

УДК 532.52

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВА В ОБЛАКЕ ФРАГМЕНТОВ ПОСРЕДСТВОМ ФРАГМЕНТАЦИИ КАПЛИ НА СЕТОЧНОЙ ПРЕГРАДЕ\*

Шумихин Т.А., Пыриков М.Д.

*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия*

### АННОТАЦИЯ

Ранее экспериментально было показано, что высокоскоростное пробивание тонких стальных сеток алюминиевыми ударниками может сопровождаться образованием выбросов кумулятивного типа, вызванного движением материала ударника в стесненных условиях сквозь ячейки сетки. Интенсивность и скорость выбросов, их пространственное распределение зависят от геометрических параметров сетки и точки попадания ударника. В данной работе с помощью серии экспериментов с каплями воды, падающими на недеформируемую сетку, выполнены оценки распределения вещества капли между выбросами, образующимися по аналогичному принципу. Оценки чисел Вебера, которые характеризуют гидродинамические особенности взаимодействия жидкого или пластического ударника с преградой, сделанные для алюминия и воды, близки по значению, что позволяет использовать эксперименты с водой для моделирования процессов, протекающих в упомянутых выше высокоскоростных экспериментах. Важно отметить, что в отличие от высокоскоростных экспериментов модельные эксперименты с водой дают возможность изучать эти процессы *in-situ*. Для этой цели использовалось оборудование для высокоскоростной съемки, а распределение вещества между выбросами оценивалось по площади пятен, образуемых на фильтровальной бумаге фрагментами вещества капли с примесью красителей. Высокоскоростная съемка позволила оценить скорости выбросов, которые оказались выше, чем скорость капли перед столкновением. Подобный же результат был получен ранее в численных расчетах и в экспериментах для случая высокоскоростной фрагментации алюминиевого ударника. Также показано, что при фрагментации капли различие в интенсивности струй существенно сглаживается за счет перераспределения вещества между струями по сравнению с ситуацией квазистатического продавливания капли сквозь ячейки сетки. Сделана классификация распределения вещества между выбросами в зависимости от близости точки попадания к одному из центров симметрии ячейки сетки.

**Ключевые слова:** удар капли; высокоскоростная съемка; сеточная преграда; фрагментация

## THE DISTRIBUTION OF MATERIALS IN A CLOUD OF FRAGMENTS AT THE FRAGMENTATION OF A DROP ON A MESH BUMPER

Shumikhin T.A., Pyrikov M.D.

*Institute of Applied Mechanics of Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

---

\* Работа выполнена в рамках государственного задания ИПРИМ РАН (номер гос.регистрации ААА-А17-117032010145-5).

## ABSTRACT

As it was shown in the previous works the high-velocity perforation of thin steel meshes by aluminum projectile can give rise to cumulative jets generated by the restrained flow of the projectile material through the mesh cells. The intensity and velocity of jets and their spatial distribution depend on the geometry of meshes and on the location of an impact point relatively the symmetry centers of the mesh cell. In this work we estimate the distribution of material among the jets produced as a result of an impact of a falling water drop on a rigid mesh. We consider the process of water drop splitting is similar to the high-velocity case with an aluminum projectile. The hydrodynamic of the interaction of a liquid or plastic projectile with some barrier or surface can be characterized by Weber number. The estimate of these numbers for the case of aluminum projectile and water drop in the range of corresponding velocities reveals the similarity of their values what approve the use of the experiments with a water drop for the modeling of high-velocity experiments with an aluminum projectile. Opposite to the specific features of high-velocity experiments the experiments with falling water drop allow us to study in-situ the process of interest. For the purpose of direct observation we used high-speed photography. The distribution of the material among the jets was estimated by the area of spots left on the sheets of filter paper by the fragment of the drop colored with ink dyes. The high-speed photography allowed us to estimate the velocities of the jets that revealed that they had higher velocity than the velocity of the water drop prior to impact – this result is similar to the effect of the acceleration of the jet material observed in the high-velocity experiment with aluminum projectile. Besides we found that the regime of the fragmentation of the water drop lowered the difference among the jet intensities comparatively the regime of quasistatic squeezing of the water drop through the mesh cells. We classified the spatial distribution of jets depending on the distance of the impact points from the centers of symmetry of the mesh cells.

**Keywords:** drop impact; drop splitting; high-speed photography; mesh bumper; fragmentation

## ВВЕДЕНИЕ

Стальной сеточный экран является перспективным элементом для применения в системах экранной защиты космических аппаратов (КА) от метеороидов и частиц космического мусора. При этом в общей картине процессов, сопровождающих высокоскоростную фрагментацию ударников на сеточных экранах (и дискретных экранах в общем случае) ещё остались пробелы – некоторые аспекты фрагментации до сих пор не выяснены. Системы регистрации экспериментальных данных в реальных высокоскоростных экспериментах на легкогазовых баллистических установках (ЛГБУ) имеют очевидные ограничения. В частности в экспериментах по высокоскоростному удару весьма ограничены возможности экспериментального наблюдения фрагментации ударника in-situ. В экспериментах по фрагментации ударника на сетке, картина фрагментации зависит от точки попадания ударника (центр ячейки сетки, узел сетки и т.д.), которую нельзя заранее спрогнозировать из-за большого количества факторов, влияющих на эксперимент. Набор достаточного количества данных, годных для статистической обработки, затруднён в силу трудоемкости и затратности высокоскоростных экспериментов на ЛГБУ. В связи с этим представляется полезным исследование, в котором интересующий процесс мог бы быть смоделирован экспериментально.

В данной работе высокоскоростной удар ударника по сеточной преграде моделировался каплей жидкости, падающей на недеформируемую (стальную) сетку. Применимость такого подхода к задачам высокосортного удара

обсуждалась нами в работе [1]. Ход рассуждений из этой работы повторен ниже, но с числовыми оценками, соответствующими рассматриваемой задаче.

При ударе металлического ударника по металлической мишени при скоростях удара в несколько км/сек материал течет подобно жидкости и прочностными эффектами можно пренебречь по сравнению с инерционными эффектами. Формально это выражается в малости отношения  $Y / \rho V_i^2$ , где  $Y$  и  $\rho$  – предел текучести и плотность материала ударника и мишени,  $V_i$  – скорость удара. Для алюминиевых сплавов, которые обычно используются в экспериментах по тестированию защиты КА,  $Y \leq 0.4$  ГПа, скорость в экспериментах  $V_i \approx 3 \div 7$  км/сек, таким образом, имеем оценку  $Y / \rho V_i^2 \leq 0.016$ , т.е. отношение  $Y / \rho V_i^2$  действительно мало.

Гидродинамика взаимодействия жидкой капли с преградой или поверхностью может быть охарактеризована числами Фруда  $Fr = V_i / \sqrt{gD}$ , Рейнольдса  $Re = \rho V_i D / \mu$  и Вебера  $We = \rho V_i^2 D / \sigma$ , где  $\rho$  – плотность жидкости,  $D$  – диаметр капли,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\mu$  – динамическая вязкость и  $\sigma$  – поверхностное натяжение. Числом Фруда в рассматриваемой задаче можно пренебречь. В ниже рассмотренных экспериментах по взаимодействию жидкой капли с поверхностью  $V_i \approx 7$  м/с и  $D \approx 5$  мм, поэтому скорость деформации капли составляет, приблизительно,  $\dot{\epsilon}_i \sim V_i / D \sim 1.4 \cdot 10^3$  сек<sup>-1</sup>.

Следуя работе [2], дадим оценку значениям  $\dot{\epsilon}_i$ , при которых поверхностные эффекты будут доминировать над вязкими эффектами в процессе фрагментации капли

$$\dot{\epsilon}_i < \frac{9 \rho \sigma^2}{2 \mu^3}. \quad (1)$$

Для воды  $\rho = 1$  г/см<sup>3</sup>,  $\sigma = 0.072$  дж/м<sup>2</sup> (при температуре 25°C),  $\mu = 8.9 \cdot 10^{-4}$  Па·с (25°C) [3], и для правой части (1) имеем  $\sim 3 \cdot 10^{10}$ . Видим, что критерий (1) для типичных экспериментов выполнен с большим запасом. Таким образом, при анализе экспериментов следует пользоваться числом Вебера как управляющим параметром задачи. Однако, если на больших временах надо учитывать ускорение свободного падения (число Фруда), то на малых временах после контакта капли с поверхностью важна вязкость: в этом случае характерная длина процесса  $\sim \sqrt{\mu D / (\rho V_i)}$  определяется вязкостью. Для нашей задачи эта величина приблизительно равна 25 мкс, в то время как характерное время дробления капли на сетке значительно больше, оно составляет  $(V_i / D)^{-1} \sim 1$  мс. Таким образом, эта оценка подтверждает вывод о доминирующем характере числа Вебера для рассматриваемой нами задачи, сделанный на основе формулы (1).

Оценим число Вебера для нашей задачи взаимодействия капли с преградой:  $We = 3403$ . Для экспериментов по соударению алюминиевого ударника с сеткой, выполненных в [4,5], плотность  $\rho = 2.71$  г/см<sup>3</sup>, диаметр ударника  $D = 6.35$  мм, характерная скорость удара  $U_i \approx 7$  км/с. Вместо поверхностного натяжения здесь берем работу разрушения, оцениваемую как способность материала поглощать энергию в процессе деформации и разрушения под действием импульсной нагрузки (т.н. ударная вязкость), величина которой сильно зависит как от типа алюминиевого сплава, так и от способа изготовления образца [6,7], для оценок примем  $\sigma = 200 \div 900$  кдж/м<sup>2</sup>. Таким образом, имеем следующие значения чисел

Вебера:  $We=936\div 4214$ . Из оценок видно, что характерное значение числа  $We$  для экспериментов [4,5] перекрываются полностью со значениями чисел  $We$  для модельных экспериментов, выполненных в настоящей работе.

В рамках данной работы выполнен цикл модельных экспериментов с жидкостью, чтобы определить, как фрагментация ударника, моделируемого каплей жидкости, зависит от точки попадания при взаимодействии ударника с недеформируемой сеточной преградой. Точкой попадания называется геометрическая точка пересечения линии движения ударника с плоскостью преграды. В работе измерялись следующие характеристики облака фрагментов, образующегося после удара капли по сетке: скорость струй, образующихся в результате движения жидкости сквозь отдельные ячейки сетки после падения капли, их пространственное распределение, а также перераспределение вещества капли между струями.

В процессе работы решались следующие задачи:

- подбор параметров моделирующего эксперимента;
- определение скорости струй с помощью камеры высокоскоростной съемки;
- классификация пространственного распределения струй в зависимости от точки попадания капли на сетку;
- оценка количественного распределения вещества капли между струями.

## 1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах капля ускорялась до необходимой скорости в падении с соответствующей высоты в нормальных условиях. Были проведены предварительные тесты для подбора параметров сетки и скорости капли, при которых действие сил поверхностного натяжения воды не оказывало бы существенного влияния на образующиеся струи.

### 1.1. Описание экспериментальной установки.

Схема установки для проведения экспериментов показана на рис.1. На стальной стойке, установленной вертикально враспор (для придания конструкции жёсткости) между полом и потолком, закреплён сосуд, заполненный окрашенной жидкостью (вода и краситель) и снабженный полой медицинской иглой для инъекций со скошенным носиком. Ниже в горизонтальной плоскости закреплена сетка. В экспериментах была использована стальная сетка. Под сеткой на некотором расстоянии также в горизонтальной плоскости располагался лист фильтровальной бумаги размером А3. Способ крепления сосуда и сетки позволял оперативно менять их высоту расположения для регулировки расстояния от носика иглы до сетки, и от сетки до листа фильтровальной бумаги. К емкости с помощью пластиковой трубки присоединяется медицинский шприц, заполненный такой же окрашенной жидкостью. При движении поршня в системе шприц-сосуд создается избыточное давление, что вызывает поступление жидкости к скошенному носику иглы, где она скапливается в виде капли и при достижении определённой массы происходит её отрыв от носика, падение и удар о расположенную ниже сетку с последующим разбрызгиванием (фрагментацией) капли. Фрагменты капли падают на лист фильтровальной бумаги, оставляя на нём хорошо различимые следы, что позволяет идентифицировать место их падения, а также определить площадь пятна, образующегося в результате впитывания в бумагу фрагментов капли. Фильтровальная бумага использовалась с тем, чтобы

по возможности исключить дополнительное разбрызгивание фрагментов капли при их ударе о поверхность листа благодаря быстрому впитыванию.

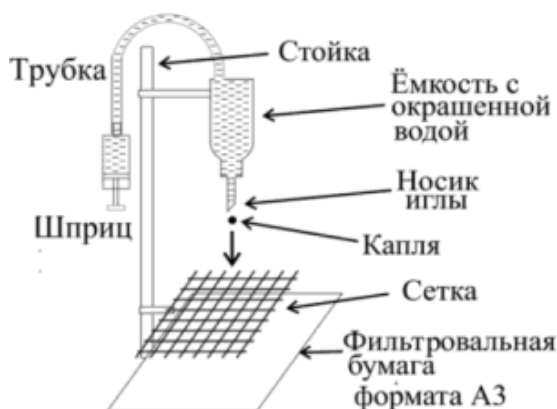


Рис.1. Схема экспериментальной установки.



Рис.2. Кадр высокоскоростной съемки, сделанной для оценки состояния капли и скорости падения.

## 1.2. Параметры эксперимента.

Чтобы определить состояние падающей капли перед соударением с сеткой, а также, чтобы измерить её скорости и выявить есть ли какие-либо особенности её контакта с сеткой при образовании струй, была использована цифровая камера для высокоскоростной съемки Photron FASTCAM SA4. Для освещения снимаемых объектов использовались четыре галогеновых лампы мощностью по 1500 Вт каждая. Съёмка велась на скорости 10000 кадров в секунду (FPS). На рис.2 приведен кадр высокоскоростной съёмки, сделанный для оценки скорости и состояния капли перед столкновением с сеткой. В кадр помещались вертикально и горизонтально расположенные измерительные линейки со шкалой деления в 1 мм для задания масштаба снимаемых объектов. Масштаб определялся как размер в миллиметрах изображения приходящегося на один пиксель (отдельно для вертикали и для горизонтали).

Для оценки таких параметров эксперимента как размер капли, скорость капли и скорость струй, использовалось программное обеспечение Photron Fastcam Viewer, поставляемое вместе с высокоскоростной камерой. Данная программное обеспечение предоставляет набор функций, позволяющих детально просматривать отснятые кадры высокоскоростной съемки, определять масштаб снимаемых объектов и скорость их перемещений, подготавливать выбранные кадры для публикации.

Изображение падающей капли, сделанное до контакта капли с сеткой на расстоянии примерно 5 мм от поверхности сетки, приведено на рис.3. Капля имеет форму неправильного эллипсоида с более плоской нижней стороной. Эта сторона обращена к потоку набегающего в падении воздуха. Большая полуось эллипсоида имеет размер порядка 2.91 мм, меньшая полуось – 2.15 мм, что позволяет оценить объём капли равным  $76 \text{ мм}^3$  (т.е. характерный размер капли можно оценить как 5.3 мм). Измерение скорости падения капли, выполненные на дистанции 20 мм перед соударением капли с сеткой даёт скорость порядка 7.0 м/с.

Использование высокоскоростной съёмки не только позволило определить скорость и состояние капли перед ударом о сетку, но и прояснило характер поведения струй в зависимости от геометрических параметров сетки и скорости падающей капли. В начальных опытах распределение фрагментов капли на листе фильтровальной бумаги носило сильно стохастический характер, отсутствовала симметричная структура, подобная наблюдаемой в проведенных ранее высокоскоростных экспериментах со стальной сеточной преградой и алюминиевыми ударниками [8,9]. Как показала высокоскоростная съёмка, влияние поверхностного натяжения приводило к смешению струй, не позволяя их идентифицировать и исследовать их индивидуальные свойства. Увеличение высоты падения капли, добавление в воду поверхностно-активных веществ, понижающих поверхностное натяжение воды, и увеличение апертуры сетки позволило улучшить картину распределения следов фрагментов.

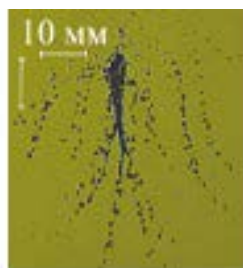


Рис.3. Изображение капли перед соударением с сеткой. Цена видимых делений шкалы – 1 мм.

На рис.4(а) изображено запреградное пространство в эксперименте с сеткой с апертурой 1,2 мм и диаметром проволоки 0,3мм (далее в тексте параметры сеток будут обозначаться по аналогии 1,2 мм×0,3 мм) через 2.4 мс после контакта капли с преградой. На рисунке видны как отдельные струи, так и некий расположенный в центре конгломерат струй, соединенных между собой водяной плёнкой, которая стягивает их вместе, искривляя их кинематические траектории движения. Это приводит к тому, что часть струй сходится вместе, превращаясь в вытянутое бесформенное образование, как видно на рис.4(б) полученном через 6 мс после удара капли о сетку. Увеличение высоты падения и использование сетки с большими апертурой ячейки и диаметром проволоки позволило избавиться от паразитного эффекта схождения струй.



а) 2.4 мс



б) 6 мс



а) 2.4 мс



б) 6 мс

Рис.4. Стадии фрагментация капли воды на сетке 1,2×0,3 мм в моменты времени 2.4 мс и 6 мс после контакта с преградой.

Рис.5. Стадии фрагментация капли воды на сетке 2,0×0,6 мм в моменты времени 2.4 мс и 6 мс после контакта с преградой.

На рис.5(а) и (б) изображено состояние струй после фрагментации капли на сетке 2,0 мм×0,6 мм при ударной скорости капли порядка 7 м/с. Как видно из рис.5(а) в момент времени 2.4 мс после начала взаимодействия капли и преграды между струями также присутствует тонкая водяная плёнка, которая далее лопается и на рис.5(б) через 6 мс она отсутствует. При этом отклонения струй от первоначальной траектории движения незначительные. Таким образом, для целей эксперимента в качестве наиболее подходящих параметров были выбраны сетка 2,0 мм×0,6 мм и скорость капли перед соударением не меньше чем 7 м/с.

### 1.3. Красители воды. Улучшение контрастности.

Как было сказано выше, для регистрации размеров и пространственного распределения фрагментов капли использовались листы фильтровальной бумаги. Для оцифровки с целью дальнейшей компьютерной обработки листы бумаги сканировались обычным офисным сканером. В математическом смысле цветное цифровое изображение представляет собой трехмерную матрицу, где первая и вторая размерности соответствуют разрешению изображения по вертикали и горизонтали, третья размерность соответствует одному из трех цветовых слоёв матрицы - красному, синему или зеленому цвету, а значение элемента матрицы – величина от 0 до 255 обозначающая уровень яркости одного из трех цветов точек (пикселей), которые формируют изображение. Поэтому с целью повышения контрастности изображения следов фрагментов капли одним из наиболее подходящих красителей воды оказались канцелярские чернила синего цвета. При обработке изображения оказалось достаточным использовать только синий слой трехмерной матрицы изображения при высоком уровне контрастности. На рис.6 приведены образцы оцифрованного изображения для случаев, когда воспроизводятся все три слоя матрицы (а), только синий слой (б) и, например, только зелёный слой (в). Очевидно, что контрастность синего слоя значительно выше.

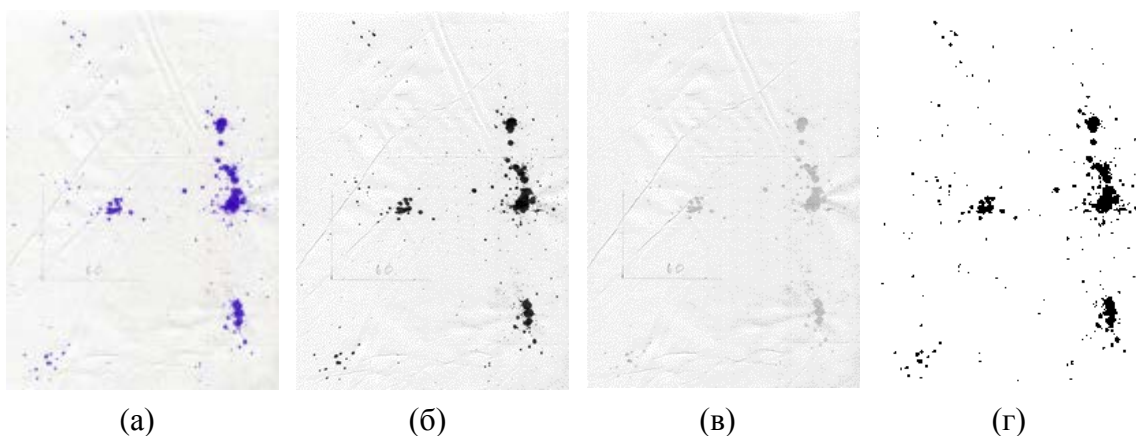


Рис.6. Образцы оцифрованного изображения а) полная матрица изображения, б) второй слой матрицы (синий), в) третий слой матрицы (зелёный), г) бинарное изображение второго слоя.

Для дальнейшей аналитической обработки следов фрагментации синий слой изображения переводился в бинарный формат таким образом: элементы матрицы, значение которых соответствует более темным оттенкам приравниваются к единице, остальные элементы приравниваются к нулю. Критерием перевода каждого элемента в «0» или «1» служило некоторое экспериментально



выявляемое значение интенсивности, при котором уровень яркости неокрашенного фона бумаги отсекался как «нулевой». В нашей работе это значение было порядка 190-200 (при значении 255, соответствующем максимальной ярости, т.е. абсолютно белому фону). При воспроизведении такой матрицы её элементы со значением единица отображаются черным цветом, остальные элементы – белым (рис.6(г)).

#### 1.4. Обработка изображения и восстановление массы фрагментов.

Как было сказано выше, для аналитической обработки данных о распределении следов фрагментов капли по поверхности листа фильтровальной бумаги поверхность бумаги сканировалась. Для регистрации фрагментов использовался листы бумаги формата А3. Поскольку облако фрагментов капли при движении в запреградном пространстве расширяется в боковые стороны, то увеличение расстояния от преграды до листа фильтровальной бумаги приводит к конечному разнесению фрагментов на большую площадь поверхности, что улучшает детализацию образца для исследования состава облака фрагментов. Особенно это актуально в данной постановке эксперимента в связи с тем, что, впитываясь в фильтровальную бумагу, фрагменты оставляют на ней следы большей площади, и для целей исследования отдельных фрагментов следует подбирать такое расстояние от преграды до листа, чтобы эти следы не перекрывались. Именно поэтому для регистрации фрагментов был выбран лист увеличенного формата А3 (297 мм×420 мм) (рис.7(а)).

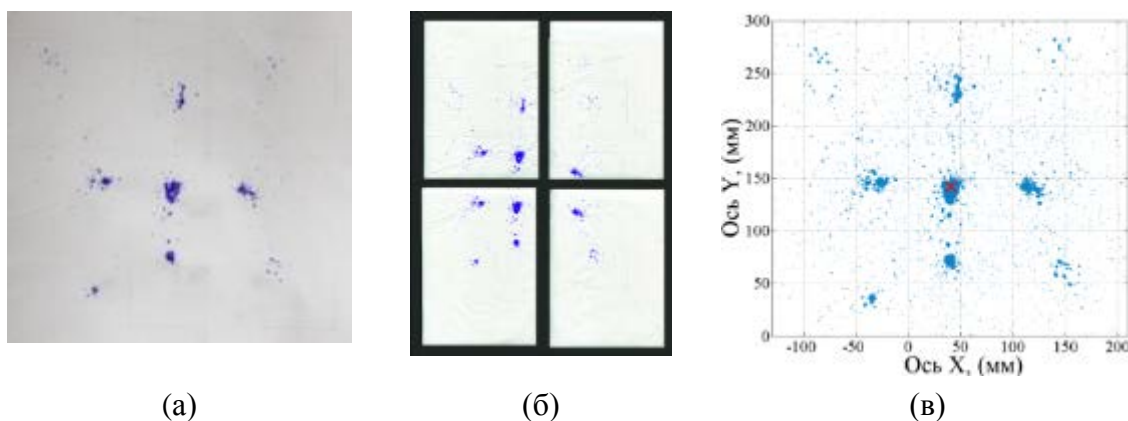


Рис.7. Изображение листа фильтровальной бумаги с распределением следов фрагментов капли в эксперименте №16: (а) фотография листа, выполненная цифровым фотоаппаратом (б) сканированные изображения формата А4 (в) элементы триангуляционного массива, отображенные согласно своим фактическим координатам. Каждый элемент соответствует своему пикселю бинарного изображения. Красным крестом обозначена точка проекции траектории движения капли на лист фильтровальной бумаги.

В связи с тем, что для сканирования поверхности листов фильтровальной бумаги использовался сканер формата А4 (210мм×297 мм), сканирование всей поверхности производилось по отдельным частям (от двух до четырех частей) (рис.7(б)). На листе для каждой отдельно сканируемой области наносились оси локальной декартовой системы координат и метки для определения взаимного расположения локальных систем областей друг относительно друга.



Сканированные изображения частей одного листа объединялись в одно общее изображение с помощью компьютерной программы. При этом была реализована подгонка каждого изображения по его индивидуальным декартовым осям к ориентации и масштабу глобальной декартовой системы координат объединенного изображения. Далее каждый элемент матрицы финального объединенного изображения в бинарном формате конвертировался в соответствующий элемент массива точек, фактически задающих триангуляцию окрашенных областей в фактическом масштабе. Кроме координат фактического масштаба, приписанных к каждому из элементов этого массива, элемент содержал информацию о линейных размерах, площади и ряде других параметров соответствующего ему пикселя (рис.7(в)). Такое представление данных было удобнее для работы по ряду соображений технического характера.

Подготовка и обработка изображений проводились достаточно аккуратно, чтобы минимизировать влияние возможных погрешностей на дальнейшие измерения. В процессе подготовки и обработки изображений появление погрешностей может быть обусловлено рядом таких факторов как флуктуация значений яркости точек, формирующих изображение, связанная с техническими особенностями работы светочувствительных элементов сканера, а также с особенностями программной обработки сигналов со сканера такими, например, алгоритмами как сжатие изображения или конвертация изображения в выбранный формат. Также погрешности могут быть вызваны не слишком высокими значениями естественной белизны используемой фильтровальной бумаги, её помятостью, приводящей к неравномерному освещению поверхности при сканировании, слишком слабым естественным контрастом окрашенных следов фрагментов капли после высыхания, что может быть связано с невысокой концентрацией красителя в жидкости. Из-за высокой вероятности появления погрешностей связанных с шумностью ПЗС матрицы фотоаппарата, сильных краевых геометрических искажений фотообъектива и высокой неоднородности освещения фотографируемой поверхности было принято решение отказаться от использования фотоаппарата для получения изображения следов на листах фильтровальной бумаги в пользу оптического сканера. Определение массы отдельных фрагментов капли строилось по измерениям площади следов фрагментов капли на листе фильтровальной бумаги. Из общих соображений можно предположить, что, начиная с некоторого размера фрагмента, соответствующая ему площадь следа должна быть связана с массой фрагмента линейной зависимостью. Как было сказано выше изображение следов фрагментов капли представляется в виде множества триангуляционных точек, каждой из которых, в частности, приписана информация об их фактических координатах и площади соответствующего элементарного элемента поверхности (элементарной площади). На множестве триангуляционных точек след отдельного фрагмента соответствует некоторому кластеру из подмножества этих точек, найденному по заданному метрическому критерию. Определение площади следа фрагмента, сводится к вычислению суммы элементарных площадей соответствующих точек этого кластера. Элементарная площадь рассчитывается как площадь сканируемой поверхности, соответствующая одному пикселю.

Для нахождения масс фрагментов была построена калибровочная кривая, связывающая массы фрагментов с площадями оставляемых ими следов. Для этой цели на небольшие куски фильтровальной бумаги наносились капли окрашенной жидкости разной массы. После нанесения капли её масса определялась

с помощью измерения на высокоточных электронных весах OHAUS Explorer Pro EP214 (точность до 0.00001 г) изменения веса куска бумаги, а после высыхания след от капли сканировался и определялась его площадь. По полученным данным были найдены полиномиальные коэффициенты соответствующей кривой, с помощью которых и восстанавливались значения масс фрагментов капли по площади образованных ими следов. Вид калибровочной кривой с калибровочными точками приведен на рис.8. Масса отдельной струи определялась как совокупная масса группы кластеров, входящих в эту струю. Группа кластеров, образующих отдельную струю, задавалась вручную, выделением соответствующих кластеров с помощью специально подготовленной для этого компьютерной программой.

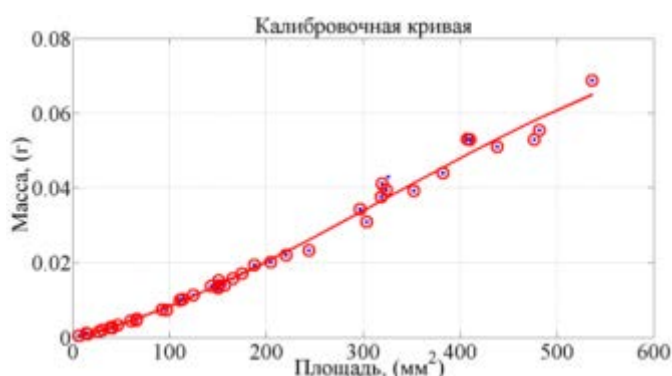


Рис.8. Калибровочная кривая и точки калибровочных данных.

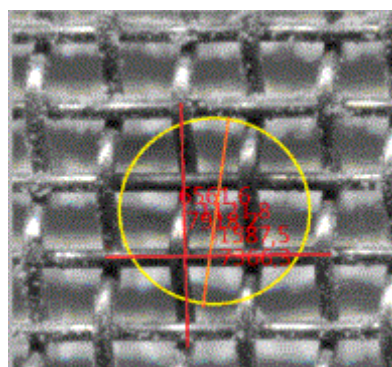


Рис.9. Определение точки попадания.

### 1.5. Нахождение точки попадания и линии падения капли.

Одним из определяющих параметров при ударной фрагментации на сетках является так называемая точка попадания (см. рис.9) – точка на поверхности сеточной преграды, в которую попадает капля или, другими словами, точка пересечения плоскости сеточной преграды и линии падения капли. В ходе подготовительных экспериментов выяснилось, что из-за ряда причин невозможно прицельное попадание падающей каплей точно в желаемую точку на сетке. Характерный размер пятна разброса попаданий в сетку капли, падающей с высоты 3.5 метров, составлял примерно 15-20 мм. В связи с этим при проведении каждого эксперимента выполнялась процедура восстановления местоположения точки попадания капли на сетке. С этой целью сетка предварительно покрывалась мелкодисперсным порошком, используемом в качестве наполнителя малярных красок (характерный размер частиц порошка порядка 20 мк), который неплохо держался на металлической поверхности проволоки сетки и также хорошо смывался жидкостью падающей капли. После падения капли с помощью стереоскопического бинокулярного микроскопа (увеличением 100-300 крат) пятно контакта жидкости и сетки изучалось, фотографировалось и по зоне смывого порошка, определялась наиболее вероятная точка попадания. Кроме вышеуказанного порошка в качестве маркера попадания капли в некоторых испытаниях использовалась также пшеничная мука. Также на листе фильтровальной бумаги отмечалась точка, соответствующая линии падения капли.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

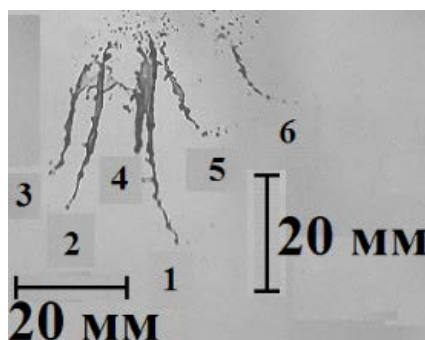
Всего рассматриваются тринадцать экспериментов. Их номера 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 и 16. Все эксперименты проводились для одной и той же высоты падения капли, с одной и той же иголкой, на которой капля формировалась, с одной и той же сеткой, с одним и тем же типом фильтровальной бумаги. Кроме этих экспериментов упоминается несколько пристрелочных экспериментов, выполненных с другими параметрами во время подготовительной работы.

### 2.1. Измерение скорости струй.

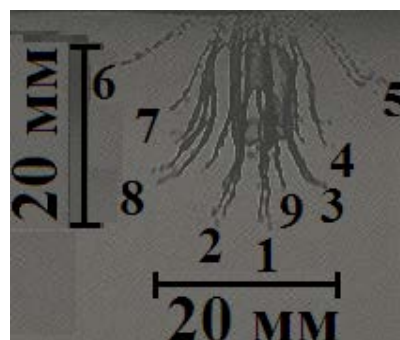
Работа с высокоскоростной камерой позволила установить скорость фронтальной части струй, которая оказалась выше, чем скорость капли перед ударом о сетку. На рис.10(а) представлены кадры высокоскоростной съемки, сделанной через 4.3 мс после начала фрагментации капли при соударения с сеткой 2,0 мм×0,6 мм при скорости капли 7.23 м/с. Струи на рисунке пронумерованы. Значения скоростей струй по номерам представлены в Таблице 1. Также, на рис.10(б) представлены пронумерованные струи при контакте капли с сеткой 1,2 мм×0,3 мм при скорости 7.03 м/с через 2.3 мс от начала ударного взаимодействия капли. Скорости для струй также представлены в Таблице 1. Как было показано ранее, в численном расчёте [8], моделирующем удар алюминиевого шарика диаметром 6.35 мм по стальной сетке 2,0 мм×0,6 мм с начальной скоростью 3000 м/с, с точкой попадания расположенной точно в пустом центре ячейки сетки, генерируемая центральная струя имеет скорость своей фронтальной части в 1.5 раза превышающую начальную скорость ударника. Прямое экспериментальное наблюдение разгона вещества струи фрагментов было получено в работе [4] в которой фиксация запреградного облака фрагментов с помощью рентгеновской камеры показала, что скорость фронтальной части струи в 1,38 раз выше, чем начальная скорость алюминиевой сферы диаметров 6.35 мм, имевшая значение 7040 м/с. Используемая в данном высокоскоростном эксперименте сетка имела параметры 2,0 мм×0,6 мм. Пояснилось, что разгон вещества в струях вызван движением материала ударника в стесненных условиях сквозь ячейки сетки [8].

Данные приведённые в Таблице 1 показывают, что скорость струи может в полтора раза превысить скорость, которую капля имела до соударения. Из-за того, что струи видны только в проекции, возникают трудности с точным определением их местоположения в пространстве и приведённые в Таблице 1 значения являются нижней границей оценки их скорости и угла отклонения от вертикали. В любом случае можно говорить о корреляции между углом отклонения и скоростью струи: чем ближе к вертикали направление движения струи, тем выше его скорость. Исключением является струя №6 для сетки 1,2 мм×0,3 мм (рис.10(б)), Таблица 1). При траектории движения струи близкой к горизонтальной его скорость почти в два раза превышает скорость капли перед соударением. Вероятно, что при данном угле отклонения и факторе ускорения механизм разгона отличается от случая характерного для большей части остальных струй. Следует заметить, что под углом отклонения струи от вертикали подразумевается угол кинематической траектории движения отдельно выбранной частицы вещества (выбирались частицы фронтальной части струи), но не угол отклонения от вертикали видимого на изображении множества частиц жидкости, из которых состоит струя, в рассматриваемый момент времени.

Данные, приведённые в Таблице 1, показывают также, что величина кумулятивного эффекта зависит от апертуры сетки. Этот вопрос обсуждался в работе [8] на основе численного моделирования.



(а) Сетка 2,0 мм×0,6 мм,  $\Delta t=4.3$  мс, начальная скорость капли 7,23 м/с.



(б) Сетка 1,2 мм×0,3 мм,  $\Delta t=2.4$  мс, начальная скорость капли 7,03 м/с.

Рис.10. Пронумерованные струи воды в запреградном пространстве при фрагментации капли на сетке. Скорости струй даны в Таблице 1.

Таблица 1.

Характеристики струй.

Номер струи	Скорость по вертикали, (м/с)	Скорость по горизонтали, (м/с)	Скорость, (м/с)	Угол от вертикали (град)	Отношение скорости струи к скорости капли
<b>Сетка 2,0×0,6 мм. Скорость удара капли о сетку 7.23 м/с (рис.10а)</b>					
1	10,75	1,05	10,80	5,57	1,50
2	9,13	2,75	9,53	16,74	1,32
3	7,56	2,86	8,08	20,69	1,12
4	6,96	0,13	6,96	1,08	0,96
5	6,84	2,56	7,30	20,51	1,01
6	5,60	5,66	7,96	45,28	1,10
<b>Сетка 1,2×0,3 мм. Скорость удара капли о сетку 7.03 м/с (рис.10б)</b>					
1	10,16	0,48	10,17	2,70	1,45
2	9,98	1,41	10,08	8,03	1,43
3	8,19	2,34	8,52	15,97	1,21
4	6,55	2,72	7,10	22,53	1,01
5	3,80	4,84	6,15	51,82	0,88
6	1,11	12,99	13,04	85,12	1,86
7	4,84	-3,51	5,98	35,90	0,85
8	8,12	-3,74	8,94	24,73	1,27
9	8,32	0,91	8,37	6,28	1,19

**2.2. Распределение вещества капли между струями.**

Как было сказано выше, при проведении экспериментов регистрировались следующие параметры:

- координаты точки, указывающие место попадания капли в ячейку сетки - за начало отсчёта принят левый нижний узел ячейки, т.е. место пересечения проволок;

- координаты линии падения капли, т.е. точки пересечения плоскости листа фильтровальной бумаги-свидетеля и линии движения капли;
- координаты точек, реализующих триангуляцию окрашенных зон на поверхности листа фильтровальной бумаги, являющихся следами осевшего на лист облака фрагментов капли.

Схема ячейки сетки с восстановленными по результатам всех экспериментов точками попадания приведена на рис.11. Красными маркерами обозначены точки попадания, цифрами номера экспериментов. В круглых скобках приведён тип соответствующего распределения фрагментов капли (классификация распределений по типам приведена ниже). Также обозначены размер ячейки (2,6 мм), диаметр проволоки (0,6 мм), апертюра ячейки (видимое на просвет расстояние между двумя соседними проволоками 2,0 мм).

Во всех экспериментах распределение фрагментов капли характеризуется их локализацией в разнесенных областях свидетеля. Каждая область локализации соответствует отдельной струе разрушенной капли.

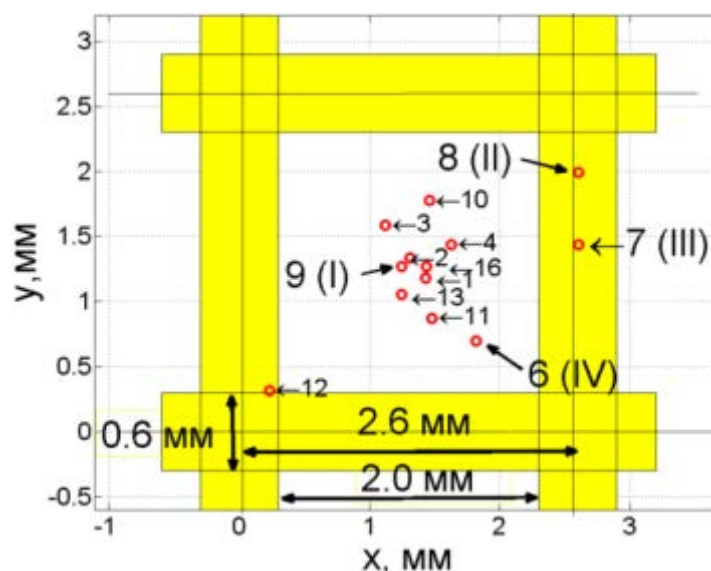


Рис.11. Схема ячейки сетки с точками попадания.

Распределение вещества в запреградном облаке фрагментов в экспериментах можно поделить на четыре основных типа, отличающихся количеством крупных струй и перераспределением вещества начальной капли между ними. Каждый тип такого распределения струй определяется близостью точки попадания к одной из трёх следующих точек ячейки, задающих симметрию сетки:

- узел ячейки, т.е. место пересечения проволок;
- пустой центр ячейки;
- срединная точка на ребре ячейки, между двумя соседними узлами.

Типы распределения струй следующие.

I-й тип распределения представлен на рис.12, где чёрными точками обозначены центры масс струй, а соответствующими цифрами их номера. Цифра 0 относится к центру масс тех фрагментов, которые не вошли ни в одни из струй. В левом верхнем углу приведено изображение сетки, ячейки которой пронумерованы в соответствии с номерами струй, образовавшихся в результате движения воды сквозь соответствующие ячейки. Такой порядок обхода ячеек

(слева направо и снизу вверх будет использован повсеместно в дальнейшем изложении).

Распределение I-ого типа характеризуется наличием девяти различных струй, из которых пять заметно крупнее, чем остальные (струи №№ 2, 4, 5, 6 и 8) (рис.12). Один из пяти этих струй (№5), наиболее крупный, располагается в геометрическом центре всех фрагментов, практически совпадая с линией падения капли. Четыре других крупных струи (№№2, 4, 6 и 8) расположены симметрично относительно центральной струи №5. Распределение I-ого типа характерно для попадания капли в область близкую к пустому центру ячейки.

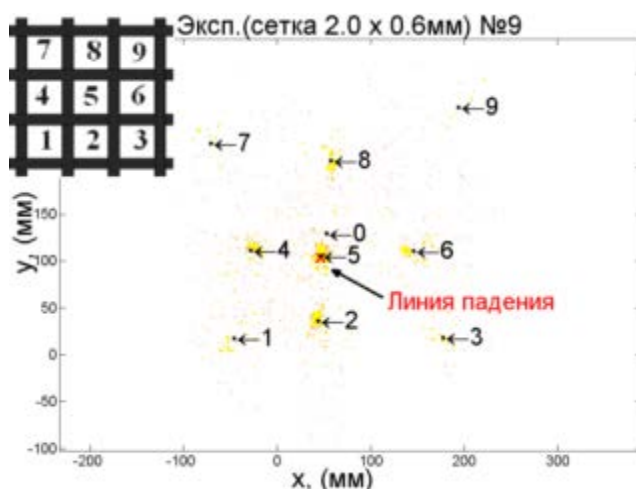


Рис.12. Распределение фрагментов в эксперименте №9.

Для демонстрации специфических количественных особенностей распределения каждого типа в эксперименте удобно геометрически разделить объём шара на части, соответствующие ячейкам сетки, как показано на рис.13(а), и сравнивать перераспределение вещества между струями в эксперименте с этим геометрическим разделением.

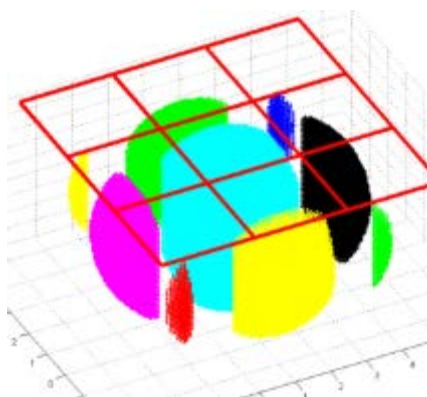


Рис.13 (а). Геометрическое разбиение объема шара ячейками сетки. Приведён случай для I-ого типа распределения.

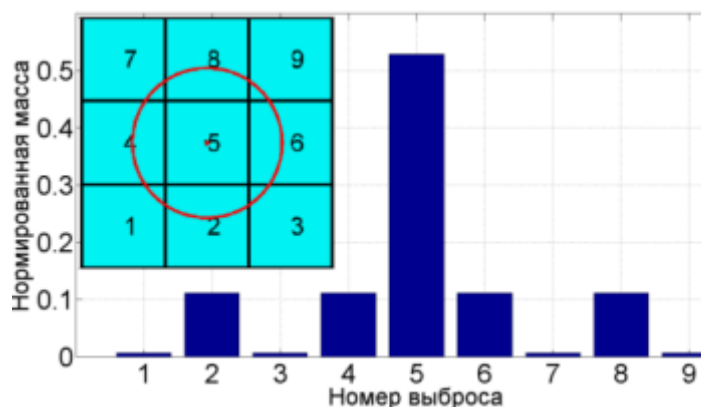


Рис.13 (б). Распределение нормированных масс струй для геометрического разбиения объема шара по ячейкам сетки, когда точка попадания находится в центре пустой ячейки сетки

В случае геометрического разделения каждой ячейке будет соответствовать некоторый объём (масса) равный объему той части шара, проецируемой



на плоскость сетки, которая приходится на эту ячейку. Подобному распределению вещества между ячейками может соответствовать случай разрезания сеткой, выполненной из достаточно тонких проволок, шара, состоящего из несжимаемого вещества при квазистатическом внедрении ячеек сетки в материал шара (рис.13(а)). Образующиеся при этом разрезы не должны залечиваться. Тогда нормированное распределение масс струй, соответствующее точке попадания, приходящейся на пустой центр ячейки сетки, выглядит, как показано на рис.13(б). На рис.13(а) приведён вид шара, разделённого ячейками сетки при условии, что вертикальная ось симметрии шара проходит через пустой центр ячейки. При заданных параметрах шара, размере ячейки и принятом правиле обхода при нумерации ячеек масса центральной струи для геометрического разбиения в пять раз превышает массу четырех симметричных струй, приходящихся на ячейки №№ 2, 4, 6 и 8.

К распределению I-ого типа, исходя из вида распределения струй и положения восстановленных точек попадания, можно отнести эксперименты №№ 1, 2, 3, 9, 11, 13 и 16 (рис.11).

Характерный вид II-ого типа распределения получен, например, в эксперименте №8 и представлен на рис.14. Обозначения такие же, как на рис.12. В левом верхнем углу рисунка на схеме распределения струй по ячейкам сетки круглым маркером белого цвета указана точка попадания.

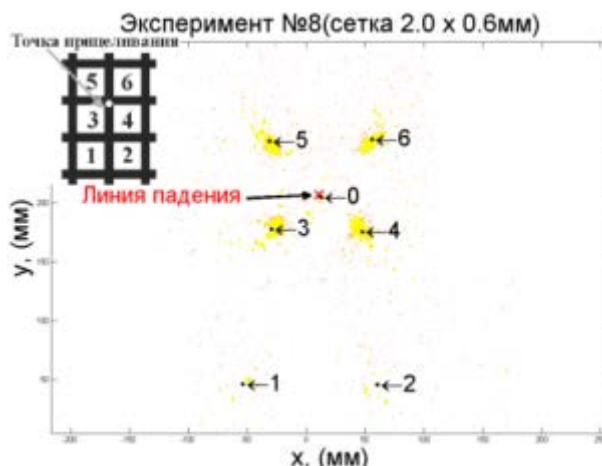


Рис.14. Распределение фрагментов капли в эксперименте №8.

Распределение II-ого типа характеризуется наличием четырех крупных струй (№№ 3, 4, 5 и 6, рис.14) следы которых расположены симметрично относительно линии падения капли. В области геометрического центра распределения локализации фрагментов не наблюдается. Это распределение наблюдается при попадании капли в область близкую к узлу сетки, т.е. месту пресечения двух проволок. При небольшом удалении от узла ячейки кроме четырёх крупных струй может присутствовать пара слабых струй (струи №№1 и 2, рис.14), удаленных от геометрического центра. К распределению II-ого типа можно отнести эксперименты №№ 8, 12 (рис.11).

Геометрическое разбиение шара элементами сетки при точке попадания соответствующей узлу ячейки, даёт распределение масс струй, как показано на рис.15. Симметрия четырех ячеек относительно узла приводит к симметричному делению шара на четыре одинаковых части. В правой верхней части рис.15 приведена схема деления шара ячейками сетки 1, 2, 4 и 5. Очевидно,



что подобное распределение наблюдалось бы и в реальном эксперименте при точном попадании капли в узел ячейки.

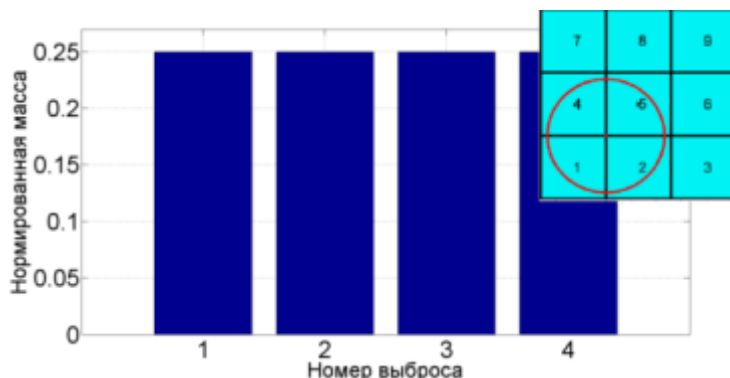


Рис.15. Распределение нормированных масс струй для геометрического разбиения объема шара по ячейкам сетки, когда точка попадания находится в узле ячейки (пересечение двух проволок).

III-ий тип распределения представлен на рис.16. Данный тип представлен результатом эксперимента 7, который не является идеальным воспроизведением характерного для этого типа распределения и отчасти схож с распределением II-го типа. Вообще из тринадцати экспериментов к III-ему типу можно отнести только эксперимент 7. В идеале данное распределение должно характеризоваться двумя крупными струями симметрично расположенными относительно линии падения и соответствовать нахождению точки попадания на середине проволоки между двумя смежными узлами ячейки, как это указано белым маркером на рис.14. Кроме двух крупных струй (№№ 3 и 4) имеются также более слабые струи №1,2 и №5,6 симметрично расположенные относительно линии, соединяющей крупные струи №№3 и 4. Эта симметрия является характеристическим отличием пространственного распределения струй в эксперименте №7 (III-й тип распределения) (рис.16) от распределения в эксперименте №8 (II-ой тип распределения) (рис.14).

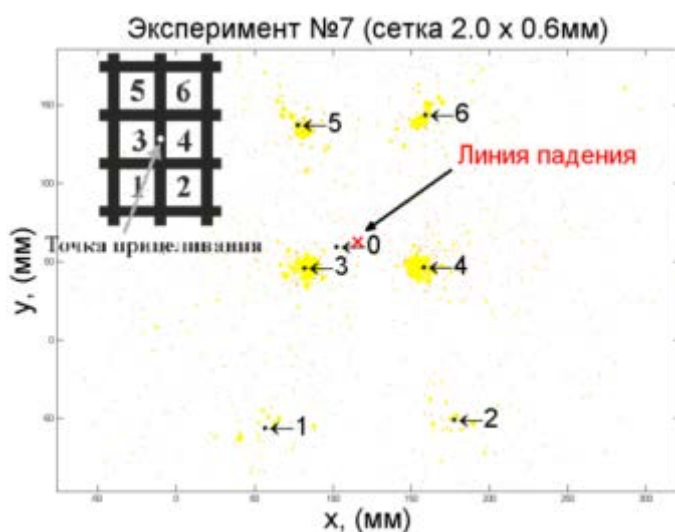


Рис.16. Распределение фрагментов капли в эксперименте 7.

Геометрическое разбиение шара элементами сетки при точке попадания соответствующей середине проволоки между двумя смежными узлами ячейки даёт распределение масс струй как показано на рис.17. Данная симметрия точки попадания приводит к образованию двух крупных одинаковых струй и четырех одинаковых струй меньшей массы. Количественно каждый крупный выброс при этом превышает каждый меньший выброс примерно в пять раз. В левой верхней части рис.17 приведена схема деления шара ячейками сетки 2, 3, 5, 6, 8 и 9.

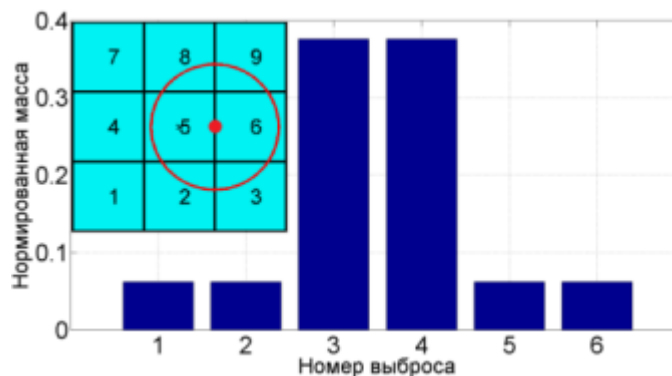


Рис.17. Распределение нормированных масс струй для геометрического разбиения объема шара по ячейкам сетки, когда точка попадания находится на середине проволоки между двумя смежными узлами ячейки.

Вообще говоря, поскольку I-й, II-ой и III-й типы распределения являются результатом попадания капли в одни из трёх центров, задающих симметрию сетки, то правомерно ожидать симметричного распределения фрагментов по листу фильтровальной бумаги в случае идеально точного попадания.

IV-й тип распределения представлен на рис.18. Обозначения на рисунке такие же, как на рис.12 и рис.13. Этот тип распределения можно охарактеризовать, как распределение, не подпадающее под классификацию I-ого, II-ого или III-ого типа. В основном оно характеризуется расположенными асимметрично относительно линии падения несколькими локализованными группами как крупных, так и слабых струй.

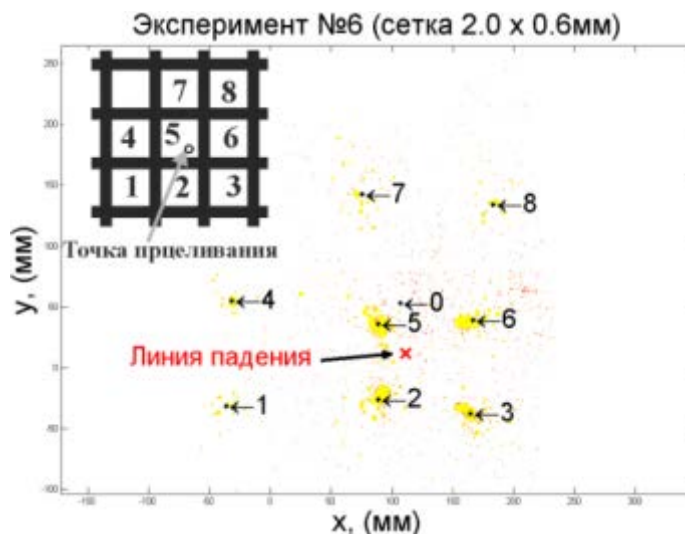


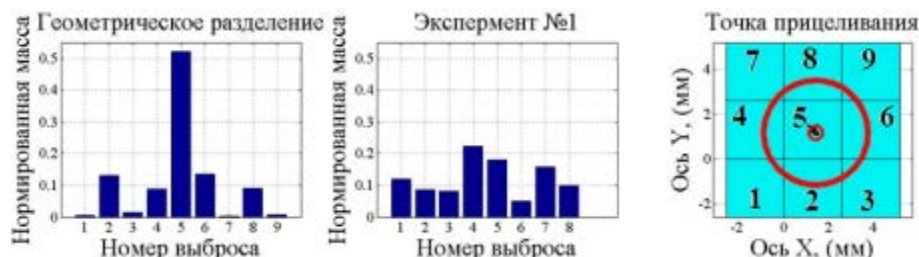
Рис.18. Распределение фрагментов капли в эксперименте 6.

IV-й тип распределения охарактеризовать, как распределение, не подпадающее под классификацию I-ого, II-ого или III-ого типа. Данный тип распределения имеет место, когда точка попадания находится в областях, не относящихся к точкам, дающим распределения I-ого, II-ого или III-го типа, и характеризуется ассиметричным распределением вещества в струях (хотя структура пространственного распределения при этом сохраняется). Количество струй при этом может быть 8 или 9. К этому типу распределения можно отнести эксперименты №№ 4, 6 и 10.

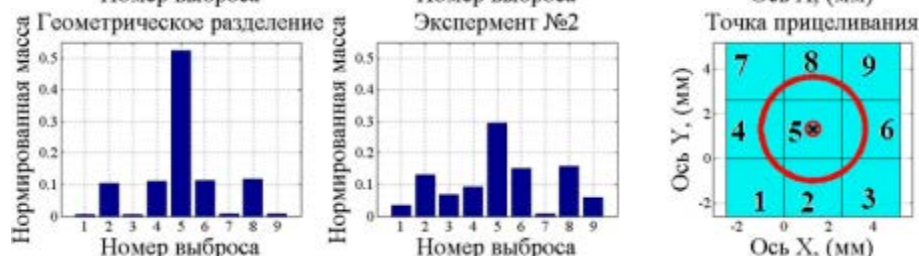
Приведенная выше классификация проведенных экспериментов основывалась на экспериментально определённых координатах точек попадания (рис.11) исходя из их близости к основным точкам симметрии сетки и общему виду пространственного распределения фрагментов капли по листу фильтровальной бумаги. Определенные с помощью калибровочной кривой (рис.8) массы фрагментов капли позволяют построить распределения струй по массам и сравнить их с геометрическим разделением объема шара, построенным для точек попадания, определённых экспериментально (рис.19). Это сравнение полезно тем, что позволяет выявить различия в фрагментации при скоростном и квазистатическом внедрении, которые обусловлены гидродинамическими явлениями, инициируемыми в капле внедрением элементов сетки.

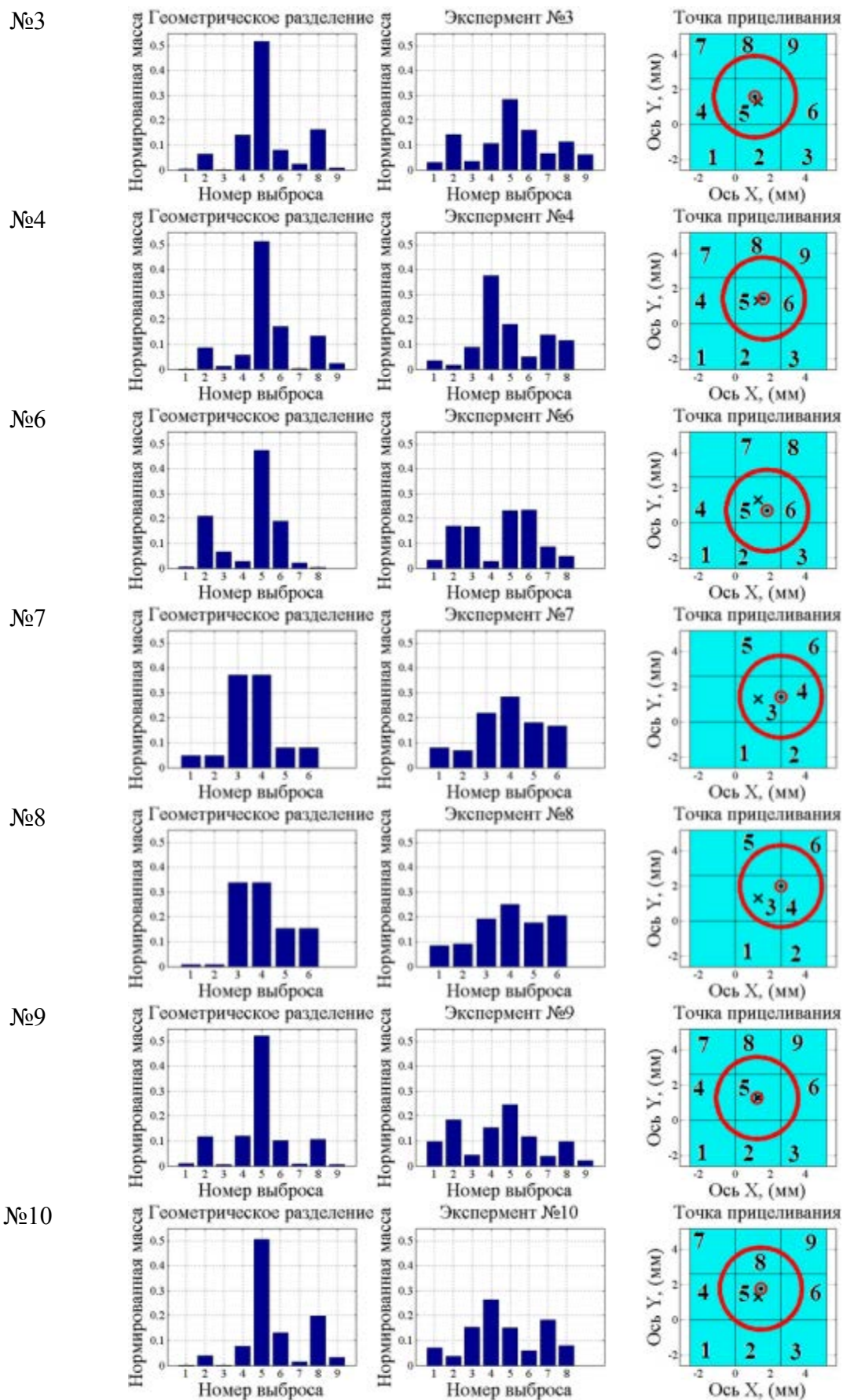
Как известно, при разработке защитных конструкций экранного типа, призванных уменьшить риск повреждения космического аппарата при столкновении с высокоскоростными частицами космического мусора или метеороидами, от всей защитной конфигурации требуется, в частности, чтобы наиболее крупные фрагменты, образующиеся при фрагментации ударника, не превышали некоторого критического размера, опасного с точки зрения полного пробивания всей конструкции, включая последний защитный элемент - стенку гермокорпуса аппарата. В связи с этим специальный интерес представляет количество вещества, локализованного в индивидуальной струе и зависимость перераспределения количества вещества между струями для разных точек попадания.

№1



№2







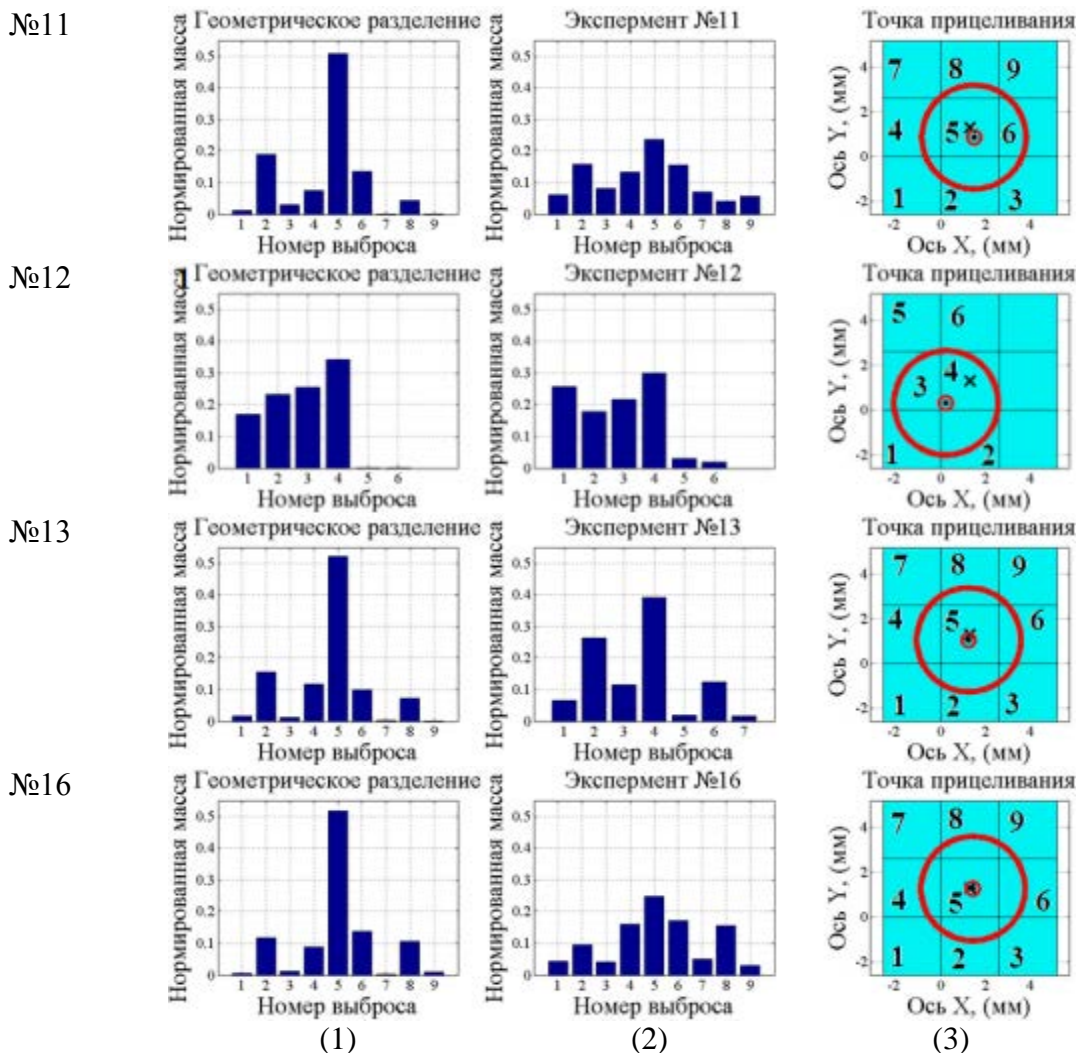


Рис.19. Для тринадцати экспериментов представлены слева направо: 1. нормированное распределение массы струй при геометрическом разделении сферического ударника для точки попадания, восстановленной в эксперименте; 2. экспериментально определённые массы струй; 3. схематическое изображение точки попадания относительно ячеек сетки и проекции на ячейки сферического ударника. Цифрами обозначены номера струй геометрического разделения для соответствующих ячеек.

Для сравнительного анализа геометрическое разбиение было построено для всех точек попадания, восстановленных в экспериментах. На рис.19 для каждого эксперимента представлены нормированное распределение масс при геометрическом разбиении, соответствующем восстановленной точке попадания, нормированное экспериментальное распределение и схематическое расположение точки попадания относительно ячеек сетки с контуром проекции сферического ударника на сетку. Цифры в ячейках обозначают номера соответствующих струй нормированного распределения при геометрическом разделении сферического ударника.

Для сравнения профилей нормированных распределений геометрического разделения с экспериментальными данными нужно сперва сравнить общее

количество струй и если количество струй совпадает, то можно сравнивать попарно струи с одинаковыми номерами.

Из сравнения диаграмм геометрического разделения и экспериментальных данных на рис.19 можно сделать предположение, что при одинаковой точке попадания сохраняется качественный вид профиля струй. Например, в экспериментах №№2 и 3 имеется одна наиболее интенсивная по массе струя 5, четыре менее интенсивных струи 2, 4, 6 и 8 и четыре наименее интенсивных струи 1, 3, 7 и 9. То же самое относится к экспериментальному распределению в эксперименте №16. Девять струй в этом эксперименте также делятся по интенсивности на три группы: струя 5 – самая интенсивная центральная струя и две группы симметрично расположенных менее интенсивных струй: группа (2-4-6-8) и группа (1-3-7-9) (группы близких по интенсивности струй будем заключать в круглые скобки, разделяя номера внутри скобок дефисом).

В случае эксперимента №13 геометрическое разделение имеет профиль, состоящий из трех групп: (5), (2-4-6-8) и (1-3-7-9). Такой профиль хорошо подпадает под I-й тип распределения. Однако профиль экспериментального распределения состоит из семи струй с ассиметричным распределением масс и может быть классифицирован как струя IV-ого типа. Данное несоответствие профилей указывает на достаточно большую погрешность измерения точки попадания в данном эксперименте.

В случае эксперимента №9 струя 1 практически равна струе 9 и даже чуть больше последнего, что позволяет классифицировать это распределение как распределение IV-ого типа, хотя местоположение восстановленной точки попадания и распределение струй при соответствующем ей геометрическом разделении соответствуют распределению по типу I. То же самое касается и эксперимента №11, в котором геометрическое разделение удовлетворяет критериям, относящим его к типу I, в то время как в экспериментально полученном распределении интенсивность струи 8 сопоставима с интенсивностью струй наименее интенсивной группы, хотя его местоположение в профиле диаграммы должно соответствовать средней по интенсивности группе.

Если ввести такое понятие как сигнатура профиля распределения струй, т.е. порядок номеров струй, выстроенных в порядке, когда интенсивность каждой следующей струи больше предыдущей (больше или равен в пределах одной группы струй), то вообще говоря, сигнатуры профиля струй для геометрического разделения и экспериментального распределения вероятнее всего должны, совпадать при условии близости точек попадания. При этом в зонах совпадения эта зависимость должна быть непрерывной, а сами области не иметь разрывов. Для примера сигнатурой профиля распределения струй по массе I-го типа при геометрическом разделении сферического ударника (рис.13(б)) будет такая последовательность (1-3-7-9)-(2-4-6-8)-5, где скобки обособляют группы струй близкие по интенсивности.

Показательным с этой точки зрения являются распределения эксперимента №7. Профили распределений струй геометрического разделения и экспериментальных данных соответствуют сигнатуре (2-1)-(6-5)-(3-4), (есть три группы интенсивности соответственно (2-1), (6-5) и (3-4)), что можно отнести к распределению III-го типа с сигнатурой (1-2-5-6)-(3-4), профиль распределения геометрического разделения которого приведен на рис.17. Следуя этим рассуждениям к распределению III-го типа можно было бы отнести распределение эксперимента №8 – полагая, что сигнатура профиля определяется

как (1-2-5-6)-(3-4) и совпадает с сигнатурой эксперимента №7. При этом сигнатуру профиля геометрического разбиения, построенную по восстановленной точке попадания эксперимента №8, которая, казалось бы, тоже может быть определена как (1-2-5-6)-(3-4), тем не менее, стоит отнести к распределению II-ого типа, потому что струи 1 и 2 в этом распределении много меньше по интенсивности, чем струи 5 и 6 и, пренебрегая ими, получаем сигнатуру (5-6-3-4), соответствующую распределению типа II (рис.15). Тут также можно упомянуть отмеченную выше асимметричность расположения струй (1-2) и (5-6) относительно линии проходящей через струи (3-4), что говорит в пользу II-ого типа распределения для данного эксперимента. Вдобавок следует считать, что по близости интенсивностей струй разбиение по группам в сигнатуре профиля эксперимента №8 все же должно быть таким (1-2)-(5-3-6-4), что делает это распределение ближе к II-ому типу.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В данной работе высокоскоростной удар по сеточной преграде моделировался каплей жидкости, падающей на сетку. Возможность и мотивация такого подхода применительно к задачам эжекции при высокоскоростном ударе ранее подробно обсуждалась в работе [1]. Известно, что эксперименты по взаимодействию тел со скоростями более 2 км/сек являются весьма дорогостоящим мероприятием. Кроме этого, в экспериментах по высокоскоростному удару весьма ограничены возможности экспериментального наблюдения фрагментации ударника in-situ. С другой стороны при падении капли жидкости на сетку наблюдается картина схожая с описанной во введении картиной фрагментации алюминиевого ударника на стальной сетке. Такое внешнее сходство не случайно. При ударе металлического ударника по металлической мишени при скоростях удара в несколько км/сек материал течет подобно жидкости и прочностными эффектами можно пренебречь по сравнению с инерционными эффектами. Формально это выражается в малости отношения  $Y/\rho V_i^2$ , где  $Y$  и  $\rho$  – предел текучести и плотность материала ударника и мишени,  $V_i$  – скорость удара. Для алюминиевых сплавов  $Y \leq 0.4$  ГПа. Таким образом, учитывая, что характерная скорость в экспериментах, которые моделируются, была  $V_i \approx 3 \div 7$  км/сек, имеем оценку  $Y/\rho V_i^2 \leq 0,016$ , т.е. отношение  $Y/\rho V_i^2$  действительно мало.

2. Цель работы состояла в том, чтобы с помощью модельных экспериментов с жидкостью выяснить характер фрагментации ударника (капли) в зависимости от точки попадания при столкновении ударника с сеточной преградой. Точкой попадания является геометрическая точка пересечения линии движения ударника с плоскостью преграды. В работе нас интересовали следующие характеристики фрагментации: скорости струй, образующихся в результате движения жидкости сквозь отдельные ячейки сетки после удара капли, их пространственное распределение, а также перераспределение вещества ударника (капли) между струями. Получены следующие результаты:

- Измерение скорости капли и струй с помощью высокоскоростной цифровой камеры до и после взаимодействия с сеткой, показали наличие кумулятивного эффекта с коэффициентом увеличения скорости до 1.5 раз. Этот результат согласуется с теоретическими расчетами и натурными экспериментами, выполненными нами ранее (см. [4,5,8]).



- Оценки распределения вещества капли между струями показали существенную зависимость этого распределения от точки попадания капли в сетку. Дана классификация распределения вещества в струях по группам, в зависимости от близости точки попадания к одному из центров симметрии ячейки сетки, а именно: пустому центру ячейки, узлу ячейки (точка пересечения проволок), срединной точки на проволоке между двумя соседними узлами.
- Проведено сравнение распределения вещества капли между струями в процессе динамической фрагментации с геометрическим разбиением, соответствующим квазистатическому продавливанию вещества капли сквозь ячейки сетки. Показано, что при динамической фрагментации капли интенсивность струй существенно сглаживается за счет перераспределения вещества между струями, при этом массы наибольших струй существенно уменьшаются по сравнению с квазистатическим продавливанием.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Myagkov N.N., Shumikhin T.A. *Modeling of high-velocity impact ejecta by experiments with a water drop impacting on a water surface* // Acta Mechanica. – 2016. – Vol.227. – Pp.2911-2924.
2. Grady D.E. *The Spall Strength of Condensed Matter* // J. Mech. Phys. Solids. – 1988. – Vol.36. – Pp.353-384.
3. Огородников В.А., Садовый А.А., Тюнькин Е.С. *О вязкости алюминия и свинца в ударно-волновых экспериментах* // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1995. – №1. – С.5-11.
4. Калмыков П.Н., Лапичев Н.В., Михайлов И.А., Мягков Н.Н., Сальников А.В., Шумихин Т.А. *Экспериментальные исследования фрагментации сферических алюминиевых ударников на сплошных и сеточных экранах при скоростях удара до 7 км/сек* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2018. – Т.24. – №1. – С.46-69.
5. Калмыков П.Н., Колчев С.В., Лапичев Н.В., Михайлов И.А., Мягков Н.Н., Номаконова В.Н., Сальников А.В., Шумихин Т.А. *Экспериментальные исследования фрагментации сферических алюминиевых ударников на стальных сеточных экранах при скоростях 5...7 км/с* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. – Т.21. – №1. – С.3-20.
6. Мондольфо Л.Ф. *Структура и свойства алюминиевых сплавов*. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.
7. *Свойства элементов. Ч.1. Физические свойства* / Справочник. 2-е изд. М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
8. Myagkov N.N., Shumikhin T.A., Bezrukov L.N. *Experimental and Numerical Study of Peculiarities at High-Velocity Interaction between a Projectile and Discrete Bumpers* // Int. J. Impact Engng. – 2010. – Vol.37. – Pp.980-994.
9. Шумихин Т.А., Безруков Л.Н., Мягков Н.Н. *Модельный эксперимент, проясняющий механизм фрагментации высокоскоростного ударника на дискретных экранах* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2007. – Т.13. – №3. – С.341-355.

## REFERENCES

1. Myagkov N.N., Shumikhin T.A. *Modeling of high-velocity impact ejecta by experiments with a water drop impacting on a water surface*. Acta Mechanica, 2016, Vol.227, Pp.2911-2924.
2. Grady D.E. *The Spall Strength of Condensed Matter*. J. Mech. Phys. Solids, 1988, Vol.36, Pp.353-384.
3. Ogorodnikov V.A., Sadovoi A.A., Tyun'kin E.S. et al. *Viscosity of aluminum and lead in shockwave experiments*. J. Appl. Mech. Tech. Phys., 1995, Vol.36, Iss.1, Pp.4-9.
4. Kalmykov P.N., Lapichev N.V., Mikhaylov I.A. et al. *Eksperimental'nye issledovaniia fragmentatsii sfericheskikh aliuminievykh udarnikov na sploshnykh i setochnykh ekranakh pri skorostiakh udara do 7 km/sek [Experimental study of fragmentation of spherical fluminum projectiles on continuous and mesh bumpers at velocities up to 7km/s]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2018, Vol.24, No.1, Pp.46-69.
5. Kalmykov P.N., Kolchev S.V., Lapichev N.V. et al. *Eksperimental'nye issledovaniia fragmentatsii sfericheskikh aliuminievykh udarnikov na stal'nykh setochnykh ekranakh pri skorostiakh 5...7 km/s [Experimental study of the fragmentation of spherical aluminum projectiles on steel mesh bumpers at the velocity of 5... 7 km/s]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2015, Vol.21, No.1, Pp.3-20.
6. Mondolfo L.F. *Aluminum alloys: structure & properties*. London, Butterworths, 1979, 986 p.
7. *Svoistva elementov. Ch. 1. Fizicheskie svoistva. Spravochnik. [Properties of elements. Part 1. Physical properties]*. Moskva, Metallurgiiia, 1976, 600 p.
8. Myagkov N.N., Shumikhin T.A., Bezrukov L.N. *Experimental and numerical study of peculiarities at high-velocity interaction between a projectile and discrete bumpers*. Int. J. Impact Engng., 2010, Vol.37, Pp.980-994.
9. Shumikhin T.A., Bezrukov L.N., Myagkov N.N. *Model'nyi eksperiment, proiasniaiushchii mekhanizm fragmentatsii vysokoskorostnogo udarnika na diskretnykh ekranakh [Modeling experiment that reveals mechanics of fragmentation of high-velocity projectile on discrete bumpers]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2007, Vol.13, No.3, Pp.341-355.

Поступила в редакцию 7 апреля 2018 года.

---

### Сведения об авторах:

Шумихин Тимофей Александрович – к.т.н., с.н.с., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: [shumikhin@iam.ras.ru](mailto:shumikhin@iam.ras.ru)

Пыриков Матвей Дмитриевич – м.н.с., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail; e-mail: [m.pirikov@yandex.ru](mailto:m.pirikov@yandex.ru)