

**К вопросу количественной оценки газодинамических параметров процессов в газовых средах по результатам их оптической регистрации**

# 04, апрель 2013

DOI: 10.7463/0413.0552104

Зеленцов В. В., Кузнецов А. В., Ивашов А. И.

УДК 53.082.5

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

[dean@sm.bmstu.ru](mailto:dean@sm.bmstu.ru)[ivashovai@mail.ru](mailto:ivashovai@mail.ru)[avk-51@mail.ru](mailto:avk-51@mail.ru)

## Введение

Процессы, реализующиеся в газовых средах, оказывают существенное влияние на жизнедеятельность человека. В частности, газодинамические процессы, происходящие в атмосфере, оказывают существенное влияние на нашу жизнь: перепады давления влияют на самочувствие атмосферо-зависимых людей (гипотоников и гипертоников), а смерчи и торнадо приводят к значительному материальному ущербу и человеческим жертвам. При разработке и проведении мероприятий, направленных на уменьшение последствий разрушительного действия атмосферных явлений, необходимо знать количественную оценку параметров атмосферы в непосредственной близости от источника возмущений: распределение давления, плотности, температуры, содержание твёрдых веществ, значения массовых скоростей, влажности и т.д. Непосредственное измерение этих параметров в среде рядом и в источнике возмущений зачастую затруднено (например, в эпицентре торнадо или пограничном слое летящего тела). С другой стороны, развитие авиационной и космической техники предъявляет все более высокие требования к количеству и качеству информации, получаемой при изучении обтекания летательного аппарата в широком диапазоне параметров (чисел Маха и Рейнольдса, углов атаки и т.д.). Это ведет к необходимости наряду с совершенствованием традиционных экспериментальных методов исследования потоков (измерения с помощью пневмонасадков, термопар, термоанемометров и т.д.) внедрения новых более производительных, как качественно, так и количественно методов регистрации параметров газодинамического процесса. Методы оптической регистрации параметров газовых сред в настоящее время

приобретают все более широкое распространение, как при изучении атмосферных явлений, так и при проведении аэрофизических и баллистических экспериментов. Их преимуществом является наглядность процесса развития особенностей газодинамических процессов и возможность получения информации на большом поле без внесения возмущений в исследуемую область потока. Одним из наиболее распространенных методов оптической регистрации газодинамических процессов при экспериментальных исследованиях особенностей обтекания тел потоком газа является теневой метод [1-3]. Он позволяет получать «мгновенную», по сравнению с характерным временем исследуемого процесса, информацию.

Преимуществом теневого метода оптической регистрации является возможность наглядной визуализации процесса обтекания тел путём анализа яркости каждой точке черно-белого фотоснимка. Согласно [1], теневой метод регистрирует вторую производную плотности газа, что позволяет применять его для исследования ударных и звуковых волн, тангенциальных разрывов, турбулентных явлений и других газодинамических процессов, сопровождающихся быстрыми изменениями показателя преломления и, соответственно, яркости в каждой точке снимка процесса в газовой среде. С учётом дифракционных явлений [4] он обеспечивает простое и надёжное определение таких данных, как положение и форма ударных и звуковых волн, положение точек отрыва и величины углов схода потока, состояние и толщина пограничного слоя, геометрические параметры следа. Основные недостатки теневого метода связаны с его сравнительно невысокой чувствительностью (что обусловлено в основном низким качеством регистрирующей аппаратуры) и, поскольку этот метод основан на смещении лучей - в появлении геометрических искажений контуров моделей. Кроме того, дифракционные явления также ухудшают чёткость изображения. Однако наиболее существенным недостатком теневого метода является трудность количественного анализа результатов экспериментов и невозможность получения достоверной количественной информации о состоянии газодинамических параметров потока газа в исследуемой области [5]. Учитывая актуальность проблемы определения количественных показателей газодинамических параметров в газовых средах, целью данной работы являлась разработка принципиально нового подхода к определению количественных показателей газодинамических параметров процессов в газовых средах по результатам их оптической регистрации и методики для его осуществления.

#### Постановка задачи

Решение поставленной задачи определения количественных показателей газодинамических параметров процессов в газовых средах по результатам их оптической регистрации основывалось на известном [6] соотношении яркости газовой среды и второй производной её плотности.

В качестве основного допущения в разработанной методике для реализации предложенного подхода предполагалось равенство яркости в каждой точке чёрно-белого фотоснимка, второй производной плотности потока газа по координате в той же точке известное из [6]:

$$\Phi_x = \varphi * \frac{\partial^2 \rho}{\partial X^2}, \quad (1)$$

$$\Phi_y = \varphi * \frac{\partial^2 \rho}{\partial Y^2}.$$

Здесь  $\Phi$  – яркость,  $\varphi$  – коэффициент согласования,  $\rho$  – плотность среды,  $X, Y$  – координаты, а плотность и давление связаны зависимостью [7]

$$P = A * \rho^k, \quad (2)$$

где  $P$  – давление,  $\rho$  – плотность,  $A$  – коэффициент согласования,  $k$  – показатель изоэнтропы.

Обрабатываемый кадр (рис. 1) разбивался сеткой на массив данных, причём на один миллиметр обрабатываемой фотографии (кадра) приходилось 2,4 пикселя. Размеры ячейки – один квадратный миллиметр. Размер массива составлял 768 *узлов сетки* по ширине и 576 *узлов сетки* по высоте. В полученном массиве данных выделялась строка (рис. 1), из которой брались значения интенсивности (яркости) цвета пикселей (от 0 – чёрный цвет пиксела до 255 – белый цвет пиксела) для последующей их обработки.

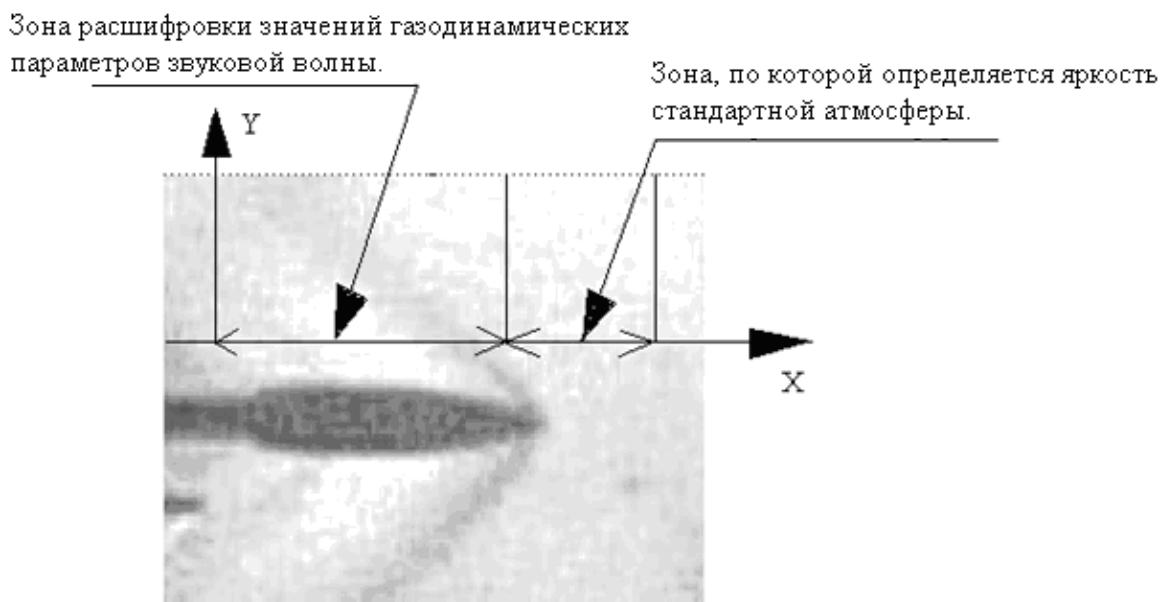


Рис. 1. Исходное изображение с выделенной строкой из которой выбираются значения цвета (яркости) пикселей для последующей их обработки

В невозмущённой зоне потока полагалась, что его яркость соответствует давлению стандартной атмосферы. Затем проводилась корректировка массива давлений относительно принятого значения яркости пикселя, соответствующего стандартной атмосфере. Это позволило получить зависимость давления (рис. 2) от выбранной координаты X или Y.

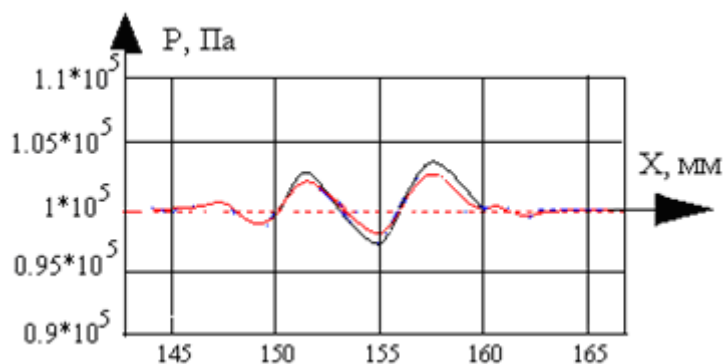


Рис. 2. Распределение давления по координате выделенной строки

- расчёт по газодинамической модели
- эксперимент (осреднённое значение давления из теневой фотографии)

Данные представленные на рис.1 - 5 получены в результате продувки цилиндрического тела диаметром 9,0 мм с оживальной частью в аэродинамической трубе, причём скорость воздушного потока в данном случае соответствовала числу Маха  $M = 0,95$ .

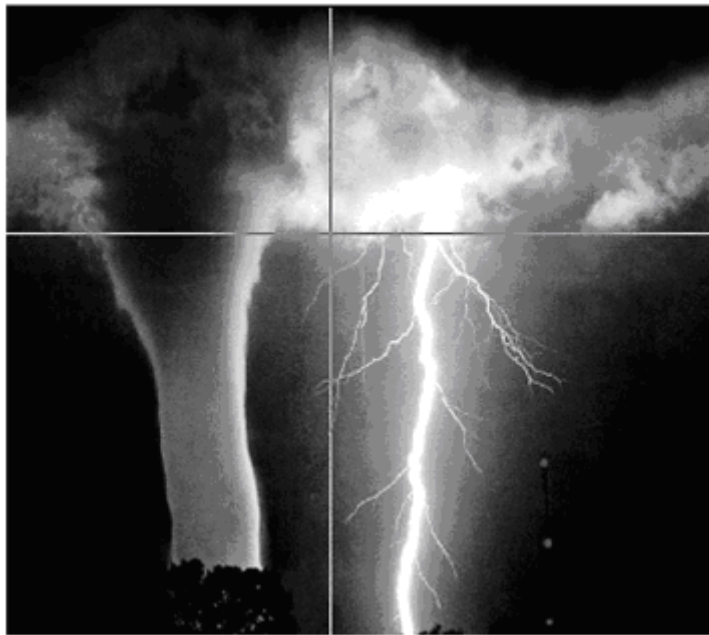


Рис. 3. Фотография торнадо с выделенной строкой из которой выбираются значения цвета (яркости) пикселей для последующей их обработке

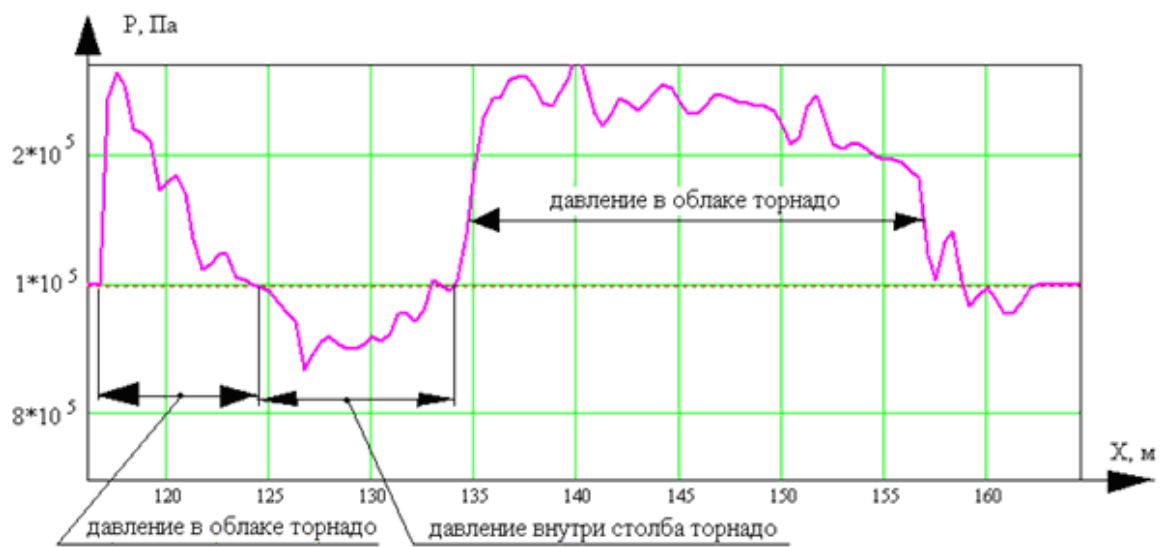


Рис. 4. Распределение давления по координате выделенной строки  
— среднее значение

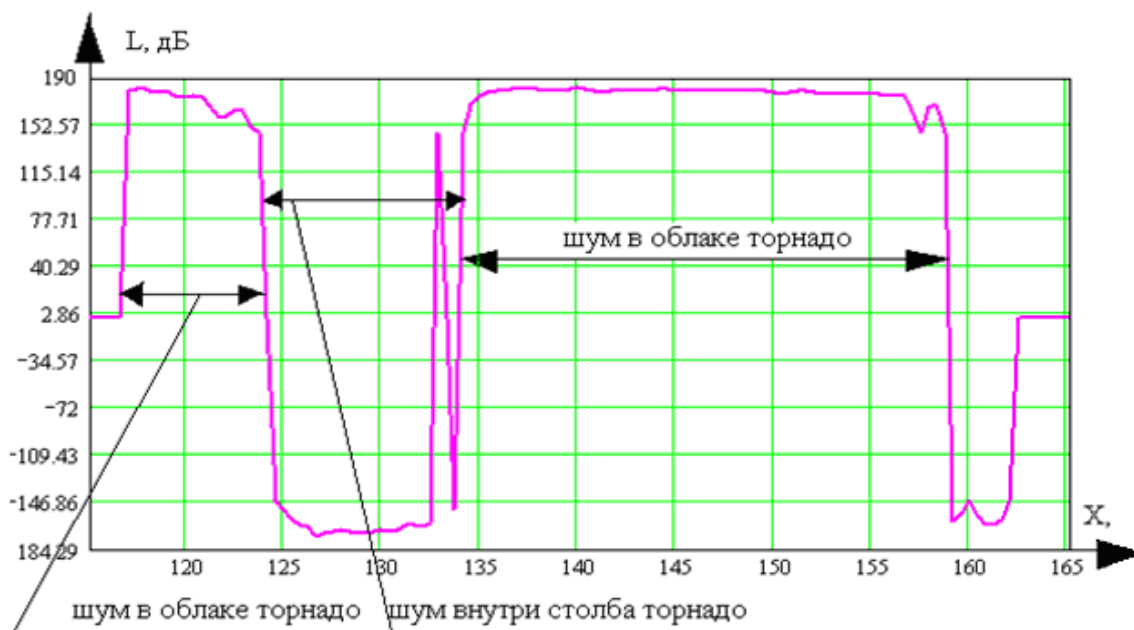


Рис. 5. Распределение шума по координате выделенной строки

— среднее значение

Методика позволяет проводить расшифровку теневых фотографий в любом направлении движения газовой среды. С целью определения достоверности результатов расшифровки фотографий, было выполнено решение задачи обтекания цилиндрического тела диаметром 9,0 мм с оживальной частью воздушным потоком при  $M = 0,95$ . Процесс обтекания тела описывался системой уравнений математической физики в нестационарной постановке [7, 8, 9], что позволило выполнить высокоточное моделирование изучаемого процесса:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} + v \frac{\partial p}{\partial x} + u \frac{\partial p}{\partial y} + \rho \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\rho u N}{y}; \\ \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial k}{\partial t} + v \frac{\partial k}{\partial x} + u \frac{\partial k}{\partial y} = 0; \\ p = A \rho^k, \end{cases} \quad (3)$$

где  $p$ ,  $\rho$ ,  $v$ ,  $u$ ,  $k$ ,  $t$ ,  $x$ ,  $y$  - давление, плотность, составляющие массовой скорости, показатель изоэнтропы время и координаты соответственно.  $N = 0, 1, 2$  для плоской, осевой и сферической симметрии потока соответственно [7].

В качестве граничных условий на поверхности цилиндрического тела с оживальной частью использовалось условие равенства нулю нормальной к поверхности составляющей массовой скорости потока  $\vec{w}_n = 0$ , где  $\vec{w} = \vec{u} + \vec{v}$  ( $n$  – нормаль к поверхности тела).

В качестве начальных условий газодинамических параметров воздушного потока, набегающего на цилиндрическое тело диаметром 9,0 мм с оживальной частью, использовались параметры стандартной атмосферы при  $k = 1,4$  и  $M = 0,95$ .

Решение системы уравнений (3) осуществлялось конечно-разностным методом второго порядка точности типа “предиктор - корректор” с использованием трехточечного сглаживания [10]. В процессе расчетов осуществлялся контроль точности решения по энергии. Результаты расчетов показали, что погрешность вносимая в решение за счет конечно-разностной аппроксимации газодинамических функций по энергии не превышает 1 %.

### Результаты

В результате выполненного численного моделирования было получено распределение полей газодинамических параметров вблизи корпуса цилиндрического тела диаметром 9,0 мм с оживальной частью (давления, плотности, температур и массовых скоростей), а также распределение давления по координате  $X$ , соответствующей выделенной на фотографии строке, с которой снимались экспериментальные данные распределения давления по координате.

Результаты сравнения экспериментальных и расчётных данных по давлению вдоль выделенной строки представлены на рис. 2. Анализ полученных результатов показывает, что разработанная методика обработки черно-белых фотографий вполне корректно описывает газодинамическую структуру процесса обтекания тела трансзвуковым потоком. Длина фазы сжатия, длина фазы разрежения, а также значение давления в фазе разгрузки совпадают как в эксперименте, так и в расчётном варианте с точностью до 10 %.

Сравнительный анализ результатов обработки оптических изображений процессов с результатами их численного моделирования показал, что получаемые в результате обработки по разработанной методике количественные оценки газодинамических параметров имеют точность достаточную для практического использования при обработке данных экспериментальных исследований.

Разработанная методика позволяет также выполнять оптическую диагностику различных аномальных атмосферных явлений. В частности, ниже на рис. 3, 4 и 5 представлены результаты обработки процесса развития торнадо.

Анализ результатов, представленных на рис. 3 – 5, показывает, что в процессе развития торнадо как внутри столба, так и в самом облаке развиваются существенные градиенты давления, плотности и температур.

Полученные результаты позволяют осуществлять динамическое моделирование процесса развития газодинамических процессов. В частности, настоящая методика позволяет получать начальное распределение газодинамических параметров для осуществления численного моделирования и прогнозирования динамики развития газодинамических процессов с помощью уравнений математической физики [7, 8, 9].

Необходимо отметить, что реализующиеся в столбе торнадо абсолютные значения давления и шума превышают нормативы, допустимые для человека. В частности воздействие избыточного давления выше 0,3 атмосферы на человека приводит к возникновению баротравм, а воздействие шума выше 80-85 дБ согласно ГОСТ 12.1.003-83 может привести к необратимым изменениям в теле человека, в том числе и к субсерозному поражению сосудов головного мозга и лёгких вплоть до летального исхода.

Методика позволяет также экспериментально определять частотные характеристики газодинамических процессов. Ниже приведены результаты экспериментального определения частотных характеристик торнадо фотография которого представлена выше:

$$\frac{334_{м/с}}{159_{,м} - 134_{,5м}} = 111,3_{Гц} \quad \text{- частота потока в облаке торнадо;}$$

$$159,5_{м} - 134,5 = 25_{м} \quad \text{- радиус интенсивной зоны торнадо;}$$

$$134,5_{м} - 124,5 = 10_{м} \quad \text{- диаметр столба торнадо;}$$

$$\frac{334_{м/с}}{134,5_{м} - 124,5_{м}} = 33,4_{Гц} \quad \text{- частота потока в столбе торнадо.}$$

Анализ полученных результатов показывает, что основные частотные характеристики торнадо находятся в пределах слышимого звукового диапазона, т.е. процесс распространения торнадо сопровождается сильными звуковыми эффектами, причём в отдельных частях периферийной части торнадо реализуются низкочастотные инфразвуковые колебания потока.

## Заключение

Впервые был предложен подход к определению количественных показателей газодинамических параметров процессов в газовых средах по результатам их оптической регистрации и разработана методика для его осуществления.



Разработанная методика позволяет существенно расширить возможности оптической регистрации при проведении аэрофизических и баллистических экспериментов, разрабатывать оригинальные устройства [11, 12] и определять качественные и количественные значения газодинамических параметров как вблизи движущихся в атмосфере тел, так и в процессе изучения атмосферных явлений. Она дает возможность не только повысить информативность экспериментальных исследований, но и существенно снижает стоимость их проведения. Сравнительный анализ с результатами численного моделирования показал, что получаемые в результате обработки изображений количественные оценки газодинамических параметров имеют точность достаточную для практического использования при обработке данных экспериментальных исследований.

### Список литературы

1. Гуляев Б.А., Гурьяшкин Л.П., Красильщиков А.П., Суменков К.А. О применении искровой фотографии в изучении быстро движущихся объектов // Техника киносъёмки и её применение в промышленности и научных исследованиях: сб. статей. Ч. 2. М., 1966. С. 48-53.
2. Климкин В.Ф., Папырин А.Н., Солоухин Р.И. Оптические методы регистрации быстропротекающих процессов. Новосибирск: Наука, 1980. 208 с.
3. Оптические методы исследования в баллистическом эксперименте / под ред. Г.И. Мишина. Л.: Наука, 1979. 232 с.
4. Васильев Л.А. Теневые методы. М.: Наука, 1968. 408 с.
5. Саламандра Г.Д. Фотографические методы исследования быстропротекающих процессов. М.: Наука, 1974. 201 с.
6. Златин Н.А., Красильщиков А.П., Мишин Г.И., Попов Н.Н. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / под ред. Н.А. Златина, Г.И. Мишина. М.: Наука, 1974. 344 с.
7. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П., Челышев В.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва / под ред. К.П. Станюковича. М.: Наука, 1975. 704 с.
8. Кузнецов А.В. Математическая модель процесса взаимодействия одиночной нестационарной сверхзвуковой струи с подвижной преградой конечных размеров // Известия ВУЗов. Авиационная техника. 1986. № 1. С. 27-29.
9. Кузнецов А.В. Математическая модель процесса установления течения струи горячих газов, истекающей в полужамкнутые объемы с подвижными границами и в свободное пространство // Сб. трудов МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1986. № 521. С. 18-23.
10. Кестенбойм Х.С., Чудов Л.А. Точечный взрыв. Методы расчета. Таблицы. М.: Машиностроение, 1974. 190 с.

11. Ивашов А.И., Разевиг В.В., Ивашов С.И., Васильев И.А., Макаренков В.И. Устройство зондирования конденсированных сред: пат. 2460099 Российская Федерация. 2012. Бюл. № 24. 3 с.
12. Ивашов А.И., Разевиг В.В., Ивашов С.И., Бугаев А.С. Оптический способ определения скорости железнодорожного состава: заявка на изобретение РФ, рег. № 2013103281; заявл. 25.01.2013. 3 с.

## Quantitative assessment of gas-dynamic parameters of processes in gaseous medium by their optical recording

# 04, April 2013

DOI: 10.7463/0413.0552104

Zelencov V.V., Kuznecov A.V., Ivashov A.I.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

[dean@sm.bmstu.ru](mailto:dean@sm.bmstu.ru)

[ivashovai@mail.ru](mailto:ivashovai@mail.ru)

[avk-51@mail.ru](mailto:avk-51@mail.ru)

In this article the authors propose methods of quantitative estimation of the processes' gas-dynamic parameters in gaseous media, based on the results of optical recording. The basis of this technique is a well-known dependence of a directly proportional relationship between the brightness of the image and the second derivative of gas flow density with respect to the coordinates. Comparison of experimental and calculated data showed that the developed method allowed to perform a quantitative estimation of the processes' gas-dynamic parameters in gaseous medium correctly. It leads to a significant increase in the number of possibilities of optical registration of aero-physical and ballistic experiments and makes these experiments cheaper and simpler.

---

**Publications with keywords:** [gas-dynamic parameters](#), [optical recording](#), [gaseous medium](#), [quantitative estimation of parameters](#)

**Publications with words:** [gas-dynamic parameters](#), [optical recording](#), [gaseous medium](#), [quantitative estimation of parameters](#)

---

### References

1. Guliaev B.A., Gur'iashkin L.P., Krasil'shchikov A.P., Sumenkov K.A. O primenении iskrovoi fotografii v izuchenii bystrodvizhushchikhsia ob"ektov [On the application of spark photography in the study of fast-moving objects]. *Tekhnika kinos"emok i ee primeneniye v promyshlennosti i nauchnykh issledovaniyakh: sb. statei. Ch. 2.* [Filming technique and its application in industry and scientific research: a collection of articles. Part 2]. Moscow, 1966, pp. 48-53.
2. Klimkin V.F., Papyrin A.N., Soloukhin R.I. *Opticheskie metody registratsii bystroprotekaiushchikh protsessov* [Optical methods of registration of rapid processes]. Novosibirsk, Nauka, 1980. 208 p.

3. Mishin G.I., ed. *Opticheskie metody issledovaniia v ballisticheskomeksperimente* [Optical methods of investigation in ballistic experiment]. Leningrad, Nauka, 1979. 232 p.
4. Vasil'ev L.A. *Tenevye metody* [Shadow methods]. Moscow, Nauka, 1968. 408 p.
5. Salamandra G.D. *Fotograficheskie metody issledovaniia bystroprotekaiushchikh protsessov* [Photographic methods of investigation rapid processes]. Moscow, Nauka, 1974. 201 p.
6. Zlatin N.A., Krasil'shchikov A.P., Mishin G.I., Popov N.N. *Ballisticheskie ustanovki i ikh primenenie v eksperimental'nykh issledovaniiaakh* [Ballistic installation and its application in experimental investigations]. Moscow, Nauka, 1974. 344 p.
7. Baum F.A., Orlenko L.P., Staniukovich K.P., Chelyshev V.P., Shekhter B.I. *Fizika vzryva* [Physics of explosion]. Moscow, Nauka, 1975. 704 p.
8. Kuznetsov A.V. Matematicheskaiamodel' protsessa vzaimodeistviia odinochnoi nestatsionarnoi sverkhzvukovoi strui s podvizhnoi pregradoi konechnykh razmerov [Mathematical model of the process of interaction of single nonstationary supersonic jet with a moving barrier of the finite sizes]. *Izvestiia VUZov. Aviatsionnaia tekhnika*, 1986, no. 1, pp. 27-29.
9. Kuznetsov A.V. Matematicheskaiamodel' protsessa ustanovleniia techeniia strui goriachikh gazov, istekaiushchei v poluzamknutyemy s podvizhnymi granitsami i v svobodnoeprostranstvo [Mathematical model of the process of establishing the flow of the jet of hot gases that flowing into semi-enclosed space with moving boundaries and into free space]. *Sb. trudov MVTU im. N.E. Baumana* [Proc. of the Bauman MSTU], 1986, no. 521, pp. 18-23.
10. Kestenboim Kh.S., Chudov L.A. *Tochechnyi vzryv. Metody rascheta. Tablitsy*. [Point explosion. Methods of calculation. Tables]. Moscow, Mashinostroenie, 1974. 190 p.
11. Ivashov A.I., Razevig V.V., Ivashov S.I., Vasil'ev I.A., Makarenkov V.I. *Ustroistvo zondirovaniia kondensirovannykh sred* [Sensing device of condensed media]. Patent RF, no. 2460099, 2012.
12. Ivashov A.I., Razevig V.V., Ivashov S.I., Bugaev A.S. *Opticheskii sposob opredeleniia skorosti zheleznodorozhnogo sostava* [Optical method for determining the speed of the train]. Application for invention RF, reg. no. 201310328. 2013.