

УДК 629.7.036.22

## **Метод цифровой обработки теневых снимков сверхзвукового обтекания элементов конструкций летательных аппаратов**

**Тарасенко О.С.<sup>\*</sup>, Бодрышев В.В.<sup>\*\*</sup>, Абашев В.М.<sup>\*\*\*</sup>**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*\*e-mail: [os-tarasenko@yandex.ru](mailto:os-tarasenko@yandex.ru)*

*\*\* e-mail: [soplom@mail.ru](mailto:soplom@mail.ru)*

*\*\*\* e-mail: [ipk\\_avm@mai.ru](mailto:ipk_avm@mai.ru)*

### **Аннотация**

Предлагается цифровой метод обработки теневых и шпирен изображений сверхзвукового газодинамического обтекания тел различной формы. Реализация метода рассмотрена на задачах сверхзвукового обтекания тупого угла и острых кромок. Метод основан на анализе экспериментальных изображений структуры газового потока, с представлением его в трехмерных координатах, где в качестве третьей размерности выбрана интенсивность изображения (яркость). Определяется способ нахождения корреляционной взаимосвязи между интенсивностью изображения и основными характеристиками газового потока. Метод позволит при наличии достаточного статистического материала по обработке изображений построить соответствующие «номограммы», связывающие основные эксплуатационные параметры газового потока.

**Ключевые слова:** сверхзвуковой газодинамический поток, экспериментальные исследования, интенсивность изображения, гистограмма интенсивности изображений, давление, скорость газового потока, скачек уплотнения, число Маха, волна Маха.

Исследование процессов обтекания газовым потоком твердых тел крайне актуально при разработке авиационной и ракетно-космической техники. Такие исследования проводятся на уникальных стендовых установках с визуализацией процессов обтекания. Сама визуализация газодинамических течений проводится различной аппаратурой и обрабатывается специальными методиками [1]. Например, инфракрасная термография применяется при визуализации температурных полей на поверхности. Здесь предполагается сканирование поля в инфракрасном диапазоне и преобразование полученного изображения поля из инфракрасного в видимое изображение. Регистрация и преобразование инфракрасного излучения осуществляется с помощью тепловизера. Исследуемым параметром является безразмерный параметр подобия – число Нуссельта, характеризующий теплопередачу в данной поверхности. Широко известны теневые и шпирен изображения. Они основываются на явлении отклонения света при его прохождении через неоднородности плотности прозрачной среды. При визуализации поля течения газа шпирен-методом изменение освещенности пропорционально градиенту плотности газа в исследуемой области, в теневом

методе изменение освещенности определяется степенью изменения градиента плотности.

Как теневой, так и шпирен-метод дают двухмерное изображение, по которому можно качественно отследить картину течения газового потока обтекаемого объект, но практически не дают количественную оценку. Цель работы развитие метода цифровой обработки теневых снимков и выявление параметра, характеризующего изображение и коррелирующего с основными параметрами газового потока (скоростью, давлением, плотностью). Применение такого метода позволит определять в любой точке газового потока его эксплуатационную характеристику (например, давление), а, следовательно, анализировать данное конструкторское решение и выбрать его оптимальный вариант. В данной работе предлагается в качестве основного параметра анализа изображений применять значение интенсивности (яркости) изображения [2].

Изображение описывается функцией  $I(x,y)=I(p)$ , заданной на плоскости. Используется растровое изображение, где аргументы  $x$  и  $y$  являются целыми числами:  $x, y \in Z$ . Целочисленную пару  $(x, y) = p$  можно представить пикселем. Эти значения ограничены размерами изображения по горизонтали и вертикали:  $x \in [0, W-1], y \in [0, H-1]$ , где  $W$  – ширина изображения (по оси  $x$ ),  $H$  – величина изображения по оси  $y$ . Функция  $I$  также является целой и ограничивается максимальной интенсивностью (яркостью) изображения  $L: I(x, y) \in Z, I(x, y) \in [0, L-1]$ . Изображение представляется матрицей с неотрицательными целыми ограниченными значениями. При анализе газового потока целесообразно

анализировать гистограмму интенсивности изображения и интегральную (накопленную) гистограмму.

Гистограммой интенсивности изображения является функция, определяющая число пикселей, которые имеют определенное значение интенсивности:

$$L(b) = |\{p : I(p) = b\}| \quad (1)$$

Интегральная (накопленная) гистограмма является функцией, определяющей число пикселей, имеющих значения интенсивности, не превосходящее определенного:

$$L(b) = |\{p : I(p) \leq b\}| = \sum_b^b L(b') \quad (2)$$

Качество изображения определяется количеством пикселей на заданном участке (pixels/inch, pixels/cm). Чаще всего этот диапазон составляет от 72÷400 pixels/inch (28,35÷157,48 pixels/cm). Замер интенсивности в конкретной точке является некоторой случайной величиной, поэтому целесообразно при обработке проводить анализ по его среднему значению  $\bar{L}$ , рассчитанному по данным на определенном участке и среднеквадратичном отклонению  $\sigma$

$$\bar{L} = \frac{1}{n} \sum_1^n L_i; \sigma = \frac{\sum_1^n (L_i - \bar{L})^2}{n-1}, \quad (3)$$

где  $n$  - количество пикселей с замером интенсивности  $L_i$  на определенном выбранном участке.

Значение  $L_i$  задается в размере пикселя по координатам угла или его центру. Для изображений с меньшим значением пикселей, кривая изменения функции

интенсивности огрубляется. Но при этом значительно сокращается матрица «замеров»  $L_i$  на данном размере изображения.

Достоверность выбора  $\bar{L}$  определяется не превышением  $\sigma$  некоторого предельного значения  $\sigma_{np}$ .

В качестве основного параметра выбрана интенсивность изображения в градации серого цвета. В данной работе исследуются области с наличием скачка уплотнения. При анализе газового потока учитываются физические аспекты течения. При скоростях (числе маха  $M < 1$ ) в дозвуковом режиме сжимаемость газа не проявляется, при сверхзвуковом режиме ( $M > 1$ ) сжимаемость газа существенным образом меняет картину обтекания. При переходе к сверхзвуковому потоку ( $M > 1$ ) обтекание конструкции сопровождается ударной волной. Она, перемещаясь, как бы «останавливается» набегающим газовым потоком. Все это сказывается на величине плотности газового потока, степени изменения градиента плотности и тональности изображения.

Остановимся на теневом методе. При визуализации поля течения теневым методом изменение интенсивности пропорционально степени изменения градиента плотности газа. На рис. 1 схематично представлена схема теневого метода изображения скачка уплотнения [1] с распределением интенсивности изображения и соответствующего ему изменению плотности газа вдоль неоднородности.

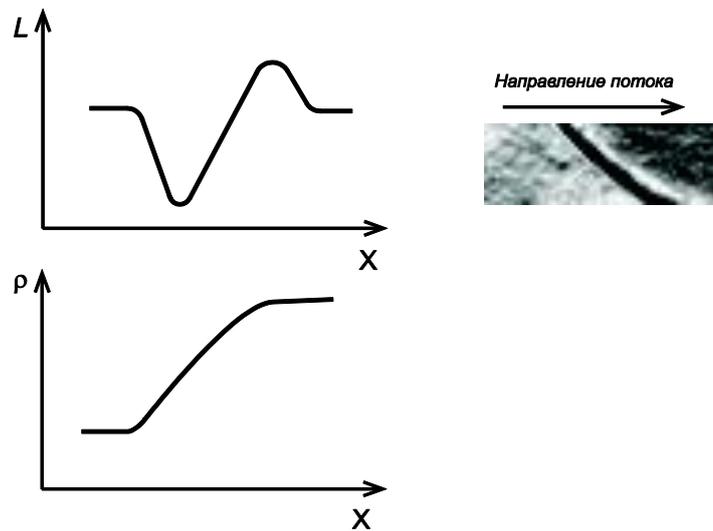
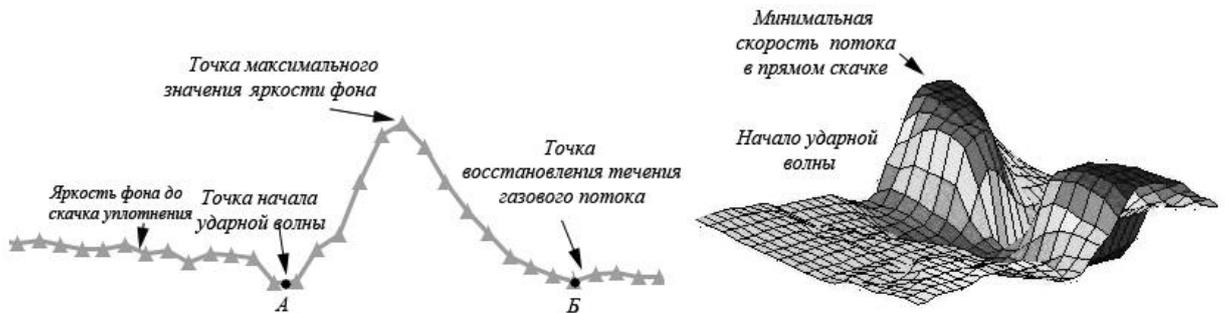


Рис. 1. Схема теневого метода

Теневое изображение ударной волны представляет собой темную полосу со стороны набегающего потока, сменяющуюся яркой светлой полосой, интенсивность которой постепенно уменьшается.

На рис. 4 представлена картина изменения интенсивности (яркости) изображения полученная с применением графического приложения пакета Image Processing Toolbox (IPT) программы Matlab.



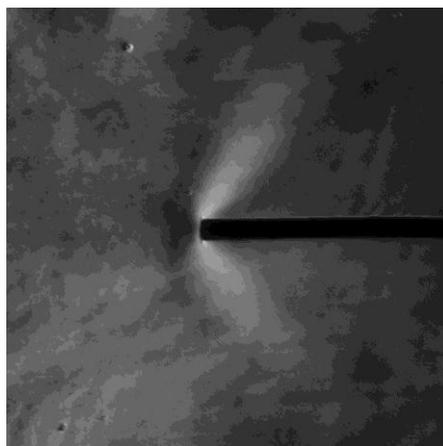


Рис. 2. Характерная кривая интенсивности (яркости) изображения в поперечном сечении ударной волны (а), графическое отображение интенсивности исследуемой области в месте скачка уплотнения (б), исследуемое изображение (в).

При переходе через точку перегиба начала ударной волны (точка А) скачкообразно изменяется  $p$ ,  $\rho$ ,  $T$  потока. Здесь  $p$ ,  $\rho$ ,  $L$  резко изменяют свое значение. При переходе через точку А скорость газа уменьшается ( $w_2 < w_1$ ), но остается сверхзвуковой. Интенсивность ( $L_1 < L_2$ ) возрастает.

Таким образом, при обработке значительного количества экспериментальных данных с заданными эксплуатационными параметрами можно найти пропорциональную зависимость между давлением потока и интенсивностью изображения.

Исследуем более подробно обтекание затупленного тела (рис. 2, в). Здесь в центре, имеется наличие отсоединенного скачка. Форма отсоединенного скачка определяется геометрическим обликом элемента конструкции. Для «тупого» конца  $\theta \geq \theta_{пред}$ , форма имеет место «плоского» отображения.

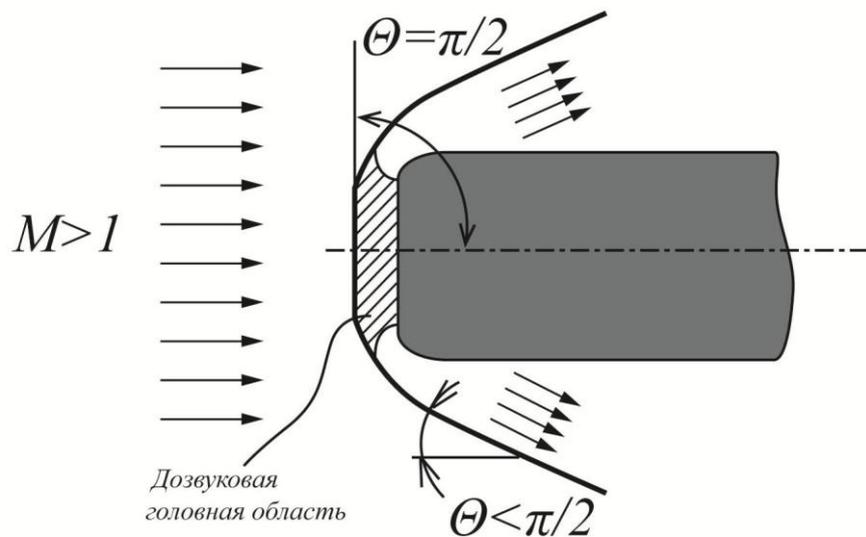


Рис. 3. Форма скачка уплотнения при обтекании затупленного тела

В головной ударной волне контрольная часть является «прямой» скачком, за которым располагается дозвуковая область; а по краям - косые скачки. В косых и прямых скачках энтропия возрастает. Коэффициент восстановления давления убывает с ростом  $M_1 \sin \beta$  вплоть до  $\beta = 90^\circ$  (прямой скачок).

Масштабный коэффициент изображения на фотографии (рис. 2, в) к истинному размеру составляет  $K_m = 1,67$ .

После обработки данного изображения, общая картина отображения интенсивности графического изображения имеет вид, представленный на рис. 4. Массив изображения показан в формате uint8. Интенсивность цифровых изображений задается дискретными числами в диапазоне [0;255]. На практике, интенсивность также может быть представлена в форматах uint16, int16, single или double. Для изображений в формате single или double, значения пикселей находятся

в диапазоне  $[0, 1]$ . Если же изображения представлены в формате uint16, то значения пикселей находятся в диапазоне  $[0, 65535]$  [2].

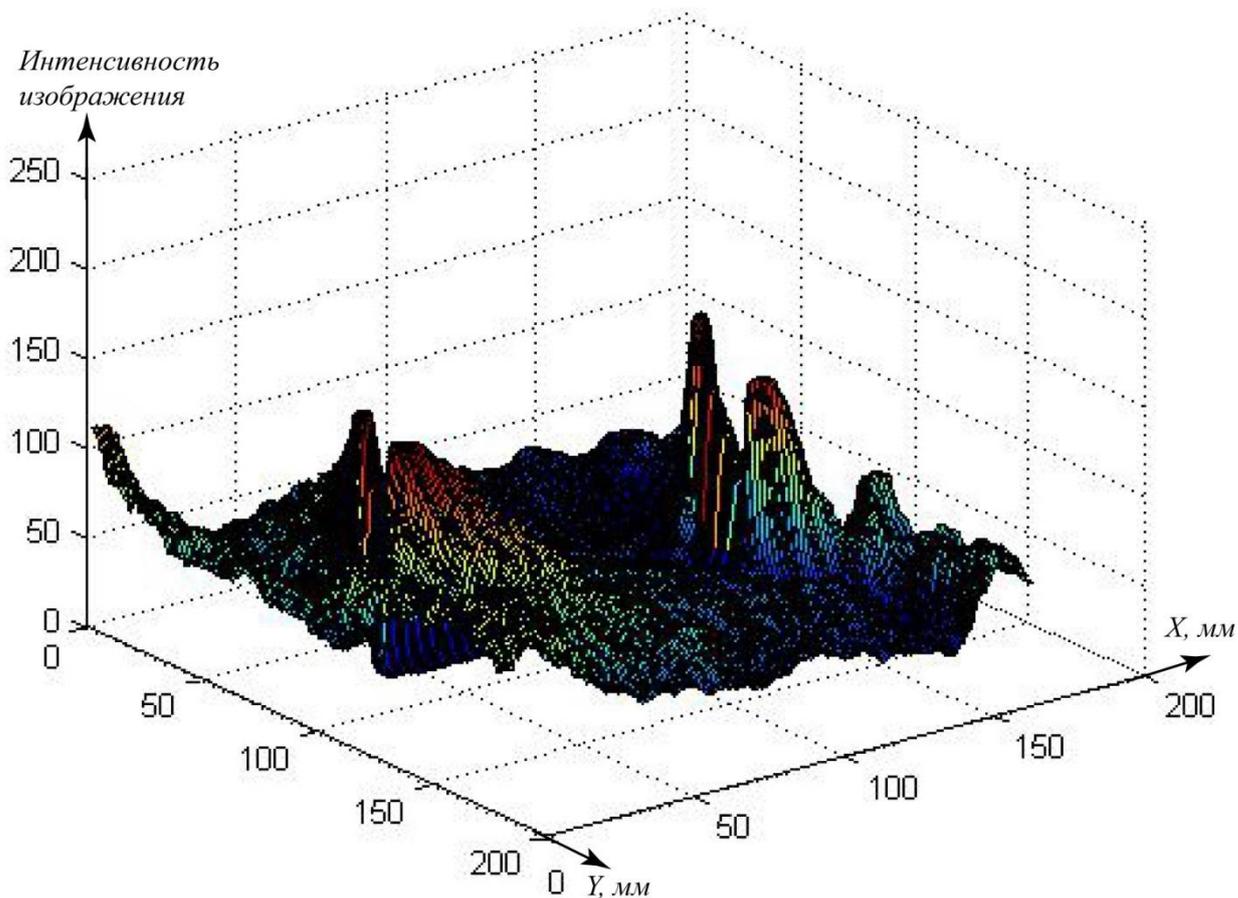


Рис. 4. Отображение интенсивности графического излучения исследуемой области

Более подробно рассмотрим зону отрывного скачка (рис. 5) в районе затупленного конца тела.

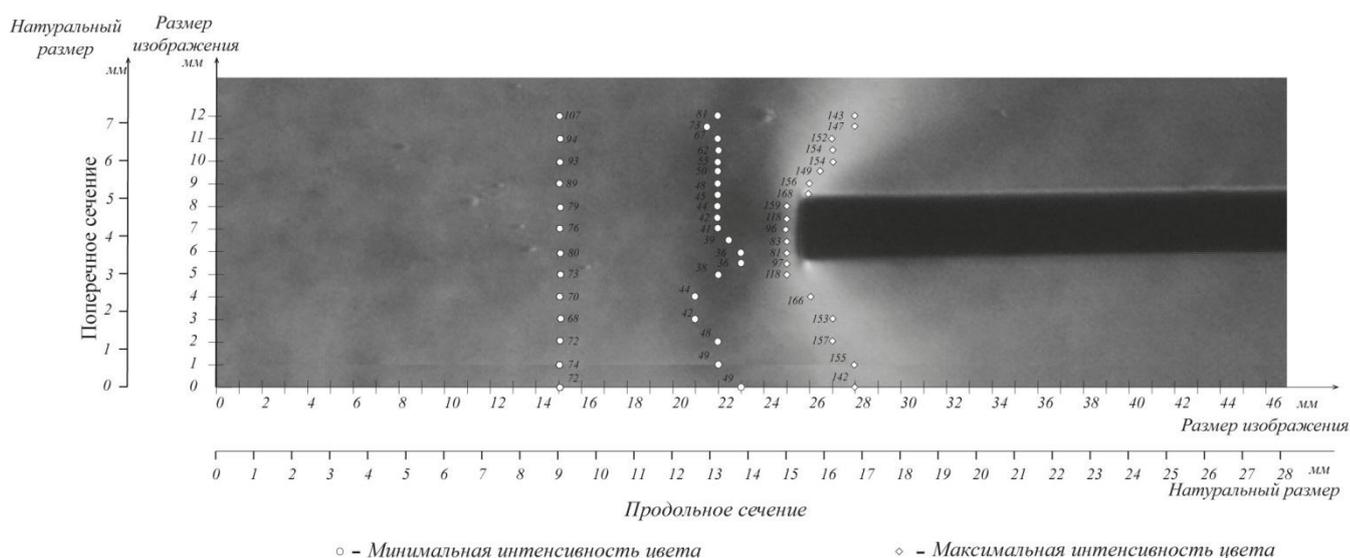


Рис. 5. Исходное изображение отсоединенного скачка уплотнения

В месте соударения скоростного потока с «затупленным» торцом объекта формируется зона дозвукового потока с одинаковыми характеристиками или с «минимальным» значением в центре объекта. Далее ударная волна расходится под некоторым углом к объекту. Специфика любого эксперимента состоит в том, что он проходит в замкнутом пространстве с наличием «неидеальных» зон течения газового потока. Поэтому реальная картина будет несколько искажена.

Как показано на рис. 6, 7, на расстоянии от 0 до 15 мм (в поперечном сечении) продольный профиль интенсивности изображения в кривых по оси  $y$  от 5 до 9,5 мм меняется в диапазоне от  $70 \div 90$ , что соответствует 25% разброса значений. По мере приближения к скачку уплотнения наблюдается уменьшение интенсивности. В минимальной точке на расстоянии  $22 \div 23$  мм разброс достигает от 41 до 50 единиц (18%).

### Интенсивность графического изображения в продольном сечении на различных уровнях по оси y

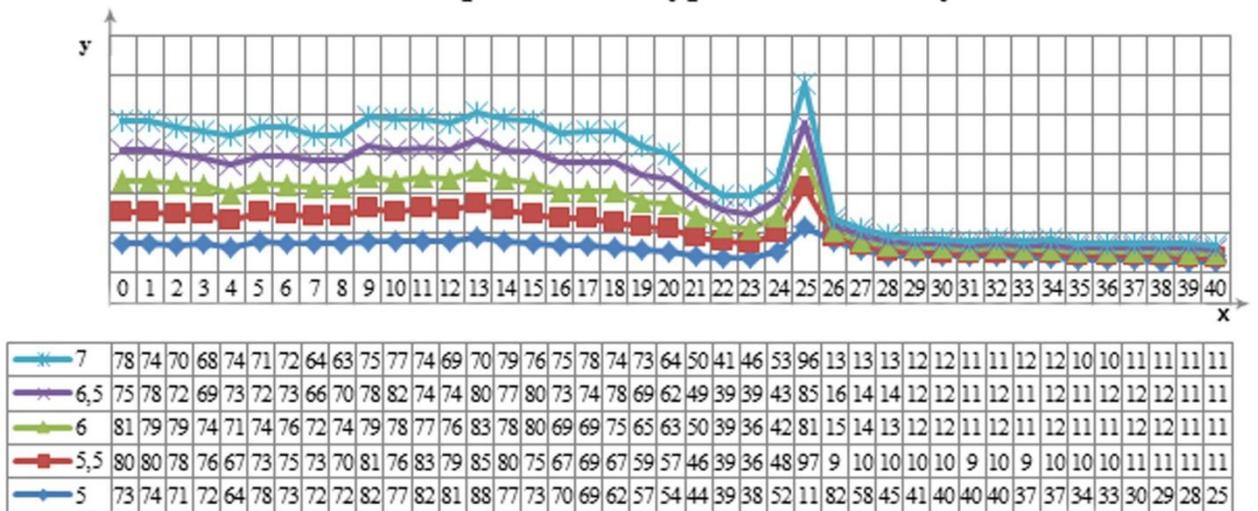


Рис. 6. График изменения интенсивности изображения в продольном направлении на уровнях 5-7 мм в поперечном сечении. В дискретных точках показано изменение интенсивности

### Интенсивность графического изображения в продольном сечении на различных уровнях по оси y

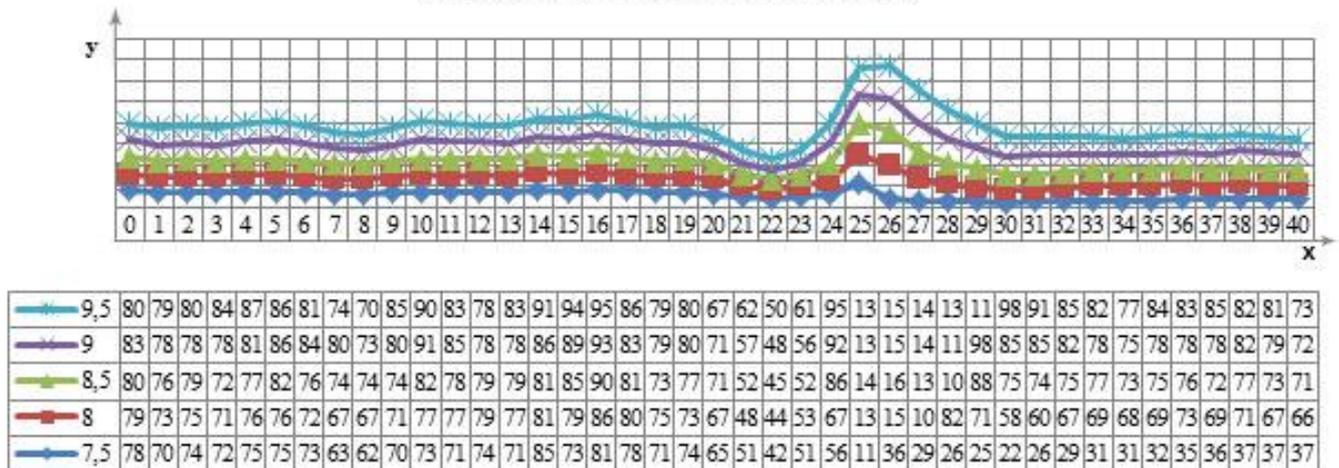


Рис. 7. График изменения интенсивности изображения графического в продольном направлении на диапазоне 7,5-9,5 мм в поперечном сечении

Исходя из предположения о корреляционной зависимости между давлением газового потока и интенсивностью графического изображения (рис. 6, 7), можно считать, что давление в сечениях 8-9,5 мм перед скачком и после него (точка на рис. 2) практически не меняется.

На рис. 8 представлен суммарный график интенсивности графического изображения в областях начала скачка и перегиба (точка б рис. 2). Считаем, что кривая изменения интенсивности (рис. 2, а) имеет аналогичную форму как для прямого и косого скачков (см. рис. 6). Видно, в сечении 6 мм имеется «прогиб» интенсивности изображения, который возрастает практически одинаково. Максимальные значения (160 пунктов) находятся на краях (4 и 8 сечения). Затем оно почти симметрично убывает с увеличением расстояния.

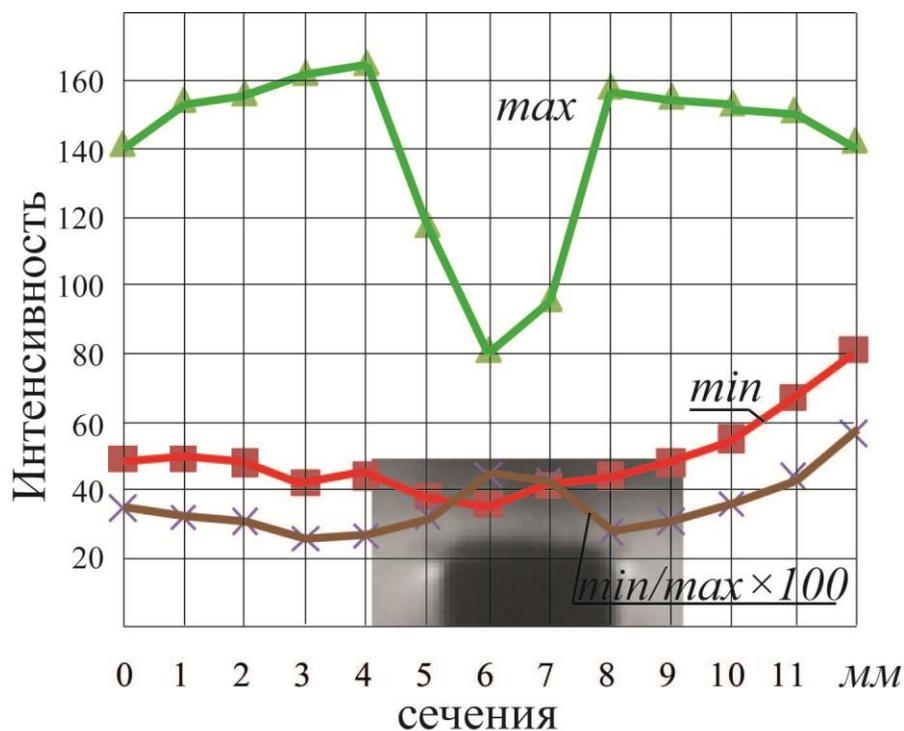


Рис. 8. График изменения интенсивности графического изображения в поперечном сечении

Рассмотрим еще один пример реализации предлагаемой методики для анализа экспериментальной картины обтекания тупого угла. На рис. 9 приведена сегментация участка скачка уплотнения тупого угла. На этом же рисунке представлено трехмерное отображение интенсивности графического изображения.

Обобщенный график изменения интенсивности графического изображения в поперечном сечении, при различных уровнях, по оси  $y$  представлен на рис. 10. Из него следует, что минимальная интенсивность на всех уровнях поперечного сечения приблизительно равна (колеблется в диапазоне 23-33 единиц), что говорит о равномерной скорости и давления в диапазоне 1-10 мм. Максимальное значение интенсивности графического изображения наблюдается в диапазоне 7-9 мм.

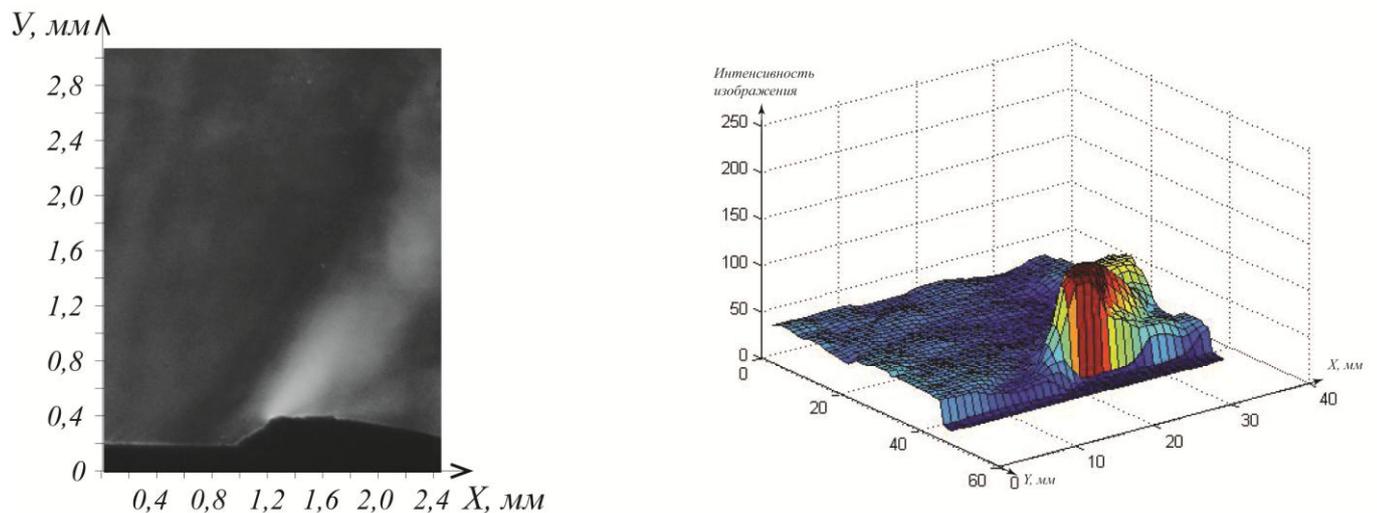


Рис. 9. Графическое отображение интенсивности изображения при обтекании газовым потоком тупого угла

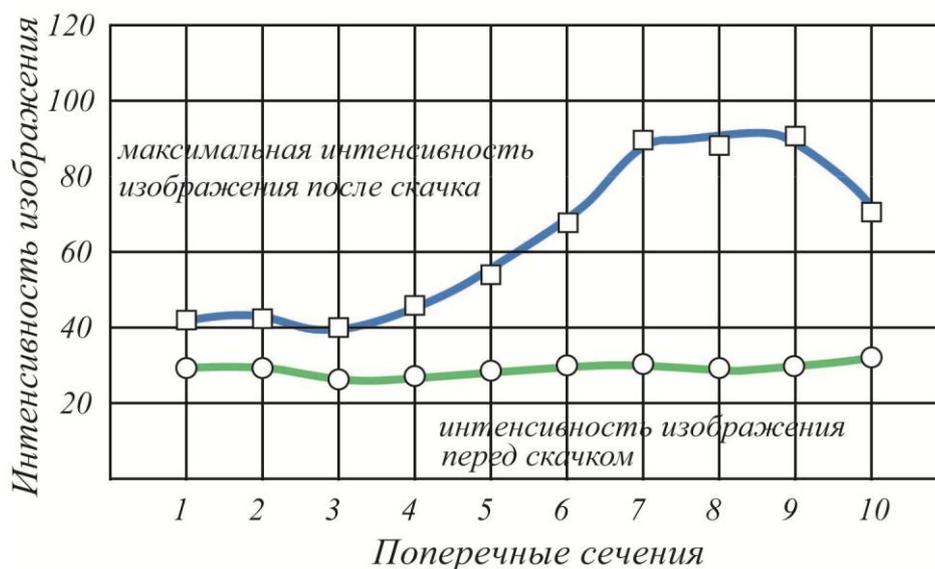


Рис. 10. График изменения интенсивности (яркости) графического изображения в начале скачка и максимального значения яркости после него на различных уровнях поперечного сечения

Проанализируем сверхзвуковое течение газового потока около острой кромки (рис.11).

На расстоянии от 6 до 10 мм по оси  $y$  в диапазоне от 2 мм до 30 мм интенсивность скачкообразно уменьшается от 230 пунктов до 137. Далее интенсивность восстанавливается. Таким образом, увеличение давления характеризуется уменьшением интенсивности графического изображения.

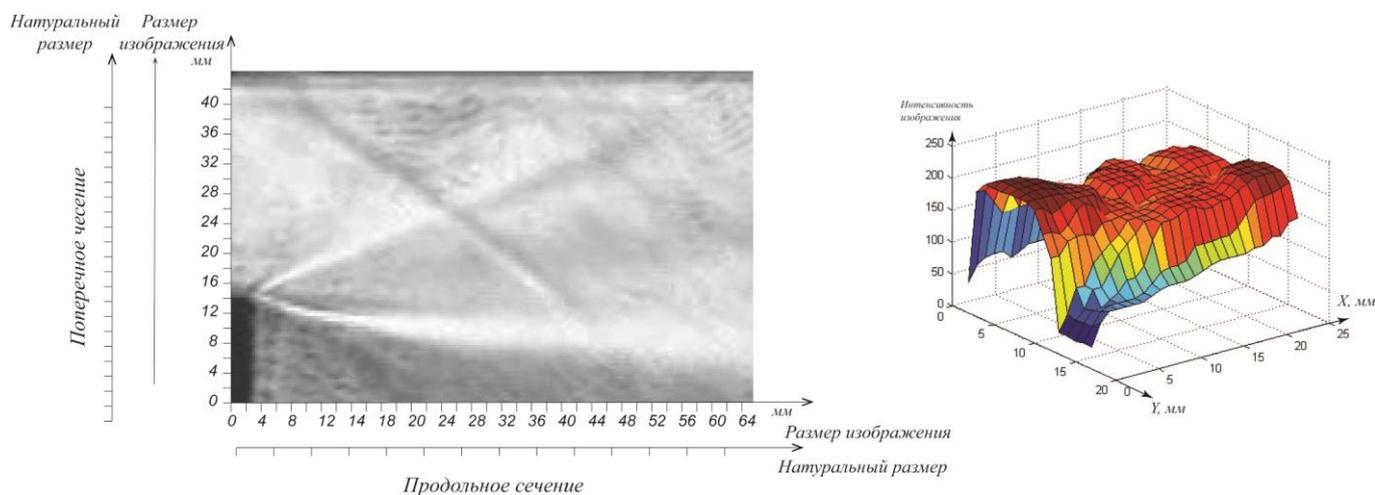


Рис. 11. Графическое отображение интенсивности изображения газового потока при обтекании острого угла

Таким образом, данные исследования позволят в дальнейшем при наличии экспериментальных данных по замеру давления до и после скачка выявить четкую взаимосвязь между интенсивностью изображения в заданной области и давлением с построением соответствующих гистограмм (с заданной доверительной вероятностью, например 0,7).

### **Выводы.**

1. Предложен метод цифровой обработки теневых снимков сверхзвукового обтекания тел различной формы.
2. В качестве критерия анализа изображений предлагается применять параметр - интенсивность изображений.
3. Проведение дополнительных исследований с учетом статистических данных позволит установить численную корреляционную взаимосвязь между интенсивностью изображения и эксплуатационными параметрами газового потока, как для изображений полученных теневым методом, так и шлирен-методом.

### **Библиографический список**

1. Знаменская И.А., Гвоздева Л.Г., Знаменский Н.В. Методы визуализации в механике газа. - М.: МАИ, 2001. - 57 с.

2. Абашев В.М., Бодрышев В.В., Тарасенко О.С. Методика построения трехмерной модели газового потока по его графическому изображению // Тезисы докладов II Международного научного семинара «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы». Кременки, 17-19 февраля 2015. С. 9-10.
3. Журавель И.М. Краткий курс теории обработки изображений. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book2/index.php>
4. Abashev V.M., Prudnikov A.G., Son E.E. Modern research areas of solid hypersonic ramjet engines. Тезисы докладов 29<sup>th</sup> Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. Санкт-Петербург, Сентябрь 7-12, 2014 – с. 2.