

УДК 681.3

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РАСПЫЛА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

О. В. Кравченко

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник*

Контактный тел.: 8 (0572) 94-27-34

E-mail:krav@ipmach.kharkov.ua

И. Г. Суворова

Доктор технических наук, профессор, ведущий научный

сотрудник*

Контактный тел.: 8 (0572) 95-96-07

E-mail:sig@ipmach.kharkov.ua

И. А. Баранов

Аспирант*

*Отдел нетрадиционных энерготехнологий

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного

НАН Украины

ул. Дм. Пожарского, 2/10, г. Харьков, Украина, 61046

Контактный тел.: 8 (0572) 95-96-07

E-mail: bia.84@mail.ru

Якість розпилювання технологічних рідин визначає ефективність багатьох технологічних процесів виробництва і роботи енергетичних установок. Розглянуті питання, пов'язані з можливістю підвищення якості розпилю технологічних рідин, в першу чергу палив, різних паливних емульсій і суспензій

Ключові слова: гідровихрова форсунка, розпил, композитне паливо

Качество распыливания технологических жидкостей определяет эффективность многих технологических процессов производства и работы энергетических установок. Рассмотрены вопросы, связанные с возможностью повышения качества распыла технологических жидкостей, в первую очередь топлив, различных топливных эмульсий и суспензий

Ключевые слова: гидровихрєвая форсунка, распыл, композитное топливо

The spray quality of technological liquids determines the efficiency of many technological processes of power plants production and work. The questions related to possibility of quality improvement of technological liquids spray above all things fuels different fuel emulsions and slurries are considered

Key words: hydro-vortex injector, spray, composite fuel

1. Введение

Распыливание технологических жидкостей широко представлено в процессах производства и эксплуатации энергетических установок. Одним из важных параметров при организации эффективного сжигания топлив в камерах сгорания является качество распыливания.

С этим параметром связаны не только конструктивные особенности камер сгорания, но и энергоэкологические показатели процессов сжигания. Решение данного вопроса требует непрерывного совершенствования конструкций горелочных устройств и технологий сжигания жидких топлив. Кроме того, актуальность вовлечения в номенклатуру сжигаемых топлив широкого спектра веществ, биоотходов, угля, и

других в настоящее время очевидна. Как правило, для подачи горючего в камеры сгорания используются центробежные, струйные комбинированные форсунки, отличительной особенностью которых является высокие требования к чистоте топлива. Использование суспензионных комбинированных топлив не допускает применения в устройствах для сжигания перечисленных типов форсунок, поскольку наличие дисперсной k-фазы в топливе приводит к быстрому засорению трубопроводов и калиброванных проходных отверстий. В этой связи особый интерес представляют гидровихрєвые форсунки [1], которые открывают новые возможности по качеству распыливания "плохо" распыливаемых жидкостей.

В основу процессов активации гидродинамического потока жидкости в таких устройствах положены

явления кавитации. Основной целью при проектировании нового типа форсунок является организация в течении кавитационных зон, в которых происходит сверхтонкое диспергирование жидкости и создание высококачественной гетерогенной смеси.

2. Математическое моделирование гидродинамических процессов в форсунках

2.1. Постановка задачи для поля скоростей

Плоское стационарное течение вязкой несжимаемой жидкости описывается следующей системой уравнений:

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + Eu \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{1}{Re} \Delta V_x = 0, \quad (1)$$

$$V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + Eu \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{1}{Re} \Delta V_y = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

Здесь (1), (2) – уравнения Навье-Стокса, (3) – уравнение неразрывности движения, Re – число Рейнольдса, Eu – число Эйлера.

Вводя функцию тока ψ с помощью соотношений $V_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}$, $V_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$, система (1) – (3) сводится к нелинейному дифференциальному уравнению в частных производных 4-го порядка относительно функции тока ψ [2]

$$\frac{1}{Re} \Delta \Delta \psi - \frac{\partial \psi}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \psi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \psi}{\partial y} = 0. \quad (4)$$

Граничные условия для такого уравнения вытекают из условия прилипания на твердой стенке и скорости на входе.

2.2. Граничные условия

На твердой стенке имеем условие прилипания ($V_x = \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0$, $V_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x} = 0$), отсюда следует, что

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} = (\nabla \psi, \vec{\tau}) = 0;$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial n} = (\nabla \psi, \vec{n}) = 0.$$

Так как $\frac{\partial \psi}{\partial \tau} = 0$ на твердой стенке, то $\psi = \text{const}$ на этой же стенке.

На входе задается параболический профиль скорости.

2.3. Расчет гидродинамических характеристик в форсунке

Постановка задачи.

Найти распределения поля скоростей в потоке при протекании его через форсунку. Решаем уравнение (4) для функции тока в области Ω (рис. 1), описанной уравнением $\omega(x,y) \geq 0$, функция $\omega(x,y)$ представлена на рис. 2.

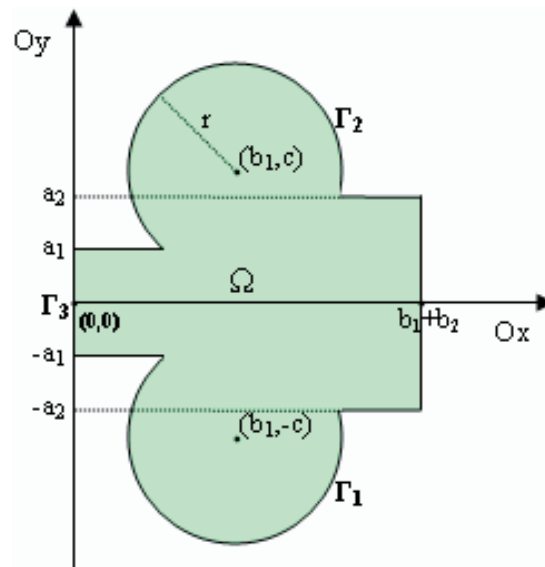


Рис. 1. Область Ω

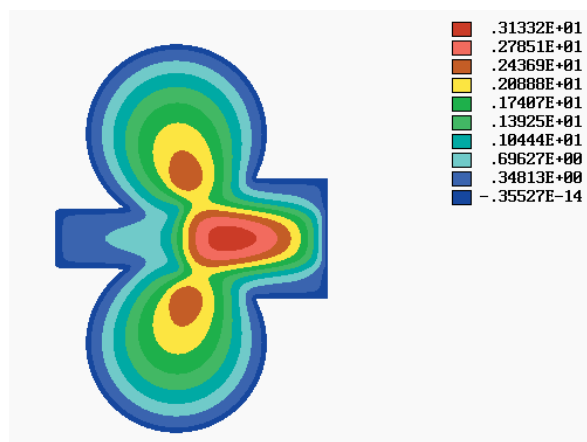


Рис. 2. $\omega(x,y)$

Структура решения для уравнения (4) с соответствующими граничными условиями имеет вид: $\psi = \psi_1 + \psi_0$ [3,4], где ψ_0 обеспечивает продолжение граничных условий внутрь области и получено с помощью формулы "склейки" [5].

$$\psi_0 = \frac{\sum_{i=1}^3 \Psi_i}{\sum_{i=1}^3 w_i^2}, \quad \text{где } \Psi_i - \text{значения функции } \psi, \text{ заданные на участках границы } \Gamma_i, \text{ описываемых уравнением } w_i = 0.$$

Здесь

$$\Psi_1 = -\frac{2a_1}{3},$$

$$w_1 = \left((x-b_1) \wedge_0 (y+a_2) \vee_0 (y+a_1) \vee_0 (r^2 - (x-b_1)^2 - (y+c)^2) \right);$$

$$\Psi_2 = \frac{2a_1}{3},$$

$$w_2 = \left((x-b_1) \wedge_0 (a_2-y) \vee_0 (a_1-y) \vee_0 (r^2 - (x-b_1)^2 - (y-c)^2) \right);$$

$$\Psi_3 = y - \frac{y^3}{3a_1^2}, \quad w_3 = x.$$

Таким образом, $\Psi_0|_i = \Psi_i, \frac{\partial \Psi_0}{\partial n}|_i = 0, i = 1, 2, 3,$

где Ψ_i – неизвестная функция с нулевыми граничными условиями Дирихле и Неймана, которая имеет вид $\Psi_i = \omega_i^2 P_i$.

Здесь $P_i = \sum_{i=1}^N A_i \zeta_i$ – неопределенная компонента структуры;

A_i – константы, которые необходимо определить;

ζ_i – специальные функции, образующие базис в гильбертовом пространстве, в котором ищется решение;

$$\omega_1 = (f_1 \wedge_0 f_2) \vee_0 (f_3 \wedge_0 f_4) \vee_0 (f_5 \vee_0 f_6);$$

$$\wedge_0(x, y) = x + y - \sqrt{x^2 + y^2} - R\text{-конъюнкция};$$

$$\vee_0(x, y) = x + y + \sqrt{x^2 + y^2} - R\text{-дизъюнкция};$$

$$f_1 = x(b_1 + b_2 - x) / (b_1 + b_2);$$

$$f_2 = (a_1 + y)(a_1 - y) / (2a_1);$$

$$f_3 = (x - b_1) / b_1;$$

$$f_4 = (a_2 + y)(a_2 - y) / (2a_2);$$

$$f_5 = (r^2 - (x - b_1)^2 - (y - c)^2) / (2r);$$

$$f_6 = (r^2 - (x - b_1)^2 - (y + c)^2) / (2r);$$

a_1 – половина ширины на входе в форсунку;

a_2 – половина ширины на выходе из форсунки;

$b_1 + b_2$ – длина форсунки;

b_1 – величина, на которую центр окружности отстоит от входа по оси Ox;

c – величина, на которую центр окружности отстоит от оси симметрии входа по оси Oy;

r – радиус окружности;

Относительно функций Ψ_1 и Ψ_0 уравнение (4) имеет вид:

$$\frac{1}{Re} \Delta \Delta \Psi_1 - \left\{ \frac{\partial \Psi_1}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_1}{\partial x} - \frac{\partial \Psi_1}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_1}{\partial y} \right\} - \frac{\partial \Psi_1}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_0}{\partial x} - \frac{\partial \Psi_0}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_1}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_1}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_0}{\partial y} + \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_1}{\partial y} = -\frac{1}{Re} \Delta \Delta \Psi_0 + \frac{\partial \Psi_0}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_0}{\partial x} - \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_0}{\partial y}. \quad (9)$$

После применения процесса линеаризации получим последовательность линейных уравнений [7]:

$$\frac{1}{Re} \Delta \Delta \Psi_{n+1} - \left\{ \frac{\partial \Psi_n}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_{n+1}}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_{n+1}}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_n}{\partial x} - \frac{\partial \Psi_n}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_{n+1}}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_{n+1}}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_n}{\partial y} \right\} - \frac{\partial \Psi_{n+1}}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_0}{\partial x} - \frac{\partial \Psi_0}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_{n+1}}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_{n+1}}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_0}{\partial y} + \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_{n+1}}{\partial y} = -\frac{1}{Re} \Delta \Delta \Psi_0 + \frac{\partial \Psi_0}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_0}{\partial x} - \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_0}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_n}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_n}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_n}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_n}{\partial y}. \quad (10)$$

Задача решается методом наименьших квадратов [8]. Статическое давление определяется из уравнения

Пуассона с правой частью, зависящей от найденной функции тока [9]. Приближенное решение понимается в смысле нормы $L_2(\Omega)$.

3. Результаты вычислительных и экспериментальных исследований

На следующих рисунках приведены результаты вычислительных экспериментов: распределения скоростей и давлений в потоке при протекании его через форсунку. Вычислительные эксперименты проводились на сетке 40x40 сплайнов 5-го порядка. Количество итераций 9.

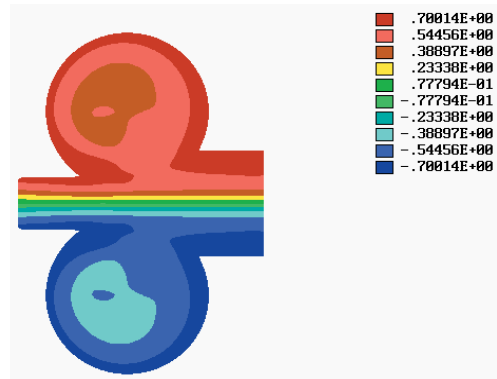


Рис. 3. Функция тока (Re=1000)

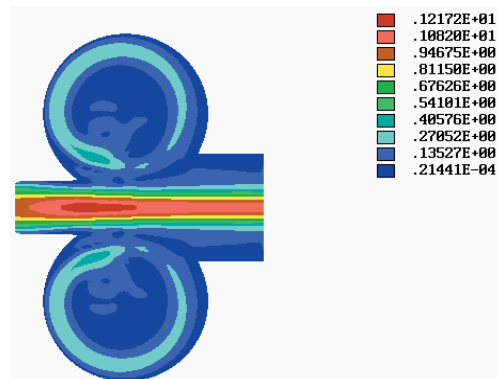


Рис. 4. Функция модуля скорости (Re=1000)

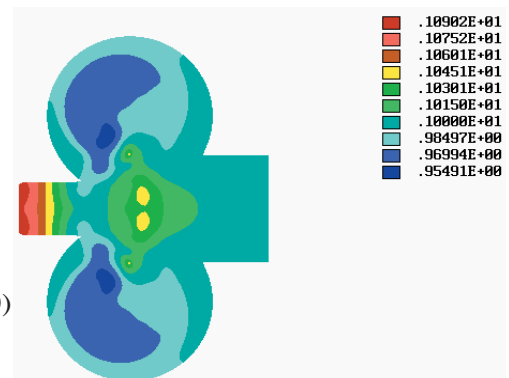


Рис. 5. Функция статического давления (Re=1000, Eu=10)

Уникальная особенность данного типа форсунок состоит в возможности обеспечения подачи в камеру сгорания теплогенерирующих установок суспензионных и эмульгированных горючих. Основной проблемой для получения стационарного горения для таких топлив является образование конгломератов наполнителя, как вдоль топливоподающего тракта, так и непосредственно в камере сгорания. Наиболее эффективным способом борьбы с конгломератами является кавитация. Поэтому, при проектировании гидровихревых форсунок, необходимо стремиться к образованию в течении интенсивных кавитационных зон.

На основании анализа модели форсунки была создана унифицированная методика расчета, что позволило создать и успешно применить в промышленности ряд гидровихревых форсунок для различных дисперсных k-фаз в топливе. Численные эксперименты показали, что после диффузора форсунки реализуются термодинамические условия для эффекта коллапса пузырьков горючего, который разбивает на капли пленку горючей смеси. Возможно, что также имеет место распад молекулы воды на радикалы и ионы H^+ и OH , что активизирует протекание реакции гидролиза и гидрогенизации высокомолекулярных фракций органических энергоносителей [9].

На основе теоретических, численных и экспериментальных исследований разработаны различные по своему практическому применению типы гидровихревых форсунок (рис. 6).



Рис. 6. Типы гидровихревых форсунок

Дисперсность распыла топлива после гидровихревой форсунки определялась с помощью лазерной установки (рис. 7).



Рис. 7. Стенд по определению дисперсности распыла

Огневые испытания форсунок, разработанных для распыливания альтернативного топлива, проводились

на очистных сооружениях в г. Харькове на установке по производству и сжиганию ИКЖТ (рис. 8), разработанной сотрудниками Харьковского национального университета радиоэлектроники.

В высокотемпературную зону горения после распыливания попадает поток ультрадисперсных капель углеводородного топлива, воды и наполнителя (биоида). Попадая в зону горения, частицы воды (размерами 5-15 мкм), находящиеся внутри капель углеводородного топлива, быстро испаряются, «взрываются» и разбрызгивают его, производя дополнительное диспергирование. Улучшается доступ окислителя к топливу, ускоряются процессы газификации в твердом наполнителе, уменьшается механический и химический недожог. При этом факел горения увеличивается в объеме на 11-12% и более плотно заполняет топочную камеру. Улучшаются теплообменные процессы, полнота сгорания некондиционного углеводородного топлива (в нашем случае – отработанное масло) достигает 99.5%.



Рис. 8. Экспериментальная установка по сжиганию композитного топлива

Созданный макетный образец форсунки прошел успешные испытания по сжиганию альтернативного биотоплива и доказал преимущества гидрокавитационного подхода для интенсификации физико-химических процессов в устройствах распыливания.

На рис. 9 показаны испытания рабочего образца гидровихревой форсунки на действующем котле мининфтеперерабатывающего завода в Харьковской области. Испытания проводились на водомазутном топливе. Следует отметить, что на данном образце были получены наилучшие энергоэкологические показатели работы котла по сравнению с форсунками других типов, представленных на рынке.



Рис. 9. Испытания гидровихревой форсунки на мини-НПЗ

5. Выводы

Разработаны и предложены методы интенсификации процессов подготовки эмульсионных и суспензионных топлив и их ультрадисперсного распыливания с использованием кавитационных явлений. Проведено математическое и компьютерное моделирование течения в гидровихревой форсунке.

Представлены результаты экспериментальных исследований разработанных гидровихревых форсунок в составе установки по получению и сжиганию искусственных композитных жидких топлив.

Проведенные испытания показали преимущества использования предложенных принципов предварительной активации топлив, доказали то, что использование гидрокавитационных технологий подготовки и распыливания топлив может существенно улучшить технико-экономические и экологические показатели эффективности работы энергетических установок.

Литература

1. Пат. 82138 Україна. МПК⁷ B01F 5/02, 04, 06, B02C 19/06. Змішувач-форсунка І.Г.Суворова, О.В. Кравченко (Україна). – Заявл. 19.06.2006; Опубл.11.03.08. Бюл. № 5.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика, Т. 6, Гидродинамика. – М.: Наука, 1988.- 736 с.
3. Баранов И.А. Метод R-функций для расчета взаимосвязанных полей в гидротоках / И.А. Баранов, О.В.Крав-

ченко, И.Г. Суворова // Вісн. Харк. нац. ун-та – Сер. Мат. моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – Харків, 2007. – №780. – С.9–18.

4. Суворова И.Г. Математическое моделирование потока жидкости методом R-функций / И.Г. Суворова, О.В. Кравченко // Системні технології: Регіон. міжвуз. зб. наук. пр. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 4 (45). – С. 57 – 69.
5. Рвачев В.Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения. – Киев: Наук. думка, 1982. – 552 с.
6. Суворова И.Г. Метод R-функций в исследованиях и расчетах физико-механических полей для задач строительства: Автореф. дис. ...д-ра техн. наук. – Харьков, 1991. – 21с.
7. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике. – М.: Наука, 1970.- 512 с.
8. Баранов И.А. Расчет гидродинамических характеристик потока вязкой несжимаемой жидкости методом R-функций / И.А. Баранов, О.В.Кравченко, И.Г. Суворова // Вісн. Харк. нац. ун-та – Сер. Мат. моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – Харків, 2009. – №809. – С.9–19.
9. Кравченко О.В. Физико-химические преобразования углеводородных соединений с использованием новых кавитационных устройств //Авиационно-космическая техника и технология. Науч.-техн. журнал НАУ ХАИ. – Харьков, 2007. – № 1 (37). – С. 65 – 69.