

УДК 621.65.03

Современные способы создания модельных проточных частей применительно к полирядным насосам для питательных систем тепловых электростанций

С. Ю. Купцов*

Описаны этапы подготовки к физическим испытаниям и исследованиям рабочего процесса опытного образца полирядного лопастного осевого насоса двустороннего действия. Рассмотрены современные способы получения изделий сложной конфигурации (рабочие колеса, направляющие аппараты) с применением экструзионной печати на 3D-принтере. Приведены результаты изготовления отдельных элементов опытного образца и намечены основные направления дальнейшей деятельности по реализации физического эксперимента.

Ключевые слова: полирядный насос, эвольвентная образующая, экструзионная печать, 3D-принтер, АБС-пластик, лопастная система, технология прототипирования, испытания.

Введение

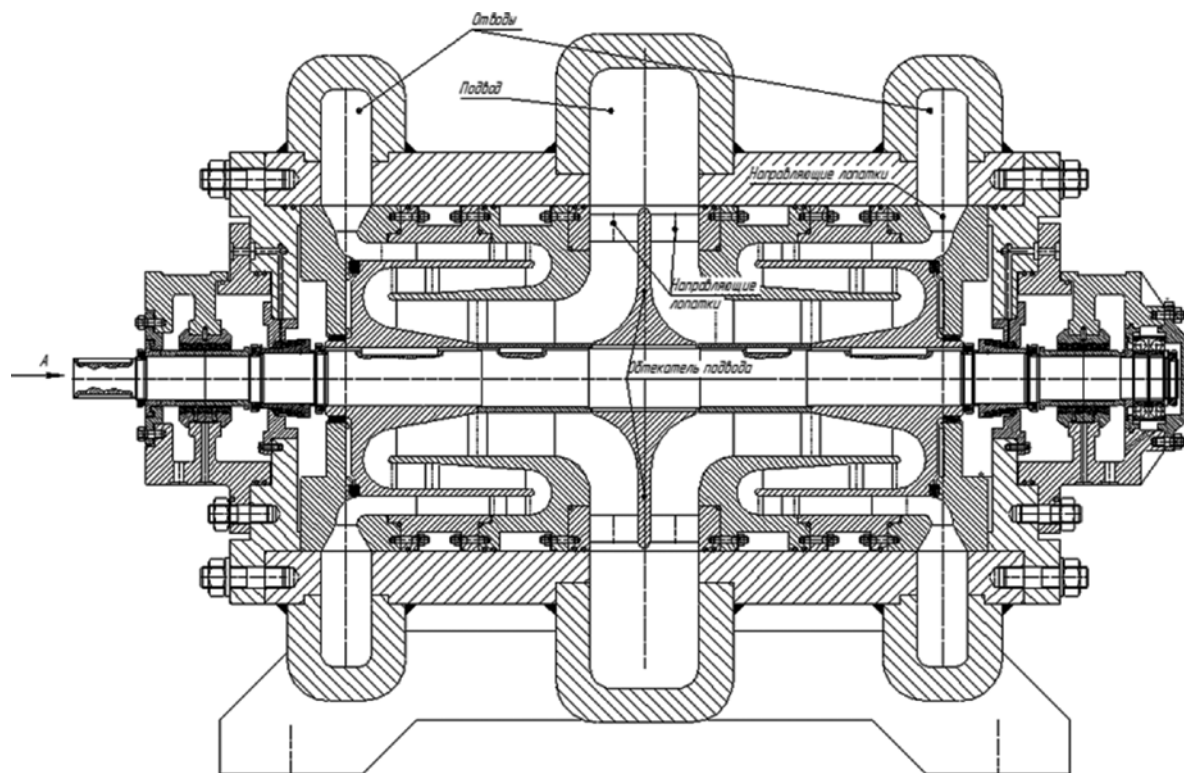
Многочисленные расчетно-теоретические исследования рабочего процесса полирядного лопастного насоса, использующегося в качестве бустерного (подпорного БН) для обеспечения бескавитационной работы питательного насоса на ТЭС, позволяют прогнозировать повышение его эксплуатационных свойств [1 — 3]. Основные преимущества предлагаемого решения по сравнению с традиционными вариантами исполнения БН, применяемыми в настоящее время, заключаются в обеспечении большей надежности и долговечности, а так же в совершенствовании эффективности работы насоса на нерасчетных подачах.

Упомянутые прогнозы свойств, основанные на результатах проведенных компьютерных исследований [2, 3], полирядного БН обуславливаются следующими основными факторами:

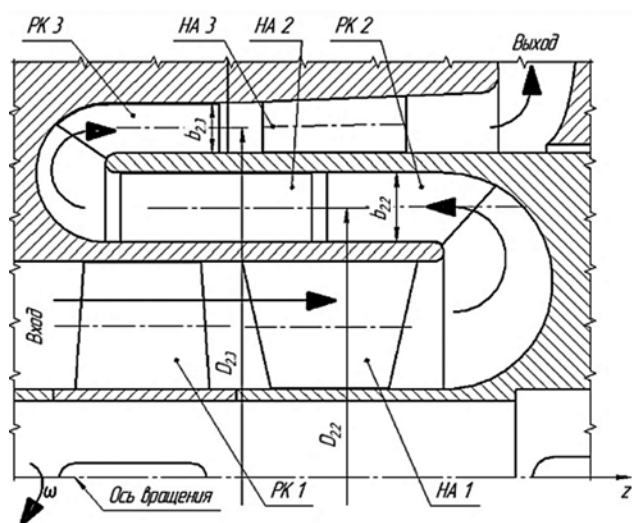
- инновационный *s*-образный проточный тракт активных органов увеличивает энергоемкость насосной части;
- подвод и отвод, выполненные с образующей в форме эвольвенты, обеспечивают достаточно высокий КПД в нерасчетных режимах по подаче;
- предлагаемая концепция активной части БН теоретически разгружена от действия осевой и в значительной мере радиальной гидродинамических сил.

Полуконструктивное исполнение полирядного БН мощностью $N = 4,34$ МВт, спроектированного по параметрам $H = 286$ м, $Q = 1,5$ м³/с для энергоблока гигаватного класса, приведено на рис. 1, *a* — *в*.

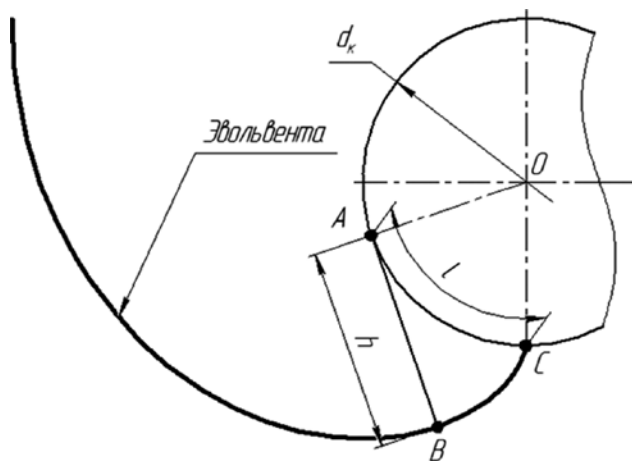
* kuptsov_semen@list.ru



a



б



в

Рис. 1. Полуконструктивная схема исполнения полирадного БН (а); б — характер s-образного движения рабочего тела от входа к выходу в меридианной проекции проточной части насоса: ПК₁ — рабочие колеса; НА₁ — аппараты направляющие; в — образующие проточной части подвода и отвода; l — длина дуги развертки окружности; h — длина касательной, l = h; d_к — диаметр рабочего колеса

Результаты расчетно-теоретических исследований подтверждают принципиальную возможность эффективного применения насосов полирадного типа, как в теплоэнергетике, так и в других отраслях [4], причем с конкурентоспособными показателями качества. Однако, для получения реального опыта эксплуатации подобных насосов и последующего их промышленного

внедрения необходима экспериментальная проверка. В машиностроении этапу ввода в производство новой техники предшествует этап изготовления макетного (опытного) образца или геометрически подобной модели [5]. Результаты испытаний тщательно анализируются и при необходимости в конструкцию основного проекта (далее по тексту — «натурная машина»)

вносятся изменения. Таким образом, устанавливаются более обоснованные суждения о работоспособности и качествах натурального аппарата.

Для подтверждения ожидаемых основных эксплуатационных свойств был спроектирован опытный образец полирядного лопастного насоса. Тесты будут проходить на испытательном стенде отдела гидромеханики и гидравлических машин им. проф. Квятковского В. С. НИУ «МЭИ», выполненном по замкнутой схеме, удовлетворяющей всем нормативным требованиям к испытаниям динамических насосов [5].

Опытный образец

На первом этапе подготовки к физическим испытаниям предполагалось реализовать строго геометрически и кинематически подобную решетку лопастей по отношению к соответствующей натурной гидромашине [6]. Однако особенности технологии изготовления рабочих органов, а также требуемые весьма высокие механические характеристики применяемых материалов определили сложность полного соблюдения отмеченного подобия. Тем не менее, общую концепцию полирядного насоса, определяемую специальной формой его проточной части, удалось сохранить.

Таким образом, проточная часть опытного образца представляет собой трехрядный, одноступенчатый в каждом ряде, осевой лопастной насос, выполненный по встречно-двусторонней симметричной схеме. Организован один общий центральный подвод рабочего тела, который делит полную подачу насоса на две практически равные части, и, соответственно, два нагнетательных патрубка с левой и правой сторон выхода потока из решеток лопастей периферийных рабочих колес. Контуры проточных частей подвода и отводов выполнены с фрагментами образующей эвольвенты окружности с обеспечением наиболее плавного изменения направления потока от радиального к осевому и наоборот. Продольный разрез и общий вид образца *s*-насоса приведены на рис. 2 *a, б*.

Активная часть насоса с лопастной системой расположена в едином модуле — картридже 1. Подвод 2 и отводы 3 представляют собой отдельные секции с выполненными внутри элементами проточной части. Картридж вводится в подводящую и отводящую секции, которые в свою очередь монтируются на раме стенда с установкой устраняющих технологические погрешности изготовления деталей-компенсаторов. Напорные патрубки отводов для объединения потоков соединяются общим коллектором. Секции подвода и отводов плотно герметизируются в картридже насоса. Асинхронный электродвигатель (ЭД) 5 устанавливается на раму так, чтобы его вал располагался соосно с валом насоса. Для компенсации возможных перекосов валов применяется муфта с упругими элементами. Кроме того, она может комплектоваться датчиками крутящего момента 4 и частоты вращения с возмож-

ностью вывода сигнала на дисплей вторичного прибора или на компьютер.

Собранный агрегат крепится к фундаментной плите и монтируется на испытательном стенде. Общий вид стенда приведен на рис. 3.

Универсальный испытательный стенд позволяет получить энергетические и кавитационные характеристики полирядного насоса в соответствии с требованиями [5]. Он оборудован современным электромагнитным расходомером, аналоговыми манометром и мановакууметром, датчиками давления. В его схему также включены вакуум-насос и закрытая емкость объемом 1,5 м³, необходимые для исследования кавитационных свойств. Для испытаний полирядного насоса стенд был переоборудован.

В схеме электропривода насоса предусмотрен преобразователь частоты (ПЧ). Его основными задачами являются организация так называемого плавного пуска машины при запуске и обеспечение возможности работы агрегата на различных частотах вращения. Кроме того, ПЧ выполняет функции системы защиты ЭД при возникновении нештатных ситуаций во время испытаний, например, при заклинивании ротора насоса. Преобразователь также позволяет вести мониторинг электрических параметров ЭД (активная и реактивная мощности, cosφ, сила тока и пр.) в режиме реального времени с возможной организацией соответствующего выходного электрического сигнала на дисплей или компьютер.

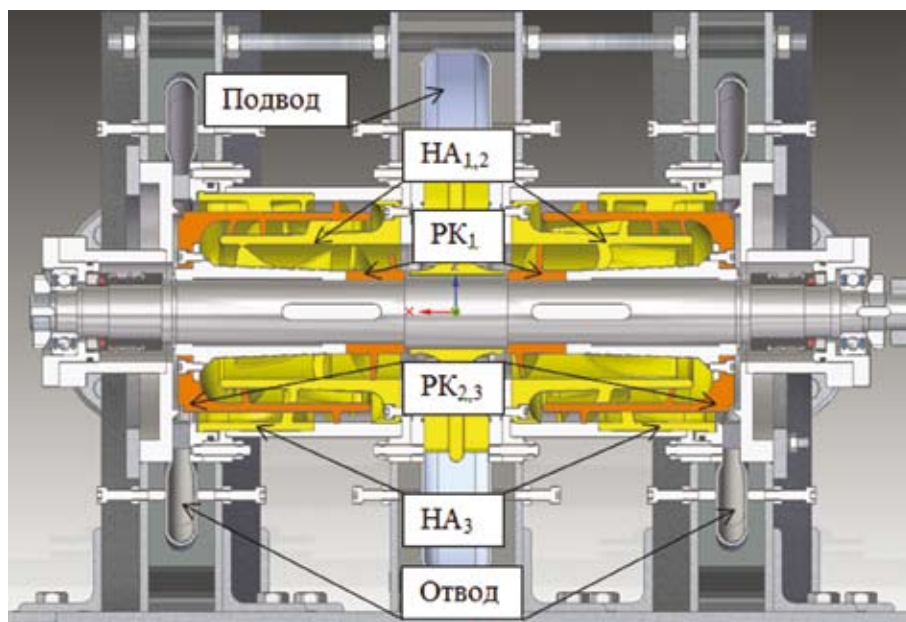
Опытный образец полирядного лопастного насоса имеет следующие основные параметры: напор, $H_0 = 14$ м; подача, $Q_0 = 13$ л/с; частота вращения ротора, $n_0 = 2880$ об/мин. Насос приводится в работу электродвигателем мощностью 5,5 кВт. Масса всего агрегата — 170 кг; основные габаритные размеры — 1100×1000×400 мм.

Изготовление опытного образца

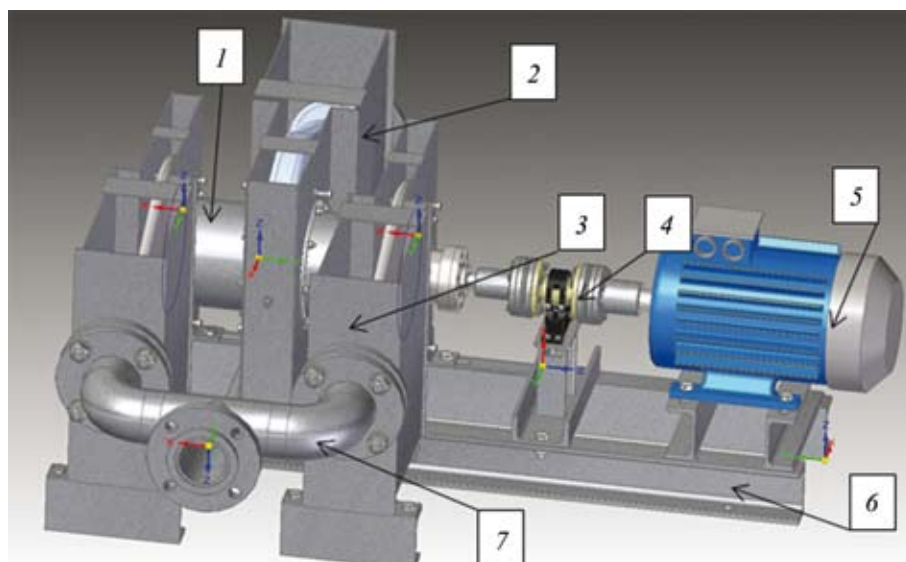
Производство деталей проточных частей лопастных насосов является дорогостоящим и трудоемким процессом. Геометрически сложные изделия (рабочие колеса, направляющие аппараты, элементы подводов и отводов), получают при помощи литейного или штамповочного производства. В случае инновационных разработок повышенной сложности и в условиях проектирования эксклюзивных изделий прибегают к использованию более точных методов изготовления с применением станков с числовым программным управлением (ЧПУ), порошковой металлургии и т. д.

Опытный образец натурной гидромашин должны отличать такие важные показатели, как технологичность деталей, приемлемая простота конструкции, удобство сборки, оперативная коррекция определяющих работоспособность элементов, возможность контроля или мониторинга отдельных параметров.

Опытный образец полирядного лопастного насоса, также, как и натурная машина, не содержит элемен-



а



б

Рис. 2. Опытный образец полирядного лопастного насоса:

а — главный разрез по активной части; б — общий вид агрегата на раме; 1 — картридж; 2 — подвод; 3 — отвод; 4 — датчик крутящего момента; 5 — электродвигатель; 6 — рама; 7 — коллектор

тов, которые достаточно изготовить только с помощью литья или обработки на станке с ЧПУ. Корпусные детали, валы, и втулки (рис. 4, а — д) традиционно выполняются точением.

Ряд элементов конструкции требует ручной сварки с последующей обработкой (см. рис. 4, д). Технологически эти детали просты в изготовлении и состоят из стандартного прокатного сортамента: профили, листы, прутки.

Наиболее сложными считаются лопастные системы активной части картриджа. Как уже было отмечено, каждая сторона насоса содержит три лопастные системы рабочих колес и три решетки направляющих аппара-

тов. Как следует из рис. 5, лопасти $ПК_2$ и $НА_1$ расположены на внутренней стороне обводов соответствующих деталей, которые получить традиционными методами изготовления трудно и экономически затратно.

В последнее время широко применяются технологии трехмерного прототипирования с использованием 3D-принтера. Современные 3D-принтеры позволяют изготавливать объекты с удовлетворительной точностью в сжатые сроки. Для нужд машиностроения в качестве исходного материала для печати могут использоваться как полимеры, так и различные металлы. Прототипирование с использованием металла — достаточно дорогостоящий процесс, применяющийся в

основном на промышленных предприятиях, где к деталям предъявляются специальные требования по точности, прочности и надежности [7]. Опытный образец полирядного лопастного насоса имеет сравнительно небольшие размеры и, учитывая невысокие параметры по развиваемому давлению и подаче, испытывает (по расчетным данным) незначительные нагрузки. В этой связи, основываясь на данных, представленных в работе [8], активные органы картриджа целесообразно выполнить из высокопрочного АБС-пластика (акрилонитрилбутадиенстирол). Основные механические свойства которого, в соответствии с [8], следующие: предел прочности — 46 МПа; прочность при изгибе — 76 МПа; модуль упругости — 2,6 ГПа.

Технология прототипирования с использованием АБС-пластика на 3D-принтере следующая: исходный материал в виде бухты 2, смонтированной на раме принтера 1, подается в экструдер 3 (рис. 6), который под действием высокой температуры (180 — 200 °С) формирует расплавленную нить пластика. Экструдер и «постель» 4 принтера перемещаются в декартовой системе координат с помощью шаговых электродвигателей, сигнал на которые подает программируемый контроллер 5.

Повторяя траекторию движения экструдера, расплавленная нить образует сначала первый слой изделия на разогретой (100 — 110 °С) гладкой «постели». Выполнение каждого последующего слоя сопровождается подъемом головки экструдера на высоту, равную высоте одного слоя изделия, и повторением аналогич-



Рис. 3. Испытательный стенд:

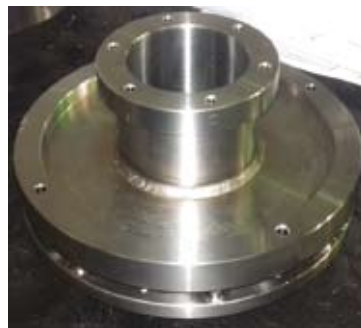
1 — электромагнитный расходомер; 2 — манометр; 3 — мановакуумметр; 4 — регулирующая задвижка; 5 — место установки полирядного насоса

ных операций в строгом соответствии с 3D-моделью, загруженной в память принтера. Слои «ложатся» друг на друга, соединяются между собой и затвердевают. Такой метод прототипирования называется экструзионной печатью. Он позволяет изготовить все требуемые для опытного образца лопастные решетки, часть из которых приведена на рис. 7.

Посадочные диаметры и привалочные поверхности деталей, полученные экструзионным способом, могут обрабатываться традиционными способами на станках. Поверхности лопастей легко выравниваются



а



б



в



г



д

Рис. 4. Элементы опытного образца, выполненные точением:

а, б — корпусные детали картриджа; в — втулка рабочего колеса; г, д — вал и рама опытного образца

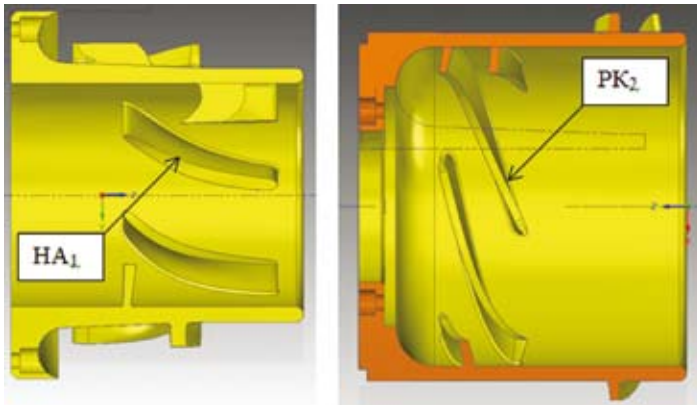


Рис. 5. Аппарат направляющий (а) и колесо рабочее (б)

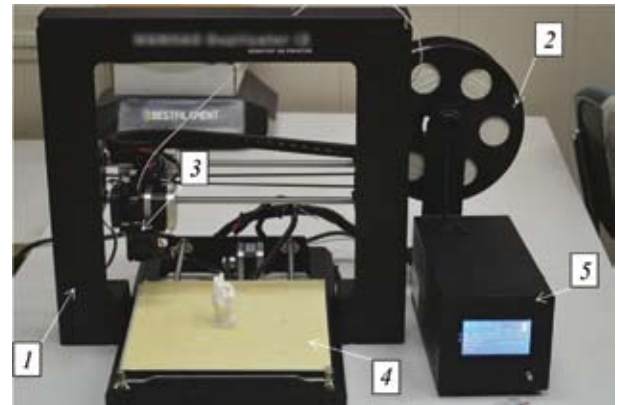


Рис. 6. 3D-принтер:

1 — рама принтера; 2 — бухта материала; 3 — экструдер; 4 — «постель»; 5 — программируемый контроллер



Рис. 7. Рабочие органы модели СБН и их 3D-модели: а, б — колесо рабочее; в, г — аппарат направляющий; д, е — шнек

абразивным и шлифовальным инструментом, что позволяет повысить гидродинамические качества насоса в целом.

Проточные части подвода и отводов также можно сделать при помощи экструзионной печати путем изготовления тонкостенной, но достаточно прочной обо-

лочки. Проекция проточной части подвода модельного насоса приведена на рис. 8, а.

Для получения контуров проточных частей подвода и отводов в соответствующих секциях применяется формовочный метод изготовления. Контур в форме эвольвенты делается из легко обрабатываемого материала (пластика, дерева, пенопласта) и помещается в металлическую сварную обечайку, как показано на рис. 8, б. Затем заготовка заливается быстро затвердевающим наполнителем: эпоксидные и полиэфирные смолы, цементный раствор и пр. После затвердевания наполнителя, закладной материал удаляется из обечайки, образуя после себя нишу, форма которой воспроизводит геометрические формы проточной части с отмеченной эвольвентной образующей.

Заключение

Описанные выше методы изготовления апробированы и позволяют изготавливать компоненты сравнительно малогабаритных гидромашин, либо модели крупных насосов и гидротурбин в достаточно короткие сроки с приемлемым качеством и пониженной стоимостью реализации. Комбинирование традиционных методов получения деталей совместно с новыми и доступными способами прототипирования сложных геометрических форм обладает свойством универсальности и применимо к созданию широкого ассортимента машин, агрегатов и устройств энергетического машиностроения.

На данном этапе работы завершается процедура изготовления элементов полирядного насоса и начинается подготовка испытательного стенда к проведению физического эксперимента. По результатам проведенных испытаний будут намечены направления дальнейших исследований насосов полирядного типа.

Литература

1. **Моргунов Г.М.** Разработка насосов нового поколения питательной системы мощных энергоблоков // Теплоэнергетика. 2013. № 2. С. 42 — 53.

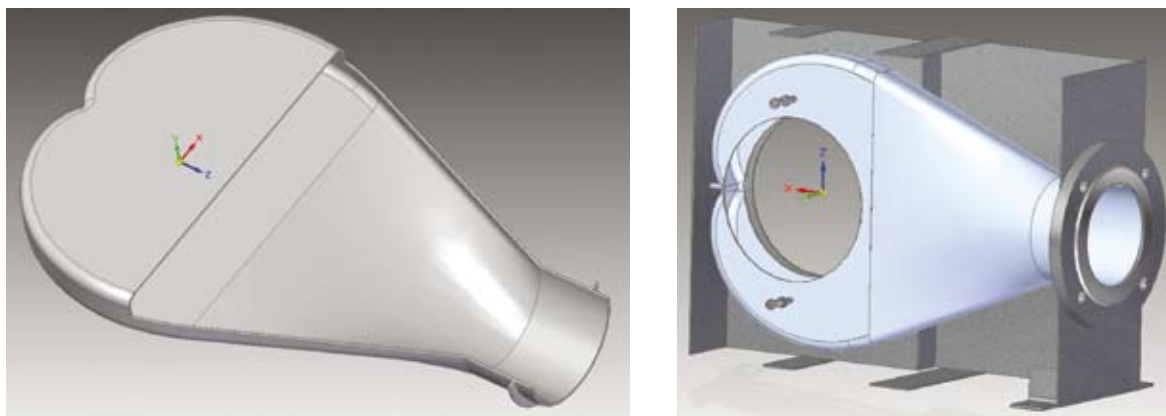


Рис. 8. Центральный подвод:

a — контур проточной части подвода опытного образца; *б* — установка подвода в стальную обечайку

2. **Купцов С.Ю.** Результаты расчетно-теоретического исследования рабочего процесса проточной части лопастной системы бустерного s -насоса двустороннего действия // Гидромашины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика: Сб. докл. 17 Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. С. 78 — 85.

3. **Купцов С.Ю.** Разработка проточной части полирядного бустерного насоса для сверхмощных энергоблоков // Фундаментальная наука и технологии — перспективные разработки: Материалы III Междунар. науч.-техн. конф. 2014. Т. 1. С. 123 — 130.

4. **Свиридов Р.О.** Структурно-параметрический синтез предвключенного устройства для насосной установки бесштанговой добычи нефти на подачу $160 \text{ м}^3/\text{сут}$ // Гидравлические машины, гидроприводы

и гидропневмоавтоматика: Сб. докл. 16 Всерос. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. М.: Изд-во МЭИ, 2012, С. 204 — 208.

5. **ГОСТ 6134—2007 (ИСО 9906:1999).** Насосы динамические. Методы испытаний.

6. **Купцов С.Ю.** Первый этап подготовки к физическим испытаниям полирядного лопастного насоса двустороннего действия // Молодежный науч.-техн. вестник. 2014. № 07.

7. **Мериан Л.** 3D-печать в массы // Междунар. компьютерный еженедельник Computerworld. 2014. № 10 (827).

8. **Margolis James M.** Engineering plastics handbook. USA: The McGraw-Hill Companies, Inc.

Статья поступила в редакцию 26.01.2016