

05.04.13

П 844



На правах рукописи

Прохасько Любовь Савельевна

**ГИДРОДИНАМИКА И РАСЧЕТ КАВИТАЦИОННЫХ  
СМЕСИТЕЛЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ**

Специальность 05 04 13 - "Гидравлические машины  
и гидропневмоагрегаты"

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пермь - 2000

Работа выполнена на кафедре "Гидравлика и гидропневмосистемы"  
Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
СПИРИДОНОВ Е.К.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
ДУБРАВИН Ю.А.,  
кандидат технических наук, профессор  
ГУСИН Н.В.

Ведущее предприятие – АООТ «Уральский теплотехнический научно-исследовательский институт» (УралВТИ),

Защита состоится \_\_\_\_\_ апреля 2000 г., в \_\_\_\_\_ ч, на заседании диссертационного совета К 063.66.08 при Пермском государственном техническом университете: 614000, г. Пермь, Комсомольский пр., 29 а, ПГТУ, ауд. 423.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПГТУ.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью учреждения, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета по указанному адресу.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2000 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор



Севастьянов В.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Актуальными для теплоэнергетики и машиностроения являются следующие новые технологии: приготовление водомазутных эмульсий (ВМЭ); подмешивание в мазут отработанных масел, смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и других жидких отходов машиностроительного производства; введение различных присадок в топлива и рабочие жидкости. Сжиганием ВМЭ достигаются следующие технические и экологические эффекты: повышается надежность топливоподачи; снижается содержание в отходящих газах окислов азота, сажи, углекислого газа и пр.

Эффективное осуществление новых технологий требует создания надежного и простого в эксплуатации эмульгатора - устройства для непрерывного приготовления стойких и высокодисперсных эмульсий. Предварительным исследованием установлено, что наиболее эффективным способом приготовления эмульсий является кавитационная обработка смеси компонентов специальными побудителями кавитации, установленными в потоке. Однако достоверных методов расчета и проектирования гидродинамических кавитационных эмульгаторов в технической литературе обнаружить не удалось. Существующие же математические модели кавитационных явлений нуждаются в существенных дополнениях и доработках и не могут быть положены в основу моделирования рабочего процесса в смесителях кавитационного типа.

Таким образом, научная и техническая проблема исследования кавитационных явлений в высокоскоростных потоках и разработка на ее основе гидродинамических устройств для приготовления эмульсии и смазочно - охлаждающих жидкостей с минимальным энергопотреблением существует и нуждается в приоритетном решении.

**Цель работы.** Целью данной работы является совершенствование существующих и разработка смесительных устройств нового поколения.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Дать более полное описание рабочего процесса гидродинамических кавитационных смесителей непрерывного действия.
2. Разработать математическую модель рабочего процесса, обеспечивающего формирование в зоне очагов кавитации бурного сверхзвукового паргазожидкостного течения смеси, которое затем переходит в спокойное дозвуковое в прыжке перемешивания.
3. Расчетными и эксплуатационными примерами подтвердить

корректность предложенной математической модели.

Обяз.  
экз.

Южно-Уральский  
гос. университет  
НАУЧНАЯ  
БИБЛИОТЕКА

4. На основе математической модели и разработанных в процессе натуральных испытаний рекомендаций оптимального проектирования смесителя предложить метод расчета гидродинамических кавитационных смесителей непрерывного действия с минимальным энергопотреблением;

**Методы исследований.** Для решения поставленных задач использованы методы механики жидкости и газа, математического моделирования процессов, протекающих в кавитационных смесителях.

**Научная новизна.** Новыми в работе являются: теоретическое описание гидродинамики двухфазного потока и рабочего процесса в кавитационном смесителе; математическая модель рабочего процесса; метод расчета гидродинамического кавитационного смесителя непрерывного действия; пути конструктивного совершенствования кавитационных смесителей.

**Обоснованность и достоверность результатов работы.**

Обоснованность научных положений и результатов работы обеспечена использованием при составлении физической и математической модели рабочего процесса фундаментальных законов сохранения и их общепринятого математического описания; применением достоверных полуэмпирических данных и соотношений. Достоверность теоретических выводов и рекомендаций подтверждена удовлетворительным согласием с результатами натуральных испытаний.

**Практическая ценность результатов работы и их реализация.**

Математическая модель рабочего процесса и построенная на ее основе методика расчета гидродинамического кавитационного смесителя непрерывного действия, а также разработанные в процессе натуральных испытаний рекомендации его оптимального проектирования могут быть использованы при совершенствовании существующих или создании принципиально новых кавитационных смесителей, реализующих эффект ударного воздействия прыжка перемешивания на смесь компонентов с одновременной конденсацией жидких присадок и их диспергированием в несущей среде, в результате чего образуется высокодисперсная, устойчивая против расслоения эмульсия.

Реализация научных и технических результатов диссертационной работы осуществлена на Кармановской ГРЭС, где установлен полупромышленный образец кавитационного смесителя. Его эксплуатация показала устойчивую и надежную работу, позволила повысить в три - четыре раза дисперсность ВМЭ, при сжигании которой наблюдалось заметное снижение окислов азота. Некоторые результаты исследований внедрены в учебный процесс подготовки инженеров по специальности 12.11

"Гидромашины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика" в Южно-Уральском государственном университете.

**Апробация работы и публикации.** Материалы работы обсуждались на ежегодных научно - технических конференциях Южно - Уральского государственного университета в 1996 - 1999 гг.; на региональных конференциях "Аэрокосмическая техника и высокие технологии" в 1999 и 2000 гг. (Пермь, ПГТУ); на международных конференциях: "Гидравлические машины, гидропривод и гидропневмоавтоматика" 9 - 10 декабря 1998 г. (Москва, МЭИ); "Гидромеханика, гидромашины, гидропривод и гидропневмоавтоматика" 26 - 27 октября 1999 г. (Челябинск, ЮУрГУ).

По результатам выполненных исследований опубликовано пять печатных работ, подана заявка на изобретение, материалы диссертационной работы изложены также в трех научно - технических отчетах.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и списка литературы, изложена на 147 страницах машинописного текста, включая 31 рисунок и список литературы из 139 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обозначено направление научных исследований кафедры гидравлики и гидропневмосистем ЮУрГУ, в рамках которого выполнена данная диссертационная работа, приводится краткое содержание глав диссертации.

### Глава I. Состояние вопроса. Цель и задача исследования

Смесительные устройства находят широкое применение во многих отраслях промышленности: металлообрабатывающей, нефтяной и газовой, пищевой и химической, в теплоэнергетике и др. Широкое распространение смесительных устройств в промышленности обусловлено потребностью в таких технологических операциях, как перемешивание, диспергирование, процессы тепло- и массопереноса и пр. Основным направлением совершенствования этих устройств является повышение качества готового продукта. Для смесительных устройств, служащих для приготовления эмульсий, - эмульгаторов - основным направлением совершенствования является повышение степени дисперсности эмульсии. Эта задача является актуальной для всех отраслей промышленности, где используют смесительные устройства, так как повышение качества эмульсии позволяет улучшить не только

техничко – экономические, но часто и экологические показатели технологических процессов. Особенно актуальной эта задача является для теплоэнергетики, где необходим комплексный подход при анализе воздействия на природную среду всех вредных выбросов энергетических установок при сжигании топлива и, как следствие, достижение экосовместимости технологий. Одной из таких технологий для теплоэнергетики, направленной на защиту атмосферы и водного бассейна от выбросов различных ингредиентов ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ , сажи, нефтепродуктов, бензапирена и другой токсичной органики), является сжигание мазута в виде водомазутных эмульсий (ВМЭ). В настоящее время для получения эмульсий широко используют смесители кавитационного типа, в которых благодаря кавитационной обработке потока смеси происходит взаимодействие многокомпонентной среды на микроуровне. Наиболее обширные экспериментальные исследования кавитационных эмульгаторов выполнили О.М. Яхно, В.И. Кормилицын, М.Г. Лысков, А.А. Румынский, Р.Ю. Акчурин, Н.А. Балахничев, С.П. Козырев.

Однако, опыт эксплуатации кавитационных эмульгаторов показал, что их потенциальные возможности не исчерпаны. Кроме того, кавитационные эмульгаторы могут быть причиной неустойчивой работы гидросистемы. Это обусловлено тем, что рабочий процесс гидродинамических кавитационных эмульгаторов детально не прописан. С другой стороны, сама теория кавитационных явлений в настоящее время находится в стадии интенсивного развития и носит незавершенный, а часто и противоречивый характер.

Поток в условиях кавитации можно рассматривать как двухфазный поток, состоящий из парогазовой и жидкой фаз, - парогазожидкостный поток. Рабочий процесс смесительных устройств, обеспечивающих такой режим работы, по своей физической сути близок к рабочему процессу двухфазных струйных аппаратов (газожидкостных, либо жидкостно-струйных аппаратов, работающих в условиях кавитации), функционирующих в холостом режиме. Поэтому результаты исследований двухфазных струйных аппаратов могут быть положены в основу физической модели рабочего процесса кавитационных смесителей непрерывного действия. Существенный вклад в развитие теории кавитационных явлений в струйных насосах внесли Л.Г. Подвидз, Ю.Л. Кирилловский, В.К. Темнов, R.G. Cunningham, H. Rouse, A.J. Stepanoff, A.G. Hansen, T.Y. Na, N.L. Sanger и др. Ими предложено несколько параметров, характеризующих

кавитационные режимы работы струйных аппаратов и их взаимосвязь с геометрическими и режимными параметрами струйных насосов.

Исследованиями J.H. Witte, R.J. Cunningham, В.Г. Цегельского, Е.К. Спиридонова, Ю.Н. Васильева установлено, что наиболее эффективным режимом работы жидкостногазовых струйных насосов является режим с минимальным скольжением фаз и прыжком перемешивания в рабочей камере аппарата. В этих условиях процесс смешения и энергообмена осуществляется наиболее полно. Поэтому одним из путей совершенствования гидродинамических кавитационных эмульгаторов для получения высокодисперсных и стойких эмульсий может быть инициирование прыжка перемешивания в проточной части устройства, реализующего эффект ударного воздействия на многокомпонентную среду.

Таким образом, задача совершенствования смесительных устройств для приготовления эмульсии высокой степени дисперсности является актуальной и ее решение требует привлечения результатов исследований кавитационных явлений двухфазных течений в струйных аппаратах. Цель работы и поставленные для достижения данной цели задачи приведены в разделе "Общая характеристика работы".

## **Глава II. Математическая модель рабочего процесса в эмульгаторах непрерывного действия**

Рабочий процесс гидродинамических кавитационных смесителей (эмульгаторов) основан на явлениях, происходящих при совместном течении двух фаз. Зарождение высокоскоростного двухфазного течения осуществляется кавитаторами, обеспечивающими локальное снижение давления до давления насыщенного пара. Первоначальная теплота парообразования генерируется самим кавитатором вследствие перевода части механической энергии в тепловую при трансформации потенциальной энергии потока в кинетическую. Дополнительная энергия для поддержания и развития парообразования черпается уже от потока смеси за счет его переохлаждения.

Информационным поиском установлено, что одним из эффективных способов создания эмульсий может быть кавитация в струйном пограничном слое. При этом для повышения дисперсности эмульсии необходимо очаги кавитации распределять равномерно по нормальному сечению потока, а их число, по возможности, увеличить. Таким кавитационным устройством может быть, например, многоструйное сопло с равномерно расположенными отверстиями, формирующее несколько высокоскоростных струй в рабочей камере эмульгатора, или решетка, составленная из нескольких цилиндров.

Поведение двухфазного потока во многом зависит от паросодержания в нем. При этом скорость звука в парогазожидкостной смеси может быть существенно меньше скорости звука в составляющих эту смесь компонентах. Поэтому, если создать условия для формирования высокоскоростных струй при помощи кавитатора, то на выходе последнего можно получить сверхзвуковой парогазожидкостный поток. Течение сверхзвукового двухфазного потока в условиях трения приводит к тому, что в некотором сечении русла формируется прыжок перемешивания, и сверхзвуковое течение переходит в дозвуковое с одновременной конденсацией жидких присадок и их диспергированием в несущую среду. Осуществление режима течения парогазожидкостного потока с прыжком перемешивания обеспечивает резкое локальное повышения давления, тем самым взаимопроникновение компонентов смеси будет наиболее полным.

Основными элементами кавитационных смесителей непрерывного действия является конфузор для предварительного разгона потока, рабочая камера с побудителями кавитации, где осуществляется приготовление эмульсии, за рабочей камерой расположен диффузор, в котором происходит частичное торможение приготовленной эмульсии до скоростей, приемлемых для транспортирования смеси в трубопроводах. Побудителями кавитации в потоке может быть либо сопло (и тогда смеситель называется струйным эмульгатором), либо гидродинамическая решетка, составленная из плохообтекаемых тел (смеситель с гидродинамической решеткой).

На рис. 1 представлены принципиальные схемы *струйного эмульгатора* (рис. 1 а) и *эмульгатора с кавитационной решеткой* (рис. 1 б). Эмульгатор состоит из подводящего конфузора 1, кавитатора (сопла либо гидродинамической решетки) 2, рабочей камеры (горловины) 3 и диффузора 4. Смешиваемый поток поступает в конфузор 1, где происходит его разгон и снижение давления. Далее поток из конфузора 1 попадает на кавитатор 2, который обеспечивает формирование высокоскоростных струй. На выходе кавитатора (сечение 2 - 2) происходит резкое падение давления вплоть до давления насыщенного пара в струйном пограничном слое либо в вихревом следе. Это падение давления приводит к выделению растворенных газов и переводу части жидкой фазы в парообразную и образованию, тем самым, высокоскоростного парогазожидкостного потока. В рабочей камере 3 происходит торможение сверхзвукового парогазожидкостного потока и переход его в дозвуковой в прыжке перемешивания. После рабочей камеры готовая

Принципиальные схемы кавитационных смесителей  
непрерывного действия

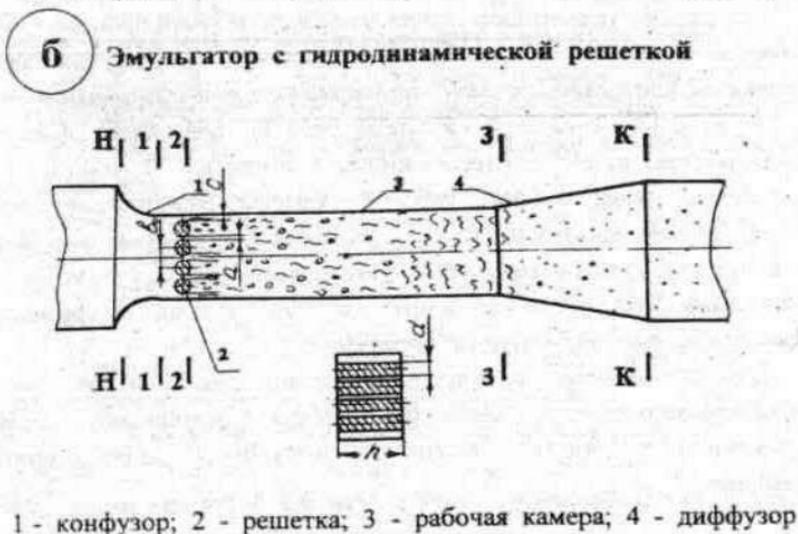


Рис. 1

эмульсия поступает в диффузор 4, где часть кинетической энергии потока преобразуется в потенциальную. Давление при этом повышается до значения меньшего, чем перед эмульгатором.

На рис. 2 схематично представлены основные этапы создания эмульсии в кавитационном эмульгаторе, рабочий процесс которых реализует прыжок перемешивания.

### Основные этапы создания эмульсии



Рис. 2

#### Определение поперечных размеров смесителя.

Исходными уравнениями, описывающими рабочий процесс в смесителе, являются уравнения: баланса массовых расходов; Д. Бернулли для потока с капельным состоянием смеси на участке между нормальными сечениями Н - Н и 2 - 2, 3 - 3 и К - К (см. рис. 1); количества движения для контрольного отсека, ограниченного сечениями 2 - 2 и 3 - 3 и внутренней поверхностью рабочей камеры. Эта система уравнений, являясь общей для эмульгаторов с различными побудителями кавитации, дополняется числами кавитации, устанавливающими взаимосвязь между локальными падениями давления за кавитаторами и режимными и геометрическими параметрами потока.

Для эмульгаторов с гидродинамической решеткой, составленной из плохобтекаемых тел, исходная система уравнений, дополненная выражением для числа кавитации в вихревом следе  $\sigma'$ , приводит к уравнению

$$\frac{P_H - P_K}{P_H - P_{H.п.}} = \frac{\zeta_{\Sigma}}{\Omega^2 \frac{(1 + \sigma' + \zeta_{КАВ})}{\Omega^2} + \zeta_{КОН}}, \quad (1)$$

которое является базовым при расчете таких смесителей.

Здесь  $P_H$ ,  $P_K$ ,  $P_{H.п.}$  - давление в сечениях Н - Н, К - К и давление насыщенного пара соответственно;  $\zeta_{\Sigma}$ ,  $\zeta_{КАВ}$ ,  $\zeta_{КОН}$  - суммарный гидравлический коэффициент сопротивления проточной части смесителя, гидравлический коэффициент сопротивления кавитатора (решетки) и коэффициент

сопротивления конфузора соответственно;  $\Omega$  - относительная площадь кавитатора;  $\sigma' = (P_2 - P_{\min}) / (\rho \cdot V_{c2}^2 / 2)$  - число кавитации, в котором  $P_{\min} = P_{\text{н.п.}}$ ;  $P_2$ ,  $V_{c2}$  и  $\rho$  - соответственно давление, скорость и плотность потока смеси в сечении 2-2.

В диссертации приводятся обобщенные опытные данные по выбору числа кавитации  $\sigma'$  для решетки, составленной из нескольких прямых круговых цилиндров.

При выводе расчетного уравнения струйного смесителя используется формула В.К. Темнова, устанавливающая зависимость числа кавитации  $\sigma_0$  от относительной площади сопла  $\Omega_0$ :

$$\begin{aligned} \text{при } 0 < \Omega_0 \leq 0,5 & \quad \sigma_0 = 0,07 + 1,36 \cdot \Omega_0 \cdot (1 - \Omega_0); \\ \text{при } 0,5 < \Omega_0 < 1,0 & \quad \sigma_0 = 0,41. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\sigma_0 = (P_2 - P_{\min}) / (\rho \cdot V_0^2 / 2)$  - число кавитации, в котором  $P_{\min} = P_{\text{н.п.}}$ ,  $P_2$ ,  $V_0$  и  $\rho$  - давление, скорость и плотность потока смеси на срезе сопла;  $\Omega = A_0 / A_3$  - относительная площадь сопла, где  $A_0$  - площадь выходного сечения сопла (или нормального сечения струи сразу же за соплом),  $A_3$  - площадь поперечного сечения камеры смешения (рабочей камеры или горловины).

Комбинация исходных уравнений и формулы (2), а также ряд преобразований, приводят к выражению

$$\frac{P_{\text{н}} - P_{\text{к}}}{P_{\text{н}} - P_{\text{н.п.}}} = \frac{\zeta_{\text{сop}} + (\zeta_{\text{кон}} + \zeta_{\text{диф}} + \zeta_{\text{г}}) \Omega_0^2 + (1 - \Omega_0)^2}{1 + \sigma_0 + \zeta_{\text{сop}} + \zeta_{\text{кон}} \cdot \Omega_0^2}, \quad (3)$$

которое является базовым при расчете струйного смесителя.

Выражения (1) и (3) позволяют при известном абсолютном давлении перед смесителем  $P_{\text{н}}$  и выбранных коэффициентах сопротивления элементов проточной части определить безразмерные геометрические параметры кавитаторов  $\Omega$  или  $\Omega_0$ , при которых потери давления в смесителе ( $P_{\text{н}} - P_{\text{к}}$ ) будут не выше заданной величины. На рис. 3 представлены графики изменения относительного перепада давления  $(P_{\text{н}} - P_{\text{к}}) / (P_{\text{н}} - P_{\text{н.п.}})$  на струйном смесителе в функции от относительной площади сопла  $\Omega_0$ , рассчитанные по уравнению (3), во всем практическом диапазоне изменения коэффициента сопротивления рабочей камеры (горловины)  $\zeta_{\text{г}} = 0,08 \dots 1$  и гидравлически совершенном профилировании остальных элементов проточной части смесителя. Анализ выражения (3) и графиков (см. рис. 3) показывает, что минимуму относительного перепада давления

$(P_H - P_K) / (P_H - P_{H.п.})$ , а, следовательно, минимуму потерь в смесителе соответствует следующий диапазон изменения относительной площади сопла:  $0,45 \leq \Omega \leq 0,7$ . Поэтому при расчете гидродинамических кавитационных смесителей струйного типа целесообразно выбирать геометрические характеристики именно из этого ряда.

График изменения относительного перепада давления в зависимости от относительной площади сопла

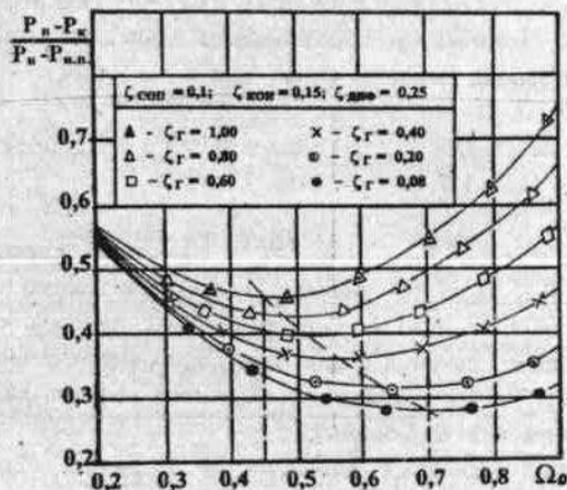


Рис. 3

### Определение продольных размеров смесителя

Изменение давления вдоль газожидкостного потока в цилиндрическом русле определяется уравнением Е.К. Спиридонова:

$$\frac{dP}{dl} = \frac{\rho_{ж} \cdot g \cdot (Q_{ж})^2 \cdot (1 + \alpha)}{(A \cdot \sqrt{\frac{8g}{\lambda}})^2 \cdot R \cdot (1 - M^2)} \quad (4)$$

где  $A$  - площадь живого сечения потока;  $\lambda$  - коэффициент гидравлического трения;  $M$  - число Маха;  $R$  - гидравлический радиус;  $l$  - осевая координата;  $Q_{ж}$  - объемный расход жидкой фазы;  $\alpha$  - отношение объемных долей газа (пара) и жидкости;  $\rho_{ж}$  - плотность жидкой фазы;  $g$  - ускорение свободного падения.

Анализ уравнения (4) показывает, что под влиянием трения **гомогенный** дозвуковой парогазожидкостный поток ( $M < 1$ ) в трубе разгоняется ( $dP < 0$ ), а сверхзвуковой ( $M > 0$ ) тормозится ( $dP > 0$ ). Если же условия движения сверхзвукового двухфазного потока таковы, что неизбежен переход через скорость звука ( $P = P_K, M = 1$ ), то плавное торможение потока парогазожидкостной смеси невозможно: в некотором сечении потока произойдет прыжок перемешивания, за которым установится ускоренное дозвуковое течение. Для определения длины эмульгатора надо рассчитать критическую длину  $l_K$  участка русла с бурным двухфазным потоком, при которой в конечном сечении участка достигается критическое состояние потока (давление  $P = P_K$ ). Эта задача решается на основе уравнения (4). Его интегрирование приводит к следующему выражению:

$$\xi_K = Z(X_K) - Z(X_l), \quad (5)$$

где  $\xi = \frac{\lambda \cdot \kappa \cdot y}{2} = \frac{\lambda \cdot l \cdot y}{D \cdot 2}$  - приведенная длина;  $\kappa = \frac{l}{4R}$  - относительная длина

участка ( $l$ -длина;  $R$  и  $D$  - гидравлические радиус и диаметр соответственно);

$$Z(X) = \gamma \cdot \ln X - (\gamma - 1) \cdot \ln(X + 1) - \gamma \cdot \frac{X + \psi}{X + 1} - X; \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{y}{\psi^2} \quad \text{- принятое обозначение;} \quad (7)$$

$\psi$  - коэффициент скольжения;  $X$  и  $y$  - безразмерные координаты:

$$X = \frac{P}{\mu \cdot R \cdot T_{ж} \rho_{ж}}; \quad y = \frac{(Q_{ж})^2}{A^2 \mu \cdot R \cdot T_{ж}} \quad (8)$$

$P$  - давление в сечении потока;  $\mu$  - отношение массовых долей газа и жидкости;  $T_{ж}$  - температура жидкой фазы.

Критическое состояние потока описывается уравнением:

$$y_K = (\psi \cdot X_K)^2 \frac{X_K + 1}{\psi \cdot X_K + 1} \quad (9)$$

Совместное решение уравнений (4) - (9) позволяет определить осевую координату  $l_K$  прыжка перемешивания и, следовательно, длину рабочей

камеры. Однако, для этого необходимо знать истинное паросодержание в бурном потоке.

Определение истинного паросодержания осуществляется совместным решением уравнений материального и энергетического баланса с учетом процесса парообразования для двухфазного потока в рабочей камере, то есть на участке между сечениями 2-2 и 3-3. При этом полагается, что тепло, затраченное на парообразование части массы жидкой присадки в единицу времени, равно мощности тепловыделения потока при трансформации механических потерь в тепло плюс приток тепла в единицу времени от самого потока за счет его локального переохлаждения.

Таким образом, математическая модель рабочего процесса, составленная на основе уравнений количества движения, материального и энергетического баланса потока в смесителях непрерывного действия, является замкнутой. Она позволяет рассчитать поперечные размеры смесителей с побудителями кавитации в потоке в виде многоструйного сопла либо гидродинамической кавитационной решетки, а также определить координаты скачка перемешивания и, тем самым, - продольные размеры смесителя.

### Глава III. Конструкции гидродинамических смесительных устройств. Состояние и перспективы

Все смесительные устройства принципиально можно разделить на два класса: статические смесители и смесители с подвижными элементами. Наличие подвижных элементов определяет их невысокие эксплуатационные показатели надежности. Поэтому предпочтение следует отдавать статическим смесителям. По принципу воздействия на обрабатываемую среду можно выделить следующие классы смесительных устройств: механические и волновые. Получить высокую степень дисперсности конечного продукта механическим воздействием на смешиваемые компоненты затруднительно. Эта задача может быть решена применением волновых статических смесителей и, в частности, кавитационных. Обзор научно-технической литературы и патентный поиск показали, что существующие схемы кавитационных смесителей в силу своих конструктивных особенностей не в полной мере отвечают требованиям стабильной работы, а также приготовления однородной, устойчивой к расслоению, высокодисперсной эмульсии. Исходя из вышеизложенного, были разработаны следующие рекомендации по совершенствованию кавитационного смесителя:

- кавитационное устройство целесообразно выполнить в виде многоструйного сопла, установленного на входе рабочей камеры. При такой схеме

обеспечивается только однократный разгон потока и последующее его торможение в рабочей камере. Тем самым снижаются потери энергии. Применение многоструйного сопла обеспечивает создание достаточного количества очагов кавитации, равномерно распределенных по живому сечению потока;

- создать условия для формирования сверхзвукового парогазожидкостного течения в рабочей камере смесителя, которое в условиях трения переходит в дозвуковое в прыжке перемешивания. Прыжок перемешивания создает условия интенсивного дробления жидких присадок и их внедрение в несущей среде. При этом смесь компонентов подвергается не только традиционной кавитационной обработке, но и мощному ударному воздействию скачка перемешивания;

- повысить вероятность формирования прыжка перемешивания именно в рабочей камере специальными конструктивными мероприятиями. Для этого, например, на внутренней поверхности рабочей камеры в начале ее концевой участка выполнить порогаобразный выступ, расположенный по периметру рабочей камеры;

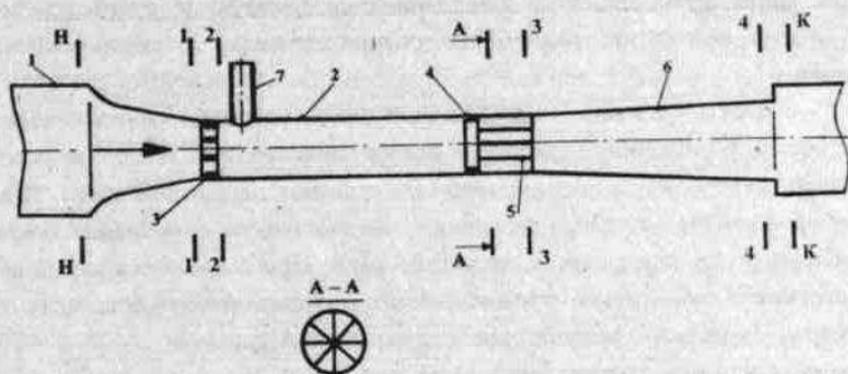
- предусмотреть устройство по стабилизации потока за прыжком перемешивания. Таким устройством может быть успокоитель, выполненный в виде продольных радиальных ребер, расположенных по всей длине ее концевой участка. Успокоитель обеспечивает гашение колебаний давления и снижение вибрации устройства;

- предусмотреть в конструкции смесителя канал ввода добавочного компонента смеси. Это позволит отказаться от предварительной подготовки смеси компонентов, так как один из компонентов может быть введен непосредственно в кавитационную зону. При таком исполнении схема гидродинамического кавитационного смесителя приближена к схеме струйного насоса.

Выше перечисленные мероприятия могут быть реализованы различными конструктивными решениями. Одно из таких решений приведено на рис. 4.

Предложенная оригинальная конструкция кавитационного смесителя позволяет организовать рабочий процесс с прыжком перемешивания и, тем самым, дополнить традиционную кавитационную обработку потока смеси ударным воздействием прыжка, в результате которого происходит диспергирование жидких присадок в несущей среде и образование высокодисперсных, устойчивых к расслоению эмульсий.

### Кавитационный смеситель с многоструйным соплом



- 1 - подводный патрубок; 2 - рабочая камера; 3 - сопло; 4 - порогаобразный выступ;  
5 - успокоитель; 6 - отводящий патрубок; 7 - патрубок подачи добавочного  
компонента

Рис. 4

#### Глава IV. Натурные испытания кавитационного смесителя. Метод расчета смесителей нового поколения

В задачу натурных испытаний входили: 1) опробование в промышленных условиях гидродинамического кавитационного смесителя непрерывного действия, рассчитанного согласно вышеописанной математической модели; 2) получение опытных данных о распределении давления вдоль проточной части смесителя; 3) проведение сравнительного анализа водомазутной эмульсии, полученной механическим перемешиванием компонентов смеси в лопастной системе центробежных насосов, и эмульсии, полученной с помощью гидродинамического кавитационного смесителя непрерывного действия; 4) сопоставление опытных данных по концентрации вредных веществ (в частности, окислов азота  $\text{NO}_x$ ) в отходящих газах при сжигании водомазутной эмульсии, полученной различными способами (с использованием и без использования эмульгатора).

Смеситель был установлен на одном из мазутопроводов системы топливоподачи Кармановской ГРЭС. Испытания проводились как на расчетном режиме (соответствующем исходным данным), так и на режимах, отличных от расчетного. В процессе испытаний проводились измерения давления вдоль проточной части смесителя образцовыми манометрами; датчиками температуры измерялась температура смеси; степень дисперсности водомазутной эмульсии определялась визуально. Натурные испытания полупромышленного образца гидродинамического

кавитационного смесителя включали также измерение концентрации окислов азота  $NO_x$  и содержания кислорода в уходящих газах.

В результате выполненных натуральных испытаний в соответствии с поставленными задачами можно отметить следующее:

1. Смеситель в промышленных условиях работал устойчиво, уровень вибрации аппарата был незначителен. Натурные испытания полупромышленного смесителя показали его высокую надежность и эффективность при работе на различных режимах. На расчетном режиме потери давления не превышали заданной величины.

2. Полученные в результате натуральных испытаний данные о распределении давления вдоль проточной части смесителя подтверждают принятую физическую модель рабочего процесса в гидродинамическом эмульгаторе. Местоположение прыжка перемешивания переменна на различных режимах работы смесителя и зависит от параметров потока, в частности от абсолютного давления водомазутной смеси перед эмульгатором  $P_H$ : с увеличением данного параметра прыжок смещается в диффузор и формируется на месте излома проточной части смесителя (переход от цилиндрической рабочей камеры к диффузору).

3. Экспериментальные исследования дисперсности ВМЭ показали, что степень дисперсности ВМЭ, приготовленной с помощью кавитационного эмульгатора, повысилась в три - четыре раза по сравнению с водомазутной эмульсией, приготовленной механическим способом.

4. При переходе с незумульгированного мазута на водомазутную эмульсию фиксировалось снижение окислов азота в отходящих газах на 2,4...9,8%.

На основе математической модели и разработанных в процессе натуральных испытаний рекомендаций предложен метод расчета кавитационного смесителя непрерывного действия с минимальным энергопотреблением. Расчет смесителя выполняется методом последовательных приближений. При этом в каждом приближении по исходным данным и выбранным гидравлическим коэффициентам сопротивления кавитаторов и элементов проточной части рабочей камеры определяются оптимальные поперечные размеры побудителей кавитации и рабочей камеры, соответствующие минимуму потерь в смесителе, затем рассчитывается расход пара и далее температура потока смеси в начальном участке рабочей камеры. Расчет считается достоверным, если параметры потока смеси компонентов в двух последних приближениях отличаются не более, чем на (2...5) %. После нахождения температуры смеси на начальном участке рабочей камеры и паросодержания в потоке определяются продольные размеры проточной части смесителя. На рис. 5 изображен предлагаемый метод расчета в виде структурно - логической схемы.

## Метод расчета кавитационных смесителей

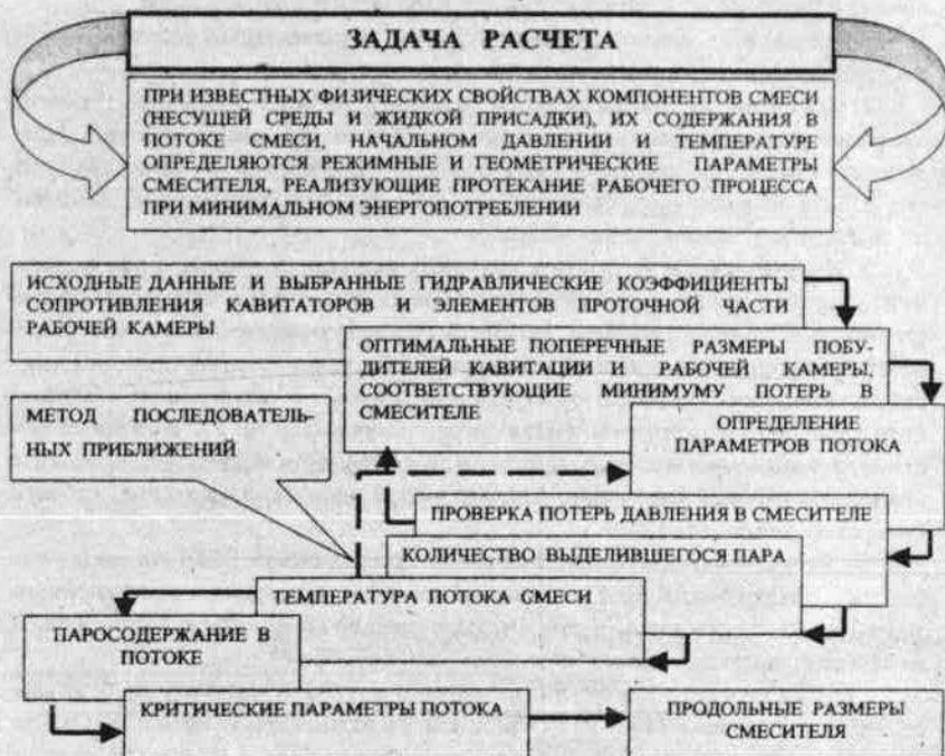


Рис. 5

### Основные выводы

1. Смесительные устройства и системы на их основе находят широкое применение во многих отраслях промышленности, что обусловлено потребностью в таких технологических операциях, как перемешивание, диспергирование, процессы тепло- и массопереноса. Причем, основным направлением совершенствования этих устройств является повышение качества готового продукта, то есть повышение степени дисперсности эмульсий и суспензий. Эта задача является актуальной для всех отраслей промышленности, где используют смесительные устройства, так как повышение степени дисперсности позволяет повысить не только технико-экономические, но и экологические показатели технологических процессов.

2. Создание высокодисперсных эмульсий при помощи традиционного механического воздействия на поток компонентов, подлежащих эмульгированию, затруднительно. Кавитационная обработка компонентов

смеси позволяет решить эту задачу на качественно ином уровне, ибо при такой обработке потока происходит взаимодействие составляющих многокомпонентной среды на микроуровне и образование высокодисперсной, устойчивой против расслоения смеси.

3. Рабочий процесс гидродинамических кавитационных смесителей целесообразно формировать с таким расчетом, чтобы на начальном участке рабочей камеры за побудителями кавитации образовалось бурное сверхзвуковое течение парожидкостной смеси, переходящее затем в конце рабочей камеры смесителя в дозвуковое течение в скачках перемешивания. В последних происходит интенсивная конденсация пара, дробление и диспергирование жидких присадок в несущую среду. В результате данного процесса образуется высокодисперсная эмульсия.

4. Расчетная модель рабочего процесса в кавитационных смесителях непрерывного действия включает уравнения количества движения, материального и энергетического баланса потока, а также соотношения и коэффициенты, полученные на основе экспериментальных данных. Она позволяет рассчитать поперечные размеры смесителей с побудителями кавитации в потоке в виде многоструйного сопла либо гидродинамической кавитационной решетки, а также определить координаты скачка перемешивания и, тем самым, - продольные размеры смесителя.

5. Основными параметрами, описывающими рабочий процесс гидродинамических кавитационных смесителей, являются: число кавитации  $\sigma$ ; относительная площадь кавитационного устройства (сопла или гидродинамической решетки)  $\Omega$ ; приведенная критическая длина  $\xi_k$ ; относительный перепад давления  $(P_H - P_K) / (P_H - P_{н.п.})$  на смесителе. Причем, относительный перепад давления в смесителе зависит, главным образом, от коэффициентов сопротивления элементов проточной части: горловины  $\zeta_r$ , конфузора  $\zeta_{кон}$ , кавитатора  $\zeta_{кав}$  и диффузора  $\zeta_{диф}$ , а также относительной площади кавитационного устройства  $\Omega$  и числа кавитации  $\sigma$ . Каждому набору коэффициентов сопротивления элементов проточной части смесителя отвечает оптимальное значение основного геометрического параметра  $\Omega_{опт}$ , при котором перепад давления в смесителе - минимален. Во всем практическом диапазоне изменения коэффициентов сопротивления горловины  $\zeta_r = 0,08...1,00$  и гидравлически совершенном профилировании других элементов проточной части: конфузора ( $\zeta_{кон} = 0,15$ ), кавитационного устройства ( $\zeta_{кав} = 0,1$ ) и диффузора ( $\zeta_{диф} = 0,25$ ) оптимальная величина относительной площади кавитационного устройства составляет  $\Omega_{опт} = 0,45...0,70$ .

6. С целью интенсификации кавитационного процесса целесообразно очаги кавитации распределять равномерно по нормальному сечению потока, а их число, до возможности, увеличить. Этому требованию отвечает гидродинамическая кавитационная решетка либо многоструйное сопло с равномерно расположенными отверстиями, создающее несколько высокоскоростных струй.

Для инициирования прыжка перемешивания именно в рабочей камере целесообразно выполнить порогообразный выступ в конце рабочей камеры, а сразу за выступом - успокоитель, который выполнял бы функции гашения колебаний давления и успокоения потока.

7. Метод расчета гидродинамических кавитационных смесителей, построенный на основе предложенной математической модели рабочего процесса вместе с условиями минимума потери давления в устройстве и рекомендациями его оптимального проектирования, позволяет разрабатывать эффективные смесительные устройства непрерывного действия с минимальным энергопотреблением.

Содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Спиридонов Е.К., Прохасько Л.С. Конструкции и расчет струйных кавитационных устройств для приготовления эмульсий // Гидравлика и гидропневмосистемы : Сборник докладов секции «Гидравлика и гидропневмосистемы» 50-й юбилейной научно-технической конференции Южно-Уральского Государственного Университета 14-16 апреля 1998 г. – Челябинск: ЮурГУ, 1998. – С. 46-48.

2. Игнатъев А.В., Прохасько Л.С., Спиридонов Е.К. Расчет кавитационного смесительного устройства // Гидравлические машины, гидропривод и гидропневоавтоматика: Тез. докл. международной научно – техн. конф. – Москва: Изд. МЭИ, 1998. – 68 с.

3. Спиридонов Е.К., Прохасько Л.С. Рабочий процесс и характеристики гидродинамических кавитационных эмульгаторов // Аэрокосмическая техника и высокие технологии – 99. – Пермь; Изд. ПГТУ, 1999. – С. 45 – 50.

4. Спиридонов Е.К., Прохасько Л.С. К вопросу о проектировании смесителей нового поколения // Гидромеханика, гидромашин, гидропривод и гидропневоавтоматика: Сб. докл. международной научно – техн. конф. – Челябинск, 1999. – С. 25 – 26.

5. Спиридонов Е.К., Прохасько Л.С. Гидродинамика и расчет кавитационных смесителей непрерывного действия // Аэрокосмическая техника и высокие технологии – 2000. – Пермь; Изд. ПГТУ, 2000. (8 печати).

Издательство Южно-Уральского государственного  
университета

---

ИД № 00200 от 29.09.99. Подписано в печать 09.02.2000. Формат  
60x84 1/16. Печать офсетная. Усл.печ.л. 1,16. Уч.-изд.л. 1.

Тираж 90 экз. Заказ 56/70.

---

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.