



**К. БАХАУС**, инж.  
(Государственный институт  
УМЗИХТ и союза «Шахтный газ»,  
Германия)



**И. А. ЯЦЕНКО**, инж.  
(Министерство энергетики  
и угольной промышленности  
Украины)



**В. И. ОРЛОВ**, инж.  
(ПАО «Шахтоуправление  
«Донбасс»)



**В. В. КАСЬЯНОВ**,  
канд. техн. наук  
(ООО «Эко-Альянс»)

## Расчет вакуума и выбор насоса вакуумно-насосной станции шахтной дегазации

*Рассматриваются вопросы потери давления в дегазационной сети, вакуум и подсос воздуха. Сравниваются вакуумно-насосные станции с водокольцевыми и ротационными насосами, приводятся диаграммы работы компрессоров разной мощности при различном вакууме. Для шахтных мобильных ВНС технические и экономические преимущества имеют ротационные компрессоры подачи до 50 м<sup>3</sup>/мин и разностью давления до 500 мбар.*

При проектировании шахтной дегазации важно определить объем метановоздушной смеси (МВС), который необходимо будет каптировать согласно плану развития горных работ и ожидаемому газовыделению как из угольного массива, так и из выработанного пространства. Это количество смеси играет важную роль при проектировании трубопровода, по которому ее будут транспортировать. Ограничительный фактор всей дегазационной системы – необходимый и допустимый вакуум, создаваемый вакуумно-насосной станцией (ВНС) шахты.

Большинство ВНС, оптимальных по размеру, подаче и стоимости, имеют разницу давления до 500 мбар. Для утилизационных установок (мини-ТЭС, котельных, калориферов) требуется около 100 мбар избыточного давления, а на входе всасывания трубопровода

у скважин достаточен вакуум в 50 – 80 мбар, больший, как правило, технологически и экономически не оправдан. Резерв трубопровода желательнее иметь на уровне 40 %. В результате максимальные потери давления в трубопроводе не могут превышать 250 мбар. При потерях давления в 350 мбар резерв в увеличении МВС будет только на уровне 20 %.

Разрежение более 50 – 80 мбар в скважинах приводит лишь к увеличению подсосов воздуха из горных выработок через трещины в угольном пласте и в боковых породах, а также из-за негерметичности в системе газопроводов, особенно вблизи добычных работ, что значительно снижает эффективность дегазации. Подземные дегазационные сети испытывают значительное воздействие от движения боковых горных пород, особенно в местах стыков и уплотнений, поэтому именно их необходимо регулярно контролировать.

Разветвленные системы трубопроводов, как правило, усложняют дегазацию, снижают концентрацию МВС. Низкое содержание метана, в свою очередь, свидетельствует о плохом состоянии дегазационного трубопровода. Часто лишь достаточно устранить негерметичность,

чтобы получить метановоздушную смесь с концентрацией метана более 30 %, уже обеспечивающую его эффективную утилизацию. Полноценному и эффективному транспортированию газа также мешает наличие воды в трубах. Поддержание высокого уровня герметичности трубопроводов на поверхности и в подземных выработках — одна из основных задач дегазационных служб шахт.

При разработке системы шахтной дегазации должны быть учтены такие важные вопросы:

- определение правильных оптимальных параметров трубопровода дегазационной системы;
- организация контроля и поддержание подземного трубопровода, особенно в зонах очистных работ, во избежание негерметичности и скопления влаги;
- уплотнение скважин и подбор подходящего разрежения, чтобы избежать подсосываний воздуха напрямую из шахтной вентиляции.

При соблюдении этого достигается необходимая эффективность дегазационной системы, повышается содержание метана в каптируемом газе, что расширяет возможности его утилизации.

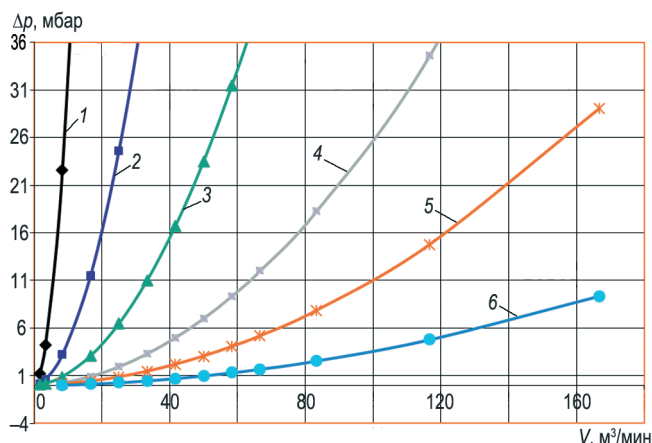
**Оптимизация вакуума трубопроводов.** Важно, чтобы потери давления в трубопроводах не приводили к превышению запланированных (организационно и экономически допустимых) 250 мбар. Более высокое разрежение в большинстве случаев вызывает незначительное увеличение откачиваемого метана, что можно обосновать при рассмотрении факторов, влияющих на потери давления в системе.

Потери давления из-за трения определяются по формуле

$$\Delta p = (\lambda L \rho v^2) / (2d_i) = v^2 [(\lambda L \rho) / (2d_i)],$$

- где  $\lambda$  — коэффициент трения в трубопроводе;  
 $L$  — длина трубопровода, м;  
 $\rho$  — плотность МВС, кг/м<sup>3</sup>;  
 $v$  — скорость потока МВС, м<sup>3</sup>/с;  
 $d_i$  — внутренний диаметр трубопровода, м.

На рис. 1 показаны потери давления в трубопроводах различного диаметра на каждые 100 м длины. Как следует из диаграммы, при подаче метановоздушной смеси 40 м<sup>3</sup>/мин в трубопроводе диаметром 200 мм потери давления составляют 14,5 мбар, при длине газопровода 1000 м — примерно 145 мбар, при подаче 60 м<sup>3</sup>/мин — уже



**Рис. 1.** Зависимость потерь давления  $\Delta p$  на 100 м длины дегазационного трубопровода от объема подачи  $V$  метановоздушной смеси: 1 – 6 – диаметры трубопровода 100, 150, 200, 250, 300, 400 мм.

32 мбар, т. е. увеличение подачи на 50 % увеличивает потери давления более чем на 100 %. Общие потери давления можно рассчитать, суммируя потери отдельных участков по всей длине трубопровода. При этом участки подбирают таким образом, чтобы подача МВС на каждом участке и диаметр трубопровода каждого участка были одинаковыми.

**Пример.** Трубопровод от вакуумно-насосной станции до места непосредственного каптажа шахтного метана разделен на участки с одинаковой подачей. Для каждого участка имеются исходные данные, что позволяет подсчитать приблизительные потери по всему трубопроводу (табл. 1).

Приведен не точный расчет сети, а дана лишь оценка в первом приближении, позволяющая оценить систему в целом.

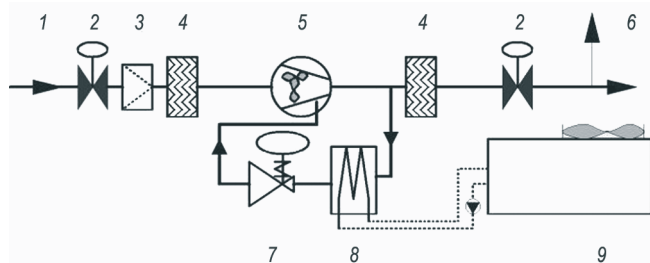
Узкое место в системах «ВНС – трубопроводы – поверхностная скважина» в большинстве случаев – диаметры труб и скважины. Это не всегда можно компенсировать увеличением вакуума, и только увеличение диаметра трубопроводов на «узких» участках позволяет работать при меньшем значении вакуума.

**Безопасность вакуумно-насосных станций.** Наряду с сетью трубопроводов, по которой транспортируется газ, важное значение для дегазации и утилизации имеют дегазационные скважины и компрессорное оборудование с высоким уровнем производственной безопасности. В связи с

Таблица 1

Показатели	Подача метановоздушной смеси на участках							
	1a	2a	2b	3a	4a	5a	6a	6b
Диаметр трубопровода, мм	100	150	150	200	250	300	400	400
Длина участка трубопровода, мм	300	450	300	300	300	3600	400	1600
Подача МВС, м <sup>3</sup> /ч	150	450	550	800	1800	3600	4200	8000
Подача МВС, поступающей из других трубопроводов, м <sup>3</sup> /ч	–	300	100	1250	0	800	600	3800
Потери давления, мбар	6,94	13,86	13,37	28,20	9,34	65,82	7,86	106,23
<b>Всего</b> потери, мбар	<b>251,61</b>							

внедрением на шахтах стран СНГ вакуумно-насосных станций с ротационными (сухими) компрессорами (насосами) в последние годы ведется дискуссия об их безопасности по сравнению с ВНС с водокольцевыми насосами. Сторонники водокольцевых насосов, безусловно, правы, если рассматривать только насосы. Но к эксплуатации на шахтах допущены не компрессоры, а вакуумно-насосные станции, в которых безопасность компрессоров достигается пламяпреградителями, устанавливаемыми с обеих сторон каждого компрессора (рис. 2).



**Рис. 2.** Схема подключения ротационного компрессора с пламяпреградителями и дополнительной системой охлаждения газа: 1 – поступление газа; 2 – автоматический вентиль аварийного отключения; 3 – фильтр; 4 – пламяпреградители; 5 – ротационный компрессор; 6 – выход газа; 7 – вода для охлаждения газа; 8 – холодильник байпаса; 9 – вентиль байпаса.

Равнозначная безопасность ВНС с ротационными компрессорами и с водокольцевыми насосами подтверждается специальным заключением немецкого горного института DMT GmbH & Co. KG, этого же мнения и немецкий государственный институт УМЗИХТ, выполняющий для Европейского Союза исследование по утилизации шахтного метана. Пламяпреградители надежны, и даже в случае их засорения уровень безопасности ВНС не снижается, так как станция автомати-

чески отключается. В руководстве по факельным установкам с ротационными компрессорами указано, что при концентрации метана ниже 25 % сжигание метановоздушной смеси прекращается, а сама установка, только уже как дегазационная станция, может продолжать работать.

В Германии разрешена дегазация и утилизация метановоздушной смеси в мини-ТЭС при концентрации метана от 20 % (нужно оформлять разовое разрешение на каждую станцию). Есть ограничения на транспортировку по трубопроводам МВС с концентрацией метана менее 25 (20) % независимо от того, какими компрессорами (водокольцевыми или ротационными) оснащена ВНС. В Германии из четырех действующих шахт на двух («Вест» и «Иббенбюрен») работают ВНС с сухими (ротационными) насосами. На закрываемых шахтах устанавливаются ВНС только с ротационными компрессорами.

Опыт эксплуатации ВНС с ротационными компрессорами в течение 15 лет во многих странах мира, в том числе 6 лет в странах СНГ, показал их высокую надежность и следующие преимущества:

- регулирование вакуума в больших пределах – 50 – 500 мбар;
- хорошее регулирование по объему газа – 30 – 100 % (у водокольцевых 70 – 100 %);
- исключена опасность замерзания, что важно в странах СНГ;
- нет воды в метановоздушной смеси на выходе (значимо при ее утилизации);
- компактность и мобильность;
- экономия до 30 % электроэнергии по сравнению с водокольцевыми насосами.

**Вакуум и характеристики компрессоров вакуумно-насосных станций.** С увеличением вакуума, особенно после 400 – 500 мбар, значитель-

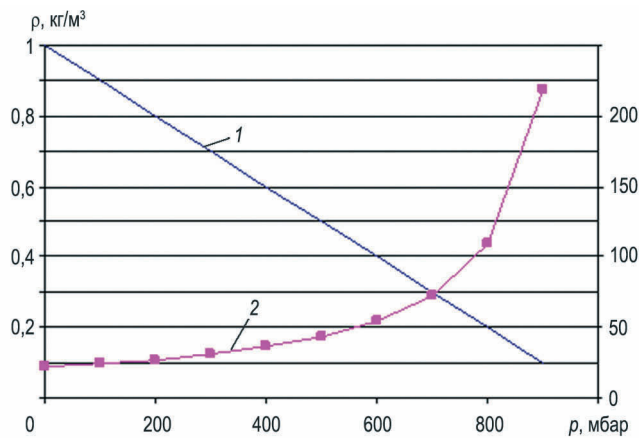


Рис. 3. Зависимость между вакуумом  $p$  компрессора, мощностью  $N$  привода и плотностью метановоздушной смеси (1 при 45 м<sup>3</sup>/мин) компрессоров класса F-90 (фирма RKR GmbH): 1 – плотность; 2 – мощность привода.

но ухудшаются все технико-экономические показатели работы компрессоров (рис. 3, 4).

Равные объемы метановоздушной смеси при различном вакууме содержат ее разное количество по массе. Из рис. 3 видно, что с увеличением вакуума от 500 до 900 мбар плотность уменьшается в 5 раз, т. е. одним и тем же компрессором откачивается только 1/5 часть МВС. Кроме того, при этом резко возрастает необходимая электрическая мощность привода и удельный расход электроэнергии. Расход электроэнергии компрессора F-60 и плотность метановоздушной смеси в зависимости от вакуума приведены в табл. 2.

*Пример.* Данные для газовой смеси: CH<sub>4</sub> – 45 %, CO<sub>2</sub> – 1 %, O<sub>2</sub> – 11 %, N<sub>2</sub> – 43 %; плотность равна 0,8884 кг/м<sup>3</sup> при нормальных условиях.

При откачивании газа компрессором с вакуумом 200 мбар подача объема метановоздушной смеси при нормальных условиях составит 31,9 м<sup>3</sup>/мин, массы МВС – 28,2 кг/мин (32 м<sup>3</sup>/мин × 0,884 кг/м<sup>3</sup>), а необходимая мощность компрессора – 42,6 кВт.

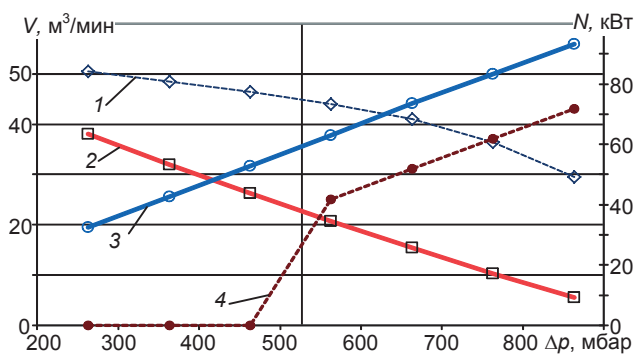


Рис. 4. Рабочие характеристики компрессора класса F-60. Вертикальная линия показывает, при каком вакууме необходимы компрессоры с охлаждением (байпасом): 1 и 2 – максимальные объемы  $V$  подачи МВС на входе при рабочих и нормальных условиях; 3 – максимальная мощность  $N$  привода; 4 – объем метановоздушной смеси для охлаждения при 20 °С.

При вакууме 500 мбар подача объема метановоздушной смеси при нормальных условиях составит 20,7 м<sup>3</sup>/мин, массы – 18,3 кг/мин (20,7 м<sup>3</sup>/мин × 0,884 кг/м<sup>3</sup>), а необходимая мощность компрессора – 63,1 кВт.

При вакууме 800 мбар будет откачиваться 6,5 м<sup>3</sup> МВС при нормальных условиях, подача массы МВС составит 5,7 кг/мин (6,5 м<sup>3</sup>/мин × 0,884 кг/м<sup>3</sup>) и необходимая электрическая мощность – 93,2 кВт.

**Охлаждение байпасом.** Важным фактором для характеристики работы компрессоров является температура метановоздушной смеси на выходе. Общая формула:  $V = V_0 [(p_0 T_1)/(p_1 T_0)]$ , а при постоянной температуре:  $pV = \text{const}$ . На практике это означает, что при вакууме более 450 – 500 мбар приходится охлаждать МВС в компрессоре (см. рис. 2), что значительно ухудшает все технические и экономические показатели: увеличиваются габариты и масса, снижается КПД, растет стоимость (на рис. 4 – значения диаграмм с правой стороны вертикальной линии), поскольку часть откачиваемого газа охлаждается через си-

Таблица 2

Вакуум, мбар	Подача объема МВС при н. у., м <sup>3</sup> /мин	Подача массы МВС, кг/мин	Мощность привода, кВт	Удельный расход электроэнергии, кВт / м <sup>3</sup>	Относительная плотность МВС, 1 при н. у.
– 200	31,9	28,2	42,6	0,9	0,8
– 500	20,7	18,3	63,1	3,0	0,5
– 800	6,5	5,7	93,2	16,8	0,2

Примечание. н. у. – при нормальных условиях.



стему байпаса, что требует дополнительных затрат. Например, электрическая мощность ВНС с подачей 140 м<sup>3</sup>/мин при нормальных условиях и 180 м<sup>3</sup>/мин в рабочем состоянии с компрессорами F-60 без байпасов и вакуумом в 400 мбар составляет 280 кВт (один контейнер с четырьмя компрессорами), при вакууме в 800 мбар – уже 2300 кВт (три контейнера по два компрессора с байпасами), а стоимость всей ВНС увеличивается в 3 раза.

Другим возможным вариантом охлаждения МВС при большом вакууме может быть подсос воздуха, что позволит снизить затраты на охлаждение, но в большинстве случаев такой способ нецелесообразен из-за снижения концентрации метана в МВС.

**Типоразмер компрессоров и компоновка вакуумно-насосных станций.** В настоящее время в странах СНГ работают и предлагаются ВНС с ротационными компрессорами, характеристики которых приведены в табл. 3.

Учитывая, что ВНС устанавливают не только на центральных промышленных площадках шахт, но и на отнесенных от них стволах, а также на поверхностных скважинах вслед за действующими лавами, это позволяет уменьшить длину и диаметр трубопроводов, снизить потери давления и повысить концентрацию метана в метановоздушной смеси. В результате возрастают мобильность ВНС, сроки их ремонта, удобство проведения ремонта.

Применение насосов F-50, F-60 дает возможность устанавливать трубопроводную арматуру диаметром 200 мм, что значительно уменьшает

размеры станции, а также ее стоимость и сопротивление фильтра. С учетом размеров всех труб и арматуры сопротивление со стороны нагнетания МДРС составляет всего 23 мбар, в том числе пламяпреградителей – 9 мбар. На шахтах Германии используются в основном компрессоры с подачей до 50 – 60 м<sup>3</sup>/мин, которые способствуют оптимизации ВНС по подаче и габаритам. С 2000 г. завод RKR изготовил более 200 насосов серии F для шахтного газа, из них только 5 % мощностью выше, чем мощность насосов F-50. Более 25 % всех компрессоров типа F завод RKR поставляет фирме «Pro2».

Исходя из условий применения ВНС в шахтах, а также экономических показателей, преимущество имеют ВНС с небольшими компрессорами и количеством до четырех в одной станции. В станциях с компрессорами F-50 и F-60 в стандартном контейнере размерами 12 × 2,5 × 2,9 м можно разместить до четырех компрессоров, а также всю автоматику с электрическими шкафами и место для дежурного персонала. Масса такой ВНС – менее 20 т, что в случае необходимости позволяет легко переместить ее на новое место.

При расчете дегазационной системы нужно учитывать и требования для утилизации газа (избыточное давление, концентрацию, объем метана). Должно каптироваться столько газа, сколько возможно в конкретных условиях, для чего необходимо регулирование. Разрежение, создаваемое компрессорным оборудованием, следует адаптировать к условиям, связанным с развитием горных

Таблица 3

Показатели	Тип компрессора для шахтного газа (фирма RKR)			
	F240-150/D400-G	F150-100/R400-G	F90-54/R350-G	F50-27/R200-G
Подача в рабочем режиме, м <sup>3</sup> /мин	229,0	150,7 – 55,5	83,5 – 29,5	40,8 – 9,1
Разница в давлении, мбар	500	500	500	500
Максимальная температура МВС на выходе, °С	126	97 – 108	92 – 107	85 – 117
Мощность мотора, кВт	315	250	132	75
Уровень звука без глушителя, дБ	105	104	106	100 – 91
Масса агрегата без мотора, кг	4780	3690	3380	805
Масса максимального узла, кг	1970	1080	690	360
Размеры агрегата, м:				
высота	3415	2490	2380	1775
ширина	1780	1570	1570	950
длина	2780	2590	2590	1850
Диаметр труб в ВНС, мм	400	400	350	200

работ. Вакуум более 500 мбар технически возможен, но экономически неоправдан, так как значительно увеличиваются габариты и масса ВНС, требуется оборудование более высокой надежности, возрастет расход электроэнергии.

Для обеспечения высокоэффективного откачивания газа следует предусмотреть возможность регулирования системы при изменении параметров его каптажа. Часто необходимо, чтобы давление на входе было постоянным. При увеличении поступления в систему газа разрежение снижается. Его можно сбалансировать увеличением частоты вращения компрессора или подключением дополнительных насосов. В современных дегазационных станциях это выполняется в автоматическом режиме. Регулирование дегазационного оборудования делает возможным эффективный и безопасный каптаж метана.

Мобильные дегазационные станции типа МДРС полностью удовлетворяют этим требованиям. Фирма «А-ТЕС Анлагентехник ГмбХ» совместно с немецким государственным институтом Фраунхофер УМЗИХТ предлагает потребителю консультирование при разработке или совершенствовании системы дегазации и утилизации, в том числе выбор ВНС. По их рекомендациям в страны СНГ поставлено и успешно эксплуатируется 15 станций МДРС (подача до 180 м<sup>3</sup>/мин), а через совместные предприятия обеспечивается сервисное обслуживание оборудования.

**Выводы.** Применяемые в настоящее время и допущенные технадзорами в Германии и странах СНГ для шахт дегазационные ВНС с ротационными насосами и пламяпреградителями так же

безопасны, как и водокольцевые насосы, что подтверждается опытом их безаварийной работы на протяжении более 15 лет на многих шахтах мира.

Оптимальная разница давления ВНС для имеющихся систем дегазации с утилизацией метановоздушной смеси находится на уровне до 500 мбар. Дальнейшее увеличение этого показателя, как правило, ограничено и в большинстве случаев нецелесообразно из-за необходимости применения крупногабаритных насосов, трубопроводов большого диаметра, высокой стоимости ВНС и технического обслуживания, несоответствия параметров дегазационной системы требуемой эффективности дегазации угольных пластов, вмещающих пород и концентрации метановоздушной смеси для утилизации метана. Большой вакуум требует охлаждения через байпас компрессора и в большинстве случаев нецелесообразен.

Оптимальная подача выпускаемых в настоящее время компрессоров для мобильных ВНС находится в пределах 50 – 60 м<sup>3</sup>/мин при рабочих условиях. Требуемая суммарная подача ВНС компенсируется за счет количества компрессоров (от одного до четырех в одном контейнере).

Основные требования к мобильным ВНС:

легкость перемонтажа при доставке на новое место (стандартные габариты контейнеров, масса одного контейнера ВНС до 20 т);

удобство, возможность размещения и ремонта вне центральных шахтных площадок;

эффективность системы дегазации и утилизации шахтного метана в целом (безопасность, масса извлекаемого метана, концентрация и влажность МВС).