
УДК 622.817.4

В.А. МАРКИН, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник,
Б.П. ЮРЧЕНКО, канд. мед. наук, ст. науч. сотрудник,
Н.Л. ТИМОФЕЕВА, науч. сотрудник; МакНИИ, Макеевка,
В.Н. КОЧЕРГА, гл. технолог, ИГТМ НАН Украины, Днепрпетровск

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РЕЖИМА РАБОТЫ ВАКУУМ-НАСОСОВ ПРИ НАЛИЧИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ВСАСЕ И НАГНЕТАНИИ

Обоснована необходимость и изложена методика расчета параметров работы вакуум-насосов: производительность, давление на всасе и нагнетании с учетом сопротивления нагнетательной сети.

Ключевые слова: водокольцевые вакуум-насосы, сопротивление на нагнетании, режим работы вакуум-насосов, давление на всасе, давление на нагнетании, производительность.

Основной задачей дегазации является снижение выделения метана в горные выработки при интенсивной разработке газоносных угольных пластов. Каптируемая из шахт метановоздушная смесь, при соблюдении технологии ведения дегазационных работ, пригодна для использования в качестве источника энергии. В случае подачи каптируемого газа потребителю (котельные, когенерационные станции, установки по обогреву стволов и т.д.) нередко возникает необходимость прокладки трубопровода значительной длины от нагнетательного патрубка вакуум-насоса. Наличие сопротивления на нагнетательной стороне вакуум-насоса приводит к снижению его производительности. Отсутствие в нормативных документах методики учета влияния сопротивления нагнетательной сети на режим работы вакуум-насосов ведет к ошибкам при проектировании дегазационных систем.

Целью работы является разработка методики расчета параметров работы водокольцевых вакуум-насосов с учетом сопротивления нагнетательной сети. Работа выполнена на основе исследований, проведенных в МакНИИ.

Задача формулируется следующим образом. Задана схема дегазационной сети, длины и диаметры труб её отдельных участков, тип и количество одновременно параллельно работающих вакуум-насосов. Необходимо определить режим работы вакуум-насосов (производительность, давление на всасе и нагнетании).

Для решения этой задачи необходимо знать характеристики сети и вакуум-насосов со стороны всаса и нагнетания.

Для расчета характеристик дегазационной сети используются формулы для определения давления на всасывающем и нагнетательном трубопроводах, приведенные в СОУ 10.1.00174088.001-2004 «Дегазация угольных шахт. Требования к способам и схемы дегазации» [1]:

а) для всасывающего трубопровода:

$$P_{вс} = \sqrt{P_{\bar{o}}^2 - \frac{4,8 \cdot 10^{-5} \cdot l \cdot Q^2 \cdot \gamma}{d^{5,33}}}; \quad (1)$$

б) для нагнетательного трубопровода:

$$P_{н} = \sqrt{P_{\bar{o}}^2 + \frac{4,8 \cdot 10^{-5} \cdot l \cdot Q^2 \cdot \gamma}{d^{5,33}}}, \quad (2)$$

где $P_{вс}$ и $P_{н}$ – давление на всасе и нагнетании вакуум-насосов, мм рт.ст.;

l – длина трубопровода, м;

Q – производительность вакуум-насосов, м³/мин;

γ – плотность метановоздушной смеси, кг/м³;

d – внутренний диаметр трубопровода, м.

Для водокольцевых вакуум-насосов не изучена зависимость между их производительностью и давлением на всасе и нагнетании. На основе стендовых испытаний обычно даются частные случаи этой зависимости:

$$Q = f(P_{вс}) \text{ при } P_{н} = P_{\bar{o}} \text{ и } Q = f(P_{н}) \text{ при } P_{вс} = P_{\bar{o}}.$$

Анализ характеристик водокольцевых вакуум-насосов, работающих в режиме воздуходувок [2, 3], показывает, что при постоянной подаче охлаждающей воды и постоянных оборотах рабочего колеса все они описываются уравнением вида:

$$Q_{m'} = n \cdot Q_m \left[1 - \left(\frac{P_{н} - P_{\bar{o}}}{P_m - P_{\bar{o}}} \right)^{1,44} \right], \quad (3)$$

где $Q_{m'}$ – суммарная производительность вакуум-насосов при отсутствии сопротивления на всасе;

n – количество одновременно параллельно работающих вакуум-насосов одного типа;

Q_m – максимальная производительность насоса при отсутствии сопротивления на всасе и нагнетании, приведенная к стандартным условиям;

P_m – максимальное абсолютное давление нагнетания при $Q = 0$.

При отсутствии сопротивления на нагнетании характеристика насоса по всасу описывается уравнением:

$$Q = \frac{n \cdot Q_m}{A_m \cdot P_{\bar{o}}} (P_{вс} - P_o), \quad (4)$$

где P_o – остаточное давление на всасе при $Q = 0$;

A_m – относительный вакуум, доли ед.

При наличии сопротивления на нагнетании характеристика насоса на всасе изменится и будет параллельная характеристике при отсутствии сопротивления:

$$Q_{m'} - Q = \frac{n \cdot Q_m}{A_m \cdot P_{\bar{o}}} (P_{\bar{o}} - P_{вс}), \quad (5)$$

преобразуем (5) к виду:

$$Q = Q_{m'} - \frac{n \cdot Q_m}{A_m} \left(1 - \frac{P_{вс}}{P_{\bar{o}}} \right). \quad (6)$$

Подставляя значения $Q_{m'}$ из (3) в (6) после преобразований получим:

$$Q = n \cdot Q_m \left[1 - \left(\frac{P_n - P_{\bar{o}}}{P_m - P_{\bar{o}}} \right)^{1,44} - \frac{1}{A_m} \left(1 - \frac{P_{вс}}{P_{\bar{o}}} \right) \right]. \quad (7)$$

При решении поставленной задачи для нахождения неизвестных Q , P_n и $P_{вс}$ необходимо решить систему трех нелинейных уравнений, которая в общем виде аналитически не может быть решена. Решение может быть получено графоаналитическим методом.

Придавая значения $P_{вс}$ от $P_{\bar{o}}$ до P_o с интервалом $\Delta P_{вс} = 50$ мм рт.ст. по уравнению, полученному из (1):

$$Q = \sqrt{\frac{(P_{\bar{o}}^2 - P_{\bar{вс}}^2) \cdot d^{5,33}}{4,8 \cdot 10^{-5} \cdot l \cdot \gamma}} \quad (8)$$

определяются соответствующие им значения Q , по которым строится характеристика сети на всасе (см. пример и рис.). На ПК построение характеристик производится в Excel.

Далее необходимо построить характеристику вакуум-насосов на нагнетании с учетом сопротивления на всасе. Для этого из (7) определяется давление нагнетания при заданных Q и $P_{\bar{вс}}$:

$$P_{\bar{н}} = P_{\bar{o}} + (P_m - P_{\bar{o}}) \left[1 - \frac{1}{A_m} \left(1 - \frac{P_{\bar{вс}}}{P_{\bar{o}}} \right) - \frac{Q}{n \cdot Q_m} \right]^{0,7} \quad (9)$$

Значения Q_m , P_m и A_m принимаются по таблице 1. Для условий Донбасса рекомендуется принимать $P_{\bar{o}} = 750$ мм рт.ст.

Таблица 1

Характеристики вакуум-насосов

Показатели	Тип вакуум-насосов				
	ВВН-25	ВВН-50	НВ-50	ДВВН-150	ВВН-150
Максимальная производительность насоса, Q_m , м ³ /мин	27,0	50,0	50	150	150
Относительный максимальный вакуум, A_m , доли. ед.	0,96	0,95	0,90	0,85	0,85
Максимальное абсолютное давление нагнетания при $Q = 0$, P_m , мм рт.ст.	2325	1875	1875	1875	1875
Остаточное давление на всасе при $Q = 0$, P_o , мм рт.ст.	30	38	75	113	113

Подставляя в (9) значения $P_{\bar{вс}}$ и Q , вычисленных по (8), определяется давление на нагнетании $P_{\bar{н}}$ и строится характеристика вакуум-насоса на нагнетании с учетом сопротивления на всасе (см. пример и рис.).

Затем, придавая значения $P_{\bar{н}}$ от P_m до $P_{\bar{o}}$ с интервалом $\Delta P_{\bar{н}} = 100$ мм рт.ст. по уравнению, полученному из (2), определяют соот-

ветствующие им значения Q , по которым строится характеристика сети на нагнетание (см. пример и рис.)

$$Q = \sqrt{\frac{(P_n^2 - P_0^2) \cdot d^{5,33}}{4,8 \cdot 10^{-5} \cdot l \cdot \gamma}} \quad (10)$$

Точка «С» пересечения характеристики нагнетательной сети и характеристики вакуум-насоса на нагнетании, полученной с учетом сопротивления всасывающей сети, определит режим работы вакуум-насоса со стороны нагнетания P_n и Q . Для определения давления на всасе необходимо из точки «С» опустить перпендикуляр на ось производительности Q . Пересечение его с характеристикой всасывающего трубопровода определит давление на всасе $P_{вс}$ по оси ординат.

Пример. Для транспорта метановоздушной смеси будут использоваться два вакуум-насоса ВВН-50, работающих параллельно. Всасывающий газопровод проложен из труб внутренним диаметром 0,31 м протяженностью 2300 м. Нагнетательный газопровод из труб внутренним диаметром 0,255 м протяженностью 3070 м. Плотность транспортируемого газа $\gamma = 1,0$ кг/м³.

Придавая значения $P_{вс}$ от $P_{вс} = P_0$ до $P_{вс} = P_n$ с интервалом $\Delta P_{вс} = 50$ мм рт.ст., по уравнению (8) вычисляем соответствующие им значения Q ;

$$Q = \sqrt{\frac{(750^2 - 700^2) \cdot 0,31^{5,33}}{4,8 \cdot 10^{-5} \cdot 2300 \cdot 1}} = 35,7 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Результаты подобных расчетов для других значений $P_{вс}$ приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры двух параллельно работающих вакуум-насосов ВВН-50 при расчетных значениях всасывающего и нагнетательного трубопроводов

$P_{вс}$, мм рт.ст.	750	700	650	600	550	500	400	300	200	100
Q , м ³ /мин	0	35,7	49,7	59,7	67,7	74,2	84,2	91,2	96,0	98,7
P_n , мм рт.ст.	1875	1512	1304	1106	874					

По данным этой таблицы строим характеристику сети на всасе 1 (см. рис.). Точка её пересечения с характеристикой двух параллельно рабо-

тающих насосов в режиме всасывания 2 при отсутствии сопротивления на нагнетании (точка «А») характеризует их максимально возможную производительность при работе на заданную сеть $Q = 69 \text{ м}^3/\text{мин}$ и давление на всасе вакуум-насоса $P_{вс} = 540 \text{ мм рт.ст.}$

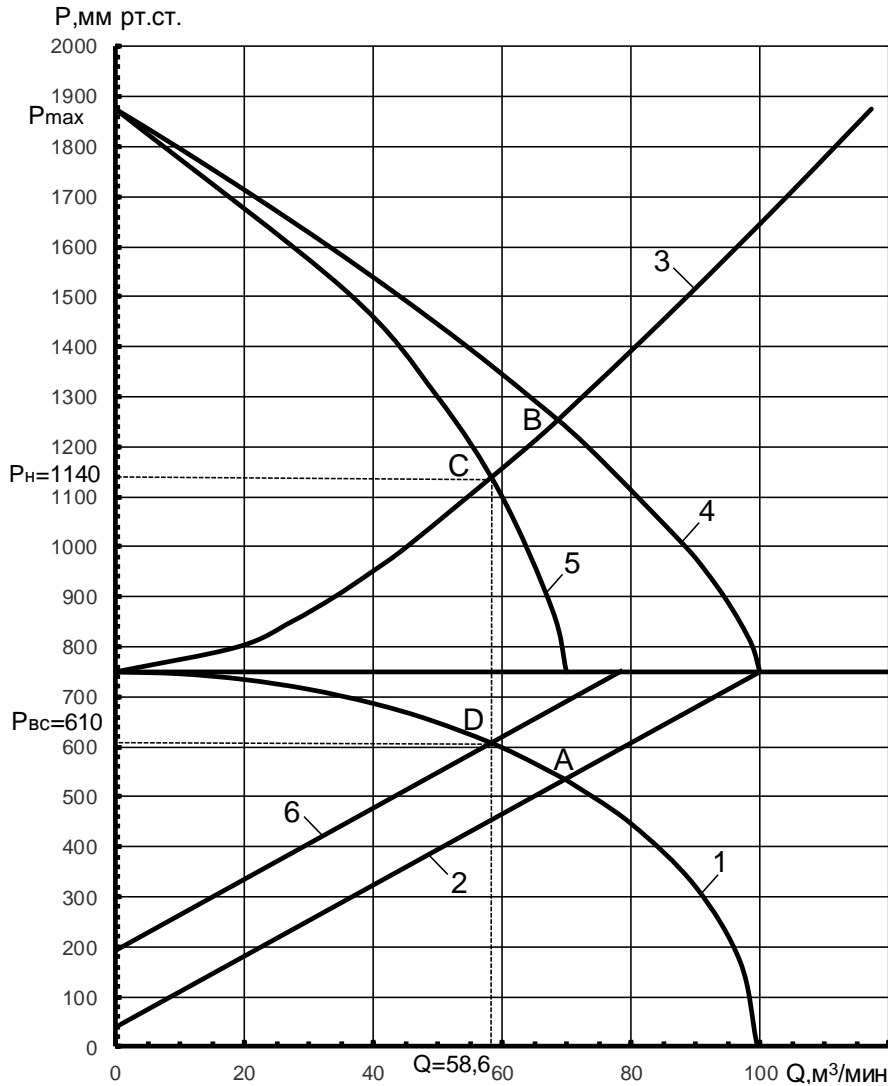


Рис. Характеристики дегазационной сети и двух параллельно работающих вакуум-насосов ВВН-50 на всасе и нагнетании:

1 – характеристика газопровода на всасе длиной 2300 м и внутренним диаметром 0,31 м;

2 – характеристика двух параллельно работающих вакуум-насосов ВВН-50 на всасе при отсутствии сопротивления на нагнетании ($P_n = P_0$);

3 – характеристика газопровода на нагнетании длиной 3070 м и внутренним диаметром 0,255 м;

4 – характеристика двух параллельно работающих вакуум-насосов ВВН-50 на нагнетании при отсутствии сопротивления на всасе ($P_{вс} = P_{\bar{o}}$);

5 – характеристика двух параллельно работающих вакуум-насосов ВВН-50 на нагнетании при наличии сопротивления на всасе.

6 – характеристика двух параллельно работающих вакуум-насосов ВВН-50 на всасе при наличии сопротивления на нагнетании.

Для построения характеристики сети на нагнетании придаются значения P_H от P_m до $P_{\bar{o}}$ с интервалом $\Delta P_H = 100 - 200$ мм рт.ст., и по уравнению (10) вычисляются соответствующие им значения Q

$$Q = \sqrt{\frac{(1875^2 - 750^2) \cdot 0,255^{5,33}}{4,8 \cdot 10^{-5} \cdot 3070 \cdot 1}} = 117,3 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Результаты подобных расчетов для других значений P_H приведены в таблице 3, по данным которой строим характеристику сети на нагнетании 3 (см. рис.). Точка её пересечения с характеристикой двух параллельно работающих вакуум-насосов в режиме воздухоудвки 4 при отсутствии сопротивления на всасе (точка «В») характеризует их производительность при работе на заданную сеть $Q = 68,5$ м³/мин и давление на нагнетательном патрубке вакуум-насоса $P_H = 1245$ мм рт.ст.

Таблица 3

Результаты расчетов характеристики сети на нагнетании

$P_{вс}$, мм рт.ст.	1875	1800	1600	1400	1200	1000	800
Q , м ³ /мин	117,3	111,7	96,5	80,7	64,0	45,2	19

Для построения характеристики вакуум-насоса на нагнетании с учетом сопротивления на всасе воспользуемся уравнением (9).

Подставляя в (9) значения $P_{вс}$ и Q из таблицы 2, определим соответствующие им значения нагнетания.

При $P_{вс} = 700$ мм рт.ст. и $Q = 35,7$ м³/мин определим:

$$P_H = 750 + (1875 - 750) \left[1 - \frac{1}{0,95} \left(1 - \frac{700}{750} \right) - \frac{35,7}{2 \cdot 50} \right]^{0,7} = 1512 \text{ мм рт.ст.}$$

Аналогично производим расчеты по (9) для других значений $P_{вс} > 540$ мм рт.ст. и $Q < 69$ м³/мин (см.табл.2).

Точка «С» пересечения характеристики сети на нагнетании с характеристикой двух параллельно работающих насосов 5 (см. рис.) с учетом сопротивления сети на всасе определит производительность дегазационной системы $Q = 58,6 \text{ м}^3/\text{мин}$ и давление нагнетания $P_H = 1140 \text{ мм рт.ст.}$

Для определения давления на всасе из точки «С» опускается перпендикуляр на ось абсцисс до пересечения с характеристикой сети на всасе – точка «D». Через эту же точку проходит характеристика двух параллельно работающих вакуум-насосов при наличии сопротивления на нагнетании 6. Ордината этой точки равна давлению на всасе $P_{вс} = 610 \text{ мм рт.ст.}$

ВЫВОДЫ

Предлагаемая методика позволяет при проектировании дегазационных систем рассчитывать режим работы вакуум-насосов (производительность, давление на нагнетании и всасе) с учетом сопротивления нагнетательной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дегазация угольных шахт. Требования к способам и схемы дегазации: СОУ 10.1.00174088.001-2004. – Офиц. изд. – К., 2004. – 162 с. – (Нормативный документ Минтопэнерго Украины).
2. Паспорт и инструкция по эксплуатации насоса водокольцевого НВ-50. Донецк, 1969. –24 с.
3. Морев А. М. Исследование условий и режимов работы подземных вспомогательных вакуум-насосов дегазационных станций: Техотчет по теме №8, / А. М. Морев, А. М. Варакин, Б. А. Инюшин. –Макеевка-Донбасс, 1971. – 136 с.

Получено: 18.03.2014

Обґрунтовано необхідність та викладено методика розрахунку параметрів роботи вакуум-насосів: продуктивність, тиск на всмоктуванні та нагнітанні з врахуванням опору нагнітальної мережі.

Ключові слова: водо кільцеві вакуум-насоси, опір на нагнітанні, режим роботи вакуум-насосів, тиск на всмоктуванні, тиск на нагнітанні, продуктивність.

The necessity of calculation methods has been validated and set out for calculation of operating conditions of vacuum air-pumps: through-put capacity, suction and discharge pressure taking into account the resistance of discharging network.

Keywords: liquid-packed ring vacuum systems, discharging resistance, operating conditions of vacuum air-pumps, suction pressure, discharge pressure, through-put capacity.