

УДК 622.671.

СТРУКТУРА ПОТОКА ШАХТНОЙ ВОДЫ ПРИ КАВИТАЦИИ НА ВХОДЕ В РАБОЧЕЕ КОЛЕСО НАСОСА ВОДОУТЛИВА

Малеев В.Б., докт. тех. наук., проф., Прищенко В.А., аспирант
Донецкий национальный технический университет

В работе исследована кинематика движения потока шахтной воды во входной втулке рабочего колеса центробежного насоса. При этом изучены эффекты вращательного движения и расслоения фаз гидро-смеси.

It is investigate the kinematics mine water stream motion in the centrifugal pump impeller entrance hub. The effects of rotatory motion and stratification gydromixture phases are studied

Проблема и ее связь с научными или практическими задачами. Особенностью работы шахтных центробежных насосов является перекачивание гидросмесей с содержанием твердых частиц угля и породы. Работа насоса на гидросмеси отличается от работы на чистой жидкости, т.к. изменяются его напорная, энергетическая характеристики и допустимая высота всасывания.

Анализ исследований и публикаций. Силовое взаимодействие между непрерывным потоком жидкости и дискретным потоком твердых частиц в реально существующих неоднородных потоках гидросмеси изучено в [1, 2].

Вопросы перекачивания двухфазных потоков шахтными центробежными насосами рассматривались Зарей А.Н. [3,4], Малеевым В.Б. [5]

Однако эти работы не рассматривали кинематику трехфазного потока на входе в рабочее колесо (РК), состоящего из пузырьков насыщенного пара, воды и частиц твердого.

Постановка задачи. Целью данной статьи является изучение кинематики многофазного потока на входе в РК шахтных центробежных насосов и ее влияние на работу последних.

Изложение материала и результаты. Основной особенностью проточной части центробежного насоса является наличие неинерциальной механической системы для потока в рабочем колесе. В этой системе на компоненты потока шахтной воды кроме обычных сил действуют также переносная и кориолисова силы инерции. По этой

причине на пузырьки пара, твёрдые частицы и равные им объёмы жидкости при неравенстве их плотностей будут действовать разные силы, что приведёт к соответствующей разнице между их кинематическими параметрами (сепарации гидросмеси). Твёрдые частицы, обладающие меньшей упругостью, чем жидкость, имеют значительно меньшую потенциальную энергию и, соответственно будут двигаться быстрее жидкой и газовой фаз. Таким образом, особенность гидродинамики многофазной смеси в проточной части насоса связана с раз-

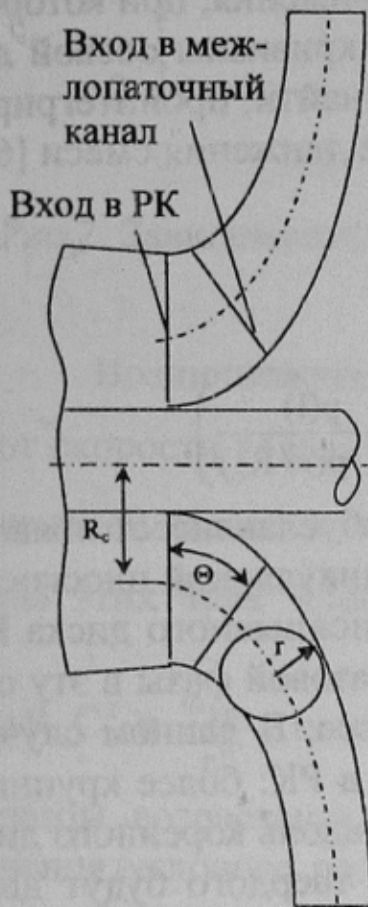


Рис.1 Схема РК центробежного насоса

ными физическими свойствами движущихся компонентов. Поэтому движение трехфазного потока (пузырьки пара – жидкость – частицы твердого) на участке от начала входной втулки РК до кромок его лопаток (рис.1) будем рассматривать подобным движению смеси в коленах изгибающихся трубопроводов [6]. Тогда распределение давления на начальном участке входной втулки РК ($\Theta < 30^\circ$) очень близко к распределению давления, соответствующему свободному вихрю в однородном потоке:

$$\frac{dp}{dr} = \rho_{см} \frac{C_0^2 R_c^2}{(r + R_c)^3}, \quad (1)$$

где R_c - радиус средней линии межлопаточного канала РК,

r - фактический радиус окружности, вписанной в межлопаточный канал,

$\rho_{см}$ - плотность перекачиваемой смеси.

При возникновении кавитации в движущемся потоке появляется газовая составляющая, в результате чего плотность смеси изменяется. Принимаем:

$$\rho_{см} = \frac{\rho_{см0}}{1 - \gamma_{газ} + \gamma_{газ} \frac{p_0}{p}},$$

где $\gamma_{газ}$ - объемное газосодержание, $\rho_{см0}$ - плотность смеси на входе в РК, p_0 - давление на входе в РК.

После интегрирования выражения (1) в кавитационном режиме работы насоса получаем распределение давления для свободного вихря:

$$A_v \left(\frac{R_c^2}{r^2} - 1 \right) = (1 - \gamma_{\text{газ}}) \left(\frac{p(1)}{p_0} - \frac{p(r/R_c)}{p_0} \right) + \gamma_{\text{газ}} \ln \left(\frac{p(1)}{p_0 \cdot p(r/R_c)} \right),$$

где $A_v = \rho_{\text{см}0} C_0^2 / 2p_0$,

На следующем участке входной втулки ($30^\circ < \Theta < 60^\circ$) форма распределения давления изменяется и становится ближе к распределению давления для вынужденного вихревого движения, при котором жидкость вращается относительно оси радиуса кривизны осевой линии колеса. Это распределение давления можно найти, проинтегрировав в плоскости симметрии РК (рис.1) уравнение движения смеси [6]:

$$\frac{dp}{dr} = \rho_{\text{см}} \left(\frac{U_0}{R_c} \right)^2 (r + R_c)$$

Данное распределение имеет вид:

$$A_v \left(1 - \frac{r^2}{R_c^2} \right) = (1 - \gamma_{\text{газ}}) \left(\frac{p(1)}{p_0} - \frac{p(r/R_c)}{p_0} \right) + \gamma_{\text{газ}} \ln \left(\frac{p(1)}{p_0 \cdot p(r/R_c)} \right)$$

Такое изменение распределения давления обуславливает появление вращения потока относительно оси, перпендикулярной плоскости симметрии колеса. Кроме того, течение вблизи покрывного диска РК еще более усложняется в результате отделения газовой фазы в эту область при кавитационных режимах работы насоса. В данном случае имеет место следующее движение фаз на входе в РК: более крупные частицы будут перемещаться в потоке жидкости вдоль коренного диска, пузырьки пара и наиболее мелкие частицы твердого будут двигаться вдоль покрывного диска РК. При этом воздух, находящийся в порах твердых частиц будет расширяться в области вакуумметрического давления, способствуя тем самым развитию кавитации вдоль покрывного диска РК.

Полученная в работе [6] зависимость углового расстояния $\Theta_{\text{вр}}$, при котором начинает развиваться вращение потока $\omega_{\text{вих}}$ от его осевой скорости (рис.2) показывает, что при наименьшей средней скорости потока вращательное движение начинается на большем угловом расстоянии от входа в колесо.

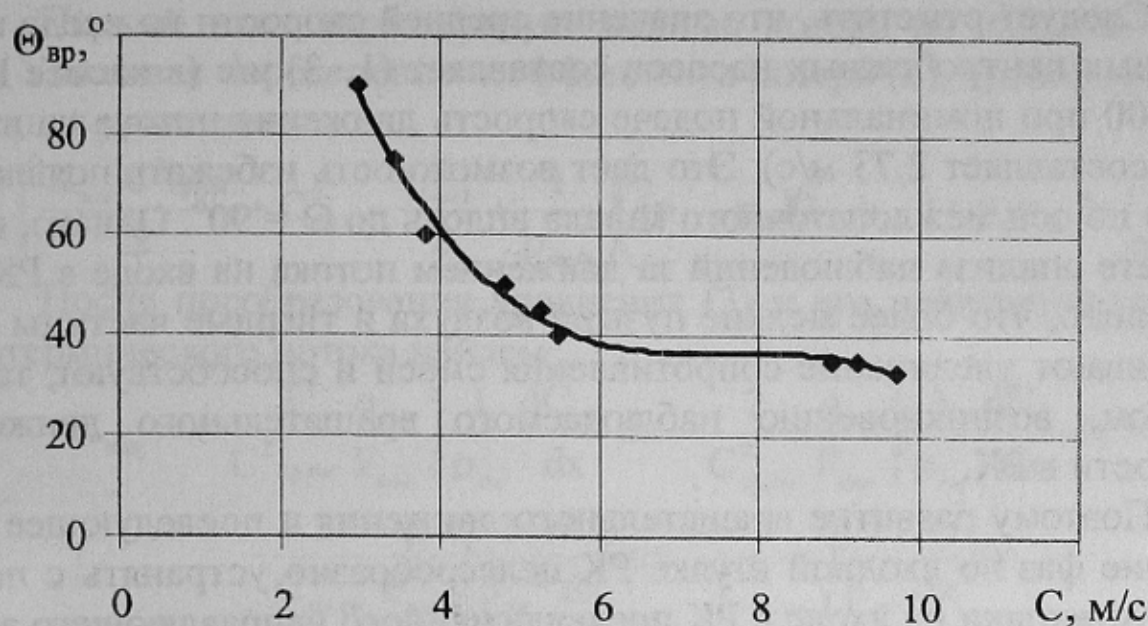


Рис.2. Зависимость углового расстояния от входа в РК $\Theta_{вр}$ от скорости потока шахтной воды

Возникновение завихренности в турбулентном потоке зависит от скорости возрастания завихренности $\frac{d\omega_{вих}}{dt}$ и произведения турбулентной вязкости на вторую производную от завихренности. Величины этих трех членов соответственно пропорциональны: $\frac{C_0}{R_c} \frac{d\omega_{вих}}{d\Theta}$,

$\rho R_c C_0^2$ и $\frac{\omega_{вих}}{r_0^2}$, поэтому можно принять, что $\frac{d\omega_{вих}}{d\Theta} \approx \left(\frac{R_c}{r_0}\right)^2$. Таким образом,

возрастание вращательного движения в потоке по мере увеличения углового расстояния от входа во входную втулку РК должно происходить при больших отношениях R_c/r_0 . Уменьшение угловой координаты $\Theta_{вр}$ при больших скоростях потока свидетельствует об образовании структуры течения с мелкими пузырьками при этих скоростях, которая способствует увеличению турбулентного напряжения трения и более быстрому развитию вращательного движения в потоке по мере его прохождения через входную втулку РК. Таким образом, появление вращательного движения в результате действия сил инерции во входной втулке РК способствует разделению жидкой и твердой фаз и появлению газовой составляющей, а появление последней, в свою очередь, способствует еще большему развитию вращательного движения в результате увеличения скольжения между фазами.

Следует отметить, что значение средней скорости на входе в РК шахтных центробежных насосов составляет (1...3) м/с (в насосе ЦНС 300-600 при номинальной подаче скорость движения потока на входе в РК составляет 2,73 м/с). Это дает возможность избежать появления вихря по оси межлопаточного канала вплоть до $\Theta = 90^\circ$. Однако, в результате анализа наблюдений за движением потока на входе в РК установлено, что более мелкие пузыри воздуха и твердые частицы обуславливают увеличение сопротивления смеси и способствуют, таким образом, возникновению наблюдаемого вращательного движения жидкости в РК.

Поэтому развитие вращательного движения и последующее разделение фаз во входной втулке РК целесообразно устранять с помощью установки на входе в РК предвключенного направляющего аппарата, устраняющей вихревые движения и уменьшающей гидравлические потери в РК. При этом на участке движения потока, соответствующему $\Theta > (30...60)^\circ$ давление возле покрывного диска РК сохраняется практически постоянным, хоть и значительно меньше давления возле коренного диска. Таким образом, разделение фаз в сочетании с радиальным изменением давления играют важную роль в формировании полных гидравлических потерь давления на рассматриваемом участке. Коэффициент потерь давления во входной втулке РК можно определить:

$$K_{\text{кол}} = \frac{2 \cdot \Delta E_{\text{кол}}}{\rho_{\text{см}} C_{\text{ср.см}}^2} \quad (2)$$

где $\Delta E_{\text{кол}}$ – уменьшение энергии во входной втулке РК,

$C_{\text{ср.см}}$ – средняя скорость смеси в промежуточной точке колеса, определяемая исходя из полного объемного расхода в заданном сечении и площади этого сечения.

Уравнение количества движения для течения смеси без существенного влияния трения имеет вид

$$C_{\text{см}} \frac{dC_{\text{см}}}{dx} + \frac{1}{\rho_{\text{см}}} \frac{dp}{dx} = 0 \quad (3)$$

После интегрирования между двумя сечениями (с индексами 1 и 2) получим

$$\frac{\Delta E}{\rho_{\text{см}}} + \left(C_{\text{см}2}^2 - \frac{C_{\text{см}1}^2}{2} \right) + \left(\frac{1}{\rho_{\text{см}0}} \left[(p_2 - p_1)(1 - \gamma_{\text{газ}}) + p_0 \gamma_{\text{газ}} \ln \frac{p_2}{p_1} \right] \right)$$

Первый член характеризует полные потери во входной втулке РК. Учитывая определение коэффициента потерь (2), преобразуем последнее уравнение

$$\left(\frac{K_{\text{кол}} C_{\text{ср.см}}^2}{2} + C_{\text{см}2}^2 - \frac{C_{\text{см}1}^2}{2} + \frac{1}{\rho_{\text{см}0}} \right) \left((p_2 - p_1)(1 - \gamma_{\text{газ}}) + p_0 \gamma_{\text{газ}} \ln \frac{p_2}{p_1} \right)$$

После преобразования уравнения (3) и его интегрирования для изотермического потока найдем

$$K_{\text{кол}} = -\frac{2}{C_{\text{ср.см}}^2} \frac{q_{\text{газ}}}{F_{\text{кол}}} \int_1^2 \frac{1}{\rho_{\text{см}}} \frac{dC_{\text{газ}}}{dx} dx - \frac{2}{C_{\text{ср.см}}^2} \frac{q_{\text{ж}}}{F_{\text{кол}}} \int_1^2 \frac{1}{\rho_{\text{см}}} \frac{dC_{\text{ж}}}{dx} dx - \\ - \frac{2}{C_{\text{ср.см}}^2} \frac{q_{\text{т}}}{F_{\text{кол}}} \int_1^2 \frac{1}{\rho_{\text{см}}} \frac{dC_{\text{т}}}{dx} dx - \frac{2}{C_{\text{ср.см}}^2} \int_1^2 \frac{1}{\rho_{\text{см}}} \frac{dp}{dx} dx,$$

где $q_{\text{газ}} = \gamma_{\text{газ}} \rho_{\text{газ}} C_{\text{газ}} F_{\text{кол}}$, $q_{\text{ж}} = \gamma_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} C_{\text{ж}} F_{\text{кол}}$ и $q_{\text{т}} = \gamma_{\text{т}} \rho_{\text{т}} C_{\text{т}} F_{\text{кол}}$ - соответственно массовые расходы газа, жидкости и твердого.

Пренебрегая скольжением в потоке, можно записать последнее уравнение в виде

$$K_{\text{кол}} = -\left(\frac{C_{\text{см}2}^2 - C_{\text{см}1}^2}{C_{\text{ср.см}}^2} \right) - \left(\frac{2}{\rho_{\text{см}0} C_{\text{ср.см}}^2} \right) \left((p_2 - p_1)(1 - \gamma_{\text{газ}}) + p_0 \gamma_{\text{газ}} \ln \frac{p_2}{p_1} \right)$$

В случае существования на входе в межлопаточные каналы РК большого скольжения между движущимися фазами потока расчетные значения коэффициента потерь возрастают. Это объясняется завышением кинетической энергии потока при определении скорости потока по его полному объемному расходу, а также значительной диссипацией энергии вследствие большого профильного сопротивления частиц,

При большом относительном скольжении жидкая фаза, которая переносит большую часть кинетической энергии, перемещается с более высокой скоростью по сравнению со средней скоростью потока. В свою очередь, твердые частицы, обладающие еще большей кинетической энергией, движутся с наибольшей для трех фаз скоростью. Таким образом, наибольшее увеличение расчетного коэффициента потерь наблюдается в случае максимального скольжения на входе в межлопаточные каналы РК, что является причиной уменьшения КПД насоса при работе на гидросмеси.

Выводы и направления дальнейших исследований.

- исследования структуры потока, движущегося в проточной части РК шахтных центробежных насосов показало, что вращательное движение и расслоение фаз твердого, жидкости и газа возникают

в начальной области входа в первое РК центробежного насоса и сохраняются на входе в его межлопаточные каналы;

- относительное скольжение между фазами значительно возрастает на входе в межлопаточные каналы РК при малой скорости потока. Твердые частицы за счет большей относительной скорости, чем у жидкости, активно действуют на жидкость и создают в ней приращение напора. Однако, вследствие большого профильного сопротивления между твердыми частицами, жидкостью и пузырьками газа передача энергии сопровождается значительной диссипацией, что является причиной уменьшения КПД насоса при работе на гидросмеси. Влияние скольжения приводит к увеличению расчетной величины полного коэффициента потерь на обмен энергии между тремя фазами во входной втулке РК в среднем на 10%;

- для уменьшения этих потерь необходима установка во входной втулке РК предвключенного направляющего аппарата.

В дальнейших исследованиях необходимо установить влияние разделения фаз гидросмеси в РК на его всасывающую способность.

Список источников

1. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. -М.: Гостехиздат, 1973. - 848с.
2. Дементьев М. А. Общие уравнения и динамическое подобие взвесенесущих потоков. Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, Т. 73, 1963.
3. Заря А. Н. О кинематике частиц полифазной смеси в рабочем колесе центробежного насоса. // Горная электромеханика и автоматика. - 1973.- Вып.23. С.12-18.
4. Заря А. Н. Всасывающая способность центробежного насоса при работе на гидросмеси. // Разработка месторождений полезных ископаемых. К.: Техніка.- 1974.- Вып. 37 - С. 35 – 41.
5. Малеев В.Б. Развитие научных основ системы шахтного водоотлива: Дис...докт. техн. наук: 05.05.06. – Д., 2003. – 317с.
6. Хоан, Дэвис Структура течения и потери давления в двухфазном потоке в обратных колесах // Trans ASME. – 1984. -Т106. - №1. – С.123-131