

УДК 62-144.3+629.02

**А. Н. Лялинов, А. Л. Пенкин****ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ ПАРАМЕТРОВ  
НАСАДКА-ГОМОГЕНИЗАТОРА**

Дата поступления: 21.08.2015

Решение о публикации: 12.11.2015

**Цель:** Исследовать геометрические параметры насадка-гомогенизатора, установленного в сопле газовой форсунки двигателя внутреннего сгорания, – элемента, позволяющего точно направлять струи газового топлива для формирования необходимых зон турбулентного возмущения. Исследования проводились с целью повышения однородности газозвушной смеси для её более полного сгорания, а также снижения количества вредных выбросов с отработавшими газами и улучшения топливной экономичности двигателей. **Методы:** В работе применялись теория двигателя внутреннего сгорания, теория матриц с использованием математического комплекса MATLAB, метод измерения длины свободного пробега частицы газовой смеси, имеющей определённое давление М. Борна и Е. Бормана, прикладная газовая динамика, векторный анализ и начало тензорного исчисления. Воспользовавшись методикой определения напряжённого состояния при движении газовой смеси в тонком слое, авторы при решении задачи создания однородной газозвушной смеси используют понятия силы внутреннего трения, коэффициентов динамической и кинематической вязкости, градиента скорости частиц газовой смеси, длины свободного пробега  $\lambda$  (характеристики смеси). **Результаты:** Выявлено, что насадок-гомогенизатор на газовую форсунку не создаёт повышенного сопротивления движению воздуха во впускном коллекторе ДВС, позволяет формировать необходимые зоны турбулентного возмущения в камере сгорания ДВС, а изменение угла раскрытия эллипсоида позволяет реализовать возможность выбора параметров турбулентного возмущения впрыскиваемому газовому топливу. Рассмотрены раскрытие «разнесённого эллипсоида» – отражающей поверхности насадка, зависящее от величины угла  $\alpha$ , определяющего величину этого раскрытия, а также длина всей дуги плоской кривой в подвижной системе координат. На основании расчёта приведены графики, определяющие длину кривой в зависимости от угла раскрытия насадка, графики зависимости внутренней поверхности гомотенизатора от различных углов его раскрытия  $\alpha$ , зависимости внутреннего объёма насадка-гомотенизатора от  $\alpha$ . **Практическая значимость:** Применение предлагаемой конструкции насадка-гомотенизатора позволяет повысить однородность газозвушной смеси, тем самым улучшить эксплуатационные показатели транспортных газовых и газодизельных двигателей.

Насадок-гомотенизатор, разнесённый эллипсоид, угол раскрытия, коэффициент динамической вязкости, коэффициент кинематической вязкости, газозвушная смесь, градиент скорости.

**Anatoliy N. Lyalinov**, D. Eng., professor (Petersburg State Transport University); \***Aleksey L. Penkin**, associate professor, apenkin1@gmail.com (Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering) STUDY INTO INTERNAL PARAMETERS OF HOMOGENIZER FITTING

**Objective:** To study geometrical parameters of homogenizer fitting installed in the gas blast nozzle of internal combustion engine, which is an element allowing to precisely direct the gas fuel jets for forming required zones of turbulent excitation. The studies were conducted in order to increase homogeneity of gas-air mixture for its more complete combustion, as well as decreasing the amount of harmful emissions of combustion gas and improving engine's fuel efficiency. **Methods:** Internal combustion engine theory,

matrix theory with the use of MATLAB mathematical system, Max Born – Elisabeth Bormann method of measuring the length of free path of gas mixture particle which has set pressure, applied gas dynamics, vector analysis and basic tensor calculus were applied. By applying the method of establishing the strain condition when gas mixture is moving in thin level, the authors used the concepts of force of internal tension, coefficients of dynamic and kinematic coefficient of viscosity, velocity gradient of gas mixture particles, free path length  $\lambda$  (mixture characteristics) in solving the task of creating homogenous gas-air mixture. **Results:** It was established that homogenizer fitting for gas blast nozzle does not create increased resistance to air movement in the intake manifold of the internal combustion engine, allows to form required zones of turbulent excitation in the combustion chamber of the internal combustion engine, and amending the ellipsoid expansion angle allows to realise the opportunity for choosing the parameters of turbulent excitation to the gas fuel being injected. The expansion of spaced-apart ellipsoid is considered as reflecting surface of the fitting which depends on the size of  $\alpha$  angle, which determines the size of this expansion, as well as the length of the entire flat curve arc in moving co-ordinates. Based on calculations, graphs which establish the length of the curve depending on the fitting expansion angle, graphs of dependencies of homogenizer's internal surface from various angles of its expansion  $\alpha$ , dependencies of the homogenizer fitting's internal volume from  $\alpha$  were provided. **Practical importance:** Application of the proposed homogenizer fitting design will allow to increase homogeneity of gas-air mixture and thus improve operational parameters of gas and gas-diesel transport engines.

Homogenizer fitting, spaced apart ellipsoid, expansion angle, dynamic viscosity coefficient, kinematic viscosity coefficient, gas-air mixture, velocity gradient.

При создании перспективных газовых и газодизельных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) требуется повысить гомогенность газовой смеси для её более полного сгорания, снижения количества вредных выбросов с отработавшими газами и увеличения топливной экономичности двигателей.

Имеющиеся гомогенизирующие устройства (патент RU № 94037898, патент JP 19810168522, свидетельство на полезную модель RU № 121307 [19]) имеют недостатки – повышение сопротивления движению воздуха во впускном коллекторе ДВС, невозможность точного направления струй газового топлива для формирования необходимых зон турбулентного возмущения.

Улучшить эксплуатационные показатели газовых и газодизельных ДВС за счет создания гомогенной газовой смеси в цилиндрах ДВС можно путем придания впрыскиваемому в воздушный поток газовому топливу турбулентного возмущения в специальном устройстве – насадке-гомогенизаторе, устанавливаемом на газовую форсунку. Это устройство не создаёт сопротивления на впу-

ске, придаёт турбулентное возмущение потоку газового топлива и как следствие – повышает гомогенность газовой смеси. Газовую форсунку с насадкой-гомогенизатором можно применять в ДВС с искровым зажиганием как при внешнем, так и при внутреннем смесеобразовании. В ДВС с воспламенением от сжатия устройство можно применять при работе двигателя по газодизельному циклу.

Насадка-гомогенизатор – установленный в сопле газовой форсунки элемент, направляющий струи газового топлива для формирования необходимых зон турбулентного возмущения, а изменение угла раскрытия эллипсоида насадки позволяет выбирать параметры турбулентного возмущения впрыскиваемого газового топлива [2, 20].

Рабочие параметры насадки-гомогенизатора в значительной степени зависят от его внутренней поверхности, объёма и наклона основной оси насадки к оси цилиндра ДВС [17, 19]. Его исполнение является прецизионной работой, поскольку объём этого устройства не превышает 10–20 мм<sup>3</sup>. Параметры насадки будут уточнены после натурального экспе-

римента [3], для которого прежде необходимо теоретическое исследование внутренних параметров насадка.

Для расчета рабочих параметров насадка-гомогенизатора необходимо рассмотреть длину его плоской кривой в зависимости от наклона к оси абсцисс  $O_1X_1$  (рис. 1).

Кроме того, необходимо знать всю внутреннюю поверхность и объём насадка. Эллипсоид, представляющий отражающую поверхность насадка, раскрывается венчиком в виде телесного угла относительно начала координатной оси  $O_1X_1$ . Как видно из рис. 1, к примеру, из точки  $K$  исходят лучи векторов усилий через фокальные точки  $F_1$  и  $F_2$  раскрытой на угол  $2\alpha$  насадка. Отметим также, что малая ось эллипса  $KO_2$  является нормалью к оси  $O_1X_2$ , а в данном случае – и нормалью к касательной  $a-a$ .

В дальнейших наших исследованиях ось  $O_1X_1$  будет определять основное направление насадка-гомогенизатора, перпендикулярное оси цилиндра ДВС.

### Определение длины кривой продольного контура насадка-гомогенизатора

Рассмотрим половину канонической фигуры эллипса. Пусть полуразнесённый эллипсоид имеет горизонтальную ось  $O_1X_1$  и

вертикальную  $O_1Y_1$ . Первоначальное положение полуэллипса должно соответствовать подвижной системе координат  $O_1X_2Y_2$ . Чтобы получить неподвижную систему координат, нужно новую подвижную повернуть по часовой стрелке. Движение поворота полуэллипса по часовой стрелке определяется отрицательным углом  $(-\alpha)$ , угол будем принимать положительным, если он вращает подвижную систему координат против часовой. В новой плоской системе координат  $O_1X_2Y_2$  кривая окаймляет верхнюю зону разнесённого полуэллипса. Этот поворот осуществляется матричным уравнением [6, 9, 10, 12, 14]

$$X_1 = AX_2,$$

$$\text{где } X_1 = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$X_2 = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix}.$$

Матрица  $A$  является матрицей поворота  $2 \times 2$ ; она получается путём проектирования подвижной на неподвижную систему координат с учётом знака угла  $(-\alpha)$  [5, 7, 9, 10, 13–16]:

$$X_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

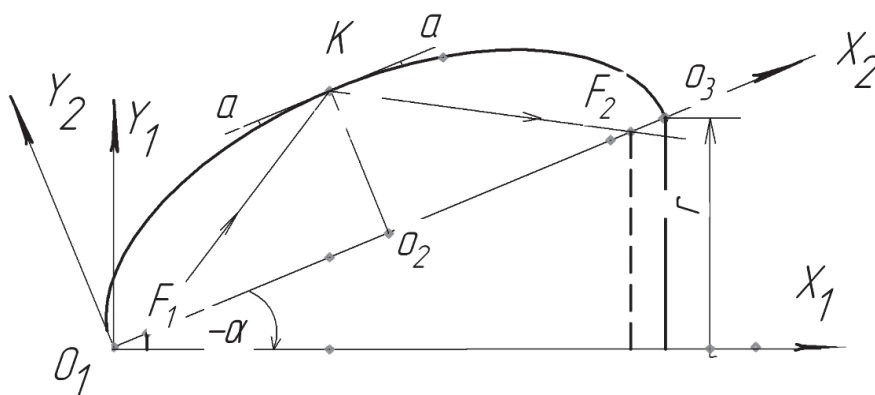


Рис. 1. Определение параметров поворота полуэллипса:  
 $X_1O_1Y_1$  – неподвижная система координат;  $X_2O_1Y_2$  – подвижная система координат

Выражение (2) есть матрица-столбец в плоской (неподвижной) системе координат  $O_1X_1Y_1$ . Эта матрица является результатом перемножения двух матриц (1).

Функциональное представление формул  $x_2$ ,  $y_2$  в системе координат  $O_1X_2Y_2$  имеет вид

$$\begin{aligned} x_2 &= a\left(1 + \sqrt{1 - \frac{y_2^2}{b^2}}\right); \\ y_2 &= b\sqrt{1 - \frac{(x_2 - a)^2}{a^2}} \dots \end{aligned} \quad (3)$$

В соответствии с правилом перемножения матриц, используя правила Фалька, получим следующие значения элементов матрицы-столбца  $X_1$ :

$$\begin{aligned} x_1 &= a\left(1 + \sqrt{1 - \frac{y_2^2}{b^2}}\right) \times \\ &\times \cos \alpha - b\sqrt{1 - \frac{(x_2 - a)^2}{a^2}} \sin \alpha; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} y_1 &= a\left(1 + \sqrt{1 - \frac{y_2^2}{b^2}}\right) \times \\ &\times \sin \alpha + \frac{b}{a}\sqrt{2ax_2 - x_2^2} \cos \alpha. \end{aligned} \quad (5)$$

Выражения (4) и (5) являются элементами матрицы-столбца  $X_1$  выражения (2) и определяются формулами для кривой в старой системе координат.

Плоская кривая верхней зоны в плоскости разнесённого эллипсоида (рис. 1) относительно точки в системе координат  $O_1X_2Y_2$  определяется формулой:

$$L = \int_0^{2a} \sqrt{1 + y_2'^2} dx_2.$$

Здесь за начало интегрирования принято начало координат  $O_1$ , а за конечную точку – выражение

$$l_1 = 2a,$$

где  $2a$  – длина большей оси эллипса в подвижной системе координат  $O_1X_2Y_2$ .

Продифференцировав выражение (3) по  $x_2$  и возведя его в квадрат, получим

$$y_2'^2 = \frac{b^2(a - x_2)^2}{a^2(2a - x_2)x_2}.$$

Длина всей дуги плоской кривой  $L$  (рис. 1) в подвижной системе координат  $O_1X_2Y_2$  определяется интегралом [4, 18]:

$$L = 2 \int_0^{2a} \sqrt{1 + \frac{b^2(a - x_2)^2}{a^2(2a - x_2)x_2}} dx_2. \quad (6)$$

В выражении (6) перед интегралом стоит двойка, так как здесь определяется длина всей кривой в сечении, проходящем через продольную ось  $O_1X_1$  неподвижной системы координат насадка-гомогенизатора.

Воспользуемся математическим комплексом MATLAB. Интегрируя выражение (6) при различных параметрах наклона кривой раскрытого полуэллипса по оси  $O_1X_2$ , получим её длину при соответствующем раскрытии разнесённого эллипсоида.

На рис. 2 приведена зависимость длины кривой, находящейся на внутренней поверхности, проходящей через абсциссу  $O_1X_1$ , от длины малой полуоси эллипса при различном раскрытии насадка-гомогенизатора. Как видно из рис. 2, кривая определяется явно выраженной параболой. С увеличением длины малой полуоси эллипса её тангенс угла наклона к оси абсцисс увеличивается почти в 60 раз. За основу единицы измерения (рис. 2–4) принята длина большей полуоси эллипса  $a = 1$  ед., а величина малой полуоси  $b$  – при её разных значениях  $b_i = 0,15; 0,30; 0,45; 0,60$ .

Принятое конструктивное исполнение насадка-гомогенизатора позволяет выбирать параметры турбулентного возмущения впыскиваемому газовому топливу в разных режимах работы ДВС.

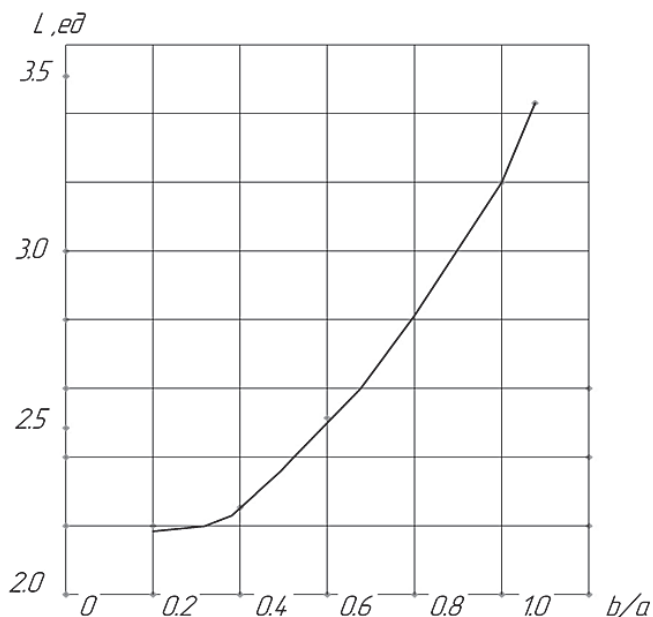


Рис. 2. Зависимость длины кривой, находящейся на внутренней поверхности гомогенизатора, проходящей через абсциссу  $O_1X_1$ , от длины малой полуоси эллипса в условных единицах

### Определение внутренней поверхности насадок-гомогенизатора

Насадок-гомогенизатор является неканонической фигурой, полученной в результате вращения плоской кривой разнесённого эллипсоида относительно оси  $O_1X_1$  системы координат  $O_1X_1Y_1$ .

Возьмем производные по направлению переменной  $x_2$  от выражений (4) и (5):

$$\frac{\partial x_1}{\partial x_2} = \cos \alpha + \frac{b}{a} \frac{(x_2 - a)}{\sqrt{2ax_2 - x_2^2}} \sin \alpha;$$

$$\frac{\partial y_1}{\partial x_2} = \sin \alpha + \frac{b}{a} \frac{(x_2 - a)}{\sqrt{2ax_2 - x_2^2}} \cos \alpha.$$

Тогда

$$\frac{dy_1}{dx_1} = \frac{\frac{\partial y_1}{\partial x_2}}{\frac{\partial x_1}{\partial x_2}} \dots$$

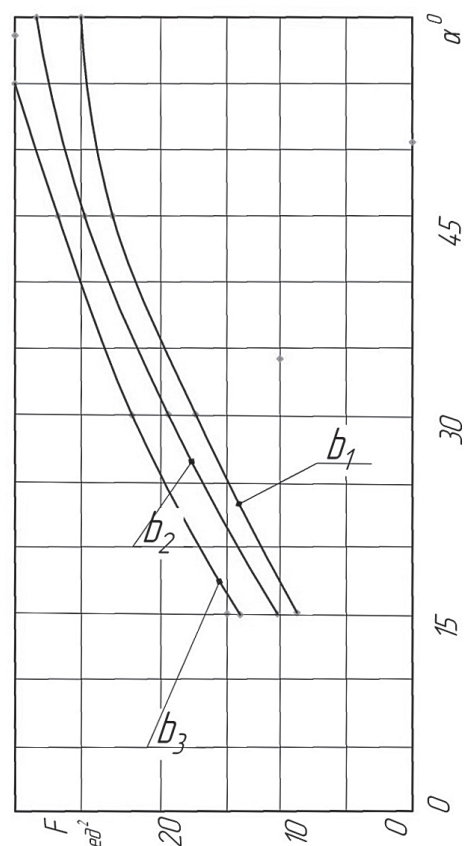


Рис. 3. Графики зависимости внутренней поверхности гомогенизатора от угла его раскрытия при  $\alpha = 15, 30, 45^\circ$ ;  $b_1 = 0,15$ ;  $b_2 = 0,5$ ;  $b_3 = 0,45$

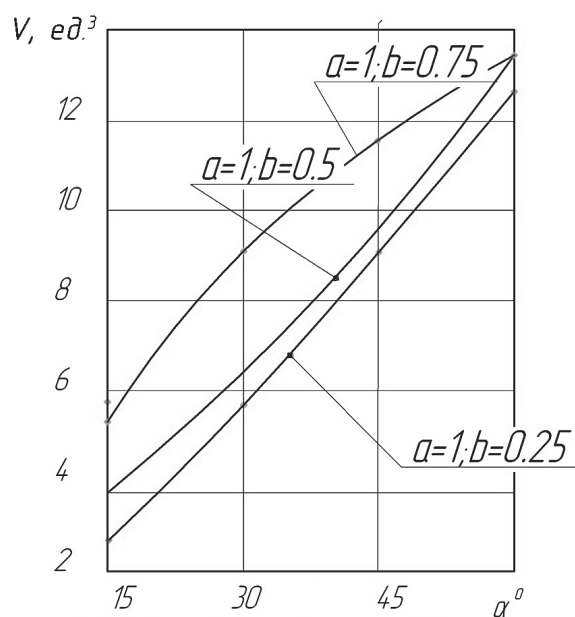


Рис. 4. Графики зависимости внутреннего объема гомогенизатора от угла его раскрытия

Площадь внутренней поверхности в значительной степени влияет на напряжённое состояние гомогенизатора. Эта площадь определяется формулой [4, 15, 16, 18]:

$$F = 2\pi \int_0^{2a} y_1 \sqrt{1 + (y_1')^2} \cdot dx_2. \quad (7)$$

Верхний предел интегрирования в выражении (7) принят равным  $2a \cos \alpha$ . Этот параметр определяет крайнюю правую точку разнесённого эллипсоида в системе координат  $O_1 X_1 Y_1$ . Выражение  $y_1$  (5) есть высота точки, находящейся на кривой, повернутой на угол  $\alpha$  по часовой стрелке до центральной оси  $O_1 X_1$  (см. рис. 1).

Рассмотрим изменение внутренней поверхности насадка-гомогенизатора при различных параметрах угла  $\alpha$  и малой полуоси эллипса  $b$ . На рис. 3 приведены кривые  $b_1 = 0,25$ ;  $b_2 = 0,50$ ;  $b_3 = 0,75$  ед., определяющие зависимость угла раскрытия  $\alpha$  от внутренней поверхности насадка-гомогенизатора.

С увеличением угла раскрытия его внутренняя поверхность увеличивается почти по прямолинейной зависимости (рис. 3). Как видно из соотношения ординат при одной и той же абсциссе, эта величина имеет возрастающую пропорциональную зависимость. Так, при  $\alpha_1 = 15^\circ$  величина  $\frac{b_3}{b_1} = 1,52$ ; при  $\alpha_2 = 30^\circ$   $\frac{b_3}{b_1} = 1,56$ ; при  $\alpha_2 = 60^\circ$   $\frac{b_3}{b_1} = 1,33$ . Как будет показано ниже, это положение кривой приводит к уменьшению нормальных напряжений в газовой струе при её соударении в любой точке внутренней поверхности насадка-гомогенизатора.

### Расчёт внутреннего объёма насадка-гомогенизатора

Величина внутреннего объёма насадка-гомогенизатора определяется по формуле [4, 7, 15, 16]:

$$V = \pi \int_0^{2a} y_1^2 dx_1, \quad (8)$$

где  $y_1$  есть выражение (5).

В результате расчёта интеграла (8) с использованием математического комплекса МАТ-LAB при различных параметрах  $\alpha_i$ ,  $b_i$  получены графические зависимости объёма насадка-гомогенизатора (рис. 4) от этих параметров.

Графики показывают, что наилучший угол раскрытия  $45^\circ$ . При кривизне больше  $\alpha = 45^\circ$  внутренний объём насадка-гомогенизатора имеет тенденцию к уменьшению и фокусные кольца, сближаясь друг с другом, уменьшают пространство для гомогенизации газовой смеси.

### Расчёт напряжённого состояния внутри насадка-гомогенизатора

Воспользуемся методикой определения напряжённого состояния [1, 3, 11, 23] при движении газовой смеси в тонком слое  $dx$ . Прямой метод измерения длины свободного пробега частицы газовой смеси, имеющей определённое давление, предложили М. Борн и Е. Борман [1, 3]. Для расчёта напряжённого состояния внутри насадка-гомогенизатора мы используем:

- $p = \frac{z}{J}$  – эффективное сечение, определяющее отношение среднего числа частиц  $z$ , выбывших из пучка в единицу времени при столкновениях, к интенсивности газовой смеси самого пучка  $J$ ;

- $$dJ = -\frac{J}{\lambda} dx, \quad (9)$$

где  $\frac{1}{\lambda}$  – вероятность рассеяния на единице длины, эту величину также называют коэффициентом рассеяния пучка;  $\lambda$  – длина свободного пробега частицы газовой смеси.

Интегрируя выражение (9), имеем

$$J = J_0 e^{-\frac{x}{\lambda}}, \quad (10)$$

где  $J_0$  – интенсивность пучка рассеяния, пересекающего плоскость  $a-b$ .

Из выражения (10) видно, что из-за рассеяния интенсивность пучка убывает по экспоненте.

Дадим формуле (10) другое толкование. Пусть  $N_0$  – число частиц, прошедших через площадку  $a-b$  (рис. 5а), тогда число частиц газовой смеси, прошедших путь  $x$  без столкновения, можно представить выражением

$$N = N_0 e^{-\frac{x}{\lambda}}. \quad (11)$$

Средний путь совпадает с длиной свободного пробега  $\lambda$  молекулы между её двумя соударениями с другими молекулами.

На применении формул (10), (11) основан метод определения длины свободного пробега частиц газовой смеси. Длина свободного пробега  $\lambda$  является характеристикой газовой смеси.

Рассмотрим наличие внутреннего трения в газовой смеси [11, 22, 23].

Пусть имеются две параллельные пластинки  $FG$  и  $BC$  (рис. 5б), между которыми находится газовая смесь. Пластина  $FG$  движется направо с вектор-скоростью  $u$ . Через слой газовой смеси толщиной  $L$  на нижнюю пластинку действует сила в направлении вектора  $u$ . Назовём её силой внутреннего трения газовой смеси. Заметим, что такое утверждение можно сделать только в том случае, если расстояние

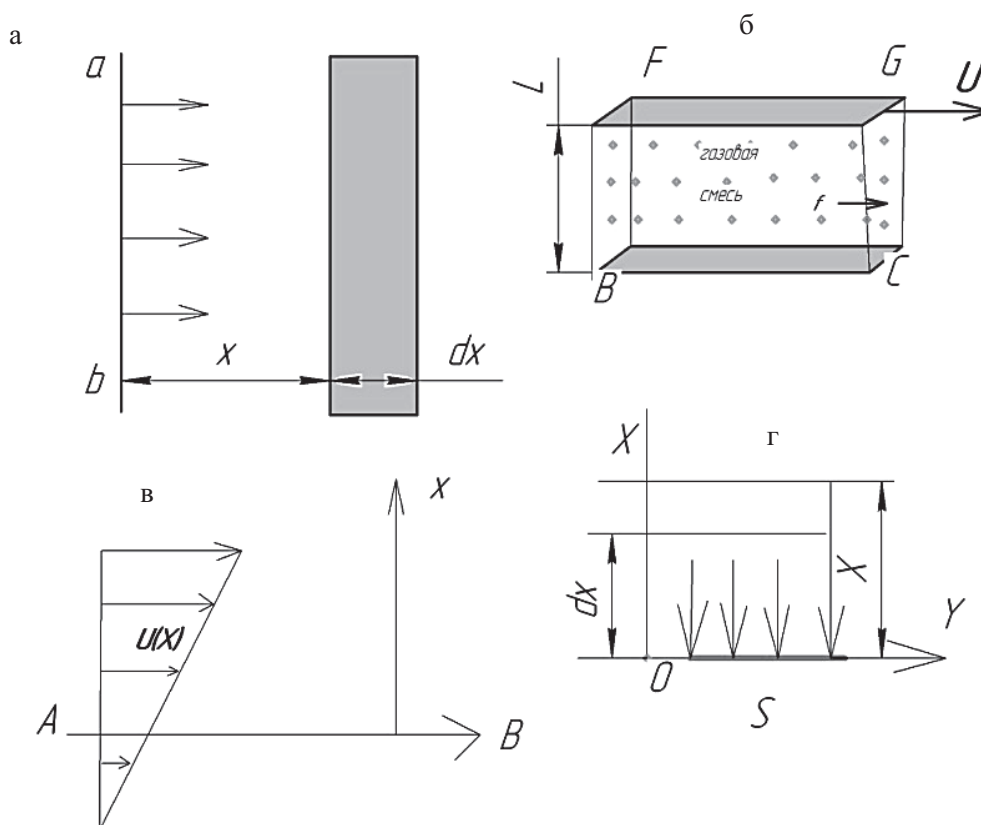


Рис. 5. Распределение молекул газовой смеси по длине свободного пробега и наличию в пучке внутреннего трения:

- а) прохождение частицами газовой смеси площадки  $a-b$ ; б) внутреннее трение в газовой смеси между параллельными пластинками  $FG$  и  $BC$ ; в) возрастание вектора скорости  $u$  с увеличением оси ординат  $x$ ; г) пересечение молекулами газовой смеси площадки  $S$

$L$  достаточно велико. Тогда можно говорить о внутреннем трении, возникающем в газовой смеси.

Очевидно, вектор  $u$  является переменной величиной и меняется в направлении, перпендикулярном слою (рис. 5в). Теперь мысленно разделим газовую смесь сечением АВ, параллельным слоям движущегося газа. Как видно из рис. 5в, вектор скорости  $u$  возрастает с увеличением оси ординат  $x$ .

Верхняя половина газовой смеси над сечением АВ (рис. 5в) будет действовать на нижнюю с силой, направленной вправо, а нижняя на верхнюю – с силой, направленной влево. Это и есть силы внутреннего трения [1, 3, 11, 23].

Дадим количественную оценку явлению внутреннего трения. Возьмём на горизонтальной плоскости площадку  $S$  (рис. 5г), которую пересекают сверху вниз в единицу времени молекулы газовой смеси, определяемые выражением [1, 3, 23]:

$$z = \frac{1}{6}nv,$$

где  $n$  – среднее число частиц (молекул) в единице объёма;  $v$  – скорость молекул, движущихся к стенке.

При столкновении частица газовой смеси получает количество движения  $g(x)$ . Двигаясь далее без столкновений, частица переносит этот момент количества движения через площадку всеми молекулами. Проявление этого переноса состоит в том, что вдоль плоскости  $S$  действует вязкое касательное напряжение

$$\tau_{xy} = \eta \frac{du}{dx},$$

где  $\eta = \frac{1}{3}nmv\lambda$ ;  $\frac{du}{dx}$  – градиент скорости частиц газовой смеси [1, 3, 15, 23];  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости (внутреннего трения), он показывает, что с увеличением скорости движения и свободного пробега смешанного газа коэффициент его вязкости возрастает.

Градиент скорости частиц газовой смеси показывает, как быстро меняется скорость при переходе от слоя к слою. Градиент также прямо пропорционален числу частиц и массе газовой смеси. По закону парности касательных напряжений [7, 10, 12–16, 21] можно записать:

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \tau_{yx} \\ \tau_{ij} &\Rightarrow \tau_{xz} = \tau_{zy} \dots \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy} \end{aligned}$$

Все рассуждения сделаны для частного случая, когда пучок газовой смеси направлен перпендикулярно к плоскости.

В точке контакта газового пучка с внутренней поверхностью насадка-гомогенизатора (например, в точках  $A_1, A_2, A_4$  (рис. 6)) он испытывает объёмное напряжённое состояние, определяемое тензором напряжений:

$$T_{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Направим нормальное напряжение  $\sigma_x$  по оси  $O_2A_2$  и касательные  $\tau_{xy}, \tau_{xz}$  – перпендикулярно ей.

Вектор  $\sigma_c \cdot F$  направлен по нормали к касательной в точке  $A_2$ . Определим величину нормали  $A_2O_2$ . Отрезок нормали  $n$  в точке  $A_2$ , через которую проходит касательная, и отрезок поднормали  $S_n$  для этой же точки любой точки плоской кривой насадка-гомогенизатора аналитически определяются дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} n &= A_2O_2 = \left| y_{10} \sqrt{1 + (y'_{10})^2} \right|; \\ S_n &= O_2O_4 = \left| y_{10} \cdot y'_{10} \right|. \end{aligned} \quad (13)$$

Вторая и третья строки тензора (12) определяют напряжённое состояние по осям  $Y_2, Z_2$  ортогональной системы  $X_2Y_2Z_2$ . (Эта си-



стема координат не показана на рис. 6, кроме точки  $A_2$ ).

Среднее нормальное напряжение по всей внутренней поверхности насадка-гомогенизатора определяется выражением [1, 3, 15–17, 19, 22]:

$$\sigma_c = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z).$$

Напряжения  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  направлены, соответственно, по осям  $A_2Y_2$  и  $A_2Z_2$ . Через любую точку  $A_i$  внутренней поверхности насадка-гомогенизатора проходит окружность, перпендикулярная оси  $O_1X_1$  разнесённого эллипсоида, которая определяет конус усилий  $\sigma_i$  в виде телесного угла  $O_2A_2A_2$ .

Плоскость  $A_3A_3$ , перпендикулярная к оси  $O_1X_1$  в проекции на плоскость  $X_1O_1Y_1$ , определяется прямой линией  $A_3A_3$ . Эта плоскость является, таким образом, «газоразделом» конусов сил, вершины которых направлены вправо, от таких же конусов, направленных влево (рис. 6). При раскрытии эллипсоида на другой больший или меньший угол  $2\alpha$  эти вершины конусов перемещаются, соответственно, вправо или влево.

Телесные углы конусов образуются нормальными (13), которые определяют поверхность силового конуса, а высота такого силового конуса есть поднормаль (13). Основание такого силового конуса есть круг с центром, через который по нормали проходит координатная ось  $O_1X_1$ . Установим боковую площадь силового конуса.

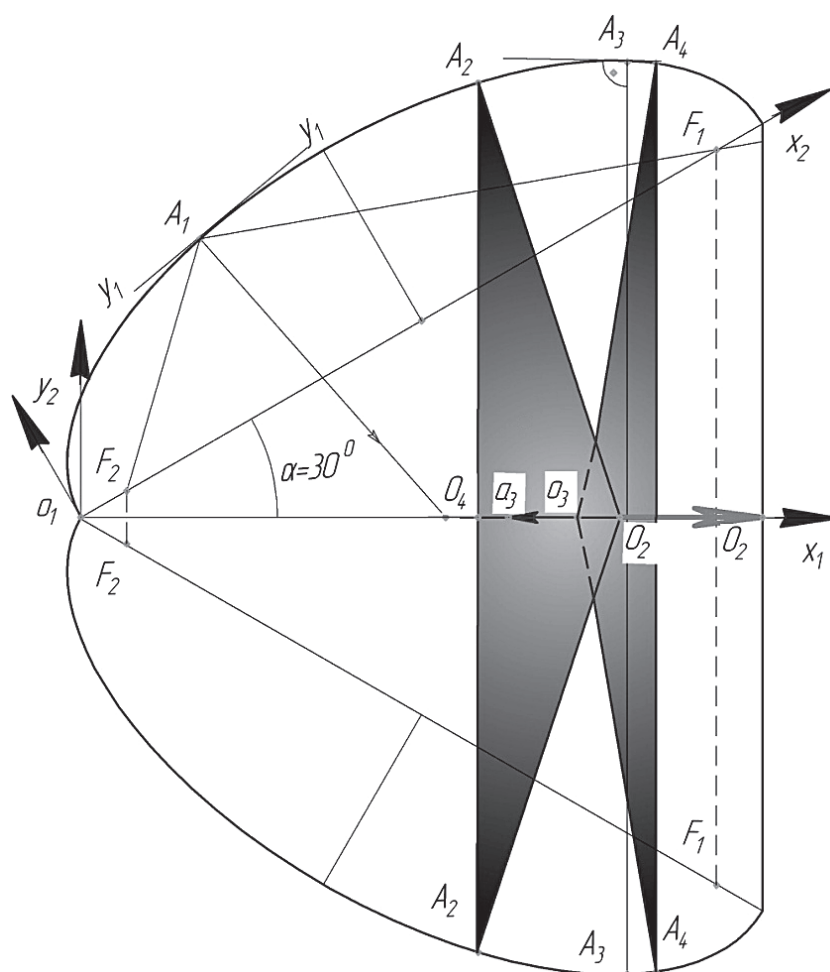


Рис. 6. Пояснения к исследованию напряженного состояния газовой смеси внутри насадка-гомогенизатора

Телесный угол при его развёртке в плоскость в радианной мере определяется выражением

$$\beta = \frac{2\pi \cdot y_{10}}{n}, \text{ рад.}$$

Тогда боковая поверхность силового конуса выражается формулой

$$\frac{\pi \cdot n^2}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot y_{10}}{n} = \pi \cdot n \cdot y_{10}.$$

Усилие, воспринимаемое силовыми конусами, расположенными слева от прямой  $A_3A_3$ , определяется формулой

$$\sum_{\text{лев.к}} P_i = \sigma_{\text{ср}} \cdot \pi \times \int_0^{x_{1A_3}} y_{10}^2 \sqrt{1 + (y'_{10})^2} dx_1. \quad (14)$$

Усилие, воспринимаемое силовыми конусами справа от проекции  $A_3A_3$  плоскости окружности, выражается также через интегральное выражение

$$\sum_{\text{прав.к}} P_i = -\sigma_{\text{ср}} \cdot \pi \times \int_{x_{1A_3}}^{2a \cos \alpha} y_{10}^2 \sqrt{1 + (y'_{10})^2} dx_1. \quad (15)$$

Результирующая сила напора  $P$  газовой смеси из насадки-гомогенизатора в поршневое пространство будет складываться из двух векторов (14), (15):

$$\overline{P} = \sum_{\text{лев.к}} \overline{P}_i + \sum_{\text{прав.к}} \overline{P}_i.$$

Результирующее напряжение потока газовой смеси в насадке-гомогенизаторе определяется формулой

$$\sigma_{\text{потока}} = \frac{P}{4\pi a^2 \sin^2 \alpha}.$$

## Выводы

Исследование позволяет сделать вывод, что предлагаемая конструкция насадка-гомогенизатора обеспечивает турбулентное возмущение впрыскиваемому газовому топливу, вследствие чего есть возможность повысить однородность газозвушной смеси, тем самым улучшить эксплуатационные показатели транспортных двигателей. Расчёт напряжённого состояния внутри насадка-гомогенизатора показывает, что производимое им возмущение на порядок выше создаваемых в современных камерах сгорания неразделённого типа [8], благодаря чему перемешивание газозвушной смеси имеет более высокий уровень. Определённое теоретическое значение силы напора газовой смеси и напряжения потока газовой смеси даёт важную аналитическую оценку процесса создания однородной газозвушной смеси в камере сгорания ДВС.

## Библиографический список

1. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика : учеб. руководство для вузов / Г. Н. Абрамович. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука ; Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1991. – 600 с.
2. Алабужев П. М. Теория подобия и размерностей. Моделирование / П. М. Алабужев, В. Б. Геронимус, Л. Н. Минкевич, Б. А. Шеховцов. – М. : Высш. шк., 1968. – 206 с.
3. Альтшуль А. Д. Гидравлика и аэродинамика : учеб. пособие для вузов / А. Д. Альтшуль, П. Г. Киселев. – 2-е изд. – М. : Стройиздат, 1975. – 326 с.
4. Бараненков Г. С. Задачи и упражнения по математическому анализу для ВТУЗов / Г. С. Бараненков, Б. П. Демидович, В. А. Ефименко и др. ; под общ. ред. Б. П. Демидович. – 6-е изд., стереотип. – М. : Наука, 1968. – 472 с.
5. Беллман Р. Введение в теорию матриц / Р. Беллман. – М. : Наука, 1976. – 367 с.
6. БСЭ. Т. 5. – 3-е изд. – М. : Сов. энциклопедия, 1971. – 604 с.
7. Борисенко А. И. Векторный анализ и начало тензорного исчисления / А. И. Борисенко, И. Е. Та-

рапов. – Харьков : Изд-во Харьков. гос. ун-та, 1959. – 238 с.

8. Бурячко В. Р. Автомобильные двигатели : учеб. / В. Р. Бурячко, А. В. Гук. – СПб. : НПИКЦ, 2005. – 292 с.

9. Венецкий И. Г. Основные математико-статистические понятия и формулы в экономическом анализе / И. Г. Венецкий, В. И. Венецкая. – М., 1974. – 280 с.

10. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. – 5-е изд. – М. : Физматлит, 2004. – 560 с.

11. Голубев И. Ф. Вязкость газов и газовых смесей / И. Ф. Голубев. – М. : Физматлит, 1959. – 377 с.

12. Ефимов Н. В. Квадратичные формы и матрицы / Н. В. Ефимов. – М. : Наука, 1967. – 161 с.

13. Курош А. Г. Курс высшей алгебры / А. Г. Курош. – М. : Наука, 1968. – 431 с.

14. Ланкастер П. Теория матриц / П. Ланкастер. – М. : Наука, 1973. – 280 с.

15. Лурье А. И. Аналитическая механика / А. И. Лурье. – М. : ГИФМЛ, 1961. – 824 с.

16. Лурье А. И. Теория упругости / А. И. Лурье. – М. : Наука, 1970. – 939 с.

17. Лялинов А. Н. Исследование насадка-гомогенизатора на газовую форсунку двигателя внутреннего сгорания / А. Н. Лялинов, А. Л. Пенкин, А. А. Капустин // Изв. ПГУПС. – 2013. – Вып. 2. – С. 126–132.

18. Матвеев Н. М. Методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений / Н. М. Матвеев. – Минск : Вышэйш. шк., 1974. – 766 с.

19. Насадок-гомогенизатор на газовую форсунку : пат. на полезную модель 121307 РФ : МПК F02M29/06(2006.01) / А. Н. Лялинов, А. Л. Пенкин, С. А. Евтюков, А. А. Капустин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет». – № 2012117260 / 28; заявл. 26.04.2012; опубл. 20.10.2012. Бюл. № 29. – 1 с.

20. Насадок-гомогенизатор на газовую форсунку : пат. на полезную модель 135732 РФ : МПК F02M29/06(2006.01) / А. Л. Пенкин, А. Н. Лялинов, А. А. Капустин, В. С. Самусь; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский

государственный архитектурно-строительный университет». – № 2013131488/03; заявл. 09.07.2013; опубл. 20.12.2013. Бюл. № 35. – 7 с.

21. Патрашев А. Н. Прикладная гидромеханика / А. Н. Патрашев, Л. А. Кивако, С. И. Гожий. – М. : Воениздат, 1970. – 683 с.

22. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1975. – 565 с.

23. Фриш С. Э. Курс общей физики. Т. 1. Физические основы механики, молекулярная физика, колебания и волны / С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. – М. : ФИЗМАТГИЗ, 1962. – 467 с.

## References

1. Abramovich G. N. Prikladnaya gazovaya dinamika [Applied Gas Dynamics], course guide. Moscow, Nauka, Fizmatlit, 1991. 600 p.

2. Alabuzhev P. M., Geronimus V. B., Minkevich L. N. & Shekhovtsov B. A. Teoriya podobiya i razmernostey. Modelirovaniye [Similarity and Dimensions Theory. Simulation]. Moscow, Vysshaya shkola, 1968. 206 p.

3. Altshul A. D. & Kiselev P. G. Gidravlika i aerodinamika [Hydraulics and Aerodynamics], course guide. Moscow, Stroyizdat, 1975. 26 p.

4. Baranekov G. S., Demidovich B. P., Yefimenko V. A., Kogan S. M., Lunts G. L., Porshneva Ye. F., Sycheva Ye. P., Frolov S. V., Shostak R. Ya. & Yanpolskiy A. R. Zadachi i uprazhneniya po matematicheskomu analizu dlya VTUZov [Mathematical Analysis Problems and Exercises for Higher Technical Schools], ed. B. P. Demidovich. Moscow, Nauka, 1968. 472 p.

5. Bellman R. Vvedeniye v teoriyu matrirts [Introduction to the Matrix Theory]. Moscow, Nauka, 1976. 367 p.

6. Bolshaya Sovetskaya Entsiklopediya [Great Soviet Encyclopaedia]. Vol. 5. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya, 1971. 604 p.

7. Borisenko A. I. & Tarapov I. Ye. Vektornyy analiz i nachalo tenzornogo ischisleniya [Vector Analysis and Basic Tensor Calculus]. Kharkiv, Izdatelstvo Kharkovskogo gosudarstvennogo universiteta, 1959. 238 p.

8. Buryachko V.R. & Guk A.V. Avtomobilnyye dvigateli [Motor Car Engines], course guide. St. Petersburg, NPIKTs, 2005. 292 p.
9. Venetskiy I.G. & Venetskaya V.I. Osnovnyye matematiko-statisticheskiye ponyatiya i formuly v ekonomicheskom analize [Basic Mathematical and Statistical Terms and Formulae in Economic Analysis]. Moscow, 1974. 280 p.
10. Gantmakher F.R. Teoriya matrits [Matrix Theory]. Moscow, Fizmatlit, 2004. 560 p.
11. Golubev I.F. Vyazkost gazov i gazovykh smesey [Gas and Gas Mixture Viscosity]. Moscow, Fizmatlit, 1959. 377 p.
12. Yefimov N.V. Kvadratichnyye formy i matrity [Quadratic Forms and Matrixes]. Moscow, Nauka, 1967. 61 p.
13. Kurosh A.G. Kurs vysshey algebrы [Higher Algebra Course]. Moscow, Nauka, 1968. 431 p.
14. Lankaster P. Teoriya matrits [Matrix Theory]. Moscow, Nauka, 1973. 280 p.
15. Lurye A.I. Analiticheskaya mekhanika [Analytical Mechanics]. Moscow, GIFML, 1961. 824 p.
16. Lurye A.I. Teoriya uprugosti [Elasticity Theory]. Moscow, Nauka, 1970. 939 p.
17. Lyalinov A.N., Penkin A.L. & Kapustin A.A. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2013. Is. 2, pp. 126-132.
18. Matveyev N.M. Metody integrirovaniya obyknovennykh differentsialnykh uravneniy [Integration Methods for Ordinary Differential Equations]. Minsk, Vysheyshaya shkola, 1974. 766 p.
19. Russian Federation Patent 121307: MPKF02 M29/06(2006.01). Nasadok-gomogenizator na gazovuyu forsunku [Gas Burner Homogenizer Fitting]. Publ. 20.10.2012. Bull. no. 29. 1 p.
20. Russian Federation Patent 135732: MPK F02M29/06 (2006.01). Nasadok-gomogenizator na gazovuyu forsunku [Gas Burner Homogenizer Fitting]. Publ. 20.12.2013. Bull. no. 35. 7 p.
21. Patrashev A.N., Kivako L.A. & Gozhiy S.I. Prikladnaya gidromekhanika [Applied Hydromechanics]. Moscow, Voenizdat, 1970. 683 p.
22. Sivukhin D.V. Obshchiy kurs fiziki [General Physics Course]. Vol. 2. Moscow, Nauka, 1975. 565 p.
23. Frish S.E. & Timoreva A.V. Kurs obshchey fiziki [General Physics Course]. Vol. 1. Moscow, FIZMATGIZ, 1962. 467 p.

ЛЯЛИНОВ Анатолий Николаевич – доктор техн. наук, профессор (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); \*ПЕНКИН Алексей Леонидович – доцент, [apenkin1@gmail.com](mailto:apenkin1@gmail.com) (Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет)