

УДК 622.248

А. Н. Рязанов, канд. техн. наук, С. Н. Парфенюк

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», Донецк, Украина

## Исследование работы водоструйного насоса с двумя струйными аппаратами

Разработано математическое описание распределения рабочего потока жидкости по струйным аппаратам двойного водоструйного насоса. Для повышения достоверности результатов проведено моделирование в универсальной программной системе конечно-элементного анализа ANSYS. Даны рекомендации по расчету конструктивных параметров струйных аппаратов насоса.

Ключевые слова: струйный насос, расчет.

Для подъема жидкости из скважин при эксплуатации водоносного горизонта широко применяются насосы центробежного типа с погружным электродвигателем. Они обеспечивают большую подачу при значительных напорах. Однако, при их эксплуатации выдвигаются жесткие требования к содержанию механических примесей в откачиваемой жидкости [1, 2]. Поэтому на практике предварительная откачка жидкости, как правило, выполняется эрлифтом или водоструйным насосом, а уже эксплуатационная – установкой с погружным центробежным насосом. Такой подход требует наличия нескольких откачных средств и дополнительные трудозатраты по их монтажу и демонтажу. При небольшом дебите скважины целесообразнее на обоих этапах освоения водоносного горизонта применить одно и то же средство – водоструйную насосную установку.

Водоструйные насосы просты по конструкции, надежны, не имеют трущихся частей и клапанов, могут откачивать загрязненную воду [3]. Недостатком применения является ограничения по глубине подъема жидкости – до 70–80 м. Для условий большого динамического уровня перспективно применение водоструйного насоса с двумя струйными аппаратами. Водоструйный насос такой конструкции (рис. 1.) состоит из всасывающего патрубка 1, корпуса насоса с наружной трубой 9 и внутренней 8, двух струйных аппаратов – нижнего и верхнего – с соплами 2 и 5 и камерами смешения 3 и 6, диффузорами 4 и 7.

Отличительной особенностью работы двойного водоструйного насоса является разделение потока жидкости, закачиваемой поверхностным насосом по двойной колонне труб, между верхним и нижним струйными аппаратами.

Для того, чтобы прогнозировать технологические параметры работы водоструйного насоса необходимо оценить, в каком количественном соотношении происходит распределение рабочего потока. Для этого могут быть использованы зависимости, применяемые при гидравлическом расчете разветвленного трубопровода [4]:

$$\begin{cases} Q_1 + Q_2 = Q \\ \frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{S_{02} \cdot l_2}{S_{01} \cdot l_1}} \end{cases} \quad (1)$$

где  $Q_1, Q_2$  – расход жидкости на участках работы верхнего струйного аппарата 0-1 и нижнего струйного аппарата 0-2,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q$  – подача поверхностного насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $S_{0i}$  – удельное гидравлическое сопротивление на соответствующем участке (0-1 или 0-2);  $l_i$  – длина соответствующего участка, м.

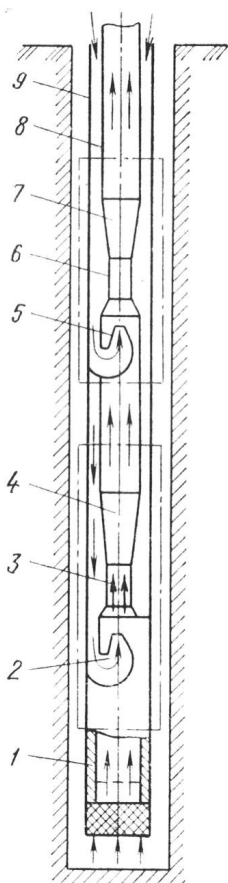


Рис. 1. Схема работы водоструйного аппарата с двумя струйными аппаратами

© А. Н. Рязанов, С. Н. Парфенюк, 2013

В результате решения системы (1) получаем:

$$Q_2 = Q \cdot \frac{\sqrt{S_{01} \cdot l_1}}{1 + \frac{\sqrt{S_{01} \cdot l_1}}{\sqrt{S_{02} \cdot l_2}}}. \quad (2)$$

Удельное гидравлическое сопротивление определяется как

$$S_{0i} = \frac{8 \cdot \lambda_i}{g \cdot \pi^2 \cdot D_{pi}^5}, \quad (3)$$

где  $\lambda_i$  – коэффициент гидравлического трения (Дарси), зависящий от режима движения жидкости;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $D_{pi}$  – расчетный диаметр трубопровода (пересчитывается по площади живого сечения потока), м.

С учетом турбулентного режима движения жидкости выражение для определения удельного гидравлического сопротивления примет вид [7]:

$$S_{0i} = \frac{0,88 \cdot \left( \frac{k_3}{D_{pi}} + \frac{17 \cdot \pi \cdot \nu}{Q_i} \right)^{0,25}}{g \cdot \pi^2 \cdot D_{pi}^5}, \quad (4)$$

где  $\nu$  – кинетическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с

Длину соответствующего трубопровода находим по формуле

$$l_i = l_{ол} + l_3, \quad (5)$$

где  $l_{ол}$  – протяженность трубопровода, м;  $l_3$  – эквивалентная длина, пропорциональная местным сопротивлениям в трубопроводе, м.

Для участка 0-1  $l_{ол}=0$ , для участка 0-2  $l_{ол}=2l_{12}$  ( $l_{12}$  – расстояние от верхнего водоструя до нижнего, м).

В общем виде  $l_3$  определяется как:

$$l_3 = \frac{\sum \xi_i}{\lambda} \cdot D_{pi}, \quad (6)$$

где  $\xi_i$  – коэффициент местного сопротивления.

На пути движения жидкости в струйном аппарате можно выделить следующие виды местных сопротивлений: диффузор, конфузор, вход в трубу и поворот под 90° круглого канала [5, 6]:

$$\sum \xi_i = \xi_{диф} + \xi_{конф} + \xi_{вх} + \xi_{кан}. \quad (7)$$

Задаемся конструктивными параметрами верхнего и нижнего струйных аппаратов. Подставляя приведенные выражения в зависимость (2) и получаем уравнение с одним неизвестным  $Q_2$ .

Его решение производим численным методом с использованием программы *Mathcad*. Расчеты выполнены для следующих параметров: подача поверхностного насоса  $Q$  находится в пределах 60-100 л/мин, расстояние между струйными аппаратами составляло 30-50 м.

Кроме того, изначально задаемся, что верхний и нижний струйные аппараты будут иметь одинаковые конструктивные.

Результаты расчетов сведены в таблицу 1.

Анализ полученных результатов показывает:

1. Количество жидкости  $Q_2$ , идущее на привод нижнего струйного аппарата, составляет 0,34-0,47 от подачи  $Q$  поверхностного насоса.
2. Величина  $Q_2$  обратно пропорциональна расстоянию между струйными аппаратами водоструйного насоса.
3. Для конкретного значения расстояния между струйными аппаратами отношение  $Q_2/Q$  уменьшается по мере увеличения подачи поверхностного насоса.

Табл. 1 – Результаты расчета в программе *Mathcad* распределения потока жидкости, подаваемого поверхностным насосом

$Q$ , л/мин	$l_{12}$ , м	$Q_1$ , л/мин	$Q_2$ , л/мин
60	30	31,7	28,3
	40	34,4	25,6
	50	37,3	22,7
70	30	39,6	30,4
	40	41,1	28,9
	50	46,1	23,9
80	30	45,5	34,5
	40	48,6	31,4
	50	51,5	28,5
90	30	49,7	40,3
	40	55,3	34,7
	50	59,7	30,3
100	30	55,7	44,3
	40	59,9	40,1
	50	66,2	33,8

Результаты, полученные на основании решения в программе *Mathcad* уравнения распределения рабочего потока жидкости, можно считать приближенными по следующим причинам:

1. В предложенной математической модели недостаточно точно учитываются конструктивные особенности местных сопротивлений на пути движения жидкости.
2. Движение жидкости по водоподъемной колонне труб как в интервале между нижним и верхним струйными аппаратами, так и в интервале от верхнего струйного аппарата до поверхности не учтено наличие объема жидкости, подтягиваемой из скважины. Опыт применения водоструев показывает, что этот объем может составлять 10-18 % от количества жидкости, подаваемой на привод нижнего водоструя.

Для повышения достоверности результатов проведено математическое моделирование в универсальной программной системе конечно-элементного анализа *ANSYS*. За основу взята физическая модель двойного водоструйного насоса с наружной колонной из обсадных труб ниппельного соединения диаметром 108 мм и внутренней колонной из бурильных труб геологоразведочного сортамента СБТМ-50. Конструктивные параметры нижнего и верхнего струйных аппаратов одинаковы и приняты такими же, как в расчетах программы *Mathcad*.

Для удобства моделирования сопротивления на пути движения жидкости между наружной и внутренней колонной труб, а также по внутренней водоподъемной колонне на интервалах между нижним и верхним водоструями и верхним водоструем и поверхностью представляются в виде диафрагм.

Диаметр соответствующей диафрагмы определяется исходя из потерь давления по длине и в местных сопротивлениях (сужениях). Результаты расчетов для конкретных конструктивных параметров двойного водоструйного насоса приведены в табл.2-3.

Табл. 2 – Результаты расчета диафрагмы, эквивалентной гидравлическим сопротивлениям в межколонном пространстве водоструйного насоса

Длина двойной колонны труб, м	Потери давления по длине и в местных сопротивлениях, кПа	Диаметр отверстия диафрагмы, мм
50	23,4	33,1
60	28,1	31,7
70	32,8	30,6
80	37,5	29,6
90	42,2	28,7
100	46,9	28

Табл. 3 – Результаты расчета диафрагмы, эквивалентной гидравлическим сопротивлениям в водоподъемной колонне

Длина участка водоподъемной колонны, м	Потери давления по длине и в местных сопротивлениях, кПа	Диаметр отверстия диафрагмы, мм
20	13,3	10,3
30	19,1	9,3
40	25,7	8,7
50	31,5	8,2
60	38,2	7,9
70	43,9	7,6
80	50,6	7,3
90	56,3	7,1

Сеточное разбиение физической модели двойного водоструйного насоса выполнено так, чтобы в узких каналах и отверстиях струйных аппаратов густота сети была большей, в кольцевом пространстве двойной колонны труб, а также в водоподъемной колонне – меньшей (рис.2).

Моделирование работы двойного водоструйного насоса выполнялось с учетом изменения расхода рабочего потока жидкости  $Q$ , глубины расположения снаряда в скважине  $H$ , расстояния между струйными аппаратами  $h$  и динамического уровня  $H_{дин}$ . Качественная картина моделирования, демонстрирующая распределение значений основных параметров: давления и скорости движения жидкости, представлена на рис.3-4. На рис.5 представленная картина получена в результате наложения на распределение давления векторов скорости движения жидкости. Количественные результаты моделирования приведены в табл. 4.

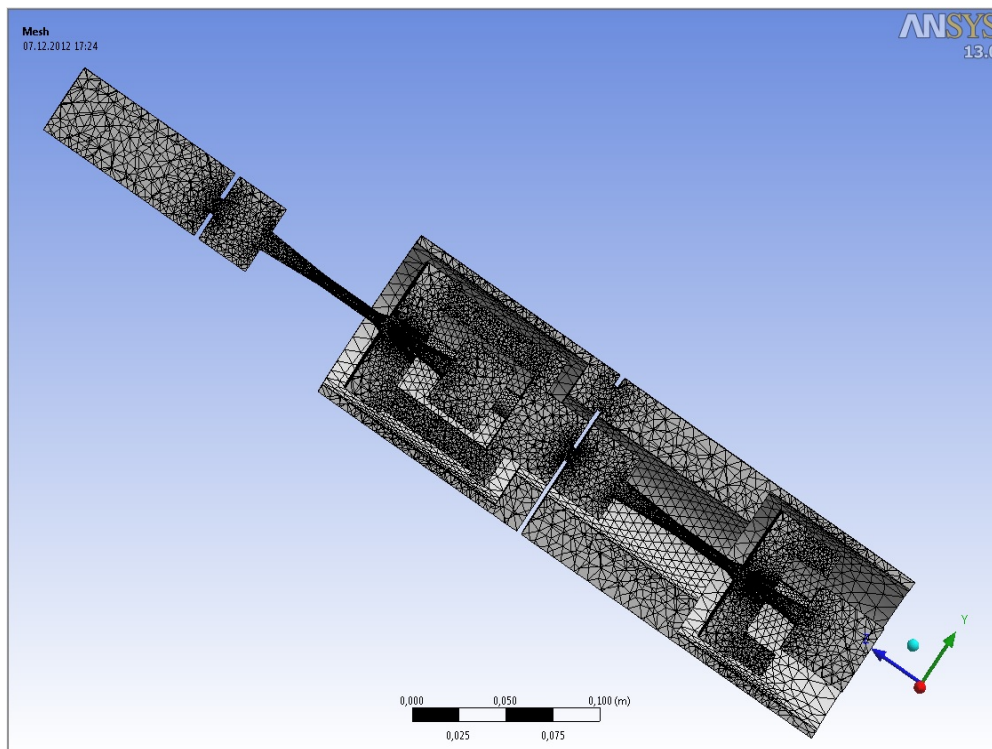


Рис. 2. Создание сеточного разбиения при моделировании работы двойного водоструйного насоса

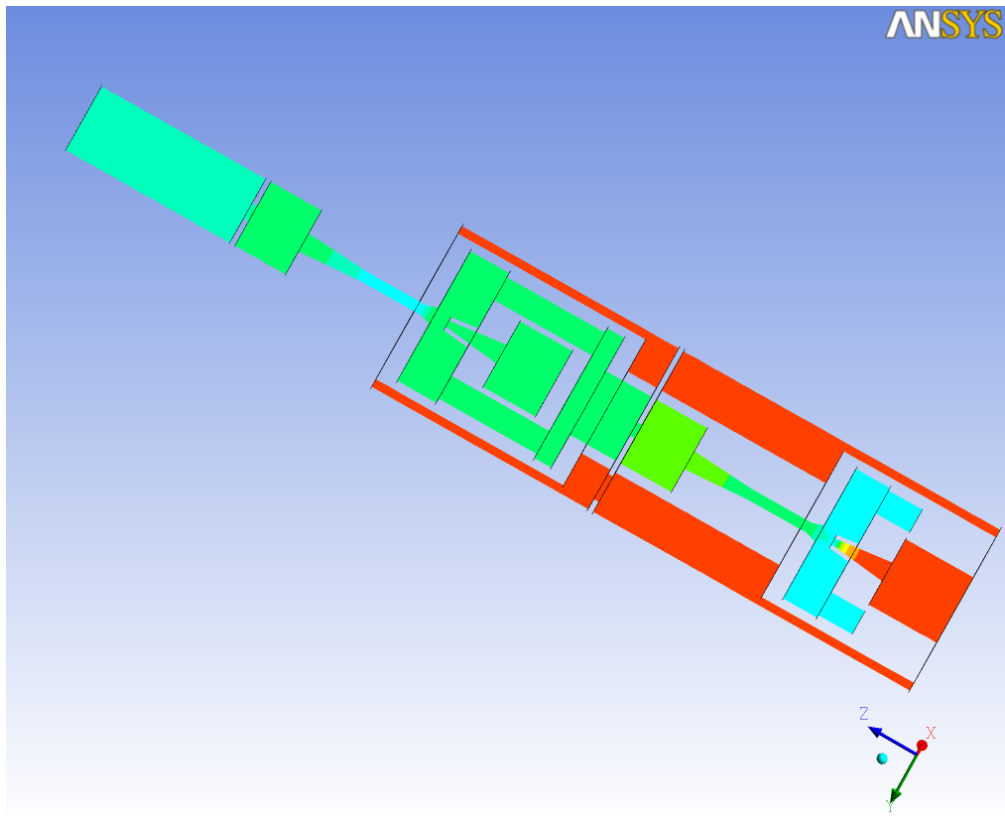


Рис. 3. Распределение давления на пути движения жидкости в двойном водоструйном насосе

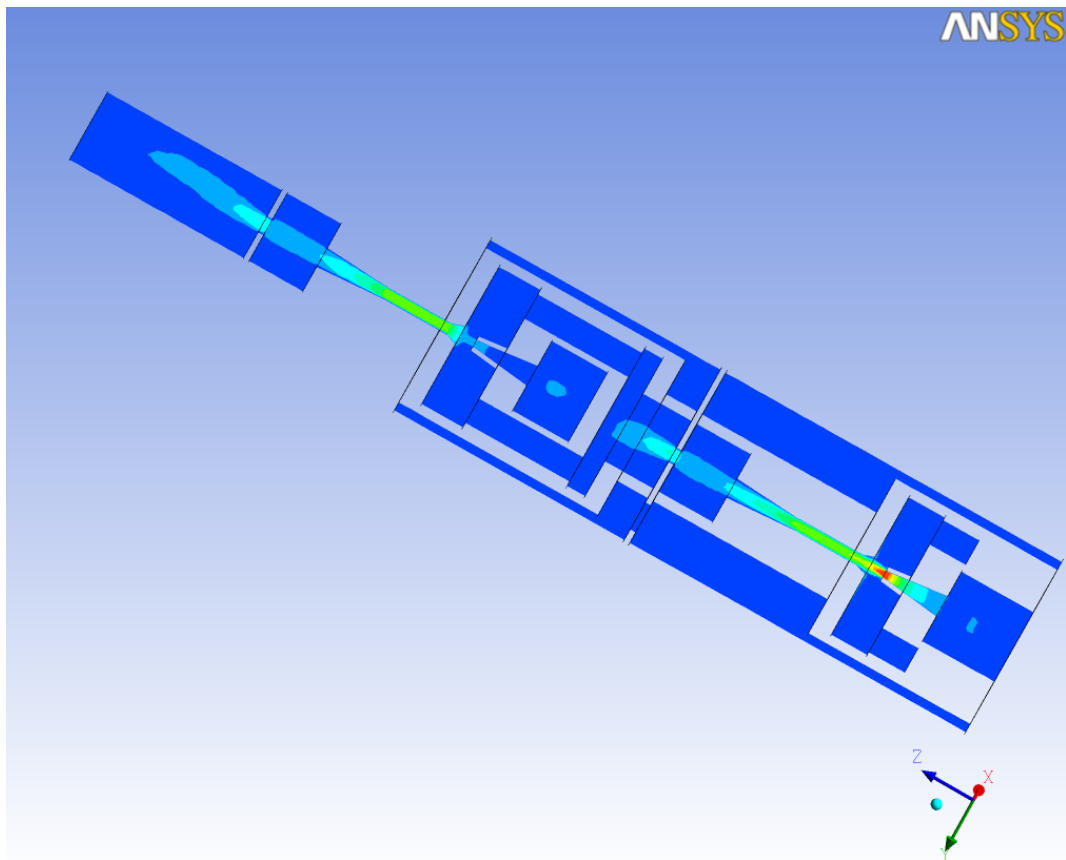


Рис.4. Распределение скоростей движения жидкости в двойном водоструйном насосе

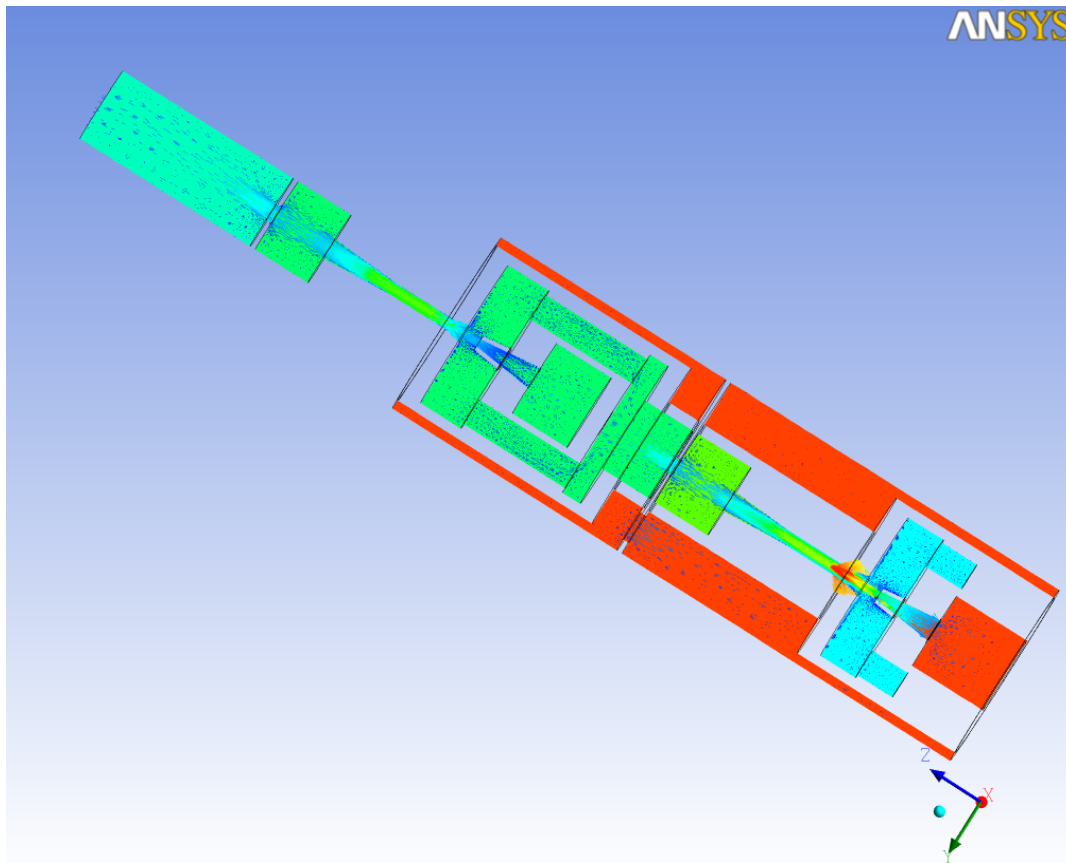


Рис.5. Распределение давления и скоростей движения жидкости (наложение)

Табл. 4 – Количественные результаты математического моделирования двойного водоструйного насоса

$Q$	$H$ , м	$h$ , м	$H_{дин}$ , м	$Q_{верх}$	$Q_{ниж}$	$Q_{всас}$ , л/мин
60	50	30	20	33	27	4,3
			30	34	26	3,8
			40	36	24	2,7
80	80	50	50	50	30	5,2
			60	52	28	4,5
			70	53	27	3,5
100	110	80	80	68	32	5,8
			90	70	30	4,7
			100	71	29	3,0

На основании полученных в ходе исследования построенной модели результатов можно сделать следующие выводы:

1. Минимально допустимое заглубление водоструйного насоса (нижнего струйного аппарата) под динамический уровень, при котором обеспечивается забор жидкости из скважины, составляет 10 м. При этом с увеличением глубины расположения водоструйного насоса в скважине превышение динамического уровня над «всасом» установки должно возрастать.
2. При работе водоструйного насоса основная нагрузка ложится на нижний струйный аппарат. Он обеспечивает забор жидкости из скважины и ее подъем до уровня верхнего струйного аппарата, который поднимает поданный объем жидкости до уровня поверхности земли. В связи с этим, для обеспечения эффективной работы установки целесообразно распределить рабочий поток между верхним и нижним струйными аппаратами в ориентировочном соот-

- ношении 20 и 80 % соответственно. Подобное распределение может быть достигнуто уменьшением диаметра подводящего канала верхнего струйного аппарата.
3. Для разрабатываемого двойного водоструйного насоса порядка 80 % рабочего потока жидкости будет направляться на привод нижнего струйного аппарата при условии, что диаметр подводящего канала верхнего струйного аппарата равняется 3–4 мм, а нижнего 10–12 мм. При таких условиях количество откачиваемой из скважины жидкости возрастает до 8–14 л/мин при подаче поверхностного насоса соответственно 60–100 л/мин.

### Библиографический список

1. Башкатов Д.Н. Прогрессивная технология бурения гидрогеологических скважин / Д.Н. Башкатов, А.В. Панков, А.М. Коломиец. – М.: Недра, 1992. – 286 с.
2. Справочник по бурению и оборудованию скважин на воду / [В.В. Дубровский, М.М. Керченский и др.]. – М.: Недра, 1972. – 512 с.
3. Лямаев Б.Ф. Гидроструйные насосы и установки / Б.Ф. Лямаев. – Л.: Машиностроение, 1988. – 256 с.
4. Альтшуль А.Д. Гидравлика и аэродинамика: учебн. для вузов / А.Д. Альтшуль, Л.С. Животовский, Л.П. Иванов. – М.: Стройиздат, 1987. – 414 с.
5. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления / А.Д. Альтшуль. – М.: Недра, 1982. – 256 с.
6. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 464 с.
7. Киселев П. Г. Гидравлика: основы механики жидкости / П. Г. Киселев. – М.: Энергия, 1980. – 380 с.

Надійшла до редакції 18.05.2013

А. Н. Рязанов, С. М. Парфенюк

*ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Донецьк, Україна*

#### Дослідження роботи струменевого насоса з двома струменевими аппаратами

Розроблено математичний опис розподілу робочого потоку рідини по струменевим аппаратам подвійного водоструминного насоса. Для підвищення достовірності результатів проведено моделювання в універсальній програмній системі звичайно-елементного аналізу ANSYS. Дано рекомендації з розрахунку конструктивних параметрів струменевих апаратів насоса.

Ключові слова: струменевий насос, моделювання, розрахунок.

A. Ryazanov, S. Parfenyuk

*Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine*

#### Research of a jet pump with two jet units

We developed a mathematical description of the distribution of the working stream of fluid between jet devices of a dual water-jet pump. To improve the reliability of the results we made a simulation in a universal software system of finite-element analysis ANSYS. The paper provides recommendations for the calculation of the design parameters of a jet pump.

Keywords: jet pump, modeling, design.