

УДК 533.601.1+621.187.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СТРУЙ, СОЗДАВАЕМЫХ ПНЕВМОИМПУЛЬСНЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

В.М. БОЙКО, В.Ф. ЧИРКАШЕНКО

*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,
Новосибирск*

Разработана методика визуализации импульсных крупномасштабных (до 5 м) воздушных струй, создаваемых пневмоимпульсными генераторами. Исследовано влияние геометрических и газодинамических параметров пневмоимпульсного генератора на динамику распространения струй, истекающих в свободное пространство. В обобщенных координатах получена аппроксимационная зависимость, описывающая траекторию движения контактной поверхности струйного газа в широком диапазоне геометрических параметров при отношении полного начального давления в форкамере к давлению в окружающем пространстве в пределах 4 – 51.

В различных областях промышленности (металлургическая, топливно-энергетическая, химическая и т. д.) нарушения технологических процессов часто связаны с формированием отложений обрабатываемых материалов или их элементов на внутренних или внешних поверхностях технологических устройств. Сюда можно отнести, например, нарастание золовых отложений на поверхностях конвективного теплообмена котлоагрегатов ТЭЦ, формирование солевых отложений на внутренних поверхностях водопроводов или зависание материалов в накопительных емкостях (бункера, силоса). Существующие активные способы, препятствующие процессу формирования отложений (присадки, покрытия и пр.), не всегда применимы и, как правило, малоэффективны. Для устранения отложений и предотвращения их образования используются различные методы профилактики, наиболее перспективным из которых является способ ударно-волнового газодинамического воздействия. Суть его заключается в комплексном воздействии на отложения ударной волны (УВ) и импульсной газовой струи, а при взрывном способе формирования струи также и продуктов сгорания. При этом доли вклада УВ и спутной струи в эффективность воздействия зависят от многих факторов (выходные параметры импульсной струи, физико-химические свойства обрабатываемых материалов и т. д.). Многопараметричность процесса приводит к различным оценкам степени влияния УВ и струи на разрушение отложений [1, 2]. Так, согласно [2], основное воздействие определяется УВ, а в [1] рассматривается поэтапное воздействие: на небольших расстояниях — УВ и спутная струя, на больших — только УВ.

Существуют различные устройства, создающие импульсные газовые струи. Это газоимпульсные камеры, использующие энергию взрывного горения природных газов [1, 2], пневмоимпульсные генераторы, использующие потенциальную энергию сжатого воздуха [3, 4], и устройства, создающие холостой выстрел с помощью порохового заряда [5]. Наиболее перспективными и универсальными в этом ряду являются пневмоимпульсные генераторы

(ПИГ). Их отличительные особенности: высокое качество очистки, безопасность, простота конструкции и условий эксплуатации, возможность полной автоматизации, низкие эксплуатационные затраты и экологическая безопасность.

При проектировании ПИГ для увеличения эффективности и обеспечения требуемых выходных параметров в струе необходимо использовать расчетные методики, которые позволяли бы моделировать нестационарные газодинамические процессы в форкамере ПИГ и в свободной струе после выхода ее из сопла. Трудности прогнозирования связаны с многопараметричностью процесса нестационарного истечения струй и несовершенством используемых моделей. Несмотря на то что задаче нестационарного истечения газовых струй в свободное пространство посвящено много теоретических и экспериментальных работ [6 – 17], она остается слабо изученной. Диапазон области применимости аналитических методов, предлагаемых в работах [6 – 8] для определения параметров потока на оси струи, ограничен несколькими диаметрами выходного сопла. Согласно анализу, проведенному в работе [16], “расходная” модель течения от радиального источника [14], а также численное моделирование [9, 15] развития процесса не обеспечивают прогнозирования параметров струй с достаточной достоверностью, а наиболее перспективным направлением в настоящее время считаются попытки решения полных уравнений Навье — Стокса [17].

Известные экспериментальные исследования, направленные на изучение структуры импульсных струй различных газов (см., например, [11 – 13, 15]), как правило, проведены в ударных трубах. При этом давление газа за отраженной УВ в канале ударной трубы было практически постоянным, что не соответствует условиям истечения из ПИГ, давление в форкамере которого в процессе истечения уменьшается. Исследуемая область струи ограничена размерами поля зрения теневого прибора ИАБ-451, используемого для визуализации структуры течения. Соответственно времена наблюдения процессов истечения струй не превышали 200 мкс. Однако реальные размеры импульсных струй, генерируемых ПИГ, составляют 5 – 10 м, а полное время процесса распространения струи составляет 50 – 100 мс.

Для моделирования процесса истечения можно воспользоваться следующими обобщенными параметрами, используемыми в работах [11 – 13] для идеального и совершенного газа при условии однородности газов в струе и окружающем пространстве:

$$\bar{X} = \frac{X}{r_*}, \quad \bar{\tau} = \frac{\tau c_*}{r_*}, \quad N = \frac{P_0}{P_\infty}, \quad \bar{T} = \frac{T_0}{T_\infty}, \quad M_c,$$

где x — координата, r_* — радиус критического сечения сопла, $\bar{\tau}$ — отношение физического времени истечения τ ко времени, необходимому для прохождения с критической скоростью звука c_* расстояния, равного характерному размеру процесса r_* , T_0 , T_∞ — температура в форкамере ПИГ и окружающем пространстве; M_c — число Маха сопла, N — отношение полного давления P_0 в форкамере ПИГ к давлению P_∞ в окружающем пространстве. Необходимо отметить, что, согласно работе [16], параметр N наиболее верно отражает изменение структуры нестационарной импульсной струи (в отличие от общепринятой степени нерасчетности, определяемой отношением статического давления на срезе сопла к давлению в окружающем пространстве).

Результаты работ [11 – 13] охватывают область $\bar{\tau} \leq 100$. Для моделирования реальных струй необходимо обеспечить значения $\bar{\tau}$ в диапазоне от 2000 до 2500 при $N \leq 200$. Кроме того, в реальных ПИГ, как правило, $\bar{T} = 1$, тогда как в ударных трубах всегда $\bar{T} > 1$.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию влияния основных геометрических и газодинамических параметров ПИГ на динамику распространения создаваемых ими крупномасштабных импульсных струй.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема пневмоимпульсного генератора и его основные геометрические параметры показаны на рис. 1. Основными элементами ПИГ являются форкамера 5, выхлопной канал 4 и быстродействующий затвор, состоящий из блока управления 2 и сбрасывающего канала 3 (время срабатывания 3 – 5 мкс). К выходу канала 4 пневмогенератора с объемом форкамеры 20 дм³ присоединялся съемный блок с двумя расходящимися сверхзвуковыми соплами. Основные геометрические параметры испытанных генераторов приведены ниже (здесь W — объем форкамеры):

W , дм ³	1,35	15	20	50
L , мм	174	400	620	725
L_c , мм	9	90	100	100
D , мм	100	210	200	300
d_* , мм	18	62	60 2 × 35	95
M_c	1	1	1; 3	1

Результат воздействия на обрабатываемый материал определяется давлением и объемом сжатого воздуха в форкамере ПИГ, размером и конфигурацией сопла, быстродействием открытия сбрасывающего клапана, а также удалением ПИГ и его ориентацией относительно обрабатываемого объекта. Объем форкамеры ПИГ W изменялся от 1,35 до 50 дм³ при соответствующем изменении диаметра критического сечения сопла $d_* = 2r_*$ от 18 до 95 мм. При этом отношение площади критического сечения сопла F к объему форкамеры, определяющее темп опорожнения форкамеры, находилось в диапазоне $F/W = (0,096 - 0,2)$ 1/м. Измерения проведены при начальных давлениях сжатого воздуха в форкамере $P_0 = (0,4 - 5,1)$ МПа и температуре $T_0 = T_\infty = 290 - 300$ К. Расчетные значения геометрического числа Маха сопел, определенные для стационарного истечения, составляли $M_c = 1$ и 3.

В исследуемых ПИГах используются удлиненные сопла, вследствие чего реальные числа Маха сопел могут отличаться от расчетных. Формирование пограничного слоя уменьшает эффективный диаметр выходного сечения сопла на удвоенную толщину вытеснения, а наличие срывных зон приводит к снижению эффективного диаметра входа. Следует отметить, что степень влияния этих факторов изменяется в процессе одного пуска и зависит от начального давления в форкамере. Учесть это влияние расчетным способом довольно сложно. Оценки показывают, что реальные значения числа Маха струй на выходе из цилиндрических сопел не превышают $M_c = 1,4$.

На рис. 2 приведена схема эксперимента. Исследования динамики распространения струи проводились с помощью покадровой импульсной фотосъемки при различных временах задержки момента съемки относительно момента выхода струи из сопла. Визуализация струи осуще-

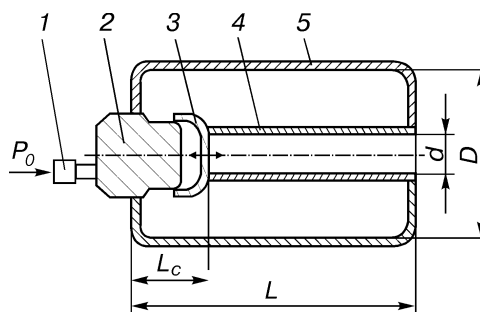


Рис. 1. Схема пневмоимпульсного генератора.

1 — штуцер подачи рабочего газа, 2 — блок управления, 3 — сбрасывающий клапан, 4 — канал, 5 — форкамера.

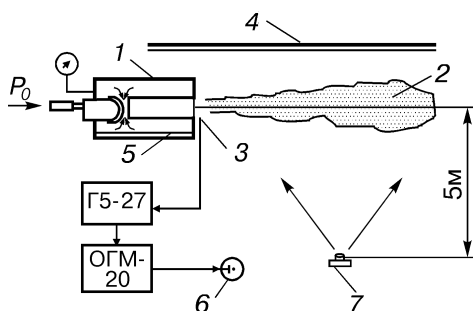


Рис. 2. Схема эксперимента.

1 — пневмогенератор, 2 — факел струи, 3 — синхронизирующий контакт, 4 — экран, 5 — вода, 6 — импульсная лампа ИФП-800, 7 — фотокамера.

ствлялась с помощью воды, предварительно заливаемой в форкамеру ПИГ. При запуске ПИГ под действием волны разрежения образуются пары воды, которые конденсировались в расширяющемся факеле струи и обеспечивали его визуализацию.

При использовании этой методики головная ударная волна (или волна сжатия), а также внутренняя структура струи не регистрировались.

Съемка факела производилась в темном помещении на фоне черного экрана на пленку КН-1 фотоаппаратом “Зенит” с объективом “Мир-1”. Для подсветки струи использовалась импульсная лампа ИФП-800, на которую разряжалась батарея конденсаторов блока питания рубинового лазера ОГМ-20. При пуске ПИГ под действием истекающей струи замыкался синхронизирующий контакт, запускающий генератор Г5-27. Последний обеспечивал заданную задержку импульса, управляющего поджигом лампы ИФП-800. Длительность вспышки, измеренная с помощью фотоэлемента ФЭК-18, составляла 0,3 мс. Данная методика позволяла практически без искажений наблюдать динамику распространения контактной поверхности на расстояниях до 5 м. При обработке изображений определялись зависимости от времени 1) расстояния до контактной поверхности струи $X_{к.п}(t)$, отсчитываемые от среза сопла в направлении его оси, и 2) угла струи раскрытия на начальном участке $\alpha(t)$.

Начальный объем воды в форкамере составлял (0,005 – 0,01) W , и этого было достаточно для обеспечения нормальной визуализации при проведении до 20 пусков ПИГ. Это хорошо видно на кадрах 2 и 3 (рис. 3, а), полученных в одинаковые моменты времени $\tau = 15$ мс в первом (кадр 3) и двадцатом (кадр 2) пуске. При этом изменение количества жидкости в форкамере на порядок (кадры 2 и 3, см. рис. 3, а) практически не сказывалось на динамике формирования факела струи.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрим особенности поведения импульсных струй в процессе их распространения в свободном пространстве. На рис. 3 показаны последовательные стадии развития конфигураций струй, истекающих из ПИГ с минимальными (см. рис. 3, а) и максимальными (см. рис. 3, б) значениями W и r . В начальной стадии истечения струи (см. рис. 3, б, $\tau = 4$ мс) конфигурация факела в окрестности переднего фронта приобретает грибовидную форму, которая при дальнейшем распространении преобразуется в близкую к конической. На некотором удалении от сопла в слое смешения формируются характерные выбросы, напоминающие вихреобразования.

Участок струи от среза сопла, на котором не наблюдаются вихреобразования, а форма границы струи сохраняется практически конической, назовем начальным коническим участком струи. Протяженность этого участка зависит от стадии истечения струи и параметра N . В начальной стадии истечения размер участка увеличивается, достигая максимального значения $(3 - 4)d_*$ при $\tau = 20$ мс, после чего уменьшается со снижением параметра N . При $\tau = 52$ мс (см. рис. 3, б) истечение из сопла практически прекратилось, и сброшенный

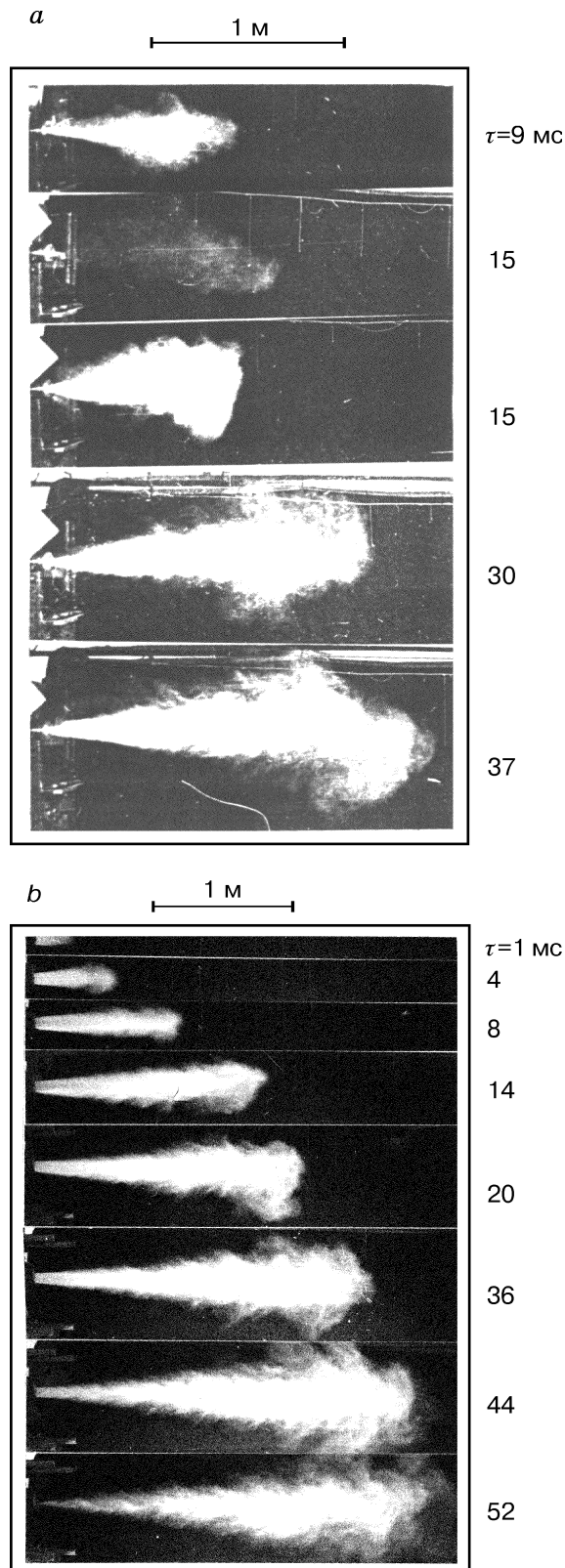
Рис. 3. Распространение импульсной струи, создаваемой ПИГ.

a: $W = 1,35 \text{ дм}^3$, $r_* = 9 \text{ мм}$, $P_0 = 2,6 \text{ МПа}$, $M_c = 1$; *b*: $W = 50 \text{ дм}^3$, $r_* = 47,5 \text{ мм}$, $P_0 = 0,6 \text{ МПа}$, $M_c = 1$.

воздух в виде струйного облака висит в атмосфере. В этой стадии распространения струи масштаб выбросов существенно увеличивается, а конфигурация струи приобретает грибовидную форму.

Рис. 4 иллюстрирует влияние начального давления сжатого воздуха в форкамере ПИГ на конфигурацию струи в фиксированный момент времени. Видно, что рост давления существенно увеличивает масштаб выбросов и угол раскрытия начального участка струи. Так, изменение P_0 от 1,05 до 5,1 МПа приводит к увеличению площади поперечного сечения струи практически на порядок.

На рис. 5, 6 показаны зависимости $\alpha(r)$ при различных значениях P_0 . Из рис. 6 видно, что в начальный период истечения ($\tau = 2 - 5$ мс) угол раскрытия струй достигает максимальных значений, которые сохраняются практически постоянными в течение 5 - 7 мс, после чего происходит их монотонное уменьшение. При этом значения α_{\max} для струй, истекающих в режиме недорасширения, оказываются существенно меньше начальных углов границы стационарных звуковых струй, определенных в [18] при соответствующих нерасчетностях. Так, значениям $\alpha_{\max}(\tau) = 7^\circ$ при $P_0 = 0,5 \text{ МПа}$ и $\alpha_{\max}(\tau) = 8^\circ$ при



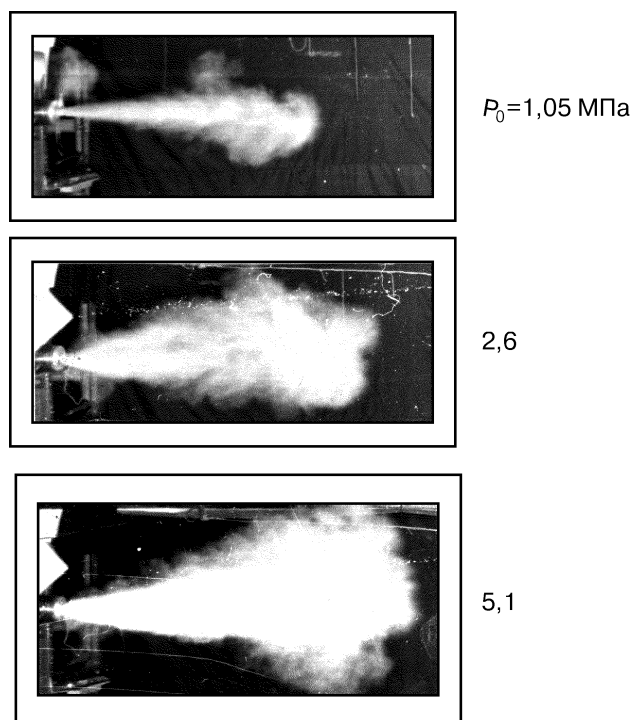


Рис. 4. Конфигурация струи при различных начальных давлениях в форкамере ПИГ.
 $W = 1,35 \text{ дм}^3, r_* = 9 \text{ мм}, M_c = 1, \tau = 17 \text{ мс}$.

$P_0 = 0,7 \text{ МПа}$ соответствуют начальные углы границы стационарной струи $\alpha = 17$ и 24° .

На рис. 7 представлены результаты обработки измерений расстояния до контактной поверхности струи для ПИГ различной геометрии при одинаковом начальном давлении в форкамере. Видно, что в размерных координатах траектории $X_{к.п}(\tau)$ расслаиваются. Если же представить результаты в безразмерных координатах (рис. 8) в виде относительного удаления контактной поверхности $\bar{X}_{к.п} = X_{к.п}/r_*$ и безразмерного времени $\bar{\tau}$, используемых в работах

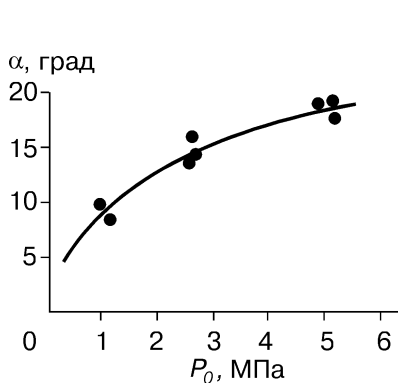


Рис. 5. Зависимость начального угла раскрытия струи от давления в форкамере ПИГ.

$W = 1,35 \text{ дм}^3, r_* = 9 \text{ мм}, M_c = 1, \tau = 17 \text{ мс}$.

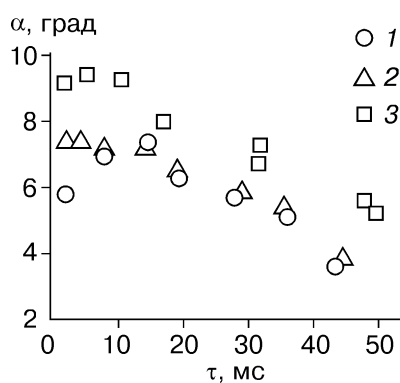


Рис. 6. Изменение во времени начальных углов раскрытия струй, создаваемых ПИГ.
 1, 2 — $W = 50 \text{ дм}^3, r_* = 47,5 \text{ мм}, M_c = 1, P_0 = 0,6 \text{ МПа}$ (1), $0,8 \text{ МПа}$ (2); 3 — $W = 20 \text{ дм}^3, r_* = 17,5 \text{ мм}, M_c = 3, P_0 = 1,1 \text{ МПа}$.

Рис. 7. Влияние геометрических параметров ПИГ на динамику распространения импульсных струй ($P_0 = 0,95$ МПа).

1 — $W = 1,35$ дм³, $r_* = 9$ мм, $M_c = 1$; 2 — $W = 15$ дм³, $r_* = 31$ мм, $M_c = 1$; 3 — $W = 50$ дм³, $r_* = 47,5$ мм, $M_c = 1$; 4 — $W = 20$ дм³, $r_* = 17,5$ мм, $M_c = 3$.

[11 – 13], то можно получить обобщенные зависимости для траекторий контактных поверхностей струй, создаваемых ПИГ различной геометрии, но при заданном начальном давлении в форкамере. В этих координатах траектории контактных поверхностей хорошо аппроксимируются степенной функцией вида $\bar{X}_{к.п.}(\tau) = a \cdot \bar{\tau}^m$ при $m < 1$. Однако в таком случае обобщение соблюдается до определенных режимов торможения струй, начиная с которых фактическая траектория отклоняется от обобщенной зависимости. Установить диапазоны применимости обобщения в данных координатах

довольно сложно и не имеет смысла, так как в рассматриваемом случае не обеспечивается обобщения по давлению в форкамере ПИГ. Введение обобщенных координат, используемых при решении задачи о мгновенно включенном радиальном источнике [14], в виде безразмерной продольной координаты

$$\xi = \sqrt{\frac{\rho_\infty}{\rho_*}} \frac{X_{к.п.}}{r_*} \text{ и безразмерного времени } \bar{\tau} = \sqrt{\frac{\rho_\infty}{\rho_*}} \frac{\tau c_*}{r_*}$$

обобщения при разных значениях параметра N .

Согласно результатам работы [16], начальное давление влияет на скорость распространения контактной поверхности струи слабо (как $(P_0/P_\infty)^{0,2}$). Анализ результатов, полученных в данной работе, показывает, что степень влияния начального давления в форкамере ПИГ на скорость распространения контактной поверхности зависит от давления, текущего значения параметра N и стадии распространения струи. При этом, если зависимость положения контактной поверхности от P_0 при заданном времени наблюдения представить в виде степенной функции $\bar{X}_{к.п.}(\tau) \approx P_0^m$, то показатель степени m изменяется от 0,5 до 0,1 при изменении P_0 от 0,4 до 5,1 МПа.

Учитывая особенности динамики распространения импульсных струй, созда-

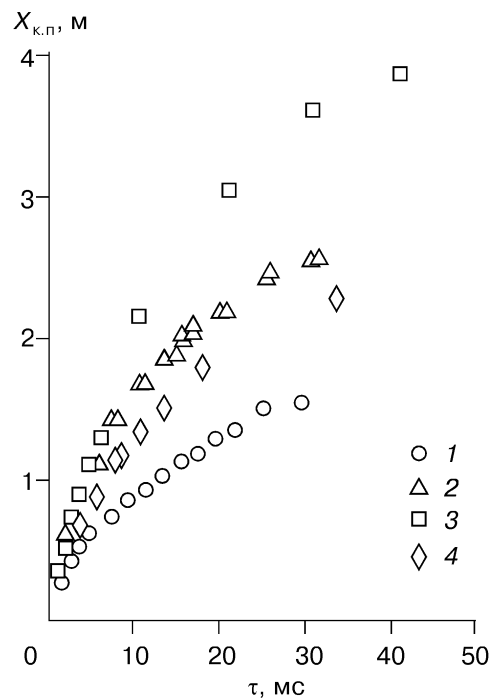
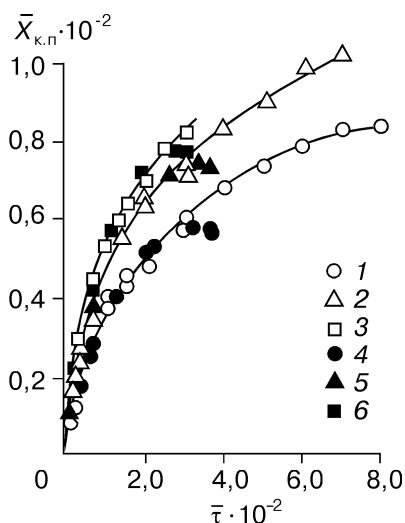


Рис. 8. Траектории импульсных струй в зависимости от геометрии ПИГ и начального давления в форкамере.

1 – 3 — $W = 15$ дм³, $r_* = 31$ мм, $M_c = 1$, $P_0 = 0,4$ МПа (1), 0,6 МПа (2), 0,8 МПа (3); 4 – 6 — $W = 50$ дм³, $r_* = 47,5$ мм, $M_c = 1$, $P_0 = 0,4$ МПа (4), 0,6 МПа (5), 0,8 МПа (6).

ваемых ПИГ различной геометрии, т. е. зависимость скорости распространения контактной поверхности струи от основных геометрических параметров ПИГ (d_* , W , M_c) от начального давления в форкамере P_0 , текущего значения параметра $N(\tau)$ и стадии распространения струи τ , для получения обобщений были использованы соответствующие безразмерные координаты. В качестве безразмерного удаления контактной поверхности принималась величина $\bar{X}_{к.п} = X_{к.п}/r_*$, а в качестве второй координаты использовалась комбинация параметров в виде $\bar{\tau}(N(\tau))^{0,1}$. При этом значение параметра $N(\tau)$ определялось по методике расчета параметров газа в емкости при ее опорожнении через отверстие постоянного сечения [19]:

$$N(\tau) = \frac{P_0(\tau)}{P_\infty} = \frac{P_0}{P_\infty} (1 + B\tau)^{-\frac{2\gamma}{\gamma-1}},$$

где

$$B = \frac{(\gamma-1)R\mu m F \sqrt{T_0}}{2W}, \quad m = \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \sqrt{\frac{g}{R}}},$$

$\gamma = C_p/C_v$ — показатель адиабаты газа, μ — коэффициент расхода, R — газовая постоянная. При определении $N(\tau)$ коэффициент расхода принимался постоянным: $\mu = 1$.

В обобщенных координатах результаты наблюдений по распространению контактных поверхностей импульсных струй, создаваемых всеми исследованными ПИГ, в диапазоне начальных давлений в форкамере $P_0 = 0,4 - 5,1$ МПа укладываются на общую кривую (рис. 9) с разбросом $\pm 7\%$. Эта кривая хорошо описывается аппроксимационной зависимостью в виде степенной

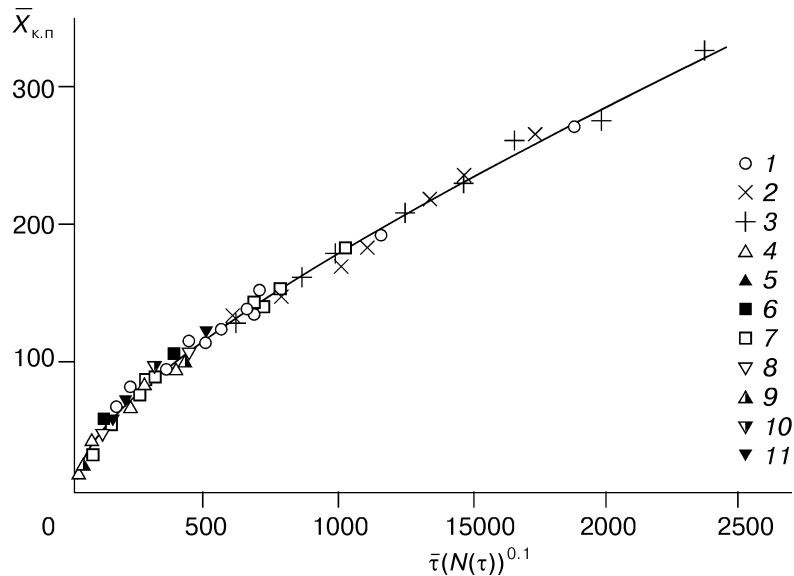


Рис. 9. Траектории фронта импульсной струи в обобщенных координатах.

1 - 3 — $W = 1,35 \text{ дм}^3$, $r_* = 9 \text{ мм}$, $M_c = 1$, $P_0 = 1,05$ (1), 2,6 (2), 5,1 МПа (3); 4 - 6 — $W = 15 \text{ дм}^3$, $r_* = 31 \text{ мм}$, $M_c = 1$, $P_0 = 0,4$ (4), 0,6 (5), 0,8 МПа (6); 7 — $W = 20 \text{ дм}^3$, $r_* = 17,5 \text{ мм}$, $M_c = 3$, $P_0 = 1,1$ МПа; 8 - 11 — $W = 50 \text{ дм}^3$, $r_* = 47,5 \text{ мм}$, $M_c = 1$, $P_0 = 0,4$ (8), 0,6 (9), 0,8 (10), 1,05 МПа (11).

функции:

$$\bar{X}_{\text{к.п}} = 1,75 \left[\bar{\tau} (N(\tau))^{0,1} \right]^{0,68}.$$

Обобщение в данных координатах соблюдается с указанной погрешностью при $N(\tau) \geq 2$.

Полученная зависимость позволяет на стадии проектирования ПИГ определить траекторию контактной поверхности и ее скорость $V_{\text{к.п}}(t) = \frac{dX_{\text{к.п}}(t)}{dt}$ при заданных геометрии d_* , W и начальном давлении в форкамере P_0 . Возможна и обратная процедура — по заданным параметрам контактной поверхности на ее траектории определить необходимые геометрические параметры ПИГ при заданном P_0 или найти P_0 при заданной геометрии ПИГ.

Подведем итоги проведенного исследования. Разработана методика визуализации и проведены исследования некоторых характеристик импульсных крупномасштабных воздушных струй, создаваемых пневмоимпульсными генераторами промышленного назначения. Выявлены особенности поведения конфигурации импульсных струй при их распространении в свободном пространстве. В частности, установлено нарушение осесимметричности, связанное с формированием выбросов массы струйного воздуха в слое смешения в виде вихреобразований, и уменьшение начальных углов раскрытия границы импульсных струй по сравнению со стационарным случаем. Исследовано влияние геометрических и газодинамических параметров ПИГ на динамику распространения струй, истекающих в свободное пространство. В обобщенных координатах получена аппроксимационная зависимость, описывающая траекторию движения контактной поверхности струйного газа в широком диапазоне геометрических параметров ПИГ при начальных значениях $N = 4 - 51$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щелоков Я.М., Аввакумов А.М., Сазыкин Ю.К. Очистка поверхностей нагрева котлоутилизаторов. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 160 с.
2. Булатов Н.Я., Шарыгин М.П., Молдабеков Ш.М., Бикбау М.Я. Импульсная аэродинамическая очистка поверхностей в химической технологии. — Алма-Ата: Гылым, 1990. — 102 с.
3. Гилязетдинов Б.Н., Звездинцев В.И., Чиркашенко В.Ф. Повышение эффективности ударной волны, генерируемой с помощью пневмоимпульсной установки // Газодинамика в народном хозяйстве: Тез. докл. 11-й Международной конференции. — Севастополь, 1993. — С. 30.
4. Бойко В.М., Чиркашенко В.Ф. Исследование динамики распространения импульсной воздушной струи при ее истечении из сопла в атмосферу: Тез. докл. XVII Всероссийского семинара “Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах”. — С.-Петербург, 1997. — С. 70.
5. Жуков М.Ф., Неронов В.А., Лукашов В.П. и др. Новые материалы и технологии. Экстремальные технологические процессы. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992. — 182 с.
6. Дулов В.Г., Райзберг Б.А. Начальная стадия образования струи // Изв. вузов. Авиационная техника. — 1961. — № 4. — С. 30 – 33.
7. Старшинов А.И. Формирование потока за фронтом ударной волны при истечении из сопла // Вестник ЛГУ. — 1965. — № 13. — С. 125 – 127.
8. Старшинов А.И. Метод расчета параметров первичной ударной волны при истечении нестационарной струи из сопла // Там же. — 1967. — № 1, вып. 11. — С. 113 – 117.
9. Ефимов А.С. О распространении ударных волн в свободном пространстве // Изв. АН СССР. МЖГ. — 1971. — № 5. — С. 163 – 166.
10. Гусев В.Н. К вопросу о запуске сверхзвуковых сопел // Инж. журн. — 1961. — Т. 1, вып. 1. — С. 164 – 168.
11. Белавин В.А., Голуб В.В., Набоко И.Н., Опара А.И. Исследование нестационарной структуры потока при истечении ударно-нагретого газа // ПМТФ. — 1973. — Т. 6, № 5. — С. 34 – 40.
12. Голуб В.В., Набоко И.М., Куликовский А.А. Исследование трехмерной волновой структуры нестационарного истечения газа из плоского звукового сопла // Там же. — 1976. — Т. 5, № 1. — С. 41 – 45.

13. **Белавин В.А., Голуб В.В., Набоко И.Н.** Структура импульсных струй, истекающих через сверхзвуковое сопло // Там же. — 1979. — Т. 5, № 1. — С. 56 – 65.
14. **Чекмарев С.Ф.** Неустановившееся радиальное расширение газа от стационарного источника // Там же. — 1975. — Т. 5, № 2. — С. 70 – 79.
15. **Базаров С.Б., Набоко И.М.** Численное и экспериментальное моделирование импульсных газовых струй: Тез. докл. семинара “Физические методы исследования прозрачных неоднородностей” — М.: Моск. дом науч.-техн. пропаганды, 1990. — С. 5 – 7.
16. **Набоко И.М.** Параметры импульсных струй. Теория и конструкция двигателей летательных аппаратов // Тр. XVIII науч. чтений по космонавтике. — М., 1994. — С. 75 – 77.
17. **Булгакова Н.М.** Численное моделирование импульсных струй вязкого теплопроводного газа // ПМТФ. — 1992. — Т. 7, № 4. — С. 93 – 99.
18. **Лав Е.С. и др.** Экспериментальное и теоретическое исследование осесимметричных свободных струй. — М.: ВИНТИ АН СССР, 1964. — 292 с.
19. **Беляев Н.М.** Термодинамика. — Киев: Высш. школа, 1987. — 344 с.

Статья поступила в редакцию 9 апреля 1998 г.