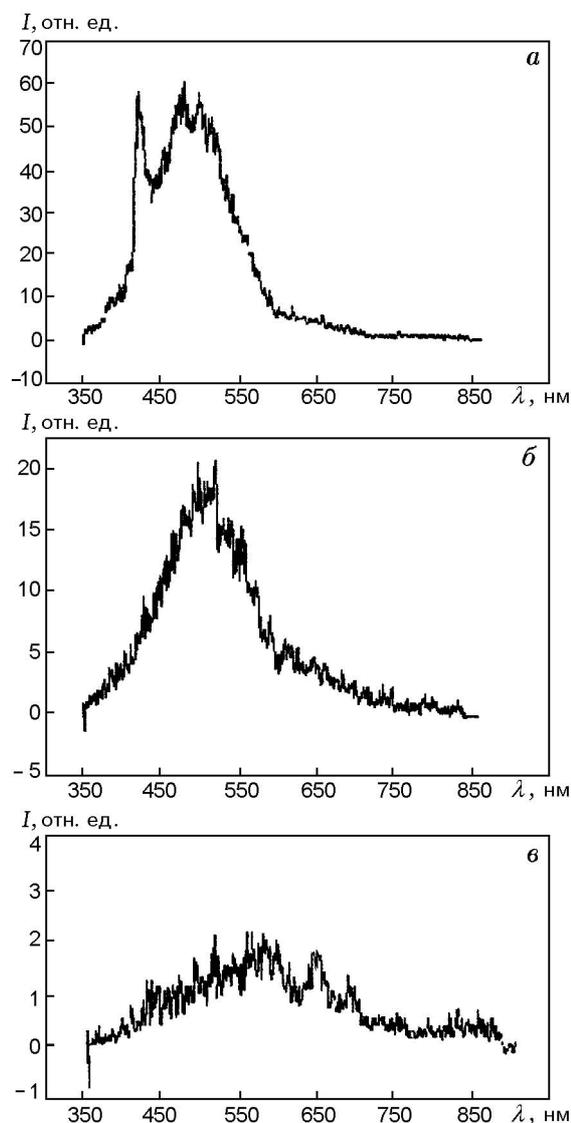


Рис. 7. Спектр пламени водорода в горячем (а, б) и холодном воздухе (в):

а — зона интенсивного горения за прямым скачком в первой «бочке»; б — горение вдали от сопла

дают сплошной спектр (см. рис. 7). Источниками твердых частиц могут быть только воздух высокого давления из газгольдеров, водород из баллонов и сам ЭДП. В представленном на рис. 7,а спектре излучения начальной части факела заметен отдельный пик, принадлежащий сере (S_2), которая чаще всего придает голубую окраску водородному пламени. Сера в неконтролируемом количестве почти всегда присутствует в баллонах с водородом и в некоторых случаях может применяться для оптических измерений параметров водородного пламени [6]. Однако из-за непостоянства концен-

трации ее пик в спектре может быть хорошо заметным (рис. 7,а), а может и отсутствовать (рис. 7,б,в).

Сравнение вида спектров пламени в видимой области при работающем плазмотороне (температура торможения подогретого воздуха $T_0 \approx 2600$ К, рис. 7,а,б) и при отсутствии подогрева ($T_0 \approx 290$ К, рис. 7,в) показало, что спектры имеют сходный характер. Только максимум интенсивности излучения сплошного спектра немного сместился в более длинноволновую область, что и должно происходить при понижении температуры.

Все это означает, что основной источник загрязнения потока, который может давать какую-либо погрешность измерений — это твердые частицы в используемых газах, а влияние меди и других продуктов эрозии плазмоторона на горение водорода несущественно. Свечение газодинамических структур на рис. 6,а — это пыль, становящаяся заметной при интенсивной подсветке ее дугой плазмоторона через сопло. В штатных режимах работы отработанная конструкция ЭДП трехкамерной схемы не влияет на структуру течения и основные характеристики процесса воспламенения и горения; важнее могут оказаться степень очистки используемого топлива и воздуха.

Таким образом, применение электродугового подогревателя на аэродинамических стендах, где необходима длительная работа при температурах $1000 \div 2500$ К, в том числе в условиях, когда требуется отсутствие влияния примесей на кинетику горения, является оправданным. Однако необходимо применять комплекс мер конструкторского и эксплуатационного характера для повышения качества высокоэнтальпийного потока. Важнейшими из них являются: выбор плазмоторона соответствующей схемы, определение режимов работы с наименьшей эрозией, наличие протяженного участка между ЭДП и рабочими секциями и организация дополнительного подмешивания холодного воздуха на этом участке. При выполнении данных требований ЭДП становится надежным инструментом на стендах, моделирующих высокотемпературные процессы при больших скоростях и давлениях, в том числе осложненных химическими реакциями. Установки с такими электродуговыми подогревателями по чистоте воздуха могут быть предпочтительнее огневых подогревателей, а по уровню достигаемых температур — каупер-

ных и омических.

Автор благодарит за ценные консультации и помощь в работе Э. К. Урбаха, П. К. Третьякова и С. С. Воронцова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барановский С. И., Надворский А. С., Ромашкова Д. Д. Простая одномерная модель влияния загрязненности воздуха на сверхзвуковое горение // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 6. С. 42–51.
2. Пузырев Л. Н., Ярославцев М. И. Стабилизация параметров газа в форкамере гиперзвуковой импульсной аэродинамической трубы // Изв. Сиб. отд-ния. АН СССР. Сер. техн. наук. 1990. Вып. 5. С. 135–140.
3. Пузырев Л. Н., Шумский В. В., Ярославцев М. И. Принципы разработки газодинамических моделей с горением для испытаний в высокоэнтальпийных установках кратковременного режима. Новосибирск, 1990. (Препр. / РАН. Сиб. отд-ние. ИТПМ; № 7).
4. Игнатъев В. Ф., Тимошевский А. Н., Урбах Э. К. Исследование плазмоторона с цилиндрическим катодом // Плазма 77. Материалы к VII Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. Алма-Ата, 1977. Т. 1. С. 3–6.
5. Урбах Э. К. Тепловые и аэродинамические процессы в электродуговых подогревателях газа / Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: ИТ СО РАН, 1986.
6. Горение в сверхзвуковом потоке / В. К. Баев, В. И. Головичев, П. К. Третьяков и др. Новосибирск: Наука, 1984.
7. Забайкин В. А., Лазарев А. М., Соловова Е. А., Третьяков П. К. Газодинамика сверхзвукового течения в канале переменного сечения при теплоподводе // Вест. АН БССР. Сер. физ.-энерг. наук. 1986. № 3. С. 102–106.
8. Забайкин В. А. Эффективность горения водорода в высокотемпературном сверхзвуковом потоке воздуха при различных способах инъекции // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 2. С. 3–8.
9. Тимошевский А. Н. и др. Исследование распределений температур и скорости в плазменных струях // Плазма 77. Материалы к VII Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. Алма-Ата, 1977. Т. 1. С. 242–245.
10. Жуков М. Ф., Коротеев А. С., Урюков Б. А. Прикладная динамика термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1975.
11. Забайкин В. А., Константиновский В. А., Тимошевский А. Н., Урбах Э. К. Плазменно-дуговой генератор в качестве подогревателя воздуха для установки по исследованию сверхзвукового горения // 2 Всесоюз. конф. по методам аэрофизических исследований (Сб. докл.). Новосибирск, 1979. Ч. 2. С. 240–242.

12. **Забайкин В. А., Перков Е. В., Третьяков П. К.** Влияние примеси H_2O_2 на воспламенение и горение водорода в сверхзвуковом потоке воздуха // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 3. С. 70–75.
13. **Строкин В. Н., Хайлов В. М.** К вопросу о влиянии окиси азота на задержку воспламенения водорода в воздухе // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 2. С. 230–235.
14. **Гейдон А. Г.** Спектроскопия пламен. М., 1959.

Поступила в редакцию 20/III 2002 г.
