

УДК 681.3

О.В. КРАВЧЕНКО, И.Г. СУВОРОВА, И.А. БАРАНОВ, С.С. ХОЛОБЦЕВ

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УСТРОЙСТВАХ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО РАСПЫЛИВАНИЯ ЖИДКИХ ТОПЛИВ

Качество подачи топлива и окислителя в камеры сгорания оказывает существенное влияние на технико-экономические и экологические показатели эффективности работы энергетических установок.

Проведено математическое и физическое моделирование течения в торсионных гидродинамических форсунках, основной задачей которых является ультрадисперсное распыливание эмульсионного или суспензионного топлива. Предложены методы интенсификации процессов подготовки топлив и их распыливания с использованием кавитационных явлений.

Представлены результаты экспериментальных исследований разработанных кавитационных устройств, в том числе в составе пилотной установки по получению и сжиганию искусственных композитных жидких топлив (ИКЖТ). Показаны преимущества использования данных изделий и пути их дальнейшего внедрения в различные отрасли промышленности.

математическая модель, дисперсность, гидродинамические преобразователи, жидкое топливо

Введение

В настоящее время происходит резкое ужесточение требований к технико-экономическим и экологическим показателям эффективности работы широкого круга энергетических объектов – от двигателей внутреннего сгорания транспортных средств до малых и больших, мобильных и стационарных энергогенерирующих установок.

Особую актуальность приобретает вовлечение в номенклатуру сжигаемых топлив биомассы, биоотходов, угля, отходов нефтепереработки и пр. Как правило, для подачи горючего в камеры сгорания используются центробежные, пневматические, струйные или комбинированные форсунки, отличительной особенностью которых является высокие требования к чистоте топлива. Использование для сжигания в перечисленных типах форсунок суспензионных композитных топлив не допускается, поскольку наличие дисперсной конденсированной фазы в топливе приводит к быстрому засорению трубопроводов и калиброванных проходных отверстий.

Одним из путей выхода из сложившейся ситуации является усовершенствование конструкций го-

релочных устройств и технологий сжигания топлив, в которых, в первую очередь, будут на новом качественном уровне решены вопросы предварительного гидродинамического диспергирования.

Новые возможности по качеству распыливания открывает использование гидрокавитационных преобразователей торсионного типа [1, 2].

В основу процессов активации гидродинамического преобразования 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 с предполагаемым окислителем.

1. Математическое моделирование гидродинамических процессов в форсунках

1.1. 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 $V_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}$, $V_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$, систему (1) – (3) преобразуем к нелинейному дифференциальному уравнению в частных производных 4-го порядка относительно функции тока ψ [3]

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

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

1.2. Граничные условия. На твердой стенке имеем условие прилипания

$$(V_x = \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0, \quad V_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x} = 0),$$

отсюда следует, что

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

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

На входе задается параболический профиль скорости.

1.3. Расчет гидродинамических характеристик в форсунке. Найдем распределение поля скоростей в потоке при протекании его через форсунку. Решаем уравнение (4) для функции тока в области Ω , описанной неравенством $\omega(x, y) \geq 0$, график функции $\omega(x, y)$ в виде изолиний представлен на рис. 1.

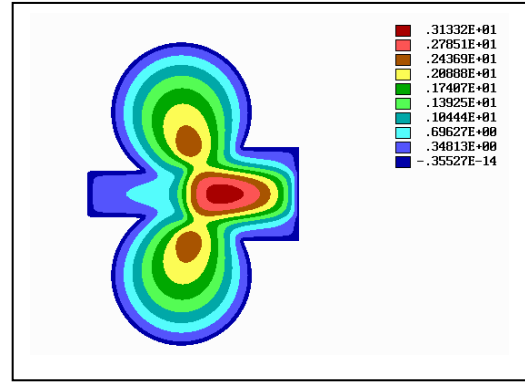


Рис. 1. Функция $\omega(x, y)$

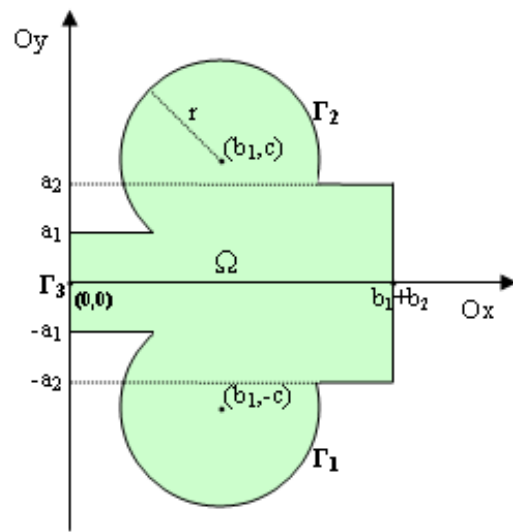


Рис. 2. Область Ω

Структура решения для уравнения (4) с соответствующими граничными условиями имеет вид $\psi = \psi_1 + \psi_0$ [4 – 6], где ψ_0 удовлетворяет всем граничным условиям внутри области, схема которой изображена на рис. 2, и получена с помощью формулы "склейки" [4],

$$\psi_0 = \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{\Psi_i}{w_i^2}}{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{w_i^2}},$$

где Ψ_i – значения функции ψ , заданные на участках границы Γ_i , описываемых уравнением $w_i = 0$.

Здесь

$$\Psi_1 = -\frac{2a_1}{3}; \quad \Psi_2 = \frac{2a_1}{3};$$

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

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

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

Таким образом,

$$\Psi_0|_{\Gamma_i} = \Psi_i, \quad \frac{\partial \Psi_0}{\partial n}|_{\Gamma_i} = 0, \quad i = 1, 2, 3,$$

где Ψ_1 – неизвестная функция с нулевыми граничными условиями Дирихле и Неймана, которая имеет вид $\Psi_1 = \omega_1^2 P_1$.

Здесь $P_1 = \sum_{i=1}^N A_i \zeta_i$ – неопределенная компонента

структуры;

A_i – константы, которые необходимо определить;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 икс;

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

r – радиус окружности.

Относительно функций Ψ_1 и Ψ_0 уравнение (4) имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{1}{\text{Re}} \Delta \Delta \Psi_1 - \left\{ \frac{\partial \Psi_1}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_1}{\partial x} - \frac{\partial \Psi_1}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_1}{\partial y} \right\} - \frac{\partial \Psi_1}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_0}{\partial x} - \\ - \frac{\partial \Psi_0}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_1}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_1}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_0}{\partial y} + \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_1}{\partial y} = \\ = - \frac{1}{\text{Re}} \Delta \Delta \Psi_0 + \frac{\partial \Psi_0}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_0}{\partial x} - \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_0}{\partial y}. \end{aligned} \quad (5)$$

После применения процесса линеаризации получим последовательность линейных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{1}{\text{Re}} \Delta \Delta \Psi_{n+1} - \left\{ \frac{\partial \Psi_n}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_{n+1}}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_{n+1}}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_n}{\partial x} - \right. \\ \left. - \frac{\partial \Psi_n}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_{n+1}}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_{n+1}}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_n}{\partial y} \right\} - \\ - \frac{\partial \Psi_{n+1}}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_0}{\partial x} - \frac{\partial \Psi_0}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_{n+1}}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_{n+1}}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_0}{\partial y} + \\ + \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_{n+1}}{\partial y} = - \frac{1}{\text{Re}} \Delta \Delta \Psi_0 + \frac{\partial \Psi_0}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_0}{\partial x} - \\ - \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_0}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_n}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_n}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_n}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \Psi_n}{\partial y}. \end{aligned} \quad (6)$$

Задача решается методом наименьших квадратов [7]. Статическое давление определяется из уравнения Пуассона с правой частью, зависящей от найденной функции тока. Приближенное решение понимается в смысле нормы $L_2(\Omega)$.

Авторами решена задача и в осесимметричной постановке [6]. Разработанные методики позволяют осуществлять расчеты как для проектировки теплогенераторов [5], работающих на принципе диссипации энергии в гидротоке, так и устройств ультрадисперсного распыливания.

2. Результаты вычислительных и экспериментальных исследований

На рис. 3 – 5 представлены результаты вычислительных экспериментов: распределения скоростей и давлений при протекании потока через форсунку. Вычислительные эксперименты проводились на

сетке 40×40 сплайнов 5-го порядка. Количество итераций 9.

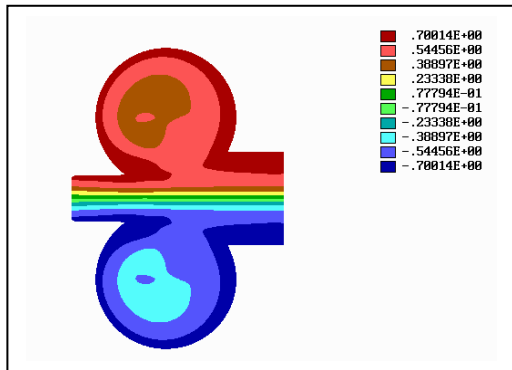


Рис. 3. Функция тока ($Re = 1000$)

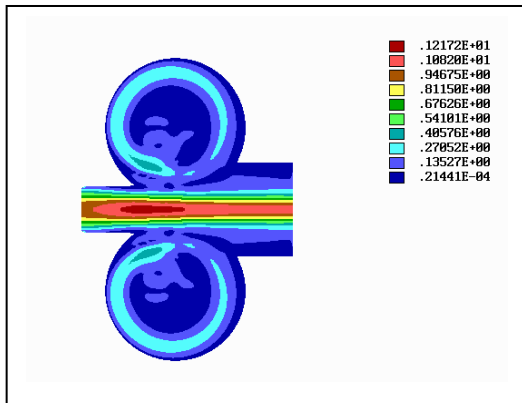


Рис. 4. Функция модуля скорости ($Re = 1000$)

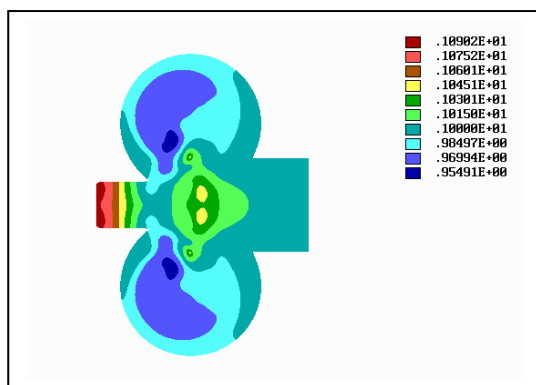


Рис. 5. Функция статического давления ($Re = 1000, Eu = 10$)

В качестве основного требования, выдвигаемого к данному типу разрабатываемой форсунки, является возможность обеспечения подачи в камеру сгорания теплогенерирующей установки суспензионных и эмульгированных горючих ультрадисперсного распыла. В данном случае основной задачей

является недопущение образования конгломератов наполнителя, как вдоль тракта топливоподготовки, так и непосредственно в камере сгорания. Образование конгломератов напрямую связано с параметрами потока, поэтому необходимо варьировать геометрией канала и параметрами потока на входе для максимальной эффективности распыливания. При этом кавитация в канале препятствует образованию конгломератов.

Ранее авторами показано [1, 2], что возникновение кавитации в потоке может приводить в зоне коллапса пузырьков к диспергированию среды до молекулярного и атомарного уровней. Эксперименты с водой подтверждают данные предположения. При этом частично изменяются ее свойства, в том числе щелочность. Воздействие на ультрадисперсную эмульсию «вода-углеводород» изменяет фракционный состав конечного продукта с частичной гидрогенизацией и гидролизом углеводородного сырья, подтверждая то, что имеет место деструкция молекул воды как на атомы, так и на ионы H^+ и OH^- . Гидрокавитационное воздействие оказывает влияние и на процесс дробления конгломератов конденсированной фазы и пленки топлива на выходе из форсунки.

Однако количественная оценка данного эффекта требует дополнительных исследований и тщательного анализа.

На рис. 6 – 8 представлены некоторые зависимости параметров распыла от давлений и скоростей потока. Исследовались также режимы течения, при которых через центральное отверстие подавался сжатый воздух, а топливо подавалось непосредственно в зону пониженного давления торообразной камеры смешения.

На основании результатов численного и физического моделирования разработана методика расчета проточной части кавитационной форсунки в зависимости от свойств жидкости и термодинамических параметров на входе в распыливающее устройство.

В соответствии с методикой созданы и успешно испытаны в промышленных установках ряд смесителей-форсунок (рис. 9).

Дисперсность распыла топлива после смесителя-форсунки определялась с помощью лазерной установки (рис. 10).

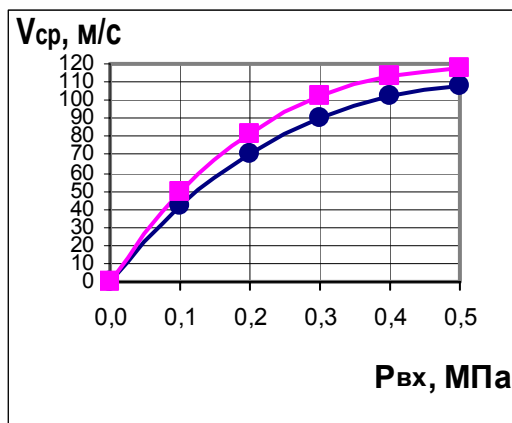


Рис. 6. Зависимость скорости течения газовой смеси в камере смешения торсионной форсунки от давления воздуха на входе при разных значениях диаметра тора вихревой камеры и постоянном диаметре сопла:

- – $d_{соп.} = 4 \text{ мм}; d_{тор.} = 30 \text{ мм};$
- – $d_{соп.} = 4 \text{ мм}; d_{тор.} = 20 \text{ мм}$

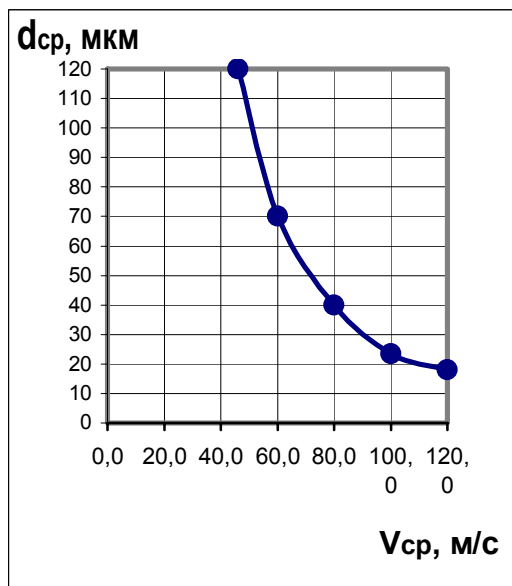


Рис. 7. Зависимость среднего диаметра капель в распыленной струе от средней скорости газовой смеси в камере смешения торсионной форсунки, при $d_{соп.} = 4 \text{ мм}; d_{тор.} = 30 \text{ мм}$

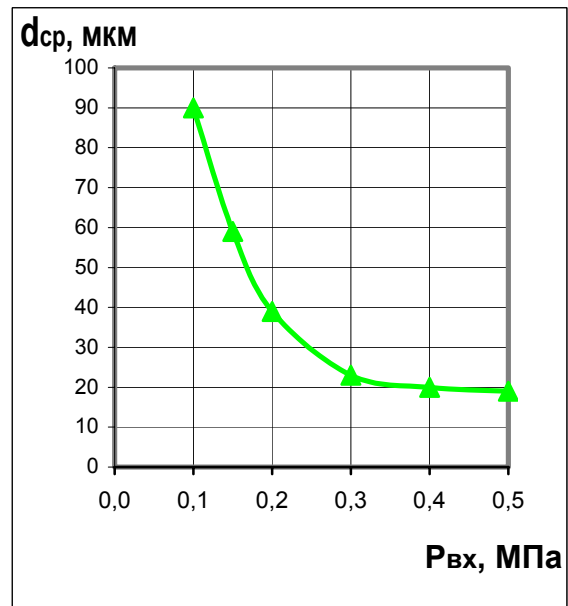


Рис. 8. Зависимости среднего диаметра капель распыленной струи торсионной форсунки ($d_{соп.} = 4 \text{ мм}, d_{тор.} = 30 \text{ мм}$) от давления газа на входе



Рис. 9. Типы смесителей-форсунок

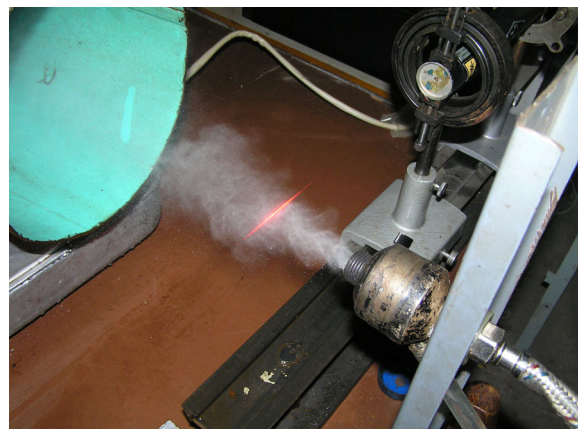


Рис. 10. Стенд по определению дисперсности распыла

4. Опытные-промышленные испытания

В качестве примера реализации разработанной методологии расчета и проектирования форсунок приведем наиболее сложный случай – ее применение для создания устройства сжигания искусственного жидкого композитного топлива (ИКЖТ), состоящего из биоила очистных сооружений (влажность около 85%), воды и углеводородной фракции. Сложность состоит в том, что ИКЖТ представляет собой вязкую эмульсию с включениями твердого осадка.

Организация распыливания и устойчивого горения такого топлива имеет определенную сложность. Достаточно сказать о том, что ни одна из известных конструкций форсунок не дала устойчивого результата.

Плохое качество распыливания, быстрое засорение сопел, необходимость наличия высокого давления потока на входе в форсунки – это лишь некоторые проблемы применения центробежных, пневматических и других типов стандартных форсунок.

Огневые испытания форсунок, разработанных для распыливания альтернативного топлива, проводились на очистных сооружениях в г. Харькове на установке по производству и сжиганию ИКЖТ (рис. 11), разработанной сотрудниками Харьковского национального университета радиоэлектроники.

В высокотемпературную зону горения после распыливания попадает поток ультрадисперсных капель углеводородного топлива, воды и наполнителя (биоила).

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 твер-

дом наполнителя, уменьшается механический и химический недожог. Даже визуально пламя становится похожим на кислородно-водородное высокотемпературное горение. 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. 11. Экспериментальная установка по сжиганию топлива

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

Выводы

Предложены методы интенсификации процессов подготовки топлив и их распыливания с использованием кавитационных явлений.

Проведено математическое и физическое моделирование течения в торсионных гидродинамических форсунках, основной задачей которых является ультрадисперсное распыливание эмульсионного или суспензионного топлив.

Представлены результаты экспериментальных исследований разработанных кавитационных уст-

ройств, в том числе в составе пилотной установки по получению и сжиганию искусственных композиционных 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.

Данные исследования проведены в рамках научного проекта “Создание экспериментального стенда гидродинамического кавитационного влияния на нефть и нефтепродукты с целью уменьшения вязкости для осуществления более эффективного их транспортирования” программы НАН Украины “Научно-технические основы решения проблем энергосбережения”.

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. Кравченко О.В. Физико-химические преобразования углеводородных соединений с использова-

нием новых кавитационных устройств // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 1 (37). – С. 65-69.

3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. – 736 с.

4. Рвачев В.Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения. – К.: Наук. думка, 1982. – 552 с.

5. Баранов И.А., Кравченко О.В., Суворова И.Г. Метод R-функций для расчета взаимосвязанных полей в гидротоках // *Вісник Харк. нац. ун-та – Сер. Мат. моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. – Х. – 2007. – № 780. – С. 9-18.

6. Суворова И.Г., Кравченко О.В. Математическое моделирование потока жидкости методом R-функций // *Системні технології: Регіон. міжвуз. зб. наук. пр.* – Дніпропетровськ. – 2006. – Вип. 4 (45). – С. 57-69.

7. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике. – М.: Наука, 1970.- 512 с.

Поступила в редакцию 30.05.2008

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.