

**БЕЗРАЗМЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИСТРУЙНЫХ НАСОСОВ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ В УСТАНОВКАХ ЛОКАЛЬНОГО ВАКУУМНОГО
ВОДОПОНИЖЕНИЯ**

Введение. В практике строительства различных подземных и заглубленных объектов в обводненных и слабоустойчивых грунтах для локального снижения уровня грунтовых вод и стабилизации грунтов широко используются установки вакуумного водопонижения. В этих установках для создания вакуума, необходимого для отсасывания воды из грунта и отвода ее от места производства строительных работ, используются водоструйные насосы различных конструкций. Например, в установках ПУВВ-1, УЗВ-3, УЗВМ-2, УЗВМ-3, УВВ-2 и ST 1/3 [1-4, 6] применены водоструйные насосы с центральным расположением насадок (одноструйные насосы). Упомянутые установки в большинстве случаев обеспечивают надежное и сравнительно быстрое локальное водопонижение. Но, несмотря на это, приходится констатировать то, что эти установки достаточно энергоемки, маломаневренны, имеют сравнительно большие габаритные размеры и массу. И, наконец, они не универсальны. Для ведения водопонижительных работ при строительстве подземных либо заглубленных объектов строители вынуждены применять несколько различных по конструкции установок.

Для устранения перечисленных выше недостатков в ХНУСА создана новая универсальная установка локального вакуумного водопонижения ПУВВ-5МЕА (рис. 1) [5]. Главной конструктивной особенностью этой установки является использование в ней вместо водоструйного насоса с центральным расположением насадка полиструйного, имеющего более высокие эксплуатационные характеристики, меньшие габаритные размеры и массу. Кроме того, в этой установке предусмотрены системы частотного регулирования электро-

привода и автоматизации управления. Целесообразность использования полиструйных насосов в установках вакуумного водопонижения теоретически нами была показана ранее в работе [6].



Рис. 1. Общий вид установки ПУВВ-5МЕА: 1 – полиструйный насос приводной станции установки; 2 – линейная всасывающая система с иглофильтрами; 3 – сливная линия.

Отметим, что работа полиструйных насосов в таких специфических условиях их применения в настоящее время исследована еще недостаточно, отсутствует ряд зависимостей для расчета и построения их характеристик, не создана экспериментально проверенная инженерная методика их расчета.

Настоящая статья посвящается анализу особенностей конструкций полиструйных насосов, используемых в установках локального вакуумного водопонижения, и получению зависимостей для расчета и построения их безразмерных характеристик.

Целью настоящей статьи является получение зависимостей для построения безразмерных характеристик полиструйных насосов для последующей разработки инженерной методики их расчета.

Результаты исследования. Полиструйный насос (рис. 2) в общем случае представляет собой блок, состоящий из

нескольких одинаковых по конструкции одноструйных насосов, имеющих одну общую приемную (всасывающую) камеру 4, связанную с помощью патрубка 3 со всасывающей системой водопонижительной установки.

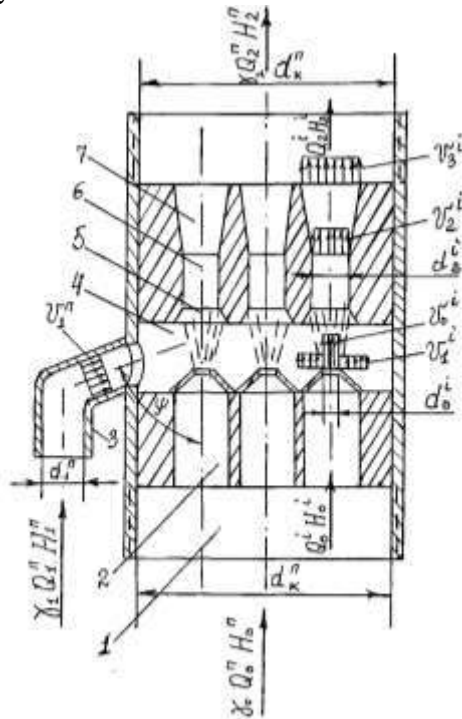


Рис. 2. Принципиальная схема полиструйного насоса: 1- корпус; 2 – блок насадков; 3 – всасывающий патрубок; 4 – приемная камера; 5, 6 и 7 – соответственно, конфузор, смесительная камера и диффузор *i*-того водоструйного насоса с центральным расположением насадка, входящего в полиструйный насос.

К насадкам каждого одноструйного насоса под напором через блок 2 подается вода от принятого в установке единого центробежного насоса. Для отвода воды от полиструйного насоса используется единый трубопровод, расположенный за диффузорами одноструйных насосов.

Теоретически количество одноструйных насосов (*i*), входящих в полиструйный, может быть различным. Например, в установке ПУВВ-5МЕА *i* = 4, а на рис. 2 (для упрощения схемы) *i* = 3. По нашему мнению, исходя из анализа возможностей центробежных насосов, применяемых для подачи воды в установках вакуумного водопонижения, количество одноструйных насосов, входящих в состав полиструйных, может находиться в пределах от 2 до 5.

На приведенном рис. 2 приняты следующие обозначения:

Q_0^i, Q_1^i и Q_2^i – объемные расходы, соответственно, «рабочего», подсосываемого и смешанного потоков воды в полиструйном насосе;

H_0^i – напор «рабочей» воды, подаваемой центробежным насосом к насадкам полиструйного насоса;

H_1^i – вакуумметрическая высота всасывания полиструйного насоса;

H_2^i – напор смешанного потока на выходе из полиструйного насоса;

γ_0, γ_1 и γ_2 – удельные веса жидкостей, соответственно, «рабочего», подсосываемого и смешанного потоков. При откачке из грунтов чистой воды и при отсутствии либо весьма малом количестве подсосываемого воздуха через приемные звенья иглофильтров $\gamma_0 = \gamma_1 = \gamma_2$. В общем случае $\gamma = \rho \cdot g$, где ρ – плотность потока; g – ускорение силы тяжести;

Q_0^i, Q_1^i и Q_2^i – объемные расходы, соответственно, «рабочего», подсосываемого и смешанного потоков воды в *i*-том одноструйном насосе;

H_0^i – напор «рабочей» воды перед насадком *i*-того одноструйного насоса;

H_1^i – разрежение, создаваемое *i*-тым одноструйным насосом в приемной камере;

H_2^i – напор за диффузором *i*-того водоструйного насоса;

d_0^i и d_2^i – диаметры, соответственно, насадка и смесительной камеры *i*-того одноструйного насоса;

V_0^i, V_1^i, V_2^i и V_3^i – скорость потоков воды, соответственно, на выходе из насадка, в приемной и смесительной камерах и на выходе из диффузора *i*-того одноструйного насоса.

При работе водоструйного насоса с центральным расположением насадка происходит непрерывное смешение потоков («рабочего» и подсосываемого), движущихся с различными скоростями. Количественная оценка распределения сообщаемой аппарату энергии между полезной (т.е. используемой для совершения полезной работы) и возможными потерями ха-

рактируется секундным балансом энергии или, иначе говоря, балансом мощности.

Для *i*-того одноструйного насоса, входящего в полиструйный, сообщаемая ему «рабочим» потоком мощность определяется по выражению

$$N_c = \rho_o \cdot g \cdot Q_o^i \cdot \left(\frac{P_a}{\gamma_o} + H_o^i \right), \quad (1)$$

где ρ_o – плотность «рабочего» потока; P_a – барометрическое давление.

Используемая *i*-тым струйным насосом мощность может быть записана выражением

$$N_{исп} = \rho_1 \cdot g \cdot Q_1^i \cdot \left(\frac{P_a}{\gamma_1} + H_1^i \right) + \rho_2 \cdot g \cdot Q_2^i \cdot \left(\frac{P_a}{\gamma_2} + H_2^i \right), \quad (2)$$

где ρ_1 и ρ_2 – соответственно, плотности подсосываемого и смешанного потоков.

Потери мощности в *i*-том одноструйном насосе слагаются из потерь ее на смешение «рабочего» и подсосываемого потоков (т.е. потерь на неупругий удар) и потерь на преодоление сопротивлений при движении потоков в элементах его проточной части.

Потери мощности на смешение, обусловленные неупругим ударом потоков, описываются известной в гидравлике теоремой Борда-Карно

$$N_{см} = \rho_o \cdot g \cdot Q_o^i \frac{(V_o^i - V_2^i)^2}{2g} + \rho_1 \cdot g \cdot Q_1^i \frac{(V_1^i \cos \psi - V_2^i)^2}{2g}, \quad (3)$$

где ψ – угол входа подсосываемого потока в приемную камеру насоса.

Потери мощности на сопротивления в элементах проточной части аппарата слагаются из потерь ее в насадке, конфузоре, смесительной камере и диффузоре. Эти потери могут быть записаны в виде

$$N_{сопр} = \xi_n^i \cdot \rho_o \cdot g \cdot Q_o^i \cdot \frac{(V_o^i)^2}{2g} + \Sigma \xi^i \cdot \rho_2 \cdot g \cdot Q_2^i \cdot \frac{(V_2^i)^2}{2g}, \quad (4)$$

где ξ_n^i – коэффициент сопротивления насадка, исчисленный применительно к скоростному напору потока на его обрезе; $\Sigma \xi^i$ – общий коэффициент сопротивлений конфузора, смесительной камеры и диффузора, исчисленный применительно к скоростному напору смешанного потока в смесительной камере *i*-того одноструйного насоса.

С учетом приведенных выше выражений (1)÷(4) можно записать общее энергетическое уравнение *i*-того одноструйного насоса в виде

$$\rho_o \cdot g \cdot Q_o^i \cdot \left(\frac{P_a}{\gamma_o} + H_o^i \right) = \rho_1 \cdot g \cdot Q_1^i \cdot \left(\frac{P_a}{\gamma_1} + H_1^i \right) + \rho_2 \cdot g \cdot Q_2^i \cdot \left(\frac{P_a}{\gamma_2} + H_2^i \right) + \rho_o \cdot g \cdot Q_o^i \frac{(V_o^i - V_2^i)^2}{2g} + \rho_1 \cdot g \cdot Q_1^i \frac{(V_1^i \cos \psi - V_2^i)^2}{2g} + \xi_n^i \cdot \rho_o \cdot g \cdot Q_o^i \times \frac{(V_o^i)^2}{2g} + \Sigma \xi^i \cdot \rho_2 \cdot g \cdot Q_2^i \cdot \frac{(V_2^i)^2}{2g}. \quad (5)$$

С учетом того, что $Q_o^i = Q_2^i - Q_1^i$ и плотности потоков одинаковы уравнение (5) после некоторых преобразований и сокращений может быть записано в виде

$$Q_o^i \cdot H_o^i = Q_1^i \cdot H_1^i + Q_2^i \cdot H_2^i + Q_o^i \frac{(V_o^i - V_2^i)^2}{2g} + Q_1^i \frac{(V_1^i \cos \psi - V_2^i)^2}{2g} + \xi_n^i \cdot Q_o^i \cdot \frac{(V_o^i)^2}{2g} + \Sigma \xi^i \cdot Q_2^i \cdot \frac{(V_2^i)^2}{2g}.$$

Введем обозначения:

$$X^i = \frac{Q_1^i}{Q_o^i} \text{ – коэффициент подсосывания;}$$

$$\lambda^i = \frac{H_1^i}{H_o^i} \text{ – коэффициент разрежения;}$$

$$\beta^i = \frac{H_2^i}{H_o^i} \text{ – коэффициент напора;}$$

$$m^i = \left(\frac{d_2^i}{d_0^i} \right)^2 - \text{первый (основной) геометрический параметр одноструйного насоса};$$

метрический параметр одноструйного насоса;

$$n^i = \left(\frac{d_1^i}{d_0^i} \right)^2 - \text{второй геометрический параметр одноструйного насоса.}$$

С учетом принятых обозначений уравнение (6) после соответствующих преобразований, выполненных по аналогии с изложенными в работе [2], получена связь между безразмерными параметрами одноструйных насосов с центральным расположением насадка в виде

$$\beta^i = -\lambda^i + \frac{1 + \lambda^i}{(1 + \xi_n^i)(1 + X^i)} \left[2 \frac{1 + X^i}{m^i} - X^i \left(\frac{X^i \cdot \cos \psi}{n^i} - \frac{1 + X^i}{m^i} \right)^2 - (1 + \sum \xi^i + X^i \cdot \sum \xi^i) \left(\frac{1 + X^i}{m^i} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Выражение (7) фактически является уравнением безразмерной напорной характеристики водоструйного насоса с центральным расположением насадка, т.е.

$$\beta^i = f(X^i).$$

Из уравнения (7) после соответствующих преобразований можно получить также уравнение безразмерной вакуумной характеристики $\lambda^i = f(X^i)$ в виде.

$$\lambda^i = \frac{\beta^i - K}{K - 1}, \quad (8)$$

где

$$K = \frac{2 \frac{1 + X^i}{m^i} - X^i \left(\frac{X^i \cdot \cos \psi}{n^i} - \frac{1 + X^i}{m^i} \right)^2 - (1 + \sum \xi^i + X^i \cdot \sum \xi^i) \left(\frac{1 + X^i}{m^i} \right)^2}{(1 + \xi_n^i)(1 + X^i)}$$

Уравнение (8) справедливо для докритического режима работы одноструйного насоса.

В общем случае полиструйный насос представляет собой агрегат, в котором параллельно работают i одинаковых по конструкции и параметрам одноструйных насосов на общий нагнетательный и всасывающий трубопроводы. Эти одноструйные насосы обеспечивают необходимое

разрежение во всасывающей системе установки и напор в трубопроводе на выходе из полиструйного насоса.

С учетом обозначений, принятых на рис. 2, можно записать [7]: $Q_0^n = i \cdot Q_0^i$, $Q_1^n = i \cdot Q_1^i$, $Q_2^n = i \cdot Q_2^i$, $H_0^n = H_0^i$, $H_1^n = H_1^i$ и $H_2^n = H_2^i$.

Объемный коэффициент подсосывания полиструйного насоса в этом случае представляет собой

$$X^n = \frac{Q_1^n}{Q_0^n} = \frac{i \cdot Q_1^i}{i \cdot Q_0^i} = \frac{Q_1^i}{Q_0^i} = X^i, \quad (10)$$

а коэффициент разрежения

$$\lambda^n = \frac{H_1^n}{H_0^n} = \frac{H_1^i}{H_0^i} = \lambda^i. \quad (11)$$

И, наконец, коэффициент напора

$$\beta^n = \frac{H_2^n}{H_0^n} = \frac{H_2^i}{H_0^i} = \beta^i. \quad (12)$$

С учетом (10), (11) и (12) можно записать уравнения:

а) безразмерной вакуумной характеристики полиструйного насоса в виде

$$\lambda^n = \frac{\beta^n - K}{K - 1}, \quad (13)$$

где

$$K = \frac{2 \frac{1 + X^n}{m^i} - X^n \left(\frac{X^n \cdot \cos \psi}{n^i} - \frac{1 + X^n}{m^i} \right)^2 - (1 + \sum \xi^i + X^n \cdot \sum \xi^i) \left(\frac{1 + X^n}{m^i} \right)^2}{(1 + \xi_n^i)(1 + X^n)}$$

б) безразмерной напорной характеристики полиструйного насоса в виде

$$\beta^n = -\lambda^n + \frac{1 + \lambda^n}{(1 + \xi_n^i)(1 + X^n)} \left[2 \frac{1 + X^n}{m^i} - X^n \left(\frac{X^n \cdot \cos \psi}{n^i} - \frac{1 + X^n}{m^i} \right)^2 - (1 + \sum \xi^i + X^n \cdot \sum \xi^i) \left(\frac{1 + X^n}{m^i} \right)^2 \right] \quad (14)$$

Коэффициент полезного действия полиструйного насоса представляет собой отношение мощности, затраченной на подсосывание воды из грунта и откачку ее за пределы ведения водопонизительных работ, ко всей мощности, подведенной «рабочим» потоком к аппарату. В связи с этим для случаев откачки полиструйным насосом чистой воды, т.е. при равенстве плотностей «рабочего», подсосываемого и смешанного потоков, можно записать

$$\eta^n = \frac{Q_1^n (H_1^n + H_2^n)}{Q_0^n \cdot H_0^n} \quad (15)$$

С учетом (9), (10), (11) и (12), после некоторых преобразований, выражение (15) может быть записано в виде

$$\eta^n = X^n (\lambda^n + \beta^n), \quad (16)$$

Подставляя в (16) выражения (13) и (14), после соответствующих преобразований, можно также получить полное уравнение безразмерной характеристики $\eta^n = f_1(X^n)$ полиструйного насоса.

По выражениям (13) и (16) построены безразмерные характеристики полиструйного насоса $\lambda^n = f(X^n)$ и $\eta^n = f_1(X^n)$ при различных значениях основного геометрического параметра m^i i -того одноструйного насоса (рис. 3).

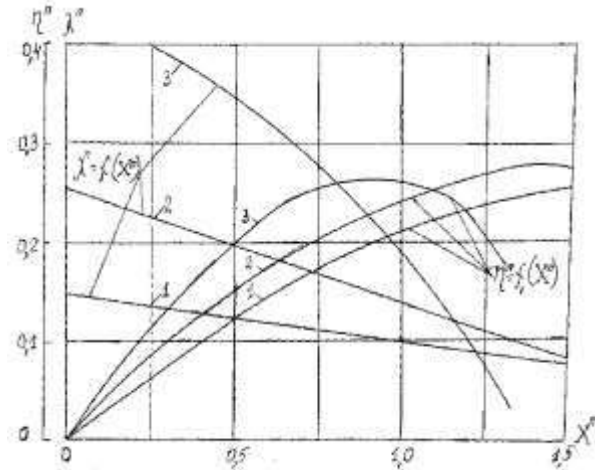


Рис. 3. Безразмерные характеристики $\lambda^n = f(X^n)$ и $\eta^n = f_1(X^n)$ полиструйных насосов при: $\xi_n^i = 0,05$; $\Sigma \xi^i = 0,32$; $\psi = 45^\circ$; $1-m^i = 8$; $2-m^i = 6$; $3-m^i = 4$.

Анализ приведенных безразмерных характеристик показывает, что с увеличением коэффициента подсосывания i -тых одноструйных насосов, входящих в блок полиструйного насоса, значения коэффициента разрежения снижаются, а с уменьшением значений основного геометрического параметра m^i эти значения существенно возрастают и достигают максимума при $m^i = 4$.

Полученные уравнения (13), (14) и (16) безразмерных характеристик полиструйных насосов, по нашему мнению, могут быть использованы для приближенных расчетов их параметров. Дальнейшие

экспериментальные работы позволят уточнить значения соответствующих коэффициентов, входящих в эти уравнения.

Выводы

1. Полученные выражения (13), (14) и (16) являются уравнениями безразмерных характеристик полиструйных насосов, применяемых в установках вакуумного водопонижения. Эти уравнения можно использовать для приближенных расчетов параметров полиструйных насосов.

2. С увеличением значений коэффициента подсосывания i -того одноструйного насоса значения коэффициента разрежения полиструйного насоса снижаются, а с уменьшением их основного геометрического параметра m^i существенно возрастают и достигают максимума при значениях $m^i = 4$.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Смородинов М.И. Водопонизительные установки. – М.: Стройиздат, 1984. – 116с.
2. Болотских Н.С. Оборудование водопонижения в угольной и горнорудной промышленности. – М.: Издательство «Недра», 1973. – 216 с.
3. Дренажный агрегат ST 1/3. Польша: ООО Aqua Industrial. Режим доступа: <http://www.aquaindustrial.cz>, 2016, – 4 с.
4. Игольчатая установка IgE-81. Руководство по эксплуатации, описание конструкции и работы. Польша: Р.Р.Н.У. KLAUDIA sp.zo.o Режим доступа: <http://www.klaudia.eu>, 2016, – 20 с.
5. Болотских Н.С., Сорокин Б.С. Универсальная установка локального вакуумного водопонижения ПУВВ–5МЕА с автоматизированной системой управления. – Харьков: ХНУСА, 2013. – 38 с.
6. Болотских Н.С. Строительное водопонижение в сложных гидрогеологических условиях. – Киев: Будівельник, 1976. – 112 с.
7. Дідур В.А., Савченко О.Д., Пастушенко О.І., Мовчан С.І. Гідравліка, сільськогосподарське водопостачання та гідропневмопривод. – Запоріжжя: вид. Прем'єр, 2005. – 462 с.

Рецензент: д-р техн. наук І.А. Смелянова