

1. Выбор параметров базового потока для экспериментального и численного исследования.

В этой главе определяются характерные параметры потока, который будет основным объектом исследования. По результатам численного моделирования и экспериментальным данным получены критерии компактности газокапельной струи. В итоге получены массовые расходы, профиль канала, давление, средние скорости фаз так называемого «базового» потока.

1.1. Определение соотношений массовых расходов фаз для максимально дальнобойной струи

При тушении пожаров чаще всего необходимо подать дискретную фазу (воду) как можно дальше и с заданной концентрацией, поэтому важно уметь прогнозировать распределение дискретной фазы в пространстве, то есть определять *компактность* газокапельной струи.

Предположим, что критерием компактности будет служить заданное минимальное значение объемной концентрации частиц (капель), что соответствует понятиям "прозрачность", "видность" струи и позволяет сравнивать теоретические и экспериментальные данные непосредственно по результатам фото- и видеосъемки.

Для практических приложений необходимо уметь прогнозировать компактность струи в зависимости от параметров потока на срезе сопла. Одними из основных характеристик газокапельного потока являются число Рейнольдса газовой фазы Re_g , скольжение дискретной фазы U_p/U_g (U_p - скорость капель, U_g - скорость газа), массовая загруженность потока частицами G_p/G_g (G_p - массовый расход капель, G_g - массовый расход газа), объемная

загруженность потока частицами A_p (объемная концентрация¹), относительный диаметр частиц D_p/d (D_p – диаметр капель, d – диаметр среза сопла)².

Ниже приведены результаты исследования влияния этих критериев на компактность струи, выполненные по модели автора /156/, применимость которой к осесимметричным струям показана в /156-158/, и выделяются определяющие (основные) критерии /170,237/. Более подробные данные см. в Приложении 2.

1.1.1. Исследование влияния числа Рейнольдса газовой фазы, скольжения дискретной фазы, относительного диаметра частиц и объемной загруженности потока частицами на компактность газок капельной струи

Для исследования влияния числа Рейнольдса газовой фазы на компактность газок капельной струи была проведена серия расчетов водовоздушных струй с различными Re_g . При этом диаметр капель, диаметр сопла, объемная концентрация частиц, скольжение дискретной фазы ($U_p/U_g=0.9$) сохранялись неизменными, массовая загруженность потока частицами изменялась в пределах 3 %. Также был проведен расчет для $U_p/U_g=1,1$ (подробнее см. Приложение 2).

Анализ поведения A_p при различных значениях U_p/U_g показал, что Re_g определяет однозначно компактность струи, причем для A_p не наблюдается монотонной зависимости от Re_g . Это можно объяснить тем, что, начиная с некоторого расстояния от среза сопла, импульс газа сильно падает из-за подмешивания окружающего воздуха, соответственно падает величина поперечной турбулентной диффузии частиц, поэтому в дальней области струи частицы летят практически параллельно оси симметрии сопла³. Причем для струй с меньшим Re_g этот момент может наступить при меньшем радиусе

¹ Чаше в тексте используется α_p .

² О критериях в многофазных потоках см., например, /19,142,143/.

³ В расчетах использовалась модель осесимметричной струи. Реально в дальней области струи основное влияние на капли оказывает сила тяжести.

«видности» дискретной фазы, то есть менее «энергичная» по газу струя может оказаться более компактной.

Для исследования влияния скольжения дискретной фазы на компактность газокапельной струи была проведена серия расчетов водовоздушных струй с переменным U_p/U_g . При этом диаметр капель, диаметр сопла, объемная концентрация частиц, число Рейнольдса газовой фазы сохранялись неизменными, однако менялась массовая загрузка потока частицами (подробнее см. Приложение 2).

Анализ поведения A_p при различных значениях U_p/U_g показал, что влияние этого критерия в дальней области струи достаточно слабое. При этом сильно проявляется влияние G_p/G_g .

Для исследования влияния относительного диаметра частиц на компактность газокапельной струи была проведена серия расчетов водовоздушных струй, вытекающих из сопла с радиусом 11.5 мм. От варианта к варианту менялся диаметр частиц. При этом остальные параметры на срезе сопла сохранялись неизменными. В этом случае получен вполне прогнозируемый результат. Имеет место сильная зависимость компактности струи от величины D_p . При этом чем больше диаметр частиц, то есть чем тяжелее, инерционнее частица, тем компактнее струя (см. Приложение 2).

Для исследования влияния объемной загрузки потока частицами на компактность газокапельной струи была проведена серия расчетов водовоздушных струй с различной объемной концентрацией на срезе сопла. При этом диаметр капель, диаметр сопла, число Рейнольдса газовой фазы сохранялись неизменными, а массовая загрузка потока частицами пропорциональна A_p .

Из анализа поведения A_p при различных начальных значениях этой величины видно, что имеет место сильная зависимость компактности струи от величины A_p . Однако в практической работе часто известна величина G_p/G_g , а значение A_p получается в результате оценочных расчетов. Поэтому A_p не имеет

смысла использовать в качестве самостоятельного критерия для оценки компактности газочапельных струй.

1.1.2. Исследование влияния массовой загрузки потока частицами G_p/G_g на компактность газочапельной струи

Была проведена серия численных экспериментов в следующей постановке: статическое давление на входе в сопло было неизменно и равнялось 5 атм, скорости газа и капель были одинаковы и равны примерно 5 м/с, входной диаметр сопла постоянный. Параметры сопла выбирались так, чтобы обеспечить, с одной стороны, максимально возможную скорость капель, с другой стороны, минимальное различие скоростей газа и капель, при этом сопло работало на расчетном режиме (для расчета сопла использовалась одномерная модель, см. п. 1.2). Если при такой постановке задачи сначала пропускать через сопло чистый газ (воздух), а затем добавлять все больше и больше капель (вода), то в пределе получится струя жидкости. При этом средняя скорость газочапельной смеси будет постоянно падать, а дальнобойность должна меняться нелинейным образом. В результате расчетов были получены графики изменения объемной концентрации и скорости капель вдоль оси струи (рис.1.1). Видно, что существует сильная зависимость компактности струи от G_p/G_g и что при отношении массовых расходов капель и газа (G_p/G_g) ~ 30 , объемная концентрация капель наиболее слабо спадает вдоль оси струи по абсолютной величине, то есть струя имеет наибольшую дальнобойность и компактность (прозрачность облака капель напрямую определяется объемной концентрацией капель в нем). Скорость капель при этом все еще достаточно велика.

На основании расчетов можно сделать два вывода. Первый, теоретический, состоит в том, что G_p/G_g можно использовать как основной критерий компактности газочапельной струи. Второй, практический, в том, что

существует такая область отношений массовых расходов капель и газа, при которой дальнобойность газочапельной струи выше, чем жидкостной при одинаковых расходе жидкости G_p и рабочем давлении в магистралях, и можно оценить оптимальное G_p/G_g .

Также была проведена серия натуральных экспериментов [28] по исследованию дальнобойности газочапельных струй. Экспериментальная установка позволяла получать газожидкостные смеси перед соплом со следующими параметрами: G_p/G_g до 64 (максимальное G_p около 700 г/с), давление 4,5-5,5 атм. Оценка дальнобойности потоков из сменных сопел (выходные диаметры находились в диапазоне 7-11 мм) проводилась по фотографиям экспериментов. Угол установки сопла составлял 60° к горизонту. Результаты экспериментов представлены на рис.1.2. Дальнобойность растет с ростом G_p/G_g , но до определенного предела. Разброс точек вокруг аппроксимирующей кривой указывает на то, что наибольшая дальнобойность получается при G_p/G_g в диапазоне 30-40, что соответствует расчетному результату.

На основании анализа результатов расчетов можно сделать следующие выводы:

- из принятых к рассмотрению критериев, характеризующих компактность газочапельной турбулентной струи по параметрам на срезе сопла, наиболее важными («сильными») являются массовая загрузка потока дискретной фазой и относительный диаметр частиц;
- получена интересная для практических приложений (системы пожаротушения) оценка области отношений массовых расходов капель и газа ($G_p/G_g \sim 30$), при которой дальнобойность газочапельной струи максимальна при фиксированном давлении в магистралях.

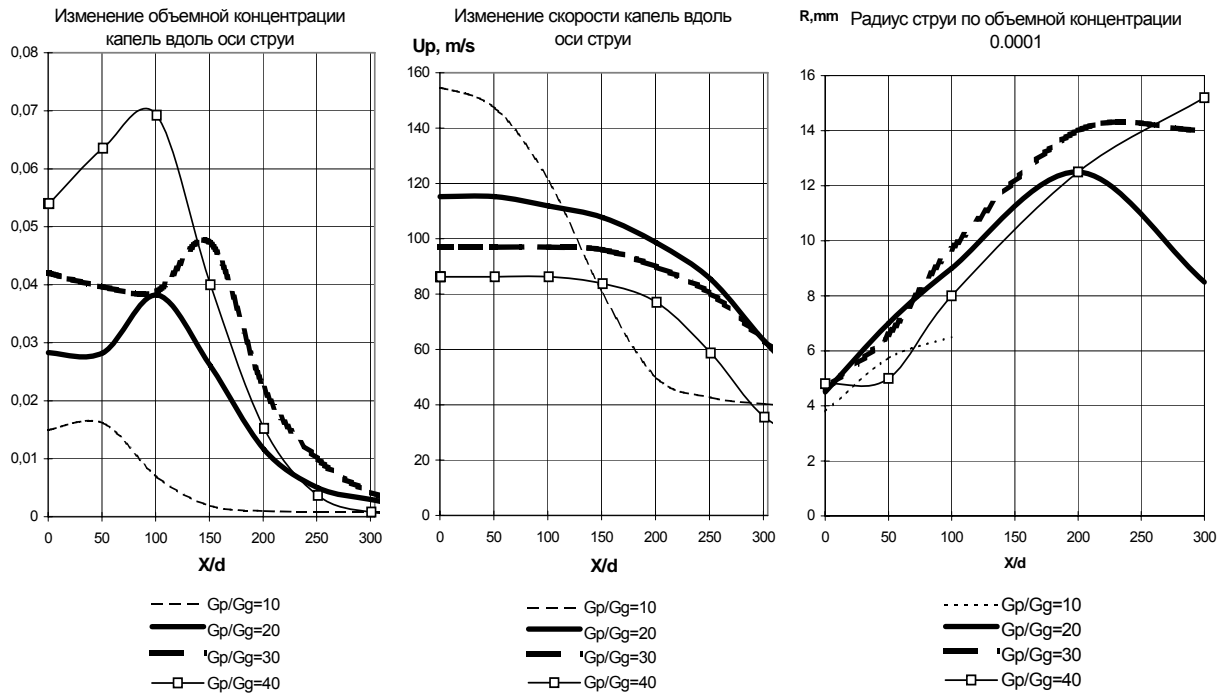


Рис.1.1. Изменение параметров капель вдоль оси струи.

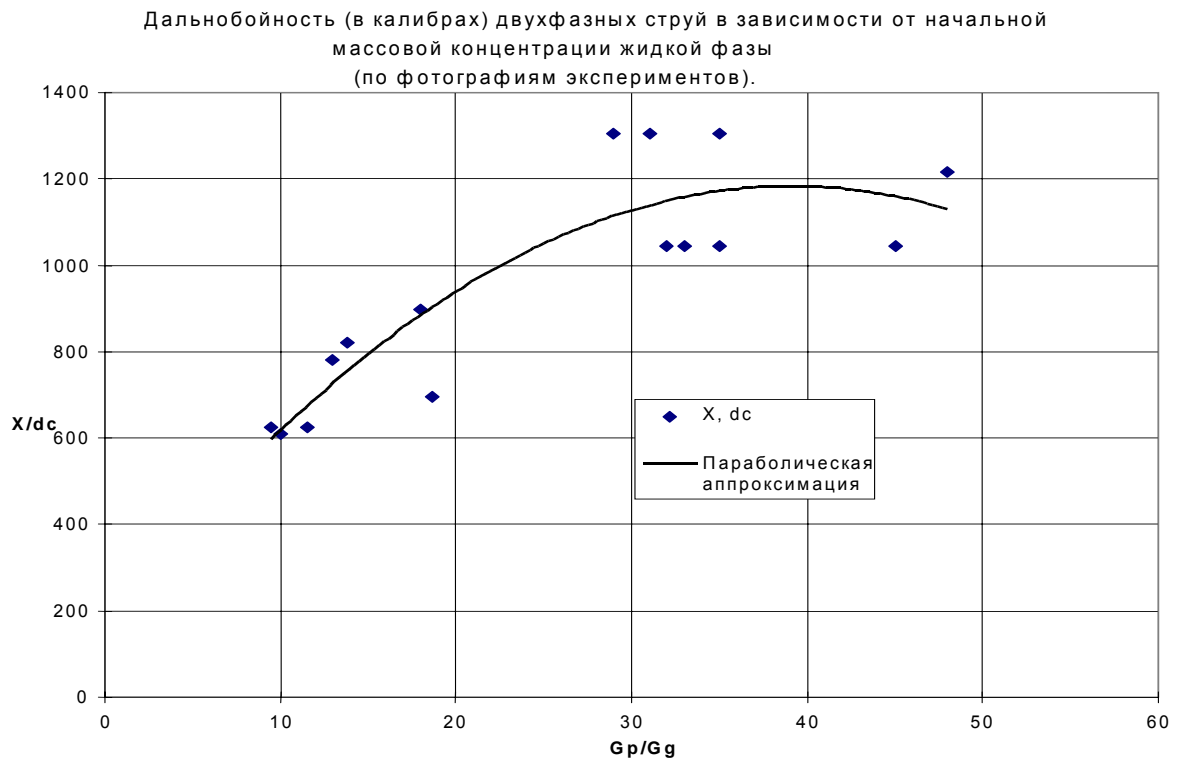


Рис.1.2. Дальнобойность газожидкостных струй /28/ со следующими параметрами: отношение расходов фаз G_p/G_g до 64 (максимальное G_p около 700 г/с), давление на входе в разгонное сопло 4,5-5,5 атм. Использовались сменные сопла с выходными диаметрами 7-11 мм.

1.2. Определение расходов воздуха, воды и мелкости капель. Проектирование сопла для разгона газок капельной смеси.

Анализ статистики пожаров и экспериментальных данных ВНИИ ПО МЧС России показал /78/, что при тушении наиболее массовых возгораний темп подачи жидкости должен быть порядка $0.5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, дисперсность капель у очага пожара $\sim 150 \text{ мкм}$, удаление оператора от очага до 5 м. Учитывая высокую эффективность мелкодисперсного тушения (см. Приложение 1) массовый расход жидкости принят $0.4 \text{ кг}/\text{с}$. Из-за ограничений, связанных с требованиями к ранцевым установкам пожаротушения, давление на входе в проектируемое сопло было принято равным 5 атм, а расход воздуха - $13 \text{ г}/\text{с}$.

Для получения первого варианта профиля сопла использовалась одномерная монодисперсная математическая модель двухфазного соплового течения с учетом скоростной и температурной неравновесности фаз и трения потока о стенки канала. Фазовые переходы отсутствуют. Подход и уравнения аналогичны изложенным в работах /81,83/. При записи уравнений введены обозначения: t - время, u - скорость, ρ - плотность, α - объемная концентрация, $F_{\text{тр}}$ - «сила» трения⁴, x - координата, f - площадь канала, P - давление, U - внутренняя энергия, T - температура, R_g - газовая постоянная. Индексом g обозначены параметры газа, индексом p - параметры частиц.

В правые части уравнений входят слагаемые, учитывающие обмен количеством движения и энергией между фазами: в уравнение количества движения газа добавляются «сила» сопротивления частиц со знаком минус: $-F_{\text{сопр}}$ и «сила» трения газа о стенки канала со знаком минус: $-F_{\text{тр}}$, в уравнение количества движения частиц - «сила» $F_{\text{сопр}}$, в уравнение энергии газа - мощность «силы» $F_{\text{сопр}}u_p$ со знаком минус: $-F_{\text{сопр}}u_p$ и тепловой поток от частиц к газу со знаком минус: $-Q_p$, в уравнение энергии частиц - мощность $F_{\text{сопр}}u_p$ и тепловой поток Q_p .

⁴ Слово «сила» стоит в кавычках, так как в уравнениях эти величины имеют размерность $[\text{Н}/\text{с}]$.

При записи уравнений энергии газа и частиц предполагается, что все тепло, выделяющееся в результате трения газа о стенки канала и в результате взаимодействия газа с частицами, воспринимается газом. Это тепло равно мощности сил трения, и в уравнениях они сразу сокращаются. Учитывается деформация капли под действием аэродинамических сил.

С учетом изложенного для стационарного течения система уравнений, записанных для каждой фазы, имеет вид:

$$P_g = \rho_g R_g T_g \quad (1.1)$$

$$\rho_p = \text{const} \quad (1.2)$$

$$\alpha_g + \alpha_p = 1 \quad (1.3)$$

$$G_g = \alpha_g \rho_g u_g f = \text{const} \quad (1.4)$$

$$G_p = \alpha_p \rho_p u_p f = \text{const} \quad (1.5)$$

$$G_g \cdot du_g/dx = -f \cdot dP_g/dx - F_{\text{тр}} - F_{\text{сопр}} \quad (1.6)$$

$$G_p \cdot du_p/dx = F_{\text{сопр}} \quad (1.7)$$

Уравнения энергии записываем через энтальпию

$$i = U + P_g/\rho_g \quad (1.8)$$

В интегральном виде закон сохранения энергии имеет вид

$$U_{\text{полная}} = (i_g + u_g^2) \cdot G_g + (i_p + u_p^2) \cdot G_p = \text{const} \quad (1.9)$$

Связь между i и T имеет вид

$$i_g = c_{pg} \cdot T_g \quad (1.10)$$

$$i_p = c_p \cdot T_p \quad (1.11)$$

где c_{pg} - теплоемкость газа при постоянном давлении, c_p - теплоемкость вещества частиц.

Сила трения $F_{\text{тр}}$ описывается выражением

$$F_{\text{тр}} = (\pi/8) \cdot \xi_{\text{тр}} \rho_g u_g^2 D \cdot \text{Cos} \beta \quad (1.12)$$

где β - угол между касательной к стенке и осью канала,

$\xi_{\text{тр}}$ - коэффициент трения,

D - диаметр канала.

Коэффициент трения зависит от режима течения газа в канале, и для ламинарного режима течения может быть рассчитан по формуле:

$$\xi_{\text{тр}} = 64/\text{Re}_D \quad \text{Re}_D \leq 2300; \quad (1.13)$$

для турбулентного режима течения - по формуле:

$$\xi_{\text{тр}} = 0,3164/\text{Re}_D^{1/4} \quad 2300 < \text{Re}_D \leq 10^5. \quad (1.14)$$

В этих формулах Re_D - число Рейнольдса, вычисленное по диаметру канала D :

$$\text{Re}_D = \rho_g u_g D / \mu_g, \quad (1.15)$$

здесь μ_g - коэффициент динамической вязкости газа; Nu - число Нуссельта; Pr_g - число Прандтля.

$$F_{\text{сопр}} = \alpha_p \cdot \text{Cd}_0 \cdot C_{\text{We}} \cdot C_{\alpha p} \cdot (u_g - u_p) \cdot |u_g - u_p| \cdot \rho_g \cdot 3 / (4 \cdot D_p), \quad (1.16)$$

где $u_g - u_p$ - скорость обдува капли; C_{We} - функция, учитывающая влияние деформации на изменение коэффициента сопротивления капли; $C_{\alpha p}$ - функция, учитывающая влияние соседних капель на изменение коэффициента сопротивления; Cd_0 - коэффициент сопротивления шара.

Для коэффициента сопротивления Cd_0 существуют различные формулы, однако в интересующем нас диапазоне параметров ($D < 500$ мкм, $|u_g - u_p| < 100$ м/с), как следует, например, из работы /42/, отличие этих формул невелико, поэтому в расчетах используется формула /68/:

$$\text{Cd}_0 = 24/\text{Re}_p + 4.4/\text{Re}_p^{0.5} + 0.32, \quad (1.17)$$

где Re_p - число Рейнольдса, вычисленное по диаметру частиц:

$$\text{Re}_p = \rho_g |u_g - u_p| D_p / \mu_g. \quad (1.18)$$

Так как в потоке мы имеем дело не со сферой, а с каплей, то для коэффициента сопротивления используется поправка В.Е.Алемасова и др. на деформацию капли, как, например, в работе /140/:

$$C_{\text{We}} = 15 \text{ при } \text{We} > 30, \quad (1.19)$$

$$C_{\text{We}} = \exp(0.03 \cdot \text{We}^{1.5}) \text{ при } \text{We} \leq 30,$$

где $\text{We} = \rho_g \cdot |u_g - u_p|^2 \cdot D / \sigma$ - число Вебера, σ - коэффициент поверхностного натяжения вещества капли (для воды $\sigma = 0.075$ Н/м).

Полученная система уравнений (1.1-1.19) используется для решения обратной задачи, когда необходимо рассчитать площадь канала при известном законе распределения давления по его длине. Граничные условия записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned} u_g = u_{go}, u_p = u_{po}, f = f_o, \alpha_p = \alpha_{po}, P = P_o, T_g = T_{go}, T_p = T_{po} \quad (x=0); \\ P = P_L \quad (x=L) \end{aligned} \quad (1.20)$$

В данной работе давление P в сопле задавалось выражением, предложенным в [81,83] и обеспечивающим плавное изменение P вдоль сопла и нулевые производные dP/dx начальном и конечном его сечениях:

$$P = P_o \cdot \{0.5 \cdot [(1 + P_L/P_o) + (1 - P_L/P_o) \cdot |\cos[\pi(x/L)^m]|^n]\}, \quad (1.21)$$

здесь L - длина сопла; P_L - давление на выходе из сопла; m и n - константы, определяющие вид функции $P = P(x)$. На базе описанной математической модели составлена программа для ПЭВМ и проведены необходимые расчеты. Анализ результатов расчетов позволяет сделать заключение, что, с точки зрения эффективности разгона частиц, осесимметричное и плоское сопла являются практически равноценными. Однако одномерная модель не учитывает влияние углов и боковых сторон реальных плоских сопел, кроме того, площадь поверхности плоского сопла выше, чем осесимметричного, что несколько увеличивает трение о стенки, поэтому в дальнейшем рассматриваются осесимметричные сопла.

Принимаемый к изготовлению профиль несколько отличается от рассчитанного. Это объясняется особенностями конструкции камеры смещения (см. рис.1.3), технологическими ограничениями и опытом, полученным в ходе предыдущих исследований. На рис.1.4 показаны рассчитанный по одномерной модели и изготовленный профили сопла.

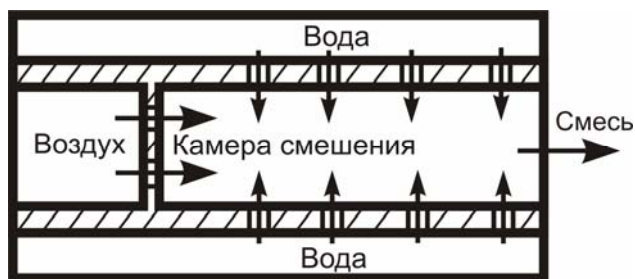


Рис.1.3. Схема камеры смешения.

Не будем останавливаться на проблемах оптимизации профиля для заданного перепада давления и отношения расходов фаз. Эти вопросы для одномерной модели подробно рассмотрены в работах /13,29,81,83,132/. Таким образом, в качестве базового для исследования был выбран поток с характеристиками, приведенными в табл. 1.1.

Таблица 1.1.

Основные характеристики исследуемого «базового» потока

массовый расход воды (г/с)	390
массовый расход воздуха (г/с)	13
отношение расходов	30
давление на входе в сопло (атм)	5

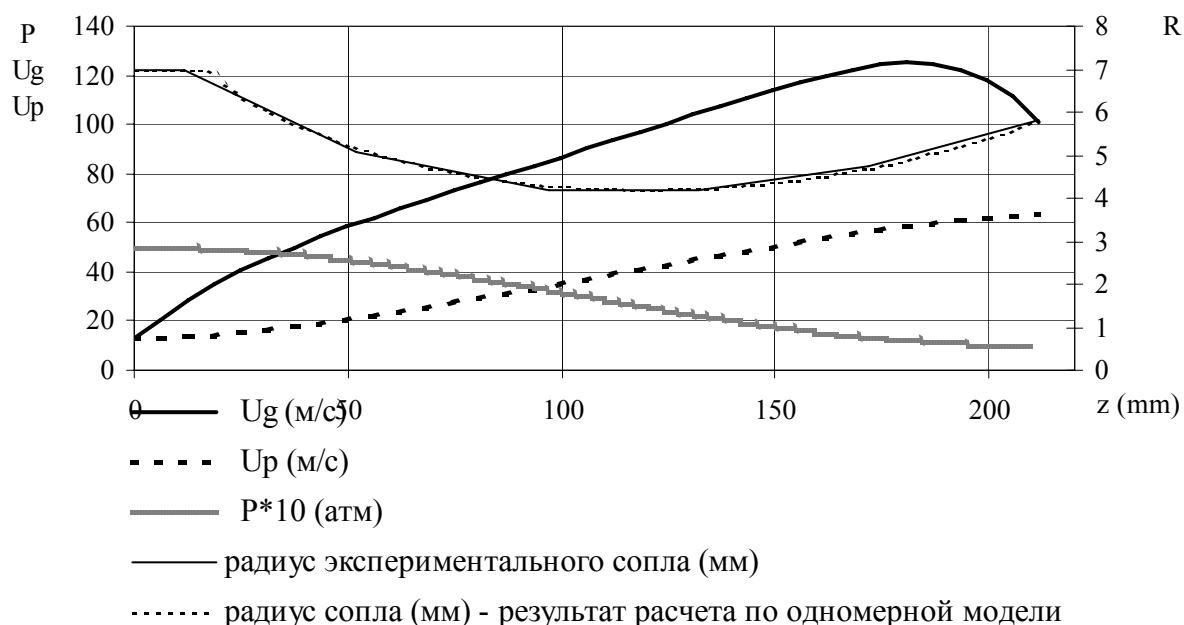


Рис.1.4. Использование одномерной модели при проектировании экспериментального сопла. P – давление газа, Z – расстояние вдоль сопла.

Отметим, что мы оперируем размерными величинами, так как цель работы не в получении критериальных зависимостей, а в получении данных о структуре и параметрах соплового потока на основании численного и физического экспериментов, а также в проверке возможностей многожидкостной модели.

1.3. Прогнозирование режима течения.

Смесь газа и жидкости может течь в канале по-разному. В [144] различают следующие режимы течения:

- пузырьковое, когда газ распределен в жидкости в виде относительно мелких пузырьков;
- пробковое (снарядное), когда пузыри газа занимают практически все сечение канала;
- раслоенное и волновое, когда газ и жидкость движутся вдоль противоположных стенок канала, причем на поверхности жидкости могут существовать волны;
- кольцевое (дисперсно-кольцевое), когда жидкость течет по стенкам канала в виде пленки, причем часть жидкости находится в виде капель в газовом ядре;
- клочковато-кольцевое, когда жидкость течет по стенкам канала в виде пленки, а капель в газовом ядре настолько много, что в результате их взаимодействия постоянно образуются неустойчивые фрагменты (комки, лоскуты, жгуты).

Для определения режимов течения существуют так называемые карты режимов. Однако следует отметить, что эти карты надо «использовать с осторожностью скорее в качестве общего указания на вероятность того или

иного режима, чем в качестве определенного показателя того, что этот режим действительно имеет место» (цитата из /144/).

Воспользуемся картами режимов Шихта /234/ (рис.1.5) и Хьюитта,Робертса /222/ (рис.1.7).

По вертикальной оси карты Шихта отложен комплекс $G \cdot x / \lambda$, где G – суммарный поток массы газа и жидкости через единицу площади за единицу времени, x – массовая доля газа в потоке, $\lambda = [(\rho_g \cdot \rho_p) / (\rho_{g0} \cdot \rho_{p0})]^{0.5}$, а $\rho_{g0} \cdot \rho_{p0}$ – плотность газа и жидкости при нормальных условиях. По горизонтальной оси карты Шихта отложен комплекс $(1-x) \cdot \lambda \cdot \psi / x$, где $\psi = [\sigma / \sigma_0] \cdot [(\mu_p / \mu_{p0}) \cdot (\rho_p / \rho_{p0})^2]^{1/3}$, σ и μ – поверхностное натяжение и вязкость жидкости, индекс 0 соответствует нормальным условиям. Полагаем, что постоянны плотность, вязкость и поверхностное натяжение жидкости. На рис.1.6 изображена кривая, рассчитанная по данным одномерного расчета в тех же координатах, что и карта Шихта. Из сопоставления рис.1.5 и рис.1.6 видно, что практически вся кривая лежит в области кольцевого режима, лишь слегка заходя правой частью в область снарядного.

По вертикальной оси карты Хьюитта и Робертса отложена удвоенная кинетическая энергия единичного объема газа, по горизонтальной – та же величина для жидкости. На рис.1.8 изображена кривая, рассчитанная по данным одномерного расчета в тех же координатах, что и карта Хьюитта и Робертса. Из сопоставления рис.1.7 и рис.1.8 видно, что вся кривая лежит в области клочковато-кольцевого режима.

Так как в нашем случае, из-за малой длины канала и высоких скоростей фаз, сила тяжести будет играть незначительную роль (см. п.2.1), следует ожидать клочковато-кольцевого и/или кольцевого режима течения.

1.4. Выводы по главе 1.

Тушение пожаров необходимо проводить за минимальное время и с минимальными издержками, в том числе издержками, вызванными самими способами пожаротушения (например, наиболее распространённый вторичный ущерб от применения воды для тушения состоит в том, что при её избытке она заливает и повреждает помещения и имущество, расположенные ниже уровня очага загорания). Существующие штатные технические средства и специальные материалы, используемые пожарными, в полной мере не позволяют выполнить эти условия.

Работа рассматриваемой установки основывается на следующем принципе: получение гасящих пламя струй достигается за счет разгона частиц или капель огнегасящего компонента газом в специальных соплах, причём в качестве газа может использоваться воздух или любой нейтральный газ. На выходе из сопла формируется концентрированная компактная многофазная струя, которая может подаваться на большие расстояния. Это обеспечивает:

- получение высоких скоростей струй вплоть до сверхзвуковых;
- увеличение дальности в 2-5 раз;
- обеспечение оптимальной дисперсности капель или частиц в очаге и окрестности пожара (размером порядка 100 мкм);
- использование в системе подачи рабочего тела низких давлений, не превышающих 10 атм;
- использование как жидкостных, так и порошковых рабочих тел.
- сократить стоимость тушения пожаров.

В результате этой части работы получены массовые расходы, профиль канала, давление, средние скорости фаз так называемого «базового» потока ранцевой установки пожаротушения, который будет объектом исследования.

Показано, что, при постоянном давлении газожидкостной смеси на входе в сопло, существует такое отношение расходов газа и жидкости, при котором

дальность полета капель максимальна. Для заданных давления (5 атм) и расхода воды (390 г/с) определено это соотношение и соответствующий расход газа (13 г/с).

Сопоставление с картами режимов течения показало, что надо учитывать пленку на стенке канала и столкновения капель в потоке.

Созданы сопла (рис. 1.9, 1.10) для экспериментального исследования на специальном стенде. Эти сопла имеют одинаковый профиль, но отличаются внешним видом.

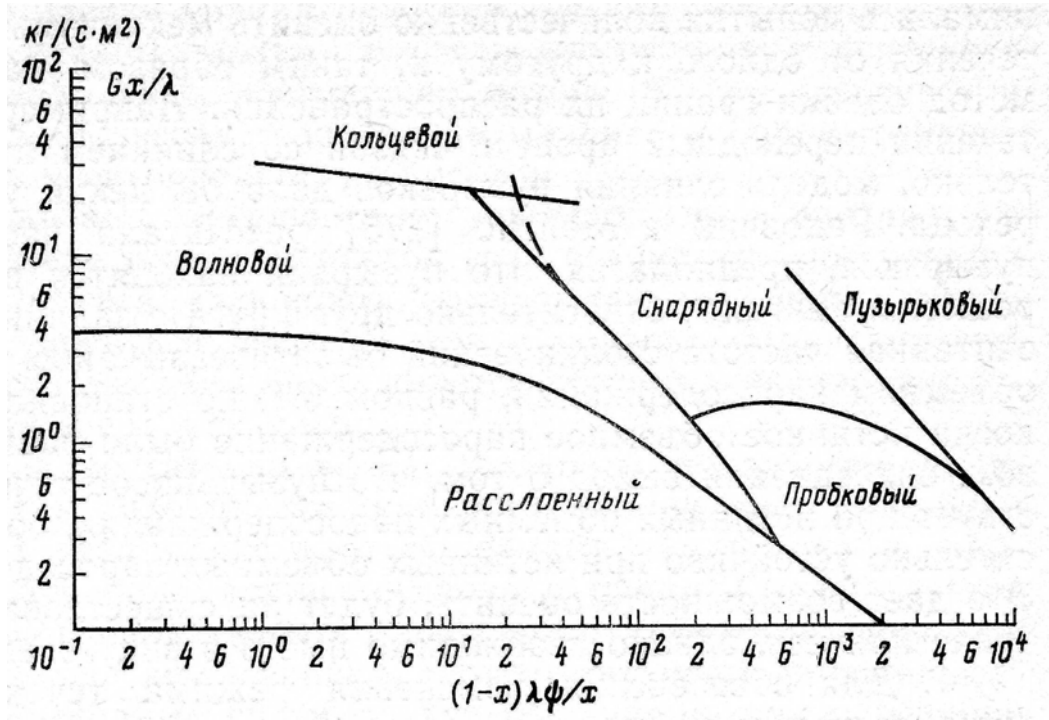


Рис.1.4. Карта режимов для горизонтальных двухфазных потоков /234/.

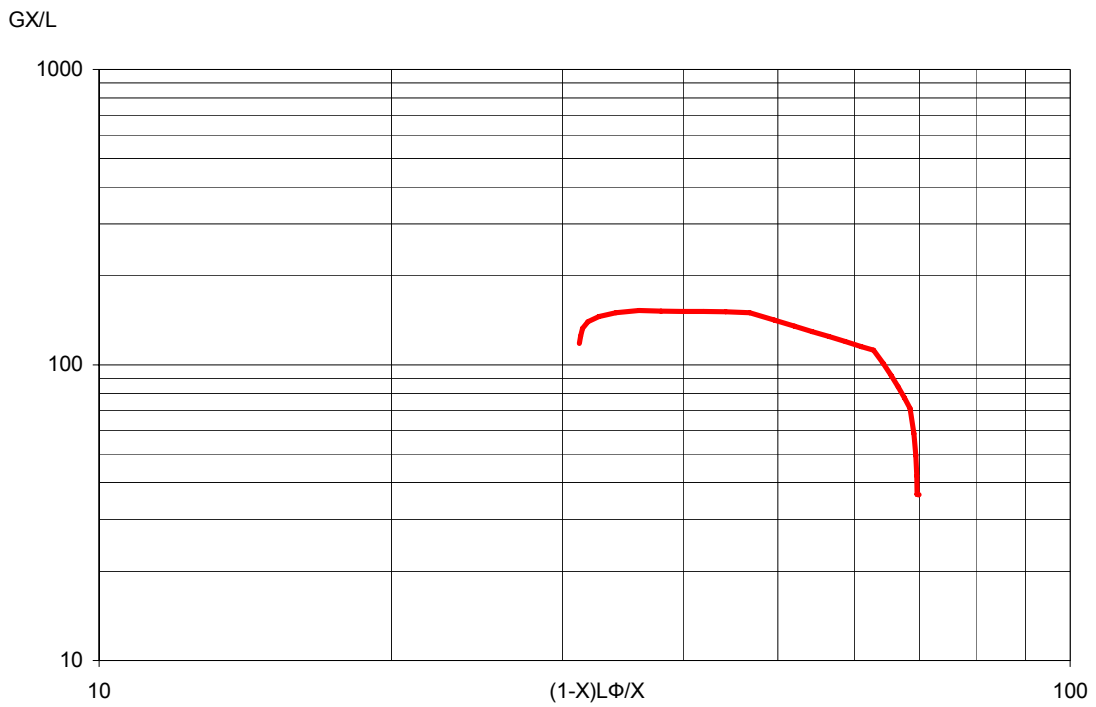


Рис.1.5. Изменение режимы течения вдоль сопла. Горизонтальная и вертикальная оси соответствуют приведенным на рис.1.4.

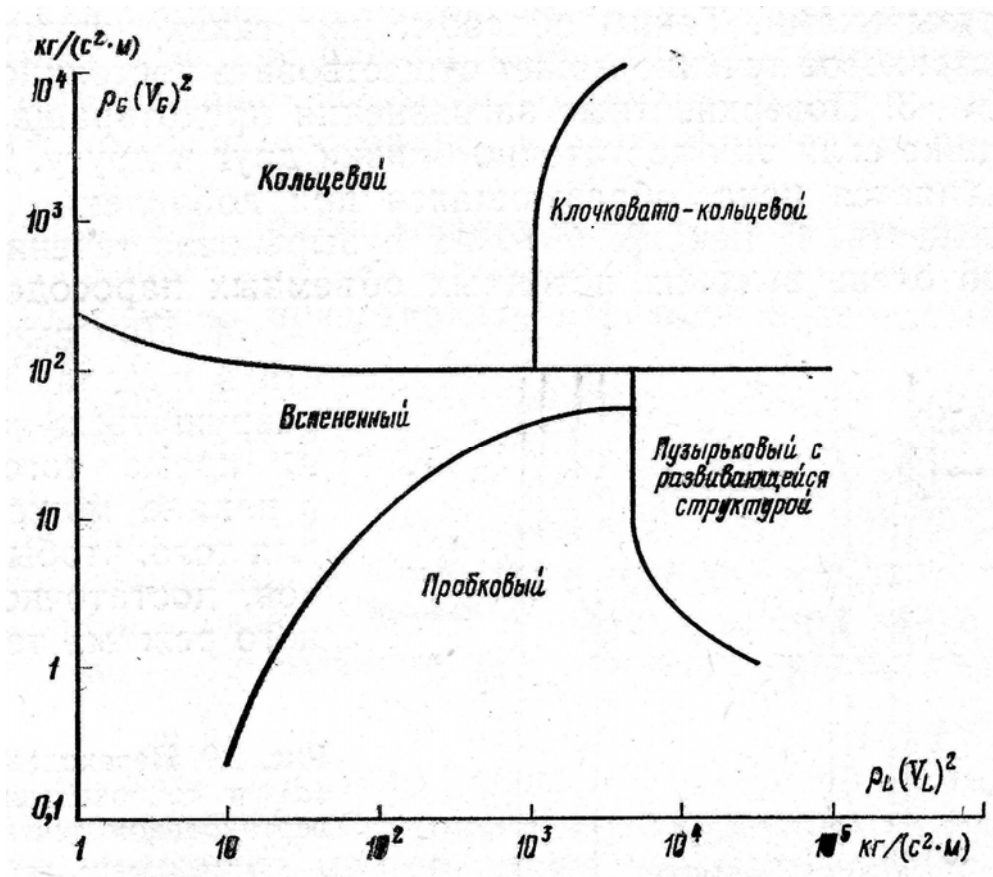


Рис.1.7. Карта режимов для вертикальных двухфазных потоков /222/.

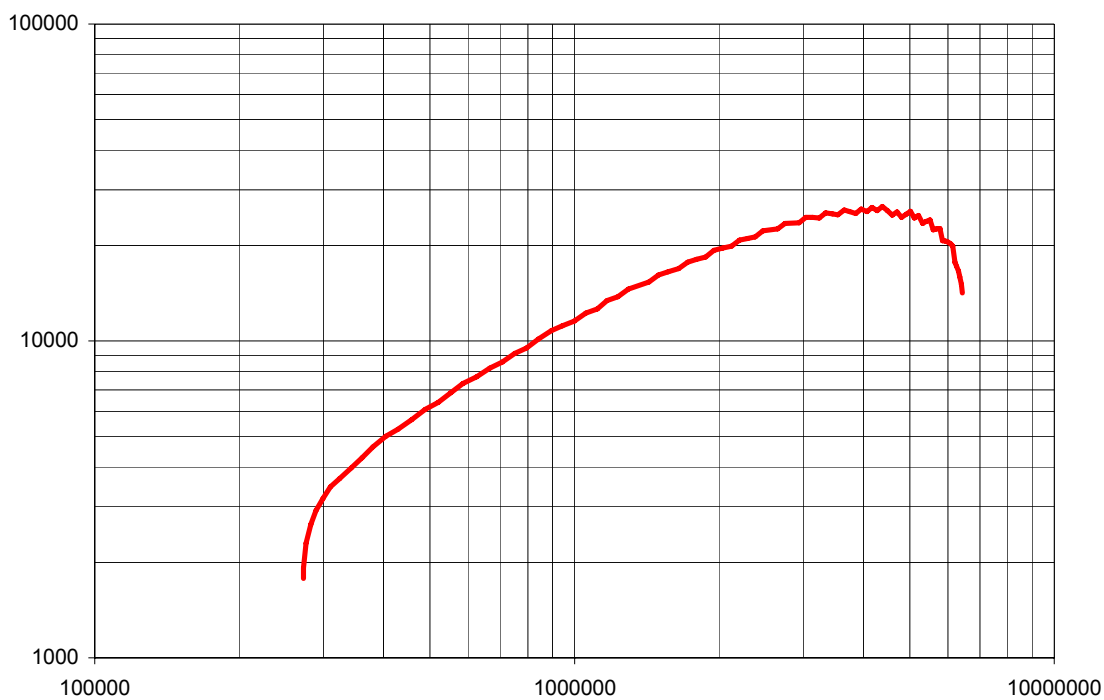


Рис.1.8. Изменение режимы течения вдоль сопла. Горизонтальная и вертикальная оси соответствуют приведенным на рис.1.7.



Рис. 1.9. Внешний вид сопла (слева) и цилиндрического канала – вставки между соплом и камерой смешения (справа), использованных в экспериментах автора.

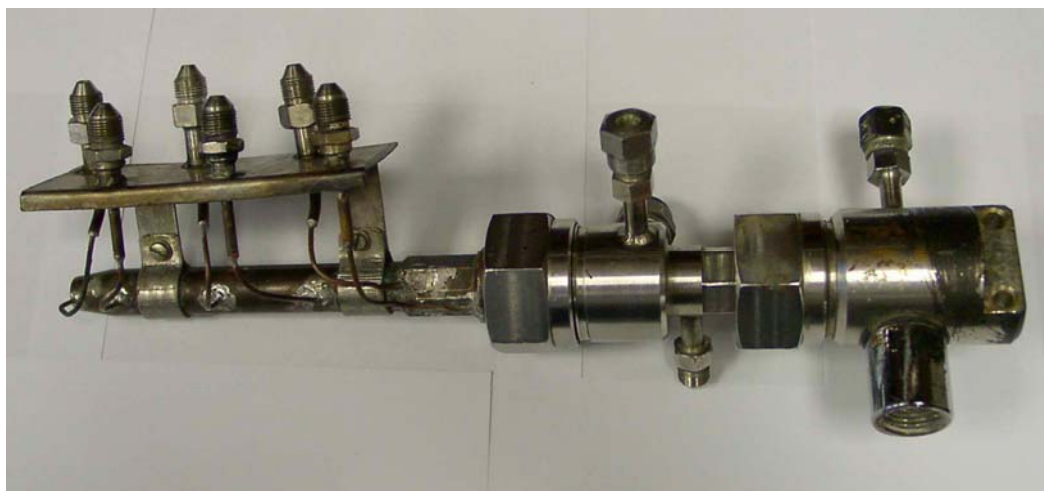


Рис. 1.10. Внешний вид сопла и камеры смешения, использованных в экспериментах /29,174,181,182,185,192,198,211,240-242/.

