

УДК 697.932.6

Экспериментальное измерение распределения диаметров водяных капель в распыле, генерируемом форсункой на основе RU-эффекта

Канд. техн. наук **Рубцов А.К.** a_rubtsov@rambler.ru

Гастев С.А. gastev_s@mail.ru

Университет ИТМО

191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

В статье представлены результаты измерения распределения диаметров водяных капель в распыле, генерируемом форсункой, при представляющих интерес значениях давления подаваемой воды на основе интерференционного метода регистрации Ми-рассеяния лазерного излучения на каплях. Исследования проводились на форсунке с подачей холодной фильтрованной водопроводной воды под давлением. Всего было проведено три эксперимента с давлением 10, 14 и 18 бар. Форсунка располагалась в закрытой емкости с прозрачными стенками с размерами $40 \times 60 \times 120$ см³ (емкость – прямоугольный параллелепипед) примерно в центре внутреннего объема емкости. Необходимость размещения объекта исследований в закрытой емкости обусловлена чувствительностью электронной аппаратуры к влаге. Вне емкости располагались оптические приборы: формирующая лазерный нож оптика и видеокамера с макрообъективом. Максимальная скорость (по модулю) практически не зависит от давления и составляет величину 8,5 м/с на расстоянии 15 см от выходного отверстия форсунки. Это можно объяснить тем, что капля претерпевает сильное сопротивление движению со стороны воздуха в ёмкости. Сила сопротивления Стокса, пропорциональная скорости, быстро тормозит каплю, так что к моменту прихода капли в область визуализации ее скорость резко уменьшается. При увеличении давления от 10 до 18 бар средний диаметр капель распыла форсунки увеличивается с 17,3 до 20 мкм.

Ключевые слова: водяные капли, форсунка, интерференционные картины, поле вектора, сила сопротивления Стокса.

Experimental measurement of the distribution of the diameter of water droplets in the spray generated by the nozzle based on the RU effect

Ph.D. **Rubtsov A.K.** a_rubtsov@rambler.ru

Gastev S.A. gastev_s@mail.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

The paper presents the results of measuring the distribution of the droplet diameters in the nebulization generated by the nozzle at the values of the pressure of the supplied water of interest based on the interference method for recording the MI-scattering of laser radiation on droplets. Studies were carried out on the nozzle with cold filtered tap water supply under pressure. In total, three experiments were carried out with a pressure of 10, 14 and 18 bar. The nozzle was located in a closed container with transparent walls measuring $40 \times 60 \times 120$ cm³ (capacity - rectangular parallelepiped) approximately in the center of the inner volume of the container. The need to locate the object of research in a closed container is due to the sensitivity of electronic equipment to moisture. Outside the container there were optical devices: laser optics forming optics and a video camera with a macro lens. The maximum speed (modulo) is practically independent of the pressure and is 8.5 m/s at a distance of 15 cm from the nozzle outlet. This can be explained by the fact that the drop undergoes strong resistance to movement from the air side in the tank. The Stokes resistance force, proportional to the speed, quickly brakes the drop, so that by the time the droplet arrives in the imaging area, its speed decreases dramatically. With an increase in pressure from 10 to 18 bar, the average diameter of the spray nozzles of the nozzle increases from 17.3 to 20 μ m.

Keywords: water droplets, nozzle, interference patterns, vector field, Stokes drag force.

Потребность в увлажнении воздуха диктуется как по санитарно-гигиеническим соображениям в зонах нахождения людей (сухой воздух крайнего севера, корабли и суда, в том числе рыболовецкие) так и технологиями галерей и музеев, производства гигроскопических материалов и т.д.

Введение

В продолжение исследования увлажнения воздуха форсункой на основе RU-эффекта, возникла необходимость измерения распределения диаметров водяных капель в распыле.

Целью данной работы являлось экспериментальное измерение распределения диаметров водяных капель в распыле, генерируемом форсункой, при представляющих интерес значениях давления подаваемой воды.

В качестве метода исследования выступал интерференционный метод регистрации Ми-рассеяния лазерного излучения на каплях (IMI, Interferometric Mie Imaging).

Проведение эксперимента. Схема измерений

Схема измерений распределения диаметров водяных капель в распыле, генерируемом форсункой представлена на рис. 1.

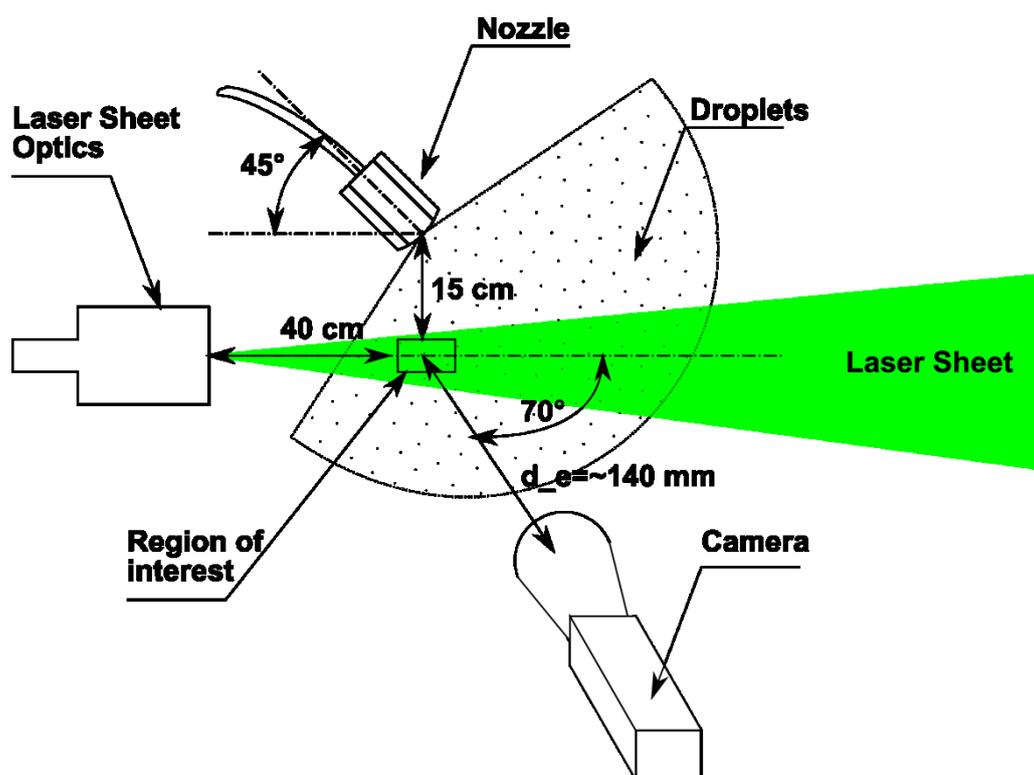


Рис. 1. Схема измерений

Форсунка располагалась в закрытой емкости с прозрачными стенками с размерами $40 \times 60 \times 120$ см³ (емкость – прямоугольный параллелепипед) примерно в центре внутреннего объема емкости. Необходимость размещения объекта исследований в закрытой емкости обусловлена чувствительностью электронной аппаратуры к влаге. Вне емкости располагались оптические приборы: формирующая лазерный нож оптика и видеокамера с макрообъективом. Форсунка размещалась так, что ее ось симметрии была параллельна плоскости лазерного ножа, а также была наклонена к горизонтальной плоскости (плоскость дна емкости) на угол 45 градусов. Выходное отверстие форсунки представляет собой прямоугольник со сторонами примерно 1×3 мм. В эксперименте наибольшая сторона выходного отверстия была параллельна вертикальной плоскости. В такой конфигурации, с одной стороны, область визуализации припадает на основной объем капель распыла, с другой – негативное влияние «загрязнения» стенок емкости (см. ниже) выражено в наименьшей степени. Плоскость лазерного ножа была параллельна двум наиболее длинным сторонам емкости и проходила через распыл, на каплях которого происходило рассеяние лазерного излучения. Это рассеяние регистрировалось с помощью видеокамеры двойной экспозиции. Двойная экспозиция видеокамеры и двойной лазерный импульс позволяют определить три компоненты вектора скорости отдельных капель, распознанных одновременно и на первом, и на втором кадре. В работе опытным путем была подобрана задержка между импульсами лазера, и она составляет величину 50 мкс. Всего регистрировалось при заданной величине давления 170 пар цифровых фотографий. Это количество определяется объемом памяти видеокамеры. Съемка проводилась с максимально возможной частотой

10 Гц, что позволяло уменьшить время эксперимента и, таким образом, уменьшить степень загрязнения стенок емкости.

Видеокамера снабжена объективом с фокусным расстоянием 100 мм, позволяющим получать фотографии с увеличением величиной до единицы, при этом рабочее расстояние (расстояние от объекта съемки до объектива) составляет величину от 20 до 10 см. Ось объектива была параллельна горизонтальной плоскости, а угол между осью и плоскостью лазерного ножа составлял 70 градусов – оптимальный угол для измерения методом ИМ [1]. Видимая камерой область располагалась на расстоянии 15 см ниже от выходного отверстия форсунки. Использовалась видеокамера с матрицей разрешением 1600×1200 пикселей с размером пикселя 7,4 мкм.

Перед внешней линзой объектива располагалась прямоугольная апертура с шириной отверстия 20 мм и высотой 5 мм. В эксперименте увеличение объектива составляло 1, а расстояние от объекта до прямоугольной апертуры объектива – 145 мм. Перед экспериментом проводилась калибровка видеокамеры с помощью фотографирования изображения жидкокристаллической матрицы с диагональю 1,5 дюйма и разрешением 128×128 пикселей (рис. 2).

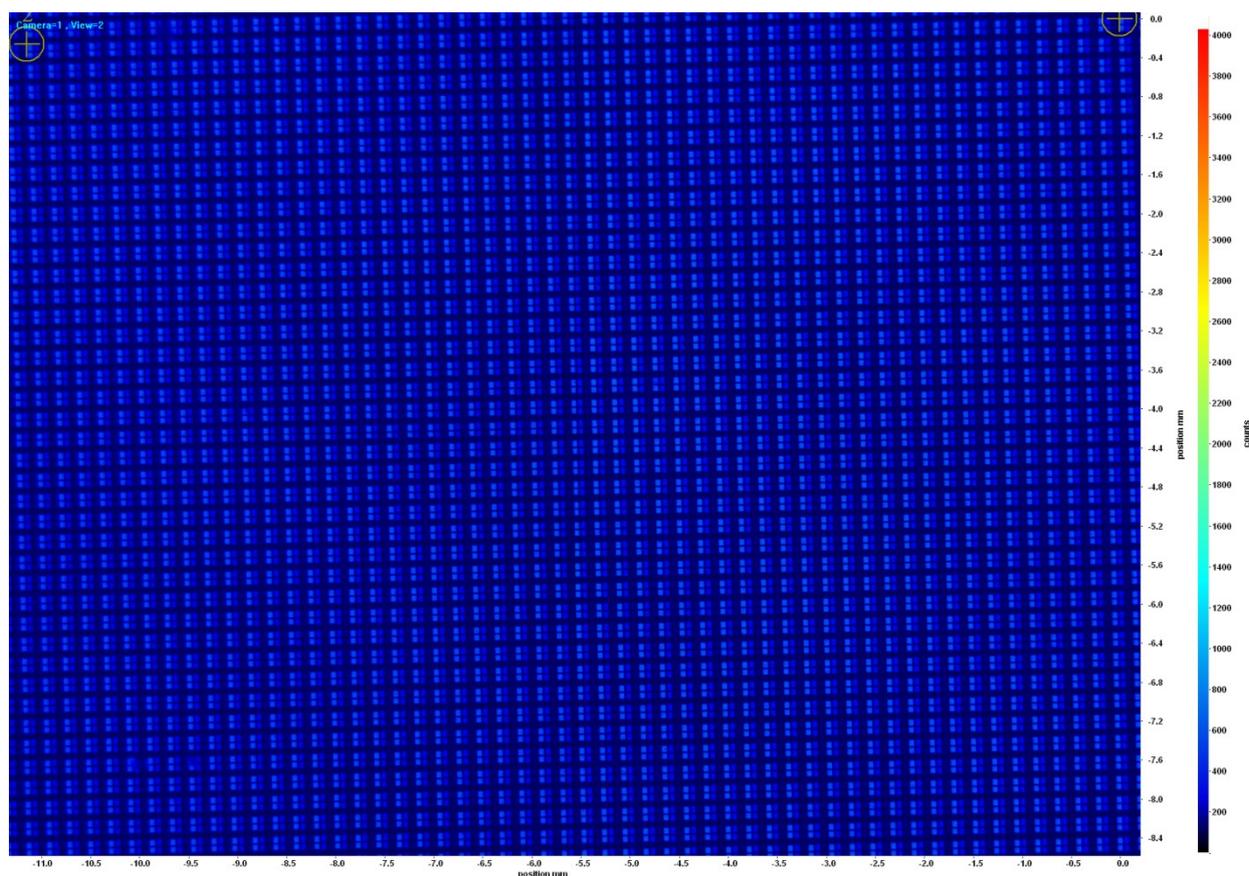


Рис. 2. Фотография жидкокристаллической матрицы

Формирование лазерного ножа осуществлялось с помощью специальной оптики [2], позволяющей создавать тонкий лазерный нож. В эксперименте применялась конфигурация формирующей оптики такая, что место фокусировки ножа находилось на расстоянии 40 см, а толщина в области визуализации была около 300 мкм [2]. Между лазером и формирующей оптикой располагалась вращаемая оптическая пластина, позволяющая вращать плоскость поляризации лазерного излучения. Перед измерением проводилась настройка пластины на угол, при котором контрастность интерферометрических полос была максимальна.

В такой конфигурации оптических частей системы (а именно, тонкий нож и прямоугольная апертура) удается проведение измерения с относительно высокой концентрацией капель. В представленном случае мы имеем дело как раз с очень высокой концентрацией капель. Дело в том, что при высокой концентрации видеокамера регистрирует фотографию с перекрывающимися изображениями капель, что приводит к потере части информации о каплях, поскольку перекрытые изображения не могут быть распознаны программой.

Следует отметить основные факторы, влияющие на качество измерений. Одним из главных является фактор «загрязнения» прозрачных стенок емкости водой. В течение времени работы форсунки на стенках скапливаются капли воды. Это приводит к тому, что, с одной стороны, рассеянное на каплях лазерное излучение попадает в объектив, пройдя дополнительный оптический путь, а также дополнительно преломившись. Кроме того, если в месте ввода лазерного ножа также присутствует подобное загрязнение, то световая когерентная

волна, генерируемая лазером, перестает быть плоской – а это необходимое условие для получения интерференционной картины. Если условие не выполняется, то видеокамера регистрирует размытые изображения капель распыла, то есть происходит драматическое падение контрастности интерференционных полос (то есть, фактически резко падает соотношение сигнал/шум). Для уменьшения негативного влияния явления «загрязнения» были предприняты следующие меры. Во-первых, форсунка располагалась в центре емкости (то есть, на максимально доступном расстоянии от прозрачных стенок емкости). Во-вторых, измерения происходили на максимально возможной частоте, чтобы уменьшить время, в течение которого такие «загрязнение» могло бы происходить. В-третьих, непосредственно перед запуском измерений производилась очистка внутренней поверхности емкости в местах, где располагается объектив и оптика, формирующая лазерный нож.

Обработка полученных интерференционных картин

Обработка полученных фотографий проводилась в программе Da Vis (La Vision) версии 7.2.2 подключенным модулем IMI. Прямое распознавание цифровых изображений – весьма ресурсоемкий процесс, поэтому в программе реализован подход, основанный на Фурье-преобразовании изображения. Процесс «распознавания» (то есть определения частоты следования интерференционных полос) происходит автоматически, но для его корректной работы необходимо задать подходящие параметры. Эти параметры можно разделить на два класса: параметры Фурье-преобразования (контрастность, окно и его смещение в пикселях, интенсивность фонового излучения и т.д.) и параметры экспериментальной установки (физические – показатель преломления, геометрические – угол обзора, размеры апертуры). При обработке, где было возможно, использовались параметры, рекомендуемые разработчиками системы, поскольку настройка этой системы также проводилась согласно их рекомендациям. На рис. 3 представлены основные параметры обработки [1].

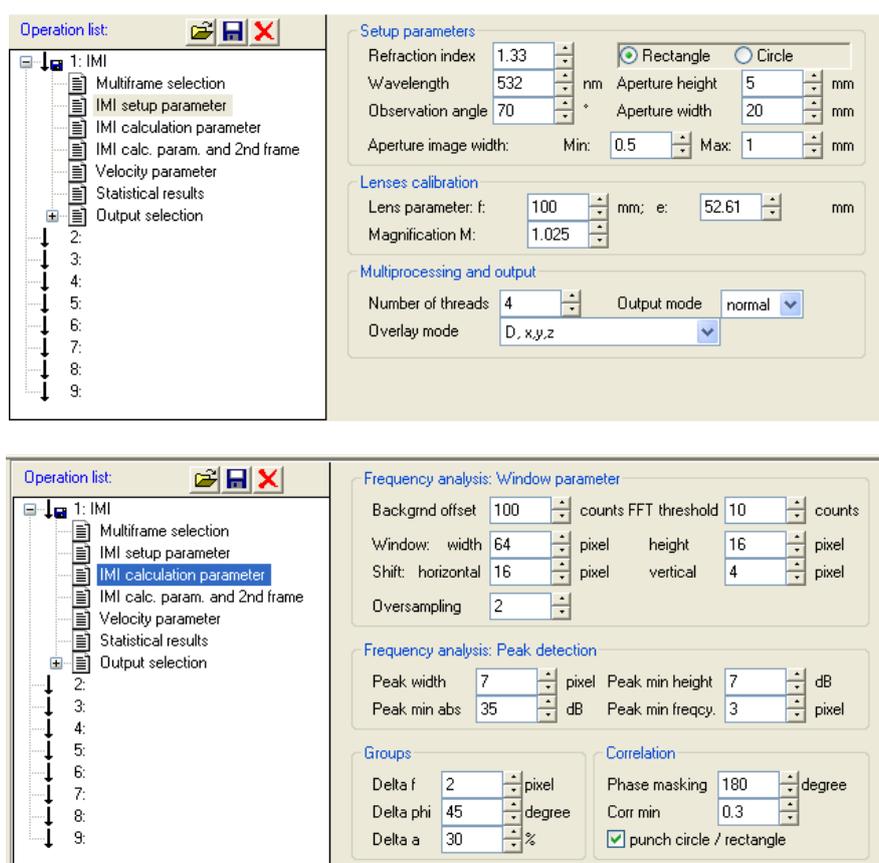


Рис. 3. Основные параметры
(физические и геометрические – слева, параметры распознавания – справа)

На рис. 4 представлена характерная фотография распознанного изображения, на котором программа автоматически нанесла контуры интерференционного изображения капли, а также рассчитанные данные об этой капле.

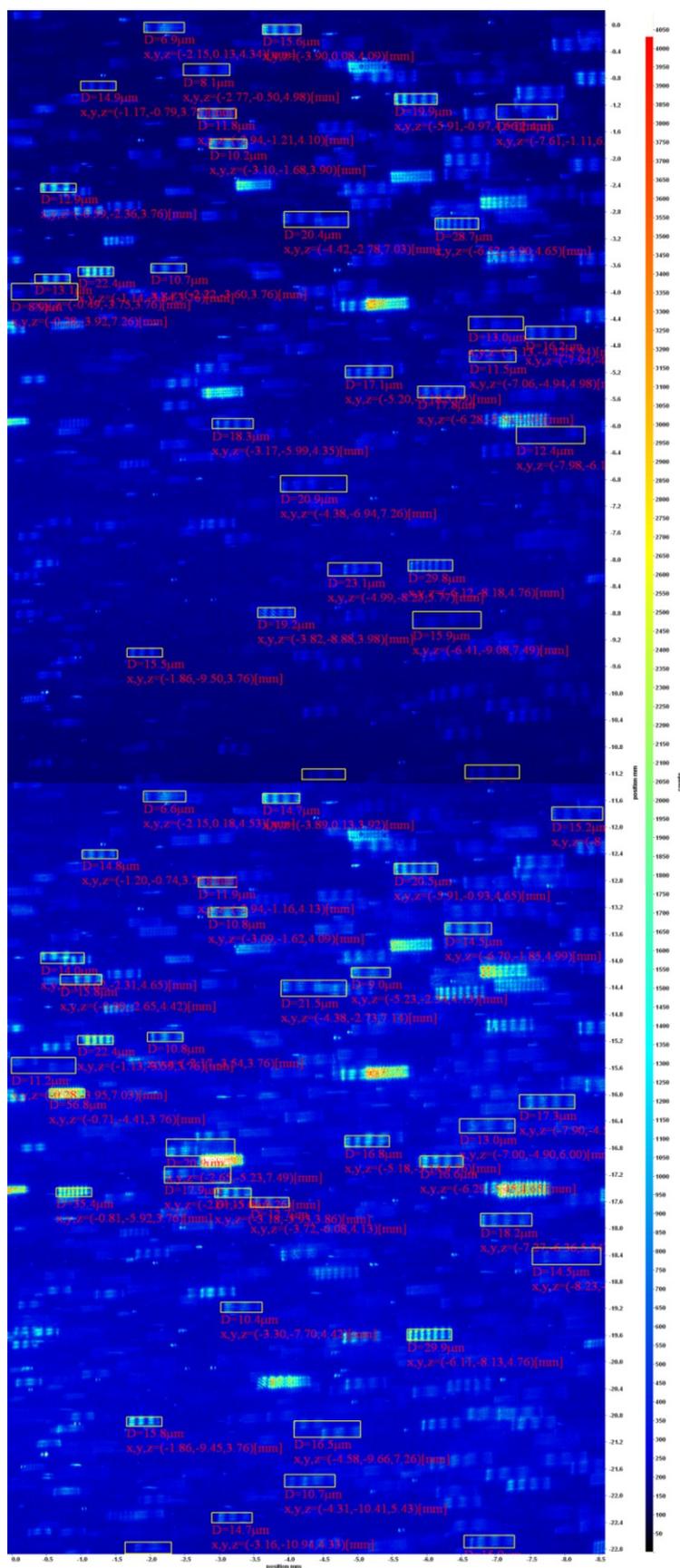


Рис. 4. Характерная фотография (двойная) интерференционных изображений капель после распознавания

Как видно из представленной фотографии, на ней программа определила несколько десятков капель. Несмотря на небольшое количество этих фотографий (170) ансамбль капель состоит в итоге из нескольких тысяч капель. Это позволяет построить распределение капель по диаметру, а также вычислить некоторые другие статистические данные:

$$D10 = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} p_i}{\sum_{i=1}^{N-1} p_i} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} p_i}{N}, \quad D32 = \frac{\sum_{i=1}^N D_i^3}{\sum_{i=1}^N D_i^2},$$

DVX (где «X» = «10», «50» или «90»),

где $D10$ – средний диаметр капель, N – количество найденных на 170 фотографиях капель, D_i – диаметр капли, p_i – условная частота встречаемости капли с диаметром D_i (на гистограмме диаметров), $D32$ – величина, характеризующий распыл в целом, связанная с отношением среднего объема капли к ее площади (важно при исследованиях испарений капель), DVX – величина диаметра капель такая, что в каплях распыла с диаметрами менее DVX содержится X% всего распыла. Например, если $DV90 = 60$ мкм, то это означает, что 90 % всего объема воды распыла содержится в каплях, диаметр которых менее 60 мкм.

Результаты исследований

Исследования проводились с предоставленной форсункой с подачей холодной фильтрованной водопроводной воды под давлением. Всего было проведено три эксперимента с давлением 10, 14 и 18 бар. На рис. 5, 6, 7 представлены гистограммы распределения капель по диаметру для указанных величин давления соответственно.

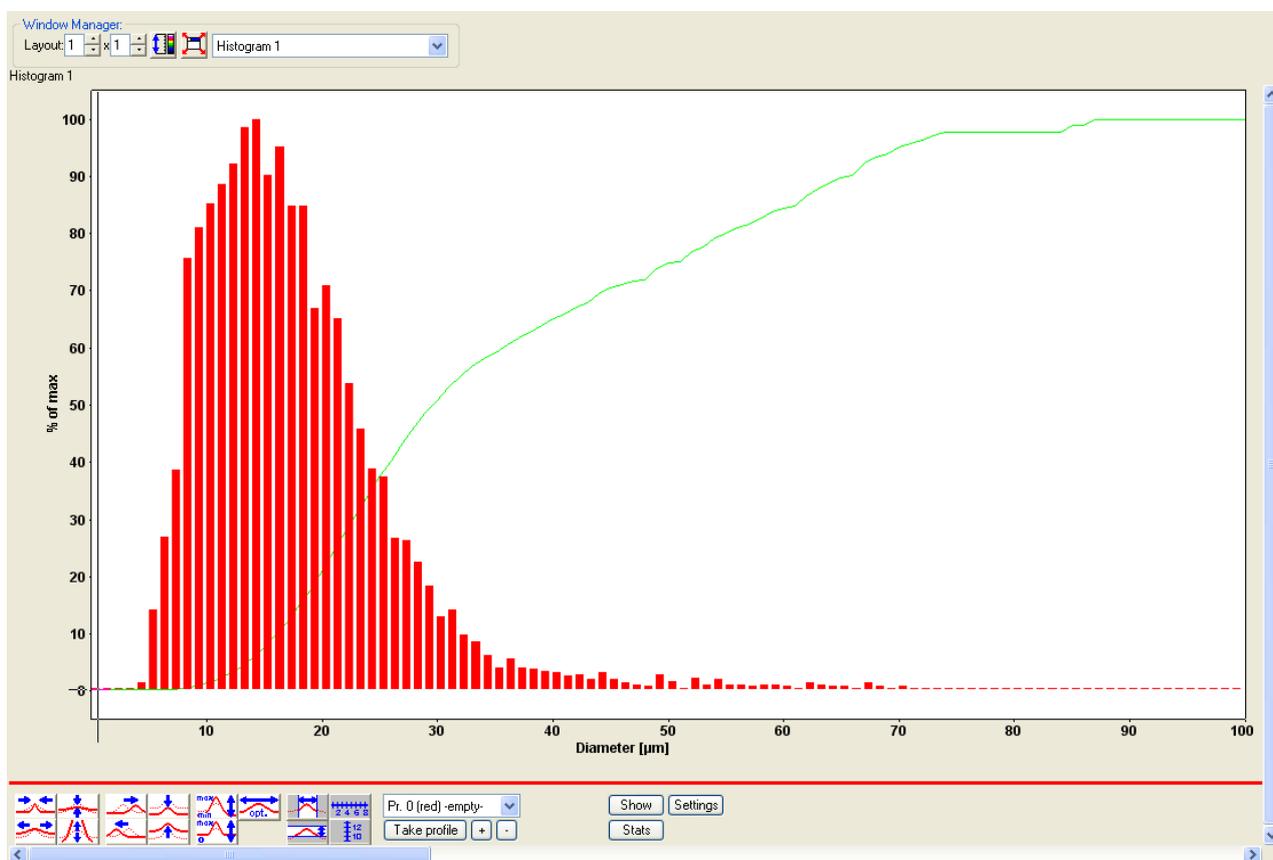


Рис. 5. Гистограмма распределения диаметра капель при давлении 10 бар

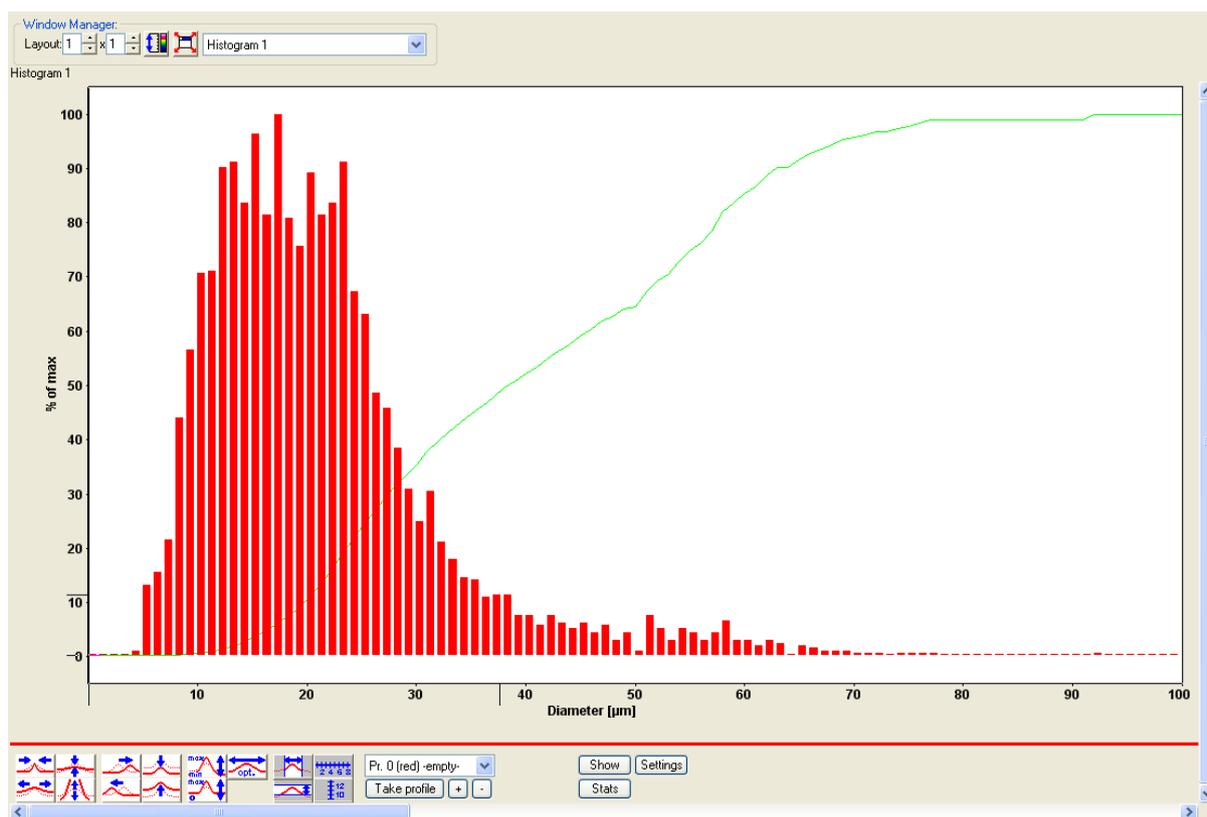


Рис. 6. Гистограмма распределения диаметра капель при давлении 14 бар

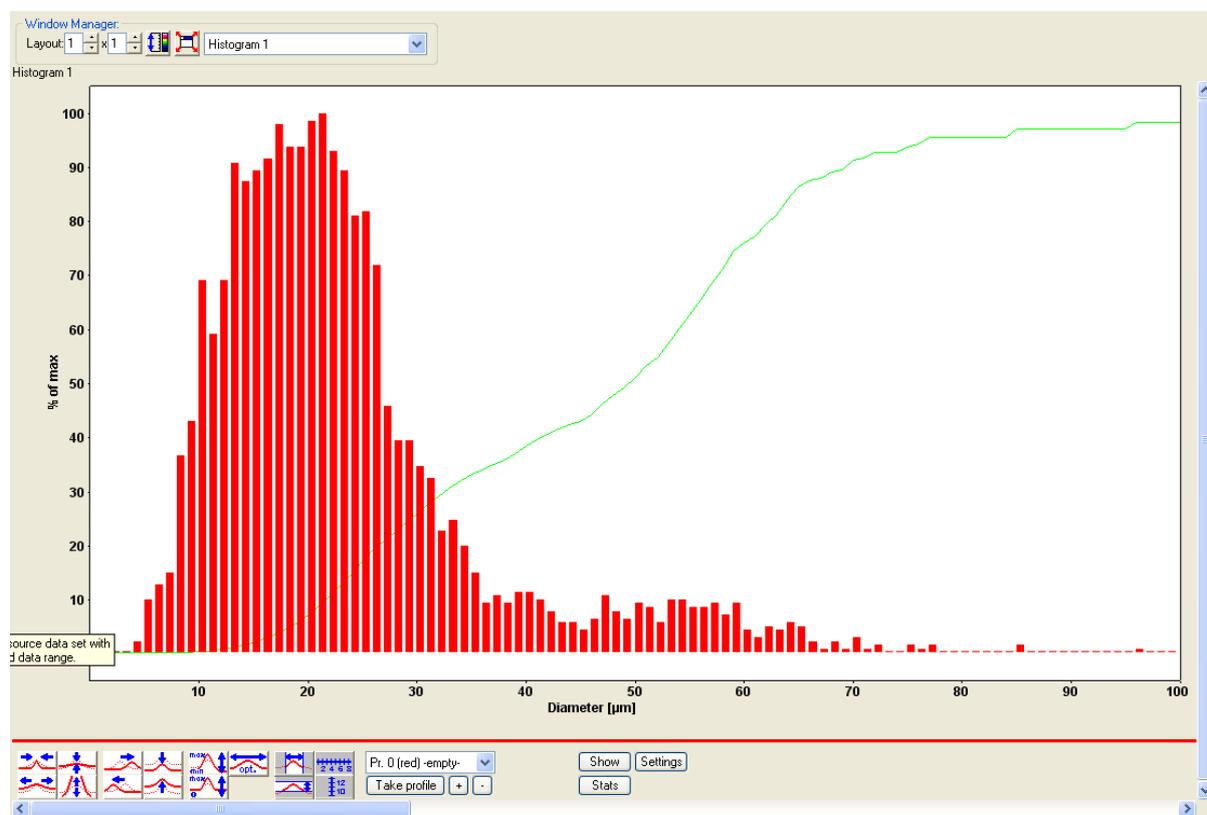


Рис. 7. Гистограмма распределения диаметра капель при давлении 18 бар

На представленных гистограммах присутствует кривая (зеленый цвет) зависимости удельного объема жидкости (воды) от диаметра капель, полученная интегрированием гистограммы.

Кроме гистограмм проводится расчет статистических данных. Эти данные представлены в табл. 1.

Таблица 1

Статистические данные по распылу при различном давлении

| Давление, бар | <i>N</i> | <i>D</i> 10 мкм | <i>D</i> 32 мкм | <i>DV</i> 10 мкм | <i>DV</i> 50 мкм | <i>DV</i> 90 мкм |
|---------------|----------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| 10 | 5500 | 17.3 | 27.9 | 16.1 | 29.6 | 65.6 |
| 14 | 4100 | 20.9 | 33.4 | 19.8 | 38.4 | 62.9 |
| 18 | 3000 | 23.0 | 38.4 | 21.7 | 49.5 | 69.3 |

Видно, что при увеличении давления происходит увеличение среднего диаметра капель. Эффект уменьшения количества распознанных изображений капель может быть связан с тем, что при большем давлении растет расход воды (за счет увеличения скорости производства капель), часть объема которой «загрязняет» стенки емкости. Кроме того, большая плотность капель приводит к более сильному перекрытию изображений, что также ведет к ухудшению результата распознавания.

Кроме статистики, система позволяет измерять три компонента вектора скорости, а программа их рассчитывает. На рис. 8, 9, 10 представлены поля вектора скорости для частиц, попавших в плоскость лазерного ножа.

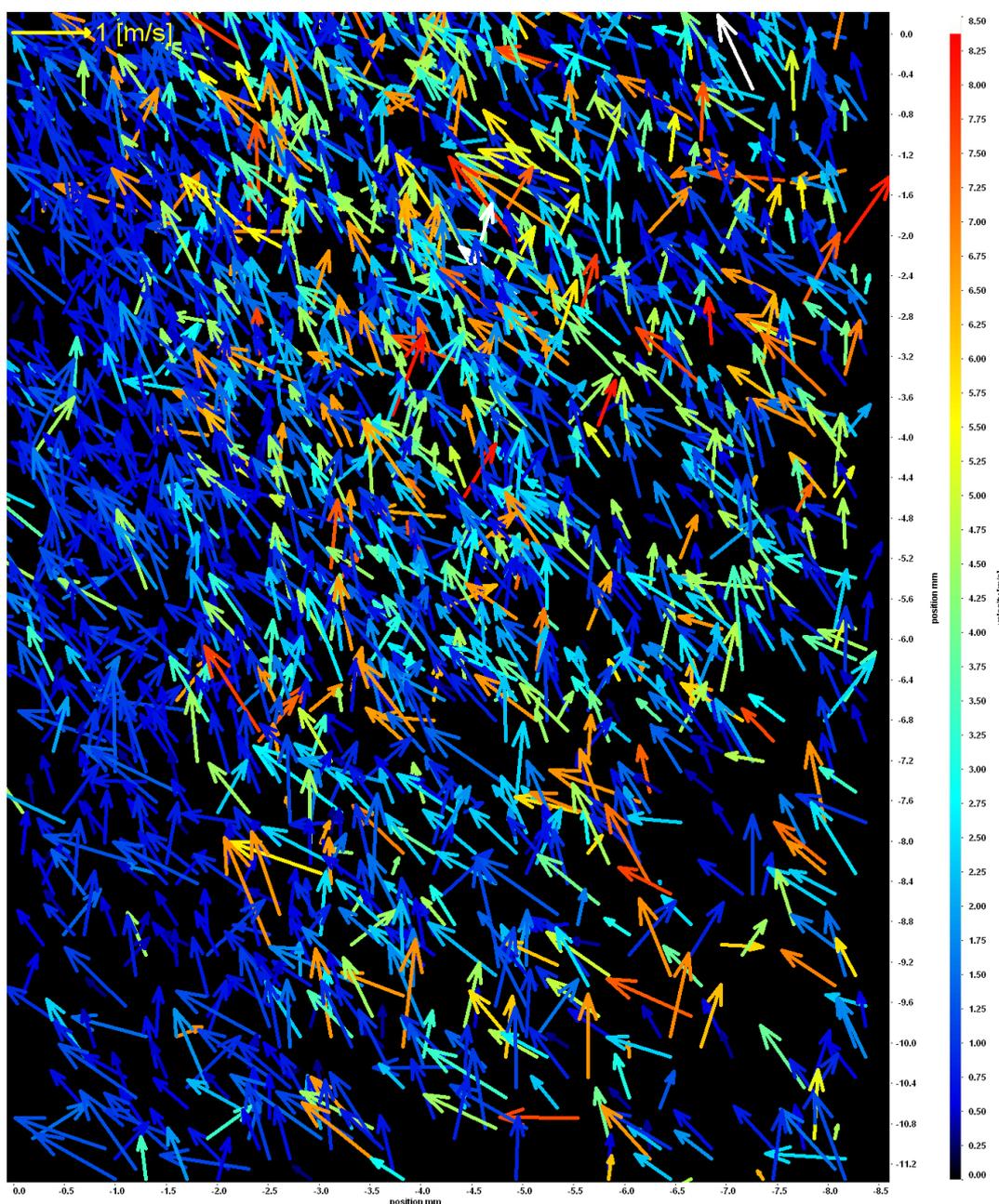


Рис. 8. Поле вектора скорости капель при давлении воды 10 бар

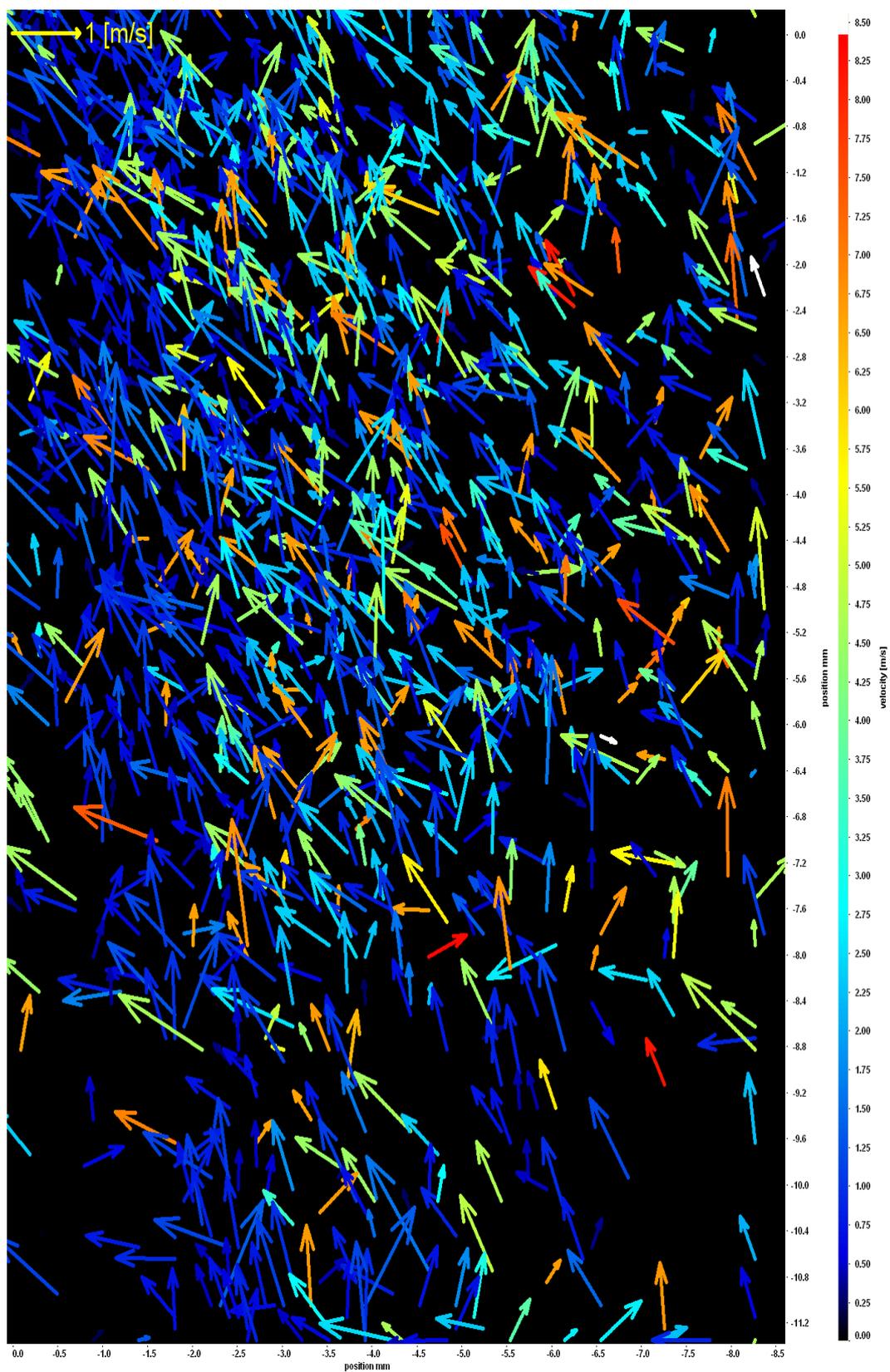


Рис. 9. Поле вектора скорости капель при давлении воды 14 бар

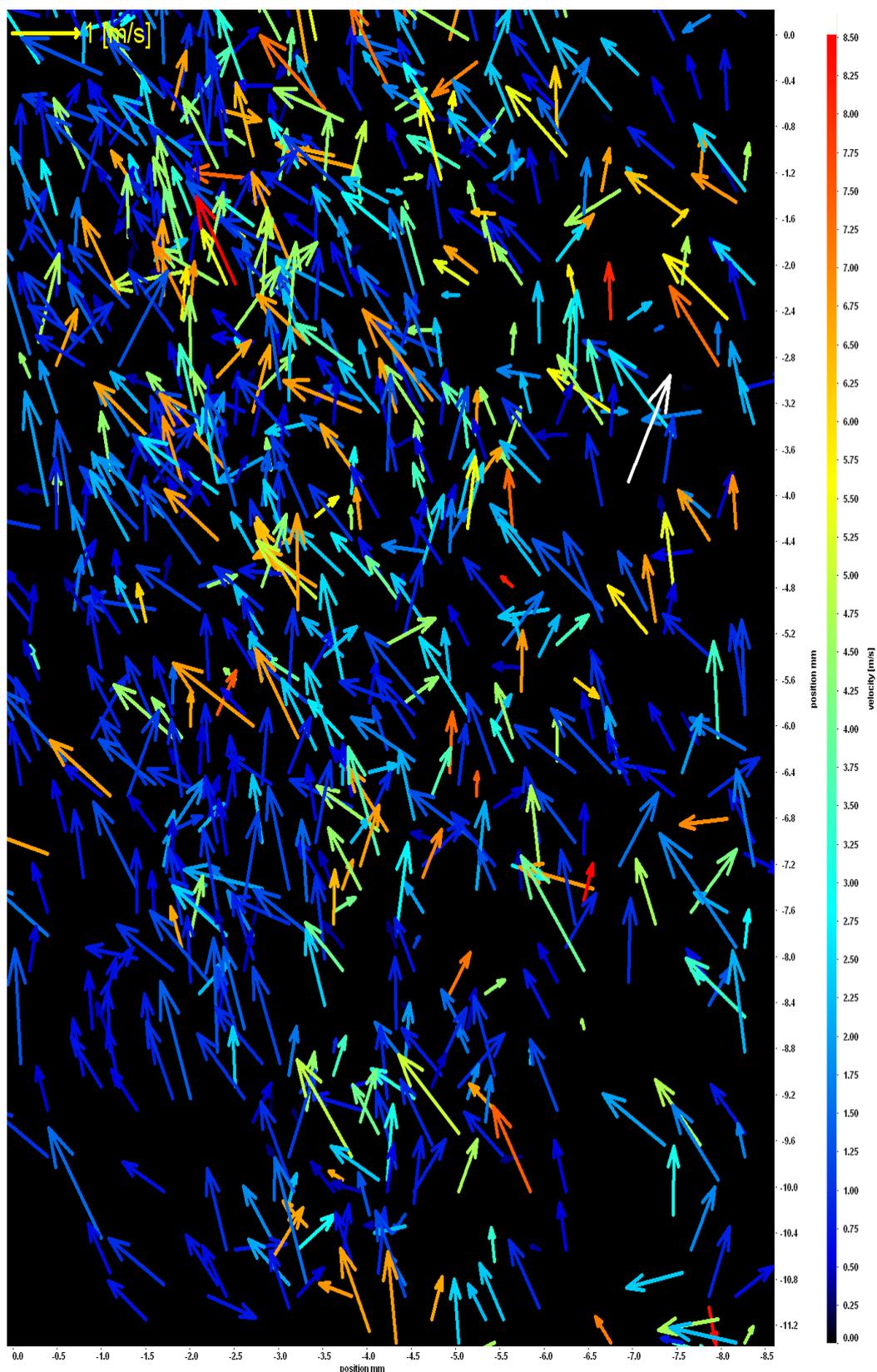


Рис. 10. Поле вектора скорости капель при давлении воды 18 бар

Представленные векторы поля скорости в основном направлены вверх, но реальное направление вектора скорости капель – горизонтально влево. Это связано с повернутым положением видеокамеры, когда меньшая сторона матрицы видеокамеры ориентирована горизонтально (то есть повернута на 90 градусов). Такой поворот позволяет уменьшить негативный эффект разного размера изображений капель в разных частях фотографии из-за 70-градусного угла съемки. Следует также обратить внимание на то, что на рисунках с полями вектора скорости присутствует референсный вектор длиной 1 м/с (желтый цвет). На рисунках есть вектора, цвет которых желтый,

но длина, которых заметно меньше длины референсного вектора. Это не противоречие, а это следствие того, что вектор наклонен к плоскости рисунка (то есть z-компонента вектора скорости ненулевая).

Видно, что максимальная скорость (по модулю) практически не зависит от давления и составляет величину 8,5 м/с на расстоянии 15 см от выходного отверстия форсунки. Это можно объяснить тем, что капля претерпевает сильное сопротивление движению со стороны воздуха в емкости. Сила сопротивления Стокса, пропорциональная скорости, быстро тормозит каплю, так что к моменту прихода капли в область визуализации ее скорость резко уменьшается.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод:

1. При увеличении давления от 10 до 18 бар средний диаметр капель распыла форсунки увеличивается с 17.3 до 20 мкм.

2. Максимальная скорость капель на расстоянии 15 см от выходного отверстия форсунки практически не зависит от давления воды.

Литература

1. La Vision Particle Master IMI. Product Manual. <http://lavision.de/en/products/particlemaster.php>
2. La Vision Sheet Optics Thin. Product Manual. <http://www.lavision.de/en/techniques/piv.php>
3. Форсунка: пат. 2299769 Рос. Федерация: МПК В 05 В 1/02/ С.И. Бурцев, А.К. Рубцов; заявитель и патентообладатель закрытое акционерное общество «Бюро техники кондиционирования и охлаждения» – № 2005133418/12; заявл. 19.10.2005; опубл. 27.05.2007, Бюл. № 15 – 5 с.
4. *Пажи Д.Г.* Основы техники распыливание жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. –Издательство «Химия», 1984. – 12 с.