

А. В. Клинов, С. К. Ким, И. В. Парамошин, М. П. Рябоконт,
А. В. Поляков, М. А. Малыгина, А. Н. Цой, Л. А. Цой

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПЫЛА ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ФОРСУНКИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ФГЖ-1

Ключевые слова: пневматическая форсунка высокого давления, факел распыла.

Разработана конструкция пневматической форсунки высокого давления ФГЖ-1. Создан экспериментальный стенд и проведены гидравлические испытания разработанной форсунки. Проанализировано влияние конструкции форсунки на качество факела и дисперсность распыла.

Key words: high-pressure air nozzle, spray pattern.

The design of the high pressure air nozzle FGZH-1. Created an experimental stand and hydraulic tests conducted designed nozzle. The influence of the nozzle design, the quality of the spray plume and dispersion.

Введение

Процессы распыливания жидкостей широко используются в энергетике при сжигании жидких топлив, в том числе и высоковязких - мазута [1], в других отраслях промышленности распыливание жидкостей широко используется как средство развития поверхности контакта в тепломассообменных аппаратах [2]. Характеристики двухфазного газожидкостного потока, сформировавшегося на выходе из распыливающего устройства, в значительной мере определяют эффективность протекающих в аппарате процессов. В рамках проводимых в ФГБОУ ВПО «КНИТУ» исследований по проекту «Разработка технологического комплекса глубокой переработки нефти и нефтепродуктов на основе технологии радиационно-волнового крекинга» для диспергирования нефти была разработана форсунка ФГЖ-1, конструкция которой представлена на рисунке 1.

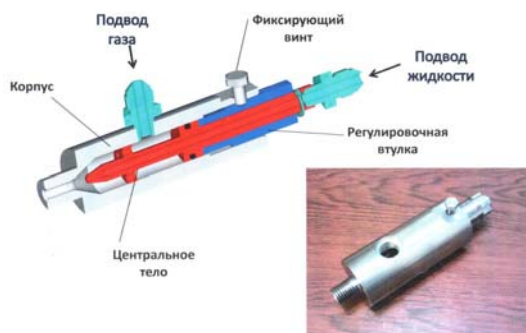


Рис. 1 - Форсунка ФГЖ-1

В соответствии с классификацией [3], данная форсунка относится к пневматическим форсункам, в которых процесс распыливания обусловлен взаимодействием распыливаемой жидкости с распыливающим газом, а также образовавшейся смеси с окружающей средой. Решающую роль играют перепады давления на форсунке распыливаемой жидкости и распыливающего газа. Их соотношением определяются характер указанных взаимодействий и конструктивное решение форсунки.

Данная форсунка относится к форсункам высокого давления, что позволяет добиваться высоких относительных скоростей потоков и низких удельных

расходов газа. По месту контакта распыливаемой жидкости и распыливающего газа форсунка относится к форсункам внутреннего смешения, в которых потоки взаимодействуют перед истечением из форсунки. Из сопла вытекает газожидкостная смесь, и образовавшиеся при внутреннем смешении первичные крупные капли в результате взаимодействия с окружающей средой распадаются на более мелкие.

При создании данной форсунки закладывались следующие параметры: расход жидкой фазы $G_{ж} = 50$ г/с; соотношение расхода газа к расходу жидкости $G_{г} / G_{ж} \leq 0,5$; средний диаметр капель ≤ 50 мкм.

Экспериментальная часть

Для оценки эффективности распыла жидкости форсункой ФГЖ-1 был создан лабораторный стенд (рис. 2), на котором исследовались свойства данной форсунки с использованием в качестве жидкости - воды, а в качестве распыляющего газа - сжатого воздуха.

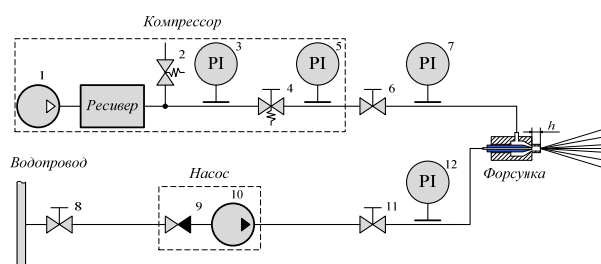


Рис. 2 - Испытательный стенд, в составе: 1 – нагнетатель воздуха; 2 – предохранительный клапан; 3, 5 – манометры; 4 – редуктор; 6, 8, 11 – вентили; 7, 12 – манометр; 9 – обратный клапан; 10 – насос; h – расстояние от среза форсунки до регулировочного конуса, мм

Эксперимент проводился при разных положениях регулировочного конуса форсунки, влияющего на качество распыла. При $h=13$ мм, площадь сечения проходного отверстия $S_{щ}$ форсунки равна нулю, то есть воздушный канал закрыт. Исследования проводились в диапазоне от $14 \div 20$ мм при разных давлениях распыливающего газа.

Исследования проводились по следующей методике:

- форсунка установлена горизонтально;
- факел распыла направлен в сторону открытого пространства;
- подача жидкости осуществлялась с регулируемой производительностью не менее 50 г/с;
- подача сжатого газа (воздуха) осуществлялась с регулируемой производительностью, достаточной для распыла жидкости с расходом до 50 г/с;
- изменение производительности форсунки осуществлялось: по жидкости – изменением давления жидкости перед форсункой; по газу – изменением пропускной способности форсунки путем перемещения регулировочного конуса.

В ходе эксперимента замерялись следующие параметры:

- давление жидкости перед форсункой;
- давление газа перед форсункой;
- расход жидкости;
- расход газа;
- перемещение регулировочного конуса.

Качественная оценка распыла

Эффективность распыла фиксировалась фотографическим способом и оценивалась путем визуального сравнения факелов распыла при разных режимах работы форсунки.

При сравнении эффективности распыла использовать экспертные оценки по следующим критериям:

- угол распыла;
- величина жидкостного ядра факела;
- дисперсность распыла на периферии факела;
- размеры факела (длина, наибольший диаметр).

Условия проведения эксперимента и результат оценки распыла по экспертной 5-балльной шкале приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты испытания форсунки при различном положении регулировочного конуса

№	h_i , мм	$S_{щ}$, мм ²	P_B , ати	Распыл (баллы)	G_B , г/с	$G_B / G_{ж}$	Примечания
1	14	5,39	10	4	14,36	0,30	$G_{ж} = 48$ г/с $P_{ж} = 2,16$ ати
			9	4-			
			8	1			
2	15	10,03	9	4	31,05	0,63	$G_{ж} = 49$ г/с $P_{ж} = 2,24$ ати
			8	4			
			7	4-			
			6	2			
3	16	14,40	8	4+	36,30	0,77	$G_{ж} = 47$ г/с $P_{ж} = 2,0$ ати
			7	4			
			6	4			
			5	3			
4	17	19,32	6,8	4+	37,98	0,81	$G_{ж} = 47$ г/с $P_{ж} = 2,0$ ати
			6	4			
			5	4			
			4	3			
			3	2			

5	18	23,31	6,4	5	38,40	0,82	$G_{ж} = 47$ г/с $P_{ж} = 2,0$ ати
			6	5-			
			5	5-			
			4	4+			
6	19	26,85	3	3	39,84	0,85	$G_{ж} = 47$ г/с $P_{ж} = 2,0$ ати
			6	5+			
			5	5+			
			4	5			
7	20	30,29	3	5	41,81	0,89	$G_{ж} = 47$ г/с $P_{ж} = 2,0$ ати
			2	4			
			1,6	4-			
			5	5+			
			4	5+			

Из полученных экспериментальных данных следует, что при увеличении площади внутреннего сечения воздушного канала форсунки $S_{щ}$ (определяется положением регулировочного конуса) качество распыла улучшается, т.к. увеличивается расход воздуха.

При этом относительно хороший распыл достигается при соотношении расхода воздуха к расходу жидкости $G_B / G_{ж} > 0.3$, а отличный – при $G_B / G_{ж} > 0.8$.

При снижении давления воздуха P_B перед форсункой распыл ухудшается, причем величина этого давления связана с площадью сечения: при увеличении $S_{щ}$ максимальная величина P_B падает, что свидетельствует о недостаточной производительности компрессорного оборудования.

Количественная оценка качества распыла

Следующим этапом исследования являлось количественная оценка качества распыла. Для нахождения распределения капель по размерам были выбраны следующие условия испытания:

- положение регулировочного конуса форсунки $h_i = 19$ мм;
- площадь проходного сечения воздушного канала $S_{щ} = 26,85$ мм²;
- давление воздуха $P_B = 5,2$ ати;
- расход воздуха $G_B = 39$ г/с;
- давление жидкости $P_{ж} = 2,4$ ати;
- расход жидкости $G_{ж} = 50$ г/с.

Для измерения размеров капель использовался метод отбора проб аэрозолей путем инерционного осаждения частиц в жидкой среде [4]. Измерение выполнялось с помощью специального заборника капель (импактора), в котором улавливаемые капли осаждаются на предметные стекла (рис. 3), покрытые полиметаксилоксановой жидкостью (силиконовым маслом), а затем фотографируются под микроскопом.

Предметное стекло устанавливается внутри импактора при помощи фиксирующего устройства, а затем закрывается шторкой. Импактор вводится в поток, шторка открывается на непродолжительное время (порядка 1 секунды), затем закрывается. Предметное стекло вынимают из импактора и делают снимки капель, взвешенных в масле, сканируя

столбик жидкости по высоте при помощи изменения фокусного расстояния микроскопа.

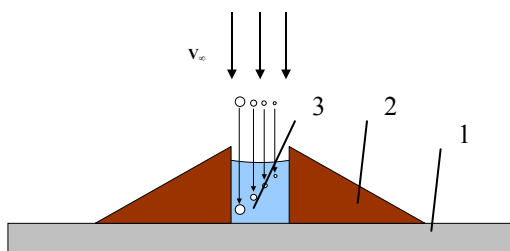


Рис. 3 - Схематическое изображение предметного стекла для улавливания капель: 1 - стекло; 2 - текстолитовый конус; 3 - силиконовое масло

Капли попадают в силиконовое масло, удерживаемое в текстолитовом конусе при помощи сил поверхностного натяжения. Более крупные капли проникают глубже в масло, мелкие капли оказываются ближе к поверхности. Вязкость силиконового масла подбирается для каждой температуры и скорости набегающего потока так, чтобы капли не дробились при ударе о поверхность масла, а свободно проникали в него. Для этого имеется набор масел с известной и различной вязкостью, которые смешиваются в определенных пропорциях для разных параметров потока.

При обработке результатов капли разбиваются на классы. Количество капель и границы каждого класса выбираются, исходя из погрешности измерений и того, что капли больших размеров существенно влияют на медианный диаметр. Количество капель, приходящихся на класс, корректируется с учетом местного коэффициента улавливания для заборника, подсчитанного для среднего диаметра каждого класса.

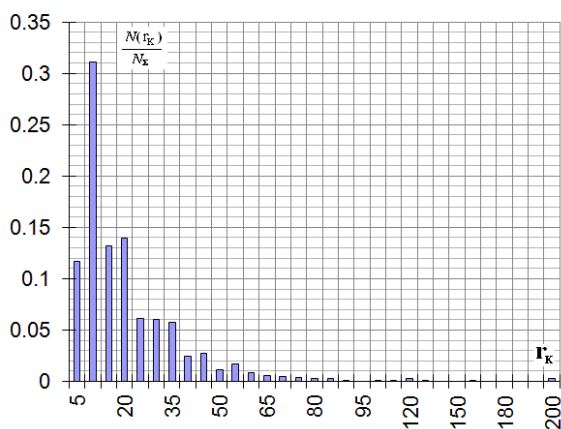


Рис. 4 - Распределение капель по размерам

Несмотря на то, что изменение функции распределения частиц по размерам, вносимое импактором (совсем мелкие частицы огибают импактор вместе с несущим их потоком воздуха, не попадая на предметное стекло) учитывается при помощи коэффициента улавливания, желательно уменьшить его диаметр.

На рисунке 4 показана соответствующая функция распределения капель по размерам, полученная по результатам обработки фотоснимка. Приняты следующие обозначения:

r_k – радиус капли, мкм;

$N(r_k)$ – число капель данного радиуса,

N_{Σ} – общее число капель на снимке.

В таблице 2 приведены некоторые статистические показатели распределения капель по размерам для проведенных испытаний.

Приведенный в таблице заутеровский диаметр капель является важной характеристикой распределения, дающей представление о том, в капли какого размера в основном уходит масса распыливаемой жидкости. Большая величина среднего заутеровского диаметра обусловлена наличием относительно небольшого количества крупных (до 0.4 мм) частиц в спектре распыла.

Таблица 2 - Параметры распределения частиц по размерам, (все размеры даны в мкм)

	Кадр 1	Кадр 2	Кадр 3	Кадр 4	Среднее
Средний диаметр	17,9	19,1	19,5	16,4	18,5
Заутеровский диаметр	161,6	215,1	223,6	225,8	207
Стандартное отклонение	19,8	26,6	27	29	
Интервал	340,1	442,9	460,3	376,5	
Минимум	4,8	3,9	3,9	3,9	
Максимум	344,9	446,8	464,2	380,4	
Сумма	7447,3	15475	10312	7828,3	
Число частиц	415	810	530	475	

Заключение

Предложенная конструкция форсунки показала удовлетворительные результаты, как по качественным, так и по количественным характеристикам распыла.

Результаты качественной оценки показали, что при надлежащей производительности компрессорного оборудования для рассматриваемой форсунки теоретически возможно получить отличное качество распыла при соотношении $G_B / G_{\text{ж}} = 0.5$, если повысить давление перед форсункой.

Исходя из полученных количественных результатов, можно сделать заключение, что разработанная форсунка обеспечивает среднеарифметический распыл 18,5 мкм, а заутеровский диаметр составляет 207 мкм.

Работа выполнена в рамках проекта № 02.G25.31.0083 (далее – проект), осуществляемого при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Расчеты и испытания, описанные в данной статье, являются НИОКТР, выполняемыми Главным исполнителем проекта ФГБОУ ВПО «КНИТУ» совместно с Инициатором проекта ООО «ТЕЛЕКОР-ЭНЕРГЕТИКА» и его партнером по совместной деятельности ООО «ХЭВИ ОЙЛ ТЭК».

Литература

1. Забродин А.Г., Алибеков С.Я., Маряшев А.В., Сальманов Р.С., Филимонов С.С. *Вестник Казанского технологического университета*, 16, 5, 226-230 (2013).
2. Москалев Л.Н., Поникаров С.И., Алексеев В.В., Поникаров И.И. *Вестник Казанского технологического университета*, 15, 18, 189-191 (2012).
3. Справочник по распыливающим, оросительным и каплеулавливающим устройствам / А.Н. Чохонелидзе, В.С. Галустов, Л.П. Холпанов, В.П. Приходько. - М.: Энергоатомиздат, 2002. - 608 с.
4. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. - М.: Мир, 1987.-280 с.

© **А. В. Клинов** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. процессов и аппаратов химической технологии КНИТУ, alklin@kstu.ru; **С. К. Ким** – зав. отделом ФГУП «ЦАГИ» им. Жуковского; **И. В. Парамошин** - ФГУП «ЦАГИ» им. Жуковского; **М. П. Рябонь** – с.н.с. каф. процессов и аппаратов химической технологии КНИТУ; **А. В. Поляков** – вед. инж. той же кафедры, **М. А. Малыгина** – вед. инж. той же кафедры; **А. Н. Цой** – зам. ген. дир. по науке ООО «ХЭВИ ОЙЛ ТЭК»; **Л. А. Цой** – исполнительный дир. ООО «ХЭВИ ОЙЛ ТЭК».