

УДК 621.181.27.001.5

В.С. КОРНИЕНКО*Херсонский филиал Национального университета кораблестроения
им. адмирала Макарова, Украина*

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ РОТАЦИОННЫХ ФОРСУНОК МАЛОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Представлены результаты исследований дисперсных характеристик ротационных форсунок при малых расходах мазута и водомазутной эмульсии. Представлены кривые влияния на величину среднего диаметра капель распыленного топлива частоты вращения и диаметра распыливающего конуса. Рассмотрено влияние напора воздуха на величину корневого угла факела, распределение топлива по радиусу и оси топочной камеры, изменение удельных потоков по оси и радиусу факела, коэффициент неравномерности распределения распыленной жидкости. Получено критериальное уравнение для определения среднего диаметра капель при распыливании водомазутных эмульсий ротационными форсунками.

Ключевые слова: ротационная форсунка, дисперсные характеристики, дожигание топлива, водомазутная эмульсия.

Анализ проблемы и постановка цели исследований

При использовании современных главных двигателей (ГД) мощностью ниже 15 МВт энергии, полученной при утилизации выхлопных газов, может оказаться недостаточно для выработки пара в УК даже двух давлений для обеспечения работы утилизационного турбогенератора (УТГ) и паровых потребителей судна при таких значениях мощности ГД. Это связано со снижением температуры выхлопных газов ДВС. Поэтому необходимо искать пути использования утилизации теплоты не только выхлопных газов, но и наддувочного воздуха, чтобы получить минимальный расход топлива в ходовом режиме. И если этой теплоты недостаточно, то (как показывают расчеты) остается только путем дожигания топлива в потоке выхлопных газов перед УК незначительно увеличить теплоту с выхлопными газами, чтобы достичь необходимого уровня работы УТГ.

При дожигании дополнительного топлива возрастает температура выхлопных газов на входе в УК, что позволит повысить температуру и давление генерируемого в УК перегретого пара, а также его расход с целью увеличения мощности утилизационной паротурбинной установки до уровня, при котором исключается работа дизель-генераторов в ходовом режиме и обеспечиваются потребители пара. При дожигании топлива в потоке выхлопных газов необходимо обратить внимание на организацию процесса горения этого топлива и как показывают проведенные исследо-

вания лучше сжигать водомазутные эмульсии (ВМЭ) определенного состава.

Накоплен и подробно описан достаточно большой опыт практического использования эмульгированных топлив. Жидкие эмульгированные топлива сгорают быстрее, чем безводные. Вода не ухудшает, а улучшает процессы горения по причине дополнительного дробления капель топлива вследствие микровзрывов, увеличения поверхности горения частиц и хорошего перемешивания горючего с воздухом. Процессы смесеобразования, воспламенения и горения обводненного эмульгированного топлива протекают более интенсивно, чем безводного, и поэтому обеспечиваются лучшие показатели сгорания как по времени, так и по полноте, что важно при дожигании небольших количеств топлива. При малых расходах топлива эффективное распыливание возможно только при применении пневматических, паровых, ротационных форсунок. В котлах малой производительности предпочтение отдают ротационным форсункам. Поэтому при необходимости сжигать небольшие количества топлива **актуальным** решением может оказаться применение ротационных форсунок.

Экспериментальных данных по работе ротационных форсунок мало, что не позволяет обработать их по критериальному уравнению и тем более для определения среднего размера капель [1].

В [2] представлены результаты экспериментальных исследований распыления китайского мазута марки 200 с присадками воды горелкой фирмы «Saacke» с ротационной форсункой. При увеличении содержания воды в ВМЭ до 25 % наблюдается

уменьшается концентрации твердых остатков сгорания топлива, оксида углерода и углеводородов, что свидетельствует об эффективности сжигания ВМЭ. Но в [2] не представлены данные о работе ротационных форсунок.

Согласно литературным данным диаметр капель, полученных при распыливании топлив оказывают влияние и на эмиссию NO_x , твердых частиц.

В [3] опубликованы данные экспериментальных исследований Маршалла по диаметрам капель при больших расходах жидкости, распыляемой вращающимся диском.

В [4] приведена критериальная зависимость для определения относительного среднемассового диаметра капель при распылении жидкости ротационными форсунками с расходом на уровне 400...1100 кг/ч.

В рассмотренных литературных источниках отсутствуют данные о дисперсных характеристиках распыливания ВМЭ.

В [1] средний размер капель d_k при работе ротационных форсунок зависит от таких значений:

$$We = \frac{v_2^2 \rho_2 \delta}{\sigma} - \text{критерия Вебера, представляющего}$$

соотношение скоростного напора к давлению поверхностного натяжения;

$$La = \frac{\rho_1 v_1^2}{\sigma \delta} - \text{критерия Лапласа, определяющего}$$

соотношение сил вязкости и поверхностного натяжения жидкости;

$M = \rho_2 / \rho_1$ – критерия, характеризующего собой инерционные свойства газовой среды и жидкости;

$N = \mu_2 / \mu_1$ – критерия представляющего соотношение сил вязкости газовой среды и распыливаемой жидкости.

В приведенных формулах принято:

d_k – диаметр капли;

δ – толщина пленки жидкости;

σ – коэффициент поверхностного натяжения;

μ_1, μ_2 – коэффициент динамической вязкости жидкости и газовой среды;

ρ_1, ρ_2 – плотность жидкости и газовой среды.

Поток жидкости характеризуется неопределенностью граничных условий на свободной поверхности пленки, что не позволяет получить в явном виде уравнение движения жидкости.

По данным [3] в случае принятия постоянства статического давления в слое пленки и среднерасходной безнапорной скорости ее движения в [4] получена формула для определения толщины пленки примет вид:

$$\delta = \left[\frac{3v_{ж}G}{2\pi n^2 r^2 \sin \varphi} \right]^{1/3},$$

где $v_{ж}$ – коэффициент кинематической вязкости жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$;

G – расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$;

n – частота вращения конуса, с^{-1} ;

r – внутренний радиус на выходе из конуса, м ;

φ – осевой угол скоса выходной кромки конуса.

Толщина пленки, подвергающейся распаду в окружающей среде, определяется зависимостью [4]:

$$\delta = \frac{G^{2/3}}{(4\pi n)^{2/3} v} = \frac{0,43G^{2/3}}{n^{1/3} v}.$$

Распад пленки жидкости на капли при выходе из распыливающего конуса происходит в результате взаимодействия пленки с первичным распыляющим воздухом, который движется относительно пленки со скоростью около 100 м/с через узкую щель, образованную внутренней поверхностью канала диаметром d_b и наружной поверхностью распыливающего конуса диаметром d_n .

В [4] представлено также критериальное уравнение для определения относительного среднемассового диаметра капель в виде:

$$\frac{d_k}{\delta} = 5,45 We^{-0,5} P_1^{0,25} P_2^{0,2} La^{0,2},$$

где $P_1 = Y / \delta$ – относительный поперечный размер участка интенсивного взаимодействия струи потока воздуха и пленки;

$P_2 = X / \delta$ – относительный продольный размер участка интенсивного взаимодействия струи потока воздуха и пленки, определение которого сложно и требует дополнительных сведений.

Цель работы – исследование дисперсных характеристик ротационных форсунок при малых расходах мазута и ВМЭ; получение критериального уравнения для определения среднего диаметра капель при распыливании ВМЭ.

Результаты исследования

Ротационные форсунки менее чувствительны к вязкости мазута, поскольку топливо перед распыливанием, омывая внутреннюю поверхность распыливающего конуса, подвергается воздействию высокой температуры, в результате чего вязкость мазута быстро снижается, т.к. температура поверхности конуса достигает до 200 °С.

Высокая частота вращения конуса позволяет очень мелко раздробить топливо, что позволяет лучше организовать смесеобразование и обеспечить

полное выгорание топлива при очень низких избытках воздуха.

Следует обратить внимание также на характерную особенность ротационных распылителей, для которых уменьшение нагрузки по количеству распыляемой жидкости приводит к уменьшению толщины пленки, срывающейся с кромки распыляющего конуса, и диаметра капель. При этом важно, чтобы с кромки конуса срывалась именно пленка топлива, которая затем дробится при встрече с потоком воздуха. Если пленка топлива, растекающаяся под действием центробежных сил, начинает дробиться еще на внутренней поверхности конуса, то с кромки начнут срываться крупные капли.

Исследования дисперсных характеристик ротационных форсунок были проведены на специальных стендах.

При использовании топлив и ВМЭ осуществлялся их подогрев до 90 °С.

Распыливание воды проводилось в холодном состоянии.

На специальных стендах исследовалось влияние на величину среднего диаметра капель распыляемого топлива частоты вращения и диаметра распыляющего конуса.

Исследовалось также влияние напора воздуха на величину корневого угла факела, на распределение топлива по радиусу и оси топочной камеры, на изменение удельных потоков (в виде их относительных величин) по оси и радиусу факела, на коэффициент неравномерности распределения распыленной жидкости и др.

Для определения диаметра капель распыленной жидкости применялся метод улавливания капель на предметные стекла, покрытые слоем вязкой жидкости, в которой капли распыленной жидкости не растворяются. В данном случае в качестве такой жидкости применено компрессорное масло. При ударе капли жидкости о поверхность пластинки получается отпечаток [3], по размерам которого определялся диаметр капель. В качестве распыляемых жидкостей применялись мазут и ВМЭ, содержащая 30 % воды и 70 % мазута, и для сравнения вода.

На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости диаметра капель распыленной жидкости по сечению факела при разных расходах жидкости и постоянной частоте вращения. При расходе воды около 1 кг/ч средний диаметр капель находился в пределах 20...25 мкм.

При таком же расходе мазута диаметр капель увеличивается до 35 мкм, что объясняется его более высокой вязкостью. Значения диаметров капель ВМЭ занимают промежуточное значение (около

30 мкм), что может быть объяснено влиянием включений воды, находящейся в мазуте, на разрушение пленки эмульсии после кромки распыляющего конуса. С увеличением расхода воды диаметр капель распыляемой воды увеличивается до 35 мкм (при расходе 3 кг/ч) и до 50 мкм (при расходе 7 кг/ч). Кроме того, наблюдается укрупнение капель от центра на периферию факела.

На диаметр капель большое влияние оказывает частота вращения распылителя. Как показывают исследования (рис. 2), при частоте вращения более $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$ наблюдается стабилизация качества распыла всех видов жидкости (диаметр капель находится в пределах 20...30 мкм). С уменьшением частоты вращения размеры капель распыленной жидкости резко увеличиваются, причем более крутой вид зависимости роста диаметра капель наблюдается для воды. Диаметр капель ВМЭ меняется по более пологой зависимости.

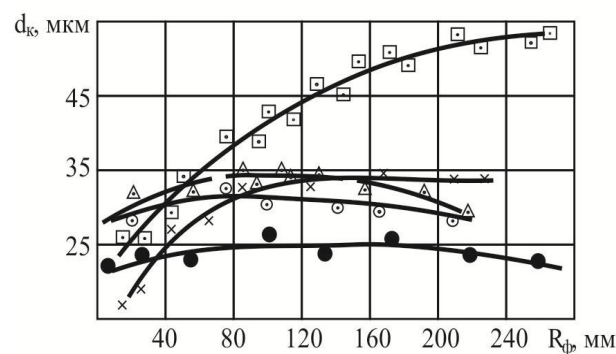


Рис. 1. Распределение капель (по величине диаметра) по сечению факела (диаметр распылителя $d_p = 25 \text{ мм}$; частота вращения $n = 6200 \text{ мин}^{-1}$)

- - расход воды 1,2 кг/ч;
- × - расход воды 3,0 кг/ч;
- - расход воды 7,0 кг/ч;
- ⊙ - расход эмульсии 1,0 кг/ч;
- △ - расход мазута 1,0 кг/ч

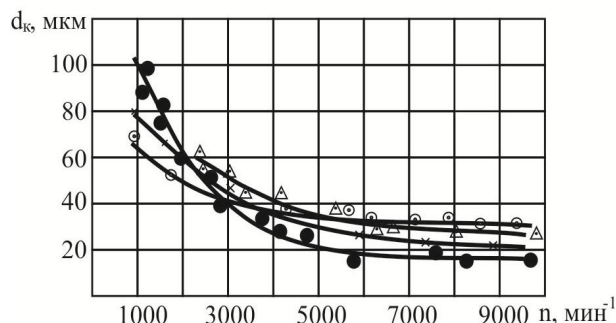


Рис. 2. Зависимость диаметра капель от частоты вращения распылителя (напор воздуха $h = 250 \text{ мм в. ст.}$, диаметр распылителя $d_p = 25 \text{ мм}$) (обозначения на рис. 1)

Опытным путем определялась также зависимость корневого угла факела от напора (рис. 3) воздуха и от частоты вращения распылителя. Корневой угол факела распыленной жидкости в большой степени определяется напором воздуха.

При увеличении напора воздуха корневого угла факела уменьшается. Увеличение частоты вращения распылителя также способствует уменьшению корневого угла факела, но в значительно меньшей степени.

Получены суммарные кривые относительно распределение потока распыленной жидкости по радиусу факела при разных диаметрах распылителя.

Определены поля удельных потоков распыленной жидкости.

Полученные кривые имеют ярко выраженный максимум, совпадающий с осью факела распыленной жидкости. Причем, форсунка с небольшим диаметром распылителя ($d_p = 25$ мм) при расходе 1,2 кг/ч имеет более равномерное поле удельных потоков распыленной жидкости. С удалением от выходной кромки распылителя поле удельных потоков выравнивается.

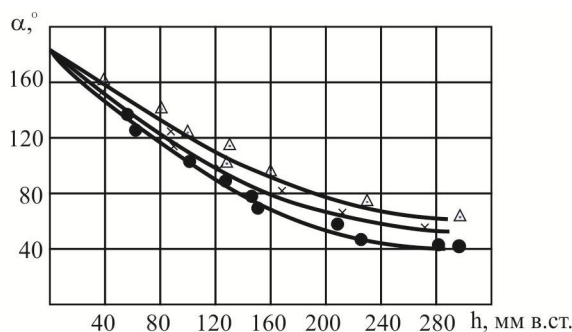


Рис. 3. Зависимость величины корневого угла факела от напора воздуха (частота вращения распылителя $n = 5500$ мин⁻¹, расход 4 кг/ч) при разных диаметрах распылителя:
 ● - $d_p = 25$ мм; × - $d_p = 26$ мм;
 △ - $d_p = 28$ мм

Обработка полученных экспериментальных данных позволила получить критериальное уравнение для определения среднего диаметра капель ВМЭ в виде:

$$d_k = 5,8We^{-0,5}La^{0,2}\delta.$$

Экспериментальная проверка полученной критериальной зависимости показала, что предлагаемая зависимость рекомендуется при значениях We и La в пределах:

$$0,125 < We < 1,2;$$

$$107 < La < 920.$$

Сопоставление значений среднего диаметра капель, рассчитанных по предлагаемой зависимости с экспериментальными данными приведено на рис. 5.

Представленные зависимости показывают полное совпадение расчетных данных с экспериментальными при частотах вращения выше 5000 мин⁻¹ и небольшое расхождение в диапазоне от 2000 до 5000 мин⁻¹.

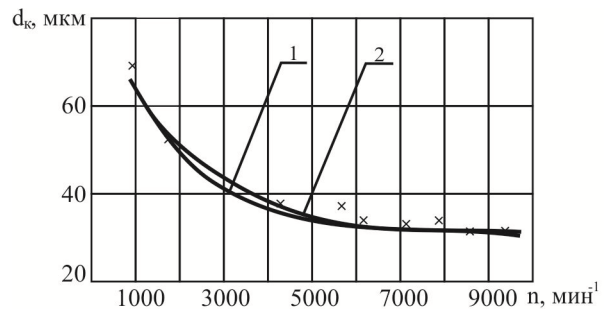


Рис. 4. Зависимость диаметра капель ВМЭ от частоты вращения распылителя (напор воздуха $h = 250$ мм в. ст., диаметр распылителя $d_p = 25$ мм):
 1 - расход эмульсии 1 кг/ч (экспериментальные данные);
 2 - расход 1 кг/ч (по расчетной формуле)

Выводы

1. Проведенные исследования показали, что при распыливании водомазутных эмульсий ротационными форсунками диаметр капель меньше, чем при распыливании мазута.
2. Получена критериальная зависимость для определения среднего диаметра капель при распыливании водомазутных эмульсий.

Литература

1. Геллер, З.И. Мазут как топливо [Текст] / З.И. Геллер. – М.: Недра, 1965. – 280 с.
2. Лоцицкий, Н.Г. Использование горелок с ротационной форсункой для сжигания мазута с присадкой воды [Текст] / Н.Г. Лоцицкий, В.Р. Котлер // Промышленная энергетика. – 2002. – №3. – С. 37-40.
3. Распыливание жидкостей [Текст] / В.А. Бородин, Ю.Ф. Дитякин, Л.А. Клячко, В.И. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1967. – 263 с.
4. Суменков, В.М. Модель распыливания жидкости ротационными форсунками [Текст] / В.М. Суменков, Л.И. Сень, О.В. Блинные // Судостроение. – 2008. – № 6. – С. 53-55.

Поступила в редакцию 21.05.2013, рассмотрена на редколлегии 13.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заместитель директора по научной работе А.В. Щедролюсов, Херсонский филиал Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Херсон.

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ РОТАЦІЙНИХ ФОРСУНОК МАЛОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ

В.С. Корнієнко

Представлені результати дослідження дисперсних характеристик ротаційних форсунок при малих витратах мазуту і водомазутної емульсії. Представлені криві впливу на величину середнього діаметру крапель розпиленого палива частоти обертання і діаметру розпилюючого конуса. Розглянуті вплив натиску повітря на величину кореневого кута факела, розподіл крапель палива по радіусу і осі паливної камери, а також зміна питомих потоків по осі і радіусу факела, коефіцієнт нерівномірності розподілу розпиленої рідини. Отримано критеріальне рівняння для визначення середнього діаметру крапель при розпилюванні водомазутних емульсій.

Ключові слова: ротаційна форсунка, дисперсні характеристики, допалювання палива, водомазутна емульсія.

RESEARCH OF SMALL PRODUCTIVITY ROTARY INJECTORS WORK

V.S. Kornienko

Researching results of dispersible rotational injectors performances at small fuel flows and water-fuel emulsion are presented. Curves influence revolutions per minute and diameter of spraying taper on average diameter size of drops of the sprayed fuel are presented. Agency of air pressure on magnitude of rooted angle of torch, fuel distribution on radius and cavity furnace axis, change of specific flows on an axis and torch radius, variation factor of distribution of the sprayed fluid are observed. The criteria equation for definition of average diameter of drops at blast injection of water fuel emulsions is gained.

Key words: rotational injector, dispersible performances, afterburning, water-fuel emulsion.

Корнієнко Вікторія Сергеевна – аспірант Херсонського філіала Національного університета кораблестроєння ім. адм. Макарова, Херсон, Україна, e-mail: Viki-4127@yandex.ru.