

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ЭНЕРГИИ НА ЕДИНИЦУ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СЖАТОГО ВОЗДУХА В КАЧЕСТВЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ

Д.А. Довгялло

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: Totig@yandex.ru

Представлены основные характеристики современных компрессоров с давлением нагнетания до 1,3 МПа, предложен показатель удельных затрат энергии на единицу работоспособности воздуха. Показано, что этот показатель не только дополняет характеристики компрессорного оборудования, но и более полно учитывает влияние давления нагнетания на энергоэкономические оценки пневмохозяйства предприятия.

Ключевые слова: воздушные компрессоры, характеристики, энергоэкономические показатели, удельные затраты энергии на единицу работоспособности воздуха, энергоменеджмент.

Сжатый воздух является одним из самых дорогих энергоносителей на промышленных предприятиях. Несмотря на то, что его получение относится к сопутствующим производственным процессам, энергоэффективность его производства и потребления часто весьма существенно отражается на общих затратах энергоресурсов.

В промышленности наибольшие проблемы возникают при необходимости регулирования производительности компрессора. При централизованном воздухообеспечении компрессоры должны с максимальной эффективностью обеспечить напор и расход воздуха у потребителя. Поэтому весьма важным является вопрос выбора количества и типов компрессоров для компрессорной станции. Обычно рабочая точка компрессора определяется видом его характеристики и характеристики сети (точка их пересечения). Так как рабочая точка может не обеспечить необходимый расход, то компрессор выбирают с условием превышения напора при требуемом расходе. Таким образом, заранее предполагается переразмеренный по номиналу мощности компрессор. Поэтому выбор компрессоров при замене оборудования является важным этапом проектной работы, влияющей на затраты энергоресурсов и на энергоменеджмент.

Аналізу работы компрессорных станций и систем воздухообеспечения посвящено значительное количество публикаций. К наиболее заметным в плане энергоменеджмента можно отнести работы А.В. Воронцового (например [1], [2], [3]), Ю.Н. Миняева [4] и др. И, в частности, в статье [2] предлагаются рекомендации по оптимальному выбору компрессорного оборудования для различных производств. В статье [3] показано, что стоимость расходов за период эксплуатации во много раз превышает цену самого компрессора.

Чаще всего в качестве основного энергоэкономического показателя при выборе компрессора выступает такая удельная величина, как отношение мощности компрессора к его объемной производительности $\text{кВт/м}^3_{\text{н}}$ (паспортная энергоемкость на расчетной точке характеристики). Приводимые в современных публикациях затраты

Данила Александрович Довгялло, аспирант.

энергии на производство воздуха для машиностроительных предприятий составляют до 25 % от общего расхода электроэнергии. При этом удельные затраты энергии для компрессоров с электроприводом составляют от 0,04 до 0,14 кВт·ч/м³_н.

Использование такого показателя энергоэффективности, как удельный расход энергии для компрессоров, общепринято и соответствует стандартам [6, 7]. Здесь этот показатель имеет смысл энергоемкости и характеризует воздух как продукт, выпускаемый компрессорной станцией. Это понятие соответствует ГОСТ Р51541-99, п. 7.2. В то же время отпущенный со станции воздух как энергоноситель обладает собственным энергетическим потенциалом, который реализуется у потребителя в виде полезной работы.

Поэтому с позиций энергоменеджмента и с точки зрения показателей энергетической эффективности (ПЭЭ) всего комплекса по производству, потреблению и распределению воздуха более правильно было бы учитывать и его давление.

Вполне очевидно, что производимая сжатым воздухом у потребителя работа будет определяться не только расходом, но и, как следует из термодинамики, давлением. Полная работоспособность воздуха определяется энтальпией:

$$I = U + P \cdot V \quad \text{или} \quad i \cdot G = u \cdot G + P \cdot v \cdot G. \quad (1)$$

В случае компрессорной станции можно считать, что после охлаждения и очистки воздух поступает к потребителям с одинаковой постоянной температурой, поэтому его работоспособность определяется только его расходом G кг/с и давлением P . Известно также, что для различных видов пневматических машин потребные расходы воздуха на производство единицы работы также зависят от давления [4].

Здесь выявляется противоречие между желаемым снижением сетевого давления (снижение затрат на компрессорах, уменьшение потерь в воздушной сети и т. д.) и оптимальным давлением для потребителя. Это противоречие, как правило, находит решение. В настоящее время на основе опыта эксплуатации оборудования и внедрения энергоменеджмента предприятия находят оптимальный уровень давления воздуха в сетях.

Однако на этапе выбора нового оборудования использование только показателя удельного расхода энергии для компрессора (кВт·ч / м³_н) может привести к ошибкам, тем более что при децентрализованной системе воздухообеспечения, когда один компрессор обслуживает своих потребителей при различных временных графиках давления подаваемого сжатого воздуха, требуется более объективная оценка энергоэффективности системы «компрессор – потребитель».

В связи с изложенным выше предлагается использовать показатель удельных затрат энергии на единицу работоспособности E_{pv} , т. е. кВт·ч/(м³_н·МПа):

$$E_{pv} = W/(P_k \cdot V_{ko}), \quad (2)$$

где P_k – давление на выходе из компрессора; W – расход электроэнергии за час работы компрессора, кВт·ч; V_{ko} – объемная производительность (приведенная к нормальным условиям).

Такая величина будет в большей степени соответствовать показателю энергоэффективности стандарта [7].

В системе СИ этот показатель получается безразмерным, однако для наглядности и придания физического смысла предлагается выражать его с размерностью: кВт·ч/(м³_н·МПа).

Еще одно важное замечание. Приведенная к нормальным условиям объемная производительность V_{ko} (что общепринято в мировой практике) в действительности отражает массовый расход, т. к. V_{ko} и G через уравнение состояния связаны только константами:

$$P_0 \cdot V_{\text{ко}} = G \cdot R \cdot T_0, \quad (3)$$

где P_0 и T_0 – нормальные физические условия.

Но во всех паспортах и формулярах к компрессорному оборудованию основные данные и характеристики представлены для объемной производительности, приведенной к нормальным физическим условиям. Поэтому предлагается оставить в E_{pv} объем $V_{\text{ко}}$, который в $\pi = P_{\text{к}} / P_0$ раз больше $V_{\text{к}}$.

Для аргументации данного предложения на приведенных ниже графиках представлены некоторые данные и обработанные автором выборки характеристик современных компрессоров различных фирм.

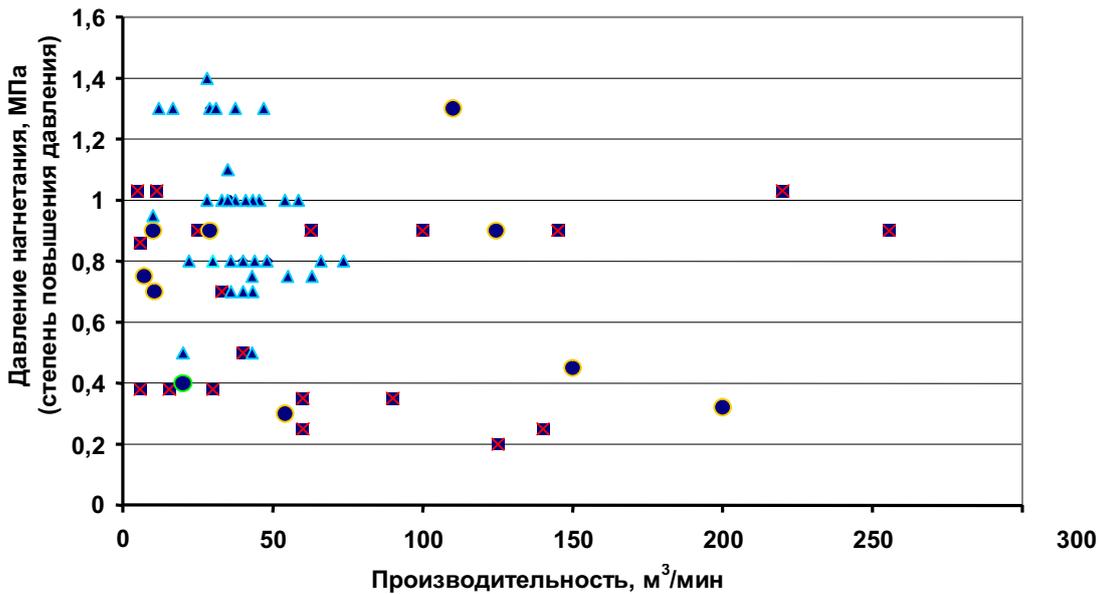


Рис. 1. Поле характеристик воздушных компрессоров с давлением нагнетания до 1,5 МПа (выборка автора, 2011 г.):

● поршневые, ■ центробежные, ▲ винтовые

Анализ показывает, что логика положения точек современных компрессоров (рис. 1) соответствует существующим полям характеристик. Развитие винтовых компрессоров направлено в сторону больших производительностей. Присутствие же небольшого количества поршневых компрессоров в этой области, а также лопаточных машин в области малых расходов свидетельствует о наличии машин специального назначения.

Отдельная выборка для отечественных компрессоров показывает, что удельные затраты на производство одного кубического метра воздуха вполне соответствуют общемировым показателям.

Более интересными могут быть данные, представленные на рис. 2 и рис. 3. Так, например, удельные энергозатраты на один кубометр воздуха для компрессора «34» (рис. 2) весьма предпочтительны, но с учетом давления (т. е. работоспособности производимого воздуха, рис. 3) этот компрессор менее предпочтителен по сравнению с компрессором такого же класса под номером «32».

Важным обстоятельством, препятствующим объективности получения расчетных данных по показателю удельных затрат энергии на получение единицы работоспособности E_{pv} , кВт·ч/(м³_н МПа), является отсутствие совместных характеристик

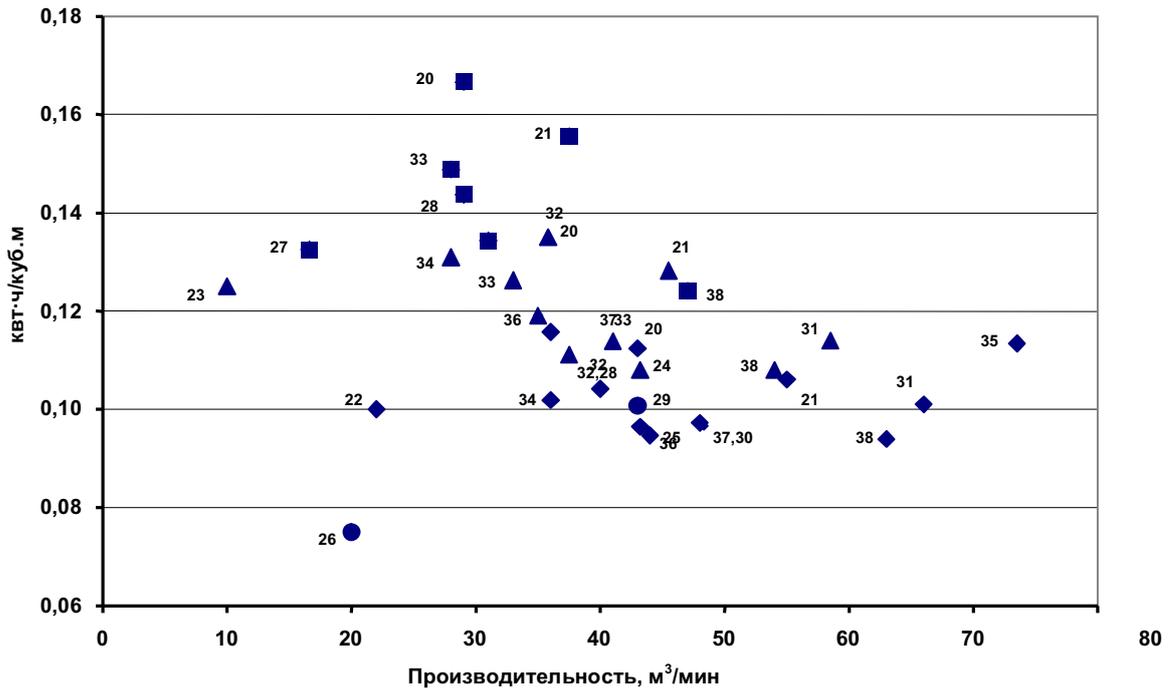


Рис. 2. Удельные затраты электроэнергии на производство одного куб. м воздуха винтовыми компрессорами с различным давлением нагнетания:
 ■ 1,3 МПа; ▲ 1,0 МПа; ● 0,75-0,8 МПа
 (представлены винтовые компрессоры типов: DVK, SF, SCK, SFA, Allegro, OPUS, Largo, S341BOGE, U250, VEK, CPG; ВК, ДЭН – Россия)

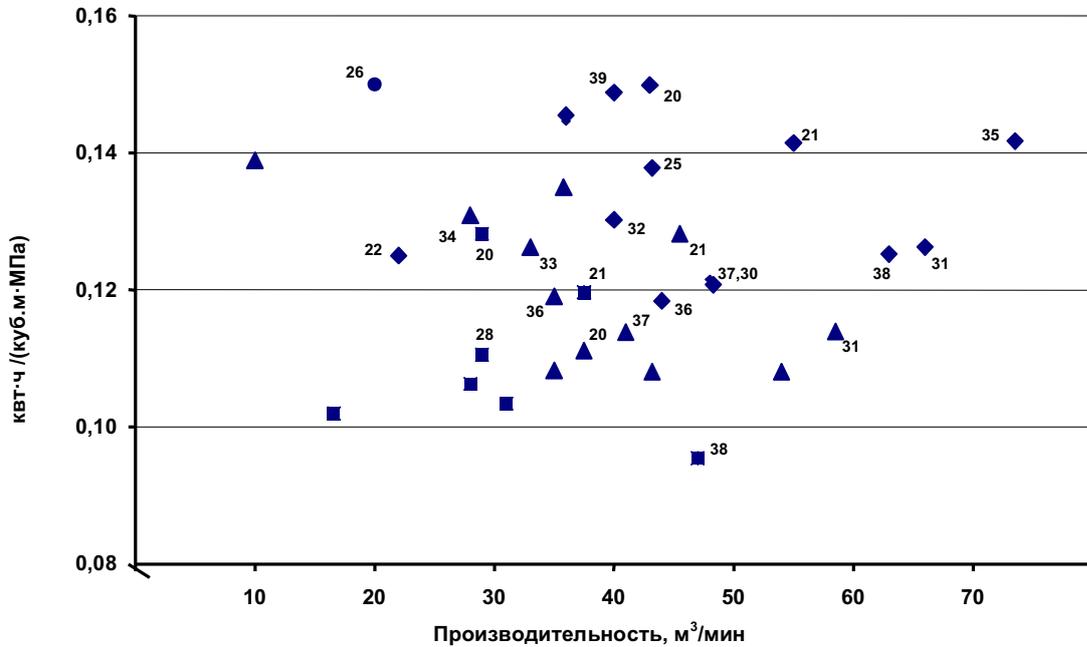


Рис. 3. Удельные затраты энергии на единицу работоспособности E_{pv} одного куб. м воздуха винтовыми компрессорами с различным давлением нагнетания:
 ■ 1,3 МПа; ▲ 1,0 МПа; ● 0,75-0,8 МПа

компрессора и сети. Действительно, если взять базовую характеристику компрессора, которая обычно прилагается к формуляру, и обработать ее с целью получения показателей E_v и E_{pv} , то изменение последнего противоречит логике. Это объясняется тем, что базовая характеристика (с расчетной точкой) приводится для полностью открытого дросселя.

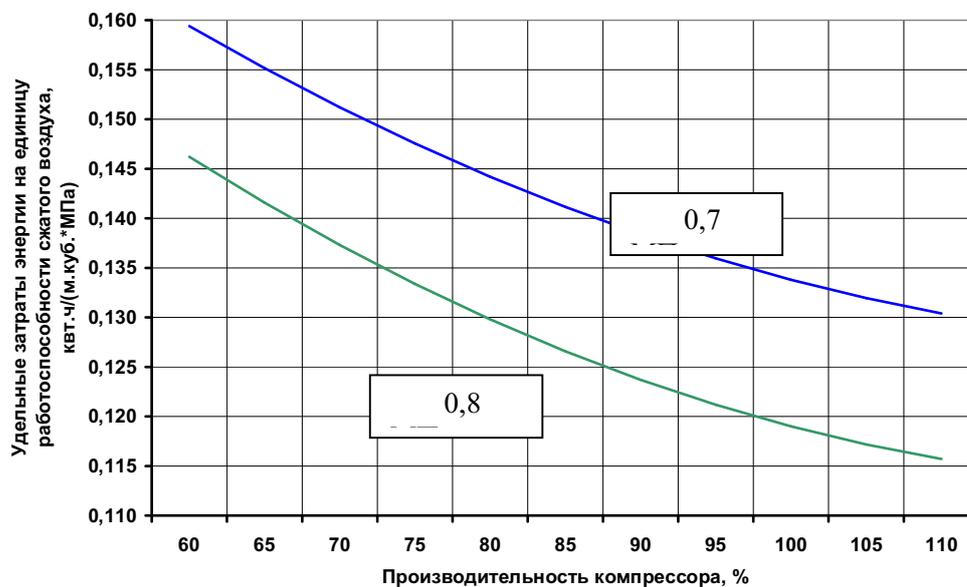


Рис. 4. Удельные затраты энергии на единицу работоспособности сжатого воздуха E_{pv} , подсчитанные по характеристикам рис. 5

В действительности только полная сетка характеристик при регулировании дросселированием на входе (рис. 5) дает возможность после ее обработки получить значения E_{pv} (рис. 4) в рабочем диапазоне производительности компрессора при различных давлениях в сети.

Таблица 1

Характеристики современных винтовых компрессоров (данные 2011 г. по ведущим зарубежным и отечественным фирмам, фрагмент выборки для винтовых компрессоров с давлением нагнетания до 1,3 МПа)

№	Наименование, марка	Давление нагнетания, МПа	Производительность, м ³ /мин	Потребл. мощность, кВт	Мощность эл. двиг., кВт	Масса, кг	Стоимость, \$ США
Винтовые компрессоры							
20	DVK-340	0,75	43	250		5540	
		1	35,8	250			
		1,3	29				
21	DVK-430	0,75	55	315		4750	
		1	45,5				
		1,3	37,5				
22	BK-76ACO-BK-22/8	0,8	22		132	2700	51330
23	BK-74-ACO-BK-10/9ПЭ	0,9	10		75	1550	23830
24	SF280B	1	43,2		280	5800	
25	SF250A	0,7	43,2		250	5800	
26	SF90E	0,5	20		90	2200	

№	Наименование, марка	Давление нагнетания, МПа	Производительность, м ³ /мин	Потребл. мощность, кВт	Мощность эл. двиг., кВт	Масса, кг	Стоимость, \$ США
Винтовые компрессоры							
27	SFA132C	1,3	16,6		132	2600	
28	SCK341 ALUP	0,8	40		250	4100	
		1,1	35				
		1,3	29				
29	Allegro260	0,5	43		260	4300	
		1,3	12				
30	OPUS-280	0,8	48,3		280	4250	
31	Largo400W	0,8	66		400	5900	
		1	58,5				
32	S341 BOGE	0,8	40		250	5000	
		1	37,5				
		1,3	31				
33	U-250	0,8	36		250	5250	
		1	33				
		1,4	28				
34	009-5119VEGA201 Kraftmann	0,7	36	200		3900	
		1	28				
35	VEK 680 KOMSAN	0,8	73,5		500		91100
36	VEK 340	0,8	44		250		58520
		1	35				
37	CPG 380	0,8	48		280	6500	
		1	41				
38	CPG 480	0,75	63		355	6700	
		1	54				
		1,3	47				
39	ДЭН-250ШМ	0,7	40		250	4600	

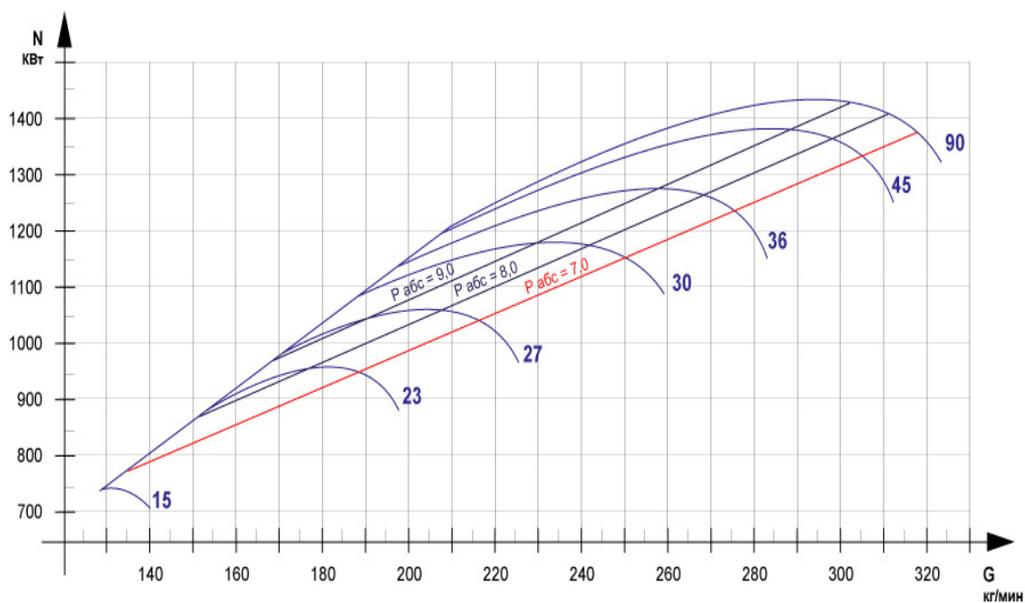


Рис. 5. Характеристики компрессора: зависимости давления нагнетания и мощности от производительности при дросселировании на входе (взяты с электронного ресурса <http://toxsoft.ru>)

Сравнивая такие характеристики для различных компрессоров, можно более правильно выбрать компрессор и тем самым предопределить снижение потребления электроэнергии на производство сжатого воздуха при дальнейшей его эксплуатации.

Предложенный в настоящей публикации показатель E_{pv} удельных затрат энергии на единицу работоспособности воздуха, получаемого на компрессорных станциях, а также методика его применения могут быть полезными при энергообследовании, реинжиниринге компрессорных станций и в локальном энергоменеджменте для компрессорных установок предприятий различного профиля.

В качестве примера сравним три винтовых компрессора из приведенной выше табл. 1. Используя их заявленные характеристики, определим показатели E_v и E_{pv} . Вполне очевидно, что при расчете на давление нагнетания 1,0 МПа эти показатели будут численно одинаковыми. Сравнение близких по мощности и производительности компрессоров U-250 и VEK-340 по обоим показателям однозначно определяет последний как наиболее экономичный.

Таблица 2

	Компрессор								
	LARGO			U-250			VEK-340		
	P_k , МПа	$V_{ко}$, м ³ /мин	W, кВт	P_k , МПа	$V_{ко}$, м ³ /мин	W, кВт	P_k , МПа	$V_{ко}$, м ³ /мин	W, кВт
Паспортные данные	0,8	66,0	400	0,8	36,0	250	0,8	44,0	250
	1,0	58,5	400	1,0	33,0	250	1,0	35,0	250

Показатели	LARGO		U-250		VEK-340	
P_k , МПа	0,8	1,0	0,8	1,0	0,8	1,0
E_v , кВт.ч / м ³ _н	0,101	0,114	0,116	0,126	0,095	0,119
E_{pv} , кВт.ч / (м ³ _н · МПа)	0,126	0,114	0,145	0,126	0,118	0,119

Компрессор большей производительности LARGO при работе на давлении 1,0 МПа имеет лучшие показатели по удельным затратам энергии (очевидно, это его расчетная точка), при переходе на давление 0,8 МПа LARGO снижает энергоемкость воздуха по показателю E_v на 11,3 %, U-250 – на 9,1 %, а VEK-340 – на 17 %, что свидетельствует в пользу последнего. В то же время LARGO по показателю E_{pv} ухудшает свою энергоэффективность на 11,2 %, U-250 – на 14 %, а у компрессора VEK-340 показатель E_{pv} остается практически на прежнем уровне.

Из приведенного примера следует, что при работе в диапазоне 0,8-1,0 МПа в равновременных условиях загрузки компрессора наиболее выгодно применять компрессор VEK-340, а при больших по времени потребностях в давлении 1,0 МПа – компрессор LARGO. Наиболее дорогим по показателю удельных затрат энергии на единицу работоспособности будет сжатый воздух 0,8 МПа у компрессора U-250.

Выводы. При выборе компрессора необходимо учитывать временной фактор загрузки по давлению, т. е. какой процент времени эксплуатации компрессор будет работать на том или ином уровне давления.

Существует объективная корреляция между показателями E_v и E_{pv} , нарушение которой является основанием к более тщательной проработке заявляемых характеристик компрессора.

Показатель удельных затрат энергии на единицу работоспособности E_{pv} не только дополняет характеристики компрессорного оборудования, но и фиксирует неточности рекламируемых показателей компрессоров, а также более полно учитывает

влияние давления нагнетания на энергоэкономические оценки пневмохозяйства предприятия¹.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Воронецкий А.В.* Современные компрессорные станции (концепции, проекты, оборудование). – М.: Премиум Инжиниринг, 2008. – 614 с.
2. *Воронецкий А.В.* Программа реконструкции системы воздухообеспечения металлургического завода // Компрессорная техника и пневматика. – №11. – 2002.
3. *Воронецкий А.В.* Методология оценки стоимости жизненного цикла при выборе компрессорного оборудования // ЭСКО – электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2005. – № 6.
4. *Миняев Ю.Н.* Энергетическое обследование пневмохозяйства промышленного предприятия: Науч.-практ. изд. – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003. – 151 с.
5. *Кочкин П.А., Мухин И.Н.* Методы повышения эффективности работы компрессорных станций // Информатизация и системы управления в промышленности: отраслевой науч.-техн. журнал. – 2009. – № 3. – С. 19-21.
6. ГОСТ Р 51541-99. Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей.
7. ГОСТ Р 51749-2001. Энергосбережение. Энергопотребляющее оборудование общепромышленного применения. Показатели энергетической эффективности.

Статья поступила в редакцию 4 апреля 2012 г.

USE OF SPECIFIC CONSUMPTION OF ENERGY PER UNIT OF FUNCTIONALITY OF COMPRESSED AIR AS INDICATOR OF ENERGY EFFICIENCY OF COMPRESSOR STATIONS

D.A. Dovgyallo

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The basic characteristics of the modern compressors with the discharge pressure of 1.3 MPa are considered in the paper. An indicator of the energy efficiency is used as an index of the specific energy consumption per unit of the air functionality. This index adds to the characteristics of the compressors equipment and reflects the influence of the discharge pressure on the energy efficiency of compressor stations.

Keywords: *air compressors, characteristics, energy indicators, specific energy consumption per unit of functionality air, energy management.*

¹ *Представленные в статье данные по компрессорам взяты из интернет-ресурсов с сайтов фирм-изготовителей и фирм-продавцов. Автор не рекламирует указанные фирмы и оборудование, а всего лишь использует эти данные для научного анализа в качестве иллюстраций.*

Danila A. Dovgyallo, Postgraduate student.