

**НАСОСЫ ДЛЯ ПЕРЕКАЧИВАНИЯ КРИОГЕННЫХ ПРОДУКТОВ:
ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

Д.С. Бабикова

babikova.dina@gmail.com

SPIN-код: 3212-1677

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Область применения криогенных продуктов в современном мире очень широка, и в связи с этим для их применения необходимы специальные технические устройства. Насосы, которые используются для перекачивания веществ или смесей веществ, находящихся при криогенных температурах, должны соответствовать особым свойствам криогенных продуктов, а также иметь высокую надежность. В данной статье рассмотрены основные типы криогенных насосов, показаны проблемы, возникающие при конструировании и эксплуатации насосных агрегатов, а также сформулированы требования, предъявляемые к данным устройствам. Представлен краткий обзор наиболее распространенных конструкций криогенных насосов зарубежного и российского производства.

Ключевые слова

Криогеника, криогенный насос, криопродукт, центробежный насос, погружной насос, насосостроение, насосный агрегат, сжиженный газ

Поступила в редакцию 10.09.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. В современном мире криогенные продукты являются неотъемлемой частью множества технологических процессов в энергетике, нефтегазовой отрасли, металлургии, космонавтике, химической промышленности, медицине и многих других сферах жизни человека [1]. К криогенным продуктам относят вещества или смеси веществ, находящихся при криогенных температурах (ниже 120 К). Наиболее широко распространены продукты низкотемпературного разделения воздуха и инертные газы: азот, кислород, аргон, неон, криптон, ксенон, озон, фтор, метан, водород, гелий. Для получения, хранения, транспортировки и использования криогенных продуктов требуются специальные устройства, соответствующие особым свойствам сжиженных газов и обеспечивающие безопасность персонала при работе с криопродуктами [2].

Обзор типов и конструкций криогенных насосов. Криогенные насосы предназначены для перекачивания криогенных продуктов и могут быть поршневого или центробежного типа. Поршневые крионасосы используют для получения и перемещения таких сжиженных газов, как кислород, азот, водород, гелий, аргон, природный газ. С помощью насосов данного типа осуществляют перекачивание криогенных жидкостей в резервуары и баллоны, также поршневые насосы входят в состав газификационных установок. Данные

насосы применяют при небольших объемах перекачиваемого продукта в области средних и высоких давлений [3].

Другим типом крионасосов являются центробежные насосы. Их применяют в воздухоразделительных установках как для сжатия криогенного продукта, так и для циркуляции криоагента в системе. Также с помощью центробежных насосов осуществляют перекачивание сжиженных газов из танкеров и хранилищ и последующую подачу криогенных продуктов из резервуаров к потребителю (например, заправка газобаллонного автотранспорта). Центробежные насосы могут иметь одноступенчатую или многоступенчатую конструкцию. В многоступенчатых насосах перекачиваемая жидкость проходит последовательно через несколько рабочих колес, между которыми расположены направляющие аппараты для подвода жидкости от предыдущей ступени к последующей. Данная конструкция позволяет значительно повысить напор насоса по сравнению с одноступенчатой [4].

При создании криогенных насосов возникают сложности, обусловленные свойствами криогенных продуктов, особенно их пониженной температурой. Так, вследствие низкой температуры перекачиваемого сжиженного газа создается большой перепад температур между проточной частью насоса и окружающей средой. Из-за этого на внешних поверхностях насоса конденсируется вода и образуется слой инея. Учитывая то, что все сжиженные газы являются легкокипящими, нагрев криопродукта вследствие теплопритока извне и тепловыделения в процессе работы может вызвать кавитацию. Для сохранения продуктов в жидком состоянии необходимо поддерживать низкую температуру и высокое избыточное давление. Неверное проектирование проточной части криогенного насоса может привести к образованию кавитации и, как следствие, к кавитационной эрозии и потере напора. Поэтому гидродинамическое моделирование течений в проточной части насоса является очень полезным инструментом при проектировании, так как позволяет определить оптимальные параметры насоса [5]. Кроме того, расчет кавитационных характеристик насоса усложняется из-за наличия в потоке двух фаз (жидкости и паров жидкости). Для решения задач в такой постановке можно применять различные методы, например, описанные в работах [6, 7]. Для криогенных насосов при нахождении критического кавитационного запаса необходимо учитывать поправки, связанные с влиянием газовых включений, вязкости рабочей среды, а также ее теплофизических свойств. Уплотнения в криогенном насосе работают в условиях недостаточной смазки, поскольку криопродукты, просачиваясь через зазор между трущимися поверхностями, быстро испаряются при температуре окружающей среды. Также уплотнение обмерзает, и иней, попадающий в зону трения, приводит к повышенному износу деталей. Подшипниковые узлы насосов могут выходить из строя гораздо раньше положенного ресурса, так как смазка в них застывает и перестает выполнять свои функции. Кроме того, пониженная температура криогенных продуктов может приводить к охрупчиванию деталей насоса. Помимо этого некоторые сжиженные газы являются токсичными, горючими или взрывоопасными, поэтому уплотнительные узлы должны обеспечивать либо полную герметизацию, либо минимальные контролируемые утечки [8].

Таким образом, можно сформулировать ряд требований, предъявляемых к криогенным насосам.

1. Сократить приток теплоты к перекачиваемому продукту до минимальных значений. Для этого необходимо теплоизолировать корпус насоса.

2. Обеспечить надежную работу уплотнений и узлов трения без применения смазки.

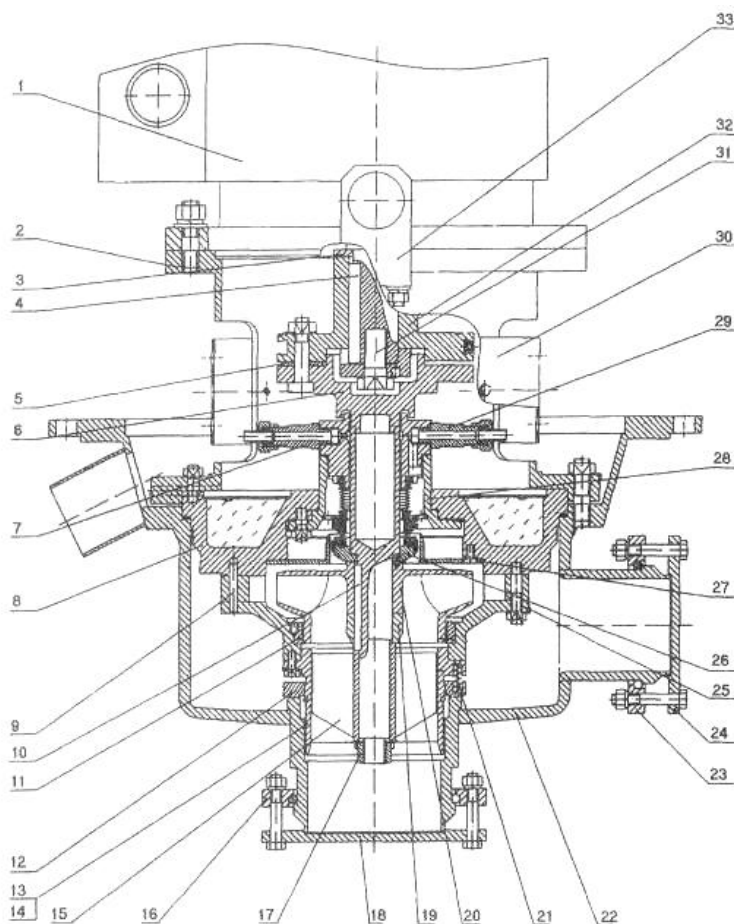


Рис. 1. Конструкция вертикального моноблочного центробежного насоса типа НкпМ с корпусом под засыпную изоляцию:

1 — электродвигатель; 2 — фонарь; 3 — проставочное кольцо; 4 — шпонка; 5 — проставочная шайба; 6 — вал-удлинитель; 7 — штуцер; 8 — крышка; 9 — штифт; 10 — шпонка; 11, 12 — уплотнительные кольца; 13 — патрубок; 14 — разжимное кольцо; 15 — шнек; 16 — накидной фланец; 17 — гайка; 18 — заглушка; 19 — втулка; 20 — рабочее колесо; 21 — пружина; 22 — корпус; 23 — накидной фланец; 24 — заглушка; 25 — направляющий аппарат; 26 — опорное кольцо; 27 — втулка; 28 — засыпная изоляция; 29 — штуцер; 30 — опора; 31 — вал электродвигателя; 32 — полумуфта; 33 — крепление датчика вибрации

3. Обеспечить надежную работу подшипников в течение всего ресурса. Для этого можно разделить проточную часть и опоры вала для уменьшения теплообмена между ними или использовать подшипники, смазываемые непосредственно перекачиваемой жидкостью.

4. При выборе материалов деталей насоса необходимо учитывать температуру и химическую активность перекачиваемого криопродукта. О пригодности материала для работы при заданной температуре судят по температурному запасу вязкости, равному разности температуры эксплуатации и порога хладноломкости.

5. При работе насосов на горючих, ядовитых или редких газах необходимо не допускать утечку продукта.

Одним из распространенных видов насосов, применяемых для перекачки криогенных жидкостей, является моноблочный электронасос (электродвигатель и крионасос, объединенные в один агрегат). К данному виду относится насос НкпМ. Его применяют при разгрузке и заправке резервуаров в системах хранения и транспортирования жидких криогенных сред, а также в воздухоразделительных установках металлургических комбинатов. Насосы НкпМ бывают горизонтального и вертикального исполнения, одно- или двухступенчатые. Насосы выпускают для работы при подаче 3...200 м³/ч и напоре 25...90 м. На рис. 1 представлен разрез вертикального моноблочного центробежного насоса типа НкпМ с корпусом под засыпную изоляцию.

Также стоит обратить внимание на криогенные центробежные насосы фирмы Cryostar (Франция). Они предназначены для перекачивания сжиженных газов (азота, аргона, кислорода, метана, водорода, диоксида углерода и др.) из одних криогенных или изотермических резервуаров в другие под давлением 2...100 бар, а также в различных низкотемпературных технологических процессах. Насосы имеют широкий диапазон производительностей — 10...10000 л/мин. Одним из наиболее распространенных является насос GBS (рис. 2) [9].

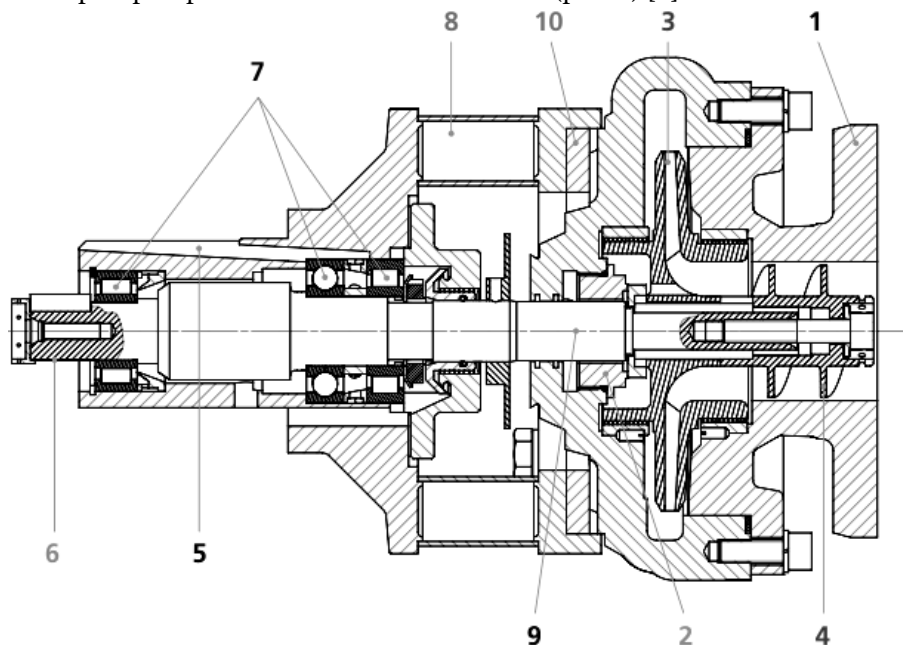


Рис. 2. Конструкция насоса GBS Cryostar:

1 — съемная часть корпуса; 2 — композитное механическое уплотнение; 3 — рабочее колесо; 4 — винтовой индуктор; 5 — редуктор; 6 — шестерня редуктора; 7 — подшипники; 8 — полые спицы, соединяющие насос с электродвигателем; 9 — вал; 10 — пластина с низкой теплопроводностью

К преимуществам данного насоса можно отнести увеличенный ресурс композитного уплотнения (по сравнению с графитовым), хорошую защиту от теплопритока и возможность легкой замены уплотнения благодаря съемной крышке корпуса.

Погружные центробежные криогенные насосы обеспечивают наиболее эффективную теплоизоляцию, так как размещаются непосредственно в перекачиваемой среде. К этому типу относится насос WUC (VS6) фирмы Flowserve (США) (рис. 3) [10]. Температура перекачиваемой жидкости составляет $-200...350$ °С. Насос обеспечивает напор до 2000 м, давление до 200 бар. Камера уплотнения стандартизована и предусматривает возможность установки двойных жидкостных, сухих газовых или газоинжекторных лабиринтных уплотнений.

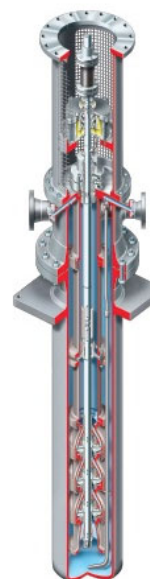
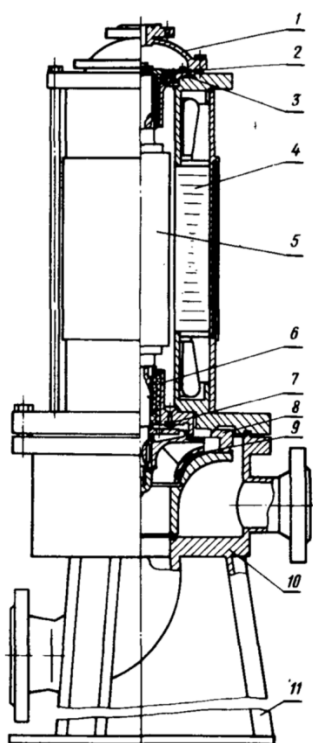


Рис. 3. Общий вид погружного насоса WUC Flowserve



Отдельно стоит отметить герметичные насосы для криогенных жидкостей. В этих агрегатах внешние теплопритоки устраняются не так эффективно, как в погружных насосах, зато исключены утечки криопродукта. Электронасосы серии ХГВ (Россия) предназначены для перекачивания агрессивных и содержащих вредные вещества жидкостей, в том числе сжиженных газов, при температуре от $-50...100$ °С. На рис. 4 представлен насос 4ХГВ-6-40-5.

Рис. 4. Конструкция электронасоса 4ХГВ-6-40-5:

1 — крышка двигателя; 2 — упорный подшипник; 3 — верхний подшипник; 4 — статор; 5 — ротор; 6 — нижний подшипник; 7 — пята; 8 — направляющий аппарат; 9 — рабочее колесо; 10 — корпус насоса; 11 — опора

Заключение. Таким образом, можно сказать, что эффективность работы насоса для перекачивания криогенного продукта во многом зависит от того, как при его конструировании решены характерные проблемы крионасосов, связанные с особыми свойствами среды. Наиболее

рациональное решение данных проблем определяет перспективные направления развития криогенных насосов, к которым можно отнести следующие:

- 1) использование в конструкции насосов новых материалов, стойких к низким температурам;
- 2) осуществление эффективной теплоизоляции насосов (например, с помощью порошков, волокон, органических пенопластов) [1];
- 3) применение герметичных компоновок насосов для того, чтобы избежать проблем с уплотнениями.

Литература

- [1] Боткина Л.А., ред. Зарубежное оборудование криогенных систем. М., ЦИНТИхимнефтемаш, 1973.
- [2] Баранов А.Ю., Соколова Е.В. Хранение и транспортировка криогенных жидкостей. Ч. 1. СПб., ИТМО, 2017.
- [3] Буренин В.В., Дронов В.П., Воробьев Е.В. Конструкции насосов для криогенных жидкостей. М., ЦИНТИхимнефтемаш, 1981.
- [4] Ломакин А.А. Центробежные и осевые насосы. М., Машиностроение, 1966.
- [5] Петров А.И., Ломакин В.О., Семенов С.Е. Пути повышения энергоэффективности динамических насосов на основе современных компьютерных технологий. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 4. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-4-689 URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hydro/689.html>
- [6] Алексенский В.А., Жарковский А.А., Пугачев П.В. Расчетное определение кавитационных характеристик центробежных насосов. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2011, т. 13, № 1-2, с. 411–414.
- [7] Ломакин В.О., Петров А.И., Кулешова М.С. Исследование двухфазного течения в осецентробежном колесе методами гидродинамического моделирования. *Наука и образование: научное издание*, 2014, № 9. URL: <http://engineering-science.ru/doc/725724.html>
- [8] Архаров А.М., Буткевич И.К., ред. Машины низкотемпературной техники. Криогенные машины и инструменты. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
- [9] Центробежный насос GBS. *cryostar-russia.ru: веб-сайт*. URL: <http://www.cryostar-russia.ru/c-gbs.htm> (дата обращения: 15.07.2019).
- [10] WUC API 610 (VS6) vertical multistage process pump for cryogenic applications (or Services). *flowserve.com: веб-сайт*. URL: <https://www.flowserve.com/sites/default/files/2016-07/pss-40-9-1-e.pdf> (дата обращения: 15.07.2019).

Бабилова Дина Святославовна — студентка магистратуры кафедры «Гидромеханика, гидромашин и гидропневмоавтоматика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Петров Алексей Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидромеханика, гидромашин и гидропневмоавтоматика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бабилова Д.С. Насосы для перекачивания криогенных продуктов: обзор конструкций и перспективы развития. *Политехнический молодежный журнал*, 2019, № 10(39). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-10-537>

PUMPS FOR CRYOGENIC PRODUCTS: DESIGN AND DEVELOPMENT PROSPECTS REVIEW

D.S. Babikova

babikova.dina@gmail.com

SPIN-code: 3212-1677

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The scope of cryogenic products in the modern world is very wide, and therefore, use of these requires special technical devices. Pumps that are used for pumping substances or mixtures of substances at cryogenic temperatures must comply with the special properties of cryogenic products, as well as have high reliability. This article reviews the main types of cryogenic pumps, identifies the problems encountered in the design and operation of pumping units, and formulates the requirements for these devices. A brief overview of the most common designs of cryogenic pumps of foreign and Russian production is made

Keywords

Cryogenics, cryogenic pump, cryogenic product, centrifugal pump, submersible pump, pump engineering, pump unit, liquefied gas

Received 10.09.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Botkina L.A., ed. Zarubezhnoe oborudovanie kriogennykh system [Foreign equipment of cryogenic systems]. Moscow, TsINTIkhimneftemash Publ., 1973 (in Russ.).
- [2] Baranov A.Yu., Sokolova E.V. Khranenie i transportirovka kriogennykh zhidkostey. Ch. 1 [Storage and transport of cryogenic liquids. P. 1]. Sankt-Petersburg, ITMO Publ., 2017 (in Russ.).
- [3] Burenin V.V., Dronov V.P., Vorob'yev E.V. Konstruktsii nasosov dlya kriogennykh zhidkostey [Pump construction for cryogenic liquids]. Moscow, TsINTIkhimneftemash Publ., 1981 (in Russ.).
- [4] Lomakin A.A. Tsentrobezhnnye i osevye nasosy [Impeller and propeller pumps]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1966 (in Russ.).
- [5] Petrov A.I., Lomakin V.O., Semenov S.E. Ways to improve energy efficiency of dynamic pumps on the basis of modern computer technologies. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 4. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-4-689 URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hydro/689.html> (in Russ.).
- [6] Aleksenskiy V.A., Zharkovskiy A.A., Pugachev P.V. Calculation definition of centrifugal pumps cavitation characteristics. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the RAS], 2011, vol. 13, no. 1–2, pp. 411–414 (in Russ.).
- [7] Lomakin V.O., Petrov A.I., Kuleshova M.S. Investigation of two-phase flow in axial-centrifugal impeller by hydrodynamic modeling methods. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2014, no. 9. URL: <http://engineering-science.ru/doc/725724.html> (in Russ.).
- [8] Arkharov A.M., Butkevich I.K., ed. Mashiny nizkotemperaturnoy tekhniki. Kriogennye mashiny i instrument [Low-temperature technique machines. Cryogenic machines and tools]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011 (in Russ.).

- [9] Tsentrobezhnnyy nasos GBS [GBS propeller pump]. *cryostar-russia.ru: website* (in Russ.). URL: <http://www.cryostar-russia.ru/c-gbs.htm> (accessed: 15.07.2019).
- [10] WUC API 610 (VS6) vertical multistage process pump for cryogenic applications (or Services). *flowserve.com: website*. URL: <https://www.flowserve.com/sites/default/files/2016-07/pss-40-9-1-e.pdf> (accessed: 15.07.2019).

Babikova D.S. — Master's Degree Student, Department of Fluid Mechanics, Hydraulic Machines and Hydraulic and Pneumatic Automation, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Petrov A.I., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Fluid Mechanics, Hydraulic Machines and Hydraulic and Pneumatic Automation, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Babikova D.S. Pumps for cryogenic products: design and development prospects review. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2019, no. 10(39). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-10-537.html> (in Russ.).