

УДК 621.51:628.8

The Prospect of Using Centrifugal and Screw Compressors in the Systems of Centralized and Decentralized Compressed Air Supply of the Industrial Enterprises

Yuri V. Kuznetsov^a and Alexandr G. Nikiforov^{b*}

^aUral Consulting Inc.

Calgary, AB, T2Y0C3, Canada

^bSmolensk State Agricultural Academy

10/2 Great Soviet Str., Smolensk, 214000, Russia

Received 04.02.2017, received in revised form 11.03.2017, accepted 29.04.2017

Discuss the use of the existing centrifugal and screw compressors in the systems of centralized and decentralized compressed air supply and the condition of the trunk air ducts in industry.

Key words: centrifugal and screw compressors, main air duct, centralized and decentralized air supply system.

Citation: Kuznetsov Yu.V., Nikiforov A.G. The prospect of using centrifugal and screw compressors in the systems of centralized and decentralized compressed air supply of the industrial enterprises, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2017, 10(3), 399-406. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-3-399-406.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: nikiforof@mail.ru

Перспектива использования центробежных и винтовых компрессоров в системах централизованного и децентрализованного снабжения сжатым воздухом промышленных предприятий

Ю.В. Кузнецов^а, А.Г. Никифоров^б

^аЮрал Консалтинг

Канада, Калгари, АБ, Т2ИОС3

^бФГБОУ ВО Смоленская ГСХА

Россия, 214000, Смоленск, ул. Большая Советская, 10/2

Рассмотрены вопросы использования действующих центробежных и локальных винтовых компрессоров в системах централизованного и децентрализованного снабжения сжатым воздухом, а также состояние магистральных воздухопроводов на промышленных предприятиях.

Ключевые слова: центробежные и винтовые компрессоры, магистральные воздухопроводы, централизованная и децентрализованная система воздуходобывания.

Система централизованного снабжения сжатым воздухом (ЦВ) включает центральную компрессорную станцию (ЦКС) или группу таких станций и магистральные сети до потребителей сжатого воздуха (цехов, крупных участков предприятия). Децентрализованные системы воздуходобывания (ДЦВ) подразделяются на индивидуальные и местные. В индивидуальной системе компрессор обеспечивает сжатым воздухом отдельного потребителя; в местных системах небольшая компрессорная станция обеспечивает группу потребителей, объединенных технологической цепочкой, одинаковыми требованиями к качеству сжатого воздуха и другими признаками. Магистральные воздухопроводы в системе ДЦВ отсутствуют.

Системы ЦВ создавались на крупных промышленных предприятиях СССР. ЦКС выполнялись преимущественно по типовым проектам Ростовского Гипростройдормаша (проекты 904-1-39,904-1-40,904-1-52 и др.) и комплектовались мощными центробежными компрессорами К-250, К-500 или поршневыми компрессорами 4ВМ-100/9 на давление до 0,9 МПа и суммарную производительность от 200 до 2000 м³/мин. На небольших предприятиях ЦКС комплектовались в основном поршневыми компрессорами на давление 0,35-0,9 МПа с суммарной производительностью до нескольких десятков м³/мин. К началу экономических реформ в промышленности скопилось до 25 % активной части фондов, требующих замены. При ежегодной амортизации машин 3,7-5,1 % к 2000 г. в эксплуатации находилось более 60 % полностью амортизированных машин и оборудования. Это относится и к компрессорам ЦКС, у которых нормативный срок службы (амортизационный период) составляет: поршневые компрессоры общего назначения с производительностью более 20 м³/мин 14,9 лет; турбокомпрессоры, воздуходувки 25 лет [1]. Достижение компрессором нормативного срока эксплуатации не означает, что он достиг своего предельного состояния и должен быть снят с эксплуатации; по такому показателю имеется основание списать компрессор. Дополнительным аргументом к замене компрессоров может быть избыточная и неравномерная нагрузка ЦКС, когда предприятия сокращают объ-

емы своего производства, переводят отдельные цехи и участки на одно-двухсменный режим работы или просто их закрывают. В таких условиях для экономичной эксплуатации требуются компрессоры с эффективной системой регулирования производительности. К тому же потребность в компрессорах небольшой и средней производительности сейчас существенно возросла в связи с развитием предприятий малого и среднего бизнеса, поэтому с середины 1990-х гг. начались активные поставки в Россию импортных компрессоров, особенно винтовых. Российских энергетиков захлестнул вихрь ярких проспектов, презентаций и выставок от компаний – производителей компрессорного оборудования. Рекламная кампания активно поддерживается публикациями в информационном поле Интернета и в некоторых журналах, где обсуждаются недостатки системы ЦВ и компрессоров К-250 и К-500. Мнения авторов разделились по интересам продаж: одни предлагают систему ДЦВ с установкой множества локальных винтовых компрессоров, другие – замену в ЦКС машин К-250 и К-500 на современные компрессоры иных производителей.

Оценка состояния действующих компрессоров с рекомендациями по их замене в значительной части публикаций скорее декларативна, чем доказательна. Вот, например, фрагмент из [2]: «На большинстве компрессорных станций установлены физически и морально устаревшие компрессорные агрегаты, имеющие удельный расход электроэнергии на 25-30 % выше по сравнению с современными компрессорными агрегатами». В сборнике статей [3] удельный расход энергии компрессором К-250 оценен в $7,9 \text{ кВт}/(\text{м}^3/\text{мин}) \approx 0,132 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ (с. 12) и далее в $0,113 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ (с. 46). Сентенции «физически и морально устаревшие» или «после длительной эксплуатации» не объясняют причины роста затрат энергии на производство сжатого воздуха российскими компрессорами в процессе их эксплуатации. Решение этой проблемы представляется простым: замена существующих компрессорных агрегатов на аналоги зарубежных производителей или полная децентрализация воздухообеспечения промышленных предприятий. Здесь уместно отметить, что мода на децентрализацию коснулась также и системы тепло- и электроснабжения. Достаточно привести примеры, жуткие с инженерной точки зрения. Так, в ряде многоэтажных жилых домов г. Смоленска, подключенных к централизованному теплоснабжению, с благословения городских властей под лозунгом физического и морального устаревания централизованного теплоснабжения в отдельных квартирах установлено индивидуальное квартирное отопление. Под этим же лозунгом устанавливаются блочно-модульные котельные или мини-ТЭЦ. Проанализируем более подробно насколько обосновано применение этого лозунга для систем воздухообеспечения промышленных предприятий.

Известно, что физический износ оборудования определяется не столько длительной эксплуатацией, сколько ненадлежащим контролем за рабочими параметрами машины, несоблюдением сроков технического обслуживания, уровнем квалификации ремонтного персонала и другими причинами. В центробежных компрессорах наибольший физический износ происходит в их проточной части, подшипниках и полумуфтах, а также в промежуточных охладителях. Как отмечают специалисты «Нева-Турбо» [4], из-за нарушения центровки ротора или неправильной установки его после ремонта возникают сильные вибрации, подплавление опорно-упорного подшипника и, как результат, увеличиваются зазоры в лабиринтных уплотнениях рабочих колес, вала и думмиса. Обратное перетекание воздуха через ненормативные зазоры лабиринтных уплотнений снижает политропный КПД секций (ниже 80 %) на 10-12 %,

как следствие, уменьшается производительность, а удельный расход энергии на производство сжатого воздуха возрастает на 12-15 %. Физический износ промежуточных охладителей происходит вследствие отложения накипи на внутренних стенках теплообменных трубок вплоть до их полной закупорки. Показателем состояния охладителя, хорошо поддающегося контролю, служит величина недоохлаждения Δt , равная разности температур воздуха после охладителя и воды на входе в охладитель. Согласно п. 3.3.11 «Правил технической эксплуатации воздушных компрессорных станций» [5] $\Delta t = 12$ °C после очистки охладителя и $\Delta t \leq 18$ °C в период его эксплуатации. Повышение недоохлаждения на каждые 10 °C приводит по данным эксплуатации и расчетам [6] к росту удельного расхода энергии на 0,6-0,8 % и снижению производительности на 2-5 %. В результате возрастания термического сопротивления в теплообменном пучке $\Delta t > 70$ °C перед второй и третьей секциями компрессора не редкость. Компрессоры любого типа, в том числе и современные центробежные компрессоры, быстро «физически устаревают» при охлаждении их теплообменников водой с высоким содержанием карбонатной жесткости более 2,85 мг-экв/кг, а срок эксплуатации имеет здесь косвенное значение. Различные способы очистки трубок от накипи – механический (шомполами и сверлением), химической промывкой – неэффективны, это по сути борьба с последствием, а не с причиной отложения накипи. В последнее время обработку циркулирующей и подпиточной воды успешно проводят специальными корректирующими реагентами (фосфонатами), которые переводят накипеобразующие соли в рыхлый не прикипающий шлам, удаляемый продувкой из системы обратного водоснабжения. Моральное устаревание обычно наступает ранее физического износа. Центробежные компрессоры линейки К (К-250, К-500 и др.) были разработаны в 60-х гг. прошлого столетия, продолжительное время это были совершенные и надежные машины, тысячи которых сейчас находятся в эксплуатации на многих крупных предприятиях. В свою очередь, компанией Cameron в 1965 г. был разработан центробежный компрессор со встроенным мультипликатором, а в результате совершенствования этой модели в 1994 г. была создана линейка воздушных компрессоров Turbo Air (с 2014 г. это brand INGERSOL RAND).

Стремление многих энергетиков предприятий заменить компрессоры в ЦКС на импортные в ближайшее время вряд ли осуществимо, так как замена потребует значительных инвестиций. Выход из такого положения имеется: завод «Дальэнергомаш» и компания «Токс Софт» предлагают модернизацию компрессоров непосредственно в ЦКС путем реконструкции проточной части и установки системы управления АСУТП «Воздух». Модернизация позволяет приспособить рабочие параметры компрессора к требованиям потребителей сжатого воздуха: производительность можно изменять от -50 до +14 %, давление – от -50 до +10 %, компрессор может работать на холостом ходу и количество разрешенных режимов пуска/остановка увеличено до одного в сутки. В совокупности это позволяет получить экономию энергии от 10 до 15 % на один агрегат [4] и в определенной степени морально «обновить» компрессор. Завод «Дальэнергомаш» сейчас выпускает модернизированные компрессоры К-250 и К-500 с улучшенными технико-экономическими показателями [7, 8]. В системе АСУТП «Воздух» остался морально устаревший способ регулирования дроссельной заслонкой на всасывании как менее экономичный по сравнению со способом закрутки потока на компрессорах TURBO-AIR. На рис. показана зависимость удельного расхода электроэнергии ρ_e , кВт

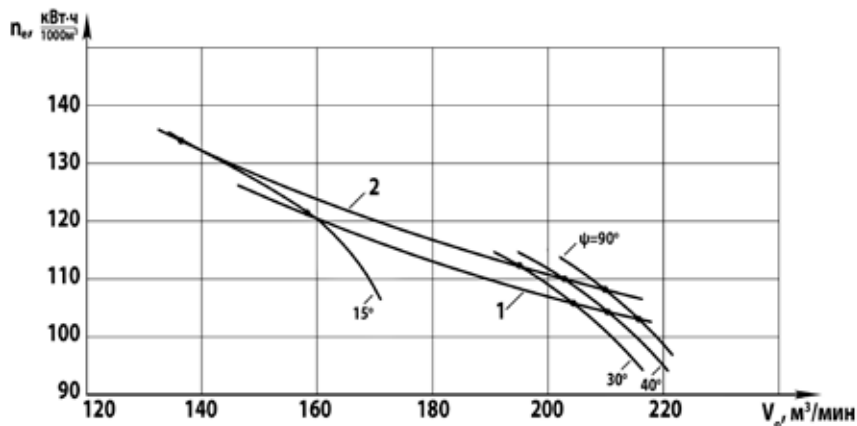


Рис. Зависимость удельного расхода электроэнергии n_e на привод компрессора К-250-61-5 от снижения производительности V_0 при дросселировании потока на всасывании при рабочих давлениях: 1 – 0,65 МПа; 2 – 0,75 МПа.

$\cdot \text{ч}/1000\text{м}^3$ от производительности V , $\text{м}^3/\text{мин}$, приведенной к нормальным условиям, при различных положениях дроссельной заслонки $\Psi=90; 40; 30$ и 15° и давлении на нагнетании 0,65 и 0,75 МПа. Данные получены на газодинамических испытаниях по ОСТ 26-12-2012-79 компрессора К-250-61-5 с загрязненными охладителями после четырех лет эксплуатации. При разгрузке компрессора до 65 % ($\Psi=15^\circ$) $n_e=136 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/1000\text{м}^3$ (давление 0,75 МПа). Чтобы обезопасить машину от попадания в помпаж завод-изготовитель ограничивает угол открытия заслонки $\Psi=22^\circ$, но на практике этот угол устанавливают большей частью в $\Psi=30^\circ$ ($n_e \approx 114 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/1000\text{м}^3$). Мифические данные по удельным затратам энергии, приведенные выше [3], не обоснованы и относятся, по-видимому, к нетипичному износу компрессора К-250. Рассчитаем среднее значение удельного расхода электроэнергии для ЦКС, где два компрессора К-250 работают с полной нагрузкой с $n_e=106 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/1000\text{м}^3$ и один – в режиме разгрузки с $n_e=114 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/1000\text{м}^3$: $n_e^{\text{ср}} = (2 \cdot 106 + 114) / 3 = 108,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/1000\text{м}^3$, что характерно для большинства ЦКС. Здесь надо учесть периодический режим разгрузки в течение суток или недели, тогда $n_e^{\text{ср}}$ будет ниже. Сравним далее полученное значение $n_e^{\text{ср}}$ с удельным расходом электроэнергии современными центробежными компрессорами, у которых, как показано в [8], $n_e \approx 96 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/1000\text{м}^3$. Тогда относительное изменение $\Delta n_e = (108,6 - 96) / 96 = 0,13$, т.е. превышение расхода электроэнергии получается не более 13, а не 25-30 %, по вышеприведенным данным [2].

В настоящее время на некоторых крупных предприятиях (ООО «Уфимское моторостроительное производственное объединение», КАМАЗ и др.), на средних и особенно мелких предприятиях внедрены системы ДСВ с установкой винтовых компрессоров (ВК) в большинстве своем зарубежного производства. О преимуществах ВК написано достаточно, но зачастую их технико-экономические показатели преувеличены. Характерная оценка показателей [9]: КПД ВК равен 95 %, срок службы 15-20 лет. Каков КПД (изотермический, адиабатный, механический, электропривода или общий), авторами не уточняется. Один только электрический КПД асинхронного двигателя составляет 94-96 %. По-видимому, такие показатели – это удобные и непроверяемые характеристики для убеждения заказчика в покупке оборудования. Но за-

казчика интересуют не малопонятные КПД, а отчетный показатель работы ЦКС – реальный удельный расход электроэнергии на производство сжатого воздуха. Ориентируясь на среднее значение удельной мощности ВК, работающего на давление 0,7-0,8 МПа, 5,8-6,4 кВт/(м³/мин), получим удельный расход электроэнергии 97-107 кВт · ч/1000м³, что выше такого показателя у современных центробежных машин и даже у модернизированных компрессоров К-250. Большинство производителей заявляют срок службы ВК 40000 ч (есть 60000, 100000 ч, вплоть до 20 лет). Срок службы – календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта или его возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние. У ВК срок службы определяется в основном состоянием винтового блока и подшипников; замена винтового блока составляет 50-60 % от стоимости компрессора. Постоянное совершенствование подшипниковых узлов позволило увеличить срок их службы, сравнимый с ресурсом винтовой пары, но нередки случаи, когда подшипники выходили из строя за 20000-30000 ч. Срок службы ВК в реальных условиях эксплуатации – это случайная величина, зависящая от температуры и чистоты воздуха в помещении, загрязненности воздуха, поступающего в компрессор, своевременного и квалифицированного проведения технического обслуживания и других факторов. Статистическим методом срок службы компрессоров не определить, так как их производители в коммерческих интересах не раскрывают сведений о частоте поломок узлов и элементов машины. Слабых мест у ВК достаточно, что отражено, например, в статьях «Компрессоры FIAK/10 мифов о винтовых компрессорах» [10], «О чем умалчивают продавцы винтовых компрессоров» [11] и других публикациях. К весьма высокой стоимости ВК следует добавить дорогое техническое обслуживание квалифицированными специалистами (техническое обслуживание от нулевого до третьего), дорогие запчасти и расходные материалы. После приобретения десятков ВК заказчик обнаружит, что его подсадили на своеобразную «винтовую иглу» с неопределенным сроком окупаемости. Диапазон производства сжатого воздуха от 10 м³/мин и выше на давление до 1,0 МПа постепенно осваивается перспективными центробежными компрессорами от компаний INGERSOL RAND, SAMSUNG TECHWIN и других, так что в этой нише следует ожидать борьбу за рынок между производителями винтовых и центробежных компрессоров.

Техническое состояние магистральных сетей используют как один из аргументов в пользу перехода к ДСВ. Так, например, называют потери давления в них до 0,2 МПа, утечки – до 40 %; фантастическую качественную оценку дают представители KRAFT AIR [12]: «Попробуем себе представить картину компрессорной станции на обычном российском заводе. При входе мы видим старые, ржавые, провисшие трубопроводы, доносится характерный свист – это утечки сжатого воздуха. *По трубопроводу (!)* мы идем к главной компрессорной. При приближении мы начинаем ощущать вибрацию и шум. ..., кажется, что мы попали в цех по прессовке и ковке металла». Резюме: приобретение локальных ВК для ДСВ снизит стоимость производства сжатого воздуха на промышленном предприятии, позволит ликвидировать изношенные магистральные трубопроводы компрессорной станции, и т.д. *В оценке потерь давления* в магистральном воздухопроводе просматривается (умышленная или по незнанию) путаница. ЦКС устанавливаются, как правило, в центре нагрузок, и на стадии проектирования расчетные потери давления в магистральных воздухопроводах не превышают 0,02-0,03 МПа; при протяженном расположении крупных потребителей устанавливаются последовательно две или три ЦКС.

В распределительных сетях расчетные потери давления до 0,03 МПа, на осушку и очистку сжатого воздуха $\approx 0,05$ МПа, но эти потери давления к магистральным воздухопроводам не относятся. После монтажа к магистральным сетям иногда подключаются длинные воздухопроводы небольшого диаметра для мелких потребителей (деревообработка, пневморазгрузка, участок химводоподготовки и др.); нерасчетные потери давления в них значительны, и, может быть, авторы публикаций относят их к магистральным сетям с общей потерей давления до 0,2 МПа, но такое в корне неверно.

Утечки сжатого воздуха по данным многочисленных обследований магистральных сетей, не более 1 % и быстро устраняются при их обнаружении. Другое дело – утечки в распределительных сетях цехов и участков, там они достигают 40 % и более от общего расхода сжатого воздуха потребителем. Устранение таких местных утечек – вопрос энергосбережения на предприятии, а установка локального ВК на участок с такими утечками – это проблема его эффективной работы.

Срок службы стальных магистральных воздухопроводов нормативами не определяется. Если их отнести к газопроводам, то можно воспользоваться постановлением Госгортехнадзора РФ от 18.03.2003 № 9 «Об утверждении Правил безопасности систем газораспределения и газопотребления» п. 3.3.28: «Внеочередное техническое обследование (диагностика технического состояния) газопроводов должны проводиться по истечении расчетного ресурса работы, принимаемого для стальных газопроводов 40 лет». Правда, просто сказать, что стальная труба служит 40 лет, нельзя – при транспорте осушенного сжатого воздуха она может служить гораздо дольше, а при транспорте влажного сжатого воздуха очень вероятно, что придет в негодность существенно раньше. Лучше всего пройти металлоконтроль трубопроводов – есть фирмы, имеющие специальные приборы неразрушающего контроля, которыми фиксируется толщина стенок трубы, усталость металла и пр. После такой диагностики принимается решение о продлении срока службы воздухопровода.

Заключение

Таким образом, выбор наиболее эффективного решения по реконструкции системы ЦВ должен быть основан на анализе состава и графиков нагрузок потребителей сжатого воздуха, режимов работы сети воздуходообеспечения, систем осушки воздуха и соответствующего парка компрессорных машин в различных отраслях промышленности: черная и цветная металлургия, машиностроение, химическая промышленность, горнодобывающая и угольная промышленность и др., а также на квалифицированном пневмоаудите на предприятиях с последующей разработкой технико-экономического обоснования нескольких вариантов, в том числе:

- 1) система ЦВ сохраняется, в ЦКС модернизируются либо заменяются изношенные компрессоры на современные машины;
- 2) первый вариант дополняется частичной децентрализацией с установкой ВК на отдельных подразделениях предприятия;
- 3) система ЦВ полностью заменяется на ДЦВ с установкой многочисленных ВК непосредственно у потребителей.

Решение основных вопросов, связанных с реализацией обозначенных вариантов, авторы предполагают дать в следующей работе.

Список литературы

- [1] *Нормированный срок службы оборудования*. Режим доступа: <http://www.refdb.ru/look/3048878-p54.html>. [*Standard service life of the equipment*. Access: <http://www.refdb.ru/look/3048878-p54.html>. (in Russian)].
- [2] *Экспертный центр. Пневмоаудит*. Режим доступа: <http://www.exctr.ru/content/id97/>. [*Expert center. Pneumatic audit*. Access: <http://www.exctr.ru/content/id97/>. (in Russian)].
- [3] Воронетский А.В. *Современные центробежные компрессоры. Вопросы оптимального применения в различных отраслях промышленности*. М.: ЗАО «Премиум Инжиниринг», 2007. 144 с. [Voronetsky A.V. *Modern centrifugal compressors. Questions of optimum application in various industries*. Moscow, 2007, JSC Premium Engineering, 144 p. (in Russian)].
- [4] ООО «Нева-Турбо». *Модернизация существующих центробежных компрессорных машин*. Режим доступа: <http://www.nevaturbo.ru/...Atm/upgrading.htm>. [*JSC Neva-Turbo. Modernization of the existing centrifugal compressors*. Access: <http://www.nevaturbo.ru/...Atm/upgrading.htm> (in Russian)].
- [5] *Правила технической эксплуатации воздушных компрессорных станций*. М.: Черметэнерго, 1973. 60 с. [*Rules stations of technical operation of air compressor*. Moscow, Chermetenergo, 1973, 60 p. (in Russian)].
- [6] Берман Я.А., Мальковский О.Н., Марр Ю.Н., Рафалович А.П. *Системы охлаждения компрессорных установок*. Л.: Маш-е, Ленингр. отд-ние, 1984. 228 с. [Berman Y.A., Malkovskij O.N., Marr Y.N., Raphalovich A.P. *Cooling systems of compressor installations*. Leningrad, Mechanical engineering, 1984, 228 p. (in Russian)].
- [7] *Модернизация компрессоров К-250, К-500, К-1500*. Режим доступа: <http://www.energomach.com/modern.htm?compression>. [Modernization of compressors K-250, K-500, K-1500. Access: <http://www.energomach.com/modern.htm?compression>. (in Russian)].
- [8] Кузнецов Ю.В., Никифоров А.Г. Удельный расход электроэнергии на производство сжатого воздуха. *Компрессорная техника и пневматика*, 2016, 3, 27-38 [Kuznetsov Y.V., Nikiforov A.G. *Specific Electricity Consumption for Production of Compressed Air*. *Compressors&Pneumatics*, 2016, 3, 27-38 (in Russian)].
- [9] *Преимущества винтовых компрессоров*. Режим доступа: <http://www.mvs-service.ru/products/compressor-vintovyh>. [*Advantages of screw compressors*. Access: <http://www.mvs-service.ru/products/compressor-vintovyh>. (in Russian)].
- [10] *Компрессоры FIAC / 10 мифов о винтовых компрессорах*. Режим доступа: http://www.FIAC.ru/tcn_myths_screw.phtml. [*The FIAC/10 myths about screw compressors*. Access: http://www.FIAC.ru/tcn_myths_screw.phtml. (in Russian)].
- [11] *О чем умалчивают продавцы винтовых компрессоров*. Режим доступа: <http://www.comprforum.ru/download/file.php?id=267>. [*What sellers of screw compressors hold back*. Access: <http://www.comprforum.ru/download/file.php?id=267>. (in Russian)].
- [12] *Винтовые компрессоры: преимущества, организация*. Режим доступа: <http://www.kraft-air.ru/.kompresory.vintovye.preimushhestva>. [*Screw compressors: advantages, organization*. Access: <http://www.kraft-air.ru/.kompresory.vintovye.preimushhestva> (in Russian)].