

Прогрессивные конструкции и технологии производства форсунок для струйных мониторов

К.т.н. Вакутин А.П., к.т.н. Малинин А.Г., Смирнов А.Н.

ООО «Специальная строительная техника»,

Малинин Д.А., аспирант ПГТУ

Введение

Технология струйной цементации грунтов находит все большее применение при решении различных задач подземного строительства – укрепление грунтов вокруг тоннелей, устройство вертикальных и горизонтальных противодиффузионных завес при строительстве глубоких котлованов, строительстве фундаментов и т. д.

Одним из наиболее важных узлов технологического оборудования, определяющих эффективность струйной цементации, является форсунка монитора. В настоящей статье обсуждаются различные типы цементных форсунок, приводятся результаты экспериментальных исследований эффективности изделия.

1. Технологии изготовления форсунок

Форсунка является устройством, преобразующим потенциальную энергию высокого давления цементировочного насоса в кинетическую энергию струи цементного раствора. Современные цементировочные насосы развивают давление до 60 МПа при расходе цементного раствора 200-400 л/мин, что позволяет разогнать цементную струю до скорости 210-250 м/с.

Кинетическая энергия струи определяет объем размываемого грунта вокруг скважины и, в конечном итоге, диаметр грунтоцементных свай [1].

Высокое давление и абразивное воздействие, присущие цементной струе, обуславливают материалы и конструкции современных форсунок для однокомпонентной технологии Jet1 и двухкомпонентной технологии Jet2. Форсунка выполняется из двух деталей - наружная деталь, называемая корпусом, выполняется из конструкционной стали, а внутренняя деталь, называемая втулкой, выполняется из износостойкого материала на основе карбидов вольфрама, кремния или бора (рис.1).

Корпус служит для закрепления форсунки в мониторе и является опорным элементом для втулки. Сопло форсунки оформляет диаметр выходящей цементной струи.

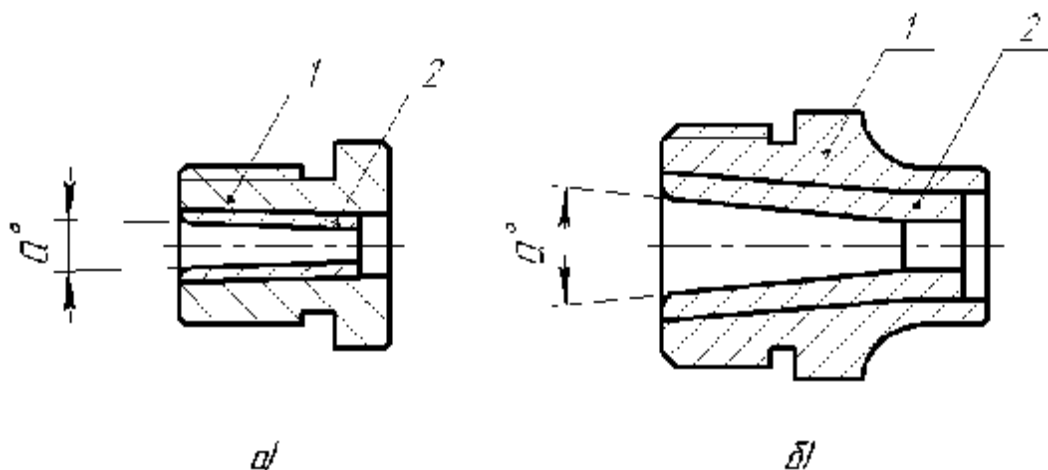


Рисунок 1. Форсунка в сборе

а – форсунка для технологии Jet1; б – форсунка для технологии Jet2.

1 – корпус; 2 – втулка из твердого сплава.

В качестве материала втулки обычно применяют твердый сплав на основе карбида вольфрама, получаемый по технологии порошковой металлургии. Данный сплав, имея высокую твердость 87-92 HRA, обладает высоким сопротивлением механическому сжатию и высокой износостойкостью.

В качестве связующего материала используют кобальт. Карбид вольфрама при высоких температурах активно растворяется в кобальте, образуя эвтектику, которая смачивает частицы карбида вольфрама, вызывает их перемещение, что способствует созданию компактного материала из порошковой заготовки. Варьируя объемную долю связующего металла в пределах 6÷10%, можно получить оптимальное сочетание необходимой твердости и прочности сплава.

Температура спекания порошковых композиций на основе карбида вольфрама составляет 1380°C, что намного меньше температуры спекания твердых сплавов других марок. Например, температура спекания для сплава на основе карбид титана составляет 1500°C, а на основе карбида кремния и карбида бора - 2000-2500°C. Повышение температуры спекания требует больших затрат электроэнергии и, главное, более дорогостоящего технологического оборудования.

Корпус форсунки в штатном варианте изготавливают из калиброванного шестигранного профиля - для форсунки Jet1 с размером под ключ 17 мм, а для форсунки Jet2 – под ключ 22 мм.

Использование шестигранного профиля экономит ресурсы по механической обработке, однако в этой технологии имеется ряд трудно

решаемых проблем. Одна из них – подгонка втулки к корпусу по конической поверхности. Данная операция не поддается автоматизации, выполняется вручную и требует больших временных затрат.

Следующая проблема связана с закреплением втулки в корпусе. Наиболее просто втулку закрепить в корпусе можно с помощью эпоксидного клея. Однако в процессе работы форсунка разогревается, эпоксидный клей размягчается, что значительно снижает живучесть форсунки.

Более надежным вариантом закрепления втулки является пайка. Проведение пайки требует специального оборудования и материалов в виде припоя, что приводит к существенному удорожанию изделия.

Вторым недостатком использования шестигранного профиля является ненадежность уплотнения места посадки форсунки в мониторе. Часто уплотнительная медная шайба не перекрывает шестигранное основание форсунки, оставляя щель для прохода цементного раствора и последующего моментального «промыва» корпуса дорогостоящего струйного монитора.

В современных конструкциях форсунок эта проблема решена созданием на корпусе форсунки дополнительного кругового бурта. Бурт располагается под шестигранником и надежно перекрывает уплотнительную шайбу. Однако в этом случае корпус форсунки приходится изготавливать из цилиндрической заготовки с дополнительным фрезерованием шестигранного участка под ключ, что в несколько раз повышает стоимость изделия.

Для решения всех вышеперечисленных проблем технологи предприятия «Специальная строительная техника» впервые в мировой практике предложили изготавливать методом порошковой металлургии не только внутреннюю твердосплавную втулку, но и корпус форсунки.

Порошковая технология позволяет одновременно выполнить круговой бурт и участок под ключ в форме шестигранника. Кроме того, технология позволяет сразу сформировать в корпусе коническое отверстие под посадку втулки и тем самым исключить ручную операцию развертки.

Третьим важным преимуществом предложенной технологии является возможность совмещения операции пайки втулки в корпусе одновременно с операцией спекания порошкового корпуса.

Вид форсунки в сборе перед спеканием в высокотемпературной печи (а) и вид готовой форсунки после механической обработки (б) представлены на рис.2. Внешний вид стандартной форсунки (а) и форсунки с круговым буртом (б) показан на рис. 3.

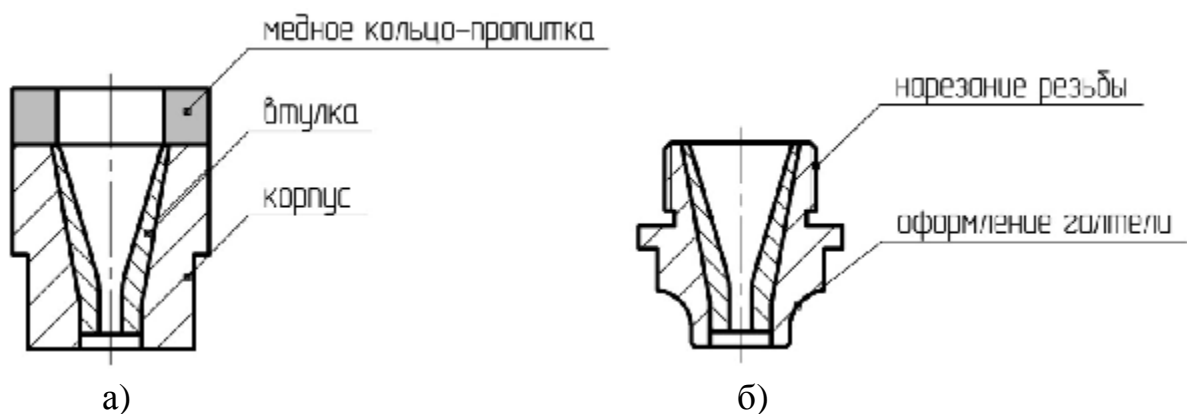


Рис. 2.

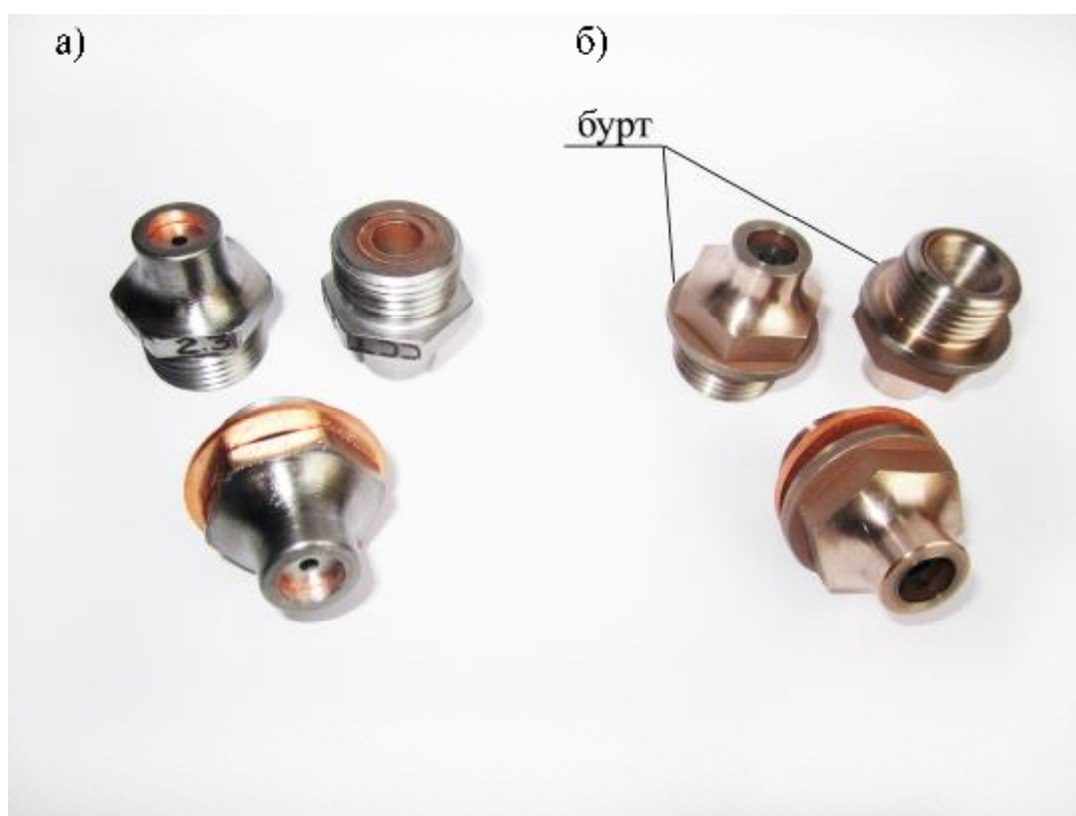


Рис. 3.

Корпус форсунки формируется из шихты порошковой стали с усилием прессования 600-700 МПа, при котором достигается плотность материала $7,2 \text{ г/см}^3$. Спекание проходит в водородосодержащей атмосфере при температуре 1150°C в течение 40 минут.

Спекание совмещается с пропиткой корпуса медью, после чего втулка и корпус становятся неразъемным соединением. Спеченная порошковая сталь имеет структуру легированного перлито-троостита с включениями

карбидных фаз. Твердость стали корпуса после спекания составляет 18-30 HRC.

Окончательная операция изготовления форсунки включает финишную механическую обработку порошкового корпуса, на котором выполняют резьбу и галтель.

2. Конструктивные параметры форсунок

Рассмотрим схему прохождения цементного раствора через монитор и закрепленные в нем форсунки (рис.4). На схеме показаны скорости прохождения цементным раствором различных сечений монитора и уровень потерь давления из-за наличия местных сопротивлений.

Принимая, что для каждого из сечений расход жидкости постоянен, получим:

$$W_1 F_1 = W_2 F_2 = W_3 F_3 = \text{Const}$$

Здесь W_1, W_2, W_3 – скорости потока жидкости в различных сечениях канала; F_1, F_2, F_3 – площади поперечных сечений соответствующих каналов.

Динамическое давление движущегося потока определяется как

$$h_{\text{дин.}} = \rho W^2 / 2$$

Где ρ, W – плотность и скорость движущегося потока.

Потери на местные сопротивления движущегося потока можно выразить через динамическое давление

$$P_{\text{м.с.}} = \xi \rho W^2 / 2$$

Где ξ - коэффициент местного сопротивления, который определяется опытным путем (для настоящего расчета коэффициенты были взяты из справочных данных [2]).

Для анализа потерь рассмотрим пример расчета потока цементного раствора через монитор с двумя форсунками диаметром 3,0 мм. Скорость потока через монитор примем $W_1=3$ л/с, скорость потока через каждую форсунку $W_2=1,5$ л/с. Давление цементировочного насоса составляет 40 МПа.

В сечении 1-1 монитора исходная скорость потока составляет 2,4 м/с. При сужении канала в сечении 2 скорость потока возрастает до 6 м/с. При входе в форсунку (сечение 3) скорость потока увеличивается до 9,8 м/с, а на выходе из сопла (сечение 4) скорость составляет 214 м/с.

Соответственно растет и динамическое давление цементной струи. На входе в монитор динамическое давление составляет 0,004 МПа, а на выходе из сопла - 33,4 МПа.

Наибольшие потери динамического давления 6,68 МПа происходят в форсунке. Эти потери связаны с увеличением скорости цементной струи от

9,8 м/с до 214 м/с. Остальные местные сопротивления, такие как, сужение канала, поворот струи, вход в форсунку приводят в сумме к снижению динамического давления менее 0,1 МПа.

Таким образом, простейший анализ показывает, что практически 99% потерь давления происходит непосредственно в форсунке. Это определяет актуальность исследования геометрических параметров внутреннего профиля форсунки.

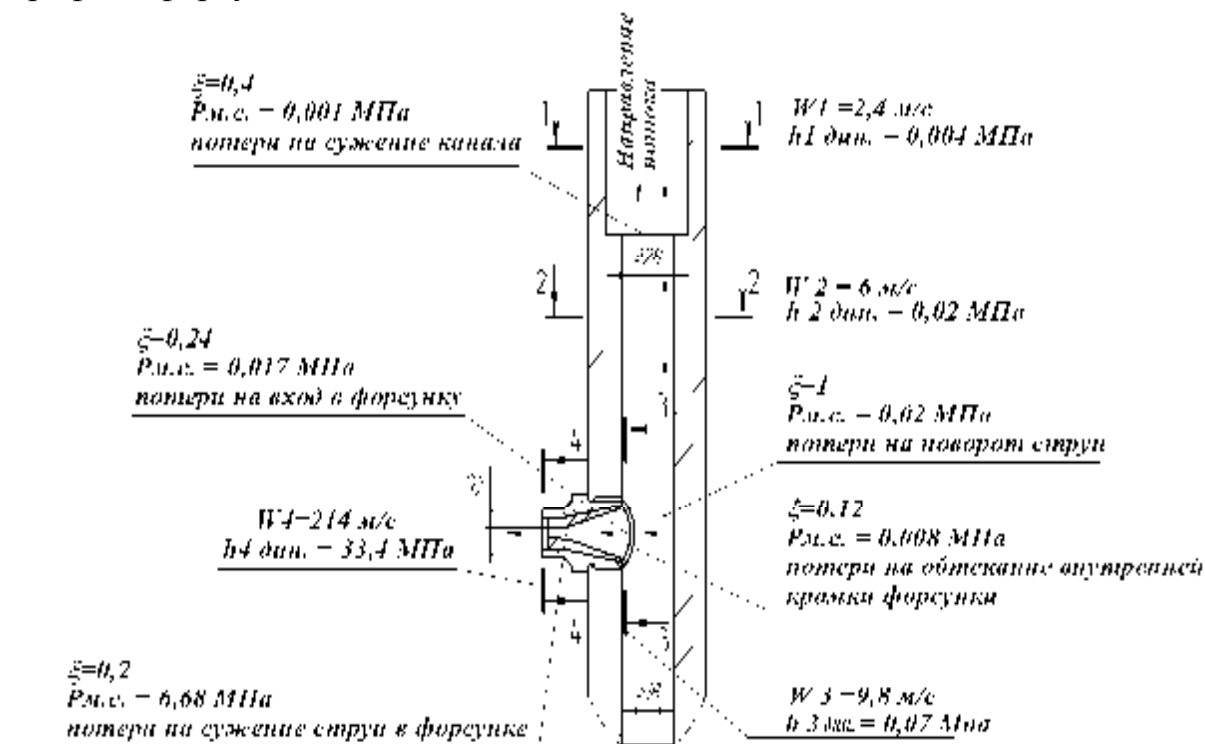


Рис.4. Схема распределения скоростей и потерь на местные сопротивления при прохождении потока цементного раствора через монитор и форсунку.

Известно [2], что оптимальным профилем сопла для истечения жидкостей и газов является профиль сопла Вентури (рис.4). Среди устройств, сужающих потоки, сопло Вентури имеет наименьшие потери давления. Расширение внутреннего диаметра канала на выходе связано с естественным расширением струи после прохождения критического сечения. Угол естественного раскрытия струй составляет 7-15°.

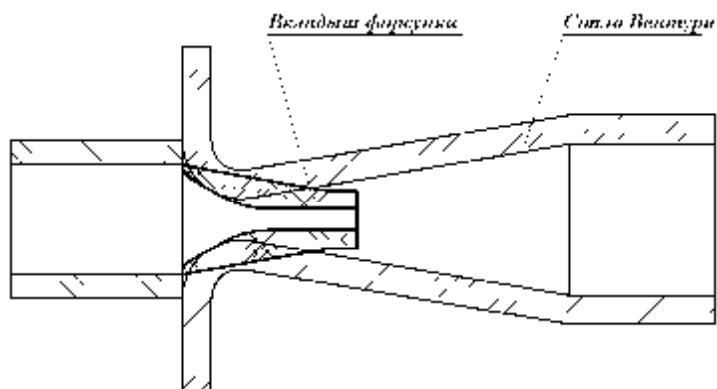


Рис.5. Сравнение профиля сопла Вентури с профилем форсунки.

Между тем, по ряду технологических причин профили, имеющие расширения на входе и выходе, не могут массово изготавливаться на существующем оборудовании порошковой металлургии. Поскольку внутренний профиль сопла оформляется стержнем пресс-формы, возникает проблема невозможности извлечения стержня из прессовки. Компромиссом между теоретической формой и технологией прессования является выполнение только заходного конуса втулки с радиусом закругления на внутренней поверхности заходного торца (рис.5).

Исследования, проведенные С.С.Шавловским [3], показали, что наибольшей энергией обладают компактные струи без турбулентных завихрений. Основным фактором, отрицательно действующим на компактность струи, является вращение струи относительно продольной оси потока. В работе [3] рекомендован угол входной конусности $10-14^\circ$ при длине выходной цилиндрической части сопла равной четырем диаметрам. Таким геометрическим параметрам при изготовлении форсунок придерживается также большинство зарубежных фирм.

Между тем, практический опыт холодной экструзии компактных и порошковых систем показывает, что для вязких жидкостей оптимальным углом вхождения потока в сопло является угол 90° . Считается, что при таких углах формоизменение струи происходит наиболее эффективно с меньшими энергетическими затратами.

Исходя из этих положений, специалистами предприятия были сконструированы новые типы форсунок с различным углом вхождения потока в конус форсунки (рис. 6).

Отдельный интерес представляет тип форсунки (рис.6,е), у которой на выходной части сопла сформированы продольные щели с целью предотвращения закручивания цементной струи и увеличения ее дальнбойности.

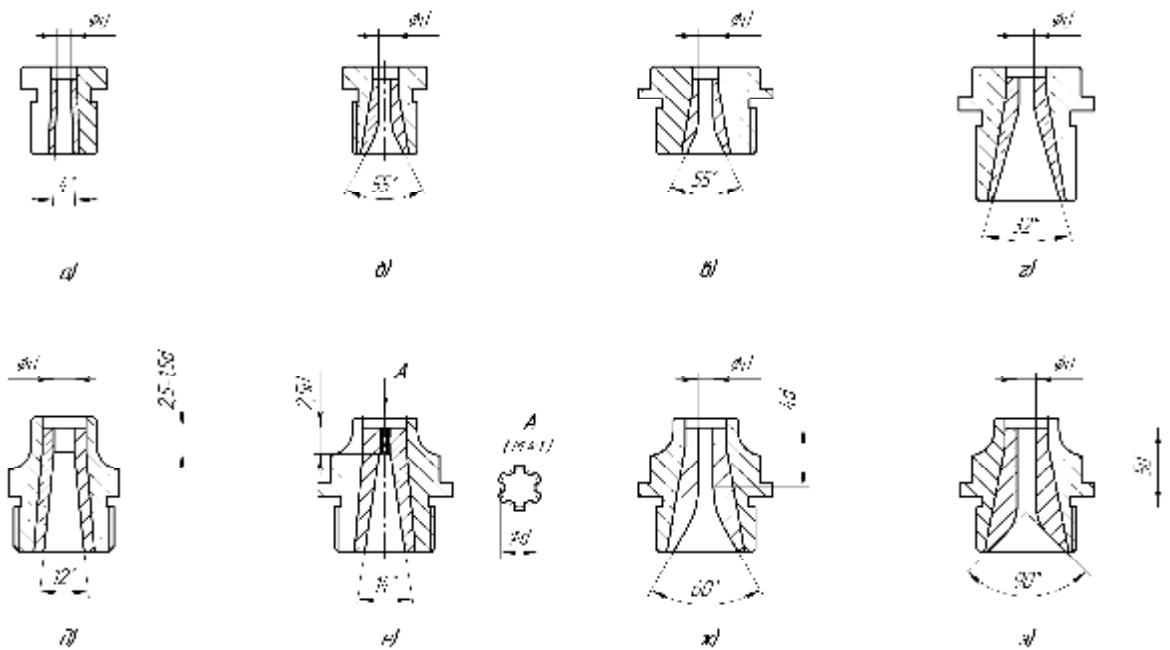


Рис.6. Различные профили форсунок для однокомпонентной и двухкомпонентной технологии струйной цементации

3. Результаты испытаний

Чтобы оценить эффективность новых конструктивных и технологических факторов были проведены сравнительные испытания всех типов форсунок. Испытания проводили в натуральных условиях. Диаметр всех форсунок составлял 3,0 мм. Давление цементировочного насоса было постоянным и составляло 40 МПа. Форму струй фиксировали с помощью фотографирования. Расходы водного и цементного раствора контролировали с помощью расходомера, установленного на высоконапорном насосе. После испытаний оценивали степени износа заходного торца корпуса.

Выводы.

В результате испытаний были сделаны следующие выводы.

1. Наибольшую «жизнеспособность» показали форсунки с расширенным входным конусом (рис.7).

2. Форсунки, имеющие стандартный конус с углом 14° , имели практически одинаковую степень износа входной части независимо от технологии изготовления корпуса (компактный металл или спеченная порошковая смесь). Это дает основание в дальнейшем применять для производства форсунок более прогрессивную технологию порошковой металлургии.

3. Наиболее компактной являлась струя форсунки, втулка которой имела продольные щели (рис.6,е и рис.7,в). Угол раскрытия факела струи составил $12,2^\circ$ в отличие от стандартных форсунок, у которых угол составлял $15,2-16,7^\circ$ (рис.6,д и рис.7,а). Важно отметить, что сужение факела на 20% приводит к повышению удельной кинетической энергии струи на 70-80%.



Рис. 7. Износ корпусов форсунок после промышленных испытаний.

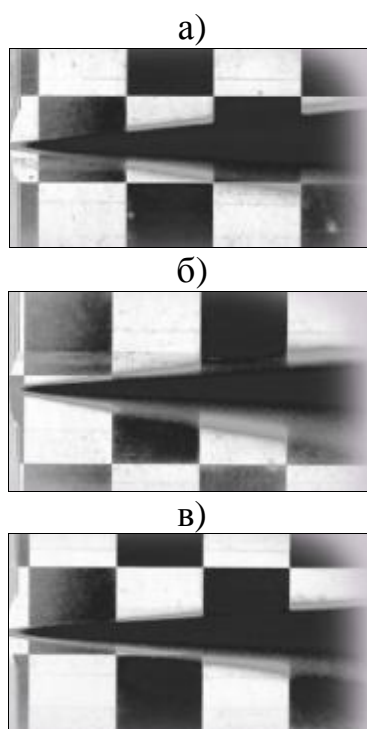


Рис.8. Вид струй факелов на выходе форсунок различных конфигураций:

а – угол заходного конуса 14° , б - угол заходного конуса 60° , в – выходная часть сопла с продольными щелями,

В заключение приведем перечень типоразмеров форсунок, в настоящее время изготавливаемых серийно предприятием «Специальная строительная техника».

Таблица

Технология Jet 1			Технология Jet 2		
Выходной диаметр сопла d, мм		Посадочное место форсунки	Выходной диаметр сопла d, мм		Посадочное место форсунки
Базовый	Дополнительный		Базовый	Дополнительный	
2,0		Резьба: 1/2" gas 1/4" gas 3/8" gas M20 Уплотнительные шайбы из меди	2,0		Резьба: M20x1,5 M24x1,5 1/2" gas Уплотнительные шайбы из меди
	2,2			2,3	
2,5			2,5		
	2,7			2,7	
	2,8		3,0		
3,0				3,2	
			3,5		
				3,6	
			4,0		

Контакты:

ООО «Специальная Строительная Техника»

Тел./факс: (499) 195-25-41; (342) 219-61-56

www.cct-drill.ru, www.cct.perm.ru, e-mail: info-cct@perm.ru

Литература.

1. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов. М.: Стройиздат, 2010 г.
2. Шавловский С.С. Основы динамики струй при разрушении горного массива. М.: Наука, 1979.