

Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

УДК 621.671

doi: 10.18698/0536-1044-2022-6-45-51

Перспективы совершенствования центробежных насосов

А.С. Байбиков

Prospects for Improving Centrifugal Pumps

A.S. Baybikov

Использование современных программных комплексов и исключение технологических ограничений на сложность формы позволяют улучшить энергетические, кавитационные и массовые характеристики насосов. Пластиковые корпуса и рабочие колеса с металлическими каркасами обеспечивают повышение жесткости и универсальности агрегатов. Специальные покрытия дают возможность повысить гладкость и износостойкость рабочих поверхностей. Новые формы осевых и радиальных динамических уплотнений снижают объемные потери при стабилизации и силы, передаваемые на опоры. Увеличивается номенклатура встроенных в насос датчиков, регулирующих режим и определяющих непрерывную диагностику состояния насоса.

Ключевые слова: центробежный насос, металлический каркас, пластиковая деталь, гладкость и износостойкость поверхностей

The application of modern software systems and the exclusion of technological restrictions on the shape complexity can improve the energy, cavitation and mass characteristics of pumps. Plastic casings and wheels with metal frames provide increased rigidity and versatility of the units. Special coatings improve the smoothness and wear resistance of working surfaces. New shapes of axial and radial dynamic seals reduce volume losses during stabilization and the forces transmitted to the supports. The range of sensors built into the pump adjusting the mode and determining the continuous diagnostics of the pump condition increases.

Keywords: centrifugal pump, metal frame, plastic casing, surface smoothness and wear resistance

Насосы всех типов потребляют до 20 % генерируемой в мире электроэнергии. Без водопровода и канализации (а следовательно, и насосов) не может существовать ни одна современная цивилизация. Однако насосостроение, существующее не одно столетие, — очень консервативная отрасль машиностроения, недостаточно

использующая достижения современных технологий и науки.

Сконцентрированная информация о новых конструктивных и технологических решениях ведущих фирм и смежных отраслей весьма необходима заводским конструкторам и при подготовке будущих инженеров. Это особенно



Рис. 1. Схема РК с входной и выходной пространственными кромками

актуально для одноступенчатых центробежных насосов, являющихся самыми распространенными среди устройств подобного назначения.

Цель работы — рассмотреть перспективы совершенствования центробежных одноступенчатых насосов.

В последние десятилетия для гидродинамического совершенствования проточных частей насосов (а следовательно, для экономии энергии, снижения абразивного и кавитационного износа) разработаны мощные программные комплексы, позволяющие рассчитать и оптимизировать сложные трехмерные турбулентные течения потока в насосах, в том числе с твердой и газовой фазами [1].

Трехмерная печать моделей и стержней, программные станки практически сняли технологические ограничения на формы основных элементов. Поэтому стало возможным использовать такие сложные криволинейные поверхности, как входные и выходные кромки лопаток рабочего колеса (РК) двойкой кривизны, аналогичные входным кромкам авиационных компрессоров (рис. 1), переменные толщина и

наклон лопаток, сложная форма языка, сечений отвода и бокового входа и др.

Так как теория турбулентности еще далека до совершенства, ее улучшения постоянно повышают точность расчетов и качество профилирования. Программные комплексы также содержат средства трехмерного расчета напряженного состояния комбинированных деталей фактически произвольной формы, причем они могут включать в себя влитые части из разных материалов (например, металлический остов массивной пластиковой детали, аналогичный железобетонным конструкциям).

Ввиду того, что детали насосов весьма неравномерно нагружены, их конструкция содержит избыточно много малонапряженных частей. Целесообразно более оптимально перераспределить восприятие нагрузок. Например, химически- и абразивостойкое полимерное РК может содержать металлический каркас с закрытыми радиальными ребрами и втулкой, заранее вложенный при изготовлении в пресс-форму (рис. 2).

Ввиду большого модуля упругости металла по сравнению с полимерами основные нагрузки будут восприниматься преимущественно более прочными металлическими частями, а толщина и масса полимерной части, обеспечивающие герметичность и форму, могут быть уменьшены.

Такая конструкция существенно повышает предельные наружные диаметры и число оборотов полимерных химически- и износостойких РК. В особо нагруженных и высокооборотных РК целесообразно использовать полимеры с наполнителями из углеродных нанотрубок, которые характеризуются рекордной прочностью при малой плотности [2].

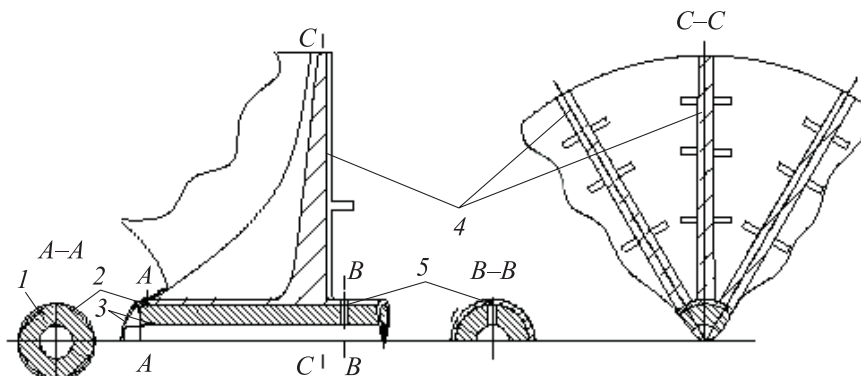


Рис. 2. Схема армированного РК:

1 — четырехгранный вал; 2 — пружинное кольцо; 3 — пластиковая крышка с защелкой; 4 — металлические ребра; 5 — отверстие входа жидкости в центральный канал (отверстие сброса утечек жидкости)

В корпусных деталях металлический каркас с ребрами, соединяющими входной и выходной фланцы, неравномерно расположенными в соответствии с заданными внешними нагрузками, залит пластиком переменной толщины, формирующим проточную часть и обеспечивающим герметичность и восприятие внутреннего давления, передаваемого большей частью на ребра (рис. 3).

Такое решение может существенно повысить максимальные допустимые размеры, надежность и качество полимерных корпусов, а в ряде случаев уменьшить массу, себестоимость и номенклатуру вследствие возможного применения для различных жидкостей. Полимерный корпус также снижает гидродинамический шум, генерируемый насосом.

Для уменьшения гидродинамических потерь на все обтекаемые поверхности проточной части можно нанести покрытия, повышающие гладкость, а также защищающие от повреждения частицами, которые почти всегда присутствуют в перекачиваемой жидкости [3]. Такие покрытия внутренних боковых поверхностей корпусов и наружных поверхностей дисков РК снижают дисковые потери, что особенно существенно для насосов низкой быстроходности.

Для уменьшения объемных потерь через уплотнения буртов РК, снижения зазоров и увеличения ресурса, необходимо уменьшить их биения путем повышения точности изготовления, соосности посадочных мест опор, улучшения балансировки, использования антифрикционных прирабатываемых покрытий поверхностей щелевых уплотнений оптимальной формы, осевых динамических уплотнений разного типа (например, винтоканавочных, лабиринтных [4]).

Оптимизация геометрии для снижения дисковых потерь радиальных динамических

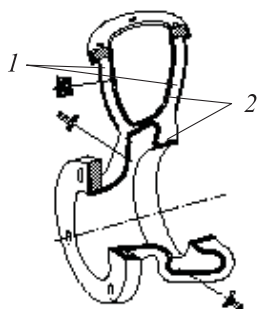


Рис. 3. Схема армированного корпуса:
1 — металлические ребра; 2 — пластиковый корпус

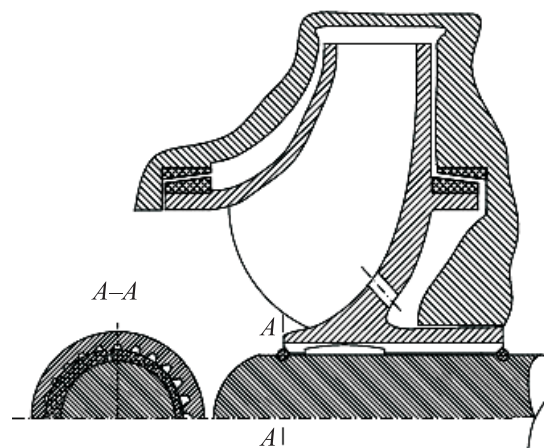


Рис. 4. Схема насоса с опорами на буртах РК

уплотнений (торцовых лопаток с бандажом) также возможна в результате гидродинамических расчетов сложных трехмерных течений в боковых пазухах [5]. При учете твердой фазы одновременно можно улучшить гидродинамическую защиту бесконтактных уплотнений на валу от твердых частиц.

Кардинальным уменьшением осевых габаритных размеров и массы насоса может быть перенос подшипников скольжения, работающих на перекачиваемой жидкости, на бурты дисков РК с соответствующим выполнением вращающихся и корпусных поверхностей из качественных антифрикционных материалов, например, из флубона [6, 7] (рис. 4).

Для восприятия осевых сил эти поверхности можно выполнить коническими. Тогда муфта, соединяющая валы насоса и привода, должна быть достаточно податливой, чтобы не препятствовать самоустановке ротора насоса. Чтобы обеспечить необходимую самоустановку РК, целесообразно использовать решение, аналогичное известной конструкции зубчатых муфт с промежуточным валом.

В качестве одной полумуфты выступает втулка РК с нарезанными изнутри зубьями. Промежуточный вал передает момент привода. Другая полумуфта имеет обычную конструкцию. Так как вал передает только момент, его диаметр можно сделать меньшим, чем обычно. Такая конструкция допускает повышенные несоосности при соединении с приводом.

Ввиду того, что центральная часть вала практически не нагружена, его целесообразно изготавливать из толстостенных труб (см. рис. 2), что облегчит консольную часть и позволит использовать центральный канал для сброса утечек

жидкости перед рабочими лопатками, а не в начальную часть рабочего канала РК.

Это уменьшит гидродинамические потери и улучшит антикавитационные качества. При соответствующем направлении утечек жидкости через центральный канал можно получить дополнительное повышение антикавитационных свойств за счет улучшения обтекания входной кромки лопаток, особенно криогенных насосов. Направление осей отверстия сброса утечек жидкости 5 (см. рис. 2) должно быть как можно ближе к окружному (вероятно, предпочтительнее отверстия выполнять электроэрозией), против направления вращения на входе.

Течение потока во входной части рабочего канала также улучшается при замене прямолинейных разгрузочных отверстий с осью, параллельной оси вращения, криволинейными с наклонной осью (см. рис. 4).

Также сброс утечек жидкости из щелевого уплотнения покрывного диска как можно ближе к направлению потока около периферийной части входной кромки рабочих лопаток улучшает кавитационные характеристики насосов. Для повышения антикавитационных свойств РК необходимо устанавливать предвключенные шнеки переменного шага и с увеличивающимся по потоку диаметром втулки [8, 9] (рис. 5).

Еще большего повышения кавитационных характеристик при некотором снижении экономичности можно достичь введением неподвижных противоположно направленных шнеку винтовых нарезок, охватывающих его [10].

Для улучшения виброакустических характеристик и снижения радиальных габаритных размеров центробежных насосов в ряде случаев применяют спиральные боковые и осевые лопаточные отводы. Как правило, это приводит к снижению коэффициента полезного действия таких насосов по сравнению с традиционными конструкциями.

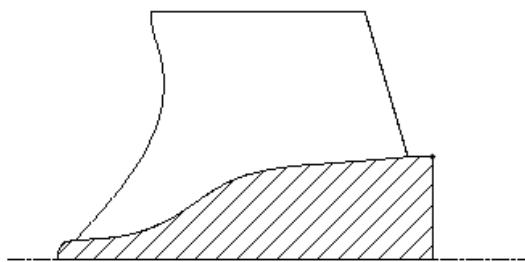


Рис. 5. Схема шнека с увеличивающимся по потоку диаметром втулки

Причиной этого является появление отрывных зон и повышение гидродинамических потерь при дополнительном повороте потока в неподвижных элементах корпуса. Поток может быть более устойчивым, и потери снижены при повороте в поле центробежных сил при меньших относительных скоростях. Для этого в закрытых центробежных РК радиальная часть покрывного диска на периферии может плавно переходить в цилиндрическую, подобную бандажам осевых РК.

Безусловно, оптимизация профилей пространственных рабочих лопаток с радиальным входом и осевым выходом в таких РК требует большого объема трехмерных расчетов. При этом существенно облегчается уравнивание гидродинамических осевых сил, действующих на РК, вследствие больших диаметра и площади покрывного диска.

Целесообразно критически проанализировать способы передачи усилий, крепления и фиксации отдельных частей насосного агрегата. Традиционное стандартное шпоночное соединение, передающее крутящий момент, использующее малопроизводительные долбежные станки, уже мало упоминается в современных учебниках по деталям машин.

Некруглые отверстия во втулке РК можно получить фрезерованием, с помощью сверла Уаттса, протяжкой (для малых РК с использованием механизма подачи токарных станков) и другими способами. Выполнить ответную форму четырехгранного вала 1 (см. рис. 2) несложно, однако необходимо оставить круглые участки для точной центровки.

Также устаревает осевая фиксация деталей на валу гайками или болтами с гроверами, отгибными и пластиковыми шайбами. Для этого можно использовать пружинные кольца с круглым или прямоугольным сечением с соответствующей проточкой вала 1 (см. рис. 2), волнистые пружины, анаэробные фиксаторы резьбы, которые также защищают от окисления [11], кольца из материала с памятью (например, из нитинола или более дешевого термопластичного полиуретана Desmoran [12]).

К сожалению, магнитная передача момента в герметичных насосных агрегатах и с магнитной муфтой связана с большими энергетическими потерями. Поэтому в большинстве случаев целесообразно применять надежные концевые контактные уплотнения.

Помимо известных силицированного графита и карбида кремния в контактных парах торцовых уплотнений целесообразно использовать такие новые материалы, как борид вольфрама [13], нитриды бора и рения, алмазное напыление и др.

Их также можно применять в подшипниках скольжения, работающих на перекачиваемой жидкости, наряду с известными карбидом вольфрама и графитовыми материалами. В опорах дорогих криогенных насосов (особенно высокооборотных и обеспечивающих электроизоляцию) можно использовать подшипники качения с легкими керамическими шариками, смазываемые перекачиваемой жидкостью [14].

Современные возможности трехмерного расчета напряженного состояния позволяют оптимизировать форму деталей, исключая малонагруженные области, увеличивающие материалоемкость изделия. Так, большинство присоединительных фланцев должны иметь выемки, а не быть тривиально круглыми. В ряде случаев шпильчатое соединение можно заменить быстроразъемным байонетным.

В связи с развитием автоматизации и миниатюризацией электроники насосы все чаще снабжают объединенными блоками управления, защиты и диагностики, а в конструкцию насосного агрегата встраивают датчики давления, температуры, оборотов ротора, электрических мощности и напряжения, вибрации, сдвига ротора и сухого хода.

Блоки часто связаны линиями с регулирующими органами частотных преобразователей, дроссельных регуляторов, датчиками уровня и другими внешними датчиками, дистанционными пультами информации и управления, что обеспечивает автоматизацию всей насосной установки [15].

Программное обеспечение блоков непрерывно анализирует сигналы датчиков, управляет пуском и остановом агрегата, включением маслонасосов и охлаждающих вентиляторов, определяет состояние и прогнозирует ресурс насоса, защищает от превышения допустимого диапазона рабочих параметров и аварийных поломок, а также может управлять давлением и расходом в разгрузочных устройствах, охлаждающих, герметизирующих вспомогательных трактах агрегата.

Возможности оптимального управления существенно повышаются при регулировании частоты вращения вала. Это обеспечивают частотные преобразователи, гидротрансформаторы и регулируемые гидромолоты [16]. Одновременно это позволяет сделать частоту вращения вала выше стандартной (что в ряде случаев снижает массу насоса), а также временно увеличить напор и подачу насоса (пожарного и аварийного).

Выводы

1. Рассмотрены перспективы совершенствования центробежных одноступенчатых насосов, являющихся самыми распространенными среди устройств подобного назначения. Безусловно, необходимо постепенное внедрение рассмотренных предложений. Следует отметить, что на многие патенты давно истек срок действия исключительных прав.

2. Описаны наиболее интересные технические решения, которые можно использовать в центробежных насосах, без претензий на полный охват всех перспективных конструкций (на сегодняшний день зарегистрированы десятки тысяч патентов по насосам и еще больше по деталям машин).

Литература

- [1] Ansys TurboGrid. *ansys.com: веб-сайт*. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-turbogrid> (дата обращения: 15.01.2022).
- [2] Радионов В.В., Мякишев А.М. Обзор применений углеродных нанотрубок в полимерных композиционных материалах. *Современные материалы, техника и технологии*, 2019, № 6, с. 8–12.
- [3] Nauss L. Increasing harsh-environment equipment life through proper coating selection. *pumpsandsystems.com: веб-сайт*. URL: <https://www.pumpsandsystems.com/sites/default/files/webinars/2019/0912/Loctite-Increasing-Equipment-Life-Slides.pdf> (дата обращения: 15.01.2021).
- [4] Голубев А.И., Кондаков Л.А., ред. *Уплотнения и уплотнительная техника*. Москва, Машиностроение, 1986. 464 с.

- [5] Шапиро А.С. *Структура реального течения в центробежных и осевых насосах*. Москва, МГИУ, 2004. 280 с.
- [6] Струк В.А., Костюкович Г.А., Кравченко В.И. и др. *Композиционный абразивостойкий триботехнический материал*. Патент РФ 2270844. Заявл. 09.09.2004, опубл. 27.02.2006.
- [7] Мельник В.А. Современные тенденции в конструировании подшипниковых опор скольжения центробежных насосов. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2004, № 3, с. 25–29.
- [8] Кудеяров В.Н., Кудеяров С.В. *Рабочее колесо оседиагонального шнекового насоса*. Патент РФ 2334899. Заявл. 03.07.2006, опубл. 27.09.2008.
- [9] Зотов Б.Н. Расчет характеристик шнеков постоянного и переменного шага. *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*, 2015, № 3, с. 29–40. URL: <https://aplantsjournal.ru>
- [10] Анкудинов А.А., Зубов А.А., Мисягина Ю.Ю. Перспективы улучшения эксплуатационных качеств осевихревого насоса. *Наука, техника и образование*, 2017, № СВ1. URL: <https://nto-journal.ru/catalog/mashinostroenie/278/>
- [11] Лихачев В.А. Эффект памяти формы. *Соровский образовательный журнал*, 1997, № 3, с. 107–114.
- [12] Shape memory TPU is introduced. *plasteurope.com: веб-сайт*. https://www.plasteurope.com/news/BAYER_MATERIALSCIENS_t222531/ (дата обращения: 15.01.2021).
- [13] Kvashin A.G., Zakaryan H.A., Zhao C. et al. New tungsten borides, their stability and outstanding mechanical properties. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2018, vol. 9, no. 12, pp. 3470–3477, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.8b01262>
- [14] Vieillard C., Binrizmer V., Kadin Y. et al. *Benefits of hybrid bearings in severe conditions*. URL: <https://evolution.skf.com/en/benefits-of-hybrid-bearings-in-severe-condition/> (дата обращения: 15.01.2022).
- [15] Волчкевич Л.И. *Автоматизация производственных процессов*. Москва, Машиностроение, 2007. 380 с.
- [16] Voith TurboGmbH efficient control of pumps and compressors. Vorecon Variable Speed Planetary Gear. URL: https://voith.com/ita-it/214_e_cr168_vorecon-variable-speed-planetare-gear.pdf (дата обращения: 15.01.2022).

References

- [1] Ansys TurboGrid. *ansys.com: website*. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-turbogrid> (accessed: 15.01.2022).
- [2] Radionov V.V., Myakishev A.M. Review on application of carbon nanotubes in polymer composites. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*, 2019, no. 6, pp. 8–12. (In Russ.).
- [3] Nauss L. Increasing harsh-environment equipment life through proper coating selection. *pumpsandsystems.com: website*. URL: <https://www.pumpsandsystems.com/sites/default/files/webinars/2019/0912/Loctite-Increasing-Equipment-Life-Slides.pdf> (accessed: 15.01.2021).
- [4] Golubev A.I., Kondakov L.A., eds. *Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika* [Compaction and compaction machinery]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 464 p. (In Russ.).
- [5] Shapiro A.S. *Struktura real'nogo techeniya v tsentrobezhnykh i osevykh nasosakh* [Structure of a real flow in centrifugal and axial pumps]. Moscow, MGIU Publ., 2004. 280 p. (In Russ.).
- [6] Struk V.A., Kostyukovich G.A., Kravchenko V.I. et al. *Kompozitsionnyy abrazivostoykiy tribotekhnicheskiy material* [Composite abrasive-resistant tribotechnical material]. Patent RU 2270844. Appl. 09.09.2004, publ. 27.02.2006. (In Russ.).
- [7] Mel'nik V.A. Modern trends in design of a bearing support for centrifugal pumps. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 2004, no. 3, pp. 25–29. (In Russ.).
- [8] Kudeyarov V.N., Kudeyarov S.V. *Rabochee koleso osediagonal'nogo shnekovogo nasosa* [Axial-diagonal flow screw pump impeller]. Patent RU 2334899. Appl. 03.07.2006, publ. 27.09.2008. (In Russ.).
- [9] Zotov B.N. Raschet kharakteristik shnekov postoyannogo i peremennogo shaga. *Mashiny i ustanovki*, 2015, no. 3, pp. 29–40. URL: <http://aplantsjournal.ru>.
- [10] Ankudinov A.A., Zubov A.A., Misyagina Yu.Yu. The prospects for improving the performance of EFE vortex pump. *Nauka, tekhnika i obrazovanie*, 2017, no. SV1. URL: <https://nto-journal.ru/catalog/mashinostroenie/278/> (in Russ.).

- [11] Likhachev V.A. Shape memory effect. *Sorovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*, 1997, no. 3, pp. 107–114. (In Russ.).
- [12] Shape memory TPU is introduced. *plasteurope.com: website*. https://www.plasteurope.com/news/BAYER_MATERIALSCIENS_t222531/ (accessed: 15.01.2021).
- [13] Kvashin A.G., Zakaryan H.A., Zhao C. et al. New tungsten borides, their stability and outstanding mechanical properties. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2018, vol. 9, no. 12, pp. 3470–3477, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.8b01262>
- [14] Vieillard C., Binrizmer V., Kadin Y. et al. *Benefits of hybrid bearings in severe conditions*. URL: <https://evolution.skf.com/en/benefits-of-hybrid-bearings-in-severe-condition/> (accessed: 15.01.2022).
- [15] Bolchkevich L.I. *Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov* [Automation of manufacturing process]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 380 p. (In Russ.).
- [16] Voith TurboGmbH efficient control of pumps and compressors. Vorecon Variable Speed Planetary Gear. URL: https://voith.com/itait/214_e_cr168_vorecon-variable-speed-planetare-gear.pdf (accessed: 15.01.2022).

Статья поступила в редакцию 18.01.2022

Информация об авторе

БАЙБИКОВ Александр Сергеевич — доктор технических наук (123060, Москва, Российская Федерация, ул. Расплетина, д. 19, к. 2, e-mail: baibikov@inbox.ru).

Information about the author

BAYBIKOV Alexandr Sergeevich — Doctor of Science (Eng.) (123060, Moscow, Russian Federation, Raspletina St., Bldg. 19, Block 2, e-mail: baibikov@inbox.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Байбиков А.С. Перспективы совершенствования центробежных насосов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 6, с. 45–51, doi: 10.18698/0536-1044-2022-6-45-51

Please cite this article in English as:

Baybikov A.S. Prospects for Improving Centrifugal Pumps. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 6, pp. 45–51, doi: 10.18698/0536-1044-2022-6-45-51



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебно-методическое пособие «Ценностно-ориентированное управление» Автор Н.В. Салиенко

Подготовлено в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования третьего поколения. Содержит материалы по базовым теоретическим и методологическим аспектам управления по ценностям, формированию ценностно-ориентированной корпоративной культуры; кейсы и практические ситуации для анализа, которые могут быть использованы на семинарских занятиях студентов бакалавриата для формирования компетенций дисциплины «Ценностно-ориентированное управление».

Для студентов направления подготовки «Менеджмент» (уровень бакалавриата) МГТУ им. Н.Э. Баумана, изучающих дисциплину «Ценностно-ориентированное управление».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@baumanpress.ru; <https://bmstu.press>