

5. Экспериментальная проверка результатов численного исследования газочапельного потока в канале и на начальном участке струи.

Численное моделирование экспериментов различных исследователей /132,182,185,224/ показало, что, при использовании предложенной модели газочапельного потока (см. п.2), достаточно хорошо совпадают расчетные и экспериментальные средние скорости фаз на срезе сопла, распределения давления вдоль стенки сопла.

Но расчеты, по предложенной автором в п.2 модели, позволяют также сделать вывод о пространственной структуре и других особенностях потока. В частности, численные расчеты показали, что в высоконцентрированном газочапельном потоке:

- 1) пленка весьма устойчива при дозвуковых скоростях газа;
- 2) жидкость из распадающейся в результате резонансных колебаний пленки разгоняется на начальном участке струи;
- 3) в расширяющейся части сопла у стенки существует область, где объемная доля капель значительно ниже, чем средняя по потоку;
- 4) в зоне повышенного содержания жидкости у среза повышенное по сравнению с окружающей средой давление;
- 5) параметры потока колеблются из-за особенностей процесса смешения жидкости и газа;
- 6) верхняя граница диаметров капель определяется гидродинамикой потока, а не дисперсностью на входе.

В этой главе приводятся данные проведенных автором и другими исследователями натуральных экспериментов по исследованию газочапельных потоков, подтверждающие численные результаты. Все опыты проводились на специально оборудованном стенде /103/. В соответствии с целью работы экспериментальные данные, с одной стороны, позволят получить описание внутренней структуры и выделить основные особенности взаимодействия фаз в

газокапельном сопловом течении при значительном (более 10) массовом содержании жидкости, с другой стороны, покажут возможности многожидкостной математической модели в этой области. Дело в том, что полноценный физический эксперимент трудоемок и требует создания специальных средств измерения и обработки, поэтому в данной работе численный и физический эксперименты дополняют друг друга.

5.1. Сравнение расчетных и экспериментальных средних характеристик потока

Для «базового» и близких к нему потоков на специально оборудованном стенде /103/ проводилось измерение средних характеристик, а именно: тяги сопла (импульса струи на срезе сопла), расходов воды и воздуха, температуры воды на входе и выходе из сопла, изменения давления вдоль стенки сопла.

Для оценки скорости фаз на срезе сопла использовался тягомер с индуктивным датчиком и стрелочным вольтметром, точность измерений составляла 0.1 кг. Тягомер предварительно тарировался гирьками в диапазоне усилий от 2 до 3 кг, так как ожидаемая тяга сопла находится в этом диапазоне. Для «базового» потока тяга составила 2.45 кг или 24 Н (см. табл. 5.1).

После камеры смешения, где создается газокapельный поток, следует цилиндрический канал, за которым начинается сужающееся-расширяющееся сопло. В канале у дренажного отверстия к первому манометру была установлена хромель-капельная термопара на расстоянии 1.2 мм от стенки (диаметр головки термопары 1 мм). Точность показаний термопары $\pm 1^{\circ}$. Измерения давления проводились образцовыми манометрами (1 класс точности). Результаты приведены на рис.5.1, 5.2 и в таблицах 5.1, 5.2 (см. также Приложение 3). Так как на протяжении 8 секунд после запуска давление в контрольных точках потока меняется (рис.5.1), показания манометров и термопар брались по истечении указанного времени. При этом полагалось, что

термопара дает температуру капель. Измерения температуры показали, что температура воды практически не меняется вдоль сопла.

Расход газа измерялся с помощью мерной шайбы. Расход жидкости определялся по показаниям турбинного расходомера.

По полученным данным можно определить средние скорости газа и жидкости из следующей системы уравнений:

$$I = G_p U_p + G_g U_g$$

$$G_p = \rho_p U_p S_p$$

$$G_g = \rho_g U_g S_g$$

$$S_p + S_g = S$$

$$\rho_g = P_g / RT_g$$

где I – тяга сопла (импульс потока на срезе сопла), G - массовый расход, U – скорость, ρ – плотность, S – площадь канала или площадь, занятая фазой, P – давление, R – газовая постоянная, T – температура, g – индекс газа, p – индекс капель (жидкой дискретной фазы). Скорость и эффективное сечение для каждой фазы (объемная концентрация) определяются из системы в предположении, что $T_g = T_p = \text{const}$. Эксперимент (см. табл.5.2) и расчеты (см. п.4.1) подтверждают это предположение.

Сравнение расчетных и экспериментальных средних скоростей фаз для «базового» потока приведено в таблице 5.1.

Таблица 5.1.

Суммарный импульс и средние скорости воды и воздуха по результатам эксперимента.

	Wg (м/с)	Wp (м/с)	Импульс (Н)
Экспериментальное значение	110	57	24
Расчет, равномерное распределение фаз на входе в сопло	141	64.1	26.54
Расчет, распределение фаз на входе в сопло соответствует рис.4.4	126	65.5	27.5

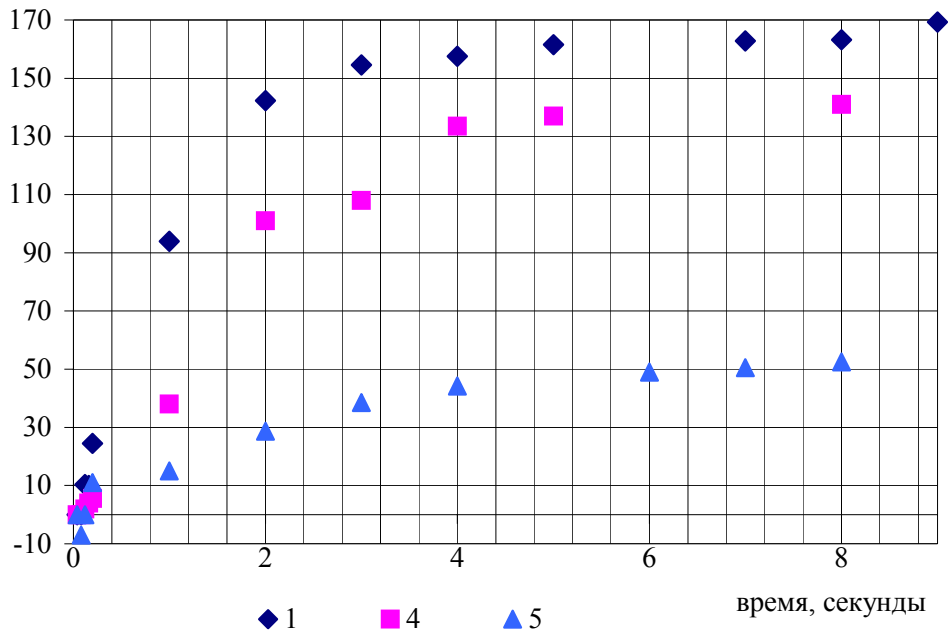


Рис.5.1. Отклонения стрелок манометров от нулевого положения с момента запуска экспериментальной установки (в градусах на расстояниях 190 мм (1), 90.4 мм (4) и 61 мм (5) от среза сопла).

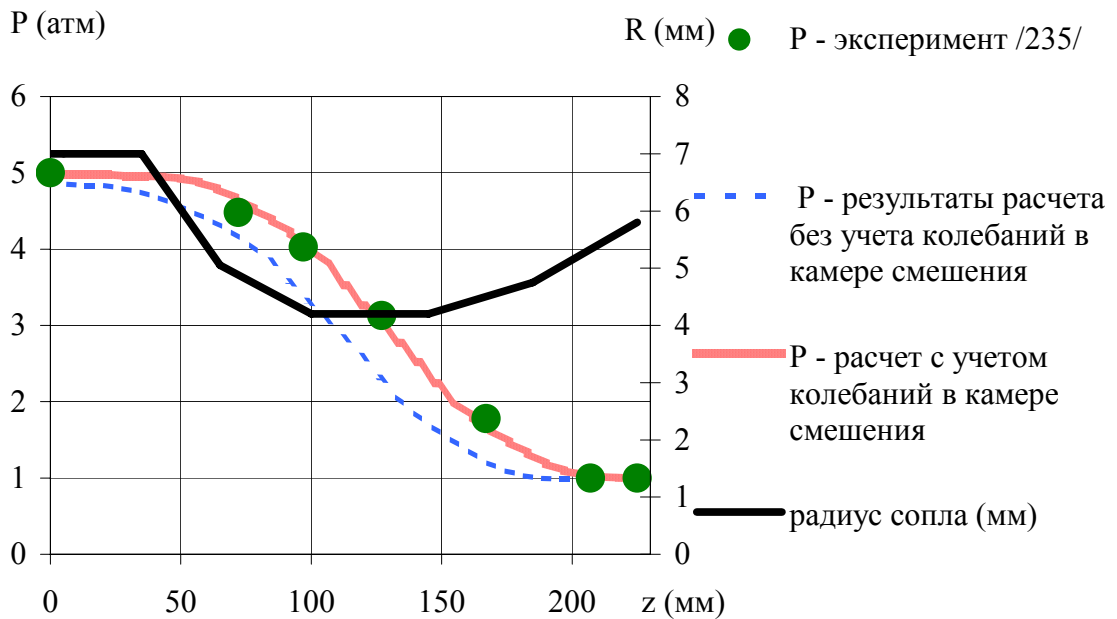


Рис.5.2. Результаты измерения давления вдоль стенки сопла.

То, что расчетные величины больше экспериментальных, является следствием заниженных потерь на трение (в случае завышенного коэффициента аэродинамического сопротивления скорость газа была бы еще больше). Действительно, если сравнить средние скорости капель, то видно, что расчет также превышает эксперимент. Справедливость этого пункта подтверждается экспериментами /94/, в которых отмечен рост сопротивления при пульсациях расхода. В свою очередь эти пульсации неизбежно возникают при колебаниях в камере смешения. Выбор более точных коэффициентов трения, чем определяемые формулами (2.31-2.36), качественно не меняет результатов, но требует достаточно сложной экспериментальной проверки, связанной с учетом особенностей рассматриваемых потоков (канал переменного сечения, отсутствие автомодельности, периодичность процессов и так далее), поэтому в данной работе эта проблема не рассматривалась.

Таблица 5.2.

Результаты измерения температуры воды на входе и выходе из сопла.

№ опыта (температура воды в баке)	Атмосферное давление, мм.рт.ст.	Температура наружного воздуха у сопла, °С	Показания термопары у 1-го манометра, °С	Показания термопары на срезе, °С
1-вода (12 ⁰ С)	742	17	13	11
2-вода (16 ⁰ С)	745	22	16	17
3-вода (16 ⁰ С)	745	21.5	16	17
4-вода (19 ⁰ С)	743	24	19	19-20
5-вода (18 ⁰ С)	743	23.5	18	19-20

5.2. Пленка у среза сопла.

Эксперименты /29/ по измерению расхода воды у среза сопла показали, что более 50% жидкости течет в достаточно узкой (шириной около 1.8 мм) кольцевой зоне у стенки сопла. При таком распределении воды очевидно, что

на выходе из сопла есть пленка. Для изучения пленки было проведено фотографирование струи у среза сопла в свете вспышек разной длительности¹.

Типичные фотографии² струи у среза сопла (сопло справа) в свете вспышки $4 \cdot 10^{-4}$ с см. рис.5.3-5.5, а в свете вспышки 10^{-6} с см. рис.5.6-5.8. Съемка проводилась «на просвет» или через щель (так называемый световой «нож»).

Видно, что на границе потока при выходе из канала летит распадающаяся на фрагменты жидкая пленка (рис.5.4, рис.5.8). Эксперименты /40,41,44/ также свидетельствуют о существовании пленки даже при высокой скорости газа около стенок канала. Все это подтверждает полученный численно вывод об устойчивости пленки при дозвуковых скоростях воздуха на смачиваемой поверхности в рассматриваемых газокпельных потоках с высокой концентрацией капель.

На фотографиях можно наблюдать капли диаметром от 70 до 400 мкм (у границы потока). По трекам³ определены скорость и угол разлета некоторых капель. Скорость находится в диапазоне от 4 до 34 м/с, угол – до $17,5^{\circ}$, подробнее см. Приложение 5. Заметим, что угол раскрытия конуса сопла составляет $0,75$ градуса, что значительно меньше угла разлета капель. Наблюдаемые капли образованы из пленки, поэтому можно считать, что скорость пленки близка к максимальной скорости капель, то есть ≈ 34 м/с (по расчету 33 м/с, см. рис.4.20).

На рис. 5.3, 5.4, 5.6 хорошо видно волнистую границу струи. Симметричная картина колебаний подтверждает достаточно хорошую осевую симметрию потока. Расстояние между гребнями волн увеличивается по мере удаления от среза сопла, то есть жидкость разгоняется (эти расстояния составляют соответственно 0,9, 1,25 и 1,7 диаметра сопла), так как, с одной

¹ Для этих экспериментов предоставили оборудование и оказали помощь в проведении опытов сотрудники группы В.П.Фирсова (кафедра 204 МАИ).

² Полностью весь набор фотоснимков см. в папке «Экспериментальное исследование потока на выходе из сопла» на прилагаемом компакт-диске.

³ Трек – это изображение капли на фото, вытянутое по направлению движения из-за длительности экспозиции.

стороны, отсутствует трение пленки о твердую стенку, с другой стороны, ориентированные по потоку фрагменты (кластеры) жидкости имеют меньшую силу сопротивления, чем волны и получающиеся из пленки капли.

Роль колебаний в распаде пленки, а, следовательно, в процессе смешения газокпельной струи с окружающим воздухом достаточно очевидна. Попробуем выяснить природу этих колебаний. Из фото 5.4, 5.6 видно, что колебания идут с нарастающей амплитудой, то есть имеет место резонанс. Следовательно, это собственные колебания выходящего из сопла потока, а не привнесенные извне (колебания сопла, шлангов, деталей редуктора и т.п.). Очевидно, что скорость передачи колебаний связана со скоростью звука. Действительно, при использовании результатов расчета (см. Приложение 24) и методики /149/ (см. п.4.2.4) скорость звука на срезе составит ≈ 45 м/с, а частота, соответственно, 3916 Гц. Сопоставление расчета и эксперимента (рис.5.9) показывает хорошую точность прогноза колебаний, и подтверждает полученный численно вывод о том, что жидкость из распадающейся в результате резонансных колебаний пленки разгоняется на начальном участке струи.

Также периодически меняется (от 0° до 9°) угол раскрытия струи (это угол между внешней границей пленки и осью симметрии сопла), что особенно хорошо видно при последовательном просмотре рис.5.3-5.8 на компьютере. Это подтверждает расчетные результаты о колебаниях параметров потока из-за особенностей процесса смешения жидкости и газа и связи колебания угла раскрытия струи с выносом аэрозольных «пробок» из сопла.



Рис.5.3. Фото струи «на просвет» у среза сопла (сопло справа) в свете вспышки $4 \cdot 10^{-4}$ с.



Рис.5.4. Фото струи «на просвет» у среза сопла (сопло справа) в свете вспышки $4 \cdot 10^{-4}$ с.

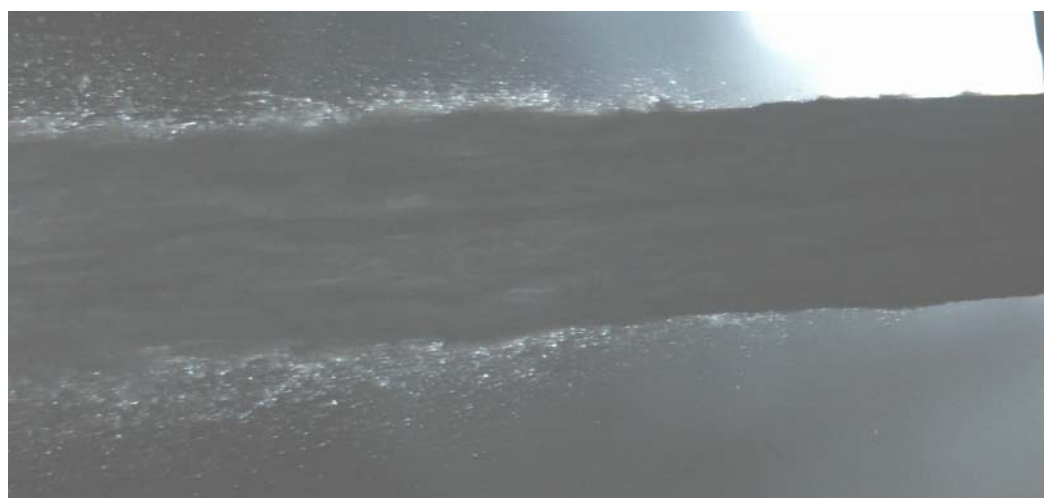


Рис.5.5. Фото струи «на просвет» у среза сопла (сопло справа) в свете вспышки $4 \cdot 10^{-4}$ с.

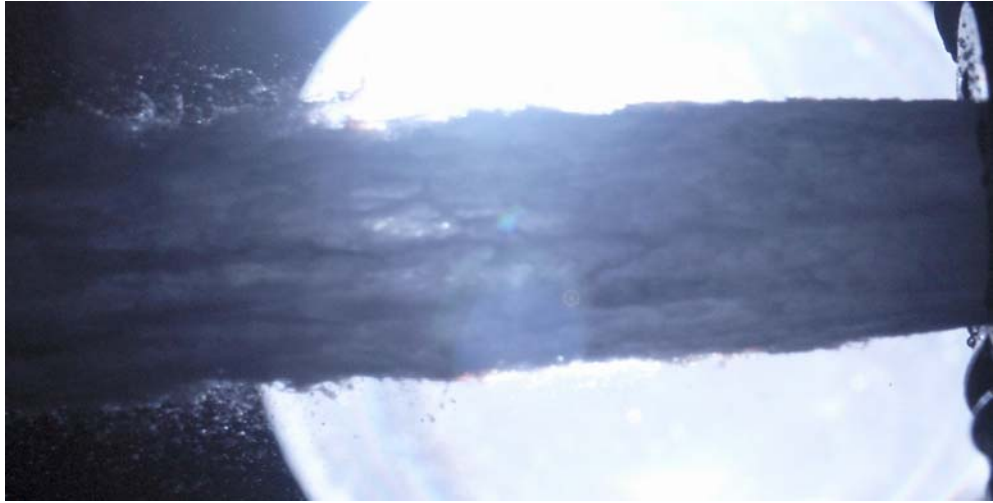


Рис.5.6. Струя «на просвет» у среза сопла (сопло справа) при вспышке 10^{-6} с.

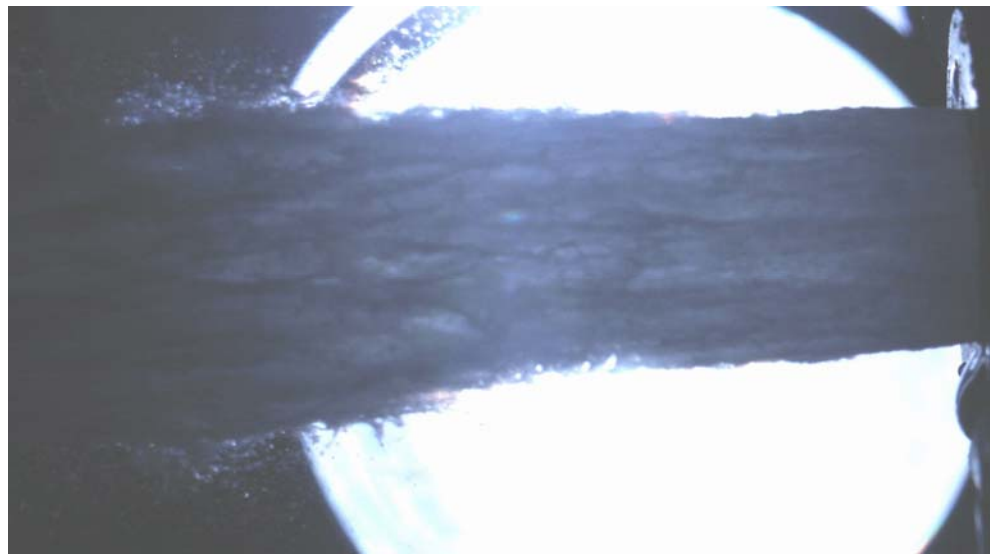


Рис.5.7. Струя «на просвет» у среза сопла (сопло справа) при вспышке 10^{-6} с.

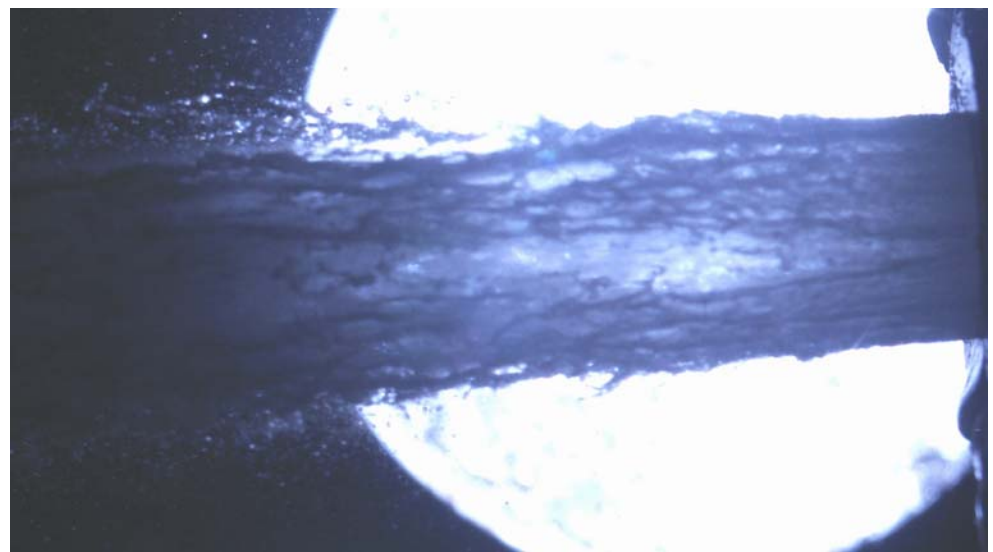


Рис.5.8. Струя «на просвет» у среза сопла (сопло справа) при вспышке 10^{-6} с.

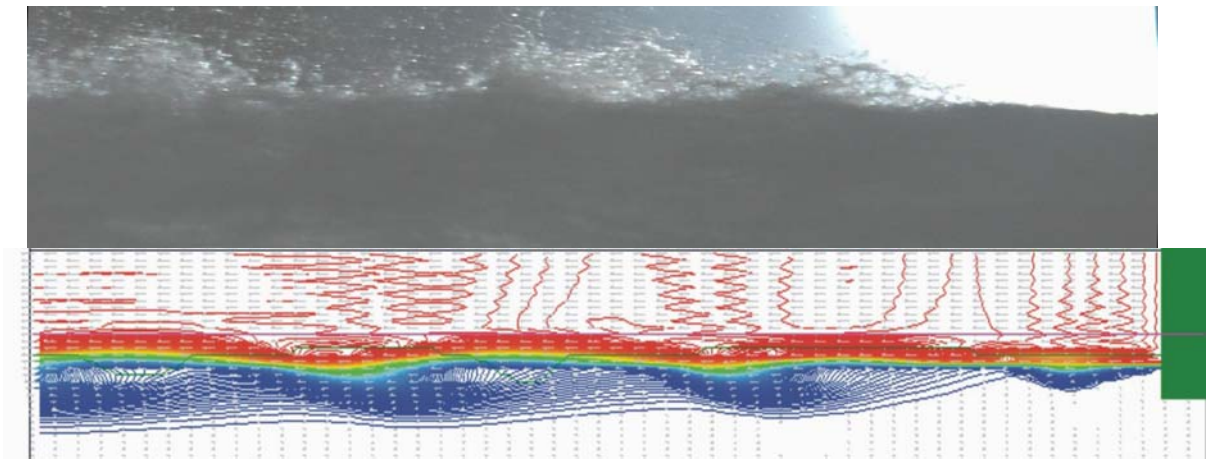


Рис.5.9. Сопоставление полученной в численном эксперименте границы капельной струи с результатами фотосъемки.

5.3. Зондовые измерения

В этом параграфе экспериментально подтверждаются полученные автором численно данные о том, что в расширяющейся части сопла у стенки существует область, где объемная доля капель значительно ниже, чем средняя по потоку; а также что в зоне повышенного содержания жидкости у среза повышенное по сравнению с окружающей средой давление;

Исследуемый поток оптически плотный, поэтому для получения параметров потока у среза были использованы:

зонд I типа - пробоотборник,

зонд II типа - измеритель статического давления,

зонд III типа – измеритель полного давления набегающего потока⁴,

зонд IV типа – электрозонд.

⁴ В работе /30/ учитывается потеря импульса при ударе капель о зонд, соответственно полагается, что зонд меряет не полное давление, а импульс.

5.3.1. Описание методики измерений зондами I и III типов.

Зондовый метод измерения расхода жидкости и полного давления газокапельного потока описан в /5,29,30,84,211/. Принципиальная схема метода изображена на рис.5.10.

Измерения проводятся зондом, имеющим входное отверстие диаметром d_n , вблизи которого замеряется статическое давление в канале зонда P_n . Зонд работает в двух режимах - измерения массовой концентрации дисперсной фазы (рис.5.10-а) и измерения импульса гетерогенной среды (рис.5.10-б). При измерении массовой расходной концентрации жидкой фазы зонд соединяется с системой отсоса (вакуумный отсос), и работает в режиме изокинетического отбора (рис.5.10-а), при котором статическое давление внутри зонда равно статическому давлению вне зонда. Отобранная проба разделяется с помощью сепаратора на фазы с последующим измерением расхода жидкости G_f - объемным методом, а расхода газа G - дроссельным расходомером. Здесь индексом f обозначены параметры капель, параметры газа индексов не имеют.

При измерении полного давления гетерогенной среды отверстие зонда заполнено жидкостью (рис.5.10-б). При встрече струйки многофазного потока с зондом происходит торможение потока. В этом случае P_n - полное давление. Отмечу, что изложенная здесь методика использовалась в экспериментах /29,182,211,240-242/ и несколько отличается от способа измерения полного давления работ /5,84/.

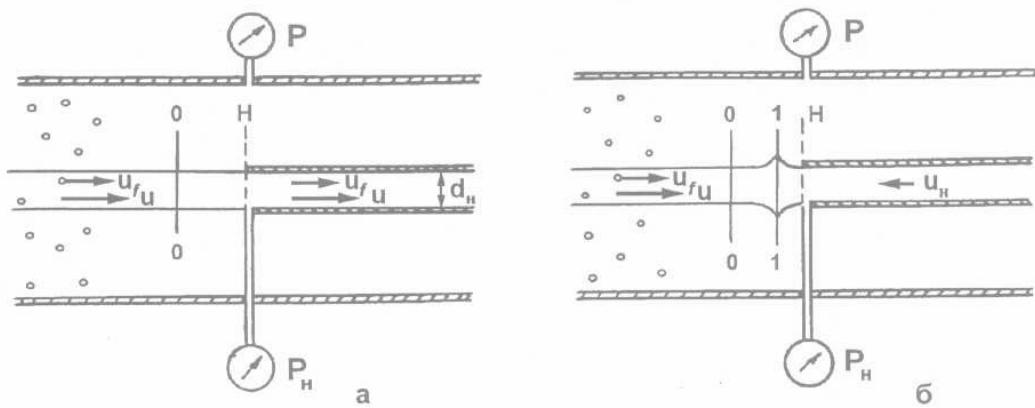


Рис.5.10. Схема зондовых измерений по /29,30/.



Рис.5.11. Фотографии используемых зондов (I, II и III типов).

5.3.2. Результаты, полученные с помощью зондов I и III типов.

На рис. 5.12 показаны результаты зондовых измерений импульса P^* и плотности орошения $Gp/Sprobe$ по данным /29,182,211,240-242/. Измерения проводились в сечении на расстоянии 1 диаметр (11.6 мм) от среза сопла. И те, и другие эксперименты проводились на одном и том же стенде, на одной и той же установке, использовалась одна и та же измерительная система. Причина отличия в результатах измерений P^* в том, что поток чрезвычайно чувствителен к малым изменениям расходов воды и воздуха в окрестности оптимального («базового») режима. Это связано с особенностью работы камеры смешения (см. п.4.3).

Сопоставление численных и экспериментальных результатов приведено на рис. 5.13, 5.14 и показало высокую точность прогноза структуры струи и хорошее количественное совпадение расчетных и экспериментальных данных. Отметим, что подбором коэффициентов трения и параметров на входе в сопло можно добиться лучшего совпадения с экспериментальными данными. Но, учитывая отличие P^* в /29/ и /211/, и возможную потерю универсальности коэффициентов трения, в таком повышении точности нет смысла.

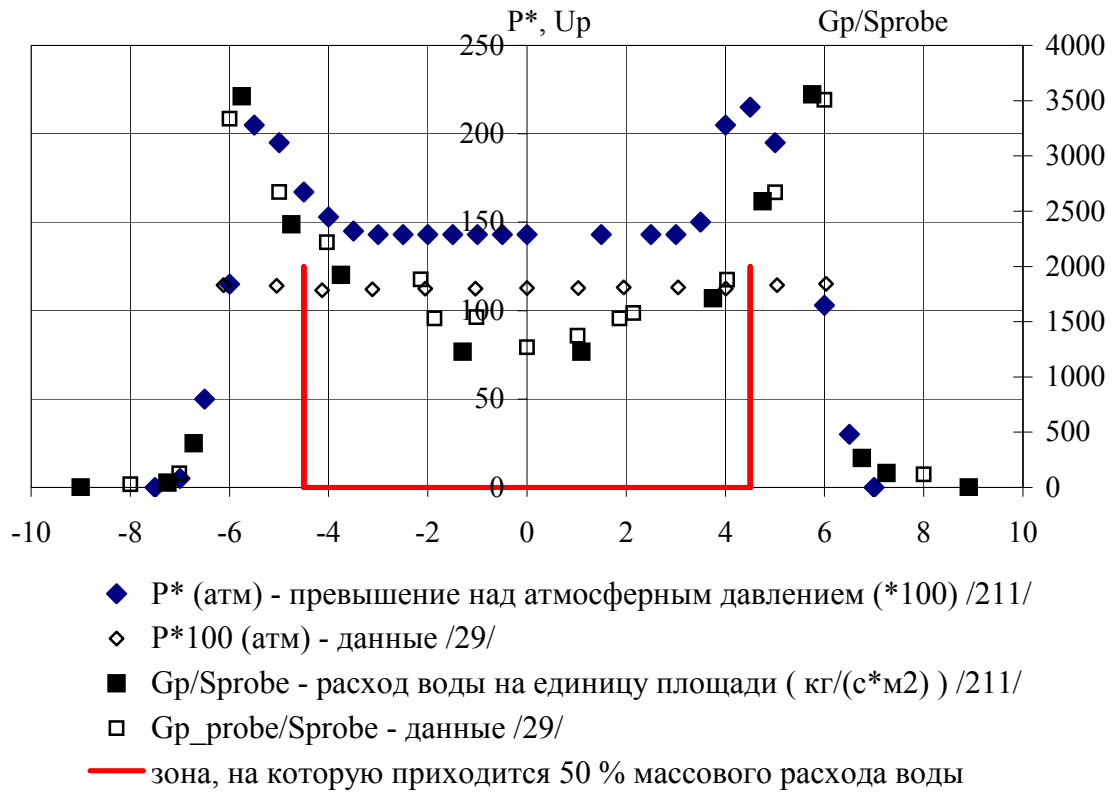


Рис.5.12. Результаты экспериментов /29,182,211,240-242/. Полное давление импульс (P^*) и плотность орошения ($Gp/Sprobe$) на расстоянии 11.6 мм от среза сопла.

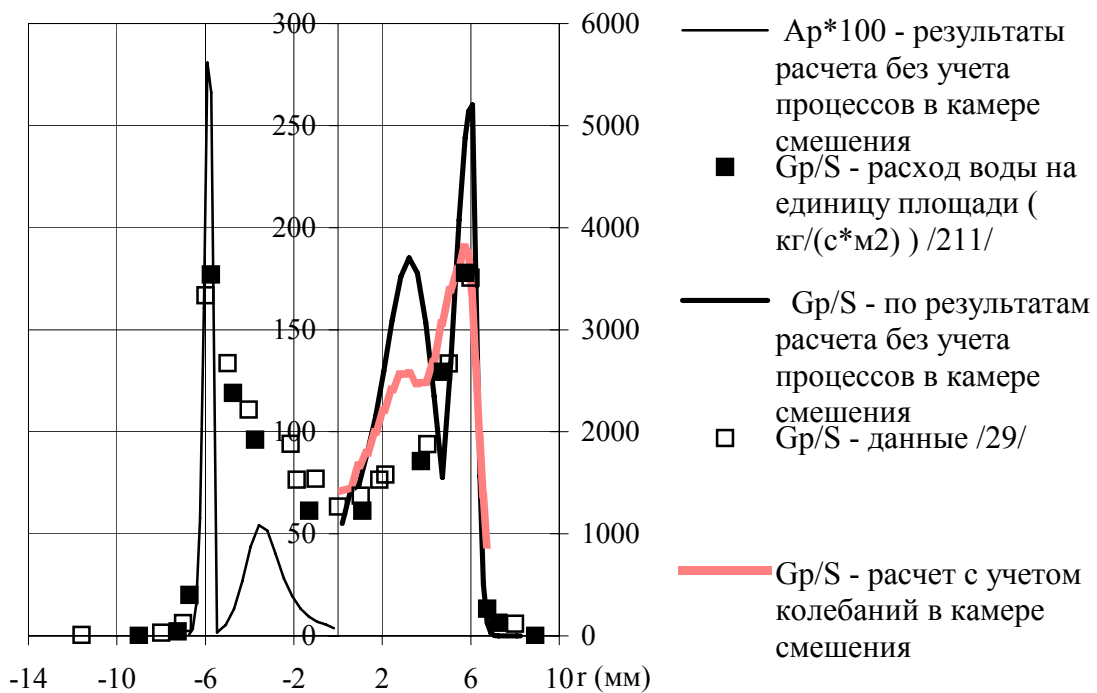


Рис.5.13. Сравнение плотности орошения (Gp/S) у среза сопла в численном и натурном экспериментах.

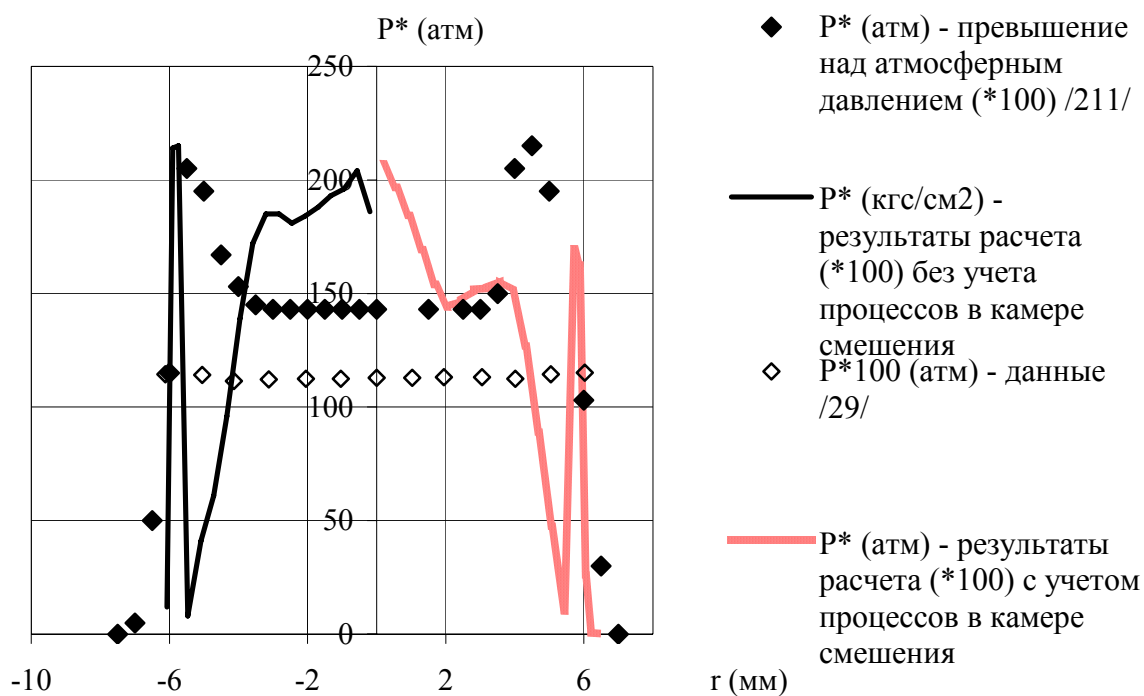


Рис.5.14. Сравнение полного импульса у среза сопла в численном и натурном экспериментах.

5.3.3. Результаты, полученные с помощью зонда IV типа.

Результаты численного моделирования показывают (рис. 4.16, 4.22, 5.13, 5.14), что в расширяющейся части сопла у стенки, как и при малой доле капле (частиц) /70,116,139,140/, существует область (шириной ~ 2 мм), где концентрация капле значительно ниже, чем средняя по потоку /29,182,211,240-242/. На первый взгляд, это противоречит результатам зондовых измерений. Была проведена экспериментальная проверка с использованием электрического зонда⁵ (подробнее см. Приложение 6), схема которого приведена на рис.5.15. Зонд состоит из двух изолированных электродов, у которых проводимы только торцы. Если между торцами образуется жидкая перемычка, то цепь замыкается и сигнал на потенциометре максимальный. Чем меньше жидкости между электродами, тем меньше уровень сигнала.

⁵ Конструктивно зонд похож на использованный в /245/.

Влажный зонд медленно вдвигался в поток на срезе сопла. Сначала, до взаимодействия с пленкой, сигнал от зонда постоянный, затем, при прохождении пленки, начинаются флуктуации (зона 1 на рис. 5.15). После выхода из пленки уровень сигнала резко падает (зона 2 на рис. 5.15), что свидетельствует о малом содержании жидкости в этой зоне. Далее, по мере вхождения зонда в капельное ядро потока, сигнал усиливается до исходной величины (зона 3 на рис. 5.15).

Эксперимент показал, что действительно существует узкая область, где жидкости практически нет (область 2 резкого падения напряжения U на рис.5.15). Существует эта зона при высокой массовой доле жидкости и относительно толстой пленке, по-видимому, потому что в расширяющейся части сопла резко падает интенсивность выпадения капель в пленку, а интенсивность уноса капель с пленки недостаточно высока. То, что эта зона не проявилась в экспериментах /29,211/, объясняется тем, что для измерения плотности орошения использовался зонд диаметром $\sim 3,5$ мм, а для измерения импульса – $2,5$ мм, а ширина зоны малых концентраций $\sim 0,5$ мм.

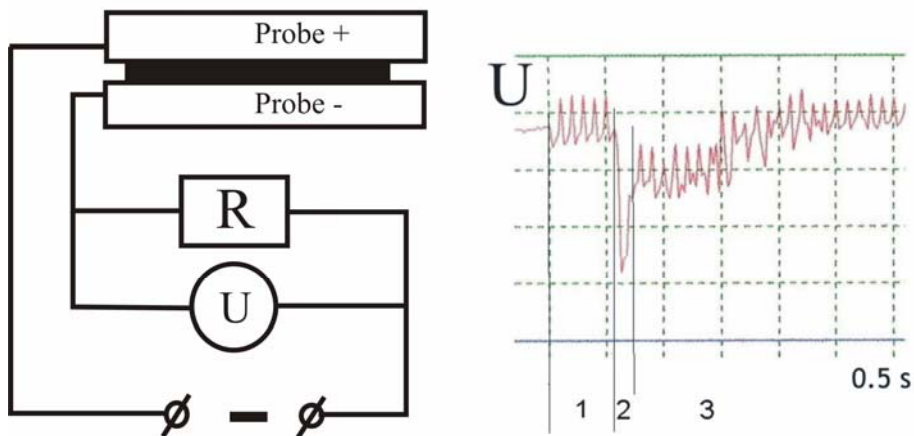


Рис.5.15. Изменение напряжения при вдвигании зонда в поток на глубину ~ 5 мм. Горизонтальная ось – время (горизонтальная сторона ячейки сетки соответствует 0.5 секунды), вертикальная – напряжение U . 1 – сигнал из пленки, 2 – сигнал из зоны малой концентрации капель, 3 – сигнал из капельного ядра потока (границы зон отмечены вертикальными сплошными линиями).

5.3.4. Результаты, полученные с помощью зонда II типа.

Расчеты показывают, что в зоне повышенного содержания жидкости у среза должно быть повышенное по сравнению с окружающей средой давление. Для проверки численных результатов были выполнены специальные измерения зондом – измерителем статического давления, которые показали правильность прогноза (рис.5.16) /192,240-242/.

Пониженное давление на оси струи можно объяснить тем, что срывающаяся с кромки сопла пленка дробится не сразу, а на протяжении нескольких сантиметров (рис.5.3-5.8), образуя своеобразный экран, поэтому становится возможным получить поток с перерасширением.

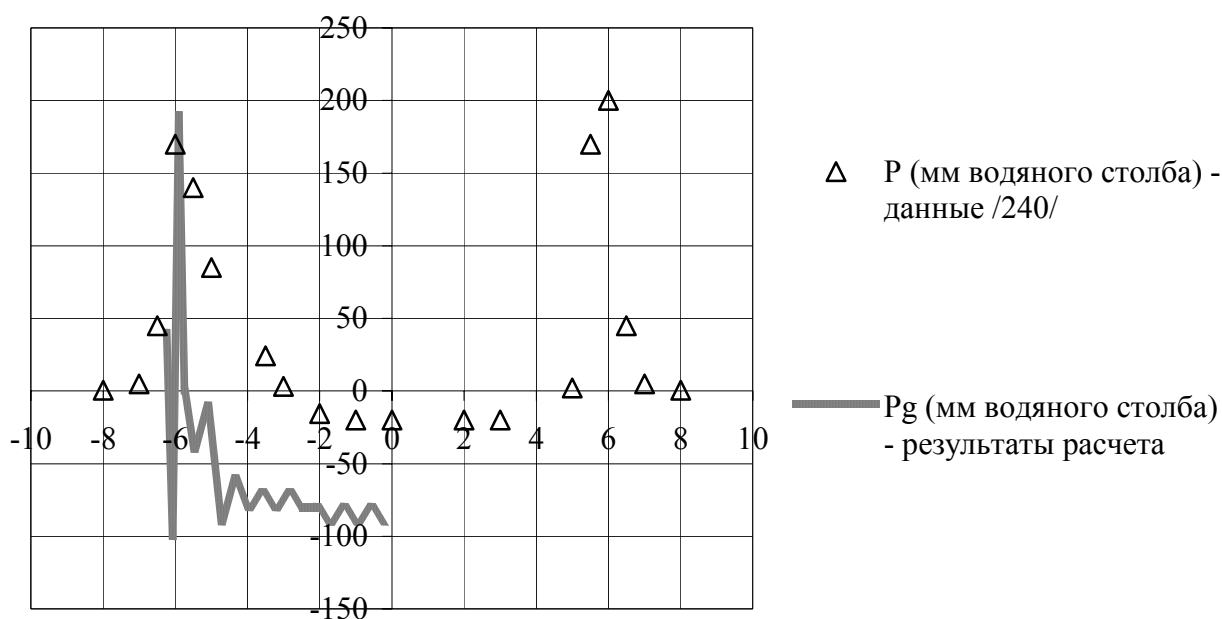


Рис.5.16. Сравнение давления у среза сопла в численном и натурном экспериментах. Колебания сплошной кривой имеют численное происхождение.

5.3.5. Определение скорости капель по результатам зондовых измерений.

Подобно измерениям в газе /85/ показания зонда III типа можно понимать как полное давление дисперсного потока⁶:

$$(P_c + P_{atm}) \cdot S_{probe} + G_p \cdot U_p / 2 + G_g \cdot U_g / 2 = (P^* + P_{atm}) \cdot S_{probe} \quad , \quad (5.1)$$

где P_c – измеренная разность статического и атмосферного давлений; S_{probe} – площадь зонда; P^* – измеренная разность полного и атмосферного давлений; P_{atm} – атмосферное давление. А так как расход воздуха значительно меньше расхода воды и P_c также много меньше P_{atm} , то:

$$G_p \cdot U_p / 2 \approx P^* \cdot S_{probe} \quad (5.2) \quad .$$

Получаемая по формулам (5.1), (5.2) скорость капель не является результатом прямого измерения и погрешность δ в её определении может быть оценена по ГОСТ 8.202-76 /38/:

$$\delta = K_\delta [\sum (\delta_i^2)_{i=1, \dots, m}]^{1/2}, \quad (5.3)$$

где δ_i – погрешность i -ой составляющей суммарной погрешности, m – число составляющих, K_δ – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью (при доверительной вероятности 0.95 $K_\delta = 1.1$). Погрешность измерения P_c и P_{atm} составляет 1%, погрешность в определении S_{probe} 2%, для G_p и G_g погрешности около 1% и 10% соответственно, для P^* ошибка 5%, а для U_g – 11% /29/. В итоге погрешность в определении скорости капель около 18%.

Сопоставление скорости капель, определенной по различным методикам, приведено на рис. 5.17. Видно, что формула (5.1) правильнее отражает структуру потока, чем использованная в /30/, при этом есть хорошее соответствие с результатами численного моделирования /240/.

⁶ В работе А.В.Воронецкого /30/ использовалась формула

$$P_c \cdot S_{probe} + k \cdot G_p \cdot U_p / 2 + G_g \cdot U_g / 2 = (P^* + P_{atm}) \cdot S_{probe} \quad , \quad (*)$$

где $k=2$ по данным /22/, то есть отличие от скорости капель, полученных по (5.1) примерно вдвое.

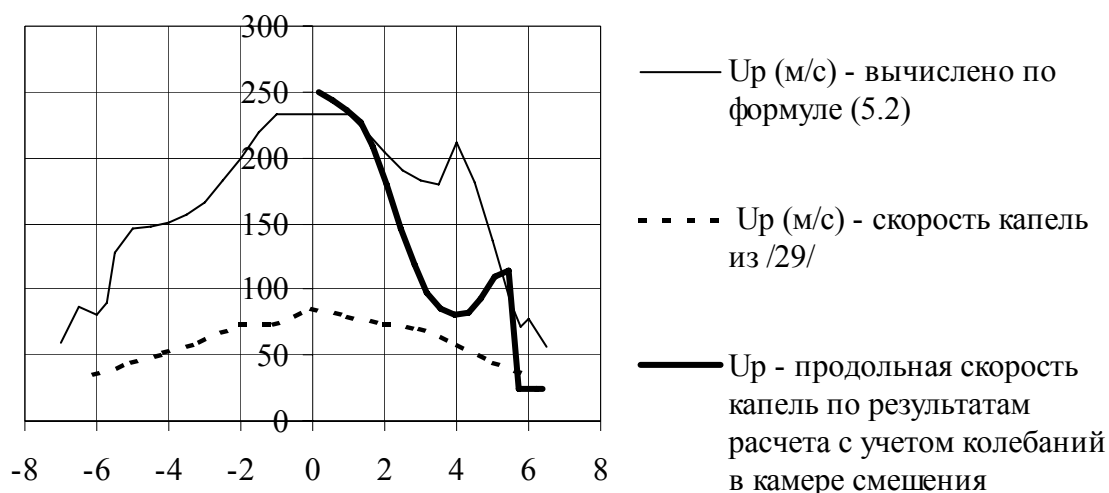


Рис.5.17. Сравнение скорости капель по результатам численного эксперимента и различным формулам пересчета измеренных величин.

5.4. Оценка дисперсности полученной струи

Для проверки результатов численного моделирования и понимания физических процессов, проходящих в потоке, необходимы данные о дисперсности выходящей из сопла газок капельной (водовоздушной) струи (данные о дисперсности необходимы и для оценки тушающих свойств струи). Вблизи сопла струя имеет столь высокую плотность, что здесь не удалось получить хорошие данные о дисперсности капель. Можно лишь говорить о максимальном диаметре (около 500 мкм), полагая, что крупные капли образуются из пленки и видны на периферии струи.

Фотографирование струи было проведено на удалении в 1 м от среза сопла (рис.5.18,5.19) в свете вспышки продолжительностью 10^{-6} с. Максимальный диаметр капель на снимках около 1 мм [240,241].

Более точные измерения (см. рис. 5.20) были выполнены на стенде НИИ НТ МАИ с помощью лазерно-оптической измерительной системы фирмы «Malvern». Средний объемно-поверхностный (Заутеровский) диаметр капель на удалении в 1 м от среза сопла 240 мкм. Очевидно, что столкновения капель

неизбежны при таких полидисперсности и плотности аэрозоля не только в канале, но и в струе.

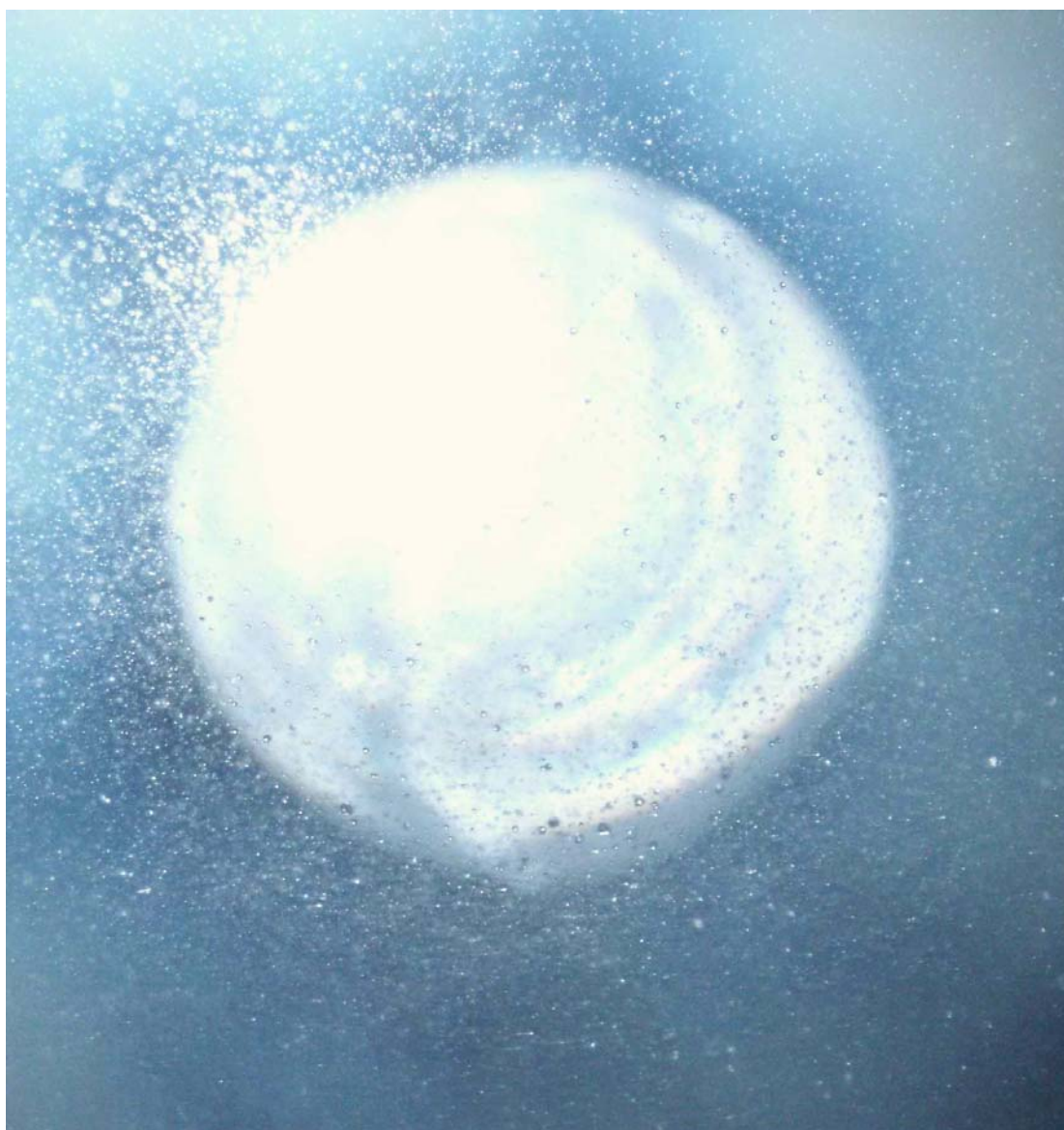


Рис. 5.18. Фото струи в свете вспышки продолжительностью 10^{-6} с «на просвет» на удалении в 1 м от среза сопла. Диаметр вспышки 57 мм.



Рис. 5.19. Фото струи в свете вспышки продолжительностью 10^{-6} с в отраженном свете (сопло справа).

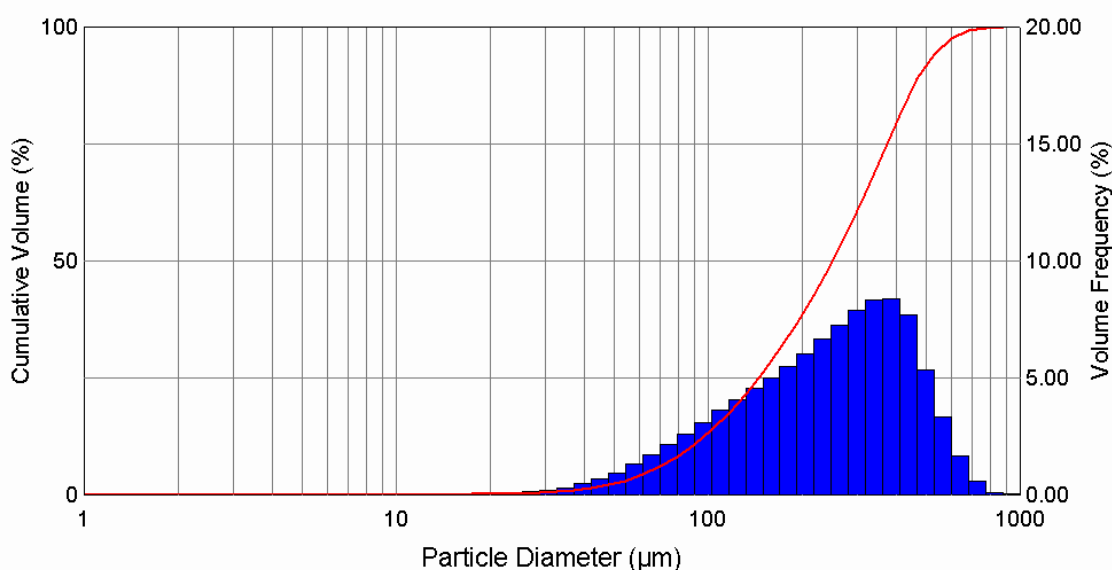


Рис.5.20. Функция распределения капель в струе экспериментальной установки (подача жидкости со стенок через множество отверстий) на удалении в 1 м от среза сопла (по горизонтальной оси – логарифмическая шкала диаметров капель в мкм; темная область – объемная доля, определяемая по правой шкале; кривая линия – суммарный объем, который определяется по левой шкале).

$$D_{32}=165.37, D_{43}=263.95.$$

5.6. Выводы по главе 5. Физическая модель газочапельного соплового течения при значительном (более 10) массовом содержании жидкости.

Эксперименты, проведенные автором (измерение давления вдоль стенки сопла, фотосъемка потока на входе и выходе из сопла, выявление зоны малой концентрации жидкости с помощью электродонда), дополняют результаты /29/, /211/. Фотосъемка также дала дополнительные данные о дисперсном составе и скорости капель на границе струи у среза сопла⁷. Комплекс экспериментальных данных о потоке на выходе из сопла дает полную количественную информацию о течении. Выявлены колебательные процессы, которые не фиксировались обычной фотосъемкой, видеосъемкой и зондом. Показано, что высокие импульсы и плотность орошения у границы струи в экспериментах связаны с вытекающей из сопла пленкой.

Фотосъемка и лазерно-оптическое измерение дисперсного состава в дальнем поле струи вместе с результатами измерений /29/ дают материал для проверки моделей двухфазных струй с высокой объемной долей дискретной фазы. Дан способ прогнозирования частоты колебаний пленки жидкости, выходящей из сопла.

Проведенные эксперименты подтвердили, что в высоконцентрированном газочапельном потоке:

- 1) пленка весьма устойчива на смачиваемой поверхности при дозвуковых скоростях газа;
- 2) жидкость из распадающейся в результате резонансных колебаний пленки разгоняется на начальном участке струи;
- 3) в расширяющейся части сопла у стенки существует область, где объемная доля капель значительно ниже, чем средняя по потоку;

⁷ Надо учитывать особенности этих двух методик получения данных (например, фотография не дает информации об очень мелких каплях и не учитывает периодические колебания потока, но дает картину течения в некоторый момент, осредняя её только за время экспозиции, зонд же дает средние характеристики по множеству периодов и по своему сечению и не дает никакой информации о размерах капель).

- 4) в зоне повышенного содержания жидкости у среза повышенное по сравнению с окружающей средой давление;
- 5) параметры потока колеблются из-за особенностей процесса смешения жидкости и газа;
- 6) верхняя граница диаметров капель определяется гидродинамикой потока, а не дисперсностью на входе.

Численные расчеты по предлагаемой математической модели хорошо согласуются с экспериментами в части описания структуры (характера распределения фаз по сечению) потока. Это подтверждает правильность подхода к моделированию потока, при котором учитываются пленка и область у среза сопла.

Для достижения цели работы осталось сформулировать физическую модель (по другой терминологии «феноменологическое описание», см. например /73/) газочапельного соплового потока с большой долей капель на основании полученных данных, а также показать, как результаты и инструменты исследования используются на практике.

С помощью численных расчетов и экспериментальных данных, картину течения потока в экспериментальной установке можно представить следующим образом.

На входе в сопло, в результате взаимодействия струек жидкости от стенок с соосной струей воздуха, формируется пульсирующее (имеются ввиду, прежде всего, пульсации массового расхода жидкости) с невысокой частотой (порядка десятков Гц) дисперсное течение с минимумом (в среднем) жидкости на оси и пленкой малой (в среднем) толщины. Пульсации возникают из-за формирования в потоке крупных фрагментов (кластеров) жидкости, которые неустойчивы и разрушаются, загромождая сечение. Отметим, что пульсации неизбежно возникнут и в камерах смешения других конструкций, так как вихреобразование в газе неизбежно при взаимодействии с каплями. В сужающейся части сопла значительная часть жидкости выпадает в пленку. Из-

за частых ударов капель поверхность пленки покрыта множеством волн, поэтому большинство соударений капель происходит, фактически, не при малых, а при больших углах, в результате чего отскакивает или выбивается незначительная доля капель. Также множество ударов увеличивает интенсивность срыва капель с пленки потоком газа, однако общая масса сорванных капель в несколько раз меньше потока капель в пленку, поэтому, раз образовавшись, пленка течет до самого среза сопла.

Внутри канала, где концентрация капель сохраняется достаточно высокой, происходит интенсивное столкновение капель, поэтому достаточно быстро теряется информация о первоначальном распределении капель по размерам.

В расширяющейся части канала, как и в соплах с малой концентрацией частиц, у стенки формируется область с малым содержанием капель.

Вытекающая из сопла пленка образует своеобразный экран, поэтому давление в ядре струи может отличаться от атмосферного, то есть от среза сопла идет неизобарическая струя.

Из-за большой доли жидкости, играющей роль термостата, температура газа меняется в значительно меньших пределах, чем в случае чисто газового потока.

Анализ работы конструктивно похожих систем пожаротушения НИИ НТ МАИ с расходами воды 1, 5 и 10 кг/с показал, что в них реализуется похожее течение (см. п. 6).

Опыт расчетов позволяет заключить, что выбранный способ построения математической модели вполне подходит для численного исследования и прогнозирования особенностей динамически неравновесных потоков с большой долей капель в каналах. Четко проявились преимущества двумерного расчета, позволившие выявить и объяснить особенности как соплового потока, так и начального участка струи, чего не дают одномерные модели.