

ний в грунтах земляного полотна и торфяного основания. Наличие в основании насыпей слоя торфяного грунта обуславливает резкое увеличение вибродинамического воздействия на грунты земляного полотна. Затухание колебаний по глубине насыпи, опирающейся на торф, происходит менее интенсивно, чем на насыпях, опирающихся на минеральный грунт. Верхние слои земляного полотна слабее рассеивают энергию колебаний, передавая на нижележащие существенную их часть, что приводит к проницанию колебаний в слабое торфяное основание.

Исследование колебательного процесса в земляном полотне и торфяном основании позволило получить аналитическую зависимость для расчета амплитуд колебаний в любой точке земляного полотна и его торфяного основания.

Библиографический список

1. **Методика** определения коэффициента стабильности основания земляного полотна с учетом вибродинамической нагрузки / А. Ф. Колос,

А. А. Сидоренко, В. С. Рыжов // Сборник научных трудов Sworld по материалам Международной научно-практической конференции. Т. 2. – 2011. – № 4. – С. 52–59.

2. **Исследование** прочностных характеристик лессовых грунтов в условиях трехосного напряженного состояния при воздействии вибродинамических нагрузок / А. Ф. Колос, М. А. Абдукаримов // Известия ПГУПС. – 2011. – Вып. 3. – С. 176–182.

3. **Влияние** промежуточных скреплений на колебания грунтов земляного полотна / И. В. Прокудин, И. С. Козлов // Путь и путевое хозяйство : научно-популярный, производственно-технический журнал. – 2009. – № 6. – С. 31–33.

4. **Колебательный** процесс грунтов железнодорожного земляного полотна, возведенного из лёссовых суглинков, при скоростном движении поездов в условиях Республики Узбекистан / А. Ф. Колос, З. Э. Мирсалихов // Известия ПГУПС. – 2011. – Вып. 4. – С. 105–113.

5. **Чувствительность** щебеночного балласта к вибродинамическому воздействию / И. С. Козлов, Д. С. Николайтис // Сборник научных трудов Sworld по материалам международной научно-практической конференции. Т. 2. – 2011. – № 4. – С. 23–24.

УДК 62-144.3+629.02

А. Н. Лялинов

Петербургский государственный университет путей сообщения

А. Л. Пенкин, А. А. Капустин

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ НАСАДКА-ГОМОГЕНИЗАТОРА НА ГАЗОВУЮ ФОРСУНКУ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Обобщены результаты теоретического исследования движения газовых струй внутри насадка-гомогенизатора на газовую форсунку двигателя внутреннего сгорания. Приведены величины градиента, дивергенции и ротора потока газовых струй в камере сгорания двигателя. Разработана программа, позволяющая дать характеристику вихревой составляющей потока газовых струй в любой точке камеры сгорания двигателя при установке насадка-гомогенизатора на газовую форсунку.

газовый двигатель, газовая форсунка, газоздушная смесь, насадок-гомогенизатор, векторный анализ.

Введение

Автомобильным газовым двигателям с распределённым впрыском топлива необходимы новые устройства для подготовки топливоздушнoй смеси, способствующие более полному её сгоранию. Повышение однородности газoвоздушной смеси позволяет снизить количество вредных выбросов с отработавшими газами и улучшить топливную экономичность двигателей. Существенным недостатком подобных устройств является повышение сопротивления во впускном тракте двигателя, что снижает положительный эффект от их применения. Авторы статьи предлагают насадок-гомогенизатор на газовую форсунку двигателя, придающий турбулентное возмущение газoвому топливу, не создающий сопротивления на впуске. Насадок может устанавливаться на форсунку как при внешнем, так и при внутреннем смешивании.

На рис. 1 представлены результаты теоретического исследования движения газoвых струй в цилиндре двигателя внутреннего сгорания при установке насадок-гомогенизатора на газовую форсунку [5].

Насадок-гомогенизатор конструктивно представляет собой раскрытый на угол γ_1 эллипсоид, выбрав который, можно спроектировать насадок в головке блока цилиндров двигателя таким образом, чтобы обеспечить турбулентное возмущение впрыскиваемого газoвого топлива. В нашем случае $\gamma_1 = 90^\circ$.

На конструктивной схеме (рис. 1) приведён насадок, близкий к масштабу 4:1. На сечение насадка нанесена сетка, точки которой симметричны относительно продольной оси OZ .

Существенным отличием предлагаемой модели форсунки является использование известного оптического свойства эллипса: луч, проходящий через фокус F_1 (его обеспечивает направляющий элемент), отражаясь от внутренней поверхности эллипсоида, обязательно проходит через второй фокус – F_2 . При раскрытии эллипсоида на угол γ_1 точки фокусов образуют левую и правую фокусные окружности $F_1 - F_1$ и $F_2 - F_2$.

Газовые струи проходят через сопло форсунки и, соприкасаясь с направляющим элементом, ударяются о внутреннюю поверхность раскрытого эллипсоида. Отражённые струи создают турбулентные завихрения как внутри насадка, так и вне его – в усечённом конусе 55A455 (рис. 1).

Расположение насадка определяется конструктором, во-первых, таким образом, чтобы перекрыть окружности радиуса R ; во-вторых, чтобы учесть расположение впускных и выпускных клапанов.

Всё пространство внутри насадка и за его пределами мы разделили на квадраты, каждый квадрат определяется своими числами.

Программа по определению параметров потока газoвых струй насадка-гомогенизатора, приведённая ниже, позволяет вычислить для каждой точки сечения насадка исследуемые параметры.

Программа определяет угол раскрытия насадка при известном расстоянии R , координат: абсциссы, ординаты и аппликаты, а также заглубление насадка в головку блока *HKON* (см. результаты расчёта параметров в точке 33).

Важным этапом является также расчёт модуля градиента потока, который определяется по формуле [1, 2, 3, 4]:

$$|\text{Grad}\bar{a}| = \sqrt{\left(\frac{\partial a}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial z}\right)^2} = 2\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (1)$$

Программа вычисляет дивергенцию газoвого потока

$$\text{div}\bar{a}(M) = \lim_{v \rightarrow 0} \frac{\oiint (\bar{a} * \bar{n}^0) ds}{v}, \quad (2)$$

или по теореме Остроградского – Гаусса в декартовых координатах:

$$\text{div}\bar{a}(M) = \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z}. \quad (3)$$

Эта формула стала основой для расчёта дивергенции векторного потока.

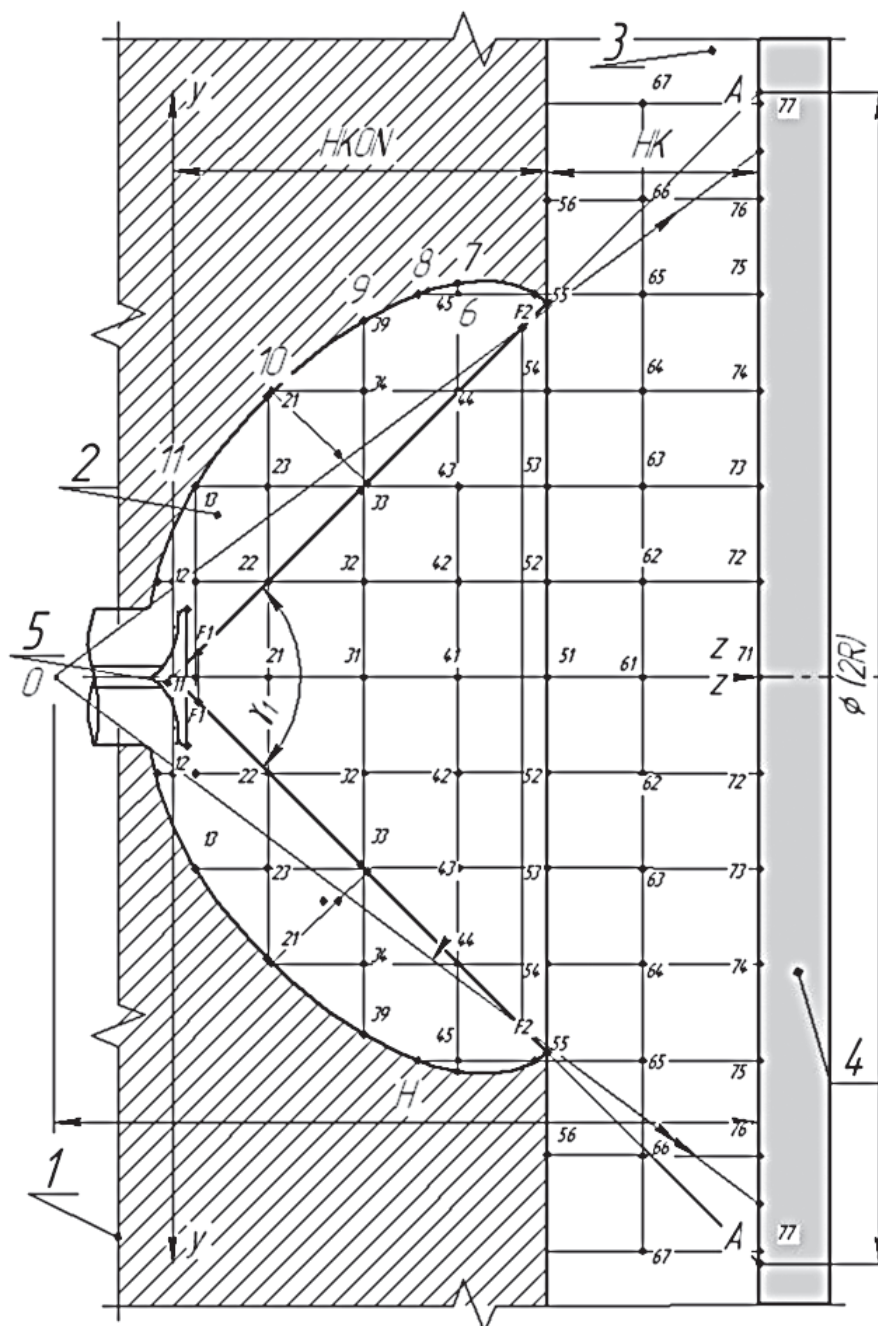


Рис. 1. Схема насадка-гомогенизатора:

1 – головка блока; 2 – внутренний объём насадка; 3 – камера сгорания без внутреннего объёма насадка; 4 – поршень; 5 – направляющий элемент

Программа определяет модуль ротора газового потока по формуле

$$|rot\bar{a}| = \frac{S}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \quad (4)$$

$$\sqrt{y^2 z^2 (y+z)^2 + x^2 z^2 (x+y)^2 + x^2 y^2 (x-y)^2},$$

где S – суммарная площадь поверхности конуса насадка.

Все результаты расчёта выводятся в файл *POLER.TXT*.

Исходные данные при расчёте заносятся в программу отдельным файлом *POLE.TXT* с указанием основания – файла *READ (2,*)*

в следующей последовательности: $X, Y, Z, A, B, НКОН, R, НК$. Здесь величины A, B определяют соответственно длину большой и малой полуосей эллипсоида. Значения $R, НК$ определяют соответственно радиус раскрытия разнесённого эллипсоида и расстояние между головкой цилиндров и поршнем (рис. 1).

Изучая формулу (2), определяющую дивергенцию потока, отметим, что она может определять плотность истечения газа.

Формула (2) представляет собой инвариантное определение дивергенции. Если в точке M векторного поля $div \vec{a} > 0$, то она является источником газа, и, наоборот, если $div \vec{a} < 0$, то данная точка M является стоком, в которую устремляется газ. Значение предела (2) по определению не зависит от вида поверхности S . Размерность этого параметра может быть различной в зависимости от изучаемого продукта. В нашем случае при вводе газа изучается метрическое пространство насадка-гомогенизатора, а поэтому дивергенция и модуль ротора имеют размерность $мм^2$.

Результаты расчёта параметров в точке 33 (пример вывода результатов работы Программы по определению параметров потока газовых струй насадка-гомогенизатора) приведены ниже:

«ПАРАМЕТРЫ ТОЧКИ X, Y, Z , мм:
 $X = 1.800, Y = 1.800, Z = 1.800$.
 УГОЛ РАСКРЫТИЯ НАСАДКА
 В РАДИАНАХ, рад:
 $GAM1 = 1.571$.
 РАСКРЫТИЕ НАСАДКА
 В ГРАДУСАХ, град:
 $GAMG = 90.0$.
 РАДИУС ПРОЕКЦИИ СТРУИ
 НА ПОРШЕНЬ, мм:
 $R = 5.5$.
 ВЫСОТА НАСАДКА-
 ГОМОГЕНИЗАТОРА, мм:
 $НКОН = 3.54$.
 ОБЪЁМ РАЗНЕСЁННОГО
 ЭЛЛИПСОИДА, $мм^3$:
 $V1 = 46.66$.
 ОБЪЁМ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ, $мм^3$:

$V = 305.28$.

МОДУЛЬ ГРАДИЕНТА ПОТОКА, мм:
 $MGR = 6.235$.

ПЛОЩАДИ БОКОВОЙ
 И ТОРЦЕВОЙ ЧАСТЕЙ
 КАМЕРЫ СГОРАНИЯ, $мм^2$:
 $S = 350.371, S1 = 39.592$.

СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПОТОКА
 ВЕКТОРНОЙ ФУНКЦИИ, мм:
 $P = 364.12, Q = 364.12, RP = -190.84$.

СЛАГАЕМЫЕ ДИВЕРГЕНЦИИ –
 ПРОИЗВОДНЫЕ ПО X, Y, Z
 $PX = 12192.7, QY = 12192.7$,
 $RPZ = -12231.3$.

ДИВЕРГЕНЦИЯ ПОТОКА ГАЗОВЫХ
 СТРУЙ, $мм^2$
 $DIVA = 433.41$.

СЛАГАЕМЫЕ ПРОИЗВОДНЫЕ РОТОРА
 $RY = 67.429, QZ = -67.429$.

$PZ = -67.429, RX = 67.429$.
 $QX = -67.429, PY = -67.429$.

МОДУЛЬ РОТОРА ПОТОКА
 ГАЗОВЫХ СТРУЙ, $мм^2$
 $MROT = 190.7$.»

При изучении параметров, определяющих рабочий процесс насадка-гомогенизатора, весь его внутренний и наружный объём между головкой блока и поршнем разбит на кубы с длиной сторон, равной 0,9 мм (рис. 1).

Принятый масштаб 4:1 позволил наглядно представить на рис. 1 как сечения объёма насадка, так и сечения всего объёма камеры сгорания.

В каждой его точке параметры определялись с помощью ЭВМ в соответствии с Программой. Зная величину параметра в каждой точке, можно показать их графически относительно любых точек и в любом направлении пространственной ортогональной системы координат. Ниже приведён лишь один пример результатов расчёта параметров в точке 33.

Рассмотрим плоскость 55–55, перпендикулярную в продольной оси аппликата OZ , определим в ней аналитические зависимости дивергенции и модуля ротора.

Эта плоскость является внутренней поверхностью головки блока. В этой плоско-

сти находится насадок-гомогенизатор, который создаёт турбулентные вихри газовых струй.

На рис. 2, а, б приведены аналитические зависимости дивергенции и модуля ротора потока газовых струй.

Из рис. 2, а видно, что дивергенция потока газа возрастает почти по прямолинейной зависимости и достигает 360 мм^2 в точке с ординатой $3,45 \text{ мм}$. Для точки, находящейся на расстоянии по ординате $0,7-0,9 \text{ мм}$, дивергенция равна нулю, и далее, при отрицательном значении ординаты OY , имеет отрицательное значение (на графике не показана). Такое значение дивергенции говорит нам об изменении движения газового потока в направлении оси аппликат OZ . Этот по-

ток определяется дивергенцией $222,81 \text{ мм}^2$. Точки, находящиеся вблизи от оси аппликат OZ , являются стоками. Образно говоря, на оси аппликат поток газа как бы «замерзает», останавливается.

На рис. 2, б приведена аналитическая зависимость модуля ротора от положения точек, перпендикулярных оси аппликат. Максимальное значение модуля ротора определяется турбулентным процессом при ординате, равной $2,3 \text{ мм}$. Следует также отметить, что с удалением от оси аппликат уменьшается значение модуля ротора. Это явление закономерно, так как эта точка находится за пределами треугольника с вершиной O (рис. 1), который определяется газовой струёй, проходящей через окружность второго фокусного кольца.

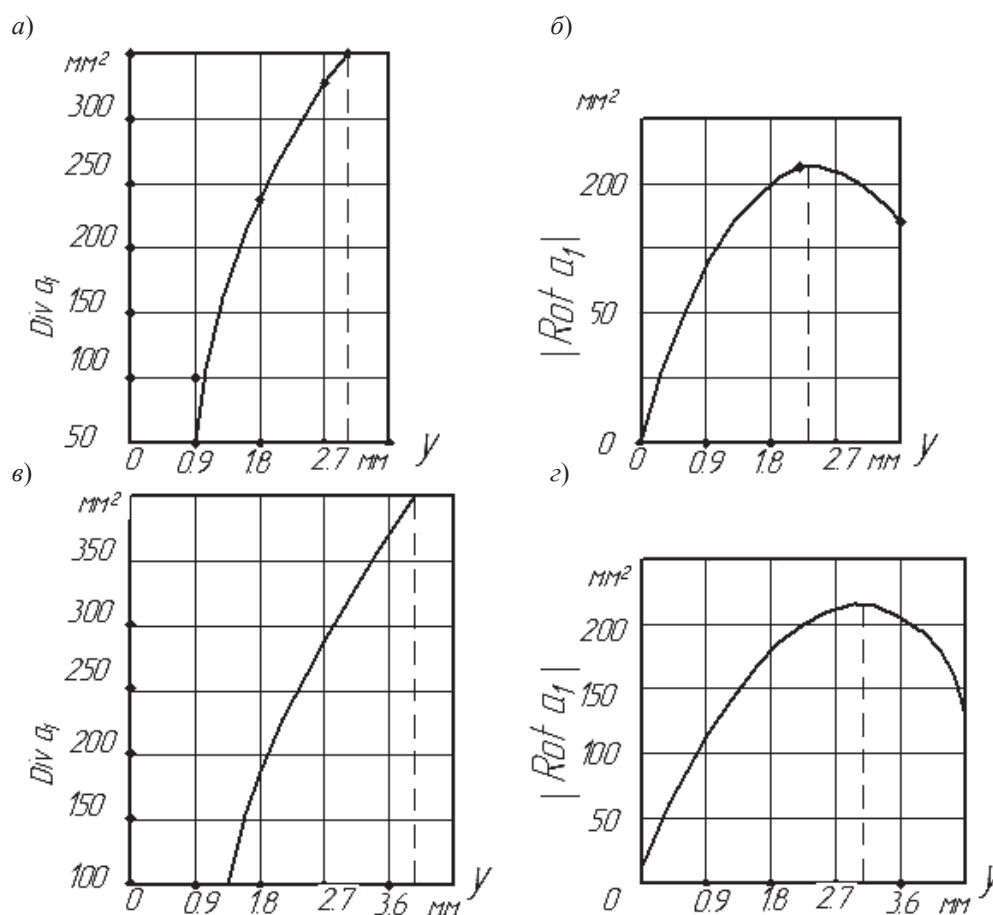


Рис. 2. Аналитическая зависимость дивергенции и модуля ротора от положения точек между поршнем и головкой блока:
а, б – положение плоскости на грани головки блока;
в, з – положение плоскости бб–бб, перпендикулярной оси OZ

Рассмотрим аналитические зависимости дивергенции и модуля на плоскости 66–66, представленные на рис. 2, в, г. Исследуя плоскость 66–66, перпендикулярную оси аппликат OZ , приходим к следующим выводам.

Дивергенция растёт почти по прямойлинейной зависимости со средним значением тангенса угла наклона 74° . Максимальное значение дивергенции равно 400 мм^2 при ординате 4 мм (рис. 2, в).

Модуль ротора (рис. 2, г) увеличивается по параболической зависимости, на первом этапе – до максимального значения, равного 215 мм^2 при ординате, равной $3,1 \text{ мм}$.

Рассмотрим плоскость 77–77.

На рис. 3 приведены зависимости дивергенции и модуля ротора для этой плоскости, перпендикулярной оси аппликат OZ .

Изучая изменение дивергенции на плоскости, перпендикулярной оси аппликат, следует отметить тенденцию, аналогичную показанной на рис. 2, а, в.

Следует отметить также отличия. Если дивергенция у головки блока (рис. 2, а) при ординате $y = 2,7 \text{ мм}$ равна 375 мм^2 , то такой же параметр для поверхности поршня (рис. 3, а) равен 310 мм^2 , т. е. уменьшился в 1,21 раза.

Наблюдается также небольшое уменьшение модуля ротора. У поверхности головки (рис. 2, б) он составил $210\text{--}220 \text{ мм}^2$ при ординате $y = 2,7 \text{ мм}$, а для поверхности поршня – 200 мм^2 (рис. 3, б).

Рассмотрим изменение модуля градиента векторной функции для двух сечений – 66–66 и 77–77 – для пространства, находящегося между внутренней поверхностью головки и днищем поршня.

Кривая 1 (рис. 4) определяет изменение модуля градиента от положения точек в сечении 66–66, а кривая 2 определяет этот же параметр для точек плоскости 77–77, перпендикулярной оси аппликат OZ .

Кривая 1 имеет больший тангенс угла наклона к оси ординат OY по сравнению с кривой 2. Поскольку ось ординат OY находится в плоскости рис. 1, то её наклон «на нас» также будет большей величиной и, следовательно, нормаль векторной трубки потока газа будет иметь большую величину. Эта кривая также даёт косвенную оценку увеличения модуля ротора функции в точках 62, 63 относительно аппликаты OZ .

Кривая 2 (рис. 4) определяет модуль градиента векторной функции над днищем поршня в различных точках. Особенность кривой 2 в том, что её модуль по величине

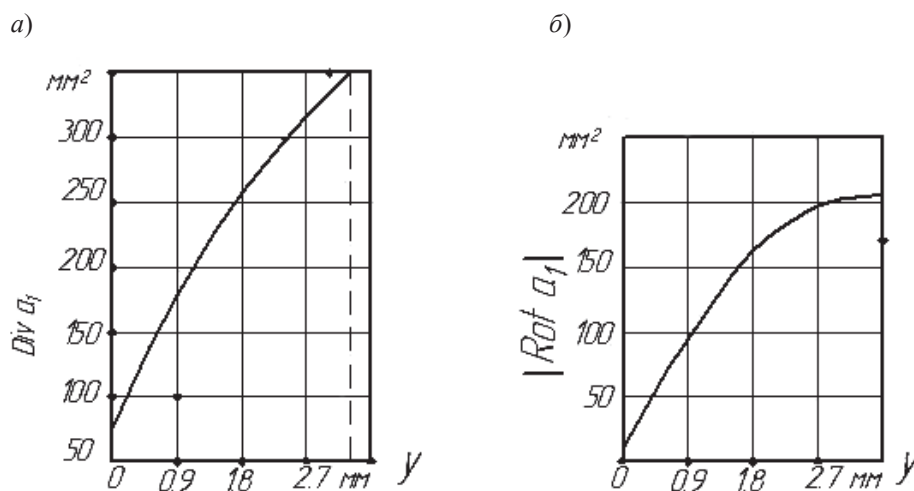


Рис. 3. Аналитическая зависимость дивергенции и модуля ротора от положения точек в плоскости рабочей поверхности поршня:
а – зависимость дивергенции от расстояния до оси аппликат; б – зависимость модуля ротора от расстояния до оси аппликат

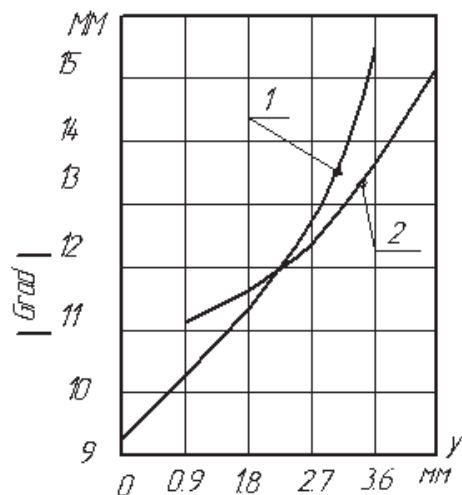


Рис. 4. Зависимость модуля градиента от его расстояния до аппликаты:
1 – кривая M_{grad} для сечения 66–66;
2 – кривая M_{grad} для сечения 77–77

равен модулю кривой в наиболее удаленных точках от оси аппликаты.

Заключение

По результатам теоретического исследования движения газовых струй внутри насадка-гомогенизатора на газовую форсунку двигателя внутреннего сгорания можно сделать следующие выводы.

1. Применение насадка-гомогенизатора для газовых двигателей внутреннего сгорания позволяет в значительной степени повысить турбулентность и тем самым однородность газозоудшной смеси в камере сгорания.

2. Максимальный поток газа определяется дивергенцией потока, которая резко

возрастает в крайних точках у поверхности конуса (рис. 1) и достигает 300–400 мм².

3. Вихрь газа (модуль ротора) достигает своего максимального значения 200 мм² на расстоянии 2,7–3,5 мм от оси аппликаты OZ .

4. Модуль градиента векторного потока газа возрастает с удалением от оси ординат OY и достигает значений 15–20 мм.

5. Подтверждением теоретических выводов, изложенных в статье, может быть только эксперимент, конструктивная схема которого разрабатывается.

Библиографический список

1. **Векторный** анализ и начала тензорного исчисления / А. И. Борисенко, И. Е. Тарапов // Изд-во Харьковского университета. – Харьков, 1972. – С. 154–170.
2. **Справочник** по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн // М.: Наука, 1970. – С. 166–172.
3. **Векторный** анализ / М. Л. Краснов, А. И. Киселёв, Г. И. Макаренко. – М.: Наука, 1978. – С. 25–100.
4. **Элементы** векторного исчисления / Г. Ф. Лаптев. – М.: Наука, 1975. – С. 150–200.
5. **Патент** 121307 Российская Федерация: МПК F02M29/06 (2006.01). Насадок-гомогенизатор на газовую форсунку / Лялинов А. Н., Пенкин А. Л., Евтюков С. А., Капустин А. А.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – № 2012117260/28; заявл. 26.04.2012; опубл. 20.10.2012, Бюл. № 29. – 1 с.: 1 ил.