На правах рукописи

Базуев Виктор Павлович

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ БИТУМНО-ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ В ТРУБАХ И КАНАЛАХ, ПРОЦЕССОВ МОДИФИЦИРОВАНИЯ БИТУМОВ И ПОЛУЧЕНИЯ БИТУМНЫХ ЭМУЛЬСИЙ В КАВИТАЦИОННО-СМЕСИТЕЛЬНОМ ДИСПЕРГАТОРЕ

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2011

Работа выполнена в Томском государственном архитектурно-строительном университете

Научный руководитель –	доктор физико-математических наук, профессор Матвиенко О.В.
Официальные оппоненты	доктор физико-математических наук, профессор Бубенчиков А.М. доктор физико-математических наук, профессор Тимченко С.В.
Ведущая организация	Томский политехнический университет

Защита состоится 23 декабря 2011 в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д212.267.13 Томского государственного университета по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.т.н. Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Долговечность и надежность асфальтобетонных покрытий напрямую связаны с качеством битумного вяжущего и других битумных дисперсных систем, используемых в дорожном строительстве. Создание эффективного оборудования и простого технологического процесса приготовления новых битумных дисперсных систем на основе дорожных битумов является **приоритетной** задачей.

К настоящему времени накоплен экспериментальный материал, и имеются многочисленные полуэмпирические зависимости для расчета течения неньютоновских сред в технологических устройствах. Эти корреляции получены путем обработки экспериментальных данных, а также с помощью упрощенных инженерных моделей. Однако, в настоящее время возможности инженерных методов расчета и проектирования аппаратов, обеспечивающих высокие технологические показатели, практически исчерпаны. Таким образом, разработке практических рекомендаций по оптимизации работы технологических устройств должно предшествовать обстоятельное теоретическое исследование структуры течения и процессов модифицирования битумно-дисперсных систем в технологических устройствах. Поэтому комплексное рассмотрение влияния гидродинамических и тепловых факторов на течение, и смешение в турбулентных закрученных потоках, процессы дробления турбулентных струй и возникновения кавитационных зон представляет достаточно сложную и в связи с практическими потребностями **актуальную** задачу.

Для создания модели движения битумно-дисперсных систем в трубах и каналах, а также для определения характеристик битумных эмульсий, получаемых в технологических устройствах, требуется понимание физических причин поведения вязких жидкостей в сложных гидродинамических условиях. При этом возникает необходимость рассмотрения следующих процессов:

- исследование гидродинамики и теплообмена сильновязкой ньютоновской жидкости;
- исследование течения закрученного потока псевдопластической жидкости;
- исследование смешения коаксиальных закрученных потоков вязкой жидкости;
- экспериментальное изучение возникновения кавитации;
- исследование структуры течения, процессов смешения, диспергирования и кавитации в кавитационно–смесительном диспергаторе.

Целью настоящей работы является

- исследование транспортирования битумных дисперсных систем в трубах и каналах;
- физическое и математическое моделирование процесса получения битумных дисперсных систем способом кавитационно-смесительного диспергирования;

- разработка энергосберегающих технологических процессов применяемых в дорожном строительстве на основе проведенных исследований.

Для выполнения этих целей необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ существующих битумных дисперсных систем, области их применения;
- осуществить анализ машин и оборудования для приготовления битумных дисперсных систем;
- выбрать основные математические модели для проведения исследований;
- проверить адекватность математических моделей движения жидкостей в трубах и каналах;
- провести исследования движения битума и битумных дисперсных систем в трубах и каналах;
- осуществить исследование процесса смешения, диспергирования и кавитации в кавитационно-смесительном диспергаторе.

Осуществление этих задач предполагает:

- исследование структуры течения и процессов смешения закрученных потоков сильновязких ньютоновских жидкостей в цилиндрическом канале;
- исследование влияния псевдопластических свойств жидкости на структуру закрученного течения в канале;
- разработку и изготовление устройств и оборудования для изучения возникновения кавитации в лабораторных условиях;
- исследование влияния расхода жидкости на вихревое движение в кавитационно-смесительном диспергаторе;
- экспериментальное исследование возникновения кавитации в кавитационно-смесительном диспергаторе;
- создание физико-математической модели модифицирования битумно-дисперсных систем в технологических системах с учетом процессов диспергирования и кавитации;
- численное исследование структуры течения в кавитационно-смесительном диспергаторе;

Методическая часть работы базируется на основополагающих физических идеях и математическом аппарате современной гидродинамики многофазных сред, реологии и теории турбулентности.

Научная новизна. В результате проведённых исследований

- установлен механизм влияния закрутки на течение псевдопластической жидкости в цилиндрическом канале;
- определены условия, обеспечивающие наилучшее качество смешения жидкостей в коаксиальных закрученных струях;
- проведено экспериментальное исследование влияния расхода жидкости на вихревое движение в кавитационно-смесительном диспергаторе;

- разработана математическая модель модифицирования битумно-дисперсных систем, с учетом процессов диспергирования и кавитации;
- разработана математическая модель дробления струи битума в спутном закрученном потоке.

Достоверность полученных результатов подтверждается результатами тестирования численной процедуры на известных точных решениях, сравнением с известными результатами других авторов, как численными, так и экспериментальными.

Научная и практическая ценность. Результаты работы могут применяться для создания эффективного оборудования и организации технологического процесса приготовления битумных дисперсных систем. Выполненное исследование позволяет достаточно полно определить особенности течения и смешения закрученных потоков сильновязких ньютоновских и неньютоновских сред в трубах и каналах, исследовать структуру течения и процессы модифицирования битумно-дисперсных систем в кавитационно-смесительных диспергаторах.

Положения, выносимые на защиту:

1. закрутка потока в псевдопластических средах приводит к уменьшению эффективной вязкости, что обеспечивает большую протяженность зоны возвратных течений, при этом при одном и том же числе Россби интенсивность рециркуляции тем больше, чем меньше показатель нелинейности;
2. наилучшего качества смешения коаксиальных потоков ньютоновских жидкостей можно добиться при совместной сонаправленной закрутке с помощью организации в потоке рециркуляционной зоны, в которую будут вовлечены оба потока;
3. использование кавитационно-смесительного диспергатора для осуществления процессов модифицирования дорожных битумов жидкими или разогретыми до жидкого состояния добавками позволяет получить однородный модифицированный битум при оптимальных температурах с минимальными энергетическими затратами.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях, научных конгрессах, школах-семинарах: «Использование местных каменных материалов и отходов промышленности при строительстве дорожных и аэтодромных одежд. Труды научно-технической конференции» (1980г., Москва), «Молодые ученые и специалисты в развитии производительных сил Томской области. Труды региональной научно-практической конференции» (1980г., Томск), «Строительство и транспорт. Труды IV региональной научно-практической конференции» (1983г., Томск). «VI Минский международный форум по тепло- и массообмену» (2008г., Минск), «Перспективные материалы и технологии.

Труды региональной научно-технической конференции, посвященной 15-летию ООФ ТГАСУ» (2009 г., Томск).

Публикации. Материалы диссертационного исследования изложены в 17 публикациях: 8 статей, из них 3 статьи в журналах из списка ВАК РФ, 5 статей в сборниках научной конференции, 5 патентов, 4 стандарта организации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов, списка цитируемой литературы и приложения. Работа содержит 177 страниц, 71 рисунк, 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В настоящей работе проведен анализ существующих способов и технологий приготовления битумных дисперсных систем, а также предложены новые эффективные и простые принципы и технологии их получения способом кавитационно-смесительного диспергирования с учетом математического моделирования для каждого определенного вида технологического процесса.

Во введении обоснованы актуальность и практическая значимость работы, дана общая характеристика решаемой задачи, сформулирована цель исследования.

В первой главе проводится классификация битумно-дисперсных систем, обсуждается их применение в дорожном строительстве, приводятся сведения о машинах и оборудовании, используемых для приготовления битумных дисперсных систем.

Вторая глава посвящена анализу моделей вязких жидкостей и рассмотрению установившегося течения неньютоновских жидкостей в трубах. В этой главе формулируется математическая модель, обсуждаются особенности ее численной реализации, а также проводится верификация численного метода.

Для проверки адекватности используемого численного метода сначала рассматривается задача формирования установившегося профиля осевой составляющей скорости потока вязкой ньютоновской жидкости в канале круглого сечения. Предполагается, что на входе в канал распределение осевой составляющей скорости является однородным. Вследствие вязкости на стенках трубы начинает образовываться пограничный слой. На значительном удалении от входа пограничный слой достигает оси течения, и в случае ламинарного режима течения формируется параболический профиль Хагена – Пуазейля. На рис. 1 представлены результаты расчета изменения вниз по потоку безразмерной осевой составляющей скорости u/U в сравнении с данными Никурадзе[1]. Видно, что совпадение расчетных и экспериментальных данных, определенных на различных расстояниях от оси течения достаточно хорошее.

[1] Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974.

Далее рассмотривается формирование установившегося профиля степенной жидкости Оствальда – де Вейля в круглой трубе. На входе предполагается параболический профиль осевой скорости, радиальная и тангенциальная составляющие скорости принимались равными нулю. Результаты выполненных расчетов показыют, что радиальное распределение осевой составляющей скорости при течении неньютоновской жидкости в трубе на участке стабилизации хорошо согласуется с аналитическим решением.

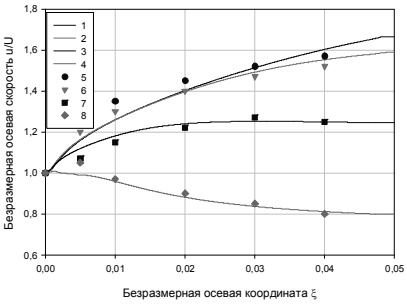


Рис. 1 Изменение вниз по потоку безразмерной осевой скорости u/U на различном удалении от оси течения ($\xi = \mu x / (\rho U R^2)$ – безразмерная осевая координата). 1 – 4 – расчет, 5 – 8 эксперимент. 1, 5 – $r/R = 0.8$, 2, 6 – $r/R = 0.6$, 3, 7 – $r/R = 0.4$, 4, 8 – $r/R = 0.2$

Результаты расчета закрученного потока представлены на рис. 2, 3. Сопоставление результатов расчетов с данными Шнайдермана М.Ф., Ершова А.И.[2] показывает удовлетворительное совпадение рассчитанных значений с известными данными других авторов.

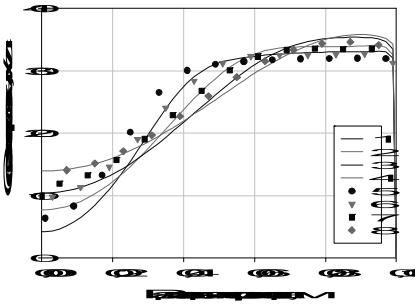


Рис. 2. Радиальное распределение осевой скорости: 1 – 4 – расчет, 5 – 8 эксперимент. 1, 5 – $x = 0.2$ м, 2, 6 – $x = 0.4$ м, 3, 7 – $x = 0.6$, 4, 8 – $x = 0.8$ м

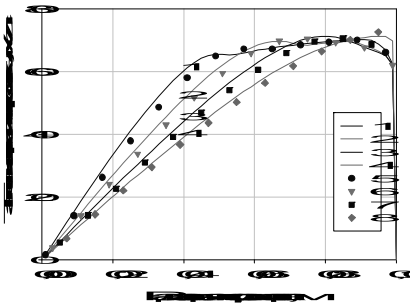


Рис. 3 Радиальное распределение тангенциальнойй скорости: 1 – 4 – расчет, 5 – 8 эксперимент. 1, 5 – $x = 0.2$ м, 2, 6 – $x = 0.4$ м, 3, 7 – $x = 0.6$, 4, 8 – $x = 0.8$ м

Таким образом, можно сделать вывод, что расчет прямоточного и закрученного потока в круглой цилиндрической трубе хорошо согласуется

[2] Шнайдерман М.Ф., Ершов А.И. О влиянии закрутки на распределение скоростей и температуры в круглой трубе. //Инженерно–физический журнал, Т. 28, № 4, С. 630–635.

с известными теоретическими и экспериментальными данными. Проведенные исследования подтверждает корректность используемой математической модели, а также вычислительного алгоритма.

Далее, во второй главе исследуются особенности течения и характеристики тепломассопереноса турбулизированной сильновязкой ньютоновской жидкости при течении в охлаждаемом канале. При моделировании поля течения используются уравнения Рейнольдса, записанные относительно осредненных по времени осевой u, радиальной v, тангенциальной w составляющих скорости, а также давления p:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial \rho v r}{\partial x}=0\,, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho u^2}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial \rho u v r}{\partial r}=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu_{\text{eff}}\left(2\frac{\partial u}{\partial x}-\frac{2}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial v r}{\partial r}\right)\right)\right]+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\mu_{\text{eff}} r\left(\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right], \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho u w}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial \rho v w r}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu_{\text{eff}}\frac{\partial w}{\partial x}\right]+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_{r\phi}}r^3\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{w}{r}\right)\right]-\frac{\rho v w}{r}\,, \tag{3}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho u v}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial \rho v^2 r}{\partial r}=&-\frac{\partial p}{\partial r}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu_{\text{eff}}\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial r}\right)\right]+\\&+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\mu_{\text{eff}} r\left(2\frac{\partial v}{\partial r}-\frac{2}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial v r}{\partial r}\right)\right)\right]-2\frac{\mu_{\text{eff}} v}{r^2}+\frac{\rho w^2}{r}\end{aligned} \tag{4}$$

В настоящей работе исследование характеристик турбулентности осуществлялось с использованием двупараметрической $k-\varepsilon$ модели с поправкой на кривизну линий тока, адаптированной Джонсом и Лаундером для расчета течений с низкими числами Рейнольдса[3]:

$$\frac{\partial \rho u k}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial \rho v k r}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x}\right]+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k}r\frac{\partial k}{\partial r}\right]+G_k-\rho\varepsilon-D\,, \tag{5}$$

$$\frac{\partial \rho u \varepsilon}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial \rho v \varepsilon r}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right]+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial r}\right]+\left(C_1-C_2\rho\varepsilon\right)\frac{\varepsilon}{k}+E\,, \tag{6}$$

Для описания процессов теплообмена используется уравнения теплопроводности.

---

[3] Jones W.P., Launder B.E. The calculation of low Reynolds number phenomena with a two-equation model of turbulence. //Int. J. of Heat Mass Transfer, 16, 1973, pp. 1119-1130.

$$c\left(\frac{\partial \rho u T}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial \rho v r T}{\partial r}\right)=\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda_{eff}\frac{\partial T}{\partial x}\right]+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\lambda_{eff} r\frac{\partial T}{\partial r}\right]+\mu_t G_k+\rho\varepsilon, \qquad (7)$$

Предполагалось выполнение следующих граничных условий. На входе задается распределение скорости и температуры потока, кинетическая энергия турбулентности берется пропорциональной кинетической энергии осредненного течения. На выходе осевые составляющие градиента тангенциальной скорости, температуры, а также турбулентных характеристик k и ε, предполагаются равными нулю. Считается, что в выходном сечениии отсутствует движение жидкости в радиальном направлении: $v=0$. На стенках канала выполняется условие прилипания и идеального теплообмена.

Зависимость молекулярной вязкости от температуры определялась зависимостью $\mu_0=\mu_r\left(T/T_r\right)^n$ с использованием параметров $\mu_r=3.95$ Па·с, $T_r=283$ К и $n=-20$.

Перейдем к рассмотрению особенностей тепломассообмена и течения потока сильновязкой жидкости в охлаждаемом канале. При высоких значениях начальной температуры отчетливо выделяется область пограничного слоя и ядро потока, в котором жидкость движется примерно с одинаковой скоростью. Вниз по потоку вследствие наличия трения наблюдается уменьшение расхода жидкости у стенки и, следовательно, увеличение скорости течения в ядре потока. Это происходит пока пограничный слой не достигнет оси канала. С уменьшением температуры жидкости увеличивается вязкость потока, и в канале можно выделить уже три характерные зоны. Одна из них – область пограничного слоя, непосредственно примыкающая к стенкам канала. Далее идет область течения сильновязкой жидкости (высокие значения вязкости здесь объясняются охлаждением потока стенкой) в которой загустевшая жидкость движется как твердое тело. И, наконец, область течения высокотемпературной слабовязкой жидкости. Эта область характеризуется параболическим распределением осевой скорости. Формирование профиля осевой скорости на значительном удалении от входа в основном определяются величиной расхода или, значением u_{in}. Если u_{in} мало, то вследствие процесса теплоотвода будет происходить загустение жидкости, которая будет налипать на стенки канала, как бы уменьшая его радиус. В этом случае картина течения начинает напоминать течение в диффузоре. Напротив, в высокоскоростных потоках течение характеризуется тепловыделением в пристеночной области вследствие процессов вязкой и турбулентной диссипации. Рост температуры на периферии потока приводит к уменьшению здесь вязкости, и относительно "твердая" масса загустевшего вещества, скользит вдоль стенок канала.

Как уже отмечалось, водно-битумные эмульсии, содержащие не менее 50 % битума, обладаютт неньютоновскими свойствами. В настоящее время для

описания реологического поведения таких эмульсий при комнатной температуре используется модель степенной жидкости Оствальда де Вейля[4].

Для описания поля течения используются двумерные осесимметричные уравнения реодинамики, описывающие баланс массы и количества движения (2.10), которые в осесимметричном случае имеют вид:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial \rho v r}{\partial r}=0\,, \tag{8}$$

$$\frac{\partial \rho u^2}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial \rho u v r}{\partial r}=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial \sigma_{\text{хх}}}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial r\sigma_{\text{хг}}}{\partial r}\,, \tag{9}$$

$$\frac{\partial \rho u v}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial \rho v^2 r}{\partial r}=-\frac{\partial p}{\partial r}+\frac{\partial \sigma_{\text{хг}}}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial r\sigma_{\text{гг}}}{\partial r}-\frac{\sigma_{\varphi\varphi}}{r}+\frac{\rho w^2}{r}\,, \tag{10}$$

$$\frac{\partial \rho u w}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial \rho v w r}{\partial r}=\frac{\partial \sigma_{\text{х}\varphi}}{\partial x}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial r^2\sigma_{\text{г}\varphi}}{\partial r}-\frac{\rho v w}{r}\,. \tag{11}$$

Для построения модели среды необходимо установить связь между девиаторами тензора напряжений и тензора скоростей деформаций. Для степенной жидкости Оствальда – де Вейля реологические соотношения имеют вид:

$$\sigma_{\text{хх}}=2KU^{(n-1)/2}\frac{\partial u}{\partial x}\,,\quad \sigma_{\text{хг}}=KU^{(n-1)/2}\left(\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{\partial v}{\partial \text{x}}\right),\quad \sigma_{\text{гг}}=2KU^{(n-1)/2}\frac{\partial v}{\partial r}\,,$$

$$\sigma_{\text{х}\phi}=KU^{(n-1)/2}\frac{\partial w}{\partial \text{x}}\,,\quad \sigma_{\text{г}\phi}=KU^{(n-1)/2}\left(\frac{\partial w}{\partial r}-\frac{w}{r}\right),\quad \sigma_{\phi\phi}=2KU^{(n-1)/2}\frac{v}{r}\,,$$

$$U=2\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)^2+\left(\frac{v}{r}\right)^2\right]+\left(\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2+\left(r\frac{\partial w/r}{\partial r}\right)^2. \tag{12}$$

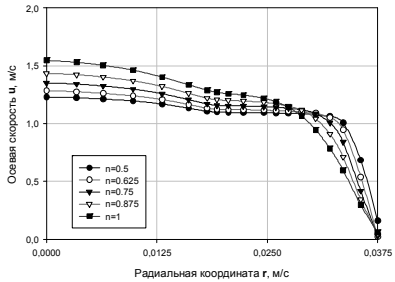
Постоянная K называется показателем (индексом) консистенции жидкости; чем меньше ее текучесть, тем больше K. Параметр n характеризует степень неньютоновского поведения материала; чем сильнее n отличается от единицы (в большую или меньшую сторону), тем отчетливее проявляется аномалия вязкости и нелинейность кривой течения.

Рассмотрим основные результаты исследования течения прямоточного и закрученного потоков псевдопластической жидкости в цилиндрическом канале. При моделирования поля течения диапазон изменения параметров был выбран следующим: консистенция жидкости изменялась в пределах $K = 0.03\div0.3$ Н·с^n/м^2, показатель нелинейности – $n = 0.5\div1$, среднерасходная скорость – $u_{in} = 1\div10$ м/с, число Россби – $\text{Ro} = \omega d/2u_{in} = 0\div10$. Диаметр канала составлял $d = 0.075$ м.

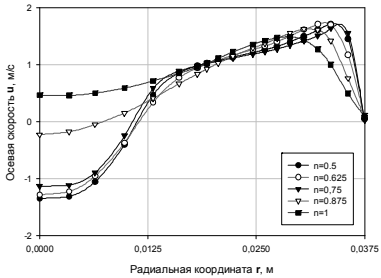
[4] Островский Г.М. Прикладная механика неоднородных сред. СПб: Наука, 2000, 359с.

Эффективная вязкость псевдопластических сред при больших сдвиговых напряжениях уменьшается, что препятствует затуханию вращательного движения в канале и приводит к значительному увеличению тангенциальной скорости жидкости в канале. Максимальные значения тангенциальной скорости псевдопластической жидкости с показателем нелинейности $n = 0.5$ примерно на порядок превосходят максимальные значения тангенциальной скорости ньютоновской жидкости при одной и той же начальной закрутке потока. Под действием центробежных сил происходит отток жидкость в пристеночную область. В псевдопластических средах уменьшение вязкости способствует более интенсивному движению жидкости в радиальном направлении. В результате, в приосевой части канала возникает зона пониженного давления, в которой формируется зона возвратных течений.

Радиальные распределения осевой скорости для различных значений показателя нелинейности и числа Россби приведены на рис. 4.



а



б

Рис. 4 Радиальное распределение осевой скорости в канале: $K = 0.3$ Н·с^n/м^2, $x = 0.8$ м, $u_{in} = 1$ м/с, *а* – $R_o = 0$, *б* – $R_o = 10$

Из рисунка видно, что при одном и том же числе Россби интенсивность рециркуляции тем больше, чем меньше показатель нелинейности. Так, при $\mathrm{Ro} = 10$ течение ньютоновской жидкости характеризуется лишь незначительным уменьшением осевой скорости в центральной части канала, а течение псевдопластической жидкости с показателем нелинейности $n = 0.875$ является уже рециркуляционным.

Завершают вторую главу результаты исследования структуры течения и смешения двух коаксиальных закрученных потоков вязкой жидкости. Потоки жидкости предполагается стационарным, осесимметричными, турбулентными, закрученными на входе по закону вращения твердого тела. При моделировании поля течения используются уравнения Рейнольдса (1 – 4). Исследование характеристик турбулентности осуществлялось с использованием двупараметрической $k - \varepsilon$ модели (5 – 6). Для описания процессов тепломассообмена

и смешения используются уравнения теплопроводности (7) и переноса концентрации компонентов.

$$\frac{\partial \rho u C_1}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial \rho v r C_1}{\partial r}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\rho D_{eff}\frac{\partial C_1}{\partial x}\right]+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\rho D_{eff} r\frac{\partial C_1}{\partial r}\right], \qquad (13)$$

$$\frac{\partial \rho u C_2}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial \rho v r C_2}{\partial r}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\rho D_{eff}\frac{\partial C_2}{\partial x}\right]+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\rho D_{eff} r\frac{\partial C_2}{\partial r}\right]. \qquad (14)$$

Условия на границах расчетной области приведены ниже:

$x=0$, $r\le r_0$: $C_1=1$, $C_2=0$; $r>r_0$: $C_1=0$, $C_2=1$;

$x=L$: $\frac{\partial C_1}{\partial x}=0$; $\frac{\partial C_2}{\partial x}=0$;

$r=0$: $\frac{\partial C_1}{\partial r}=0$; $\frac{\partial C_2}{\partial r}=0$; $r=R$: $\frac{\partial C_1}{\partial r}=0$, $\frac{\partial C_2}{\partial r}=0$.

Зависимости молекулярной вязкости и диффузии от температуры определялись соотношениями: $\mu_0=\mu_r\left(T/T_r\right)^n$, $\lambda_0=1.744\cdot10^{-2}-1.493\cdot10^{-5}T$, $D_0=3.5\cdot10^{-5}T\mu_0^{-1}$ с использованием параметров $\mu_r=0.55$ Па·с, $T_r=300$ K и $n=-13$.

Для характеристики качества смешения будем использовать параметр качества смешения, который определяется:

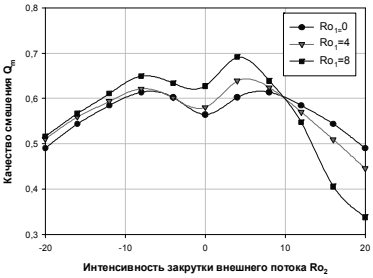
$$Q_m=\frac{1}{\overline{C}}\int_0^R \rho\left(C_1-\overline{C}\right)^2 ur\mathrm{d}r\,,\ \overline{c}=\int_0^R \rho C_1 ur\mathrm{d}r\Big/\int_0^R \rho ur\mathrm{d}r\,,$$

где $\overline{C}$ – среднерасходная концентрация, Q_m – характеризует дисперсию. Отметим, что $Q_m=0$ означает идеальное смешение потоков.

Проанализируем процессы смешения в случае отсутствия закрутки внутреннего потока (рис. 5). Слабая закрутка внешнего потока ($\mathrm{Ro}_2<8$) приводит к ухудшению качества смешения. Это связано оттеснением внешнего потока к стенке и уменьшения слоя смешения. Когда $\mathrm{Ro}_2>8$ в потоке образуется периферийная зона возвратных течений, в которую вовлечены масса жидкости из обоих потоков. Качество смешения резко улучшается.

При слабой закрутке внутреннего потока $\mathrm{Ro}_2\le 8$ зависимость Q_m от интенсивности закрутки внешнего потока качественно сохраняет свой вид: слабая закрутка внешнего потока приводит к увеличению Q_m, а сильная

к уменьшению. Отметим, что качество смешения двух слабо закрученных потоков оказывается худшим, чем в незакрученном. Это объясняется процессами реламиниризации и соответственно уменьшения турбулентного диффузионного переноса. В случае сильной закрутки внутреннего потока $\mathrm{Ro}_1 > 8$, когда в приосевой области возникает зона возвратных течений, зависимость $Q_m = Q_m\left(\mathrm{Ro}_2\right)$ характеризуется наличием максимума. Величина этого максимума уменьшается с увеличением закрутки внутреннего потока, что свидетельствует об улучшении качества смешения. Максимальное значение Q_m локализуется в области отрицательных значений Ro_2, то есть в том случае когда потоки закручены в разные стороны. Анализ поля течения позволяет сделать вывод, что наибольшего качества смешения можно добиться с помощью организации в потоке рециркуляционной зоны, в которую будут вовлечены оба потока. Для потоков с соотношением среднерасходных скоростей $u_1/u_2 > 1$ это достигается при совместной сонаправленной закрутке.



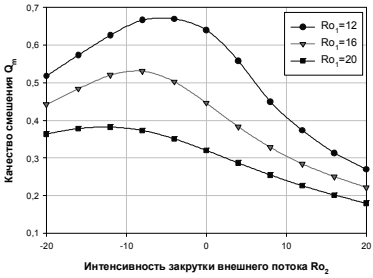


Рис. 5 Влияние закрутки на качество смешения: $u_1 = 2$ м/с, $u_2 = 0.2$ м/с

В третьей главе описана лабораторная установка для исследования процесса кавитации, и приводятся результаты экспериментальных исследований. Также проведено математическое моделирование структуры течения и модификации битумно-дисперсных систем в кавитационно-смесительном диспергаторе, процесса кавитации, дробления закрученной струи и формирования водно-битумной эмульсии.

Для исследования возникновения кавитации в турбулентных потоках, а так же принципа смешения различных жидкостей разработан многофункциональный кавитационно-смесительный диспергатор КСД. (рис. 6). Конструкция КСД. состоит из корпуса 1, улиточного завихрителя с внутренней плоскостью с входящими патрубками 2, расположенными диаметрально

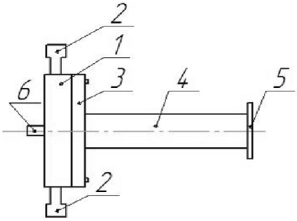


Рис. 6 Схема кавитационно-смесительного диспергатора. 1 – улиточный завихритель, 2 – выходные патрубки, 3 – выходной фланец, 4 – выходной патрубок, 5 – соединительный фланец, 6 – центральный штуцер

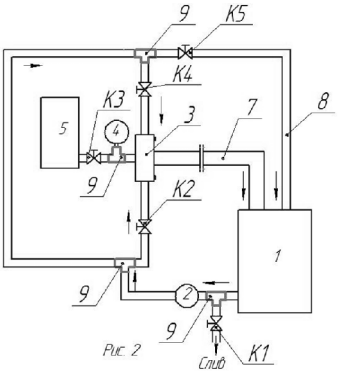


Рис. 7 Гидравлическая схема установки 1 – ёмкость для воды V=70л, 2 – насос, 3 – кавитационно-смесительный диспергатор с прозрачным фланцем и выходной трубой, 4 – вакуумметет, 5 – ёмкость для диспергирующей жидкости V=10л, 6 – К1, К2б К3, К4, К5 – запорные вентиля, 7 – выходной патрубок кавитационно-смесительного диспергатора, 8 – трубопровод свободного слива, 9 – тройник

противоположено по касательной к наружной окружности внутренней плоскости корпуса. Патрубки расположены так, чтобы вихревое движение жидкости по внутренней плоскости корпуса были направлены в одну сторону.

Схема лабораторной установки для изучения и моделирования образования кавитационных пузырьков и их схлопывания при различных расходах жидкости приведена на рис. 7. Лабораторная установка работает следующим образом. Жидкость из емкости 1 центробежным насосом 2 подается под давлениям по трубопроводам к регулировочным кранам К2 и К4 установленных на корпусе улиточного завихрителя и крану К5 для свободного слива. По показаниям вакуумметра можно наблюдать изменения давления в центре вихревой воронки жидкости создаваемой улиточным завихрителем при различных режимах подаваемой жидкости. Емкость 5 с краном 6 предназначена для изучения смещения различных жидкостей с жидкостью подаваемой в улиточный завихритель КСД, при этом процесс можно визуально наблюдать в выходном патрубке.

Разработанная лабораторная установка позволяет наблюдать вихревое движение жидкости и возникновение турбулентных потоков с образованием кавитационных пузырьков в интервалах расходов жидкости в пределах 0,2–1,0 л/с при температуре 20$\pm$2 ^{0}С, проходящей через улиточный завихритель и выходной патрубок. При подаче жидкости насосом в улиточный завихритель и регулируя ее расход в пределах 0,2 – 0,25 л/с, можно наблюдать в выходном патрубке следующую картину (рис. 8). На выходе из улиточного завихрителя в выходном патрубке образуется вихревое движение жидкости состоящего из множества пузырьков с вихревой трубкой, которое достигает решетки противодавления

установленной между фланцами. Снижение барометрического давление в центре вихревой воронки незначительно.

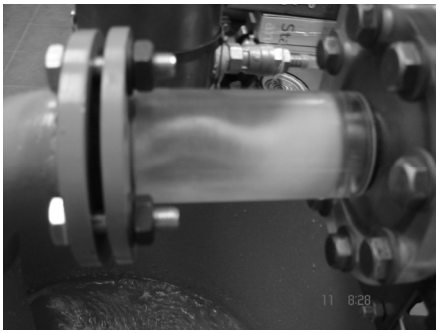


Рис. 8. Вихревое движение жидкости при расходе 0,2 – 0,25 л/с

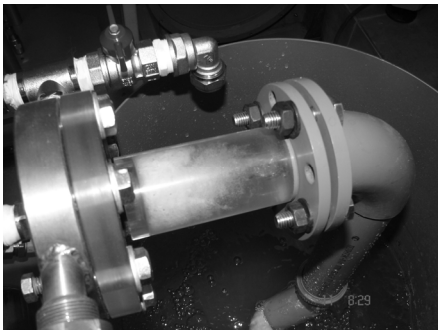


Рис. 9. Вихревое движение жидкости при расходе 1 л/с

Дальнейшее увеличение расхода жидкости, проходящей через улиточный завихритель до 1 л/с приводит к существенному изменениям вихревого движения в выходном патрубке (рис. 9). Вихревая трубка изменяет свои размеры переходит в вид вихревой воронки, а образовавшиеся множества кавитационных пузырьков, представляющих вихрь, по мере приближения решетке противодавления начинают схлопываться. В центре вихревой воронки улиточного завихрителя создается достаточно небольшое разрежение. Изменяя расходы жидкости проходящих через улиточный завихритель можно изменять форму вихревого движения, условия возникновения кавитационных пузырьков и их схлопывания.

Дальнейшее наблюдения за поведением вихревых движений потоков жидкости в вихревом патрубке улиточного завихрителя были проведены с применением гидродинамического устройства установленого консольно на решетке противодавления. Исследования проводились при применении различных типов гидродинамических устройств: пластинчатых, трубчатых и звездообразных.

Наиболее интересную картину вихревых потоков жидкости удалось наблюдать при применении звездообразного гидродинамического устройства Звездообразное гидродинамическое устройство, выполненное в виде резьбы цилиндрической звезды с шагом ρ, при этом направление резьбы противоположно вихревому круговому движению жидкости. В начальной стадии при запуске кавитационно-смесительного диспергатора на выходе из улиточного завихрителя в выходной трубке происходит образование беспорядочное вихревое движение водно-воздушной смеси (рис. 10).

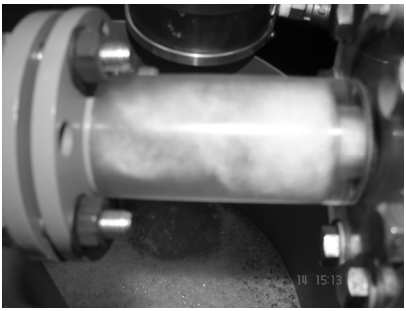


Рис. 10 Вихревое неустановившееся движение жидкости в выходном патрубке

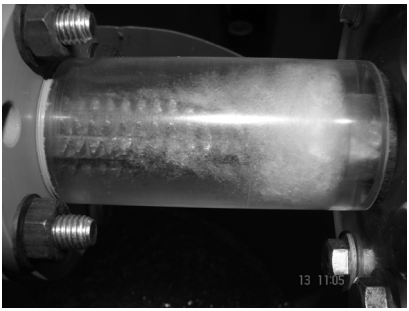


Рис. 11 Установившееся вихревое движение жидкости в вихревом патрубке

Это обусловлено тем, что при начальной стадии в подводящих трубках имеется большое количество воздуха, который, смешиваясь с жидкостью, создает в КСД такую картину. С течением времени, когда происходит полное удаление воздуха из трубопровода, происходит изменение вида вихревого движения жидкости в выходном патрубке (рис. 11), где ясно наблюдается возникновение и рост кавитационных пузырьков на выходном патрубке из улиточного завихрителя, в выходном патрубке их уменьшение и схлопывание в районе звездообразного с обратным шагом гидродинамического устройства. Образование и рост кавитационных пузырьков происходит за счет количества газов растворимых в жидкости при барометрическом атмосферном давлении. В дальнейшем идет снижение барометрического давления до 0.90 в центре улиточного завихрения и уменьшения зоны возникновения и схлопывания кавитационных пузырьков. Схлопывание кавитационных пузырьков сопровождается щелчками и резкими изменениями барометрического давления вакуумметра.

Лабораторная установка позволяет исследовать и наблюдать процессы смешивания происходящие в кавитационно-смесительном диспергаторе при введении их в центр улиточного завихрителя. Для этого была выбрана водно-дисперсная краска, которая заполнялась в емкость 5 и через $К_3$ подавалась в центр улиточного завихрителя. В процессе введения водно-дисперсной краски на выходе из улиточного завихрителя и выходной трубки наблюдалось равномерно окрашенная жидкость, что говорит о эффективности кавитационно-смесительного диспергатора, как устройства для смешивания различных жидких сред и получение качественных дисперсных систем.

Рассмотрим результаты математического моделирования структуры течения в кавитационно-смесительном диспергаторе. Для расчета локальных характеристик движения жидкости использованы уравнения Рейнольдса (1 – 7).

Характеристики турбулентности расчитывались на основе двупараметрической модели с использованием балансных уравнений для кинетической

энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε с поправкой на число Ричардсона Ri[5]. Эта модель получена при допущении неизотропности турбулентной вязкости ($\sigma_{r\varphi} = 2.5$) и при коррекции константы C_2 в уравнении для ε с помощью числа Ричардсона с целью более корректного описания влияния закрутки на процессы генерации/диссипации турбулентности.

На основе представленной выше математической модели было проведено численное исследование структуры течения в КСД. Расчетные параметры аппарата имели следующие значения: R_1=7, R_2=12, R_3=17, R_4=20, L_1=120, L_2=20, L=500мм, S_{in}=240мм^2.

Рассмотрим сначала особенности структуры течения и характеристик турбулентности в отсутствие центральной струи. На рисунках 12, 13 показаны соответственно поля тангенциальной и осевой составляющей скорости.

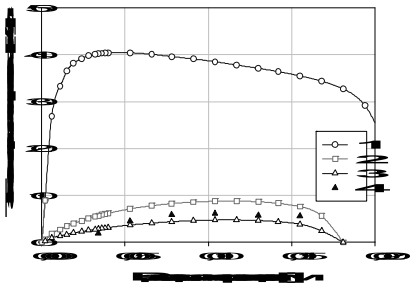


Рис. 12 Радиальное распределение тангенциальной скорости: 1 – расчет ($x = 50$ мм), 2 – расчет ($x = 150$ мм), 3 – расчет (x = 450 мм), 4 – эксперимент ($x = 450$ мм)

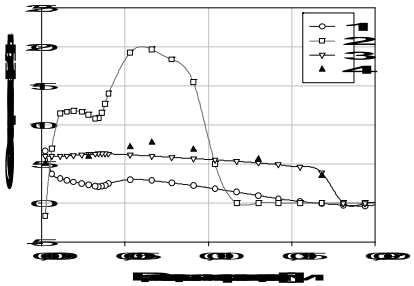


Рис. 13. Радиальное распределение осевой скорости: 1 – расчет ($x = 50$ мм), 2 – расчет (x = 150 мм), 3 – расчет (x = 450 мм), 4 – эксперимент ($x = 450$ мм)

Радиальное распределение тангенциальной составляющей скорости в приосевой области носит квазитвердый характер, а в пристеночной – квазипотенциальный. Между этими областями реализуется промежуточный режим течения. Максимальные значения тангенциальной скорости наблюдаются в области непосредственно примыкающей к завихрителю. Вниз по течению интенсивность вращательного движения в результате действия вязких сил существенно уменьшается. При большей закрутке в окрестности оси течения возникает большее разрежение, которое приводит к образованию центральной зоны возвратных течений. Вблизи торца, а также по мере удаления от завихрителя особенности течения, вызванные закруткой потока, становятся менее выраженными. Профиль осевой скорости становится монотонным с максимумом на оси течения.

[5] Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. – М.: Мир, 1987.

Максимальные значения давления реализуются на периферии потока, что связано с действием поля центробежных сил. В приосевой области давление близко к атмосферному, в области сужения канала заметна зона разряжения. При этом чем больше интенсивность закрутки, тем шире область разряжения.

Введение в поток центральной струи жидкости существенно изменяет структуру течения. Подача центральной струи осуществляется без ее закрутки, в то же время подвод потока жидкости через улиточный завихритель осуществляется без осевой составляющей скорости. Таким образом, структура течения определяется взаимодействием этих потоков. Как видно из рис. 14, для осевой составляющей скорости характерно наличие ядра, в котором осевая скорость *u* остается практически постоянной и равной скорости истечения, и пограничного слоя, в котором происходит падение скорости до скорости спутного потока. При этом профиль осевой составляющей скорости имеет вид кривой Гаусса. По мере удаления от входа в результате обмена осевой составляющей импульса происходит увеличение осевой скорости слоев I жидкости, примыкающих к поверхности струи II жидкости. В результате обмена импульсом в тангенциальном направлении происходит вовлечение центрального потока II жидкости во вращательное движение. При этом, если на начальном участке течения центральная струя сохраняет незакрученность, то уже на расстоянии, равном примерно одному диаметру струи весь поток вращается как единое целое (рис. 15).

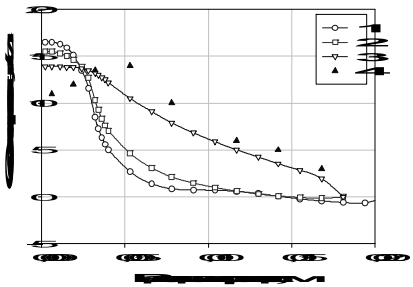


Рис. 14. Радиальное распределение осевой скорости: 1 – расчет (x = 50 мм), 2 – расчет (x = 150 мм), 3 – расчет (x = 450 мм), 4 – эксперимент (x = 450 мм)

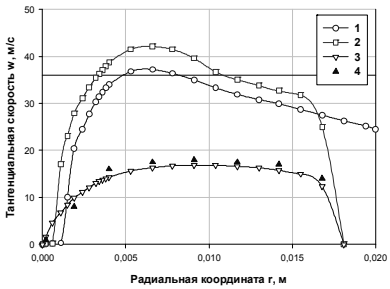


Рис. 15. Радиальное распределение тангенциальной скорости: 1 – расчет (x = 50 мм), 2 – расчет (x = 150 мм), 3 – расчет (x = = 450 мм), 4 – эксперимент (x = 450 мм)

Распределение давления в потоке с центральной струей харктеризуется максимальным значением в пристеночной области и минимальным в приосевой. Зона разрежения в соответствии с законом Бернулли локализуется в области сужения канала. При этом необходимо отметить, что при вводе центральной струи давление в канале возрастает примерно в 40 раз.

Ниже рассматриваются результаты математического моделирования процесса модификации битума в КСД. В смесительный аппарат вводятся две струи, под напором, центральная струя, содержащая модификатор и струя проходящая через улиточный завихритель, представляющая собой нагретый до 110^0С битум.

Для осуществления математического моделирования в дополнении к уравнениям (1 – 7) необходимо решить уравнения диффузии, описывающие распределение концентрации компонент (13, 14).

На рис. 16 представлены линии тока, характеризующие структуру течения в техническом устройстве. Из рисунка видно, что основная часть потока подаваемая через улиточный завихритель движется сначала в радиальном направлении вдоль торцевой крышки. Затем в области пережима канала происходит разворот потока, и движение осуществляется преимущественно в осевом направлении. При этом частицы жидкости так же осуществляют движение в тангенциальном направлении. После прохождения участка, характеризуемого минимальным сечением, происходит расширение потока. В пристеночной области отчетливо видна пристеночная зона возвратных течений. Изменение температуры в диапазоне от 350 до 450 К качественно не изменяет структуру течения, хотя количественно различия присутствуют. Так же не влияет на картину течения изменение давления на входе от 1 до 2 атмосфер.

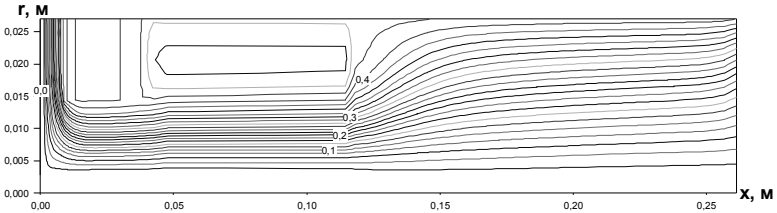


Рис. 16. Линии тока характеризующие структуру течения при $p_d = 1$ атм. $T_{in} = 350$ К

В области пережима канала наблюдается зона разряжения. С увеличением температуры потока, интенсивность разряжения становится меньше. Так, если при температуре на входе 350 К минимальное давление в аппарате становиться меньше атмосферного, то при температуре 450 К минимальное давление превышает атмосферное, хотя и значительно ниже, чем давление на входе

Основной интерес представляет распределение концентрации модификатора для различного значения температуры на входе и давления в аппарате. При низкой температуре ($T_{in} = 350$ К) смешение битума со струей модификатора практически отсутствует. С повышением температуры

происходит уменьшение молекулярной вязкости в потоке с одной стороны и увеличение коэффициента диффузии, с другой стороны это способствует улучшению качества смешения. В результате этого полное смешение происходит в объеме аппарата. При давлении $p_d = 1$ атм. и температуре T_{in} = 400 К смешение происходит в области от 0,12 до 0,17 метров и еще больше температура 450 К обеспечивает полное смешение на длинах 0,04 и 0,12 метров. Отметим, однако, что использование таких высоких температур (T_{in} = = 450 К) является нежелательным с точки зрения технологии, так как при таких температурах происходит процесс окисления битума, ухудшающий его технологические свойства. Таким образом, в качестве оптимальной температуры принимается 400 К.

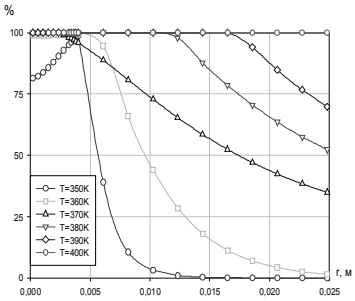


Рис. 17. Радиальное распределение концентрации полностью модифицированного битума

На рис. 17 представлены данные об однородности смешения модификатора с битумом: радиальное распределение концентрации полностью модифицированного битума (содержащего 2% модификатора и 98% чистого битума) на выходе из КСД. Из рисунка видно, что при низких температурах Т = 350 К смешения практически не происходит. С увеличением температуры в приосевой области формируется зона однородного смешения, которая тем больше, чем выше температура. И при температуре Т=400К однородность смешения наблюдается во всем объеме КСД.

Способ кавитационно-смесительного диспергирования при моделировании битумов позволяет получить однородную смесь на выходе из КСД с последующим ее транспортировании по битумопроводам к потребительским устройствам без изменения ее свойств. Низкие температуры при модифицировании битумов не создают условий для преждевременного их старения и изменения свойств нового вяжущего.

Рассмотрим процесс образования кавитационных пузырьков в КСД. Формирование зоны кавитации осуществляется в области пережима канала, где происходит значительное увеличение скорости потока и, соответственно, уменьшение давления. При этом кавитационные пузырьки достигают размера 1 мм. Увеличение давления в аппарате препятствует развитию кавитации: кавитационная зона, а также размер пузырьков становится существенно меньше.

Пересжатие канала неоднозначным образом влияет на развитие процесса кавитации. С одной стороны, уменьшение площади поперечного сечения приводит к ускорению потока и, в соответствии с теоремой Бернулли,

уменьшению давления. С другой стороны, сужение потока препятствует его расширению в результате действия центробежных сил. В результате этого влияние закрутки на уменьшение давления в приосевой области становится существенно меньше, что приводит к ослаблению кавитации. Проведенные расчеты показали, что для рассматриваемых режимных условий оптимальное пересжатие, обеспечивающее устойчивое существование зоны кавитации лежит в диапазоне $0.5 < r_{\min}/R < 0.65$. С повышением температуры происходит увеличение размеров кавитационной зоны. При температуре жидкости близкой к температуре кипения ($T = 365$ К) кавитационная зона локализуется не только в области пересжатия канала, но и распространяется вниз по потоку, занимая достаточно большую часть КСД. Это способствует формированию битумной эмульсии с улучшенными свойствами.

Далее рассматривается задача распада струи битума в спутном закрученном потоке водной фазы с целью определения характеристик создаваемой битумной эмульсии.

Предполагается, что распад струи происходит, когда энергия турбулентных молей переходит в потенциальную энергию и может быть затрачена на разрушение первоначальных связей в веществе. Эти связи могут быть разрушены, если возникающая при соударении потенциальная энергия превысит обратимую работу когезии. Известно[6], что в случае легкоподвижных жидкостей обратимая работа когезии равна удвоенному значению поверхностного натяжения. Таким образом, скорость распада струи можно записать в следующем виде:

$$\Phi_{break} = \frac{dM_{\text{bit}}}{dt} = -C_{break}\frac{\varepsilon}{k}\sqrt{g}\exp\left(-\frac{24\sigma}{\rho_{\text{bit}}d_{\text{p}}k}\right).$$

Для описания движения несущей среды использовались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (1 – 7). Характеристики турбулентности определялись на основе двупараметрической модели с использованием балансных уравнений для кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε с поправкой на число Ричардсона (8 – 9).

Для определения среднеквадратичных значений пульсаций концентраций g использовано уравнение:

$$\frac{\partial \rho u g}{\partial x} + \frac{1}{r}\frac{\partial \rho v g}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\mu_e}{\sigma_g}\frac{\partial g}{\partial x}\right] + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{\mu_e}{\sigma_g}r\frac{\partial g}{\partial r}\right] + C_{1g}\mu_t\left[\left(\frac{\partial M_0}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M_0}{\partial r}\right)^2\right] - C_{2g}\rho\frac{\varepsilon}{k}g. \quad (17)$$

Задачу описания движения капель можно существенно упростить с помощью модели дрейфа частиц с учетом их турбулентной диффузии. Баланс

[6] Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. М.: Химия. 1975.

массы капель ($1 \le i \le N$) и струи битума ($i = 0$) описывался с помощью уравнения диффузии:

$$\frac{\partial \rho (u + u_{\text{rel}}) M_i}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho (v + v_{\text{rel}}) r M_i}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho D_{\text{p}} \frac{\partial M_i}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho D_{\text{p}} r \frac{\partial M_i}{\partial r} \right] + \Phi_i . \quad (18)$$

В настоящей работе выделялось 10 фракций частиц, характеризуемых следующими размерами: $d_1 = 0.1$, $d_2 = 0.2$, $d_3 = 0.5$, $d_4 = 1$, $d_5 = 2$, $d_6 = 5$, $d_7 = 10$, $d_8 = 20$, $d_9 = 50$, $d_{10} = 100$ мкм.

Коэффициент турбулентной диффузии частиц рассчитывался аналогично[7]. Для определения скорости дрейфа частиц относительно непрерывной фазы предполагалось локальное равновесие между массовыми силами, действующими на каплю, и силой сопротивления.

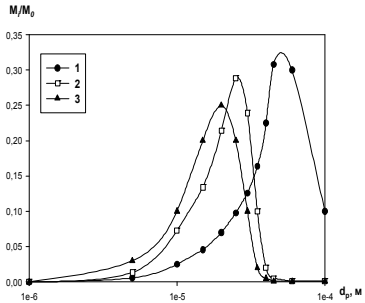


Рис. 18 Доля капель в выходном сечении: 1 – $\varphi = 50^0$, 2 – $\varphi = 60^0$, 3 – $\varphi = 70^0$

Граница раздела струи битума и потока воды на начальном участке течения характеризуется значительными градиентами скорости, связанными с разными значениями осевой скорости на входе. Это способствует росту турбулентной энергии, что в свою очередь приводит к разрушению поверхности раздела, распаду струи и формированию капель битума. Концентрация крупных капель в потоке значительно превышает концентрацию более мелких, что обусловлено энергетикой дробления струи. Наибольшие значения концентраций капель наблюдаются в области улиточного завихрителя и в основном объеме камеры. В области сужения, капли приобретают отрицательную радиальную скорость, в результате чего они совершают движение по направлению к поверхности струи, где происходит их слияние с последней. Таким образом, с практической точки зрения наибольший интерес представляет область основного объема камеры.

Сформировавшиеся в этой области капли вследствие процессов конвекции и турбулентного перемешивания распространяются из приосевой зоны по всему объему, формируя водно-битумную эмульсию. Анализ влияния закрутки на формирования эмульсии представлен на рис. 18. С увеличением

[7] Матвиенко О.В., Ушаков В.М., Евтюшкин Е.В. Математическое моделирование турбулентного переноса дисперсной фазы в турбулентном потоке // Вестник ТГПУ. 2004. Вып. 6 (43), С. 50 –53.

закрутки наблюдается смещение $d_{\max}$ влево и уменьшение величины максимума. Действительно, рост закрутки потока приводит к интенсификации турбулентности в потоке и, следовательно, способствует более быстрому распаду струи. При этом становится более энергетически выгодным формирование капель меньшего размера.

Проведенные исследования позволили прийти к выводу о возможности применения принципа кавитационно-смесительного диспергирования (КСД) для получения битумных эмульсий битумах различной концентрации.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования.

В приложении обсуждены вопросы применения кавитационно-смесительных диспергаторов в промышленных установках и устройствах для приготовления битумных дисперсных систем.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертации, написанной на основе работ [1 – 17], с единых методических позиций проведено комплексное исследование течения битумно-дисперсных систем в трубах и каналах. Результаты работы можно сформулировать в виде следующих выводов.

1. Тепло, возникающее в потоке вследствие вязкой диссипации, может оказывать значительное влияние на условия теплообмена со стенкой. При низких значениях начальной температуры потока диссипация механической энергии становится столь высокой, что приводит к значительному разогреву потока в периферийной области, несмотря на значительный теплоотвод.

2. С ростом сдвиговых напряжений, вызванного закруткой потока, в псевдопластических средах происходит уменьшение эффективной вязкости. Это способствует более интенсивному движению жидкости в радиальном направлении. В результате, в приосевой части канала возникает зона пониженного давления, в которой формируется зона возвратных течений. В этой зоне при одном и том же числе Россби интенсивность рециркуляции тем больше, чем меньше показатель нелинейности. Кроме того, понижение вязкости препятствует затуханию закрутки и обеспечивает большую протяженность зоны возвратных течений.

3. Наилучшего качества смешения можно добиться при совместной сонаправленной закрутке с помощью организации в потоке рециркуляционной зоны, в которую будут вовлечены оба потока.

4. Использование кавитационно-смесмительного диспергатора при осуществлении процессов модификацирования дорожных битумов жидкими или разогретыми до жидкого состояния добавками позволяет получить одно-

родный модифицированный битум при оптимальных температурах с минимальными энергетическими затратами.

5. Температура жидкости является одним из основных факторов, влияющих на формирование кавитационой зоны. С увеличением температуры жидкости кавитационная зона распространяется вниз по потоку, занимая достаточно большую часть КСД. Это способствует формированию битумной эмульсии с улучшенными свойствами.

6. Созданная на основе проведенных лабораторных исследований и математического моделирования опытная установка показала высокую эффективность и надежность в работе. Получаемая с её помощью битумно-дисперсная система имеет высокую степень дисперсности и однородности. При этом одновременно удалось снизить расход воды до 1–1,5 % (ранее в этих целях вводили 2–2.5%), что является существенным фактором.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Акулов А.П., Базуев В.П., Румежак И.В., Матвиенко О.В. Приготовление катионных битумных эмульсий методом кавитационно-смесительного диспергтрования. Труды всероссийской научно – практической конференции. Барнаул 2003 с.154

2. Эфа А.К., Базуев В.П., Румежак И.В., Щитов В.П., Жураускас А.В., Денисенко Д.Е. СТП «ТО ДДФ и АД» - 006-2002. Приготовление эмульсионно-минеральных смесей в установке. 7с.

3. Матвиенко О.В., Эфа А.К., Базуев В.П., Евтюшкин Е.В. Численное моделирование распада турбулентной струи в спутном закрученном потоке // Изв. Вузов. Физика. Том 49. 2006, № 6. с. 96 – 107.

4. Вороненко В.Л., Базуев В.П., Матвиенко О.В. Диспергирование струи битума в спутном закрученном потоке // Перспективные материалы и технологии. Труды региональной научно-технической конференции, посвященной 15-летию ООФ ТГАСУ. - Томск: Издво «Печатная мануфактура», 2009. С.286-296.

5. Базуев В.П., Матвиенко О.В., Южанова Н.К. Математическое моделирование течения закрученного потока псевдопластической жидкости в цилиндрическом канале //Перспективные материалы и технологии. Труды региональной научно-технической конференции, посвященной 15-летию ООФ ТГАСУ. - Томск: Изд-во «Печатная мануфактура», 2009. С.3296-304.

6. Матвиенко О.В., Эфа А.К., Базуев В.П. Исследование теплообмена и распада турбулентной струи в спутном закрученном потоке. //VI Минский международный форум по тепло- и массообмену. 19-23 Мая 2008г., Минск. Т. 1, С. 130-132.

7. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Клепова А.А. Исследование смешения коаксиальных закрученных потоков вязкой жидкости // Перспективные материалы

и технологии. Труды региональной научно-технической конференции, посвященной 15-летию ООФ ТГАСУ. - Томск: Издво «Печатная мануфактура», 2009. С.313-321.

8. Базуев В.П., Матвиенко О.В., Вороненко В.Л. Моделирование процесса модифицирования битума в кавитационно-смесительном диспергаторе // Вестник Томского государственного архитектурно – строительного университета. №4, 2010, с.121 – 128.

9. Матвиенко О.В., Базуев В.П.,. Южанова Н.К. Математическое моделирование течения закрученного потока псевдопластической жидкости в цилиндрическом канале // Инженерно-Физический журнал, 2011. Т. 84, № 3, с. 544 – 547.

10. Пат. на полезную модель 71768 Российская Федерация, МПК7 G01N3/08 . Установка для определения динамического модуля упругости битумоминеральных материалов под воздействием кратковременной нагрузки/ Эфа А.К., Базуев В.П, Зырянов В.М., Веник В.Н., Рыбин Ю.К., Трофимов И.К.; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Строительная лаборатория".- № 2007137200/22; заявл. 08.10.2007; опубл. 20.03.2008, Бюл. №8(IIIч.). - С.921.

11. Пат. 2354622 Российская Федерация, МПК7 C04B26/26, C08L95/00 . Гелеобразующее вяжущее для приготовления холодных асфальтобетонных ремонтных смесей/ Егоров С.А., Раченко А.Ф., Сироткин Е.Г., Карпова О.И., Веник В. Н., Базуев В.П., Чуприков Е.Н.; заявитель Закрытое акционерное общество "Научно-производственное предприятие "АЛТАЙСПЕЦПРОДУКТ", Общество с ограниченной ответственностью "Строительная лаборатория".- № 2007107566/03; заявл. 28.02.2007; опубл. 10.05.2009, Бюл. № 13(IIIч.).- С.570-571.

12. Пат. 2348662 Российская Федерация, МПК 7 C08L1/02, C08L23/12 , C04B16/02, C04B16/06. Стабилизатор для щебеночно-мастичного асфальтобетона/ КиселевМ.А., ВоронинА.Н., Веник В.Н., Эфа А.К., Базуев В.П.; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Фирма "ГБЦ", Общество с ограниченной ответственностью "Строительная лаборатория". - № 2007107626/04, заявл. 28.02.2007; опубл. 10.03.2009, Бюл. № 7(IVч.). – С.1012.

13. Патент на полезную модель 65229 Российская Федерация, МПК^7*G01N3/24* . Устройчтво для испытания асфальтобетона на сдвигоустойчивость/ Эфа А.К., Базуев В.П, Зырянов В.М., Трофимов И.К.; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Строительная лаборатория" .- № 2007107625/22; заявл. 28.02.2007; опубл. 27.07.2007, Бюл. №21(IIIч.). - С.622.

14. Патент на полезную модель 78316 Российская Федерация, МПК^7 *G01N11/00* . Аппарат для определения срарения бирумов/ Веник В. Н., Зырянов В. М.,Трофимов И.Н.,Буракова В. П., Базуев В.П.; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Строительная лаборатория".- № 2008127826/22; заявл. 08.07.2008; опубл. 20.11.2008, Бюл. №32(Vч.). - С.1162.

15. Базуев В.П., Трофимов И.Н., Эфа А.К., Кузнецов Е.Ю. Сдвигоустойчивость асфальтобетона по показателю колееобразования. СТО ДД ХМАО 025-2009-Томск 2009-12с.

16. Базуев В.П., Веник В.Н.,Трофимов И.Н.,Трофимов Н.Н., Эфа А.К. Битумные вяжущие для асфальтобетонных смесей. СТО ДД ХМАО 019-Томск 2009-12с.

17. Базуев В.П., Веник В.Н.,Трофимов И.Н.,Трофимов Н.Н., Эфа А.К. Битумные вяжуще для асфальтобетонных смесей. СТО ДД ХМАО 020-Томск 2009-29с.