

4. Численное исследование газочапельного соплового течения и начального участка выходящей из сопла струи.

К этому этапу исследования выделены следующие задачи, которые необходимо решить:

- необходимы данные о структуре потока (распределении параметров потока по сечению) на входе в сопло и на выходе; необходимо ответить на вопрос: есть ли пленка при выходе потока из сопла;
- на основании численных экспериментов надо получить детальную картину течения газа и жидкости в канале, прояснить влияние конструкции камеры смешения на поток.

Из оценок и предварительных расчетов видно, что

- при моделировании потока в канале необходимо учитывать пленку жидкости, столкновения и аэродинамическое дробление капель;
- при определении силы взаимодействия газа и капли необходимо учитывать присутствие в потоке других капель и изменение формы капли в результате столкновений.

В предыдущих главах рассказано о создании инструмента для проведения численных экспериментов, цель которых – получить представление о процессах и структуре газожидкостного дисперсного потока в канале переменного сечения и у выхода из него. 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.

В следующих главах рассказывается о проведенных автором численных и натуральных экспериментах по исследованию структуры «базового» газочапельного потока, а также приводятся данные экспериментов коллег.

4.1. Экспериментальная оценка параметров потока на входе в сопло.

В предыдущих расчетах и работах /13,29,182,185,211/ о распределении параметров фаз на входе в сопло можно было только догадываться из анализа конструкции камеры смешения, поэтому, чаще всего, полагалось, что все характеристики распределены равномерно поперек сопла. Однако, так как от «входа» существенно зависит «выход» /185/, то, для численного моделирования, параметры потока на входе в сопло просто необходимы, причем желательно их знать на основе более достоверной информации, чем просто догадки. Но конструкция экспериментальной установки (см. п.4.3) такова, что детальное моделирование смешения воды и воздуха по трудоемкости соизмеримо с прямым численным моделированием. С другой стороны, нас сейчас интересует применимость предложенной в п. 2 модели для исследуемого класса течений, то есть её способность отразить основные особенности потока. При такой постановке вопроса можно пожертвовать точностью цифр. Основное, что надо знать:

- есть ли пленка на входе в сопло;
- как сильно поток отличается от равномерного.

С использованием модели «фиктивного газа» /116/ и тестовых частиц (см., например, /19/) автором были получены приблизительные (оценочные) данные для температур газа и капель после камеры смешения (рис.4.1, /180/)¹. Из этих расчетов видно, что на входе в сопло температуры воды и воздуха практически равны (изотермический поток)².

¹ Более точную модель применять нет смысла, так как неизвестны зоны развала и дисперсный состав впрыскиваемых струек воды.

² Здесь не говорится о скорости, так как в расчетах полагалось, что капли заданного диаметра (тестовые частицы) вводятся в поток со стенок с заданной скоростью (значение скорости подбиралось так, чтобы обеспечить максимально равномерное распределение капель на выходе из камеры смешения) на достаточно узком участке. При такой постановке нельзя говорить о точных количественных характеристиках потока в зависимости от радиуса на входе в сопло.

Для уточнения физической модели потока и получения дополнительных данных, необходимых для численного моделирования, проведено фотографирование потока на входе в сопло /240-242/³. Для этого водовоздушная смесь подавалась от камеры смешения в сопло через цилиндрический канал с прозрачными стенками (см. рис. 1.4, 4.2).

Снимки потока на входе в сопло (сопло слева, камера смешения справа) в свете вспышки продолжительностью 10^{-6} с см. рис. 4.3. На рис. 4.3-А – съемка «на просвет» (негатив), на рис. 4.3-В – «световой нож»⁴, ориентированный поперек оси канала, на рис. 4.3-С – «световой нож», ориентированный поперек канала. Полная подборка фотографий приведена в электронном приложении.

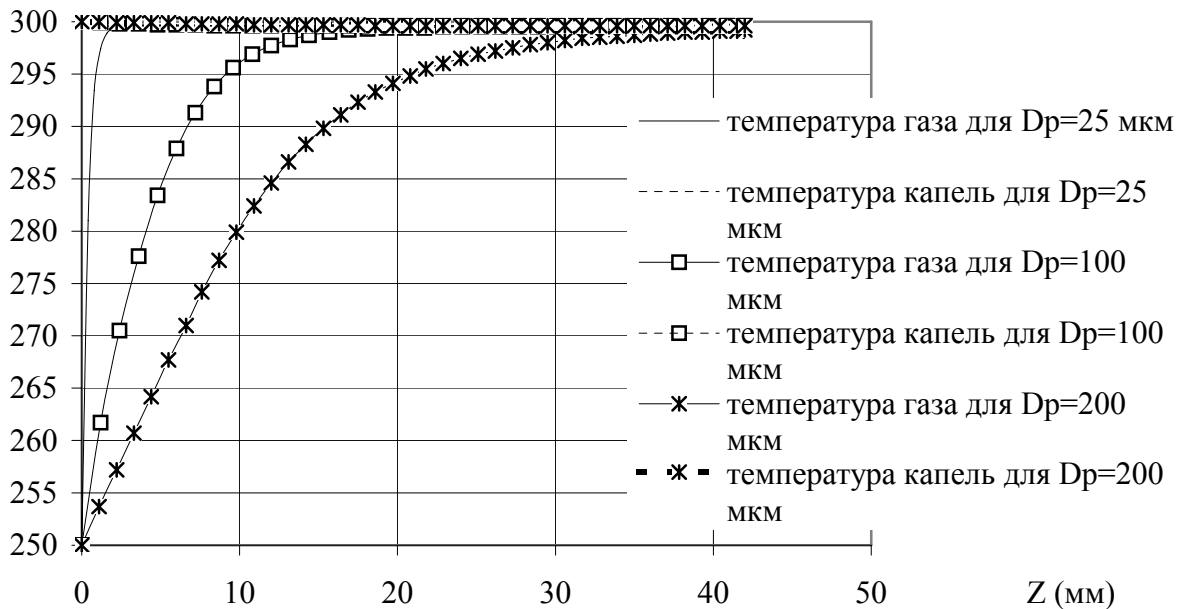


Рис.4.1. Z – расстояние (мм) по оси цилиндрического канала от зоны впрыска капель.

Проанализируем фотографии. Видно, что сколько-нибудь существенная пленка в канале отсутствует, по крайней мере, толщина пленки соизмерима с размером дискретных включений потока, в противном случае нарушалась бы

³ Для этих экспериментов предоставили оборудование и оказали помощь в проведении опытов сотрудники группы В.П.Фирсова (кафедра 204 МАИ).
⁴ «Световой нож» здесь - это поток света через щель в 2 мм.

«двухполосность» границы канала, освещенная поверхность была бы менее бугристой (рис. 4.3). По рис. 4.4-В можно оценить размер капель у стенки на входе в сопло. Он составляет ~ 150 мкм. Так как капли практически не «смазаны», то их скорость не превышает 10 м/с.

При средней скорости на входе в сопло, то есть в цилиндрической вставке, 13 м/с и времени экспозиции 10^{-6} с, смещение капель составит 13 мкм. Среднее расстояние между каплями – 0.93 их диаметра, то есть поток должен быть прозрачен, по крайней мере у верхней и нижней границ канала. С другой стороны, на фото видно, что включения расположены у границ канала более плотно, чем средняя величина, что может быть или при скорости выше средней, или при объемной концентрации капель выше средней. Последнее более вероятно, так как капли не «смазаны». Таким образом, максимум скорости капель, скорее всего, расположен на оси канала, а максимум объемной концентрации смещен к стенке. На рис. 4.5 показаны возможные профили продольных скоростей газа (U_g) и капель (U_p) и объемной концентрации капель α_p с учетом величины средней скорости на входе в сопло и слабой прозрачности потока непосредственно у стенок канала. Из сравнения с распределением α_p , спрогнозированным по модели струи в сносящем потоке (эта модель использовалась на стадии проектирования опытной установки моими коллегами /213/, см. рис.4.6, скорость газа полагается пропорциональной скорости капель⁵) видно, что максимум α_p в эксперименте смещен к стенке и распределение параметров потока на входе в сопло существенно неравномерное. В расчетах конкретный вид функций распределения параметров по радиусу подбирался исходя из максимально близкого совпадения с известными экспериментальными данными /29,182,211,240-242/.

Если просмотреть фото (рис.4.7-4.9) на компьютере друг за другом, то видно, что прозрачность потока слегка меняется, то есть имеют место

⁵ Соответствующие этому распределению расчетные результаты приведены в Приложении 23.

колебания концентрации низкой частоты (частота колебаний составляет десятки герц), вызванные, скорее всего, способом смешения воды и воздуха.



Рис.4.2. Прозрачная вставка между камерой смешения (справа) и соплом (слева). Прозрачная вставка – параллелепипед из оргстекла с отверстием диаметром 14 мм и длиной ~ 50 мм, расположенный между камерой смешения и соплом. Эта вставка по длине равна так называемой проставке в экспериментах /29/ и автора, с помощью которой измерялось давление перед соплом после камеры смешения.

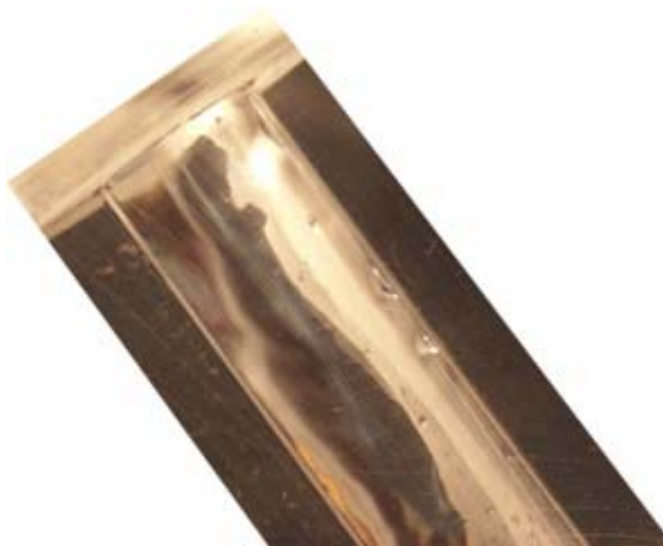


Рис. 4.3. Фотография низкоскоростной пленки в прозрачной вставке. Пленка течет сверху вниз под действием силы тяжести.

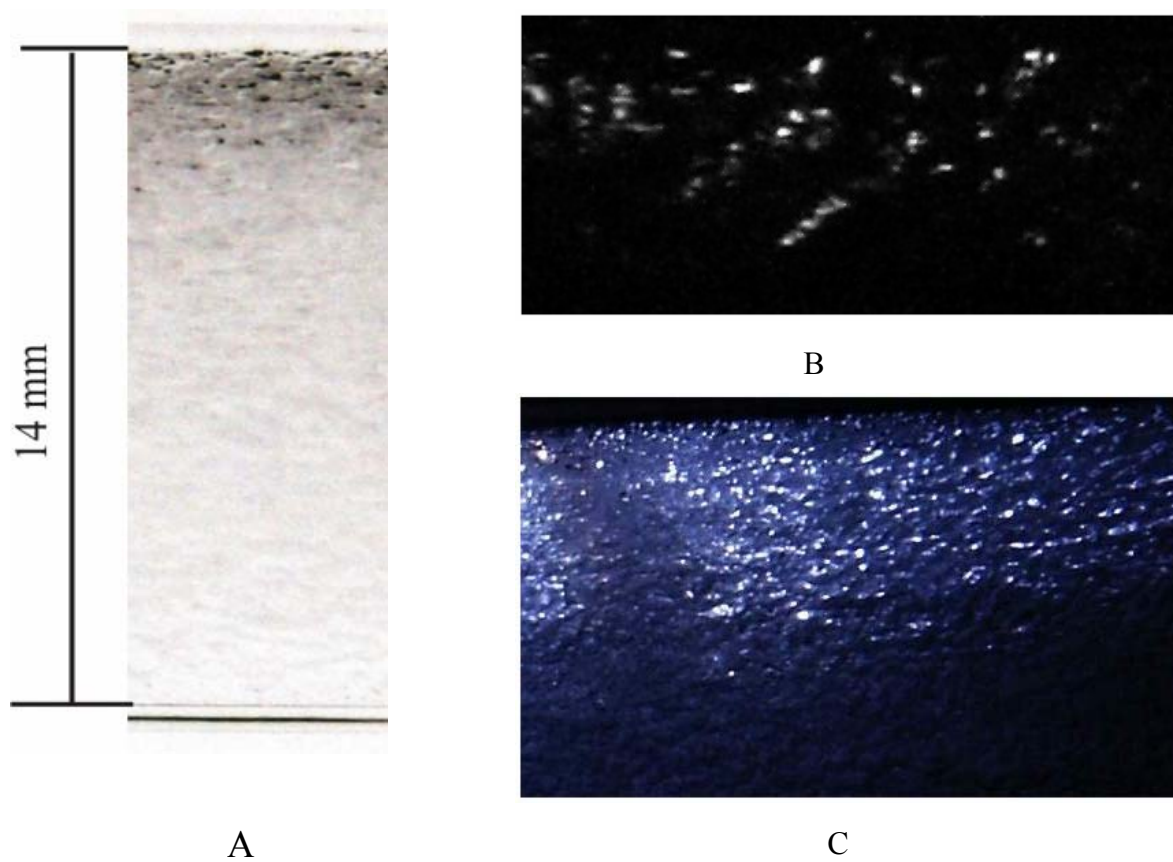


Рис.4.4. Газожидкостный поток в прозрачной цилиндрической вставке между камерой смешения и соплом. Продолжительность вспышки 10^{-6} с. А – негатив фотографии потока «на просвет», В – увеличенный позитив фотографии с использованием поперечного «светового ножа», С - позитив фотографии с использованием продольного «светового ножа».

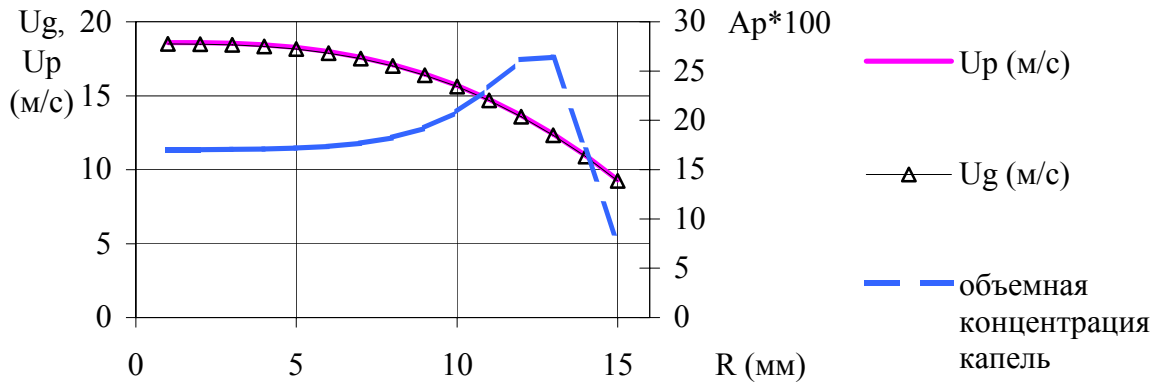


Рис. 4.5. Возможные профили продольных скоростей газа (U_g), капель (U_p) и объемной концентрации капель (A_p) по радиусу (R) канала /240/.

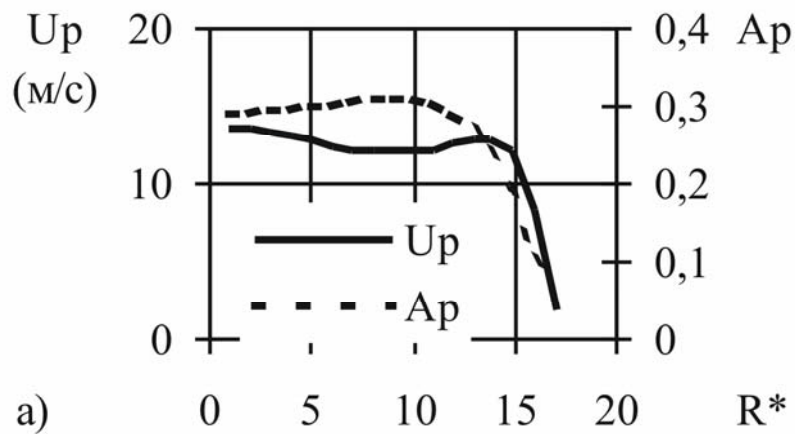


Рис.4.6. Прогноз профилей продольной скорости капель (U_p) и объемной концентрации капель (A_p) по радиусу канала ($R^* = r \cdot 17 / R_{\text{вход}}$, r - расстояние точки до оси симметрии сопла), полученный на по методике распада единичной струйки /124/.



Рис.4.7. Фотографии потока на входе в сопло в свете вспышки продолжительностью $4 \cdot 10^{-4}$ с (негатив).



Рис.4.8. Фотографии потока на входе в сопло в свете вспышки продолжительностью $4 \cdot 10^{-4}$ с (негатив).



Рис.4.9. Фотографии потока на входе в сопло в свете вспышки продолжительностью $4 \cdot 10^{-4}$ с (негатив).

4.2. Расчет параметров соплового течения без учета процессов в камере смешения

Итак, было проведено численное моделирование⁶ потока с использованием соответствующего эксперименту распределения по радиусу параметров на входе в сопло (рис.4.4). Получен ряд характеризующих поток результатов, которые приведены ниже.

4.2.1. Слабая зависимость дисперсности потока на выходе из сопла от дисперсности после камеры смешения.

Расчеты проводились для двух (см. Приложение 22) и четырех (рис.4.10-4.15, табл.4.1 и Приложение 24) групп капель и показали одинаковую тенденцию изменения распределения капель по диаметрам при увеличении числа групп (см. Приложения 22, 24). На выходе из сопла в ядре потока преобладают капли вполне определенного диаметра, смещение максимума среднего диаметра в сторону больших размеров объясняется распадом пленки.

Также исследовалась зависимость дисперсности потока на выходе из сопла от крупности капель на входе.

Функция распределения четырех групп капель приведена на рис. 4.16. Максимальный («базовый») диаметр капель на входе в сопло варьировался от 250 до 1450 мкм. Средняя скорость газа на срезе сопла при этом изменялась от 137.6 до 126.5 м/с, а скорость жидкости – от 65.04 до 65.5 м/с. Из сравнения изолиний объемной доли капель при минимальном (рис. 4.17-а) и максимальном (рис. 4.17-б) «базовых» диаметрах видно, что увеличение диаметра капель достаточно слабо влияет на характер распределения жидкости в потоке и средние характеристики течения /193,200/.

⁶ Расчетная сетка такая же, что и ранее. Естественно, было проведено множество расчетов, в ходе которых уточнялись параметры потока на входе в сопло для максимального соответствия экспериментальным данным, имевшимся на момент расчетов.

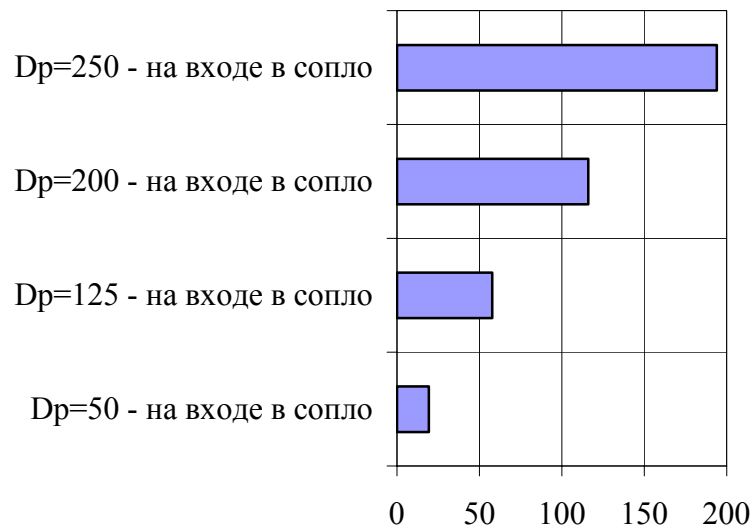
Однако если проанализировать изменения среднего и максимального диаметров капель, определенных в отдельных точках течения, то при малом «базовом» диаметре (рис. 4.18-а) преобладает слияние капель и средний и максимальный диаметры увеличиваются к выходу из сопла. С ростом «базового» диаметра максимальный диаметр капель растет до определенного предела (рис. 4.18-в, г, д), т.е. в какой-то момент времени дробление начинает преобладать над слиянием и фронт дробления занимает практически все сечение сопла. Из сравнений расположений зон повышенного среднего диаметра капель и зон малой объемной доли капель ($\alpha_p \sim 0$) на рис. 4.17, 4.18 следует, что рост среднего диаметра вызван взаимодействием потока с пленкой жидкости на стенке сопла, но общая доля таких капель на срезе сопла незначительна. Таким образом, сопло работает как своеобразная «мельница», где верхняя граница диаметров капель определяется гидродинамикой потока⁷.

Таблица 4.1.

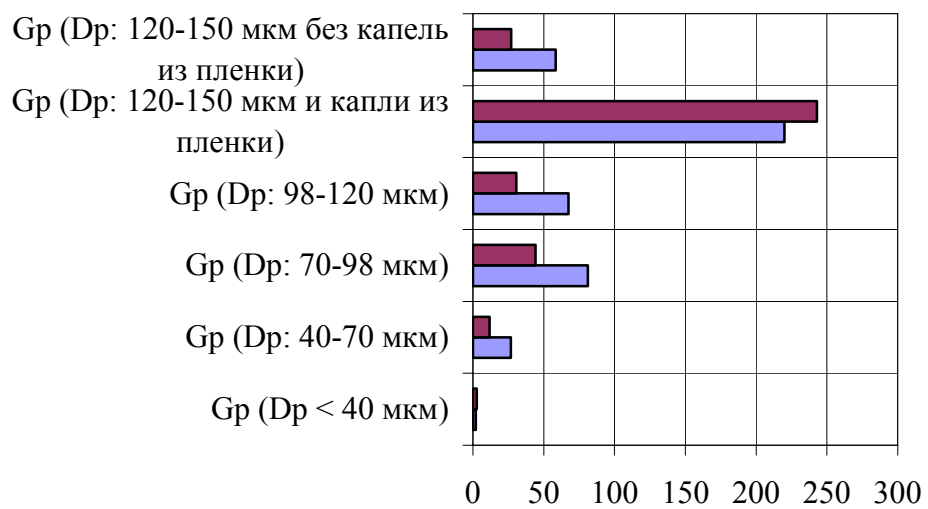
Массовое и объемное распределение капель по размерам на входе в сопло и в 10 мм от среза сопла при расчете с 4 группами капель.

	Массовая доля, г/с	Объемная доля ($\alpha_p \cdot 300$)
распределение капель по диаметру на входе в сопло		
50 мкм	19,3199	0,05
125 мкм	57,78	0,15
200 мкм	116	0,30
250 мкм	194	0,5
распределение капель по диаметру в 10 мм от среза сопла		
$D_p < 40$ мкм	1,99	0,005
$D_p: 40-70$ мкм	26,8	0,069
$D_p: 70-98$ мкм	81,1	0,209
$D_p: 98-120$ мкм	67,5	0,174
$D_p: 120-150$ мкм без капель из пленки	58,5	0,151
$D_p: 120-150$ мкм и капли из пленки	210	0,542

⁷ Это согласуется с экспериментальными данными /82/ и автора.



а)



б)

Рис.4.10. Массовое (G_p , г/с – светлые прямоугольники) и объемное ($\alpha_p \cdot 300$, темные прямоугольники) распределение капель по размерам на входе в сопло (а) и в 10 мм от среза сопла (б) при расчете с 4 группами капель.

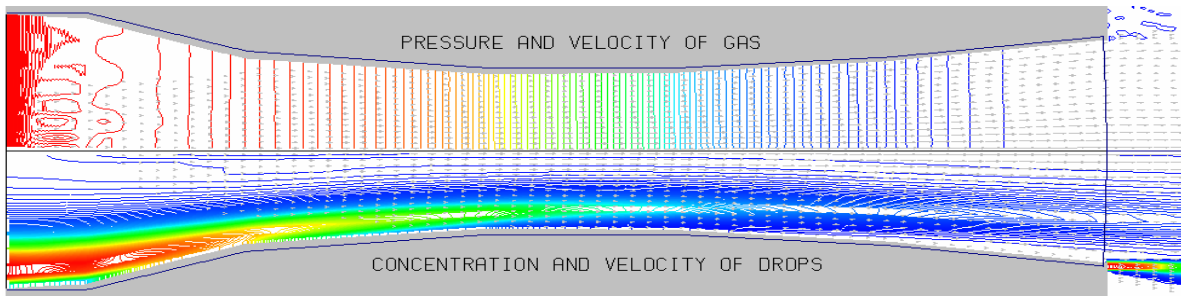


Рис.4.11. В верхней половине рисунка - изолинии давления P_g и поле скоростей газа, в нижней - изолинии объемной концентрации A_p и поле скоростей капель.

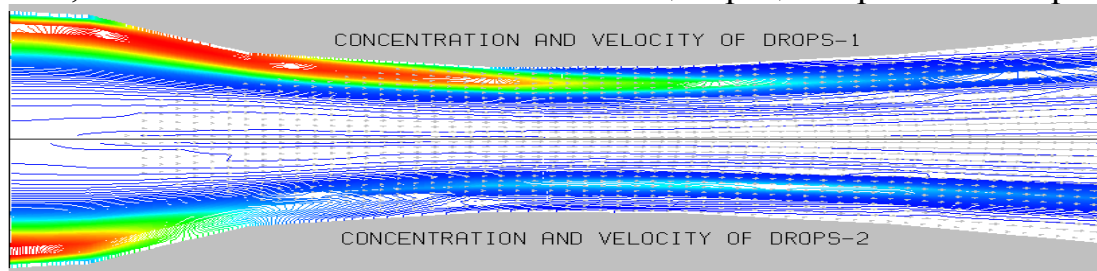


Рис.4.12. Изолинии объемной концентрации капель. В верхней половине рисунка - для фракции 1, в нижней - для фракции 2.

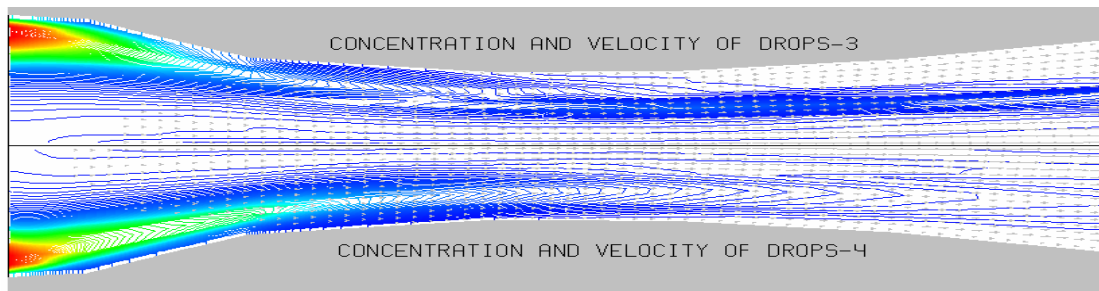


Рис.4.13. Изолинии объемной концентрации капель. В верхней половине рисунка - для фракции 3, в нижней - для фракции 4.

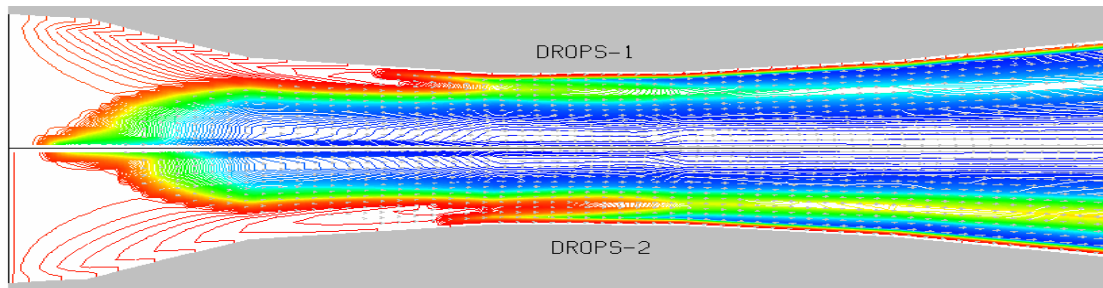


Рис.4.14. Изолинии диаметра капель. В верхней половине рисунка - для фракции 1, в нижней - для фракции 2.

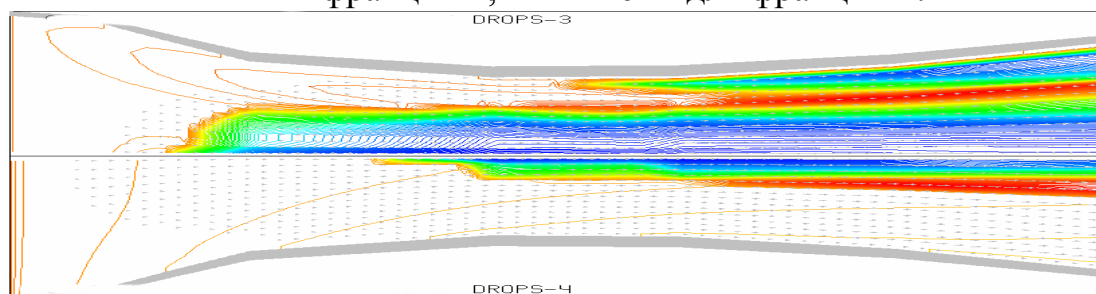


Рис.4.15. Изолинии диаметра капель. В верхней половине рисунка - для фракции 3, в нижней - для фракции 4.

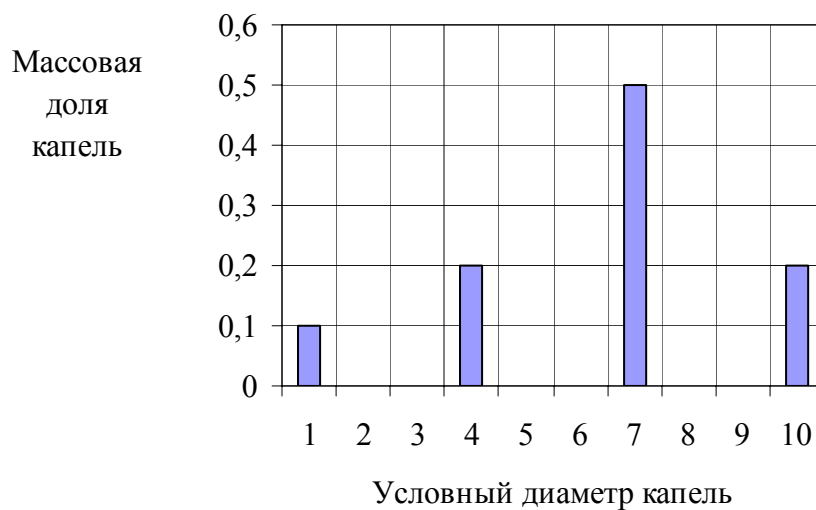
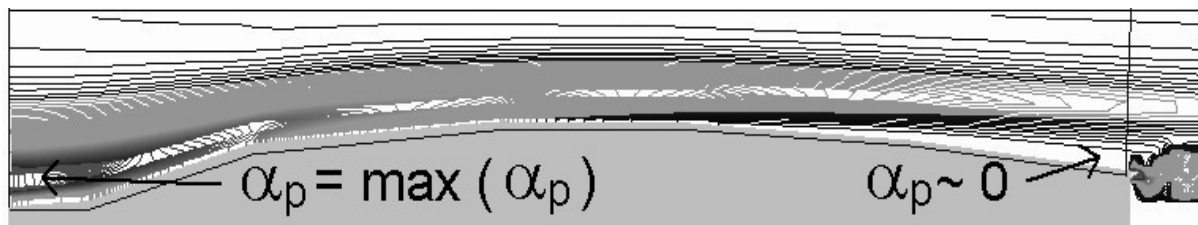
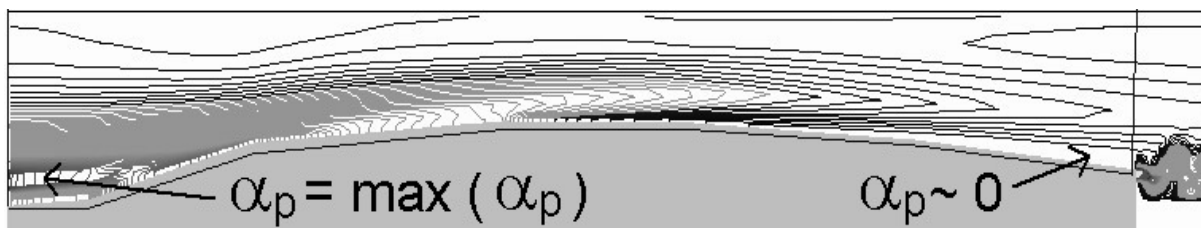


Рис. 4.16. Массовая доля капель в зависимости от условного диаметра; данные для четырех групп капель.

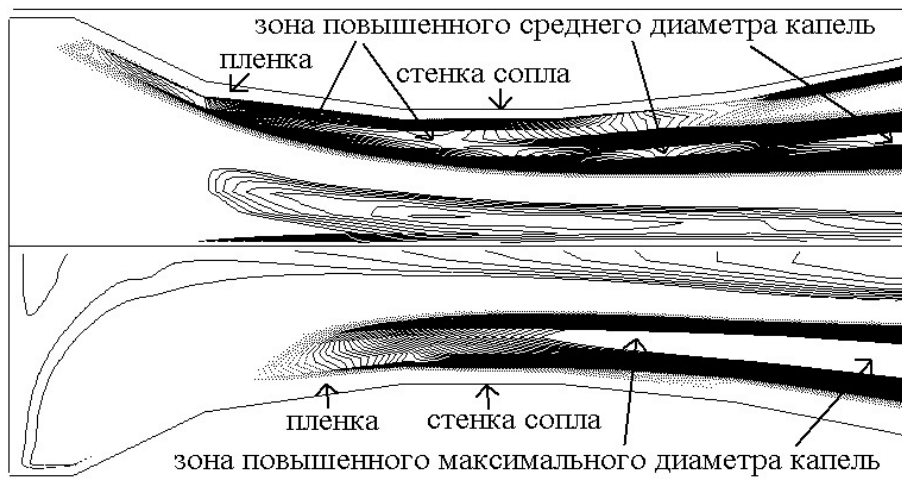


(а)

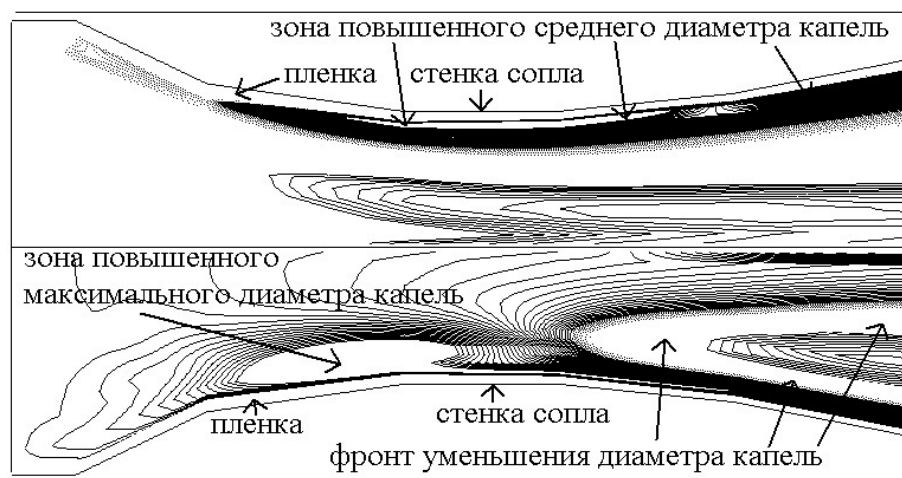


(б)

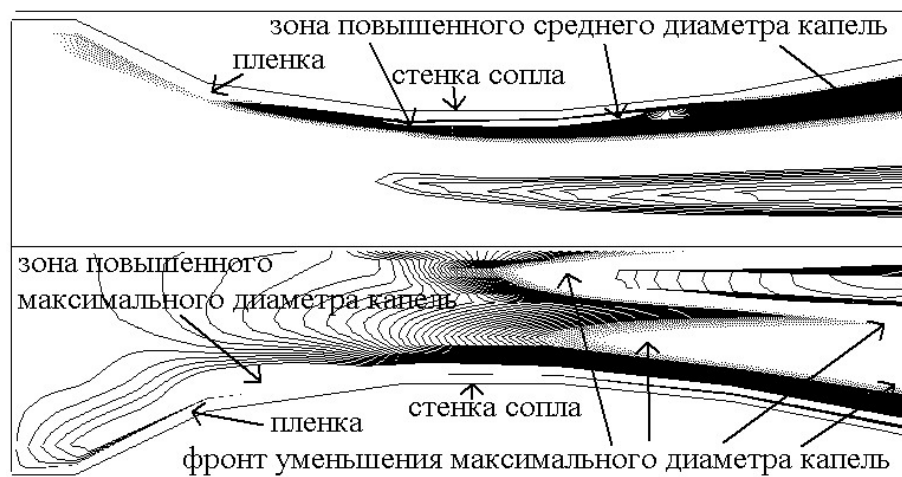
Рис. 4.17. Изолинии объемной доли капель при «базовом» диаметре капель на входе в сопло: (а) - 250 мкм; (б) - 1450 мкм. Верхняя кромка рисунка – ось сопла, ломаная линия на сером фоне внизу рисунка – стенка сопла.



(а)

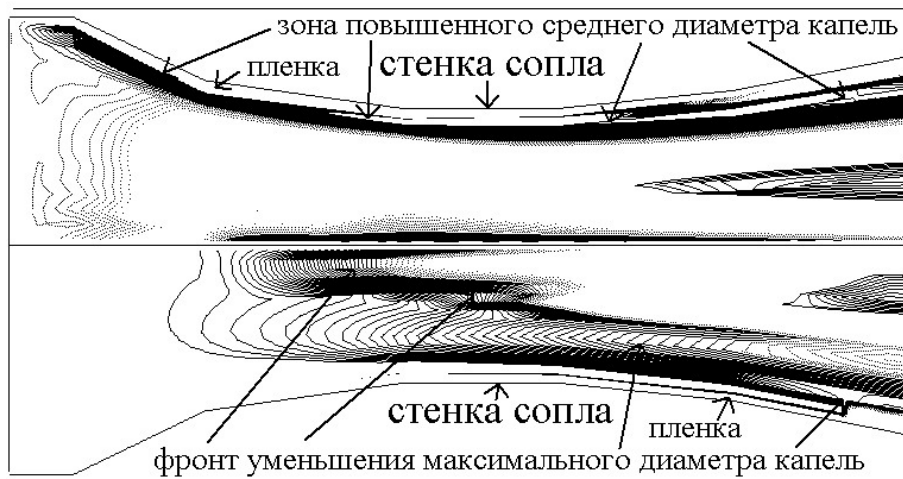


(б)

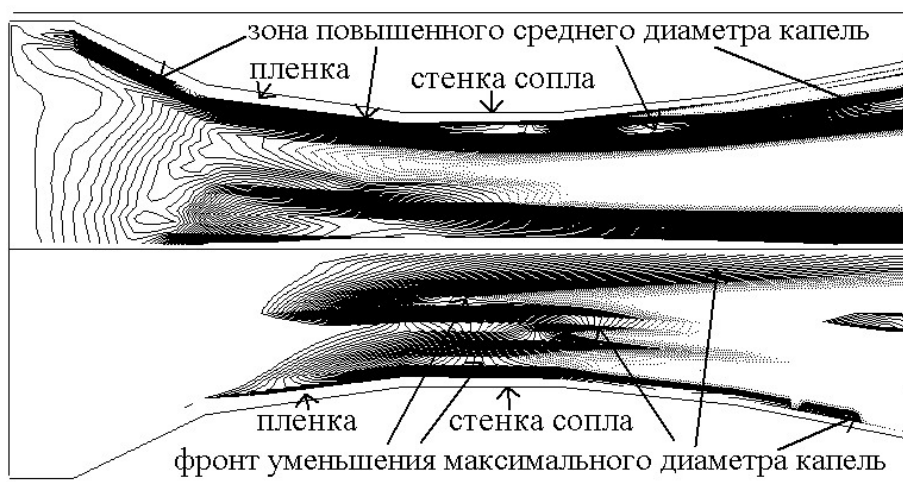


(в)

Рис.4.18 (а-в). Изолинии среднего диаметра (верхняя половина рисунка) и максимального диаметра (нижняя половина рисунка) при «базовом» диаметре капель на входе в сопло: (а) – 250, (б) – 450, (в) – 750.



(г)



(д)

Рис.4.18 (г,д). Изолинии среднего диаметра (верхняя половина рисунка) и максимального диаметра (нижняя половина рисунка) при «базовом» диаметре капель на входе в сопло: (г) – 1050, (д) - 1450 мкм.

4.2.2. Изменение давления вдоль радиуса струи у среза сопла.

Расчеты показывают, что в зоне повышенного содержания жидкости у среза должно быть повышенное по сравнению с окружающей средой давление (рис.4.19). Объяснить это можно тем, что срывающаяся с кромки сопла пленка дробится на протяжении нескольких сантиметров, а в зоне распада фрагментов

пленки на капли давление слегка повышается, так как газ тормозится в облаке низкоскоростных капель из пленки /192,200,242/⁸.

Распадающаяся пленка образует своеобразный экран, поэтому давление газа в центральной части струи может отличаться от окружающего (атмосферного),

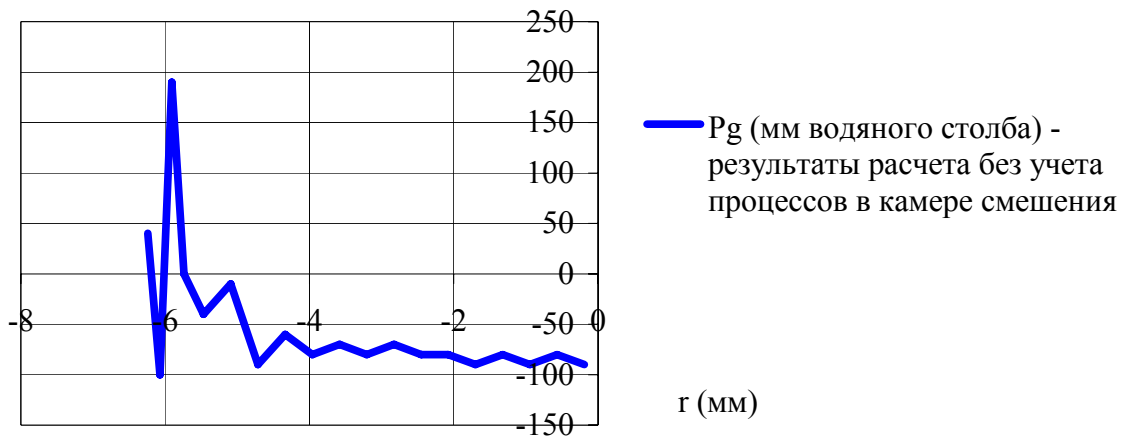


Рис.4.19. Изменение давления вдоль радиуса у среза сопла по результатам расчета.

4.2.3. Устойчивость пленки в длинном сопле.

Характер изменения расхода жидкости в пленке (рис.4.20) показал, что, начиная с некоторого сечения в сужающейся части канала, масса жидкости меняется слабо, несмотря на постоянный рост скорости газа (до $M \approx 0.9$), то есть пленка весьма устойчива при дозвуковых скоростях газа и смачиваемой стенке /242/.

⁸ Изменение статического давления подтвердилось в экспериментах /235/ (см. рис.5.16 п.5.3.4).

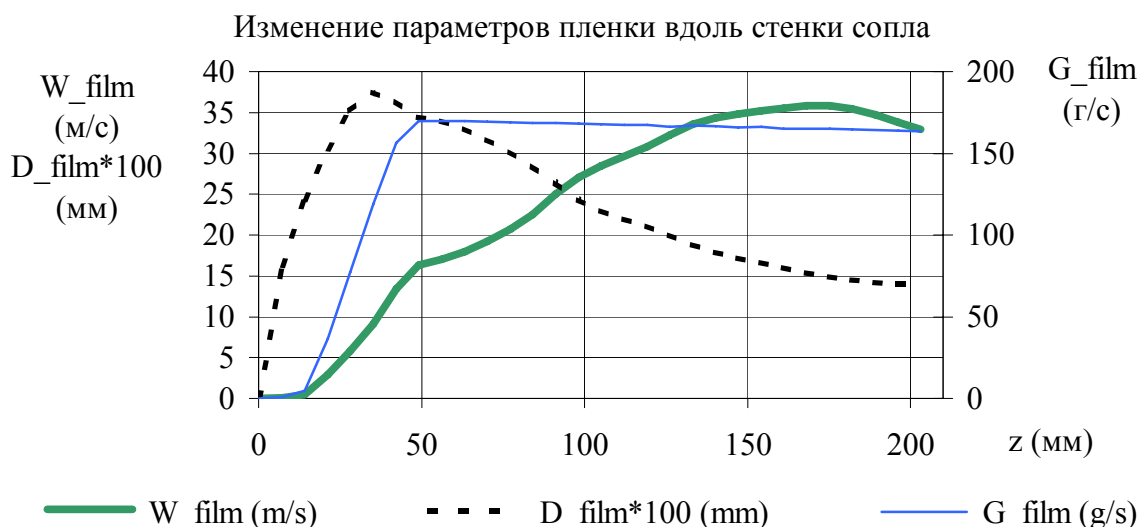


Рис.4.20. Изменение скорости (W_{film}), толщины (D_{film}) и массового расхода жидкости в пленке (G_{film}) по результатам расчетов.

4.2.4. Прогнозирование поведения жидкости на границе струи у среза сопла по результатам численного эксперимента

Из теории известно /123/, что вытекающая из канала кольцевая пленка распадается в результате резонансных колебаний. Для определения частоты этих колебаний (для трубы диаметром D оценка периода резонансных колебаний T , при постоянной по сечению скорости звука $a_{зв}$, есть $T/2=D/a_{зв}$) и скорости пленки использовалась методика, изложенная в работе В.С.Федотовского и др. /149/, которая учитывает разность скоростей и объем фаз и поэтому более предпочтительна, чем методика для равновесного потока из /140/⁹. Скорость звука в смеси C^* вычисляется из соотношения:

⁹ Например, для равновесной смеси воды и воздуха при нормальных условиях и $\alpha_p = 0.01$ по методике /149/ получается $C^* = a_{см} \approx 112,4$ м/с.

В такой же ситуации, по методике /140/, скорость звука в равновесной смеси $a_{см}$ с учетом объема, занимаемого дискретной фазой, вычисляется из соотношения:

$$a_{см}^2 / (k \cdot R_g \cdot T_g) =$$

$$C^* = 1 / \{ [\rho_g + (\rho_p - \rho_g) \cdot \alpha_p \cdot W_p / W_g] \cdot [(1 - \alpha_p) / (\rho_g \cdot C_g^2) + \alpha_p / (\rho_p \cdot C_p^2)] \}^{1/2}$$

где ρ_g – плотность газа, ρ_p – плотность жидкости, α_p – объемная доля капель, W_p – скорость капель, W_g – скорость газа, $C_g = (k \cdot R_g \cdot T_g)^{0.5}$ – скорость звука в газе (k – показатель адиабаты), C_p – скорость звука в каплях. Полученный период колебаний T использовался для определения поперечной скорости капель W_{pr} при моделировании выхода пленки из сопла:

$$W_{pr} = W_{r0} \cdot \sin(2\pi \cdot t / T) , \quad (4.1)$$

где t – текущее время, W_{r0} – максимальная радиальная составляющая скорости пленки.

По результатам расчета потока с четырьмя группами капель (см. Приложение 24) частота составила ≈ 3900 Гц. С использованием формулы (4.1, $W_{r0} = 6$ м/с) проведено численное моделирование потока у среза сопла. Видно (рис.4.21), что расстояние между гребнями увеличивается *на начальном участке струи*, то есть *жидкость из пленки разгоняется* [237]. Объясняется это тем, что ориентированные по потоку фрагменты (кластеры) жидкости имеют меньшую силу сопротивления, чем получающиеся из них сферические капли (см. п.2.8.3).

4.2.5. О локальных экстремумах распределения жидкости вдоль радиуса у среза сопла.

Четко видно, как и предыдущих расчетах (см. рис. 3.5, 3.22, 3.23, 4.22, 4.23), что максимумы импульса и плотности орошения связаны с пленкой. Заметная неоднородность наблюдается в ядре потока (рис.4.23). Однако существуют физические механизмы выравнивания параметров поперек потока в ядре: это поперечная диффузия капель из-за столкновений

$$= \{ 1 + \alpha_p \cdot [C_{part} \cdot \rho_p / (C_{p_gas} \cdot \rho_g) - 1] \} / \{ (1 - \alpha_p) \cdot [1 + \alpha_p \cdot (\rho_p / \rho_g - 1)] \cdot [1 + \alpha_p \cdot (k \cdot C_{part} \cdot \rho_p / (C_{p_gas} \cdot \rho_g) - 1)] \} ,$$

и $a_{см} \approx 100.5$ м/с (k – показатель адиабаты).

(псевдотурбулентность)¹⁰ и сила Магнуса¹¹, а также колебания в камере смешения. Механизм этих колебаний связан с тем, что направленные к оси струйки жидкости образуют сгустки (крупные фрагменты жидкости), которые не могут быть устойчивы в рассматриваемом потоке. Проверим роль колебаний расчетом.

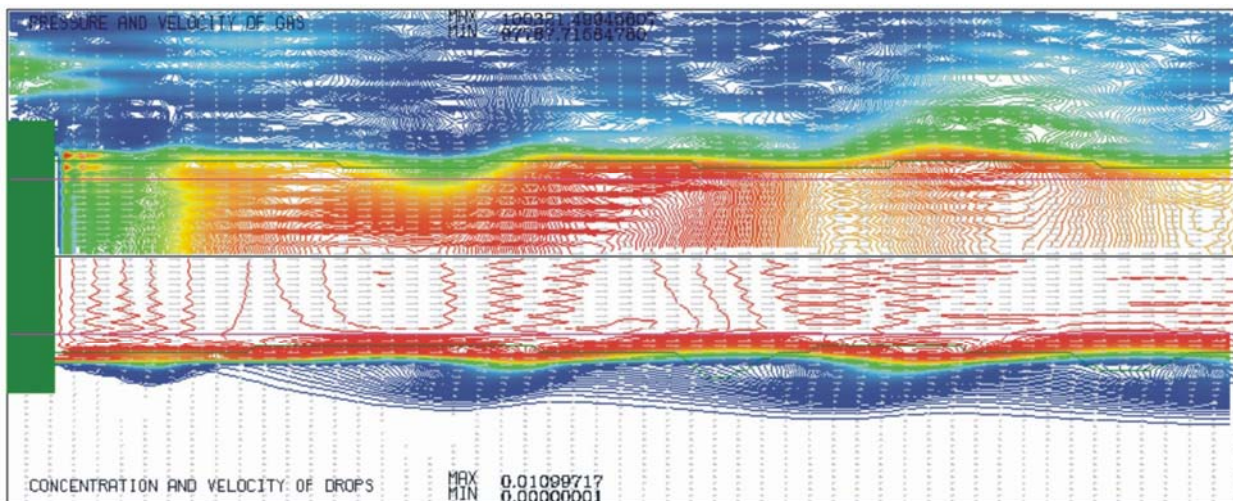


Рис.4.21. Границы капельной струи, полученные в численном эксперименте (в нижней половине рисунка – изолинии объемной доли капель, в верхней – давления). Темный прямоугольник слева – срез сопла, поток течет слева направо.

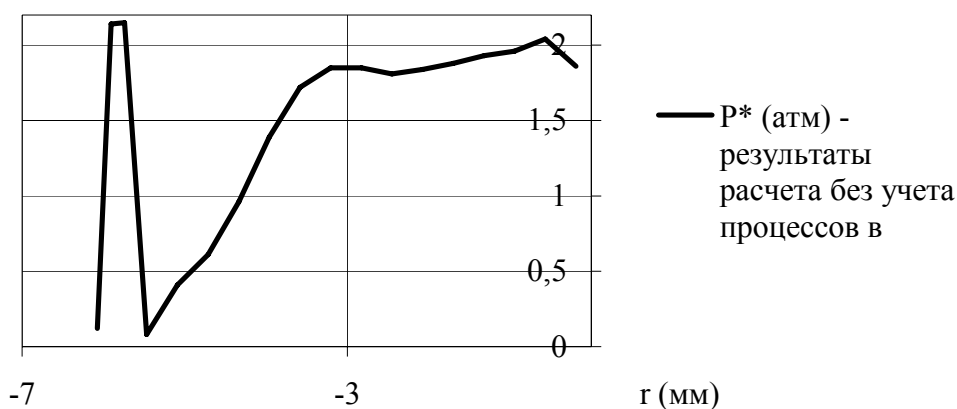


Рис.4.22. Полный импульс вдоль радиуса струи у среза сопла в численном эксперименте.

¹⁰ Эти механизмы в данной работе не рассматриваются.

¹¹ См. п.2.

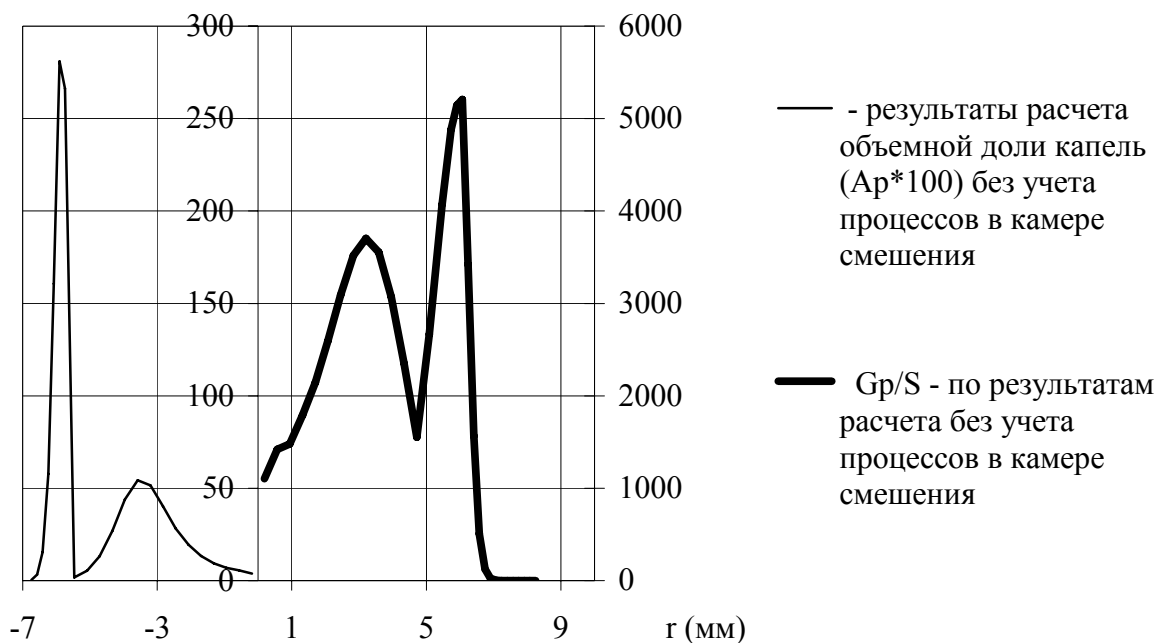


Рис.4.23. Изменение плотности орошения (Gp/S) и объемной доли капель (Ar) вдоль радиуса струи у среза сопла в численном эксперименте.

4.2.6. Выявление зоны с малым содержанием жидкости у стенки на срезе сопла.

На рис.4.22,4.23 видно, что в расширяющейся части сопла у стенки, как и при малой доле капель (частиц) /70,116,139,140/, существует область (шириной ~ 2 мм), где концентрация капель значительно ниже, чем средняя по потоку. 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 (экспериментальная проверка (см.п.5), проведенная автором, подтвердила существование этой зоны) /192,240-242/.

То, что эта зона не проявилась в экспериментах /29,211/, объясняется, с одной стороны, тем, что для измерения плотности орошения использовался зонд диаметром $\sim 3,5$ мм, а для измерения импульса – $2,5$ мм, с другой стороны, фактически зонд измеряет $\alpha_p \cdot W_p$, то есть при высокой скорости капель

количество жидкости, попавшей в зонд, может быть значительно даже при малой объемной доле капель.

4.3. Расчет потока в камере смешения

В экспериментальной установке при исследовании потока с «базовыми» характеристиками использовалась камера (см. рис.4.24-а) с подачей воды через множество отверстий на стенках и подачей воздуха через кольцевое сопло. Для получения большей ясности о работе камеры было проведено численное моделирование. При заданной геометрии скорость газа через кольцевое сопло 280 м/с, диаметр капель впрыскиваемой жидкости полагался 470 мкм, скорость - 6.4 м/с. В зонах дисперсного потока, где объемная доля капель $\alpha_p > 0.4$, диаметр капель полагался равным некоему максимальному. Сечение, через которое вытекает смесь, отодвигалось вправо от зоны впрыска (темная полоса вверху и внизу каждого квадрата на рис. 2-б) так, чтобы не было обратных токов. Расстояние до этого сечения не превысило длины цилиндрического участка между камерой смешения и соплом экспериментальной установки. Давление в этом сечении известно из эксперимента /181,240/, другие параметры определялись экстраполяцией изнутри расчетной области. Близкая к равномерной расчетная сетка со слабым сгущением ячеек к стенке имела размерность 20 ячеек по радиусу и 330 вдоль оси.

Расчеты показали /192/, что в камере реализуется периодический по времени процесс изменения параметров фаз, последовательные стадии которого приведены на рис. 2-б¹². Стрелкой в середине каждого квадрата показано основное направление потока. В нижней половине квадрата заштрихованные области соответствуют $\alpha_p > 0.4$. Видно, что в выходном сечении максимум α_p смещен к стенке, причем *радиальное положение максимума α_p периодически меняется*. Такая структура подтверждается

¹² Анимация находится в электронной версии работы в файле mix_film1 на прилагаемом компакт-диске.

анализом фотографий потока в прозрачном канале между камерой смешения и соплом (п.4.1). Ясно, что впрыск через множество отверстий не обеспечивает ожидаемых дисперсности и близкого к равномерному распределения параметров потока, поэтому нет смысла использовать технологически сложную деталь со множеством отверстий. Такой же вывод был получен экспериментально при модификации опытной установки пожаротушения в НИИ НТ МАИ.

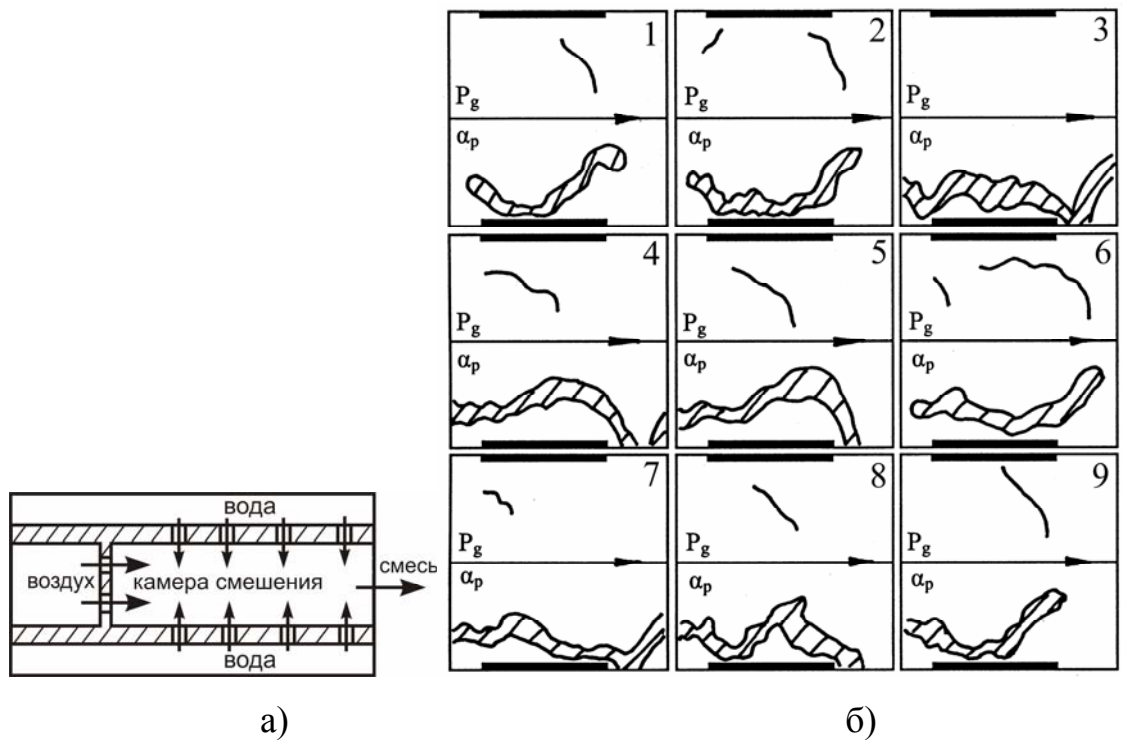


Рис.4.24. а) Схема камеры смешения. б) Последовательные стадии процесса смешения в камере (поток осесимметричный). В верхней половине каждого квадрата темной линией изображена зона максимального градиента давления газа. Стрелкой в середине квадрата показано основное направление потока. В нижней половине квадрата заштрихованные области соответствуют $\alpha_p > 0.4$.

Темная полоса вверху и внизу квадрата – зона впрыска жидкости.

Дополнительно было исследовано влияние скорости подачи воды в камеру (фактически это влияние перепада давления между магистралью подачи воды и камерой смешения) и густоты отверстий (фактически это также влияние

размера отверстий) на распределение фаз. Для сокращения времени расчетов были выбраны условия, несколько отличные от условий в реальной камере, а именно, поток воздуха на входе в камеру полагался равномерным, массовый расход воды был меньше «базового». Результаты расчета приведены на рис. 4.25-4.27. Из сопоставления положения изолиний объемной доли капель видно, что распределение фаз в камере гораздо чувствительнее к скорости подачи воды, чем к густоте отверстий. Именно этим объясняется существенное изменение компактности и дальнобойности струи при малых изменениях положений регулировочных кранов на магистралях подачи воды экспериментальной установки.

4.4. Расчет потока с учетом процессов в камере смешения

С учетом полученных данных о потоке на входе было проведено численное моделирование соплового течения¹³. Для учета влияния колебаний в камере смешения на поток в первом приближении задавалось изменение максимума объемной доли капель относительно среднего на входе в сопло по синусоидальному закону, а расходы фаз полагались постоянными, то есть скорости фаз в поперечном сечении изменялись в соответствии с положением максимума α_p . Расчеты показали, что ниже по потоку возникают колебания расходов фаз (рис. 4.28), фактически *в потоке формируются своеобразные аэрозольные «пробки»*, периодически выбиваемые из сопла (см. рис.4.29-А) и вызывающие колебания угла раскрытия струи (достаточно сравнить рис.4.29-А,Б,Г)¹⁴ /201/. Колебания заметно поднимают среднее давление вдоль канала (рис. 4.30), снижая эффективность разгона капель. Также очевидно, что

¹³ Объем данных этого численного эксперимента весьма велик, поэтому результаты есть только в электронном виде в папке «Расчет потока в канале с учетом колебаний в камере смешения» на прилагаемом компакт-диске.

¹⁴ Анимация расчета представлена в электронной версии работы и в файле Film_Nozzle-1 на прилагаемом компакт-диске.

колебания в камере влияют на параметры в ядре потока, сглаживая их (рис. 4.31).

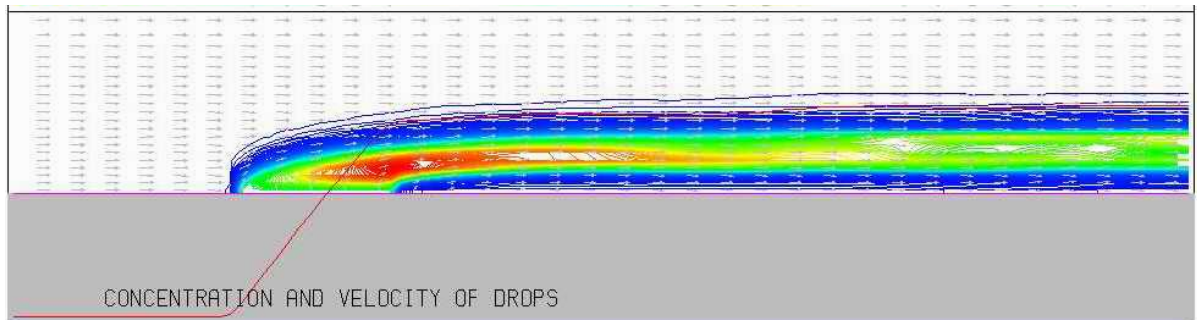


Рис.4.25. Изолинии объемной доли капель при некоторой скорости подачи воды W_{p0} и объемной доле воды α_{p0} .

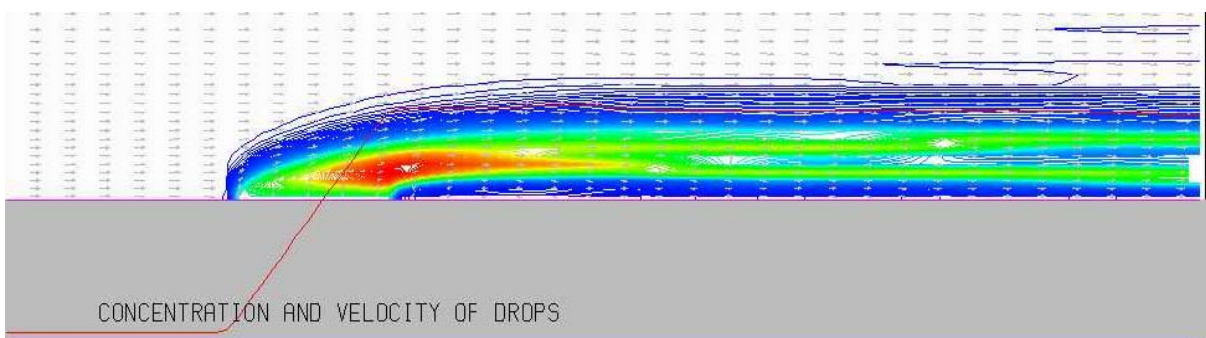


Рис.4.26. Изолинии объемной доли капель при некоторой скорости подачи воды W_{p0} и объемной доле воды $3\alpha_{p0}$.

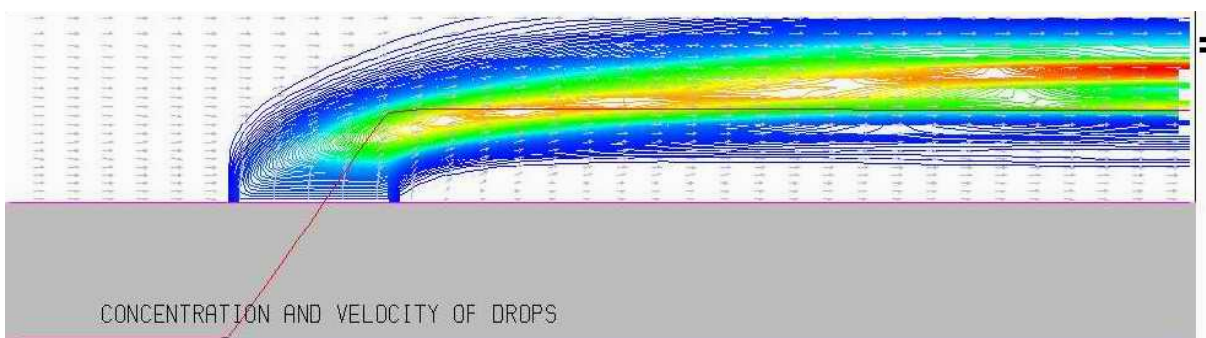


Рис.4.27. Изолинии объемной доли капель при некоторой скорости подачи воды $3 \cdot W_{p0}$ и объемной доле воды α_{p0} .

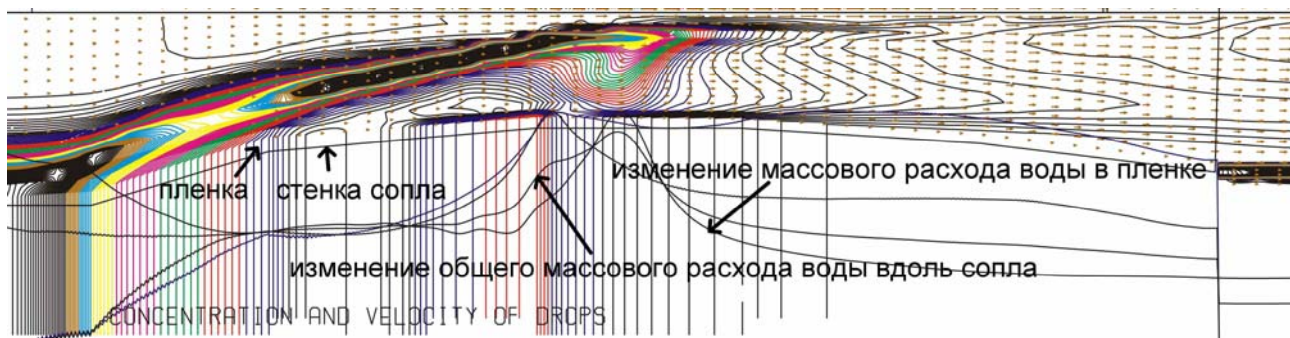


Рис.4.28. Изменение массового расхода жидкости вдоль сопла (визуализация одного из шагов расчета).

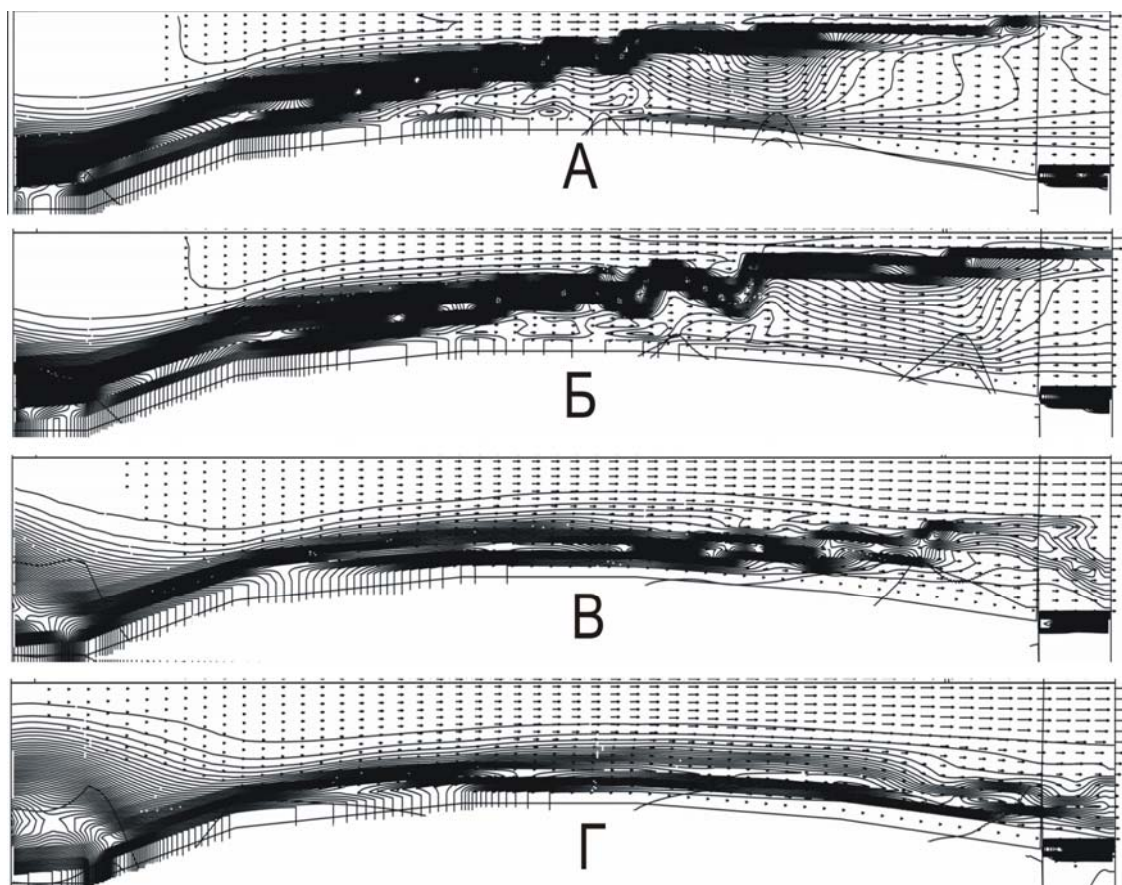


Рис.4.29. Последовательные стадии (А,Б,В,Г) выноса из сопла облака капель повышенной концентрации (внутри темной области изолиний объемной концентрации). Поток течет слева направо. Темная область у правого нижнего края каждого рисунка – капли из пленки.

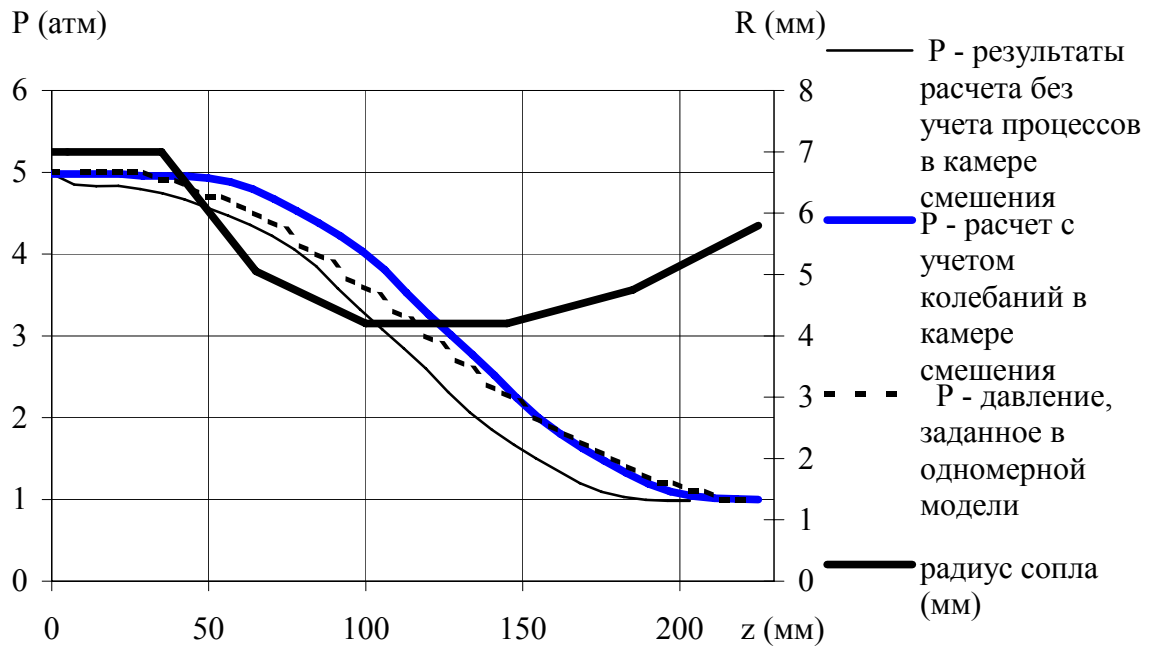


Рис.4.30. Прогноз изменения статического давления вдоль стенки сопла.

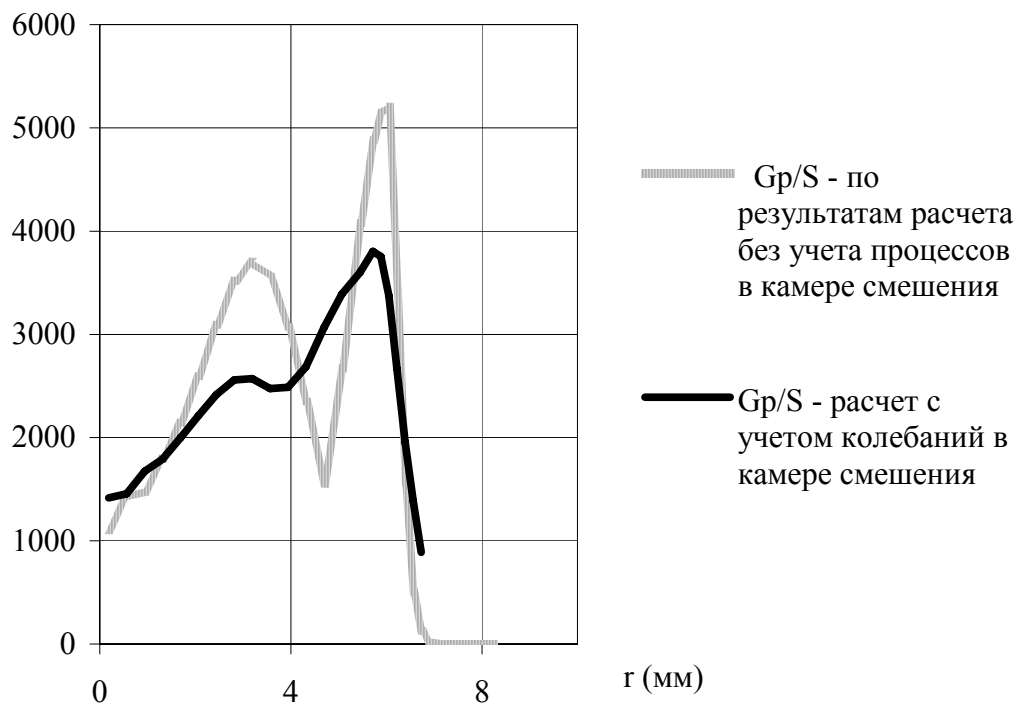


Рис.4.31. Изменение плотности орошения у среза сопла при учете колебаний в камере смешения.

4.5. Выводы по главе 4.

Численное моделирование показало, что в высоконцентрированном газокапельном потоке:

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

Все вышеперечисленные свойства потока допускают, с одной стороны, прямую или опосредованную экспериментальную проверку (например, в соответствии с /94/ и рис. 4.31, потери на трение выше, чем принимаемые по осредненным величинам.), с другой стороны, помогают выбирать направления совершенствования сопла и камеры смешения.

Подчеркнем, что в численных экспериментах не ставилась задача максимально точного совпадения с параметрами реального потока, цель расчетов – выявить физические особенности потока.

Численные эксперименты показали, что для проверки качества моделирования недостаточно средних характеристик потока, таких как расходы фаз, импульс потока на срезе сопла (тяга сопла), изменение давления вдоль стенки канала. Необходимо иметь данные о распределении и параметрах газа и жидкости поперек потока в канале и на начальном участке струи. Численные и

экспериментальные исследования автора позволили получить такие данные о потоке на входе в сопло.

Также расчеты показали, что для прогнозирования и объяснения поведения, компактности газочастиц струи необходимо рассматривать не одно сопло, а систему «камера смешения + сопло + начальный участок струи». Это вполне согласуется с экспериментальными результатами, см., например, /37,66,185/.

В связи с вышесказанным следующей задачей стала экспериментальная проверка результатов расчетов и получение данных о пространственной структуре реального потока у среза сопла.