

С.Т. Демесова¹, Р.А. Омаров¹, Д.Р. Омар¹, Е.С. Ержигитов¹

¹Казахский национальный аграрный университет, г. Алматы, Казахстан

К ИССЛЕДОВАНИЮ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТЕПЛООВОГО НАСОСА С САМООХЛАЖДЕНИЕМ КОМПРЕССОРА

Аннотация. Тепловой насос – техническое средство осуществляющее перенос тепловой энергии от низкопотенциального источника к потребителю, относится к перспективному направлению теплоэнергетики. Выдвинуты гипотезы повышения эффективности теплового насоса при подключении к нему гелиоколлектора, а также путем саморегулируемого охлаждения компрессора испарителем. Теоретическими исследованиями анализируются концепции совместного поглощения энергии прямого солнечного излучения и тепла из окружающего воздуха, которая возникает в гелиоколлекторе при его работе с тепловым насосом, а также интенсификации теплоотдачи с поверхности компрессора путем поглощения избыточного тепла испарителем. Новые технические решения способны повысить теплопроизводительность гелиоколлектора за счет эффекта совместного поглощения энергии прямого солнечного излучения и тепла из окружающего воздуха и теплового насоса за счет возврата в систему тепла выделяемого компрессором и улучшения температурного режима работы компрессора, включая охлаждение электрических обмоток приводного двигателя.

Ключевые слова: тепловой насос, компрессор, испаритель, конденсатор, коэффициент преобразования, низкопотенциальный источник тепла, энергосбережение, энергоэффективность, возобновляемая энергетика.

• • •

Түйіндеме. Жылу сорғысы – жылу энергиясын төмен потенциалды көзден тұтынушыға тасымалдауды жүзеге асыратын техникалық құрал. Ол жылу энергетикасының перспективалық бағытына жатады. Авторлар оған гелиоколлектор қосылған кезде жылу сорғысының тиімділігін арттыру, сондай-ақ компрессорды буландырғышпен өзін-өзі реттеу арқылы салқындату гипотезаларын алға тартты. Теориялық зерттеулер гелиоколлекторда жылу сорғымен жұмыс істеу кезінде пайда болатын тікелей күн сәулесі мен қоршаған ауадан жылу энергиясын бірлесіп сіңіру, сондай-ақ буландырғышпен артық жылуды сіңіру арқылы компрессордың бетінен жылу беруді күшейту тұжырымдамаларын талдайды. Авторлар жаңа техникалық шешімдер – компрессор шығаратын жылу жүйесіне оралу және компрессордың температуралық режимін жақсарту, соның ішінде жетек қозғалтқышының электр орамаларын салқындату арқылы тікелей күн сәулесі мен жылу энергиясын қоршаған

ауамен және жылу сорғысымен бірлесіп сіңіру әсерінен гелиоколлектордың жылу өнімділігін арттыра алады деген қорытындыға келді.

Түйінді сөздер: жылу сорғысы, компрессор, буландырғыш, конденсатор, түрлендіру коэффициенті, төмен потенциалды жылу көзі, энергия үнемдеу, энергия тиімділігі, жаңартылатын энергия.

• • •

Abstract. The heat pump is a technical device that transfers heat energy from a low-potential source to a consumer. It belongs to a promising direction of heat power engineering. The authors put forward hypotheses for improving the efficiency of the heat pump by connecting a solar collector to it, as well as by self-regulating cooling of the compressor with an evaporator. Theoretical research analyzes the concepts of joint absorption of energy from direct solar radiation and heat from the surrounding air, which occurs in the solar collector when it works with the heat pump, as well as the intensification of heat transfer from the compressor surface by absorbing excess heat by the evaporator. The authors conclude that new technical solutions can increase the heat capacity of the solar collector by means of the effect of joint absorption of energy from direct solar radiation and heat from the surrounding air and the heat pump by returning the heat generated by the compressor to the system and improving the temperature regime of the compressor, including cooling the electric windings of the drive motor.

Keywords: heat pump, compressor, evaporator, condenser, conversion factor, low-potential heat source, energy saving, energy efficiency, renewable energy.

Введение. Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов является сегодня одной из глобальных проблем. Истощение запасов традиционного ископаемого топлива и экологические последствия его сжигания обусловили в последние десятилетия значительное повышение интереса к технологиям использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ) [1-3]. Технологии НВИЭ предоставляют большой интерес для сельского хозяйства и экономики в целом [4,5]. Значительно сокращаются затраты на энергоносители, стоимость которых продолжает расти. Большая часть объектов АПК требует повышения степени автономности систем энергообеспечения за счет применения НВИЭ. И, конечно, главная задача НВИЭ – это экологическая чистота. Эти качества будут определять приоритеты формирования конкурентной ситуации на рынке теплогенерирующего оборудования.

Если солнечные коллекторы (гелиоколлекторы), ветро-, ги-

дрозлектростанции широко известны, то о возможностях тепловых насосов (ТН) недостаточно информированы даже специалисты. Известно, что ТН позволяет одновременно вырабатывать тепловую энергию и охлаждать. Позволяют поглощать тепло рассеянное в окружающей среде, в том числе в земле, воде, воздухе, которые принято называть низкопотенциальным теплом (НПТ). По сути, тепловой насос – это преобразованный холодильник. В обоих есть испаритель, компрессор, конденсатор и дросселирующее устройство. Цикл работы у холодильника и насоса абсолютно одинаков, разнятся только параметры настройки. Даже внешне, по размерам и форме, они похожи друг на друга. Затратив 1 кВт электроэнергии на привод компрессора ТН, можно получить 3-4 кВт тепловой энергии. Целью исследования является обоснование нового технического решения ТН, который позволит повысить его технико-экономические показатели.

Новизна технического решения подтверждена патентом РК [6] и исследованиями [7, 8].

Статья публикуется по материалам грантового проекта бюджетной программы 217 Комитета науки МОН РК: № 1769/ГФ4 «Разработка инновационного теплового насоса для «зеленой» низкоуглеродной экономики с микропроцессорным управлением» [9].

Материалы и методы исследований. Функционирование ТН – сложный термодинамический процесс, который состоит из внутренних процессов преобразования энергии, а также из взаимодействия ТН с источником низкопотенциального тепла (ИНПТ), из которого он извлекает тепловую энергию. Рассмотрим закономерности функционирования теплового насоса на примере его работы в системе с гелиоколлектором (ГК), через который извлекается солнечная энергия (E , кВт/м²). Также, в результате понижения температуры теплоносителя в полости ГК происходит дополнительное поглощение тепла из окружающего его воздуха (Q_2). Уравнение теплового баланса процесса имеет следующий вид:

$$(E - Q_0 - Q_1 + 2Q_2) \cdot S - Q_3 = C_1 \cdot \frac{dt_1}{d\tau} , \quad (1)$$

где: Q_0 – потери, связанные с отражением части СЭ от поверхности светопрозрачного покрытия ГК и потерями при прохождении через

покрытие; Q_1 – потери СЭ связанные с прохождением через поглощающую панель (ПП); Q_3 – тепло, которое забирает ТН из ГК или полезная теплопроизводительность ГК; S – площадь ГК; C_1 – общая теплоемкость теплоносителя и материала ГК, ккал/град; t_1 – текущая температура теплоносителя; τ – время, ч.

Решением уравнения (1) является формула для расчета текущей температуры теплоносителя в контуре «ГК-испаритель»:

$$t_1 = \frac{U_L \cdot t_0 \cdot S + W_{EL} \cdot \epsilon \cdot t_4 + E(1 - k_0 - k_1 + k_1 \cdot k_0) \cdot S - W_{EL} \cdot (a - 1)}{U_L \cdot S + W_{EL} \cdot \epsilon} - \frac{E(1 - k_0 - k_1 + k_1 \cdot k_0) \cdot S - W_{EL} \cdot (a - 1) + W_{EL} \cdot \epsilon \cdot (t_4 - t_0)}{U_L \cdot S + W_{EL} \cdot \epsilon} \exp \left[- \frac{(W_{EL} \cdot \epsilon + U_L \cdot S) \cdot \tau}{C_1} \right] \quad (2)$$

Из (2) выводится формула холодопроизводительности испарителя ТН:

$$Q_1 = [E(1 - k_1) \cdot S - W_{EL} \cdot (a - 1) + W_{EL} \cdot \epsilon \cdot (t_4 - t_0)] \exp \left[- \frac{(W_{EL} \cdot \epsilon + U_L \cdot S) \cdot \tau}{C_1} \right] \quad (3),$$

где W_{EL} – расход энергии на привод компрессора

Для описания процесса самоохладения компрессора рассмотрим схему ТН, показанную на рисунке 1 [6]. На схеме: 1 – теплообменник испарителя; 2 – теплообменник конденсатора; 3 – компрессор; 4 – дроссельный клапан; 5 и 6 – трубки, по которым циркулирует хладагент (фреон), уложенные по винтовой линии в теплообменниках 5 и 6; 7 – штуцеры, соединяющие внешние подводящие трубки с выходными концами внутренних трубок 5 и 6; 8 – кольцевая сетчатая обечайка-делитель воздушных потоков.

Как видно, теплообменники испарителя и конденсатора изготовлены в виде кольцеобразных емкостей, с внутренним радиусом R_1 и внешним R_2 . Емкости устанавливаются друг над другом, соосно – снизу теплообменник испарителя, а сверху конденсатор. Компрессор устанавливается в центре цилиндрической обечайки теплообменника испарителя.

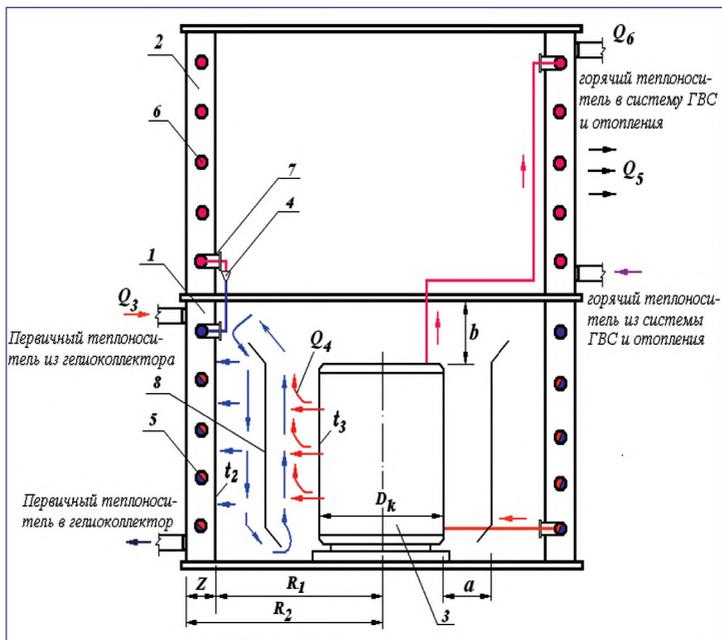


Рисунок 1 – Схема конструкции ТН

Q_3 – тепло, которое поступает из ГК посредством циркулирующего в контуре теплоносителя, через верхний патрубок теплообменника испарителя; Q_6 – тепло, которое передается в систему отопления, через верхний патрубок теплообменника конденсатора; Q_4 – выделяющееся с поверхности компрессора. При работе ТН трубы 5 поглощают тепло из ГК, которое передается в конденсатор и систему отопления. Одновременно происходит нагрев компрессора, с выделением тепла Q_4 (рисунок 1). Нагрев является следствием сжатия парообразного хладагента и нагрева обмоток приводного электродвигателя. В известных ТН и холодильных установках задачу охлаждения решают путем внешнего обдува корпуса компрессора вентилятором. Если принудительно не удалять выделяемое тепло, компрессор может выйти из строя из-за перегрева. Нежелательно превышение его температуры свыше 90°C .

В предлагаемой конструкции ТН компрессор охлаждается при помощи испарителя, теплообменник которого охватывает поверхность компрессора [6]. Процесс осуществляется следующим обра-

зом. Воздушный поток циркулирующий в промежутке между компрессором и испарителем, движется вверх вдоль нагретой поверхности компрессора, снимая с него тепло. Затем, часть потока, соприкасаясь с внутренней холодной поверхностью теплообменника испарителя, опускается вниз, отдавая ему свое тепло. Ввиду того, что нагретая и холодная поверхности располагаются достаточно близко, также образуется теплообмен излучением между поверхностями.

Задачу нагрева компрессора, можно рассмотреть, как процесс нагрева тела внутренних источников тепла, постоянной мощности P [10,11].

Принимаются следующие предположения:

- температура тела в любой момент времени одинакова во всех точках объема V ;
- теплоемкость тела C не зависит от температуры;
- коэффициент теплоотдачи $k_{то}$ практически не зависит от превышения температуры и одинаков по всей поверхности тела.

За время $\partial\tau$ энергия, генерируемая в теле, будет расходоваться на повышение температуры тела ($C \cdot \partial t$) а часть ее ($k_{то} \cdot t \cdot \partial\tau$) будет отдаваться в окружающую среду:

$$P \cdot \partial\tau = C \cdot \partial t + k_{то} \cdot S \cdot \partial\tau \quad (4)$$

После соответствующих преобразований уравнение (4) приводится к виду:

$$\frac{\partial t}{\partial\tau} + \frac{k_{то} \cdot S}{C} \cdot t - \frac{P}{C} = 0 \quad (5)$$

Частным решением (5) является формула расчета температуры компрессора:

$$t_i = \frac{P}{k_{то} \cdot S}$$

Общее решение дополнительного уравнения:

$$\frac{\partial t_2}{\partial\tau} + \frac{k_{то} \cdot S}{C} \cdot t_2 = 0$$

является:

$$t_2 = A \cdot e^{\tau/T}$$

где A — постоянная интегрирования, определяемая условиями задач.

Величина

$$T = \frac{C}{k_{\text{то}} \cdot S}$$

равная отношению полной теплоемкости C тела к его теплоотдающей способности $k_{\text{то}} \cdot S$, называется постоянной времени нагрева.

Общим решением уравнения (5) является зависимость:

$$t = t_i + t_2 = \frac{P}{k_{\text{то}} \cdot S} + A \cdot e^{\frac{\tau}{T}} \quad (6)$$

Для определения постоянной A используется следующее условие:

при $\tau = 0$ и $t=0$:

$$0 = \frac{P}{k_{\text{то}} \cdot S} + A$$

откуда:

$$A = - \frac{P}{k_{\text{то}} \cdot S} .$$

Подставляя полученное выражение для A в (6), будем иметь:

$$t = \frac{P}{k_{\text{то}} \cdot S} + (1 - e^{\tau/T}) .$$

Из последнего выражения видно, что при $\tau \rightarrow \infty$

$$t_{\text{уст}} = \frac{P}{k_{\text{то}} \cdot S} .$$

Из полученного выражения следует, что

$$\frac{t}{t_{\text{уст}}} = 1 - e^{\tau/T} .$$

Таким образом, $t_{\text{уст}}$ равно установившемуся превышению температуры, когда выделяемая мощность P становится численно равной мощности, отдаваемой в окружающую среду с поверхности нагретого тела ($k_{\text{то}} \cdot S \cdot t_{\text{уст}}$). Если в момент включения ТН компрессор имел начальное превышение температуры $t_{\text{нач}}$, то при определении постоянной A необходимо учесть $\tau = 0$; $t = t_{\text{нач}}$.

Из (6) следует:

$$t_{\text{уст}} = \frac{P}{k_{\text{то}} \cdot S} + A$$

откуда

$$A = t_{\text{уст}} - \frac{P}{k_{\text{то}} \cdot S}$$

Общее решение уравнения (5) будет:

$$t = t_{уст} \cdot e^{-\tau/T} + \frac{P}{k_{то,с}} \cdot (1 - e^{-\tau/T}) \quad (7)$$

или

$$t = t_{нач} \cdot e^{-\tau/T} + t_{уст} \cdot (1 - e^{-\tau/T}) \quad (8)$$

где: при $\tau = \infty$; $t = t_{уст}$

Для пользования формулами (7) и (8) необходимо знать коэффициент теплоотдачи $k_{то}$.

Как было отмечено выше, при исследовании охлаждения компрессора в нашем случае необходим отдельный учет отдачи тепла с поверхности компрессора конвекцией и излучением. Для расчета отдачи тепла конвекцией широкое применение получили результаты теории подобия, на основании которой получены эффективные методы обобщения опытных данных [11]. При расчете отдачи тепла с поверхности нагретых тел окружающей среде отдельно конвекцией и излучением вводится понятие о коэффициентах теплоотдачи конвекцией $k_{то,к}$ и лучеиспусканием $k_{то,из}$. Исходя из выражения (7), имеем:

$$P = P_k + P_{из} = (k_{то,к} + k_{то,из}) \cdot S \cdot t \quad (9)$$

где P_k и $P_{из}$ – мощность, отдаваемая конвекцией и излучением соответственно;

$k_{то,к} + k_{то,из} = k_{то}$. Здесь $k_{то}$ – суммарный коэффициент теплоотдачи в формуле (4).

Важным параметром является мощность внутреннего источника нагрева или мощность нагревающая компрессор (P). Данный параметр можно определить через КПД (η_k) компрессора. Если η_k показывает полезную мощность, то $(1 - \eta_k)$ показывает потери, которые нагревают корпус компрессора. Тогда:

$$P = N \cdot (1 - \eta_k) \quad (10)$$

где N – мощность компрессора.

В отношении компрессора – мощность, это произведение производительности по газу на работу по его сжатию. Такую мощность называют теоретической и рассчитывают по формуле [12]:

$$N_e = (Q \cdot \rho \cdot R) / 1000$$

где: N_e – теоретическая мощность, кВт; Q – производительность, м³/мин; ρ – плотность газа, кг/м³; R – теоретическая работа сжатия газа, Дж/кг.

Однако известно, что теоретическая мощность не совпадает с мощностью, которую требуется подвести к компрессору для его работы, и с мощностью, которую должен вырабатывать двигатель, подключаемый к компрессору. Связано это с явлением потери мощности, что численно описывается набором коэффициентов полезного действия. Осуществляемый в компрессоре процесс сжатия обладает своим показателем КПД (в зависимости от типа процесса), а также в компрессоре часть подводимой мощности теряется при механической передаче. В связи с этим необходимо воспользоваться эффективной мощностью (мощностью на валу), связанной с теоретической мощностью следующей формулой:

$$N_э = N_e / \eta_m \cdot \eta_{пр}$$

где: $N_э$ – эффективная мощность, кВт; η_m – механический КПД компрессора; $\eta_{пр}$ – КПД процесса сжатия газа.

Если рассматривать компрессорную установку, оснащенную также двигателем и передачей, то в ней будут наблюдаться дополнительные потери мощности, отражаемые двумя КПД η_d и $\eta_{пер}$, соответственно. Тогда мощность, которую необходимо подвести к двигателю компрессорной установки для ее работы, будет равна:

$$N_d = N_э / \eta_d \cdot \eta_{пер}$$

где: N_d – мощность двигателя компрессорной установки, кВт; η_d – КПД двигателя; $\eta_{пер}$ – КПД механической передачи.

Учет КПД всех элементов компрессорной установки крайне важен. Один и тот же двигатель может оказаться неподходящим для одной и той же задачи по сжатию газа, если она будет осуществляться компрессорами разного типа, поскольку их КПД могут сильно отличаться. Мощности, идущей непосредственно на сжатие газа, может попросту не хватить вследствие больших потерь. К примеру, в среднем КПД винтовых компрессоров составляет 95%, в то время как у поршневых компрессоров эта величина оказывается ближе к 80%, то есть разница в эффективности использования подводимой мощности может составлять 10-15% в пользу винтового устройства.

Выводы. Обосновано новое техническое решение теплового насоса. В предложенном устройстве устранен ряд принципиальных недостатков присущих известным аналогам. За счет нового подхода к компоновке и размещению основных элементов друг относительно друга, достигнуто саморегулируемое охлаждение компрессора путем поглощения его избыточного тепла испарителем. Для этого, компрессор помещен во внутреннее пространство теплообменника испарите-

ля изготовленного в виде кольцеобразной емкости. Также, решение позволило улучшить массогабаритные показатели теплового насоса. Выполнен теоретический анализ работы теплового насоса совместно с гелиоколлектором. Подтверждено, что работа гелиоколлектора через тепловой насос существенно повышает его теплопроизводительность. Эффект достигается за счет совместного поглощения энергии прямого солнечного излучения и тепла из окружающего воздуха. Резервом дополнительного повышения теплопроизводительности может быть применение прозрачной поглощающей панели, пропускающей поток прямого и рассеянного солнечного излучения непосредственно к теплоносителю.

Проведены теоретические исследования процесса нагрева компрессора. Подтверждено, что температура компрессора может быть стабилизирована на заданном уровне путем охлаждения испарителем, без применения охлаждающего вентилятора. Эффект достигается за счет интенсификации теплоотдачи с поверхности компрессора.

Список литературы

1 Конференция по климату в Париже (2015), [Электронный ресурс]: <https://ru.wikipedia.org>., [Konferentsiya po klimatu v Parizhe (2015), [Elektronnyj resurs]: <https://ru.wikipedia.org>]

2 Концепция проекта ЭКСПО-2017, [Электронный ресурс]: <http://expo2017astana.com/future-energy/zamyisel-proekta>, [Kontseptsiya proekta ENKSP0-2017. <http://expo2017astana.com/future-energy/zamyisel-proekta>]

3 *Jacobson M.Z., Delucchi M.A.* Providing all global energy with wind, water, and solar power, Energy Policy. Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. Volume 39, Issue 3, March 2011, Pages 1154–1169, [Электронный ресурс]: <https://web.stanford.edu.pdf>.

4 Закон Республики Казахстан. Об энергосбережении и повышении энергоэффективности: утв. 13 января 2012 года, №541-IV], [Zakon Respubliki Kazakhstan. Ob ehnergoberezenii i povyshenii ehnergoehffektivnosti: utv. 13 yanvarya 2012 goda, №541-IV].]

5 Указ Президента Республики Казахстан. О Концепции по переходу Республики Казахстан к зеленой экономике: утв. 30 мая 2013 г., №577., [Ukaz Prezidenta Respubliki Kazakhstan. O Kontseptsii po perekhodu Respubliki Kazakhstan k zelenoj ehkonomike: utv. 30 maya 2013 g., №577..]

6 Инновационный патент РК 30004, Тепловой насос, МПК F24D 3/08. опубл. 15.06.2015, Бюл. №2. –3 с., [Innovatsionnyj patent RK 30004, Teplovoj nasos, MPK F24D 3/08. opubl. 15.06.2015, Byul. №2. –3 s.,]

7 *Demessova, S., Omarov, R.*, Results of experimental studies of a heat pump with compressor self-cooling // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, 2020, 10(1), IJMPERDFEB202015,

с. 175-184., [Электронный ресурс]: <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100814505&tip=sid&clean>

8 *Omarov R., Stoyanov, I., Demessova, S.*, Experimental studies of a heat pump with microprocessor control on an animal farm // International Journal of Applied Engineering Research, 2017, 12(24), с. 14259-14267.

9 Отчет по НИР за 2017 г., МРНТИ 44.37, № гос.рег. 0115PK02200. инв. №0216PK00848; программа 055 «Научная и/или научно-техническая деятельность», подпрограмма 101 «Грантовое финансирование научных исследований» по проекту: «Разработка инновационного теплового насоса для «зеленой» низкоуглеродной экономики с микропроцессорным управлением» (заключительный)., [Отчет по НИР за 2017 г., МРНТИ 44.37, № гос.рег. 0115RK02200. inv. №0216RK00848; программа 055 «Nauchnaya i/ili nauchno-tekhnicheskaya deyatel'nost'», podprogramma 101 «Grantovoe finansirovanie nauchnykh issledovaniy» po proektu: «Razrabotka innovatsionnogo teplovogo nasosa dlya «zelenoj» nizkouglerodnoj ehkonomiki s mikroprotsessornym upravleniem» (zaklyuchitel'nyj).]

10 Процесс нагрева тела от внутренних источников тепла, [Электронный ресурс]: <https://electrono.ru/elektrotexnicheskaya-apparatura/process-nagreva-tela-ot-vnutrennix-istochnikov-tepla.>, [Protsess nagreva tela ot vnutrennix istochnikov tepla, [EHlektronnyj resurs]: <https://electrono.ru/elektrotexnicheskaya-apparatura/process-nagreva-tela-ot-vnutrennix-istochnikov-tepla>]

11 Основные характеристики компрессора. Производительность компрессора. Мощность компрессора, [Электронный ресурс]: https://intech-gmbh.ru/compr_main_parameters., [Osnovnye kharakteristiki kompressora. Proizvoditel'nost' kompressora. Moshhnost' kompressora, [EHlektronnyj resurs]: https://intech-gmbh.ru/compr_main_parameters]