

УДК 519.2

А.В. ФЕСЕНКО, В.Д. ХИЦАН, Н.П. СКИДАН

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОТОЧНЫХ КАВИТАЦИОННЫХ АКТИВАТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЖ

В статье предложен способ активации СОЖ в проточных гидродинамических устройствах, позволяющий выполнять интенсивное перемешивание и кavitационную обработку эмульсий, как на стадии ее приготовления, так и при восстановлении. Дан анализ процессов, происходящим при прохождении потока через щелевые смесители и кavitационные насадки. Разработан стенд для экспериментального исследования параметров потока при постоянной энергии на входе. Проведено экспериментальное исследование проточных смесителей и кavitационных насадок, на основании которого разработана установка для круглошлифовального станка, обеспечивающая получение гомогенной и мелкодисперсной СОЖ.

**Ключевые слова:** шлифовальный станок, смесители, активация, давление, расход жидкости, кавитация, гидродинамическое воздействие, СОЖ.

**Введение.** Одним из важнейших факторов, обеспечивающих получение заданного качества шлифованных деталей и повышение производительности обработки, является рациональное применение смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). К настоящему времени разработаны научные методики и предлагается ряд подходов к описанию процессов, происходящих в зоне резания при различных способах подготовки и подачи СОЖ в зону шлифования [1,2]. Проработан ряд аспектов научных основ применения СОЖ с введением дополнительной энергии [3]. В то же время мало внимания уделяется активации СОЖ при эксплуатации на шлифовальных станках на этапах подготовки и восстановления её основных функциональных свойств.

**Анализ основных достижений и литературы.** В последнее время все большее применение находят различные виды активации СОЖ, направленные на повышение ее эффективности при шлифовании. Считается, что при механической активации подвод энергии извне к технологической среде способствует преодолению атомами и молекулами потенциального барьера, препятствующего их взаимодействию с поверхностью металла в контактной зоне при резании. Кинетическая и потенциальная энергия частиц среды в процессе активации может достигать таких величин, при которых ослабляются или разрываются внутримолекулярные связи в молекуле вещества [4].

Актуальными становятся вопросы комплексной активации, т.е. создания таких систем охлаждения и смазки, которые включали бы какой-либо из методов физической активации, воздействующей на среду с составом, разработанным в соответствии с требованиями данного вида обработки. Естественно, такой комплексный подход к применению СОЖ должен завершаться рациональной системой подвода среды к зоне резания, объединяя в едином научно-техническом решении физико-химические и технические вопросы применения СОЖ [3].

Комплексный подход к использованию СОЖ при шлифовании включает в себя подготовку ее перед подачей в зону обработки. При этом кроме обычных систем очистки и охлаждения применяются устройства для интенсивного гидродинамического воздействия с возникновением эффекта кавитации [2, 3, 4].

Для этой цели могут использоваться как активные, так и пассивные устройства. Активные устройства [5] представляют собой гидродинамические установки, где энергия потоку сообщается во вращающемся роторе. Такие установки выполняют функции и насоса, и кавитатора одновременно. Пассивные активаторы при воздействии на жидкую среду используют энергию, получаемую потоком от насоса.

Помимо влияния на основные функциональные свойства среды, некоторые методы активации проявляют также бактерицидный, гомогенизирующий и другие дополнительные эффекты, повышающие экономичность применения технологических сред и улучшающие условия их эксплуатации [2].

**Постановка задачи.** При всем многообразии существующих способов механической активации, на наш взгляд, недостаточно внимания уделяется относительно простым и эффективным способам активации СОЖ в потоке с помощью проточных смесителей и кavitационных насадок. Необходимо выполнить анализ основных закономерностей потока СОЖ в проточных системах активизации, на основании которых разработать индивидуальную систему смешения и кavitационной обработки СОЖ для круглошлифовального станка.

**Материалы исследований.** Для исследований выбраны насадки, представляющие собой местное сужение в конфузоре, цилиндрический участок и плавное расширение в диффузоре. Рассмотрим явления кавитации при прохождении жидкости через такую насадку, (рис 1).

Для оценки кавитационных свойств насадки, можно воспользоваться числом кавитации [ 7 ].

$$\chi = \frac{P_1^* - P_{КАВ}}{\rho \cdot V_{ПР}^2 / 2}$$

Используются следующие параметры потока: давление перед конфузуром  $P_1$ , скорость в проходном (узком) сечении  $V_{ПР}$ , давление кавитации  $P_{КАВ}$ , которое можно заменить на давление насыщенных паров текущей жидкости  $P_H$  [ 7 ].

Рассмотрим движение жидкости через квитирующее устройство.

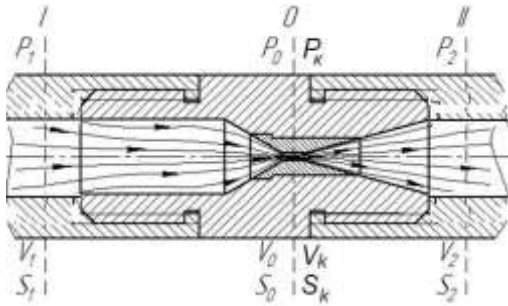


Рис. 1 - Схема течения жидкости в насадке

Для этого воспользуемся уравнением Бернулли для реальной жидкости с учетом потерь давления только на преодоление местного сопротивления:

$$P_1 + \frac{\rho \cdot V_1^2}{2} = P_0 + \frac{\rho \cdot V_0^2}{2} + \Delta P_{MC}$$

где:  $\Delta P_{MC}$  – потери давления на преодоление местного сопротивления.

Известно [6], что  $\Delta P_{MC}$  пропорционально скоростному напору, тогда

$$\Delta P_{MC} = \xi_1 \cdot \frac{\rho \cdot V_1^2}{2}$$

где:  $\xi_1$  – коэффициент местного сопротивления от сечения на входе  $S_1$  до сечения сжатой струи  $S_0$ .

Преобразования, выполненные с учетом сечений на входе  $S_1$  в насадку и проходного сечения  $S_{np}$ , с учетом коэффициента сжатия струи  $\varepsilon$  позволяют получить формулу для критического числа кавитации в виде

$$\chi_{кр} = \left( \frac{S_1^2}{S_{np}^2 \cdot \varepsilon^2} - 1 \right) + \xi_1$$

Из формулы видно, что, чем больше будет сжатие струи  $\varepsilon$  и меньше гидравлическое сопротивление  $\xi_1$ , тем меньше будет критическое число кавитации  $\chi_{кр}$ .

При исследованиях [7] используются разные подходы к определению уровня кавитации. На практике данные из литературных источников бывают противоречивы, что не позволяет воспользоваться существующей информацией для проектирования кавитационных устройств. Поэтому, для каждой разрабатываемой системы проточных кавитаторов и для определенной эмульсии необходимо проводить экспериментальное исследование.

Обычно для таких исследований используется стенд, включающий в себя насос, краны регулировки потока и измерительную аппаратуру (манометры и расходомеры).

При такой схеме полная энергия потока  $E_0$  будет зависеть от характеристики насоса. При закрытии магистрали, когда в ней нет движения жидкости, создается определенное давление. При этом потребляемая насосом энергия (расходуется) преобразуется в потенциальную энергию давления  $E_{II}$  и энергию, за-

трачиваемую на перемешивание и нагрев рабочей среды в насосе  $E_{S1}$ .

$$E_n = E_n + E_{S1} = \frac{P_n \cdot m}{\rho} + E_{S1}$$

где:  $P_n$  – создаваемое насосом давление,  $m$  – масса элемента жидкости,  $\rho$  – плотность данной жидкости.

При открытии крана в магистрали начинается движение жидкости. При этом характеристика насоса определяется взаимосвязью давления  $P$  и расхода  $Q$ .

В конечном итоге при движении жидкости вся энергия, создаваемая насосом, расходуется на создание потока, преодоление внешней нагрузки и гидравлических сопротивлений в трубопроводах и устройствах. При этом полная энергия потока будет включать в себя энергию давления  $E_n$ , энергию движения  $E_k$ , потери энергии в сопротивлениях (трубопроводах и других устройствах)  $E_c$  и энергию  $E_{S2}$ , затрачиваемую на перемешивание, возвратные потоки и возможную кавитацию в насосе, внешним проявлением которых будет нагрев рабочей среды.

Суммарная энергия потока будет:

$$E_n = E_n + E_k + E_c + E_{S2}$$

Для проведения испытаний насадок можно использовать стенд (Рис.2). Здесь источником энергии потока жидкости является насос. Тогда, исходя из посылок о сохранении энергии в потоке, можно записать:

$$\frac{P_n \cdot m}{\rho} + E_{S1} = \frac{P \cdot m}{\rho} + \frac{V^2 \cdot m}{\rho} + E_c + E_s$$

где:  $P$  – давление в модуле,  $V$  – скорость движения в модуле,  $E_{S2}$  – потери энергии при новых условиях работы насоса.

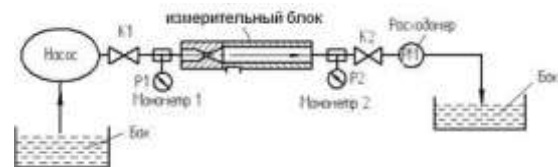


Рис. 2– Испытательный стенд с насосом

На таком стенде предусмотрена регулировка потока с помощью кранов перед ( $K_1$ ) и после ( $K_2$ ) насадки. Во время испытаний выполняется замеры давления ( $P_1$  и  $P_2$ ) и расхода ( $PM$ ).

Для того чтобы исключить влияние характеристики насоса на энергетику потока надо обеспечить постоянную величину энергии на входе  $E_0$ , как при отсутствии движения жидкости, так и в потоке.

Для этого был разработан стенд, в котором поддержание постоянной энергии потока на входе ( $E_0 = \text{const}$ ) обеспечивается за счет постоянного усилия на штоке рабочего цилиндра, подающего СОЖ на испытываемое устройство (Рис.3).

Стенд (см. рис.3) имеет гидроцилиндр, давление на штоке которого поддерживается с помощью редукционных клапанов. Гидроцилиндр через муфту связан с рабочим цилиндром подачи СОЖ, из которого рабочая среда передается на измерительный блок. После опустошения рабочей полости рабочего цилиндра

дра происходит перезарядка (во время обратного хода).

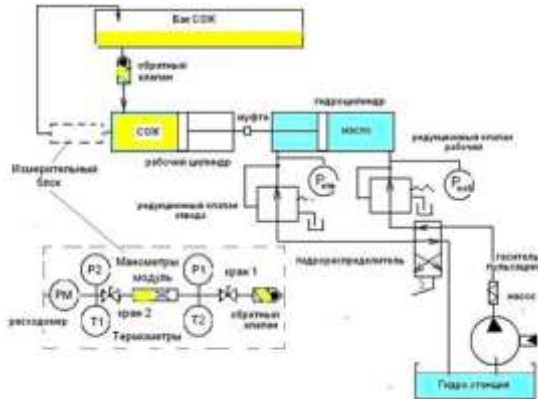


Рис. 3 – Стенд для испытания проточных активаторов

Поскольку высота уровня жидкости в баке относительно измерительного блока обычно не превышает  $H = 0.5$  м, то энергией положения можно пренебречь. В этом случае уравнение сохранения энергии в потоке принимает вид:

$$\frac{P_0 \cdot m}{\rho} = \frac{P \cdot m}{\rho} + \frac{V^2 \cdot m}{2} + E_c$$

тогда уравнение баланса удельной энергии для потока с учетом потерь будет:

$$\frac{P_0}{\rho \cdot g} = \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2g} + \Delta h$$

Было проведено исследование зависимости параметров потока от конструктивных элементов кавитаторов. При проведении исследований изменялись следующие параметры: диаметры отверстия  $dk = 1, 2, 3$  мм; длина цилиндрической части  $L = 0, 3, 9$  мм; угол конуса на выходе  $\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ .

Выполнялся замер давления на входе  $P_1$  и выходе  $P_2$ , температура жидкости в этих точках  $T_1$  и  $T_2$  и расход жидкости через измерительный блок  $Q$ .

Для определения параметров потока при обработке экспериментальных данных использовались расчетные формулы:

$$\text{Скорость в насадке- } V_k = 278 \frac{Q}{S_k}$$

$$\text{Потери мощности - } N = 27.25 \cdot Q \cdot \Delta P$$

Коэффициент сопротивления-

где  $Q$  (м<sup>3</sup>/час),  $V_k$  (м/сек),  $\Delta P$  (кГ/см<sup>2</sup>),  $S_k$  (мм<sup>2</sup>), для воды  $\rho = 100$  (кГ·сек<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>),

Для определения давления в узкой части насадки использовался принцип, заложенным в основу расходомера Вентури. После преобразований расчетных зависимостей была получена формула для определения давления в кавитаторе  $P_n$ . Для расчетов использовались данные полученные при эксперименте: давление на входе  $P_1$ , скорости потока в центральной части насадки  $V_k$  и в трубе  $V_{mp}$

$$P_k = P_1 - \frac{(V_k^2 - V_{mp}^2) \cdot \rho}{2}$$

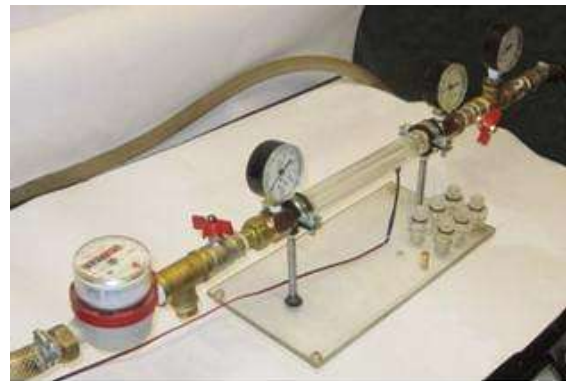


Рис. 4 – Стенд для испытаний кavitационных насадок

На рисунке 4 показана установка, на которой проводились испытания насадок. Кроме замеров и расчетов перечисленных выше параметров в измерительном блоке через прозрачную трубу выполнялось визуальное наблюдение за состоянием потока.

Ниже приведен пример обработки экспериментальных данных для кавитатора со следующими параметрами  $D_{ax} = 10$  мм,  $D_{вых} = 10$  мм,  $d_k = 2$  мм,  $\alpha_{ax} = 60^\circ$ ,  $\alpha_{вых} = 30^\circ, L = 3$  мм.

Результаты опытов и вычислений приведены на графиках (рис.5)

По результатам проведенных исследований могут быть выбраны параметры кавитаторов, которые использовались при создании проточных активирующих систем.

На втором этапе выполнено исследование специального смесителя. В данной конструкции используются элементы, в которых происходит изменение направления движения жидкости. Это приводит к возникновению турбулентных течений и взаимопроникновения отдельных составляющих эмульсии. Такой прием позволяет сделать СОЖ гомогенной и уменьшить её дисперсность.

На рисунке 6 показана вставка в трубу. Конструкция вставки представляет собой сборный узел, в котором расположены блоки с наклонными пазами (Рис.7). Направление канавок парного блока изменяется под углом  $90^\circ$ .

Рассмотрим особенности потока в смесителе данной конструкции. Площадь сечения наклонного канала  $S_f = 1 \text{ мм}^2$ , всего 32 канала, тогда общая площадь сечения составит  $S_k = 32 \text{ мм}^2$ . В промежутке между секциями общая площадь сечения  $S_n = 117 \text{ мм}^2$ .

Скорости на отдельных участках вставки можно рассчитать по формулам:  $V_k = Q/S_k = 278Q/32$  и  $V_n = Q/S_n = 278Q/117$ . Следует также учитывать, что направление потока изменялось под углом  $90^\circ$ , что создавало интенсивное перемешивание, а следовательно и потери энергии пропорционально величине скорости.

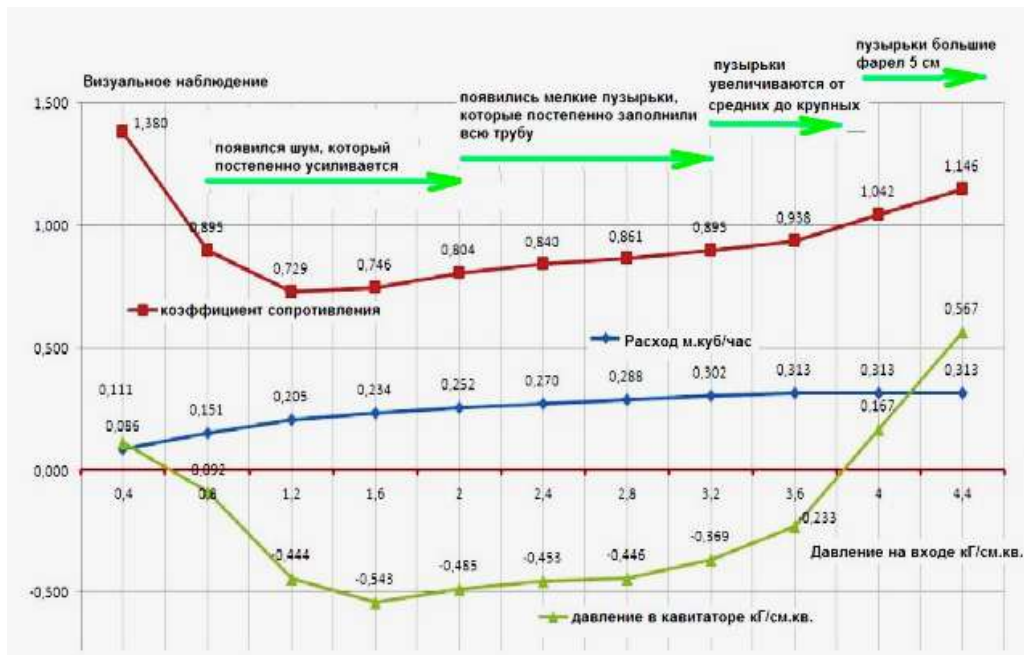


Рис. 5 - Данные по испытаниям кавитатора

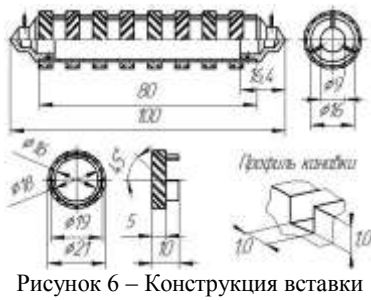


Рисунок 6 – Конструкция вставки



Рис. 7 –Вставка в смеситель

При испытаниях смесителя изменяли давление на входе  $P_1$  и количество блоков  $n$ . Измерительный блок был аналогичен, показанному на рисунке 3.

В результате проведенных испытаний были установлены закономерности изменения расхода, а следовательно, и скоростей потока и сопротивления в зависимости от давления на входе и количества секций в смесителе (рис. 8).

Проведенные исследования смесителей позволили определить влияние их конструктивных параметров (в частности, количество секций) на гидродинамические показатели потока, что в дальнейшем легло в основу расчетов при конструировании блока смешения для станка.

Для приготовления и восстановления эмульсий при индивидуальной системе использования СОЖ нами разработан узел смешения с проточными эле-

ментами (рис. 9). Данная конструкция позволяет выполнять интенсивное перемешивание эмульсии и вводить необходимые добавки.

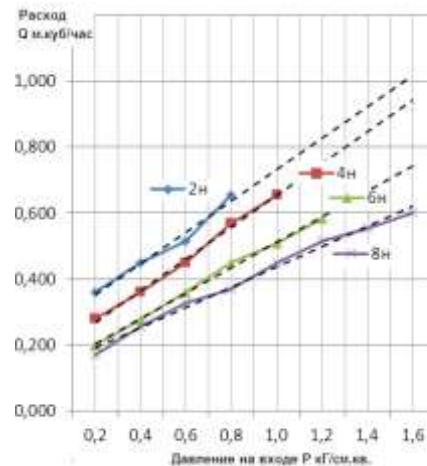


Рис. 8 - Изменение расхода при изменении давления на входе

В корпусе 1 канал входа выполнен в виде конфузора 2 и диффузора 3. На переходном участке расположены каналы для подвода дополнительных компонентов 4. Со стороны диффузора вводится игла 5, с помощью которой регулируется площадь проходного сечения. В цилиндрическом канале установлен смеситель, состоящий из набора колец 6 с проходными каналами, расположенными под углом  $45^\circ$ . Смеситель установлен на цилиндрическом участке иглы, которая соединена с регулируемой втулкой 7. Втулка имеет ряд отверстий для прохождения рабочей среды. Регулировка выполняется при повороте втулки на резьбе корпуса. Изоляция выполняется с помощью резиновых колец 8.

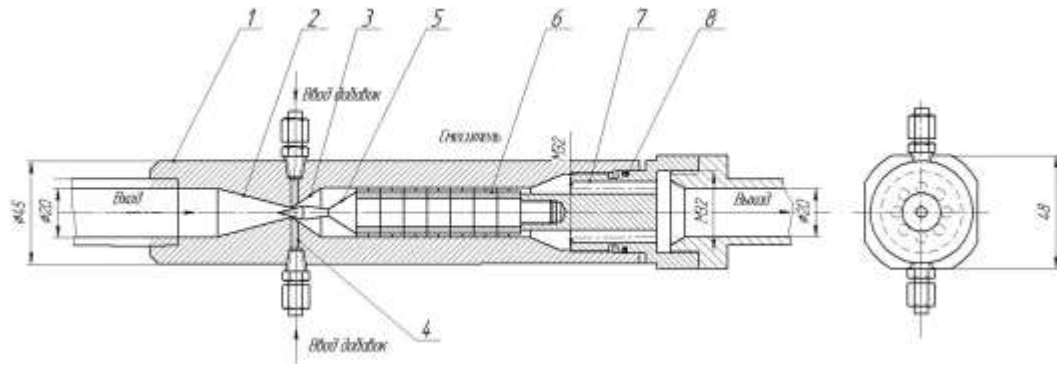


Рис. 9 – Узел смешения СОЖ

При анализе параметров потока на входе в смесителе без иглы (рис.10) потери на конфузоре можно рассчитать по формуле

$$\Delta P_K = \xi_K \cdot \frac{\rho \cdot V_1^2}{2}$$

$$\xi_K = k_2 \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2$$

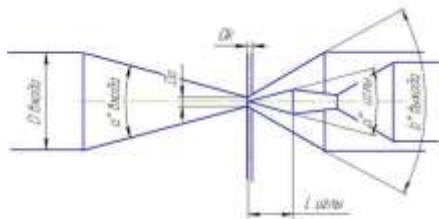


Рис. 10 – Фрагмент входа смесителя

На диффузоре потери рассчитываются как

$$\Delta P_D = \xi_D \cdot \frac{\rho \cdot V_2^2}{2}$$

$$\xi_D = \xi_{TP} + \xi_{раси}$$

$$\xi_{раси} = 3,2 \cdot (\operatorname{tg} 15^\circ)^{1,25} \left( 1 - \frac{1}{n_1} \right)^2$$

$$\xi_{TP} = \frac{\lambda}{8} \cdot \sin 15^\circ \left( 1 - \frac{1}{n_1} \right)^2$$

При использовании подвижной иглы характер движения жидкости изменяется. В общем случае данное устройство можно отнести к дросселям инерционного сопротивления, потеря напора в которых определяется в основном деформацией потока и вихреобразованием.

Сопротивление на входе в конфузоре-диффузоре меняется при перемещении иглы, с помощью которой изменяется проходное сечение.

Проходное сечение рассчитываем по формуле

$$Snp = S_o - S_i = 0,785 \cdot [D_o^2 - (2 \cdot Li \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta_{усл}}{2})^2]$$

Максимальное перемещение иглы определяется как

$$L_{max} = \frac{D_o}{2 \cdot \operatorname{tg}(\beta_{усл}/2)} \sqrt{\frac{D_o^2}{(2 \cdot \operatorname{tg}(\beta_{усл}/2))^2} - 1}$$

При  $D_o=4$  мм и  $\beta=30^\circ$   $L_{max}=7,46$  мм. Вся длина иглы составляет  $L_{игл}=25$  мм.

Наличие иглы изменяет характер потока, поэтому для получения необходимых данных было проведено экспериментальное исследование по определению дополнительного сопротивления при обтекании иглы.

Потери в секциях смесителя с наклонными каналами были определены по данным экспериментальных исследований. В частности для  $n=8$  зависимость  $\xi_{см}$  от исходного давления  $P_1$  имеет вид

$$\xi_{см} = 0,092 \cdot P_1^2 - 1,736 P_1 + 19,69$$

Потери в цилиндрических каналах определяются по формулам

$$\Delta P_L = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \left( \frac{V_K^2 \cdot \rho}{2} \right)$$

$$\lambda = 0,11 \cdot \left( \frac{68}{\operatorname{Re}} + \frac{K_C}{d} \right)^{0,25}$$

Уравнение для определения параметров потока через блок смешения имеет вид

$$\frac{P_o \cdot m}{\rho} = \frac{P \cdot m}{\rho} + \frac{V^2 \cdot m}{2} + E_C$$

Или в параметрах давления

$$P_o = P_i + \frac{\rho \cdot V_i^2}{2} + (\xi_K + \xi_D + \xi_H + \xi_{см} + \xi_L) \frac{\rho \cdot V_i^2}{2}$$

Используя расчетные и экспериментальные данные можно определить параметры потока при заданном положении иглы.

В индивидуальной системе приготовления и восстановления СОЖ круглошлифовального станка применяются два модуля (рис.11). Первый для интенсивного перемешивания и введения добавок. Во

втором модуле выполняется кavitационная обработка эмульсии в специальных насадках.

При приготовлении эмульсии к насосу подключается емкость с водой (K1 открыт, K2 закрыт). Вода подается в смеситель, куда одновременно вводятся необходимые добавки. После заполнения эмульсией бака, до необходимого объема, Кран K1 закрывается и открывается кран K2. Далее эмульсия циркулирует через смеситель. Такая обработка продолжается до заданного уровня гомогенности. Контроль выполняется при отборе проб через кран K7.

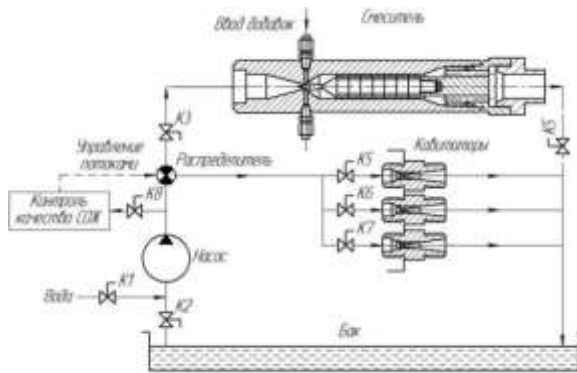


Рис. 11 – Индивидуальная система приготовления СОЖ

В дальнейшем, для получения мелкодисперсной эмульсии поток через распределитель направляется на кавитаторы. В зависимости от состава эмульсии и требуемой интенсивности кавитационного воздействия на рабочую среду подключаются кавитатор, соответствующий данному технологическому режиму. Готовая СОЖ подается на станок.

После использования СОЖ на технологических операциях шлифовального станка эмульсия снова отправляют в бак устройства для ее восстановления.

**Выводы.** При выполнении экспериментального исследования проточных активирующих систем была разработана установка, обеспечивающая по-

стоянство давления на входе измерительного устройства, что позволило исключить влияние характеристики насоса на результаты опытов. Проведенные исследования позволили получить данные, необходимые для разработки элементов перемешивания и кavitационных насадок проточных систем смешения и активации эмульсий. На основании расчетов и экспериментальных данных спроектирована установка для смешения и кavitационной обработки СОЖ в круглошлифовальном станке, позволившая повысить качество эмульсии.

**Список литературы** 1. Худобин Л.В. Смазочно-охлаждающие средства, применяемые при шлифовании. М.: Машиностроение, 1971. – 214 с. 2. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием. Справочник/ Под ред. С.Г.Энтелеса и Э.М.Берлинера. М.: Машиностроение, 1995. – 436 с. 3. Худобин Л.В., Семенов С.В. Влияние способа подачи СОЖ в зону правки на эффективность шлифования // Станки и инструмент. 1985. No 3. С. 19-20. 4. Федоткин И. М., Немчин А. Ф. Использование кавитации в технологических процессах, – Киев: Вища школа. Изд-во при Киевском ун-те. 1984. – 68 с. 5. Фесенко А.В., Лjubимый Ю.Н. Особенности обработки жидкостей в роторных активаторах. – Вестник НТУ ХПИ. Сборник научных работ. Тематический выпуск: Технологии в машиностроении. – Харьков: изд. НТУ «ХПИ». – 2013. No 1 С. 24-27 6. Федорец В.А. и др. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика станков. Киев, Высш. шк., 1987. – 124 с. 7. Арзуманов Э.С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. – М.: Энергия, 1978. –153 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Hudobin L.V. *Smazochno-ohlazhdajushchije sredstva, primenjaemye pri shlifovanii*. Moscow.: Mashynostroyeniye, 1971. 214P. Print. 2. *Smazochno-ohlazhdajushchije tehnologicheskije sredstva dlja obrabotki metallov rezaniem. Spravochnik. Pod redakciej P.G.Entelisa i E.M.Berlinera*. Moscow.: Mashynostroyeniye, 1995. 436P. Print. 3. Hudobin L.V., Semenov P.V. *Vlijanie sposoba podachi SOZH v zonu pravki na effektivnost shlifovania. Stanki i instrument*. 1985. No 3 pP. 19-20. Print. 4. Fedotkin I.M., Nemchin A.F. *Ispolzovanie kavitacii v tehnologicheskikh processah*. Kiev.: Higher school. 1984. 68P. Print. 5. Fesenko A.V., Ljubimyj U.N. *Osobennosti obrabotki zhidkostej v rotornykh aktivatorah*. Kharkov: NTU “KhPI”. 2013. No 1 pP. 24-27. Print. 6. Fedorec V.A. i dr. *Gidroprivody i gidropnevmoavtomatika stankov*. Kiev.: Higher school. 1987. 124P. Print. 7. Arzumanov E.P. *Kavitacija v mestnyh gidravlicheskih soprotivlenijah*. Moscow.: Energi, 1978. 153P. Print.

Поступила (received) 05.11.2015

**Фесенко Анатолий Владимирович** – канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»; тел.: (057)-720-66-25;  
**Fesenko Anatolij Vladimirovich** – Candidate of Technical Sciences, Professor of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25;  
**Хицан Валерий Дмитриевич** – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»; тел.: (057)-720-66-25;  
**Khytsan Valeryi Dmytryevych** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25;  
**Скидан Наталия Павловна** – ст. преп., НТУ «ХПИ» тел.: (057)-720-66-25;  
**Skidan Nataliya Pavlovna** – Senior Lecturer, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25.