

# РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ЖИДКОСТИ И МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЕГО ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Ф.Ш. Хафизов, В.Г. Афанасенко, Е.В. Боев



**ХАФИЗОВ**  
**Фаниль**  
**Шамильевич**

Доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой «Пожарная и промышленная безопасность» Уфимского государственного нефтяного технического университета (УГНТУ). Специализируется в области исследования кавитационно-вихревых явлений, а также применении их в химическом и нефтеперерабатывающем аппаратостроении.



**БОЕВ**  
**Евгений**  
**Владимирович**

Преподаватель кафедры «Оборудование нефтехимических заводов» филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Sterlitaмаке. Окончил вышеназванный университет в 2005 г. по специальности «Машины и аппараты химических производств». Специализируется в области повышения эффективности охлаждения оборотной воды.



**АФАНАСЕНКО**  
**Виталий**  
**Геннадьевич**

Преподаватель кафедры «Оборудование нефтехимических заводов» филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Sterlitaмаке. Специализируется в области разделения неоднородных смесей в поле действия центробежных сил, а также исследования дробления капельной жидкости в потоке газа.

## Введение

Распыление жидкости является сложным процессом, зависящим от многих факторов. Распадение струи на капли и их дробление происходит на выходе струи из распылителя под действием внешних и внутренних сил.

К внешним, аэродинамическим силам, относятся силы взаимодействия распыляемого компонента со средой, в которую он впрыскивается. Их значение зависит от плотности окружающей среды, скорости струи и размеров капель жидкости. К внешним силам относятся также силы взаимодействия при пересечении струй или при встрече струи с твердой стенкой.

© Ф.Ш. Хафизов, В.Г. Афанасенко, Е.В. Боев, 2008

К внутренним силам относятся молекулярные силы и силы, возникающие за счет турбулентных пульсаций в капельной жидкости. В струе вытекающей жидкости возникают турбулентные пульсации, интенсивность которых зависит от плотности, вязкости, перепада давления, а также от конструкции распылителя. Увеличение скорости истечения способствует увеличению интенсивности турбулентных пульсаций, что в свою очередь улучшает качество диспергирования жидкости [1–3].

Дробление жидкости, и образование капель происходит следующим образом: при впрыске образуется пелена, которая под действием внешних сил и турбулентных пульсаций распадается на частицы различной формы и величины. Малые частицы под действием поверхностного натяжения принимают форму шара и образуют капли, а крупные продолжают распадаться.

Авторы [4] считают, что схема первичного дробления струи на капли вследствие турбулентного воздействия может служить только в качестве упрощенной модели процесса распыления жидкости и предлагают схему распада, строящуюся на предположении, что причиной разрушения единого потока жидкости на капли являются кавитационные процессы.

Появление в жидкости кавитационных полостей происходит при равенстве давлений в рассматриваемом объеме и насыщенных парах жидкости при данных условиях. В сопле форсунки кавитация возникает за счет увеличения гидродинамического напора жидкости, при котором гидростатический напор и, соответственно, давление уменьшаются. Повышение скорости потока, увеличивающее гидродинамический напор, достигается уменьшением площади проходного сечения канала [5].

Образованные в сопле форсунки каверны на выходе из сопла, где давление обычно близко к атмосферному, исчезают, разрушая целостность струи. Образование кавитационных полостей носит периодический характер с частотой, зависящей от скорости потока. С увеличением скорости потока кавитационные пу-

зырьки образуются не только на поверхности, но и внутри струи, и из сопла выходит парожидкостная смесь. Интенсификации кавитации во всем сечении струи также способствует завихренное движение потока.

Для диспергирования жидкости используются главным образом форсунки следующих типов [3, 6, 7]:

- гидравлического, в которых распад струи происходит под действием давления нагнетания. К этому типу относятся струйные и центробежные форсунки;

- пневматического, в которых необходимая для распада струи энергия подводится потоком газа или пара.

Несмотря на то, что при пневматическом способе диспергирования расход жидкости не влияет на качество распыления, а также появляется возможность распыления высоковязких жидкостей, применение этого способа ограничено из-за большого расхода энергии и сложности конструктивного оформления форсунки. Поэтому более широкое распространение в технике получил гидравлический способ диспергирования жидкостей, к достоинствам которого следует отнести простоту конструкций форсунок и экономичность по затрачиваемой на проведение процесса энергии.

### **Разработка конструкции устройства для диспергирования жидкостей**

Как отмечалось ранее, дробление струи, вытекающей из сопла форсунки, происходит при взаимодействии жидкости со средой, в которую она впрыскивается. С целью повышения эффективности диспергирования за счет увеличения площади контакта фаз и скорости истечения жидкости в Уфимском государственном нефтяном техническом университете разработана конструкция форсунки, распыление жидкости на выходе из которой происходит по кольцу [8].

Разработанное устройство для диспергирования жидкости (рис. 1, 2) состоит из входного патрубка 2, корпуса 1 с каналом для жидкости 3 и кольцевого выходного сопла 4. Отли-

чительной особенностью данной конструкции является то, что выходное сопло форсунки 4 состоит из нескольких зон: I – зоны уменьшения проходного сечения канала; II – рабочей зоны сопла 4, выполненной в виде зазора между двумя коническими соосными поверхностями; III – зоны увеличения площади проходного сечения.

Кроме этого, внутренний канал 3 корпуса форсунки 1 обеспечивает равномерность подвода жидкости к соплу. Также в корпусе форсунки 1 может содержаться закручивающее устройство 5 или насечки на поверхности ра-

бочей части сопла, благодаря которым вектор скорости на выходе из сопла форсунки приобретает тангенциальную составляющую.

Устройство для диспергирования жидкости работает следующим образом. Жидкость через патрубок 2 поступает в канал 3 корпуса 1, по которому равномерным потоком попадает в сопло. Равномерность подвода жидкости к соплу устройства обеспечивается постоянством площади проходного сечения внутреннего канала и обуславливает равномерность распределения жидкости по поперечному сечению факела распыла. При установке в корпус закручивающего устройства 5 поток жидкости приобретает вращательное движение относительно оси форсунки, что благодаря возникновению центробежных сил увеличивает угол раскрытия факела.

В зоне I сопла за счет уменьшения площади проходного сечения канала увеличивается скорость потока. Далее распыляемая жидкость поступает в рабочую зону сопла II, выполненную в виде кольцевого зазора между двумя соосными коническими поверхностями, где происходит стабилизация потока, откуда – в зону расширения III, в которой струя жидкости под действием внешних сил распадается (рис. 2).

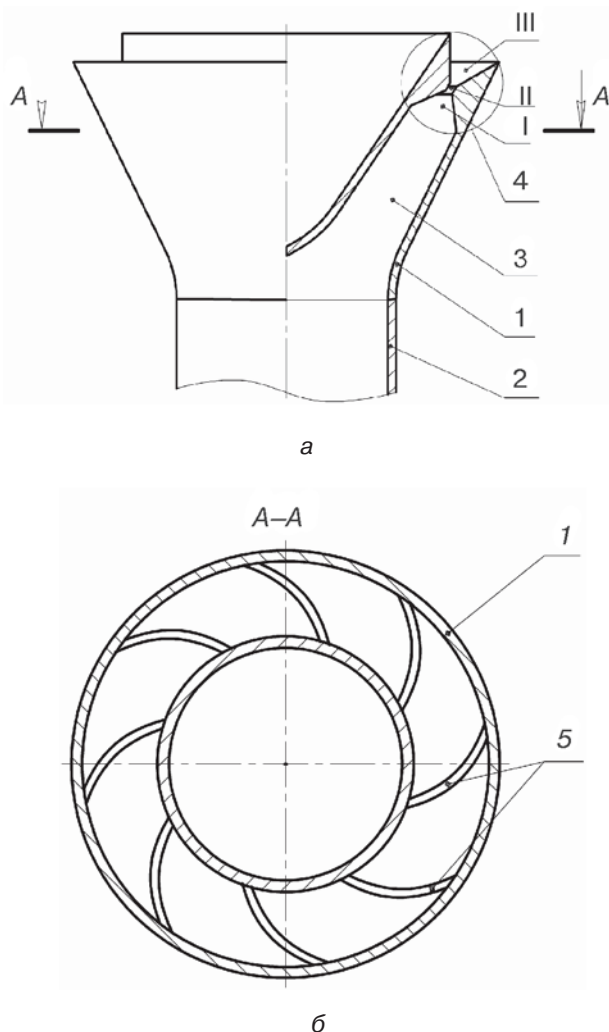


Рис. 1. Общий вид форсунки с закручивающим устройством:

1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – канал для жидкости; 4 – сопло, состоящее из зоны уменьшения проходного сечения канала I, рабочей зоны II, зоны увеличения площади проходного сечения III; 5 – закручивающее устройство

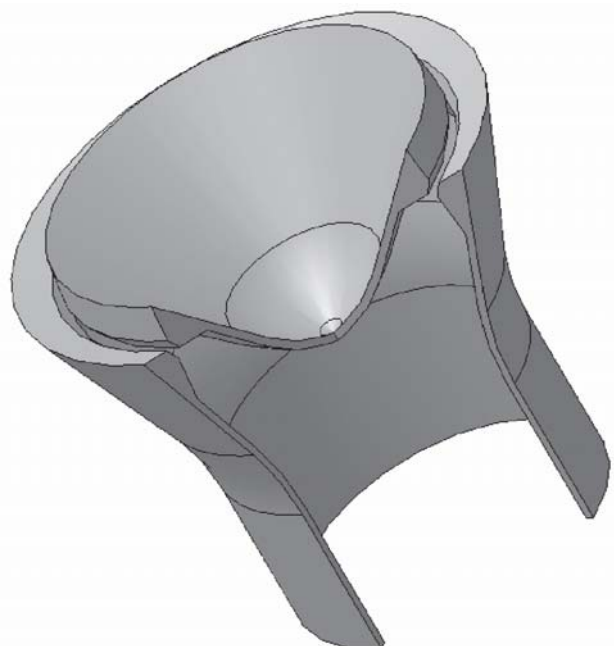


Рис. 2. Трехмерная модель форсунки без закручивающего устройства

### Методика расчета основных параметров устройства

Рассмотрим зависимости параметров потока жидкости в корпусе и сопле форсунки от ее основных геометрических размеров.

Соотношение гидродинамического и гидростатического напора жидкости в различных точках канала корпуса и сопла форсунки может быть описано уравнением Бернулли [3]:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho_{\text{ж}} \cdot g} + \frac{\omega_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho_{\text{ж}} \cdot g} + \frac{\omega_2^2}{2g} + h_n, \quad (1)$$

которое с учетом того, что при небольших габаритных размерах устройства  $z_1 \approx z_2$ , а потери напора на трение можно пренебречь, т.е.

$h_n = h_{\text{мс}} = \zeta \frac{\omega_2^2}{2g}$ , можно записать в виде:

$$\frac{p_1}{\rho_{\text{ж}}} + \frac{\omega_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_{\text{ж}}} + (1 + \zeta) \frac{\omega_2^2}{2}. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2):  $z_1, z_2$  – нивелирная высота двух произвольных точек канала форсунки, м;  $p_1, p_2$  – давления в двух рассматриваемых точках, Па;  $\omega_1, \omega_2$  – скорости потока в рассматриваемых точках канала, м/с;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность распыляемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\zeta$  – коэффициент сопротивления форсунки в целом (можно принять равным коэффициенту сопротивления сопла).

Канал в корпусе форсунки предназначен для соединения входного патрубка круглого сечения с входным сечением сопла, имеющего форму боковой поверхности усеченного конуса, причем количество подводимой жидкости ко всем точкам входного сечения должно быть одинаковым. Для равномерного подвода жидкости к соплу (т.е. для обеспечения ровной эпюры скоростей в проходном сечении на входе в сопло) необходимо избегать пульсаций скорости. Постоянство скорости, согласно уравнению неразрывности потока, можно сохранить при неизменной площади проходного сечения канала в корпусе форсунки.

Площадь поперечного сечения входного патрубка

$$S_{\text{вх}} = \pi \cdot R_{\text{вх}}^2, \quad (3)$$

а площадь проходного сечения канала в корпусе форсунки (так же как и сопла), представля-

ющего собой боковую поверхность усеченного конуса (рис. 3):

$$S_{\text{ук}} = \pi \left( 2R_{\text{вх}} \cdot \Delta l_i - (\Delta l_i)^2 \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \right), \quad (4)$$

где  $R_{\text{вх}}$  – радиус входного патрубка форсунки, м;  $R_{\text{вх}}$  – радиус вращения произвольной точки, располагающейся на внутренней поверхности внешней стенки корпуса форсунки, м;  $\Delta l_i$  – длина образующей усеченного конуса для точки с  $R_{\text{вх}}$ , м;  $\alpha$  – угол раствора срединной конической поверхности канала в корпусе форсунки.

Степень изменения площади проходного сечения канала или сопла форсунки по сравнению с площадью поперечного сечения входного патрубка  $k_i$  равно отношению этих площадей, но при использовании закручивающих устройств вектор скорости потока распыляемой жидкости приобретает тангенциальную составляющую, и отношение площадей принимает следующий вид:

$$\frac{S_{\text{ук}}}{S_{\text{вх}}} = k_i \cdot \cos \beta_i, \quad (5)$$

где  $\beta_i$  – угол, который составляет вектор скорости в заданной точке с плоскостью, перпендикулярной тангенциальному направлению;  $k_i$  – степень изменения площади проходного сечения рабочей части сопла форсунки по сравнению с площадью поперечного сечения входного патрубка.

Для канала в корпусе форсунки, предназначенной для распыления небольшого количества жидкости, рекомендуется принимать  $k_i = 1$  и плавно уменьшать по мере удаления от входного сечения, что позволит обеспечить оптимальный с технологической точки зрения зазор между рабочими поверхностями сопла форсунки при необходимой скорости выходящего потока. В других случаях степень изменения проходного сечения канала рекомендуется принимать постоянной и равной единице.

От степени изменения площади проходного сечения сопла по сравнению площадью поперечного сечения входного патрубка зависит скорость жидкости на выходе из форсунки, что напрямую влияет на качество диспергирования.

Подставляя (3) и (4) в (5), определим в об-

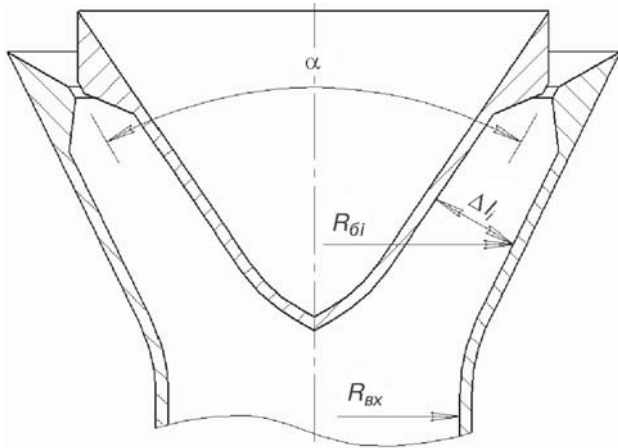


Рис. 3. Осевого разреза форсунки

щем виде длину образующей усеченного конуса в произвольной точке:

$$\Delta l_i = \frac{R_{6i} - \sqrt{R_{6i}^2 - \cos \frac{\alpha}{2} \cdot k_i \cdot \cos \beta_i \cdot R_{BX}^2}}{\cos \frac{\alpha}{2}}. \quad (6)$$

С учетом уравнения неразрывности потока уравнение (5) можно записать в виде:

$$\omega_{BX} = \omega_i \cdot k_i \cdot \cos \beta_i, \quad (7)$$

и тогда из уравнения (2) можно определить скорость потока жидкости в произвольной точке канала форсунки:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{2(p_{BX} - p_i)}{\rho_{ж}(1 + \zeta - k_i^2 \cdot \cos^2 \beta_i)}}, \quad (8)$$

где  $p_{BX}$  – давление жидкости на входе, Па.

Эффективность работы форсунки зависит от параметров жидкости в сопле, поэтому уравнением (8) целесообразно связывать основные параметры потока жидкости в рабочей части сопла форсунки с параметрами подводимого потока:

$$V_{ж} = \sqrt{\frac{2(p_{BX} - p_c)}{\rho(1 + \zeta - k^2 \cdot \cos^2 \beta)}}, \quad (9)$$

где  $V_{ж}$  – скорость жидкости в рабочей части сопла, м/с;  $k$  – степень изменения площади проходного сечения рабочей части сопла форсунки по сравнению с площадью поперечного сечения входного патрубка;  $\beta$  – отклонение вектора скорости на выходе из форсунки от радиально-осевого направления;  $p_c$  – давление жидкости в рабочей части сопла, Па.

После этого, зная физические параметры

диспергируемой жидкости, а также скорость и направление движения среды, в которую происходит распыление, необходимо определить диаметр образующихся капель. Максимальный размер капли, которая может существовать в факеле, можно определить из условия равенства силы поверхностного натяжения и силы аэродинамического давления [4]:

$$d_k = \frac{2 \cdot \sigma_{ж}}{\xi \cdot \rho_{ж} \cdot u^2}, \quad (10)$$

где  $\sigma_{ж}$  – поверхностное натяжение жидкости, Н/м;  $u$  – разность скоростей капли жидкости и обдувающего ее газа, м/с;  $\xi$  – коэффициент сопротивления движению капли.

Для центробежных форсунок в общем случае тангенс угла раскрытия факела равен отношению тангенциальной и осевой составляющей вектора скорости [7]. В разработанном устройстве значительное влияние на истечение жидкости из сопла оказывает радиальная составляющая скорости, приобретенная потоком в корпусе форсунки, поэтому минимальный угол раскрытия факела распыла определяется по формуле

$$\varphi = 2 \cdot \arccos \left( \cos \beta \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \right). \quad (11)$$

На рис. 4 приведены графические зависимости минимального угла раскрытия факела распыла от угла  $\beta$  при разных углах раствора срединной конической поверхности канала в корпусе форсунки  $\alpha$ .

Из полученных зависимостей следует, что величина угла раскрытия факела распыла  $\varphi$  увеличивается при увеличении угла раствора  $\alpha$  срединной конической поверхности канала в корпусе форсунки.

Аналогичная зависимость рассматриваемого параметра наблюдается от угла  $\beta$ . Причем, чем выше интенсивность закрутки потока, тем меньшее влияние на раскрытие факела оказывает угол раствора срединной поверхности канала. При теоретическом значении  $\beta = 90^\circ$  угол раскрытия не зависит от  $\alpha$ .

На основании представленных графиков можно сделать вывод о том, что закручивающее устройство в корпус форсунки целесооб-

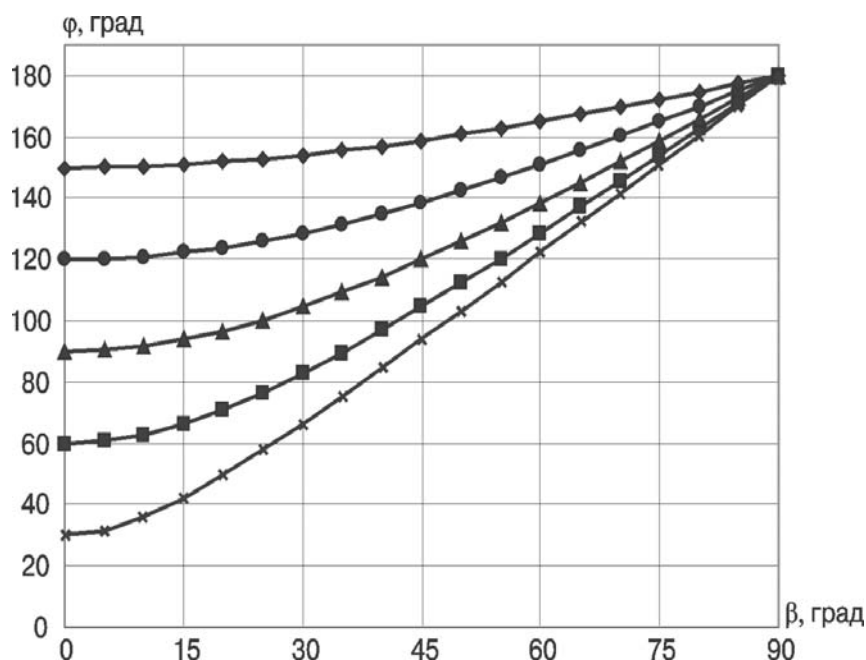


Рис. 4. Графики зависимости минимального угла раскрытия факела распыла:

—  $\alpha=30^\circ$ ; —  $\alpha=60^\circ$ ; —  $\alpha=90^\circ$ ; —  $\alpha=120^\circ$ ; —  $\alpha=150^\circ$

разно устанавливать при небольшом угле раствора срединной поверхности канала ( $\alpha < 90^\circ$ ), в других случаях увеличение угла раскрытия факела будет незначительным.

Для проверки достоверности формулы (6) было приведено компьютерное моделирование с применением программного комплекса FlowVision v2.3, предназначенного для расчета гидро- и газодинамических задач (вместе с сопряженными процессами тепло- и массопереноса) в широком диапазоне чисел Рейнольдса и Маха в произвольных трехмерных областях [9].

Базовыми в программном комплексе FlowVision являются уравнения Навье-Стокса (вместе с уравнением неразрывности). Помимо этих уравнений в зависимости от конкретной задачи могут использоваться дополнительные соотношения, описывающие изменение плотности, турбулентный перенос и т. п.

В качестве базовой расчетной модели была выбрана форсунка со следующими параметрами:

- радиус входного патрубка форсунки  $R_{вх} = 5$  см;
- угол раствора срединной конической по-

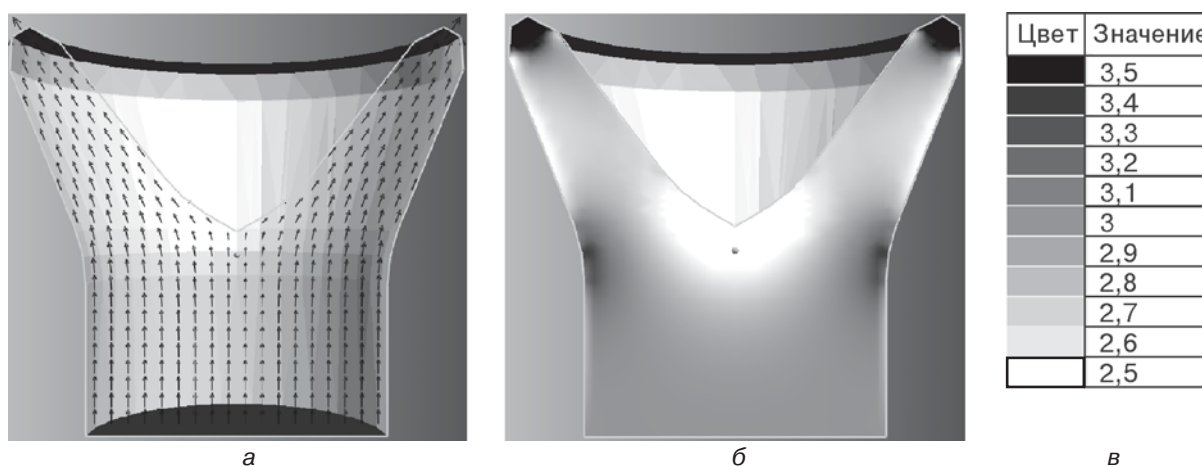


Рис. 5. Результаты моделирования в программном комплексе FlowVision:

а – направления вектора скорости в осевом сечении форсунки;  
б – величина скорости (заливка по модулю скорости); в – значение скорости

верхности канала в корпусе форсунки  $\alpha = 60^\circ$ ;

- отклонение вектора скорости на выходе из форсунки  $\beta = 0$ ;

- степень изменения площади проходного сечения рабочей части сопла форсунки по сравнению с площадью поперечного сечения входного патрубка  $k = 1,0$ .

Скорость жидкости (воды) во входном патрубке форсунки  $\omega_{вх} = 3$  м/с.

Результаты моделирования гидромеханических процессов представлены на рис. 5.

Оценку равномерности подводимого к соплу потока жидкости производили по направлению векторов скорости (рис 5, а) и их величине (рис 5, б). Из чего следует, что жидкость к соплу форсунки, форма канала в корпусе которой удовлетворяет уравнению (6), подводится равномерно, а перепад скоростей составляет менее 10% от входной скорости (для данных условий скорость жидкости во входном сечении сопла равняется  $3 \pm 0,2$  м/с)

### Заключение

К основным преимуществам представленной конструкции форсунки можно отнести:

- простоту конструкции устройства благодаря отсутствию в нем подвижных частей и патрубков подвода распыляющих компонентов;

- низкое гидродинамическое сопротивление за счет уменьшения проходного сечения канала, увеличивающего гидродинамическую составляющую напора, происходящего непосредственно на выходе из форсунки, в отличие от форсунок с кольцевым соплом;

- повышенную эффективность дробления струи на начальном этапе за счет увеличения воздействия на нее внешних сил, обеспечивающегося большой (по сравнению с цилиндрическим соплом) площадью контакта выходящей жидкости со средой, в которую она впрыскивается, так как факел распыла ограничен не одной, а двумя коническими поверхностями (внутренней и внешней);

- широкий диапазон регулирования параметров работы устройства путем изменения на стадии проектирования угла раствора срединной конической поверхности канала в корпусе форсун-

ки  $\alpha$ , отклонения вектора скорости (угла  $\beta$ ) и степени изменения проходного сечения канала  $k$ .

Таким образом, на основании приведенной методики можно рассчитать и спроектировать конструкцию представленного устройства диспергирования жидкостей для обеспечения требуемых параметров распыла при заданных условиях работы форсунки.

### Список литературы

1. Пажи Д.Г. Корягин А.А., Ламм Э.Л. Распыливающие устройства в химической промышленности / Под ред. Д.Г. Пажи – М.: Химия, 1975. – 199 с.
2. Пажи Д.Г., Прахов А.М., Равикович Б.Б. Форсунки в химической промышленности. – М.: Химия, 1971. – 221 с.
3. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Изд. 2-е. В 2-х кн.: ч. 1. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. – М.: Химия, 1995. – 400 с.
4. Кулагин Л.В., Охотников С.С. Сжигание тяжелых жидких топлив. – М.: Недра, 1967. – 282 с.
5. Хафизов Ф.Ш., Афанасенко В.Г., Хафизов Н.Ф. Кавитирование жидкой фазы как способ интенсификации массообменных процессов // Естественные и технические науки. 2007. № 4. С. 267–268.
6. Витман Л.А., Кацнельсон Б.Д., Палеев И.И. Распыливание жидкости форсунками / Под ред. С.С. Кутателадзе – М.: Государственное энергетическое издательство, 1962. – 258 с.
7. Головачевский Ю.А. Оросители и форсунки скрубберов химической промышленности. – М.: Машиностроение, 1967. – 196 с.
8. Патент РФ № 68653, МПК F23D11/04, Устройство для диспергирования жидкости. Хафизов Ф.Ш., Афанасенко В.Г., Хафизов Н.Ф.; Заявл. 02.05.2007. Оpubл. 27.11.2007 / Бюлл. № 33.
9. Кондранин Т.В., Ткаченко Б.К., Березникова М.В., Евдокимов А.В., Зуев А.П. Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа: Учеб. пособ. – М.: МФТИ, 2005. – 104 с.