

Как подобрать маслоохладитель для винтового компрессора

Семенов Ю.В., АК «Искусство хладотехники»

Введение

Полугерметичные (бессальниковые) винтовые компрессоры *Bitzer* и *Refcomp* на протяжении многих лет являются «рабочими лошадками» в системах холодоснабжения благодаря универсальности в отношении использования различных хладагентов, а также широкому рабочему диапазону и обширным областям применения.

Они находят применение при оснащении камер шоковой заморозки, распределительных складов охлажденных и замороженных продуктов, аккумуляторов холода и т.д.

Основные вопросы проектирования холодильных установок с винтовыми полугерметичными компрессорами *Bitzer* подробно рассмотрены автором в книгах [1, 2].

Применение таких компрессоров в составе централи (многокомпрессорного агрегата) позволяет обеспечить суммарную объемную подачу свыше 2000 м³/час, достойно конкурируя с промышленным холодильным оборудованием и стирая тем самым границы между коммерческим и промышленным холодом.

Отличительными особенностями полугерметичных винтовых компрессоров являются:

- применение внешнего маслоотделителя;
- возможность работы с экономайзером;
- встроенная система регулирования производительности.

Оснащение винтового компрессора внешним маслоотделителем позволяет организовать контур охлаждения масла и возвращать в компрессор масло, имеющее температуру более низкую, чем температура масла в маслоотделителе.

Это позволяет снизить температуру сжатого пара и эффективно работать в низкотемпературной области при одноступенчатом сжатии вплоть до температуры кипения –50 °С, недостижимой для поршневых и спиральных компрессоров.

Применение экономайзера (режим ECO) особенно эффективно в низкотемпературной области, причем чем ниже температура кипения, тем больше эффект от применения экономайзера. Например, при температуре кипения –40 °С и температуре конденсации +40 °С увеличение холодопроизводительности установки за счет переохлаждения жидкого фреона в экономайзере превышает 50 % при работе на R404A или R507A.

Встроенная система регулирования производительности позволяет даже для одиночного компрессора реализовать как минимум три номинальных ступени производительности: 100-75-50 %. Фактические ступени производительности могут отличаться от номинальных значений в зависимости от условий эксплуатации и модели компрессора [3].

Для старших моделей компрессоров серии *HS Bitzer* и всех моделей серии *RW Refcomp* может быть реализовано бесступенчатое регулирование производительности в диапазоне 100-50 %, требующее более сложного управления по сравнению со ступенчатым [3, 4].

В любом случае при уменьшении производительности возрастает температура нагнетания (сжатого пара) из-за уменьшения расхода всасываемого пара, охлаждающего встроенный электромотор. При этом повышается температура пара, поступающего в полость сжатия, что приводит к соответствующему росту температуры сжатого пара, которая может быть снижена преимущественно только за счет охлаждения масла [3].

Если компрессор работает с экономайзером, теоретически могут быть реализованы полноценные четыре номинальных ступени производительности:

100 % + ECO, 100 %, 75 %, 50 %.

Но в реальных условиях все четыре ступени могут быть реализованы только в том случае, если маслоохладитель правильно рассчитан и подобран, а система охлаждения и возврата масла грамотно спроектирована и смонтирована.

Именно корректному подбору маслоохладителя и посвящена эта статья.

Маслоохладитель и защита компрессора по температуре нагнетания

Масло, применяемое в винтовых компрессорах, служит не только для смазки подшипников, но и для уплотнения зазоров между роторами (винтами).

Поэтому для винтовых компрессоров применяются холодильные масла, обладающие высокой вязкостью, в несколько раз превышающей соответствующие показатели масел, применяемых для поршневых и спиральных компрессоров.

Высокая вязкость масла позволяет эффективно уплотнять зазоры между винтами, способствуя устранению внутренних перетечек хладагента в процессе сжатия.

На рис. 1 приведены марки и характеристики холодильных масел, применяемых для полугерметичных винтовых компрессоров *Bitzer* [5].

3.1 Schmierstoff-Tabelle		3.1 Table of lubricants			3.1 Tableau des lubrifiants	
Ölsorte Oil type Type d'huile BITZER	Viskosität Viscosity Viscosité cSt/40°C	Kältemittel Refrigerant Fluide frigorigène	Verflüssigung Condensing Condensation °C	Verdampfung Evaporating Evaporation °C	Druckgastemperatur Discharge gas temp. Temp. gaz refoulement °C	Öleinspritz-Temperatur Oil injection temp. Temp. d'injection d'huile °C
BSE170	170	R134a	.. 70	+20 .. -20	~60 .. max. 100	max. 100
		R404A / R507A	.. 55	+7,5 .. -50		
		R407C	.. 60	+12,5 .. -20		
B100	100	R22	.. 45 (55)	-5 .. -50		max. 80
B150SH	150	R22	.. 60	+12,5 .. -40		max. 100

Рис. 1. Характеристики холодильных масел для винтовых компрессоров [5]

Для фреона R507A и подобных ему применяют масло BSE 170, имеющее при 40 °С кинематическую вязкость 170 мм²/с (сСт) [5], в то время как масло BSE 32, применяемое для поршневых компрессоров, имеет при этой температуре вязкость всего 32 мм²/с.

Для компрессоров *Refcomp* применяются аналогичные масла.

Как следует из таблицы, максимальная температура сжатого пара (нагнетания) составляет 100 °С для всех масел.

Такое ограничение обусловлено наличием у каждого компрессора электронного защитного устройства, отключающего компрессор при превышении максимально допустимой температуры обмоток электродвигателя или сжатого пара.

В каждом винтовом компрессоре в обмотках электродвигателя и в порту нагнетания установлены РТС-термисторы, подключенные последовательно к защитному устройству.

При нагреве любого из термисторов (6 — в обмотках, 1 — в порту нагнетания) выше номинальной температуры термистора (ϑ_{NAT}) его сопротивление примерно на порядок возрастает (рис. 2), что приводит к срабатыванию защитного устройства и отключению компрессора.

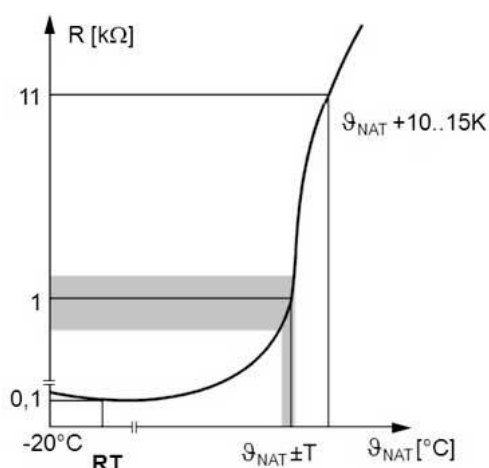


Рис. 2. Зависимость сопротивления РТС-термистора от температуры [6]

В винтовых компрессорах применяют термисторы с $\vartheta_{\text{NAT}} \approx 100^{\circ}\text{C}$, у которых при более высокой температуре происходит экспоненциальный рост сопротивления [6].

Как показано на рис. 2 при температуре термистора на 10...15 К выше 90...100 °С его сопротивление стремительно возрастает с ≈ 1 кОм до ≈ 11 кОм.

Так как все термисторы соединены последовательно, нагрев любого из них до температуры $\approx 120^{\circ}\text{C}$ вызывает реакцию защитного устройства, имеющего порог срабатывания $\approx 12,5$ кОм [6].

Итак, для безаварийной работы винтового компрессора ни при каких обстоятельствах температура сжатого пара не должна превышать $\vartheta_{\text{NAT}} \approx 100^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 1).

Максимальную температуру сжатого пара t_{DG} , не превышающую этого значения, позволяют задать программы подбора компрессоров *BITZERSoftware* и *Refcomp*. В автоматическом режиме расчета t_{DG} принимается равной 80 °С.

Необходимость применения и мощность маслоохладителя определяются в программах подбора компрессоров *BITZERSoftware* и *Refcomp* в зависимости от:

- применяемого хладагента;
- параметров холодильного цикла;
- наличия экономайзера;
- принятой максимальной температуры сжатого пара t_{DG} .

Принятая максимальная температура сжатого пара t_{DG} определяет мощность маслоохладителя, так как температура масла на входе в него принимается равной t_{DG} .

Задавая в программах значения t_{DG} в диапазоне 80...100 °С, можно получить различные величины требуемой мощности маслоохладителя или вообще отказаться от его применения (например, при работе компрессора только на режиме с максимальной производительностью).

Если же необходимо работать со всеми ступенями производительности, корректно подобранный маслоохладитель должен поддерживать температуру нагнетания, не превышающую ϑ_{NAT} , для любого режима работы, включая работу с минимальной производительностью (50 %).

To Cool, or Not to Cool: вот в чем вопрос

Дальнейшие рассуждения будем проводить на примере близких по характеристикам низкотемпературных винтовых компрессоров **HSN7461-70 Bitzer** и **SW3L7000 Refcomp**, работающих на R507A. Переохлаждение в конденсаторе принимаем равным $SC = 2$ К, перегрев на компрессоре — $SH = 10$ К.

Основные технические характеристики компрессоров приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики компрессоров

№ п.п.	Характеристика	HSN7461-70	SW3L7000
1	Объемная подача, м ³ /час	220	237
2	Пределы применения по t_0 , °С	-50...-15	-50...-15
3	Ступени производительности, %	100-75-50	100-75-50
4	Холодопроизводительность при $t_0 = -30$ и $t_K = +45$ °С, кВт *	78,2	72,3
5	Холодопроизводительность при $t_0 = -40$ и $t_K = +40$ °С, кВт *	53,9	49,6
6	Масса, кг	310	420
7	Рабочее напряжение, частота	400 В/50 Гц	400 В/50 Гц
8	Максимальный рабочий ток, А	124	117
9	Присоединение линии всасывания	76 мм, 3 1/8"	67 мм, 2 5/8"
10	Присоединение линии нагнетания	54 мм, 2 1/8"	54 мм, 2 1/8"

* На производительности 100 % с экономайзером (100 % + ECO)

Параметром, определяющим необходимость охлаждения масла на заданном режиме, является температура нагнетания (сжатого пара) без охлаждения.

Охлаждение масла требуется, если эта температура превышает заданное в программах значение t_{DG} (80 °С в автоматическом режиме расчета) независимо от применяемого хладагента.

Температура t_{DG} является одновременно и расчетной температурой масла на входе в маслоохладитель. Мощность маслоохладителя рассчитывается в программах таким образом, чтобы на расчетном режиме температура сжатого пара равнялась заданной максимальной температуре нагнетания t_{DG} .

На рис. 3 приведена полученная автором зависимость температуры нагнетания (без охлаждения) от температуры кипения для компрессоров с производительностью 100 % (расчет в программах подбора *BITZERSoftware* и *Refcomp* при температуре конденсации +45 °С).

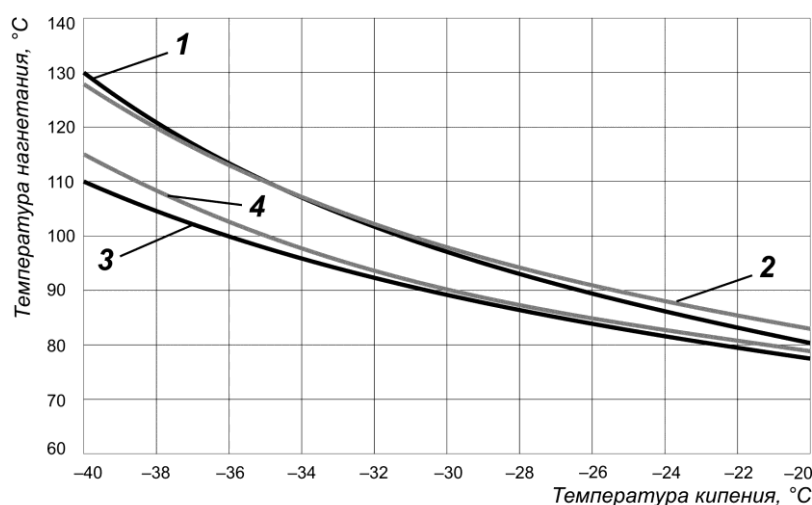


Рис. 3. Зависимость температуры нагнетания от температуры кипения

1 — HSN 100 %, 2 — SW3L 100 %, 3 — HSN 100 % + ECO, 4 — SW3L 100 % + ECO

Как следует из рис. 3, охлаждение масла требуется практически во всем диапазоне температур кипения, если принять значение температуры сжатого пара t_{DG} , равное 80 °С.

Но если принять в качестве максимальной температуры сжатого пара $t_{DG} = 90$ °С, то из графика следует, что при работе при производительности 100 % с экономайзером (100 % + ECO) можно обойтись вообще без охлаждения масла при $t_0 \geq -30$ °С.

Тогда для низкотемпературных складов и камер хранения (–22...–18 °С) можно было бы применять винтовые компрессоры без маслоохладителей, снизить тем самым стоимость оборудования и выиграть тендер на поставку и монтаж.

Как показывает практика, так часто поступают даже сотрудники некоторых так называемых «ведущих» холодильных компаний, ограничиваясь при расчетной температуре нагнетания 90 °С только подбором компрессора на указанной производительности (100 % + ECO).

Предоставив заказчику распечатку из программы, в которой отсутствует строка «производительность маслоохладителя», а температура нагнетания ниже заданной (90 °С), можно легко убедить его в этом техническом решении.

Но если выполнить подбор компрессора на производительности 100 % (без ECO), результат покажет необходимость охлаждения масла (см. табл. 2), хотя температура нагнетания без охлаждения масла все еще находится в допустимых пределах (ниже $\vartheta_{\text{НАТ}} \approx 100^\circ\text{C}$, см. рис. 1).

Таблица 2. Сравнение режимов работы компрессора HSN7461-70 при $-30/+45^\circ\text{C}$

100 % + ECO		100 %	
Макс. темп. нагнетания	90.0 °C	Макс. темп. нагнетания	90.0 °C
Результат		Результат	
Компрессор	HSN7461-70-40P	Компрессор	HSN7461-70-40P
Ступени регулирования производительности	100%	Ступени регулирования производительности	100%
Холодопроизвод-сть	78.2 kW	Холодопроизвод-сть	51.3 kW
Холодопроизвод-сть*	79.5 kW	Холодопроизвод-сть*	49.3 kW
Произв-сть испарителя	78.2 kW	Произв-сть испарителя	51.3 kW
Потребл. мощность	61.2 kW	Потребл. мощность	51.4 kW
Ток (400V)	97.4 A	Ток (400V)	82.7 A
Напряжения питания	380-415V	Напряжения питания	380-415V
Производительность конденсатора	139.5 kW	Производительность конденсатора	98.2 kW
СОР/КПД	1.28	СОР/КПД	1.00
СОР/КПД *	1.28	СОР/КПД *	0.96
Массов. расход LP	2080 kg/h	Массов. расход LP	2080 kg/h
Массов. расход HP	2976 kg/h	Массов. расход HP	2080 kg/h
Режим эксплуатации	Экономайзер	Режим эксплуатации	Стандарт
Темп. жидк-ти (переохлажд-ель)	13.05 °C	Темп. жидкости	43.0 °C
Масс. расход ECO	895 kg/h	Объемн. расход масла	2.09 m³/h
Произв-ть переохл-ля	26.9 kW	выход из маслоохл-ля	85.8 °C
Темп.насыщ.паров ECO	3.05 °C	Произв-ть маслоохл-ля	4.54 kW
ECO-давление	6.92 bar(a)	Температура нагнетания без охлаждения	96.8 °C
Объемн. расход масла	2.09 m³/h		
Температура нагнетания без охлаждения	89.1 °C		

Последствия отказа от маслоохладителя проявляются обычно на уже запущенном в эксплуатацию объекте: при работе на частичной производительности (75 или 50 %) температура сжатого пара зашкаливает, и предохранительное устройство отключает компрессор (как говорят холодильщики, компрессор начинает «рубить по INT-у»).

Но при подборе винтового компрессора *Bitzer* по программе *BITZERSoftware* эти последствия не очевидны, так как программа не позволяет рассчитать мощность маслоохладителя при работе компрессора с производительностью, отличной от 100 %.

Зато это позволяет сделать программа *Refcomp*. С помощью этой программы мы можем рассчитать мощность маслоохладителя при работе винтового компрессора **SW3L7000** даже на минимальной ступени производительности этого компрессора — 50 %. Что мы и сделаем.

На рис. 4 приведена зависимость температуры сжатого пара от ступени регулирования производительности компрессора **SW3L7000** ($t_0 = -30$, $t_K = +45$), построенная по четырем точкам:

100 % + ECO, 100 %, 75 % и 50 %.

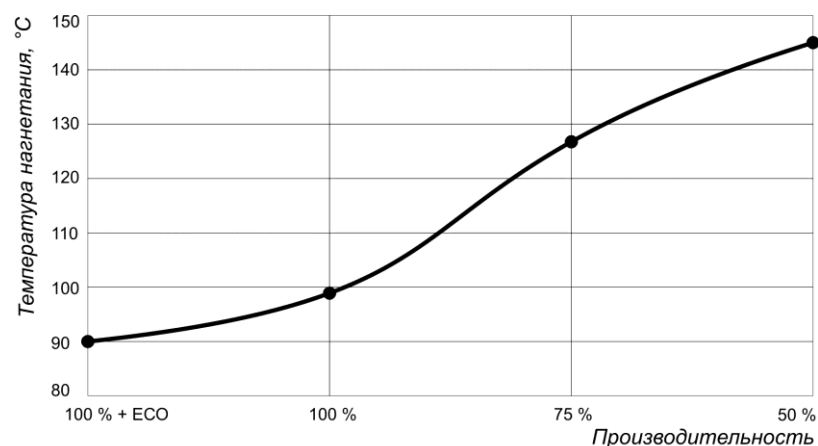


Рис. 4. Зависимость температуры нагнетания от производительности компрессора

Из рисунка следует, что уже при производительности 75 % температура сжатого пара превышает 120 °C, что приведет к срабатыванию защитного устройства при отсутствии маслоохладителя.

На рис. 5 для температур сжатого пара 90 и 80 °C приведены зависимости требуемой мощности маслоохладителя от ступени производительности компрессора **SW3L7000** ($t_0 = -30$, $t_k = +45$), построенные для тех же точек, что и на рис. 4.

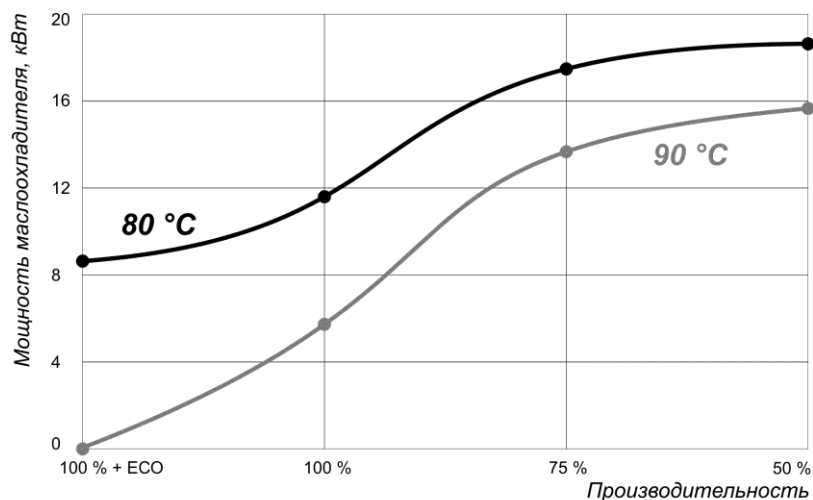


Рис. 5. Зависимость мощности маслоохладителя от производительности компрессора

Графики показывают, что при работе на производительности 75 и 50 % и $t_{DG} = 90$ °C требуется достаточно мощный маслоохладитель: его мощность при производительности 75 % и $t_{DG} = 90$ °C примерно на 20 % превышает мощность при производительности 100 % и $t_{DG} = 80$ °C.

Если формально подходить к рис. 5, то для надежной работы компрессора мы должны всегда рассчитывать маслоохладитель по максимуму — при производительности 50 % и $t_{DG} = 80$ °C. Однако в этом случае его мощность будет намного больше мощности, требуемой для работы на производительности 100 % при $t_{DG} = 80$ °C.

Но при работе компрессора на производительности 50 % температура нагнетания не должна всего лишь превышать $\vartheta_{\text{НАТ}} \approx 100^\circ\text{C}$, чтобы не срабатывало защитное устройство (см. рис. 1). Совсем не обязательно на этом режиме поддерживать температуру нагнетания 80°C .

С учетом отклонения рабочих параметров холодильной установки от расчетных, в качестве такой «безопасной» максимальной температуры нагнетания можно было бы принять $t_{\text{DG}} = 95^\circ\text{C}$ при производительности компрессора 50 %. И для этих условий подобрать маслоохладитель.

Но из-за того, что программа подбора *BITZERSoftware* позволяет рассчитать мощность маслоохладителя только при работе компрессора с производительностью 100 %, сложилась традиция подбирать маслоохладитель лишь на полную производительность компрессора.

А при каких условиях подобранный таким образом маслоохладитель сможет обеспечить безотказную работу компрессора (с $t_{\text{DG}} \leq 95^\circ\text{C}$) и при производительности 50 %?

Прежде чем ответить на этот вопрос, рассмотрим на примере воздушного маслоохладителя, как влияет температура масла на мощность маслоохладителя.

Как температура масла влияет на мощность маслоохладителя

Воздушный маслоохладитель — это специальный охладитель жидкости (*dry cooler*), рассчитанный на охлаждение вязкой жидкости и высокое давление.

В книге автора [1] приведена формула, связывающая мощность $Q_{\text{ОЖ}}$ охладителя жидкости с разностью температур жидкости и воздуха на входе:

$$Q_{\text{ОЖ}} = F_{\text{ОЖ}} \cdot (t_{\text{L1}} - t_{\text{A1}}), \quad (1)$$

где $F_{\text{ОЖ}}$ — коэффициент, имеющий размерность кВт/К;
 t_{L1} — температура жидкости на входе в охладитель жидкости, $^\circ\text{C}$;
 t_{A1} — температура воздуха на входе в охладитель жидкости, $^\circ\text{C}$.

Подробный вывод формулы (1) — тема другой статьи. Формула выводится аналогично расчетным формулам для поверхностных воздухоохладителей (см. книгу автора [7]).

Мощность маслоохладителя $Q_{\text{МО}}$ может быть рассчитана по аналогичной формуле:

$$Q_{\text{МО}} = F_{\text{МО}} \cdot (t_{\text{M1}} - t_{\text{A1}}), \quad (2)$$

где t_{M1} — температура масла на входе в маслоохладитель, $^\circ\text{C}$.

Применим эту формулу для расчета мощности $Q_{\text{МО}}^*$ данного маслоохладителя при другой температуре масла на входе t_{M1}^* при той же температуре воздуха t_{A1} .

Из формулы (2) получим значение коэффициента $F_{\text{МО}}$:

$$F_{\text{МО}} = \frac{Q_{\text{МО}}}{(t_{\text{M1}} - t_{\text{A1}})}.$$

Считая значение $F_{\text{МО}}$ постоянным для данного маслоохладителя, получим:

$$Q_{\text{МО}}^* = \frac{Q_{\text{МО}}(t_{\text{M1}}^* - t_{\text{A1}})}{(t_{\text{M1}} - t_{\text{A1}})}. \quad (3)$$

Для проверки формулы (3) подберем компрессор **SW3L7000** при производительности 100 % (без ECO) для $t_0 = -30$ и $t_k = +45$ °C (рис.6). Примем $t_{DG} = t_{M1} = 80$ °C.

Расчетная мощность маслоохладителя составит 11,6 кВт.

Model:	SW3L7000	
Version:	Refcomp V2.0.7	
Date:		
Input		
Refrigerant	R507A	
Te	-30	°C
Tc	45	°C
Pe	2.13	bar
Pc	21.03	bar
Superheat	10	K
Subcooling	2	K
Capacity	100	%
Approach	0	K
Output		
Pressure Ratio:	9.9	[-]
Capacity:	50.6	[kW]
Input Power :	50.4	[kW]
COP:	1	[-]
Condenser Capacity:	89.4	[kW]
Refrigerant Mass Flow:	2034	[kg/h]
oil flow:	26.1	[L/min]
Oil Cooler Capacity:	11.6	[kW]
Discharge Temp:	80	[°C]
Swept Volume:	237	[m3/h]

Рис. 6. Характеристики компрессора SW3L7000

Подберем для этого компрессора маслоохладитель компании *Güntner* по программе подбора GPC при температуре воздуха +35 °C и расходе масла 26,1 л/мин ($\approx 1,56$ м³/час) (рис. 7).

Маслоохладитель	GFHC OD 050.1/11-46		
Мощность:	12.5 kW	Среда:	Bitzer BSE 170 ⁽¹⁾
Резерв поверхности:	0.0 %	Вход:	80.0 °C
Объемн. расход возд.:	8219 m³/h	Выход:	64.4 °C
Воздух на входе:	35.0 °C	Потери давления:	0.65 bar
Высота над ур. моря:	0 m	Объемный расход:	1.56 m³/h

Рис. 7. Характеристики маслоохладителя GFHCOD 050.1/11-46 при $t_{DG} = 80$ °C

Маслоохладитель имеет мощность 12,5 кВт при $t_{DG} = 80$ °C (запас ≈ 8 %). Определим его мощность при $t_{DG} = 90$ °C и $t_{DG} = 95$ °C по формуле (3) и программе подбора GPC.

По формуле (3) при $t_{DG}^* = t_{M1}^* = 90$ °C: $Q_{M0}^* = 12,5 \cdot (90 - 35) / (80 - 35) = 15,3$ кВт.

По программе подбора GPC $Q_{M0}^* = 15,3$ кВт при $t_{DG}^* = t_{M1}^* = 90$ °C (рис. 8).

Маслоохладитель	GFHC OD 050.1/11-46		
Мощность:	15.3 kW	Среда:	Bitzer BSE 170 ⁽¹⁾
Резерв поверхности:	0.0 %	Вход:	90.0 °C
Объемн. расход возд.:	8219 m³/h	Выход:	71.0 °C
Воздух на входе:	35.0 °C	Потери давления:	0.50 bar
Высота над ур. моря:	0 m	Объемный расход:	1.56 m³/h

Рис. 8. Характеристики маслоохладителя GFHCOD 050.1/11-46 при $t_{DG} = 90$ °C

По формуле (3) при $t_{DG}^* = t_{M1}^* = 95$ °C: $Q_{M0}^* = 12,5 \cdot (95 - 35) / (80 - 35) = 16,7$ кВт.

По программе подбора GPC $Q_{M0}^* = 16,7$ кВт при $t_{DG} = t_{M1}^* = 95$ °C (рис. 9).

Маслоохладитель		GFHC OD 050.1/11-46	
Мощность:	16.7 kW	Среда:	Bitzer BSE 170 ⁽¹⁾
Резерв поверхности:	0.0 %	Вход:	95.0 °C
Объемн. расход возд.:	8219 m³/h	Выход:	74.4 °C
Воздух на входе:	35.0 °C	Потери давления:	0.43 bar
Высота над ур. моря:	0 m	Объемный расход:	1.56 m³/h

Рис. 9. Характеристики маслоохладителя GFHCOD 050.1/11-46 при $t_{DG} = 95$ °C

Так как результаты расчета по формуле (3) и по программе GPC совпадают, формула (3) может быть использована для пересчета мощности маслоохладителя, подобранного для $t_{DG} = t_{M1} = 80$ °C, на другие температуры масла на входе в маслоохладитель без дополнительного обращения к программе подбора.

Из формулы (3) также следует, что мощность маслоохладителя линейно возрастает с ростом температуры масла на входе в него, принимаемой равной t_{DG} (рис. 10).

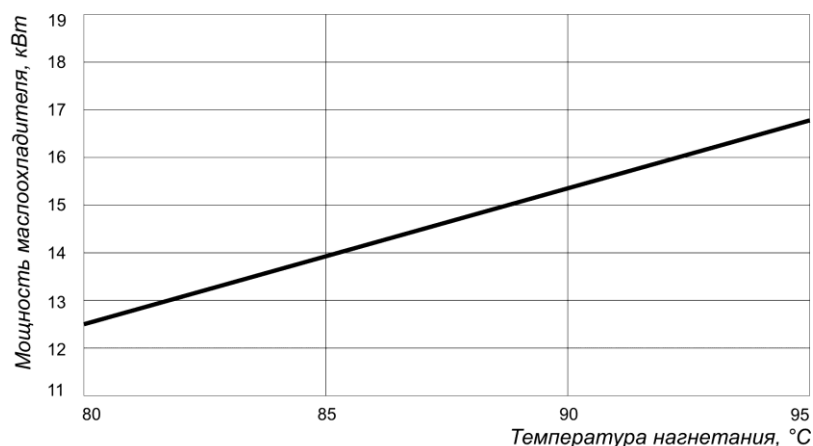


Рис. 10. Зависимость мощности маслоохладителя GFHCOD 050.1/11-46 от температуры нагнетания (температуры масла на входе)

Когда все работает безотказно

Как следует из рис. 5, наибольшая потребность в охлаждении масла возникает при работе компрессора с минимальной производительностью (50 %), при которой температура сжатого пара без охлаждения может превышать 140 °C (рис. 4).

Мощность маслоохладителя при этом будет определяться заданной температурой сжатого пара: чем выше t_{DG} , тем меньше требуемая мощность маслоохладителя (см. рис. 5).

Выполнив в программе Refcomp подбор компрессора **SW3L7000** при производительности 50 % для различных значений температуры сжатого пара (например, 80, 85, 90 и 95 °C), можно получить зависимость требуемой мощности маслоохладителя от заданной температуры нагнетания.

Такая зависимость, полученная автором, представлена в графическом виде на рис. 11.

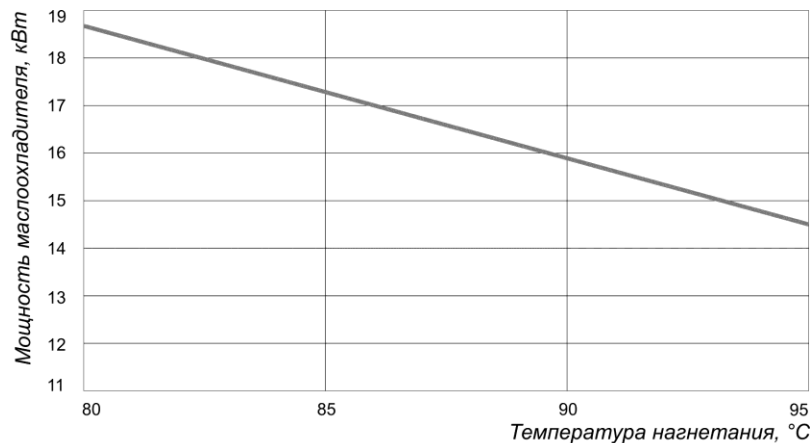


Рис. 11. Зависимость требуемой мощности маслоохладителя для SW3L7000 от температуры нагнетания (производительность 50 %)

Совмещая графики, приведенные на рис. 10 и 11, найдем точку их пересечения (рис. 12).

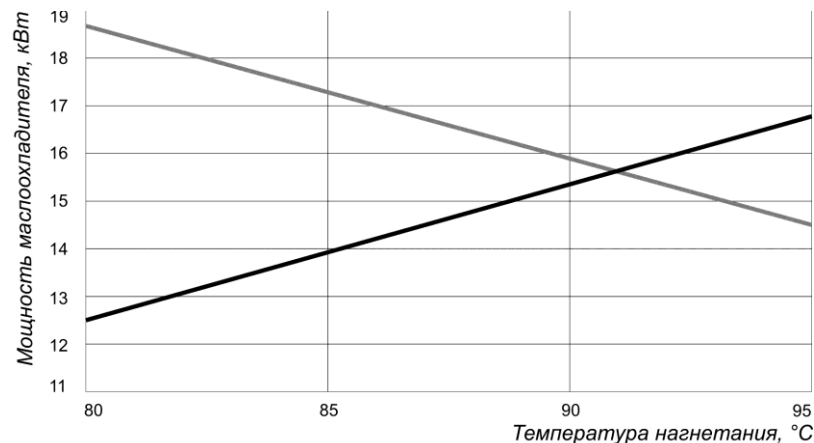


Рис. 12. Определение температуры нагнетания (производительность 50 %)

Эта точка соответствует $t_{DG} \approx 91$ °C, при которой требуемая мощность маслоохладителя для компрессора **SW3L7000**, работающего на производительности 50 %, равна мощности маслоохладителя **GFHC OD 050.1/11-46**, подобранного для этого компрессора при производительности 100 % и $t_{DG} = 80$ °C.

Мощность маслоохладителя при этом равна $\approx 15,5$ кВт. Проверим это значение расчетами.

Расчет по программе *Refcomp* мощности маслоохладителя для компрессора **SW3L7000**, работающего на производительности 50 %, дает значение 15,5 кВт при заданной температуре нагнетания 91 °C (рис. 13).

По формуле (3) при $t_{DG}^* = t_{M1}^* = 91$ °C получаем для маслоохладителя **GFHC OD 050.1/11-46**:

$$Q_{M0}^* = 12,5 \cdot (91 - 35) / (80 - 35) = 15,55 \text{ кВт.}$$

Результаты расчетов по программе подбора *Refcomp* и формуле (3) практически совпадают.

Если мы подберем другой маслоохладитель меньшей производительности, то температура нагнетания соответственно должна увеличиться (точка пересечения сместится вправо).

Model:	SW3L7000	
Version:	Refcomp V2.0.7	
Date:		
Input		
Refrigerant	R507A	
Te	-30	°C
Tc	45	°C
Pe	2.13	bar
Pc	21.03	bar
Superheat	10	K
Subcooling	2	K
Capacity	50	%
Approach	0	K
Output		
Pressure Ratio:	9.9	[-]
Capacity:	22.2	[kW]
Input Power :	35.8	[kW]
COP:	0.62	[-]
Condenser Capacity:	42.5	[kW]
Refrigerant Mass Flow:	895	[kg/h]
oil flow:	26.1	[L/min]
Oil Cooler Capacity:	15.5	[kW]
Discharge Temp:	91	[°C]
Swept Volume:	237	[m3/h]

Рис. 13. Характеристики компрессора SW3L7000 при производительности 50 % и температуре нагнетания 91 °C

Найдем графически аналогично рис. 12 равновесные температуры нагнетания для компрессора **SW3L7000** и двух условных маслоохладителей, имеющих при температуре нагнетания 80 °C и температуре воздуха +35 °C следующие мощности (рис. 14):

- 11,6 кВт (требуемая мощность при производительности компрессора 100 %, рис. 6);
- 8,8 кВт (требуемая мощность при производительности компрессора 100 % с экономайзером (100 % + ECO)).

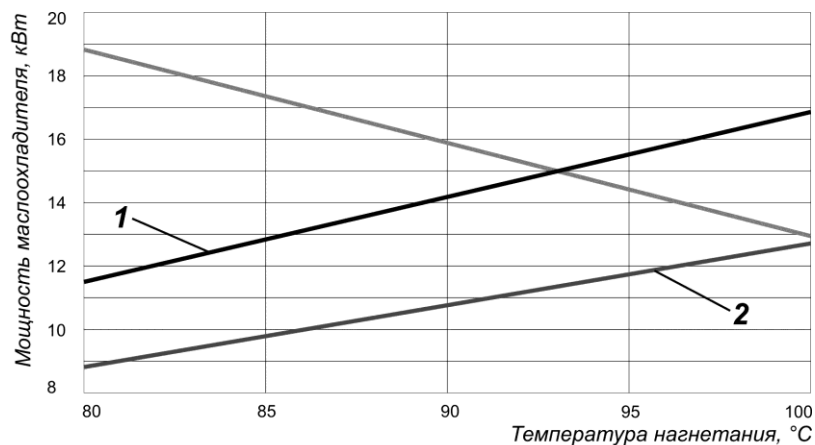


Рис. 14. Определение температуры нагнетания (производительность 50 %)
1 — мощность 11,6 кВт, 2 — мощность 8,8 кВт (при $t_{DG} = 80$ °C)

Как следует из этого рисунка, в первом случае (11,6 кВт) температура нагнетания составляет ≈93 °C. Эта температура меньше принятой безопасной температуры 95 °C, и с данным маслоохладителем компрессор может безаварийно работать при производительности 50 %.

Во втором случае (8,8 кВт) температура нагнетания превышает 100 °С, что не гарантирует работы компрессора при производительности 50 % с этим маслоохладителем.

Минимальная ступень производительности будет ограничена в этом случае производительностью 75 %, при которой, как показывают расчеты, температура нагнетания будет составлять ≈ 95 °С.

Для режимов работы, однозначно требующих применения маслоохладителя, можем действовать аналогичным образом:

- рассчитываем мощность Q_{MO} условного маслоохладителя по требуемой мощности при производительности компрессора 100 % (без ECO) для $t_{DG} = t_{M1} = 80$ °С и определяем мощность Q_{MO}^* этого маслоохладителя при $t_{DG} = t_{M1} = 95$ °С по формуле (3);
- определяем требуемую мощность маслоохладителя Q_{MO}^P при производительности компрессора 50 % для $t_{DG} = 95$ °С и сравниваем ее с пересчитанной на эту температуру мощностью условного маслоохладителя Q_{MO}^* (Q_{MO}^* должно быть $\leq Q_{MO}^P$);
- подбираем маслоохладитель с мощностью $\geq Q_{MO}$, обеспечивающий безаварийную работу компрессора при производительности 100...50%.

Например, расчет воздушного маслоохладителя для компрессора **SW3L7000** на режиме $t_0 = -40$ °С и $t_k = +40$ °С дает следующие результаты (при температуре воздуха +35 °С):

- требуемая мощность маслоохладителя составляет 13,3 кВт при производительности 100 % (без ECO) и $t_{DG} = 80$ °С и 14,3 кВт при производительности 50 % и $t_{DG} = 95$ °С;
- по формуле (3) $Q_{MO}^* = 13,3 \cdot (95 - 35) / (80 - 35) = 17,7$ кВт при $t_{DG}^* = t_{M1}^* = 95$ °С;
- при мощности маслоохладителя $\geq 13,3$ кВт при $t_{DG}^* = t_{M1}^* = 80$ °С холодильная установка должна надежно работать во всем диапазоне производительности 100...50 %.

Таким образом, на основании проведенных расчетов можно сделать следующий вывод:

Подбор маслоохладителя для производительности компрессора 100 % (без экономайзера) и температуры нагнетания 80 °С позволяет компрессору работать и на других ступенях производительности (75 и 50 %) за счет увеличения мощности маслоохладителя при соответствующем возрастании температуры масла.

Приведенные выше рассуждения по расчету мощности и подбору воздушного маслоохладителя для компрессора **SW3L7000** могут быть проведены и для других винтовых компрессоров как в случае сомнения в необходимости применения маслоохладителя, так и при режимах работы, однозначно требующих применения маслоохладителя.

Если программа подбора компрессоров не позволяет выполнить расчет маслоохладителя для всех допустимых ступеней производительности компрессора, рекомендуется производить подбор маслоохладителя на производительности 100 % (без ECO) при максимальной температуре нагнетания 80 °С.

Выводы

1. Задание максимальной температуры нагнетания в автоматическом режиме (80 °С) в программе подбора позволяет корректно рассчитать мощность маслоохладителя.
2. При неизменной температуре воздуха и постоянном расходе масла мощность воздушного маслоохладителя увеличивается с ростом температуры масла на входе в него.
3. Пересчет мощности выбранного воздушного маслоохладителя на температуру масла выше 80 °С можно выполнять по формуле (3).
4. Рекомендуется оценивать необходимость применения и подбирать воздушный маслоохладитель для производительности компрессора 100 % без экономайзера и максимальной температуры нагнетания 80 °С.
5. Выполнение п.4 в большинстве случаев обеспечивает безаварийную работу винтового компрессора на всех допустимых ступенях производительности, так как температура нагнетания не превышает 100 °С даже на минимальной производительности 50 %.
6. Если компрессор при производительности 100 % с экономайзером не требует охлаждения масла при заданной максимальной температуре нагнетания (выше 80 °С), необходимо проверить потребность в маслоохладителе как минимум на режиме 100 % без экономайзера, а по возможности и при минимальной производительности (50 %).
7. Отсутствие маслоохладителя обычно ограничивает систему регулирования производительности компрессора всего двумя ступенями (100 % + ECO и 100 %) вместо четырех, что может быть критичным не только для холодильной установки с одним винтовым компрессором, но и для централи (многокомпрессорного агрегата).

Литература

1. Семенов Ю.В. Холодильные установки. Основы проектирования. — СПб.: Скифия, 2025.
2. Семенов Ю.В. Искусство хладотехники. — СПб.: BooksNonStop, 2020.
3. Leistungregelung bei Schraubenverdichtern: Projektierungshandbuch. ST-430-4. — Sindelfingen (Germany): Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH, 2025.
4. Capacity Control: Application and maintenance manual. WA-03-01-E. — Fujian (China): RefComp (FUJIAN SNOWMAN Co), 2021.
5. Halbhermetische Schraubenverdichter: Projektierungshandbuch. SH-100-4. — Sindelfingen (Germany): Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH, 2011.
6. BITZER International Refrigeration Seminar 26.02.-02.03.2007. — Sindelfingen (Germany): Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH, 2007.
7. Семенов Ю.В. Системы кондиционирования воздуха с поверхностными воздухоохладителями. — М.: Техносфера, 2014.