

УДК: 631.372+662.756.3

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СМЕСИТЕЛЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БИОДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ИЗ МАСЛА ЯТРОФЫ

Хоанг Нгия ДАТ¹,
аспирант,
Г.Г.ПАРХОМЕНКО²,
канд. техн. наук,

В.И.ПАХОМОВ²,
докт. техн. наук,
В.Б.РЫКОВ²,
докт. техн. наук,

С.И.БЫРЬКО²,
науч. сотр.,
И.В.БОЖКО²,
инж.-конст.

¹Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону,

²Северо-Кавказский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства,
e-mail: vnptim07@mail.ru, Ростовская обл., г. Зерноград, Российская Федерация

Рассмотрели процесс функционирования гидродинамического смесителя, осуществляющего смешивание потоков биодизельного топлива из ятрофового масла повышенной кислотности с углекислым газом для его промывки. Получили закономерности, раскрывающие взаимосвязь параметров (диаметра и длины камеры смешивания), режимов (давление и скорость потока) со свойствами среды (динамическая вязкость, плотность, упругость) и энергетических показателей процесса (мощность перемешивания). На основании метода подобия и размерностей физических величин получили критерий турбулентности потока, рассчитали режимы, рекомендовали диаметр камеры смешивания (30-35 мм). Установили снижение давления потока и мощности на перемешивание при увеличении диаметра трубопровода. Определили наименьшую интенсивность изменения давления при диаметре более 30 мм, где зависимость приобретает характер линейной функции. Получили закономерность изменения мощности на перемешивание, которая наиболее интенсивно возрастает (в 1,5 раза) с уменьшением длины камеры смешивания с 15 до 10 мм и перестает снижаться при 30-35 мм. Обосновали режим (давление на срезе сопла соответствует критическому), при котором углекислый газ приобретает в камере смешивания свойства жидкости, растворяясь в биотопливе, а смесь становится квазиоднородной. Выявленный критерий смены режимов потока из сверхзвукового в дозвуковой позволил определить условие квазиоднородности смеси. Доказали, что формируемый при этом сверхзвуковой поток «жидкость-газ» трансформируется в дозвуковой, сопровождаемый при акустическом эффекте кавитации прыжком перемешивания за счет изэнтропного скачка давления. Обосновали физико-химические данные процесса кавитационного воздействия углекислого газа на биодизельное топливо, в результате которого улучшаются свойства среды вследствие структуризации молекул раствора, что положительно влияет на смешивание. Предложили конструкцию гидродинамического смесителя.

Ключевые слова: биодизельное топливо, ятрофа, кавитация, гидродинамический смеситель.

Сельское хозяйство может стать не только потребителем, но и производителем различных видов энергии и топлива. Однако популярность установок для производства биодизельного топлива из растительных масел ограничена сложностью выполнения технологического процесса [1, 2].

В нашей стране в СКНИИМЭСХ разработана модульная установка для производства биодизель-

ного топлива из растительных масел (рис. 1), в которой для интенсификации смешивания масла и метилового спирта при этерификации использован оригинальный гидродинамический кавитационный смеситель.

При повышенной кислотности растительного масла, в частности ятрофы (*Jatropha Curcas*), особое значение имеет завершающая стадия технологии производства биодизельного топлива, заклю-



Рис. 1. Модульная установка для производства биодизельного топлива

чающаяся в промывке углекислым газом и омылении полученного при этерификации продукта.

Для ускорения процесса и улучшения его качественных показателей также целесообразно использовать эффект кавитации. В качестве гидродинамического смесителя может быть рассмотрен струйный аппарат – эжектор, работающий со средами «жидкость – газ», в котором обеспечивается смешивание и обмен энергией двух потоков: сырья биодизельного продукта, полученного из яatroфового масла с повышенной кислотностью, и углекислого газа для его промывки и омыления.

Известны исследования взаимосвязи параметров гидродинамического смесителя и обрабатываемой среды, состоящей из двух жидкостей [3-5]. При ее замене на среду «жидкость – газ» предложена математическая модель процесса и рассчитаны рациональные конструктивно-технологические параметры гидродинамического смесителя.

Целью работы стало определение взаимосвязи параметров и режимов функционирования гидродинамического смесителя для среды «жидкость – газ».

Материалы и методы. По методу π -теоремы подобия и размерностей физических величин выделены три критерия – π_1, π_2, π_3 , определяющие характер протекания процесса функционирования гидродинамического смесителя со средой «жидкость – газ» (Рейнольдса – Re , Эйлера – Eu и Коши – Co):

$$\pi_1 = f(\pi_2; \pi_3), \pi_1 = Re, \pi_2 = Eu, \pi_3 = Co, \quad (1)$$

$$Re = f(Eu, Co), \frac{\Delta p}{\rho v^2} = f\left(\frac{v D \rho}{\mu}; \frac{v^2 \rho}{\varepsilon}\right),$$

где Δp – давление потока, Н/м²;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

v – скорость потока, м/с;

μ – коэффициент динамической вязкости, $\frac{Н \cdot с}{м^2}$;

ε – модуль упругости жидкости и газа, Н/м²;

D – диаметр камеры смешивания.

Скорость дисперсных частиц в потоке жидкости зависит от скорости сплошной фазы и относительной скорости пузырьков газа. Определение скорости для каждой из фаз на основании анализа уравнений сохранения потока вызывает большие затруднения. Поэтому предложена возможность раздельного решения соответствующих уравнений сплошной и дисперсной фаз [6]. На основании анализа критериального уравнения (1) с учетом преобразований для турбулентного потока смеси «биодизель – углекислый газ» получим зависимость разницы давлений от диаметра трубопровода:

$$\Delta p = \frac{10^8 \cdot \mu^2}{2 \cdot D^2 \cdot \rho}. \quad (2)$$

Следует отметить, что плотности биодизеля (890-980 кг/м³) и углекислого газа (1,839 кг/м³) имеют значительную разницу, поэтому $\rho - \rho_n \approx \rho$.

По критерию минимума энергозатрат при достижении требуемого качества среды определим длину камеры смешивания, рассчитав мощность на гомогенизацию смеси:

$$N = \Delta p \frac{\pi D^2}{4} v = 10^{12} \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \frac{\mu^3}{\rho^2} \cdot \frac{1}{D} = 10^{12} \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \frac{\mu^3}{\rho^2} \cdot \frac{K_L}{L}, \quad (3)$$

где $K_L = 3 \dots 5$ – коэффициент пропорциональности, связывающий длину L и диаметр камеры смешивания ($L = D \cdot K_L$).

Выделим дополнительное соотношение из критериального уравнения, что не противоречит теоремам теории размерностей и подобия:

$$\pi_{13} = \pi_1 \cdot \pi_3 = \frac{\Delta p}{\varepsilon}. \quad (4)$$

При числе Маха $M = \frac{v}{a} = 1$, (где a – местная скорость звука), происходит смена режимов течения из сверхзвукового в дозвуковое $\pi_{13} = 1, \Delta p = \varepsilon$. Подставив Δp в π_1 , получим выражение для определения критической скорости потока, соответствующей местной скорости звука a [5]:

$$v_{кр} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}. \quad (5)$$

Результаты и обсуждение. Выражение (2) позволяет определять давление потока Δp не только при изменении диаметра трубопровода D , но и в зависимости от свойств среды, представленных коэффициентом динамической вязкости μ и плотностью ρ . Наибольшая интенсивность изменения давления наблюдается при $D = (5 \dots 10) 10^{-3}$ м (на $265 \cdot 10^3$ Па), а наименьшая – при $D \geq (30 \dots 35) 10^{-3}$ м (на $6 \cdot 10^3$ Па). При этом на указанных интервалах график изменения давления в зависимости от диаметра приобретает характер линейной функции (рис. 2а). В связи с вышеизложенным целесообразно выбирать характерные диаметры трубопроводов смесителя в

указанных интервалах, в частности, для камеры смешивания – не более $(30...35)10^{-3}$ м.

Полученная зависимость (3) характеризует взаимосвязь энергетических показателей процесса (мощность на гомогенизацию) с параметрами гидродинамического смесителя (длина и диаметр камеры смешивания) и физико-химическими свойствами среды (плотность, коэффициент динамической вязкости). Анализ полученной зависимости (рис. 2б) свидетельствует о том, что мощность на гомогенизацию смеси возрастает с сокращением длины камеры смешивания. Наиболее заметное

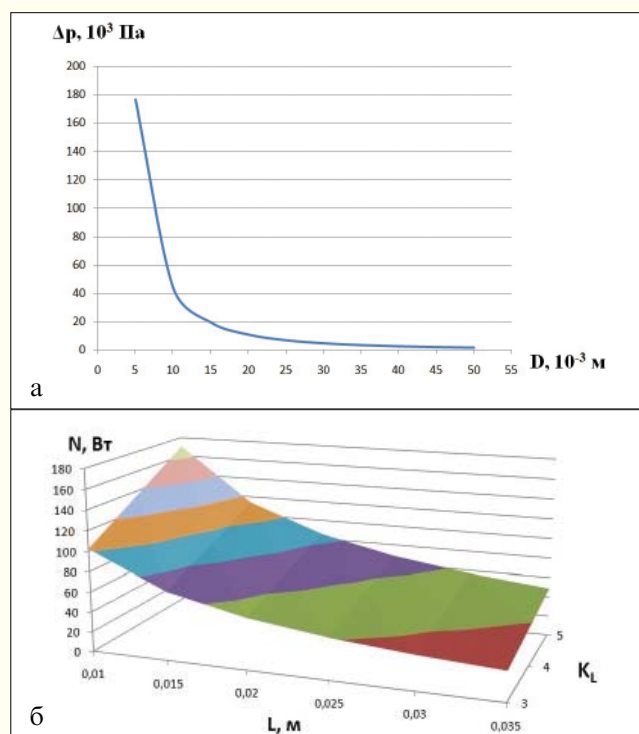


Рис. 2. Закономерности изменения параметров и режимов функционирования гидродинамического смесителя:

а – зависимость давления потока от диаметра трубопровода;

б – зависимость мощности на гомогенизацию от длины камеры смешивания

увеличение энергозатрат наблюдается при уменьшении L с 0,015 до 0,010 м (в 1,5 раза).

Физический смысл полученной закономерности (рис. 2б) заключается в следующем: объему смеси необходимо совершить работу на пути, соответствующем длине камеры смешивания, чтобы достичь требуемой степени гомогенности. Чем короче путь (меньше длина камеры смешивания), тем больше требуется энергии (мощности) для достижения заданных качественных показателей процесса при условии постоянства других параметров.

С увеличением коэффициента пропорциональности K_L , связывающего длину и диаметр камеры

смешивания, мощность на гомогенизацию увеличивается, то есть возрастают энергозатраты. Таким образом, энергетический показатель процесса снижается при увеличении диаметра камеры смешивания. Длину камеры смешивания не рекомендуется выбирать более 0,030–0,035 м, поскольку при этом мощность на гомогенизацию изменяется незначительно (в 1,16 раза), а увеличение размеров приводит к росту металлоемкости устройства.

В зависимости от известного из термодинамики соотношения давлений на входе (p_{ni}) и критического (p_n^{kp}) для углекислого газа $\frac{p_n^{kp}}{p_{ni}} = 0,546$, про-

цесс истечения делится на две области:

- малых перепадов давления (дозвуковая):

$$\frac{p_n^{kp}}{p_{ni}} < \frac{p_{ni+1}}{p_{ni}} < 1;$$

- больших перепадов давления (сверхзвуковая):

$$0 < \frac{p_{ni+1}}{p_{ni}} < 1,$$

где p_{ni+1} – давление на срезе сопла, Па.

Повысить эффект гидродинамического воздействия на поток смеси можно за счет акустического эффекта кавитации или так называемого прыжка перемешивания [7-8], формируемого при переходе сверхзвукового течения в дозвуковое за счет изотропного скачка давления [9].

Как показали расчеты, сверхзвуковой скорости легко достичь при однородном течении, когда эжектирующим потоком служит жидкость. Пузырьки газа должны быть равномерно распределены в потоке, чего можно достичь путем применения многосоплового устройства, формирующего одновременно несколько струй. При этом на срезе сопла формируется сверхзвуковой многоструйный двухкомпонентный поток «жидкость–газ», который далее трансформируется в дозвуковой, сопровождаемый прыжком перемешивания компонентов в камере смешивания в результате возникающего противодействия. Такой характер протекания процесса обеспечивает малый объемный расход эжектируемого потока (газа).

Следует отметить, что при сатурировании (газировании) жидкости углекислым газом предварительно проводят ее деаэрацию для улучшения его растворения. Этот процесс осуществляют при резком понижении давления, в результате чего образуются кавитационные пузырьки из содержащегося в жидкости насыщенного пара других газов (кислорода, водорода, азота и их соединений).

Процесс взаимодействия углекислого газа с биодизелем в гидродинамическом смесителе основан на кавитационной обработке среды (топлива) с целью улучшения физико-химических свойств. Установлено, что в кавитационный пузырек могут проникать пары биодизеля, растворенный газ, но не

попадают молекулы нелетучих веществ (осадок). Энергии, выделяющейся в процессе схлопывания пузырька, достаточно для ионизации и диссоциации молекул не только жидкости, но и газа, который активно участвует в массопереносе [9].

При схлопывании кавитационного пузырька в раствор переходят радикалы малой энергии, образовавшейся при взаимодействии углекислого газа с биодизелем. Кавитационное воздействие углекислого газа на биодизель сводится к процессу расщепления веществ, находящихся в растворе в пузырьках. Результатом такого воздействия становится структуризация молекул раствора биодизеля, что сказывается на изменении физико-химических свойств среды (рН, электропроводность и др.).

При кавитации вследствие звуковых колебаний среды интенсифицируются процессы смешивания и гомогенизации в ходе изменения физико-химических свойств [10].

Проведенные исследования показали, что целесообразно принять давление газа на срезе сопла p_{ni+1} равным критическому давлению p_n^{kp} :

$$p_{ni+1} = p_n^{kp}; \quad (6)$$

$$v = \sqrt{4,432 \cdot 10^{-3} \cdot p_{ni} \cdot \left(1 - \left(\frac{p_{ni+1}}{p_{ni}}\right)^{0,2}\right)} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}. \quad (7)$$

При соблюдении условия (7) поток до сопла (рис. 3) состоит из двух компонентов, а на срезе сопла газ приобретает свойства жидкости, растворяясь в био-

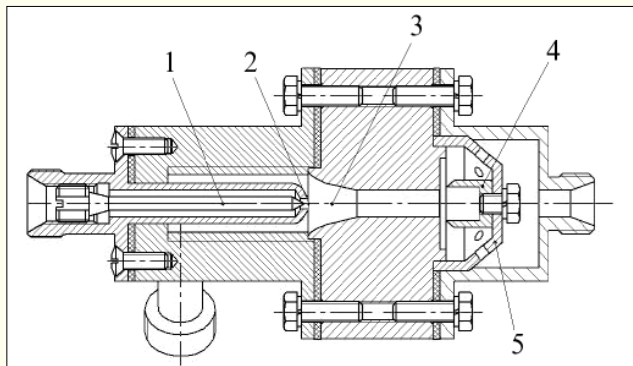


Рис. 3. Схема гидродинамического смесителя: 1 – игла; 2 – сопло; 3 – камера смешивания; 4 – отражатель; 5 – приемник

топливе и конденсируя в нем избыток паров, смесь становится квазиоднофазной. Поэтому результаты расчета параметров камеры смешивания по жидкой фазе соответствуют реальному процессу.

Выводы. При производстве биодизельного топлива из масла яatroфы повышенной кислотности для промывки полученного продукта углекислым газом целесообразно использовать гидродинамический смеситель, работающий в среде «жидкость – газ» и обеспечивающий кавитационный эффект.

Для эффективной работы гидродинамического смесителя в среде «жидкость – газ» получены зависимости, позволяющие рассчитать его рациональные параметры и режимы функционирования при производстве биодизельного топлива из растительных масел повышенной кислотности.

Литература

1. Басков В.Н., Колос В.А., Сапьян Ю.Н. Биотопливо из растительного сырья: производство, потребление, энергоэффективность // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. – 2010. – № 6. – С. 13-18.

2. Сапьян Ю.Н., Воробьев М.А., Колос В.А. Система допуска к производству и применению биологических видов топлива // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. – 2010. – № 3. – С. 22-28.

3. Громаков А.В. Повышение эффективности функционирования машинно-тракторных агрегатов за счет применения биотоплива: Автореф. дис.... канд. техн. наук. – *Зерноград*, 2012. – 20 с.

4. Громаков А.В., Пархоменко Г.Г., Громакова Л.В. Определение оптимального состава смеси топлива по режимам функционирования машинно-тракторных агрегатов // *Хранение и переработка зерна*. – 2014. – № 7 (184). – С. 56-57.

5. Громаков А.В., Филатов С.К., Пархоменко Г.Г. Повышение эффективности функционирования машинно-тракторных агрегатов за счет применения биотоплива // *Технология колесных и*

гусеничных машин. – 2014. – №6(16). – С. 16-22.

6. Ибятков Р.И., Муртазин Т.Ш. Метод расчета динамики дисперсных частиц в цилиндрико-коническом гидроциклоне // *Вестник Казанского ГАУ*. – 2010. – № 3 (17). – С. 89-92.

7. Воронков С.С. О модуле упругости вязкого теплопроводного газа // *Техническая акустика: [электронный журнал]*. – 2010. – № 4. URL: <http://www.ejta.org>.

8. Спиридонов Е.К., Пантюхин А.А. Экспериментальные исследования рабочего процесса кавитационного смесителя // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение»*. – 2007. – Вып. 10. – № 25. – С. 89-97.

9. Хафизов И.Ф., Мухин И.А., Доронин Д.Б. Иммитационное моделирование смесителя с целью изучения волновых процессов // *Нефтегазовое дело: [электронный научный журнал]*. – 2012. – № 4. – С. 457–465. URL: <http://www.ogbus.ru>.

10. Кошкин В.К., Михайлова Т.В. Термодинамическая теория истечения газов и паров, процесс дросселирования – М.: МАИ, 1983 – 53 с.

References

1. Baskov V.N., Kolos V.A., Sap'yan Yu.N. *Biotoplivo iz rastitel'nogo syr'ya: proizvodstvo, potreblenie, energoeffektivnost'* [Biofuel from vegetable raw materials: production, consumption, energy efficiency]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2010. No. 6. pp. 13-18 (Russian).
2. Sap'yan Yu.N., Vorob'ev M.A., Kolos V.A. *Sistema dopuska k proizvodstvu i primeneniyu biologicheskikh vidov topliva* [System of the admission to production and application of species of fuel]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2010. No. 3. pp. 22-28 (Russian).
3. Gromakov A.V. *Povyshenie effektivnosti funktsionirovaniya mashinno-traktornykh agregatov za schet primeneniya biotopliva* [Improving the efficiency of functioning of machine and tractor units through the biofuels use]. *Avtoref. dis.... kand. tekhn. nauk.*, Zernograd, 2012, 20 pp. (Russian).
4. Gromakov A.V., Parkhomenko G.G., Gromakova L.V. *Opreделение optimal'nogo sostava smesevogo topliva po rezhimam funktsionirovaniya mashinno-traktornykh agregatov* [Determination of the optimal composition of composite propellant on the modes of functioning the machine and tractor aggregates], *Khraneniye i pererabotka zerna*, 2014, No 7(184), pp. 56 – 57 (Russian).
5. Gromakov A.V., Filatov S.K., Parkhomenko G.G. *Povyshenie effektivnosti funktsionirovaniya mashinno-traktornykh agregatov za schet primeneniya biotopliva* [Improving the efficiency functioning of machine and tractor units through the biofuels use],

Tekhnologiya kolesnykh i gusenichnykh mashin. 2014, No. 6(16), pp. 16-22 (Russian).

6. Ibyatov R.I., Murtazin T.Sh. *Metod rascheta dinamiki dispersnykh chastits v tsilindro-konicheskom gidrotsiklone* [Method of calculating the dynamics of dispersed particles in cylindrical-hydrocyclone], *Vestnik Kazanskogo GAU*. 2010, No. 3 (17), pp.89-92 (Russian).
7. Voronkov S.S. *O module uprugosti vyazkogo teploprovodnogo gaza* [On the modulus of elasticity of a viscous heat-conducting gas], *Tekhnicheskaya akustika: elektronnyy zhurnal*, 2010, No. 4. Retrieved April 11, 2015 from <http://www.ejta.org/ru/voronkov3> (Russian).
8. Spiridonov E.K., Pantyukhin A.A. *Eksperimental'nye issledovaniya rabochego protsessa kavitatsionnogo smesitelya* [Experimental studies of cavitation mixer operation], *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Mashinostroenie»*, 2007, V. 10, No. 25, pp. 89-97 (Russian).
9. Khafizov I.F., Mukhin I.A., Doronin D.B. *Imitatsionnoye modelirovaniye smesitelya s tsel'yu izucheniya volnovykh protsessov* [Simulation of mixer for study of wave processes], *Oil and Gas Business: The electronic scientific journal*, 2012, No. 4, pp. 457-465. Retrieved April 11, 2015 from <http://ogbus.com/article/imitacionnoe-modelirovanie-smesitelya-s-celyu-izucheniya-volnovyx-protsessov/> (Russian).
10. Koshkin V.K., Mikhaylova T.V. *Termodinamicheskaya teoriya istecheniya gazov i parov, protsess drosselirovaniya* [The thermodynamic theory of the gases and vapors expiration, throttling process], M.: MAI, 1983, 53 pp. (Russian).

HYDRODYNAMIC MIXER OPERATION BY BIODIESEL PRODUCTION FROM JATROPHA OIL

Hoang Nghia Dat, Don State Technical University, Rostov-on-Don; **G.G.Parkhomenko**, Cand.Sc.(Eng.); **V.I.Pakhomov**, D.Sc.(Eng.); **V.B.Rykov**, D.Sc.(Eng.); **S.I.Byr'ko**, **I.V.Bozhko**, North Caucasian Research Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture, e-mail: vnptim07@mail.ru, Zernograd, Russian Federation

A process of functioning of the hydrodynamic mixer which mixes streams of biodiesel fuel from *Jatropha* oil of the increased acidity with carbon dioxide for its washing was considered. The regularities revealing interrelation of parameters (diameter and length of the mixing camera), the modes (pressure and stream speed) with properties of the environment (dynamic viscosity, density, elasticity) and power indicators of process (intermixing capacity) was obtained. On the basis of a method of similarity and dimensions of physical quantities criterion of stream turbulence was received, modes were determinate, diameter of the mixing camera (30-35 mm) was recommended. Stream pressure decrease and intermixing capacity at increase in pipeline diameter were established. When diameter is more than 30 mm, so pressure intensity modification is the smallest and dependence become like linear function. The intermixing capacity increases most intensively (by 1.5 times) with reduction of mixing camera length from 15 to 10 mm and it ceases to decrease at 30-35 mm. When pressure on a cut of a nozzle corresponds critical, carbon dioxide in the mixing camera gets liquid properties, dissolving in biofuel, and mix becomes quasihomogeneous. The revealed criterion of stream change modes from supersonic in the subsonic allowed to define a condition of quasiuniformity of mix. It was proved that the supersonic stream formed thus «liquid-gas» is transformed in subsonic, accompanied at acoustic effect of cavitation with a intermixing due to isentropic jump in pressure. There were proved physical and chemical data of process of cavitation impact of carbon dioxide on biodiesel fuel as a result of which properties of the environment improve owing to structurization of molecules of solution that positively influences mixing. A design of the hydrodynamic mixer was recommend.

Keywords: Biofuel; *Jatropha*; Cavitation; Hydrodynamic mixer parameters.