

УДК 622.016.222:62-9

**Э.И. Антонов**, д-р техн. наук,  
**К.В. Грядущий**, инженер, НИИГМ им. М.М. Федорова

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И БАЛАНС ЭНЕРГИИ ЗУМПФОВЫХ ВОДОСТРУЙНЫХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ ИХ С ПОДПОРОМ**

*В статье на основе использования энергетического уравнения водоструйного аппарата выполнен сравнительный анализ баланса энергии зумпфowego аппарата при нулевом, скоростном и статическом подпоре на его входе. Установлено, что наиболее выгодным экономически является вариант со статическим подпором.*

**Ключевые слова:** зумпфовой водоотлив, технологические параметры, энергетическая характеристика, баланс энергии, водоструйный аппарат, подпор, безразмерные характеристики.

### ***Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.***

Водоструйные аппараты являются весьма простым и надежным, пригодным для работы на зумпфовом водоотливе, гидротранспортном оборудованием. К их основным достоинствам можно отнести: возможность исключения постоянного присутствия обслуживающего персонала в зумпфах и обеспечение высокой производительности при удалении просыпи, сравнительно небольшие габаритные размеры и массу. В то же время аппараты рассматриваемого типа характеризуются низкими напорами и эксплуатационным КПД, как правило, не превышающим уровень 0,1...0,15. Поэтому вполне определенный практический интерес представляют вопросы повышения, как экономичности, так и напорности установок с водоструйными аппаратами за счет рационального технологического их использования. Особенно актуальной является задача в такой постановке для зумпфовых аппаратов, предназначенных для откачки и очистки зумпфов повышенной глубины.

***Анализ исследований и публикаций.*** Вопросам повышения КПД установок с водоструйными аппаратами уделено достаточно большое внимание в работах целого ряда авторов. При этом, как показывают результаты исследований [1-3], в определенных технологических условиях использования аппаратов, при работе их с подпором, можно добиться определенного повышения как напора, так и КПД. В отличие от известных подходов параметры аппаратов с учетом влияния высоты всасывания будем считать технологическими (обуслов-

ленными технологическими особенностями эксплуатации аппаратов). В рассматриваемом плане характеристики и параметры аппаратов были рассмотрены в работе [3]. Однако, как показал анализ, ряд положений последней требует дальнейшего уточнения и развития.

**Постановка задачи.** Целью данной работы является развитие научных положений работы [3] на основе сравнительного анализа баланса энергии и характеристик технологического КПД водоструйных аппаратов в условиях работы их со статическим, скоростным и нулевым подпором на всасе.

**Изложение материала и результаты.** Для решения поставленной задачи используем энергетическое уравнение водоструйного аппарата на всасе, полученное в работе [3]:

$$\begin{aligned} \rho_2 g Q_2 H_3 = & \rho_p g Q_p H_p + \rho_{вх} g Q_{вх} \left( H_{вх.ст} + \frac{V_{вх}^2 \cos^2 \psi}{2g} \right) - \\ & \rho_{вх} g Q_{вх} \frac{(\varphi_2 V_{вх} \cos \psi - V_2)^2}{2g} - \rho_p g Q_p \frac{(\varphi_2 V_{p1} - V_2)^2}{2g} - \\ & \rho_p g Q_p \xi_p \frac{V_{p1}^2}{2g} - \rho_2 g Q_2 \xi_k \frac{V_2^2}{2g} - \rho_{вх} g Q_{вх} \xi_{вх} \frac{V_2^2}{2g} - \rho_2 g Q_2 \xi_d \frac{V_2^2}{2g}. \end{aligned} \quad (1)$$

- где  $Q_{вх}, \rho_{вх}$  – объемный расход, плотность всасываемого потока;  
 $Q_2, \rho_2$  – объемный расход, плотность смешанного потока на выходе из камеры смешения;  
 $Q_p, \rho_p$  – объемный расход, плотность рабочего потока;  
 $V_p$  – скорость рабочего потока (принимается равной скорости на выходе из сопла);  
 $V_{вх}$  – скорость всасываемого потока на входе в камеру смешения;  
 $V_2$  – скорость смешанного потока в камере смешения;  
 $H_{вх.ст}$  – напор (статический) на входе в аппарат;  
 $H_3$  – напор аппарата, в выходном сечении диффузора;  
 $H_p$  – напор рабочего потока (перед соплом);  
 $g$  – ускорение свободного падения;  
 $\varphi_2$  – коэффициент скорости камеры смешения;  
 $\psi$  – угол подвода всасываемого потока.

В выражении (1) приняты обозначения  $\xi_c, \xi_{ex}, \xi_d, \xi_k$  – коэффициенты сопротивления сопла, входа в аппарат, диффузора, камеры смешения. Значения  $\xi_k, \xi_{ex}$  и  $\xi_d$  отнесены к скорости смешанного потока  $V_2$  в камере смешения.

Уравнение (1) справедливо при выполнении следующих условий:

- критерий динамического подобия, число Рейнольдса для сопла, отвечает условию автомодельности –  $Re \geq 10^6$  ;
- работа аппарата ведется в докавитационных режимах;
- статическое давление на участке входа всасываемого потока между выходом из сопла и входом в камеру смешения сохраняет постоянное значение;
- в вариантах работы аппаратов с подпором дополнительные потери энергии при их образовании принимаются равными и при сравнительном анализе вариантов создания подпора эти затраты не учитываются.

Для дальнейшего анализа преобразуем размерную энергетическую характеристику (1) в безразмерные зависимости для вариантов работы аппаратов с нулевым, статическим и скоростным подпорами. С этой целью введем следующие относительные параметры:

- $h = H_3/H_p$  – относительный напор аппарата;
- $U = Q_{ex}/Q_p$  – относительный расход аппарата;
- $\delta = \rho_{ex}/\rho_p$  – относительная плотность;
- $h_{ex.cm} = H_{ex.cm}/H_p$  – коэффициент статического подпора на всасе аппарата;
- $h_{ex.ck} = H_{ex.ck}/H_p = Z^2/(1 + \xi_c)$  – коэффициент скоростного подпора на всасе аппарата;
- $Z = V_{ex}/V_p = U/n$  ;
- $Z_0 = V_{ex.1}/V_{p.o} = u/n$  – отношение входной скорости  $V_{ex}$  к скорости рабочего потока  $V_{p.o}$  (в сечении среза сопла) при условии нулевого подпора (уровень всасываемой жидкости отвечает плоскости среза сопла аппарата);
- $m = f_2/f_{p1} = d_k^2/d_c^2$  – отношение площади  $f_2$  камеры смешения к площади  $f_{p1}$  выходного отверстия сопла;
- $d_k, d_c$  – диаметры камеры смешения и сопла;
- $n = f_{ex}/f_p = U/Z_0$  – отношение площадей всасываемого и рабочего потоков;
- $\Sigma \xi = \xi_{ex} + \xi_d + \xi_k$  .

Для аппаратов с центральным соплом при рациональной их конструкции  $n = m - 1$  [4, 5].

Далее, разделив обе части уравнения (1) на  $\rho_p g Q_p H_p$ , используя вышеприведенные безразмерные параметры и выполнив соответствующие преобразования, получаем следующие безразмерные характеристики:

для случая  $h_{\text{вх.см}} = h_{\text{вх.ск}} = 0$  имеем

$$h_0 = \frac{1}{1+u} - \frac{1}{(1+u)(1+\xi_c)} \left[ u \left( \varphi_2 Z_0 \cos \psi - \frac{1+u}{m} \right)^2 + \left( \varphi_2 - \frac{1+u}{m} \right)^2 + \sum \xi \frac{(1+u)^3}{m^2} + \xi_c \right] \quad (2)$$

для варианта работы аппарата со статическим подпором

$$h_{\text{см}} = \frac{1}{1+u} + \frac{h_{\text{вх.см}} u}{1+u} - \frac{1-h_{\text{вх.см}}}{(1+u)(1+\xi_c)} \left[ u \left( \varphi_2 \frac{u}{n} \cos \psi - \frac{1+u}{m} \right)^2 + \left( \varphi_2 - \frac{1+u}{m} \right)^2 + \sum \xi \frac{(1+u)^3}{m^2} + \xi_c \right] \quad (3)$$

при обеспечении скоростного подпора на всасе аппарата находим, что

$$h_{\text{ск}} = \frac{1}{(1+u)} + \frac{1}{(1+u)(1+\xi_c)} \left[ Z^2 u \cos^2 \psi - u \left( \varphi_2 Z \cos \psi - \frac{1+u}{m} \right)^2 - \left( \varphi_2 - \frac{1+u}{m} \right)^2 - \sum \xi \frac{(1+u)^3}{m^2} - \xi_c \right] \quad (4)$$

Выражения (2)–(4) получены с учетом условия  $\rho_{\text{вх}} = \rho_p$ , или  $\delta = 1$ , что позволяет на данном этапе выполнить анализ только гидравлических характеристик аппаратов.

При этом установленные зависимости дают возможность вести анализ как частных технологических характеристик аппаратов (при  $m = \text{const}$ ), так и интегральных безразмерных их характеристик, отвечающих оптимальным значениям  $m$ , т.е. при максимальных значениях КПД аппаратов. Поскольку при этом прежде всего представляет интерес рассмотрение интегральных характеристик аппаратов, были получены следующие выражения для параметра  $m_{\text{онм}}$ :

для вариантов работы аппаратов при нулевом и статическом подпоре

$$m_{\text{онм.0}} = m_{\text{онм.см}} = \frac{(1 + \sum \xi)(1+u)^2 n}{\varphi_2 (n + u^2 \cos \psi)}; \quad (5)$$

для варианта при скоростном подпоре на входе в аппарат

$$m_{\text{онм.ск}} = \frac{(1 + \sum \xi)(1+u)^2}{\varphi_2 (Zu \cos \psi + 1)} \quad (6)$$

Из выражений (5) и (6) вытекает, что, если в вариантах нулевого и статического подпора параметр  $m_{онм}$  от величины подпора не зависит, то значение  $m_{онм.ск}$  от скоростного подпора зависит существенно. При неизменном  $U$  увеличению  $Z$  в общем случае отвечает соответствующее уменьшение величины  $n$ , что, в свою очередь, приводит к уменьшению  $m_{онм.ск}$  и росту уровня скорости  $V_{вх}$  на входе в камеру смешения.

Далее, при использовании расчетных зависимостей (2) – (6) важным вопросом является обоснованный выбор величины суммарного коэффициента сопротивления  $\Sigma\xi$ , отнесенного к скорости  $V_2$  смешанного потока в камере смешения аппарата. В соответствии с данными работ [1, 4-6] величина  $\Sigma\xi$  может изменяться в пределах  $\Sigma\xi = 0,28 \div 0,36$ . Используя формулу (5) можно легко установить, что результаты экспериментальных исследований [4-6] в основном отвечают  $\Sigma\xi = 0,28 \div 0,34$ . В то же время из данных [6] вытекает, что  $\Sigma\xi$  может превышать величину 0,4. Учитывая, что качество обработки элементов проточной части промышленных аппаратов будет в общем случае ниже экспериментальных образцов в дальнейшем будет вполне обоснованным в определенных случаях принятие значений  $\Sigma\xi$  больших по сравнению с приведенным их диапазоном.

Рассмотрим теперь непосредственно вопросы, касающиеся баланса энергии водоструйных аппаратов при работе их с нулевым, статическим и скоростным подпором на оптимальных режимах их работы.

Как известно, баланс энергии любой машины или аппарата, в том числе и водоструйного, позволяет оценить уровень экономичности отдельных их элементов. При этом важно отметить, что в таких авторитетных работах как [1, 4, 5] он определялся на основе весьма обстоятельных экспериментальных исследований струйных аппаратов. Это позволило получить опытные коэффициенты сопротивления отдельных элементов аппаратов, что, в свою очередь, дает возможность при анализе новых вариантов их работы (в данном случае при организации подпора на их всасе) изучать баланс энергии на основе расчетных зависимостей.

На основе использования характеристик (1) – (4) установим зависимости отдельных составляющих баланса энергии для всех трех рассматриваемых вариантов работы. С этой целью необходимо зависимости, содержащие составляющие баланса, отнести к величине подводимой к аппарату энергии, которую принимаем равной:

для варианта с нулевым подпором

$$H_{\text{под.0}} = H_p Q_p \rho_p g;$$

для варианта со статическим подпором

$$H_{\text{под.ст}} = H_p Q_p \rho_p g + H_{\text{ex.ст}} Q_{\text{ex}} \rho_{\text{ex}} g;$$

для варианта со скоростным подпором

$$H_{\text{под.ск}} = H_p Q_p \rho_p g + H_{\text{ex.ск}} Q_{\text{ex}} \rho_{\text{ex}} g.$$

Разделив при этом числитель и знаменатель каждой из упомянутых составляющей на величину  $H_p Q_p \rho_p g$ , используя ранее принятые обозначения, исходя из особенностей и вида потерь энергии в каждом из рассматриваемых вариантов работы аппарата – выражения (2) – (4), получаем следующие безразмерные зависимости для определения отдельных величин баланса энергии (принимая  $\rho_p = \rho_{\text{ex}}$ ,  $\cos \psi = 1$ ,  $\Sigma \xi = 0,45$ ):

для варианта с нулевым подпором:

подведенная к аппарату мощность

$$\bar{N}_{\text{под.0}} = 1;$$

потери на смешение

$$\bar{N}_{\text{см.0}} = \frac{u \left( \varphi_2 Z_0 - \frac{1+u}{m_{\text{онм.0}}} \right)^2 + \left( \varphi_2 - \frac{1+u}{m_{\text{онм.0}}} \right)^2}{1 + \xi_c};$$

полезная мощность

$$\bar{N}_{\text{пол.0}} = \eta_{\text{онм.0}} = u h_{\text{онм.0}};$$

потери в сопле

$$\bar{N}_{\text{с.0}} = \frac{\xi_c}{1 + \xi_c};$$

сумма потерь в диффузоре, на входе и на трение в камере смешения

$$\Sigma \bar{N} = \Sigma \xi \frac{(1+u)^3}{(1 + \xi_c) m_{\text{онм.0}}^2};$$

потери энергии с потоком рабочей струи (за диффузором аппарата)

$$\bar{N}_{\text{р.с.0}} = h_{\text{онм.0}}.$$

Для варианта со статическим подпором:

подведенная мощность

$$\bar{N}_{\text{под.ст}} = 1;$$

полезная мощность

$$\bar{N}_{пол.см} = \eta_{онм.см} = \frac{uh_{онм.см}}{1 + uh_{вх.см}};$$

потери энергии с потоком рабочей струи

$$\bar{N}_{р.с.см} = \frac{h_{онм.см}}{1 + uh_{вх.см}};$$

потери на смешение

$$\bar{N}_{см.см} = (1 - h_{вх.см}) \frac{u \left( \varphi_2 \frac{u}{n} - \frac{1+u}{m_{онм.см}} \right)^2 + \left( \varphi_2 - \frac{1+u}{m_{онм.см}} \right)^2}{(1 + \xi_c)(1 + uh_{вх.см})};$$

потери в сопле

$$\bar{N}_{с.см} = \frac{(1 - h_{вх.см})\xi_c}{(1 + \xi_c)(1 + uh_{вх.см})};$$

сумма потерь в диффузоре, на входе и на трение в камере смешения

$$\sum \bar{N}_{см} = \sum \xi \frac{(1 - h_{вх.см})(1 + u)^3}{(1 + \xi_c)(1 + uh_{вх.см})m_{онм.см}^2}.$$

Для варианта со скоростным подпором (при нулевом статическом подпоре) относительные зависимости составляющих баланса энергии ( $\psi=0^\circ$ ;  $\cos\psi=1$ ):

подведенная мощность

$$\bar{N}_{под.ск} = 1;$$

полезная мощность

$$\bar{N}_{пол.ск} = \eta_{онм.ск} = \frac{uh_{онм.ск}(1 + \xi_c)}{1 + \xi_c + uZ^2};$$

потери на смешение

$$\bar{N}_{см.ск} = \frac{\varphi_2^2 \left( u \left( Z - \frac{uZ+1}{(1 + \sum \xi)(1+u)} \right)^2 + \left( 1 - \frac{uZ+1}{(1 + \sum \xi)(1+u)} \right)^2 \right)}{1 + \xi_c + uZ^2};$$

сумма потерь в диффузоре, на входе и на трение в камере смешения

$$\sum \bar{N}_{ск} = \sum \xi \frac{\varphi_2^2 (Zu + 1)^2}{(1 + u)(1 + \sum \xi)^2 (1 + \xi_c + uZ^2)};$$

потери энергии с потоком рабочей струи

$$\bar{N}_{p.c.ck} = \frac{h_{onm.ck}(1 + \xi_c)}{1 + \xi_c + uZ^2};$$

потери в сопле

$$\bar{N}_{c.ck} = \frac{\xi_c}{1 + \xi_c + uZ^2}.$$

На основе приведенных зависимостей были выполнены расчеты относительных составляющих баланса энергии всех трех вариантов работы аппаратов на оптимальных их режимах.

На рис.1, 2 и 3 в качестве иллюстраций приведены балансы мощности водоструйных аппаратов соответственно для нулевого, статического и скоростного подпоров при значении последних –  $h_{вх.ст} = h_{вх.ск} = 0,1$ .

Как видно, оба варианта работы аппаратов с подпором заметно более экономичны по сравнению с вариантом при нулевом подпоре. При этом в области наиболее вероятных для зумпфового водоотлива значений  $U = 1 \div 4$  значение  $\eta_{onm.cm}$  превосходит  $\eta_{onm.0}$  в  $1,16 \div 1,67$  раза. При дальнейшем увеличении параметра  $U$  отношение между указанными  $\eta_{onm}$  возрастает дополнительно.

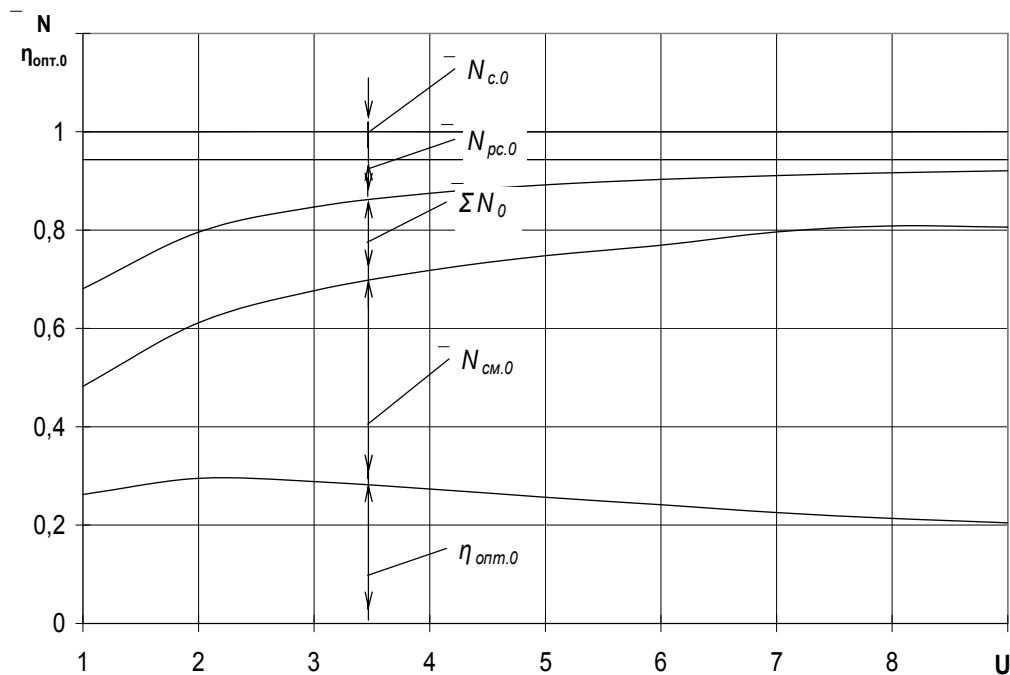


Рис.1. Баланс энергии аппаратов при нулевом подпоре



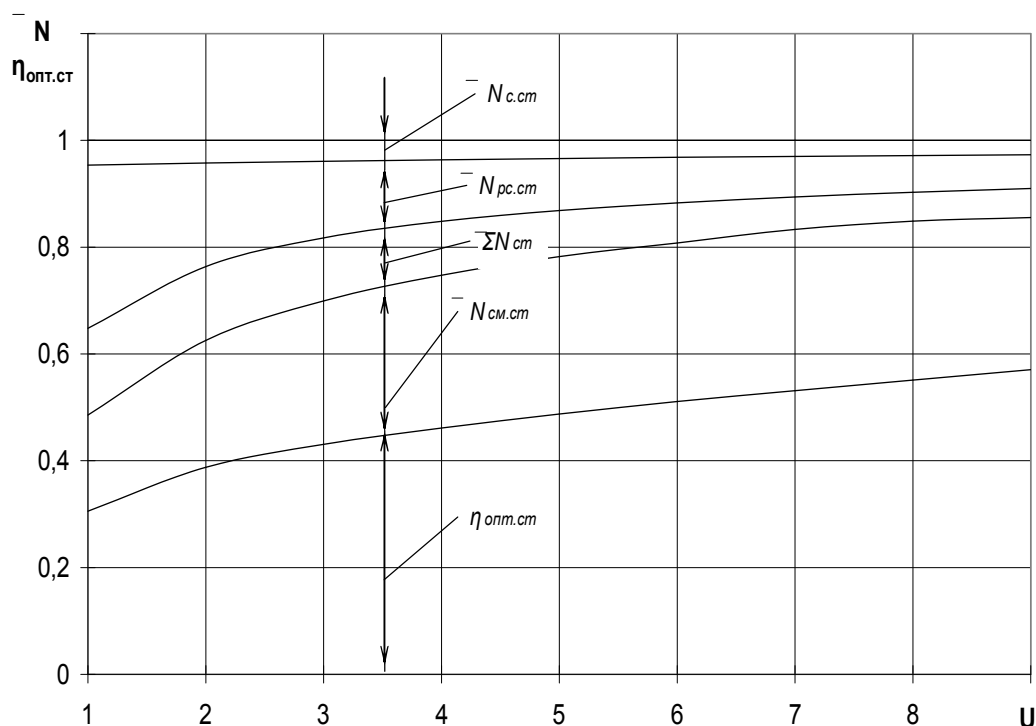


Рис.2. Баланс энергии аппаратов при статическом подпоре  $h_{ex.ст} = 0,1$

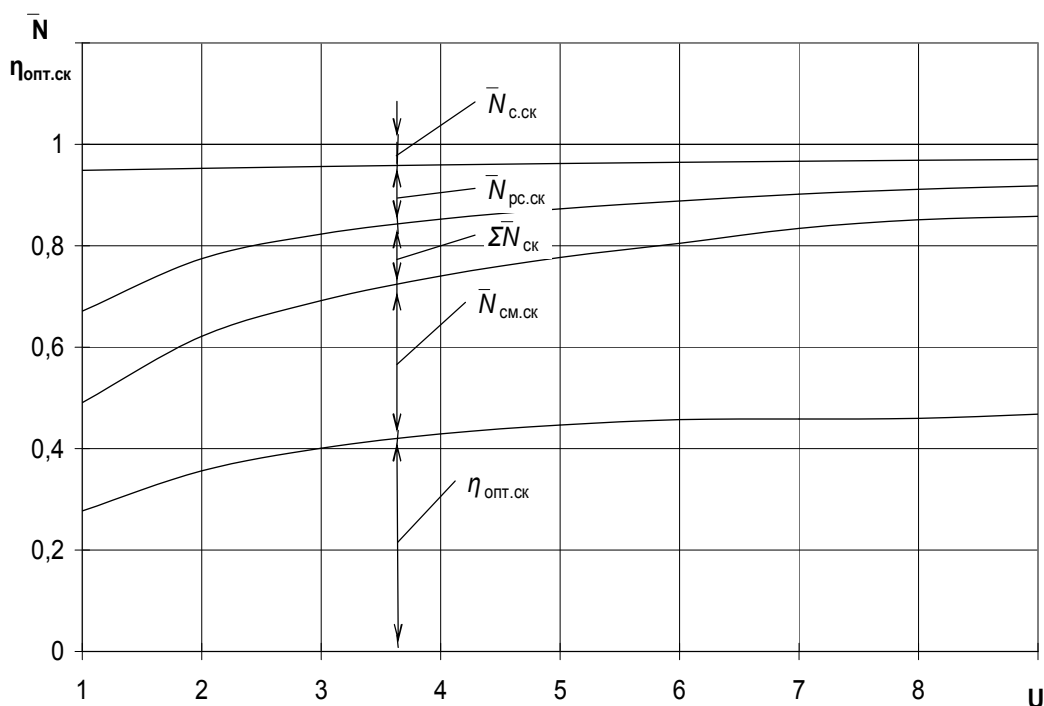


Рис.3. Баланс энергии аппаратов при скоростном подпоре  $h_{ex.ск} = 0,1$

Сравнение значений  $\eta_{opt.ст}$  и  $\eta_{opt.ск}$  показывает, что в указанном диапазоне  $U$  величина  $\eta_{opt.ст}$  превосходит значение  $\eta_{opt.ск}$  примерно в 1,12 раза. Обусловлено это несколько более высокими значениями таких видов потерь энергии, как  $\bar{N}_{см}$ ,  $\bar{\Sigma N}$  и  $\bar{N}_c$  в варианте

скоростного подпора. При этом снижение потерь на смешение потоков в варианте статического подпора вызвано в частности тем, что в нем несколько снижается расход рабочей жидкости, а значит и разница скоростей в камере смешения. В варианте статического подпора имеет место более удачное перераспределение поля давлений и скоростей потоков в проточной части аппаратов, приводящее к некоторому выигрышу в величине технологического КПД установок с водоструйными аппаратами.

На основе полученных результатов сравнительного анализа технологических характеристик и составляющих баланса энергии водоструйных аппаратов при работе их с нулевым, статическим и скоростным подпором, с учетом результатов анализа [3], можно сформулировать следующие **выводы и направления дальнейших исследований**:

- создание подпора, как статического, так и скоростного, на входе водоструйных аппаратов приводит к заметному повышению их технологического напора и КПД с тенденцией роста последнего по мере повышения оптимальной подачи аппаратов;
- впервые установлено, что, в отличие от традиционных представлений, вариант работы аппаратов со статическим подпором обеспечивает заметное снижение потерь энергии на смешение потоков и потерь в диффузоре, благодаря чему он является экономически более выгодным по сравнению с вариантом с «чисто» скоростным подпором (отвечающим традиционно рекомендуемому повышению уровня скоростей  $V_{вх}$  на входе в камеру смешения);
- выявленная зависимость предложенных технологических характеристик и параметров аппаратов от вида подпора на всасе обусловлена физической сущностью процессов в проточной их части, что подтверждает обоснованность и целесообразность дальнейшего использования таких характеристик для целей научного анализа и расчетного определения рабочих параметров установок с водоструйными аппаратами.

#### Список литературы

1. Тиховидов Б.Д. О повышении эффективности рабочего режима гидроэлеваторных установок / Б.Д. Тиховидов, Н.С. Болотских // Гидравлические машины. – 1969. – Вып.6. – С.130-134.
2. Безуглов Н.Н. Гидроэлеваторы на угольных шахтах / Н.Н. Безуглов, Л.Н. Безуглова, А.Я. Горчаков. – М.: Недра, 1986. – 114 с.

3. Антонов Э.И. Исследование влияния подпора на технологические характеристики водоструйных аппаратов / Э.И. Антонов, К.В. Грядущий // Проблемы експлуатації обладнання стаціонарних установок: Сб.научн.тр.НИИГМ им.М.М.Федорова. – 2006. – Вып. 100. – С.201-215.
4. Соколов Е.Н. Струйные аппараты / Е.Н. Соколов, Н.М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 351 с.
5. Подвидз Л.Г. Расчет струйных насосов и установок / Л.Г. Подвидз, Ю.Л. Кирилловский // Тр. ВИГМ. – 1968. – Вып. 38. – С.44-96.
6. Лямаев Б.Ф. Гидроструйные насосы и установки / Б.Ф. Лямаев. – Л.: Машиностроение, 1988. – 278 с.

*Стаття надійшла до редколегії 14.11.2011.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.І. Дворніков*

**Є.І. Антонов, К.В. Грядущий.** Технологічні параметри і баланс енергії зумпфових водоструминних апаратів в умовах роботи їх з підпором. У статті на основі використання енергетичного рівняння водоструминного апарату виконано порівняльний аналіз балансу енергії зумпфового апарату при нульовому, швидкісному і статичному підпорі на його вході. Встановлено, що найбільш вигідним економічно є варіант із статичним підпором.

**Ключові слова:** зумпфовий водовідлив, технологічні параметри, енергетична характеристика, баланс енергії, водоструминний апарат, підпор, безрозмірні характеристики.

**E. Antonov, K. Gryaduschy.** Technological Parameters and Energy Balance of Sump Water-Jet Apparatuses under Conditions of Operation with a Head on Their Intake. In this article a comparative analysis of energy balance of sump water-jet apparatus was carried out on the basis of the use of the energy equation under condition with zero, speed and static head on its intake. It was found out that the variant with static head is the most advantageous.

**Keywords:** sump water drainage, technological parameters, energy characteristic, balance of energy, water-jet apparatus, head, dimensionless characteristics.

© Антонов Э.И., Грядущий К.В., 2011