

КОМПЬЮТЕРНАЯ ОБРАБОТКА ВИЗУАЛИЗИРОВАННЫХ ТЕЧЕНИЙ В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

1. ВВЕДЕНИЕ

Повышение интенсивности техногенного воздействия человека на окружающую среду приводит, в частности, к росту суммарной массы аэрозольных выбросов в атмосферу. По недавно опубликованным данным [1] на каждого жителя России приходится около 400 кг аэрозольных выбросов. Значительную часть в этой гигантской массе вредных веществ составляют атмосферные выбросы авиационных и автомобильных двигателей, промышленных топочных устройств. Не секрет, что массовый советский автомобиль уступает своему западному аналогу в экономичности, а это приводит к дополнительному расходу углеводородного топлива и, как следствие, дополнительному аэрозольному и тепловому загрязнению атмосферы.

В научно-техническом центре АвтоВАЗа (г. Тольятти) постоянно ведутся работы по повышению экономичности и снижению загрязняющего воздействия на атмосферу транспортных поршневых двигателей с искровым зажиганием. В этих работах принимают участие учёные и инженеры Самарского Аэрокосмического Университета (СГАУ).

Так, в 1990 г. на ПО АвтоВАЗ в отделе доводки двигателей совместно со специалистами СГАУ проводились исследования структур течения газа в модельном цилиндре двигателя внутреннего сгорания (ДВС) методом лазерного "ножа" [2]. В результате указанных исследований визуализированы и зарегистрированы изображения отдельных вихревых структур, возникающих в процессе впуска топливо-воздушной смеси в районе впускного клапана и снижающих весовой заряд смеси. Указанные исследования проводились в модельном цилиндре, в котором движение воздуха создавалось за счёт разрежения в нижней части цилиндра. Отсутствие поршня в данной установке и реальной кинематики, присущей поршневому двигателю, снижает ценность полученных результатов. В этой связи авторами статьи спроектирована и изготовлена исследовательская установка на базе серийного двигателя ВАЗ 2108, в которой визуализация структур течений газовых потоков в цилиндре ДВС осуществляется методом лазерного "ножа" с использованием аэрозольных частиц.

Исследования в указанном направлении позволили получить новые результаты для более глубокого понимания газодинамики поршневых двигателей и находить новые подходы при проектировании более экономичных двигателей для транспортных целей. Актуальность указанных исследований доказывается аналогичными исследованиями, проводимыми за рубежом на ведущих автодвигателестроительных фирмах.

Параллельно с экспериментальным моделированием развивается математическое моделирование, призванное для создания методов расчёта интегральных характеристик ДВС, а также методов расчёта процессов горения и течений в камерах сгорания, системах впуска-выпуска в цилиндре ДВС.

В данной статье авторами приведены результаты работы по автоматизированной обработке визуализированных течений в двигателе внутреннего сгорания. Исходным материалом для обработки были изображения потоков частиц в цилиндре двигателя, полученные методом лазерного "ножа", суть которого заключалась в трансформировании лазерного пучка с световую плоскость ("нож"), введении её в исследуемый объём и регистрации рассеянного от частиц дисперсной фазы излучения. Основные принципы построения лазерных визуализаторов и методики их применения подробно изложены в работе авторов [2]. Ниже изложены подходы к решению поставленной задачи и отдельные результаты автоматизированной обработки изображений структур течений в цилиндре ДВС.

2. ОПИСАНИЕ СПОСОБА ВИЗУАЛИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЙ.

В данной задаче требуется по изображению, содержащему струи жидкости, построить изображение, на котором основные направления течений показаны линиями. Наиболее удобный способ трассировки, описанный в [3], в нашем случае не дал результата, так как он требует непрерывности потоков (изображения типа глазного дна с кровеносными сосудами или географической карты с реками). У нас же линии прерывисты и не имеют чёткой границы, отделяющей их от фона. Поэтому было введено понятие поля направлений.

Изображение можно рассматривать как функцию двух переменных $I(x,y)$. Полем направлений называется функция $DF(x,y)$, значение которой в данной точке равно углу касательной к линии уровня функции $I(x,y)$ в этой же точке, приведённому к диапазону $[0^\circ; 180^\circ]$. Для построения поля направлений были разработаны и испытаны дисперсионный метод, дифференциальные методы, градиентные методы. Полученное поле направлений в силу наличия шума на изображении и большой чувствительности к локальным свойствам функции яркости является неустойчивым, что проявляется в виде ряби на изображении поля. Поэтому требуется его фильтрация. Каждый вектор, образующий точку поля направлений, характеризуется кроме угла еще и "весом", который показывает, насколько данное направление выражено.

Вспользуемся в нашей задаче тем, что вес отсчёта поля направлений достаточно велик лишь в тех областях изображения, где линии выражены отчётливо. Начальные шаги таким образом заключаются в построении поля направлений, его фильтрации и отделении веса. При этом используются алгоритмы из [4]. В результате получаем изображение, наиболее яркие области которого соответствуют наибольшим весам.

2.1. Алгоритм аппроксимации линии направления течения.

Построение ломаной, аппроксимирующей кривую, обозначающую направление линии, основано на предположении: локальные максимумы веса лежат на линии, проходящей через ось струи. Отсюда вытекает следующий алгоритм построения искомой ломаной.

1) Зануление значений веса, меньших некоторого порога.

Это необходимо по той причине, что локальные максимумы в области малых значений веса не лежат на главных струях и будут только мешать в дальнейшем.

2) Нахождение точек локального максимума функции веса.

Искомые точки определяются из стандартных условий максимума функции двух переменных:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = 0; \frac{\partial w}{\partial y} = 0; \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} < 0; \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} < 0;$$

Мы не проверяем достаточного условия максимума:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 > 0,$$

так как вычисление вторых производных довольно затруднительно. (Проверка

знаков $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$, $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ выполняется без вычисления значений производных). Для

наглядности точки максимумов отмечаются на экране.

3) Если несколько точек максимумов близко расположены, то оставляем только одну из них (см. рис. 1а). Это сокращает объем обрабатываемой информации и предотвращает скачки направления линии, которые значительно исказили бы форму ломаной (причины см. ниже).

4) Соединение точек максимумов ломаной линией.

а) В качестве начальной точки выбирается наибольший из максимумов, лежащих в левой четверти изображения. Такой выбор обоснован тем, что на всех имеющихся кадрах струя начинается у левого края и вес, как правило, возрастает при увеличении поперечного сечения струи.

б) Направление ломаной из первой точки определяется следующим образом: выбираем точку наибольшего из оставшихся максимумов, лежащих правее начальной точки. Направление прямой, соединяющей эти точки, принимается за начальное.

в) Каждая последующая точка находится следующим образом:

зная направление из предыдущей точки, ищем все максимумы, лежащие в пределах сектора с полураствором в 5° относительно данного направления. Если их несколько, то выбираем ближайшую. Эта точка помечается (чтобы в нел не попасть в дальнейшем), на экране рисуется линия от начальной точки до выбранной, направление которой принимается за начальное на следующем шаге. Если в пределах угла 5° точек максимумов нет, то увеличиваем угол на 5° до тех пор, пока не найдём точки. Пункт в) повторяется, пока для текущей точки в пределах угла полусектора α_{\max} у нас не будет следующей точки. При этом переходим к ветвлению - пункт г).

г) Среди всех оставшихся точек выбирается точка с наибольшим значением максимума. Она будет второй точкой первого отрезка ветви. Первая точка ищется среди точек, уже построенных ветвей таким образом, чтобы угол отхождения новой ветви был минимален (см. рис. 1б). Таким образом, первый отрезок новой ветви построен. Теперь переходим к пункту в), при выполнении которого

учитывается новое условие: потенциально новый отрезок ломаной не должен пересекать уже имеющиеся линии.

Теоретически алгоритм прекращает работу, когда исчерпаны все точки максимумов. В действительности имеет смысл прекращать построение ломаных гораздо раньше, когда уже построены главные ветви, так как оставшиеся точки или вообще побочные или принадлежат коротким струям, не связанным с основным потоком. Поэтому в программе, реализующей описанный алгоритм, пользователю дана возможность прервать процесс.

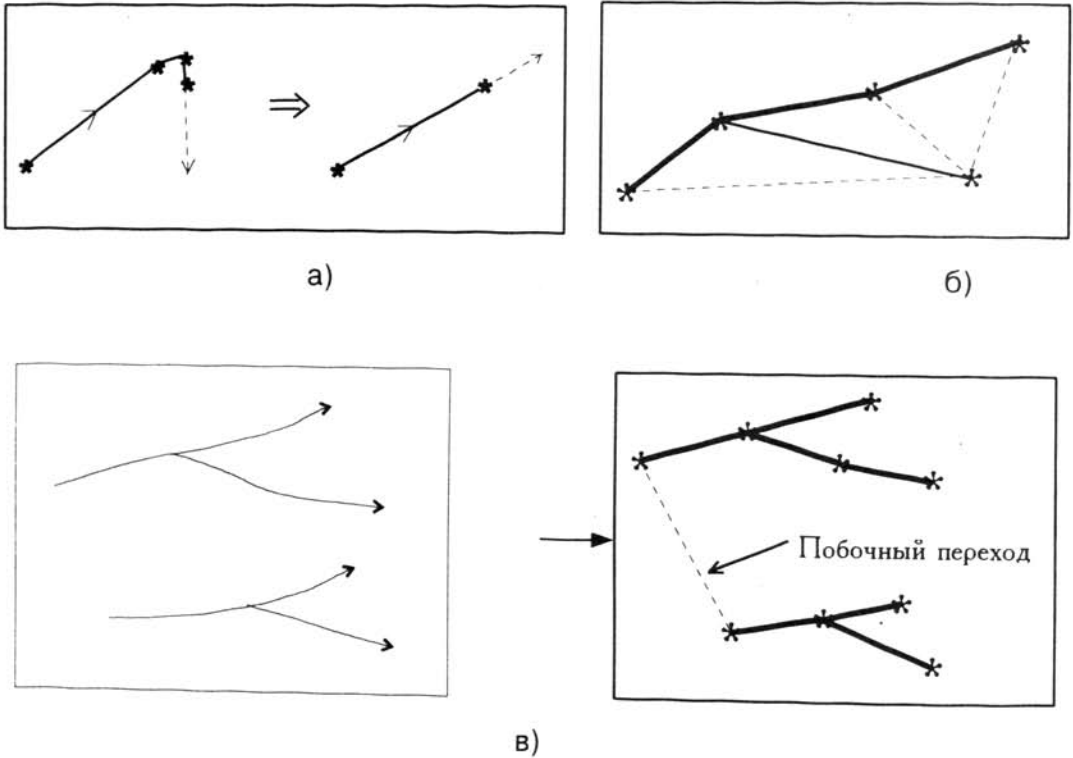


Рис. 1. Иллюстрация алгоритма аппроксимации линии направления течения

Данный алгоритм не является идеальным. Имеется 2 основных недостатка:

- 1) он хорошо работает лишь в том случае, когда имеется достаточно длинный начальный участок струи до её рассыпания.
- 2) предполагается, что картина струи имеет древовидную структуру. Если, например, имеется две струи, не связанные между собой, то будет допущена неточность (см. рис. 1в).

2.2. Программная реализация визуализации структуры течений

Изображение с фотографии вводится в ЭВМ при помощи телекамеры и имеет размер 512x512 пикселей. В некоторых случаях производится предварительная обработка введённого изображения. Исходное изображение помещено на рис. 2.

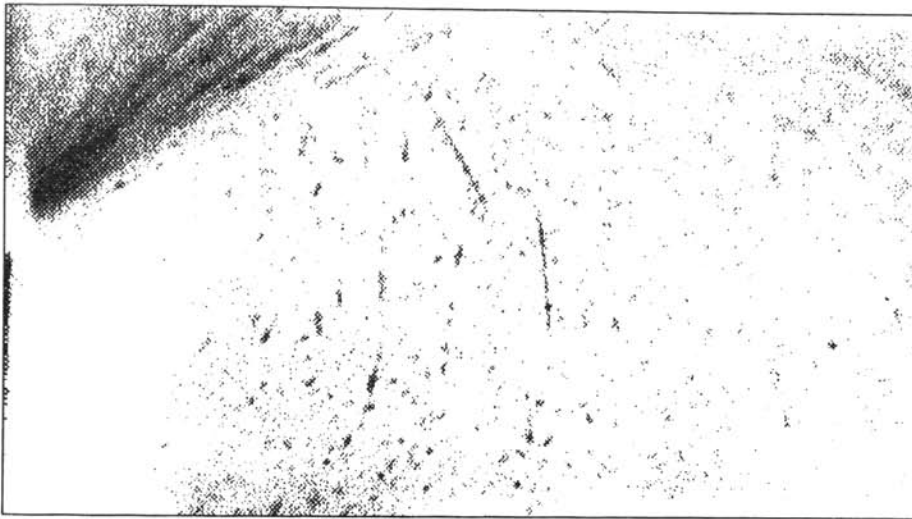


Рис. 2. Исходное изображение течения, введённое в ЭВМ телекамерой

Алгоритм, описанный в пункте 2.1. реализуется следующим набором программ:

- 1) Построение поля направлений.
- 2) Фильтрация поля направлений.
- 3) Выделение веса из файла поля направлений.
- 4) Непосредственно визуализация структуры течений.

Искомая ломаная строится на экране, получение пиков и построение каждого нового отрезка ломаной производится нажатием произвольной клавиши. Клавиша ESC выполняет досрочное завершение работы, например, при окончании построения основных линий (подробнее см. описание алгоритма в пункте 1). Изображение, содержащее значения веса поля направлений с наложенной ломаной, аппроксимирующей направления линий течения, показано на рис. 3.

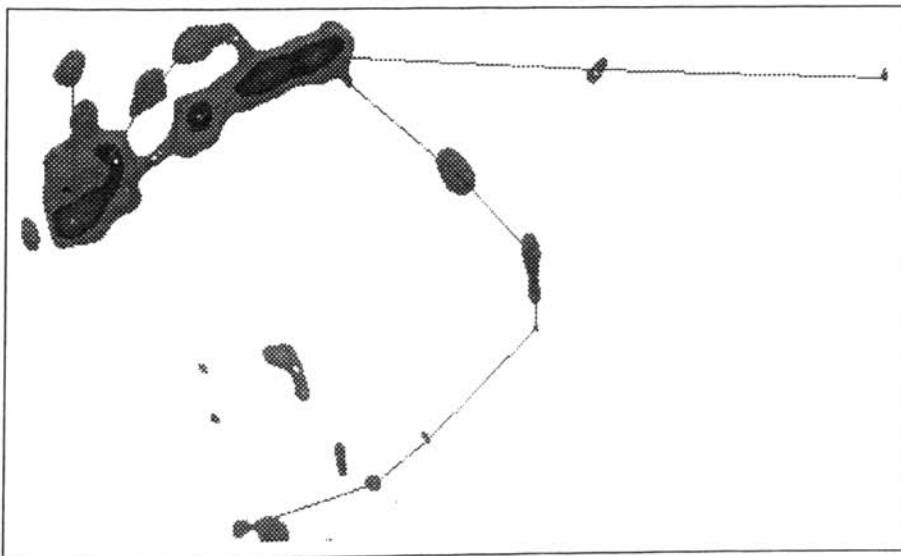


Рис. 3. Ломаная, аппроксимирующая направление течений в модельном цилиндре ДВС

3. НАХОЖДЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ЧАСТИЦ.

В данной задаче требуется по изображению, содержащему следы (треки) частиц, определить их скорости, точнее проекцию скорости на плоскость изображения. Масштаб и время экспозиции при фотосъёмке считаются заданными.

В силу постоянства масштаба и времени экспозиции по полю кадра скорость частицы пропорциональна длине трека, поэтому задача сводится к измерению их длин. Непосредственно по исходному изображению найти длины треков почти невозможно, так как стандартные процедуры обнаружения и измерения геометрических характеристик объектов используют двухградационные изображения, то есть объекты и фон уже разделены по яркости. Кроме того, качество исходного изображения не очень высокое. В силу этого имеем следующую схему измерения длин треков.

1) Выравнивание яркости по полю изображения.

Исходное изображение имеет достаточно хороший контраст и низкий уровень шума (поэтому не требуется фильтрация полутонового изображения), но яркости фона и треков существенно отличаются на разных участках изображения. Это приводит к невозможности разделения на объект и фон при помощи пороговой обработки, так как нельзя выбрать единого порога. Поэтому необходимо выполнить выравнивание яркости. Используется алгоритм растягивания гистограммы в скользящем окне [5], при этом усиливается также и контраст изображения.

2) Отделение треков от фона, фильтрация шумов, сегментация.

После выравнивания яркости производится пороговая обработка и инвертирование изображения. Полученное бинарное изображение подвергается ранговой фильтрации. Эта процедура нужна не столько для удаления шумовых вкраплений (они все равно были бы отсечены на следующем этапе), сколько для придания контурам объектов большей гладкости. После этого применяется стандартная процедура сегментации бинарных изображений, в результате которой получаем список объектов с их геометрическими характеристиками; в их числе координаты крайних точек, периметр, площадь.

3) Непосредственно вычисление длин треков.

- а) На полученном бинарном изображении кроме треков частиц имеются и другие объекты: шумовые фрагменты и объекты, по форме не похожие на треки. Возникает задача отделения треков от остальных объектов. Для этого использовалась модель трека: прямоугольник с отношением сторон более 2:1 и два геометрических параметра - коэффициент аспекта и коэффициент формы [5].

Коэффициент аспекта выражается формулой:

$$K_{asp} = \frac{l_{min}}{l_{max}},$$

где l_{min} , l_{max} - минимальная и максимальная проекции объекта. Можно доказать, что для прямоугольника с отношением сторон более 2:1 с учётом того, что сегментация даёт только 4 проекции, имеет место неравенство:

$$K_{asp} < \frac{1}{1 + \sqrt{2}} \approx 0.414$$

Но эксперименты показали, что это условие является очень жестким, поэтому в качестве порогового значения бралось 0.7. (Причина данного условия заключается во влиянии дискретизации при вычислении признаков объектов и в том, что многие реальные треки по своей форме отличаются от прямоугольников).

Коэффициент формы имеет следующее выражение:

$$K_f = \frac{4\pi S}{P^2};$$

Для прямоугольника со сторонами a и b :

$$K_f = \frac{\pi \frac{b}{a}}{\left(1 + \frac{b}{a}\right)^2}.$$

У нас $b \geq 2a$, соответственно $K_f \leq \frac{2}{9}\pi$.

Окончательно получаем, что объект считается треком, если:

$$S \geq 6 \wedge K_{asp} \leq 0.7 \wedge K_f \leq \frac{2}{9}\pi$$

(Первое условие обеспечивает отбрасывание шума).

- б) Длина трека вычисляется по методу приравненной площади. Суть метода состоит в том, что за длину объекта принимается большая сторона прямоугольника, имеющего одинаковые с объектом площадь и периметр. Была выведена следующая формула вычисления длины:

$$l = \frac{P}{4} + \sqrt{\frac{P^2}{16} - S}$$

Точность метода достаточно велика в тех случаях, когда объект имеет гладкий контур, не имеет ветвей и толщина по всей его длине меняется не очень сильно. В нашей задаче эти условия в большинстве случаев выполняются.

Отметим также, что пользователь имеет возможность изменить результаты выполнения пункта а), то есть отметить как трек объект, который автоматически был отмечен как не являющийся треком и наоборот.

После вычисления длин треков (в пикселах) проекции их скоростей вычисляются элементарно. Полученные результаты вполне согласуются с характерными физическими значениями скоростей при распыле топлива в ДВС. Однако необходимо отметить, что если масштабы по осям координат не являются примерно одинаковыми, то мы не сможем получить правильного результата из-за незнания проекций длин треков на оси. В таком случае вместо метода приравненной площади требуется применять другой метод, который может дать длины обеих проекций трека, а не только его полную длину.

3.1. Программная реализация вычисления скоростей частиц

Изображение с фотографии вводится в ЭВМ при помощи сканера и имеет размер примерно 1200x600 пикселей в формате РСХ. Исходное изображение помещено на рис. 4.

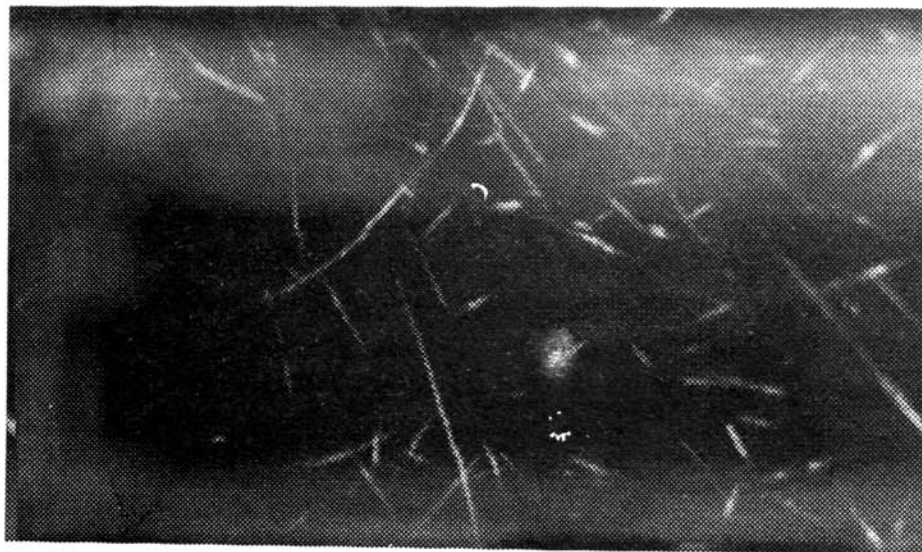


Рис. 4. Исходное изображение треков, введённое в ЭВМ сканером

Алгоритм, описанный в пункте 3, реализуется следующим набором программ:

- 1) Выравнивание яркости изображения.
- 2) Пороговая обработка и инвертирование изображение.
- 3) Ранговая фильтрация бинарных изображений.
- 4) При необходимости стираются шумовые фрагменты, которые остаются после ранговой фильтрации.
- 5) Сегментация бинарного изображения, которая выдает список объектов, присутствующих на изображении с их геометрическими характеристиками.
- 6) Непосредственное вычисление скоростей частиц.



Рис. 5. Экран пользователя при работе с системой

При запуске программы на экране высвечиваются все объекты, имеющиеся на изображении; объекты, автоматически отмеченные как треки, имеют черный цвет, а не треки - зелёный. Пользователь может просматривать список объектов при помощи клавиш \uparrow и \downarrow , при этом снизу высвечивается номер текущего объекта, а на изображении текущий объект выделяется цветом: трек - красным, не трек - фиолетовым. Можно вручную изменить интерпретацию объекта на противоположную нажатием клавиши F9. Нажатие клавиши F2 вызывает подсчёт скоростей частиц, клавиши F5 - создание результирующего файла, который представляет собой бинарное изображение, на котором имеются только треки, причём треки частиц с наибольшими скоростями пронумерованы. Нажатие клавиши ESC завершает работу. Создаётся также текстовый файл, в котором в каждой строке приведены номер объекта, служебные поля и скорость частицы (последнее поле). Нулевая скорость приписывается объектам, не являющимся треками. На рис. 5 приведён пользовательский экран, на рис. 6 - изображение с пронумерованными треками.

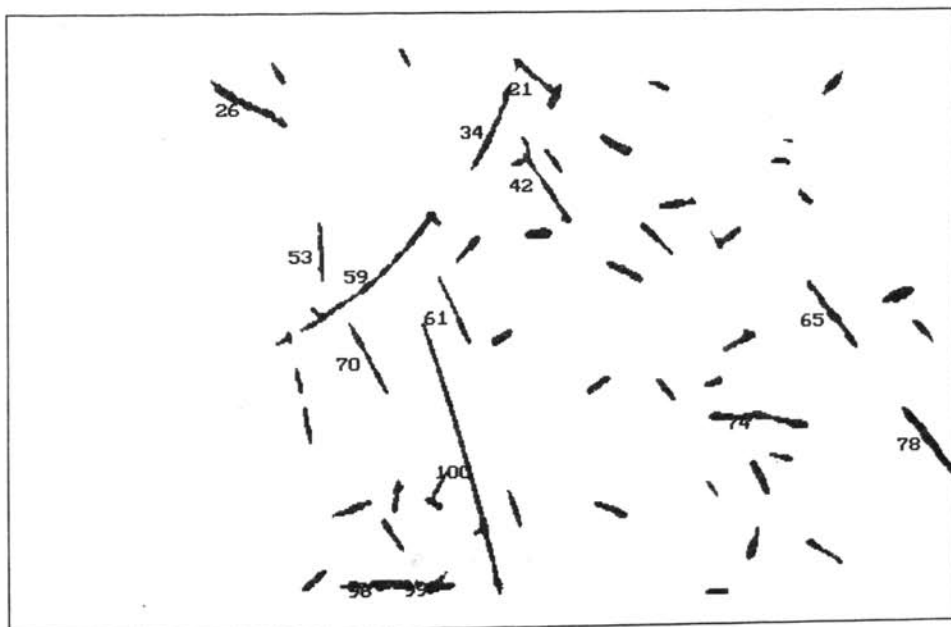


Рис. 6. Изображение, содержащее только истинные треки частиц с пронумерованными объектами

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе предложенных алгоритмов разработан комплекс программ анализа изображений структуры течений жидкости и газа в энергетических установках. Комплекс позволяет выделять объекты, классифицировать их по предложенным критериям, а также определять длины объектов. Целостная система позволяет автоматизировать процесс изучения и измерения характеристик структуры течений жидкости и газа в энергетических установках.

1. *Вачнадзе Г.Н.* Горячие точки России//М.: книга при участии "Богау Харнер Ферлаг", Марбург, ФРГ. - 1993.
2. *Журавлёв О.А., Мединская Л.Н., Шорин В.П.* Лазерная диагностика двухфазных течений//Куйбышев, КуАИ - 1989.
3. *Branchevsky S.L., Vasiliev Yu.V., Durasov A.B., Iliasova N.Yu., Ustinov A.V.* Method for distinguishing and quantitative evaluation of the elements of pathological pattern of the retina (pathology of microcirculation)//5th International Workshop on Digital Image Processing and Computer Graphics. August 22-26, 1994, Samara, Russia.
4. *Ильясова Н.Ю., Устинов А.В., Храмов А.Г.* Методы анализа дактилоскопических изображений на основе поля направлений//Научное приборостроение, Санкт-Петербург. - 1993. - Т.3. - №1. - с.89-101.
5. *Волкова С.Э., Ильясова Н.Ю., Карнеев С.В., Уваров Г.В., Устинов А.В., Храмов А.Г.* Оптико-цифровая система для анализа препаратов крови//Научное приборостроение, Санкт-Петербург. - 1993. - Т.3. - №1. - с.134-146

Справочник

"WA-2.РЕГИСТР. ПРОИЗВОДИТЕЛИ ТОВАРОВ И УСЛУГ.1994/1995"

3-е издание, в двух томах, 1424 стр.в каждом

В регистре 47500 предприятий: основная промышленность бывшего СССР, оборонные предприятия со специальной и конверсионной продукцией, компании новой экономики.

В регистре данные по каждому предприятию: наименование, форма собственности, адрес, телефон, факс, телекс, телетайп, руководитель, полный перечень продукции.

Цена комплекта справочника в 2-х томах 80 ам.долл.

Цена электронной версии РЕГИСТРА в среде DOS или WINDOWS на дискетах 100 ам.долл.

Цены на издания указаны с учетом стоимости почтовой пересылки в пределах СНГ.

БАНКОВСКИЕ РЕКВИЗИТЫ МЦНТИ:

- при расчетах по Москве и Московской области: МЦНТИ, р/с 900603538 в АКБ "Кредит-Москва", МФО 997 191, код участника 7М.
- при иногородних платежах: МЦНТИ, р/с 900603538 в АКБ "Кредит-Москва", корр.счет 501161700 в ГРКЦ ГУ ЦБ РФ по г.Москве, МФО 201791, код участника 83.

Заказы вместе с копией платежного поручения об оплате направлять по адресу:

Россия, 125252, Москва, ул.Куусинена,21б, МЦНТИ.

Сектор организации, подготовки и распространения изданий.

Факс (095) 943-00-89 Телефон для справок 198-72-10

Computer processing of visualized flows in internal combustion engines

N.D. Bystrov, N.Y. Ilyasova, L.N. Medinskaya, A.V. Ustinov

Abstract

An increase in the intensity of human impacts on the environment leads, in particular, to an increase in the total mass of aerosol emissions into the atmosphere. According to recent data [1], there are approximately 400 kg of aerosol emissions per each Russian citizen. A significant part in this gigantic mass of harmful substances is atmospheric emissions of aircraft and automobile engines, industrial combustion devices. It is no secret that the mass-produced Soviet car is inferior to its western analogue in economy, and this leads to additional consumption of hydrocarbon fuel and, as a result, additional aerosol and thermal pollution of the atmosphere.

Citation: Bystrov ND, Ilyasova NY, Medinskaya LN, Ustinov AV. Computer processing of visualized flows in internal combustion engines. *Computer Optics* 1995; 14-15(1): 69-78.

References

- [1] Vachnadze GN. Russia's Hotbeds of Tension; Moscow: book with part. of Blaue Horner Verlag, Marburg: FRG; 1993.
- [2] Zhuravlev OA, Medinskaya LN, Shorin VP. Laser diagnostics of two-phase flows; Kuibyshev: KuAI; 1989.
- [3] Branchevsky SL, Vasiliev Y.V, Durasov AB, Ilyasova NY, Ustinov AV. Method for distinguishing and quantitative evaluation of the elements of pathological pattern of the retina (pathology of microcirculation). 5th International Workshop on Digital Image Processing and Computer Graphics; Russia, Samara: 1994.
- [4] Ilyasova NY, Ustinov AV, Khramov AG. Methods of analysis of fingerprint images based on the directions field. St. Petersburg: Scientific instrumentation; 1993; 3(1): 89-101.
- [5] Volkova SE, Ilyasova NY, Karpeev SV, Uvarov GV, Ustinov AV, Khramov AG. Optical-digital system for the analysis of blood products; St. Petersburg: Scientific Instrumentation; 1993; 3(1): 134-146.