



Некоторые конструкции и эксплуатация насосов для натрия и сплавов натрия с калием

П. Л. Кириллов, В. А. Кузнецов, Н. М. Турчин, Ю. М. Федосеев

В статье описываются конструкции, результаты испытаний и опыт эксплуатации центробежных и электромагнитных насосов для перекачки натрия и сплавов натрия с калием. Эти насосы в течение последних двух лет использовались в экспериментальных и полупромышленных установках.

При разработке реакторов, охлаждаемых жидкими металлами (натрием, сплавами натрия с калием), возникла важная проблема перекачки жидких металлов. Насосы, применяемые для перекачки воды, нефтепродуктов и т. д., не могли быть использованы, так как они не обеспечивали полную герметичность и работу при температуре металла 300—500° С.

В центробежных насосах герметичность можно обеспечить четырьмя способами: 1) создать вокруг вала трущееся уплотнение; 2) герметизировать все вращающиеся части (вал, ротор); 3) заключить весь двигатель под колпак; 4) создать вокруг вала уплотнение из замороженного натрия.

Первая задача сложна, и надежного решения ее пока нет. Вторая сводится по существу к созданию специального двигателя. Поэтому нами были выбраны два последних способа, так как их легко осуществить в лабораторных условиях.

В настоящее время эксплуатация центробежных насосов при температуре менее 400° С уже не вызывает трудностей [1—4]. Созданы насосы, способные работать при температуре 550—600° С.

Высокая электропроводность жидких металлов позволила разработать новые типы насосов, в которых гидродинамический напор создается электромагнитными силами. Применение электромагнитных насосов облегчает задачу герметизации контура. Основным недостатком этих насосов является низкий коэффициент полезного действия, кото-

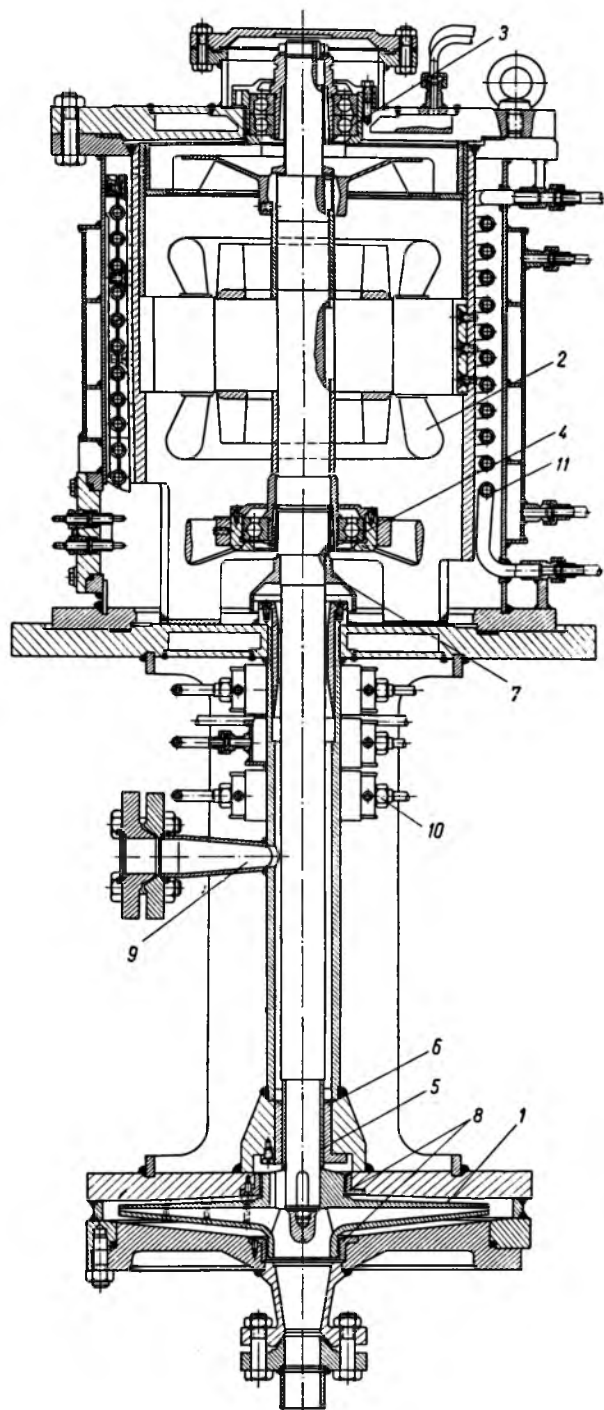
рый примерно в два раза меньше, чем у центробежных насосов, рассчитанных на такие же параметры. Однако для экспериментальных установок это обстоятельство не имеет существенного значения. Электромагнитные насосы находят все большее применение в лабораторной практике, так как они не имеют движущихся частей и более просты в изготовлении и эксплуатации, чем центробежные.

Вопрос о выборе типа насоса (центробежный или электромагнитный) для полномасштабных установок далеко не решен. Только на основе опыта эксплуатации большого количества насосов различных типов можно сделать правильные выводы о преимуществах той или другой конструкции.

Центробежные насосы

Схема центробежного насоса показана на рис. 1. При 990 об/мин насос обеспечивает напор в 23 м столба перекачиваемой жидкости, а при 1450 об/мин—55 м. Производительность насоса при 990 об/мин составляет не более 10 м³/ч. Мощность асинхронного электродвигателя 2 встроенного типа — 10 квт. В рабочем колесе 1 диаметром 415 мм имеется 14 лопаток. Для разгрузки от осевого усилия в ступице рабочего колеса сделано 7 отверстий диаметром 8 мм. Электродвигатель и рабочее колесо размещены на одном валу. Вал имеет три опоры: верхняя — два шариковых радиально-упорных подшипника 3, средняя — один шариковый радиальный

подшипник 4, нижняя—подшипник скольжения 5. Чтобы смазка не попадала в жидкий металл, вал сделан ступенчатым и на



нем ниже среднего подшипника укреплен защитный козырек 7. Смазка подшипника скольжения производится перекачиваемой жидкостью. Втулка подшипника изготовлена из быстрорежущей стали марки РФ-1, а вкладыш 6— из бериллиевой бронзы марки Бр.Б2, содержащей 2% бериллия. Из этой же бронзы сделаны уплотнительные кольца 8. Зазор между втулкой и вкладышем подшипника в холодном состоянии составлял 0,2—0,25 мм. Все остальные детали насоса изготовлены из стали 1Х18Н9Т.

Металл, протекающий через верхнее уплотнительное кольцо, поднимается вверх по валу и отводится через специальное отверстие 9 в бак насоса. Выше этого отверстия снаружи крепятся съемные камеры охлаждения 10. Электродвигатель охлаждается инертным газом, находящимся в его полости. Там же установлен змеевик 11, через который может циркулировать вода. Как выяснилось, при работе насоса нет необходимости включать охлаждение змеевика, так как вода, циркулирующая в наружной рубашке, обеспечивает достаточное охлаждение двигателя. Насос присоединяется к тракту с помощью разборных соединений типа «шар—конус». Корпус насоса уплотнен прокладкой из никеля.

Сначала насос испытывался на воде, при этом были определены его характеристики. Коэффициент полезного действия насоса при 990 об/мин и расходе жидкости 6,5 м³/ч равен 40%. Затем насос работал в течение 2000 ч на сплаве натрия с калием при температуре от 200 до 400° С. После 1500 ч вкладыш нижнего подшипника был заменен, так как односторонний износ его достиг 2 мм.

Наиболее существенными недостатками конструкции насоса являются трудность разборки (замена подшипников, съем колпака и т. д.) и громоздкость. На рис. 2 показана схема другого центробежного насоса, более компактного и простого по конструкции.

Для того чтобы при прежних параметрах насоса сделать его более компактным, был

Рис. 1. Центробежный насос с подшипником из бериллиевой бронзы и встроеным электродвигателем:

1—рабочее колесо; 2—асинхронный электродвигатель; 3—шариковый радиально-упорный подшипник; 4—шариковый радиальный подшипник; 5—втулка подшипника скольжения; 6—вкладыш; 7—защитный козырек; 8—уплотнительные кольца; 9—отверстие для отвода утечек; 10—камеры охлаждения; 11—змеевик.

выбран двигатель 2 с 2900 об/мин. Для герметичности электродвигатель закрывался колпаком 3, охлаждаемый водой. Циркуляция инертного газа под колпаком осуществлялась вентилятором электродвигателя. В нижнюю плиту для охлаждения подавалась вода. Рабочее колесо 1 диаметром 164 мм было укреплено на валу, имеющем две опоры — верхнюю 4 и нижнюю 5. Металл, протекающий вдоль вала, обеспечивает смазку нижнего подшипника и отводится в бак насоса. В зависимости от сопротивления основного контура расход металла вдоль вала может составлять от 50 до 200 л/ч.

Насос испытывался при температурах до 450° С. Оказалось, что срок службы подшипников сокращается до нескольких десятков часов вследствие резкого уменьшения твердости бериллиевой бронзы при таких температурах. Попытка применить другие пары металлов для подшипника, погруженного в натрий (сталь РФ-1 — чугун, сталь РФ-1 — ЭИ-220), ничего не дала. Наилучшие результаты были получены с подшипником, у которого втулка изготовлена из стали РФ-1, а вкладыш — из бронзы Бр.Б2. Величина зазора между втулкой и вкладышем подшипника, определенная опытным путем, составляла 0,12—0,15 мм. При меньших зазорах подшипник заклинивался, при больших — сокращался срок его службы. Все подшипники, выбывавшие из строя, имели значительный (до 5 мм) односторонний износ.

Насос эксплуатировался в течение 2000 ч на установках со сплавом натрия—калий и в течение 7000 ч — на установке с натрием при температуре металлов около 200° С.

При эксплуатации этих насосов наблюдалось проникновение паров натрия в полость электродвигателя и конденсация их на внутренних поверхностях полости и на обмотке электродвигателя. Пары натрия окислялись, и на обмотке появлялся тонкий налет окиси натрия. При попадании на обмотку влаги образовывалась гидроокись, разъедающая изоляцию, и обмотка приходила в негодность.

При повышении рабочей температуры наиболее слабым местом всех описанных выше

насосов становится подшипник, погруженный в жидкий металл. Было разработано несколько конструкций насосов с подшипни-

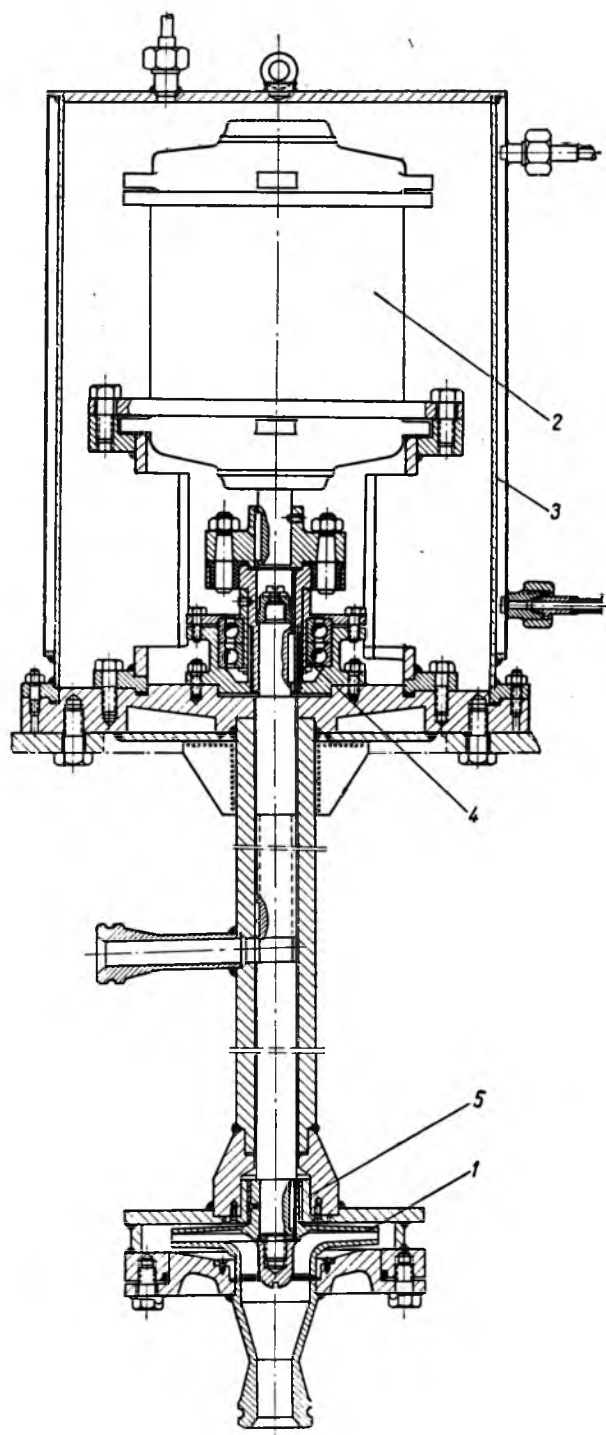
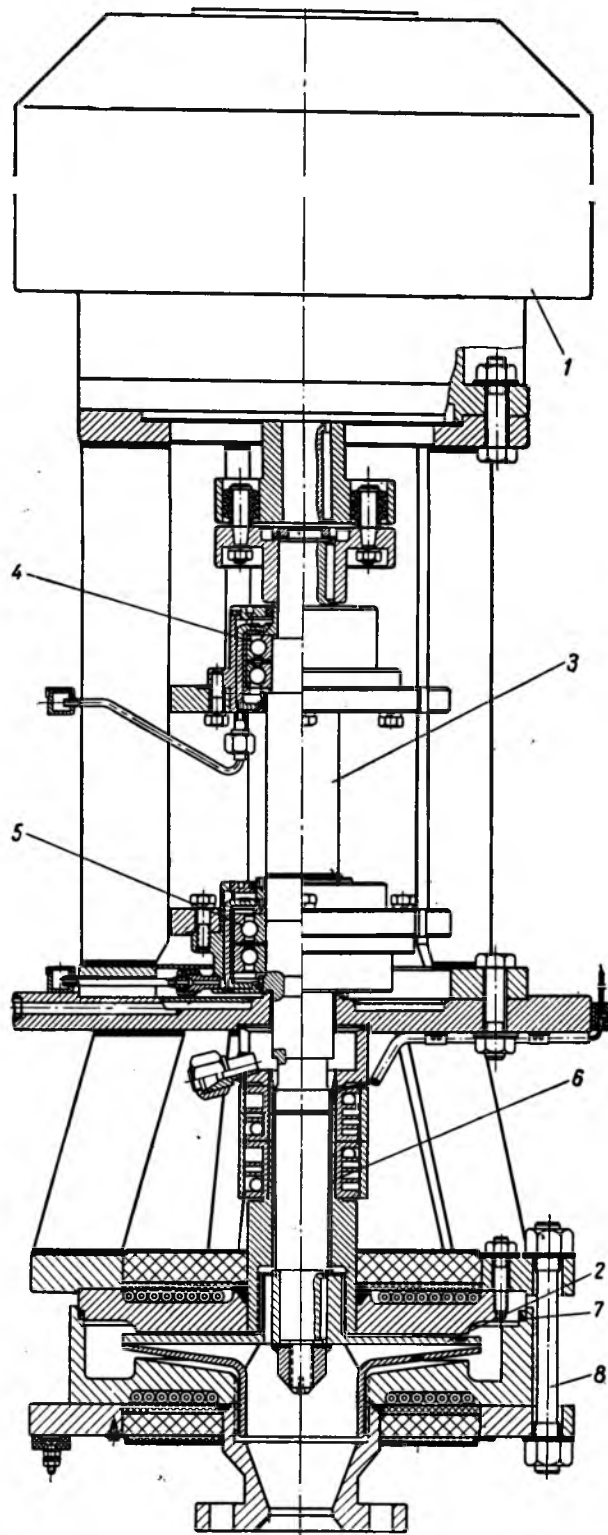


Рис. 2. Центробежный насос с подшипником из бериллиевой бронзы и обычным электродвигателем: 1—рабочее колесо; 2—электродвигатель; 3—колпак; 4—радиально-упорный подшипник; 5—подшипник скольжения.



ком из замороженного натрия на различные параметры. Схема одного из насосов приводится на рис. 3. Насос обеспечивает напор 100 м столба жидкости и имеет производительность до $25 \text{ м}^3/\text{ч}$. Двигатель имеет 2960 об/мин. Мощность электродвигателя 14 квт. Вал имеет две опоры: два радиально-упорных подшипника 4, и два радиальных подшипника 5. Подшипник из замороженного натрия 6 по существу является третьей опорой. В зоне этого подшипника на корпус насоса напрессованы две камеры охлаждения. Таким образом, между охлаждающим агентом и замороженным натрием имеются две металлические стенки, что дает возможность в качестве охлаждающего агента применять воду. Подшипник из натрия не изнашивается, и что особенно важно, выдерживает практически любые температуры. Замороженный натрий одновременно служит надежным уплотнением вала.

Расчет теплообмена в камере охлаждения весьма труден, так как трудно рассчитать тепловой поток, направленный вверх от улитки, и учесть сложную конфигурацию камер. Основным недостатком насоса является течь через уплотнение корпуса при частых изменениях температуры. Так как при быстром разогреве корпуса шпильки 8 прогреваются быстрее, чем никелевая прокладка 7, то уплотнение ослабевает и возникает течь. Вытекающий металл на воздухе превращается в гидроокись, которая быстро разъедает корпус насоса. Поэтому разъемное уплотнение было заменено сварным. Пуск насоса производится только после предварительного разогрева замороженного уплотнения. При пуске сначала включается охлаждение, а затем двигатель насоса. Задержка с включением двигателя приводит к тому, что вал «схватывается» в замороженном уплотнении и требуется повторный разогрев. Если охлаждение включается позже, чем насос, то жидкий натрий протекает через зазор. Обычно в начальный момент нагрузка электродвигателя больше, чем во время эксплуатации. Это объясняется, по-видимому, загрязнением жидкого металла в замороженном

Рис. 3. Центробежный насос с подшипником из замороженного натрия:

1—электродвигатель; 2—рабочее колесо; 3—вал; 4—радиально-упорный подшипник; 5—радиальный подшипник; 6—подшипник из замороженного натрия; 7—прокладка; 8—шпилька.

уплотнении в начале работы. Количество натрия, вытекающего наружу, составляет 1—2 г в сутки.

Были испытаны три насоса с замороженным уплотнением. Два насоса, подобных описанному выше, проработали примерно по 2000 ч каждый при температурах 400—500° С и продолжают работать. Схемы уплотнений этих двух насосов представлены на рис. 4. Третий насос испытывался ранее этих двух. Конструкция его была менее совершенна.

Электромагнитные насосы

Из многих типов электромагнитных насосов, известных в настоящее время [1, 5—7], самым удобным для экспериментальных работ является кондуктивный насос переменного тока. Для таких насосов не нужно создавать специальных агрегатов питания, как, например, для кондуктивных насосов постоянного тока. Кроме того, они сравнительно легко выдерживают температуры порядка 400—

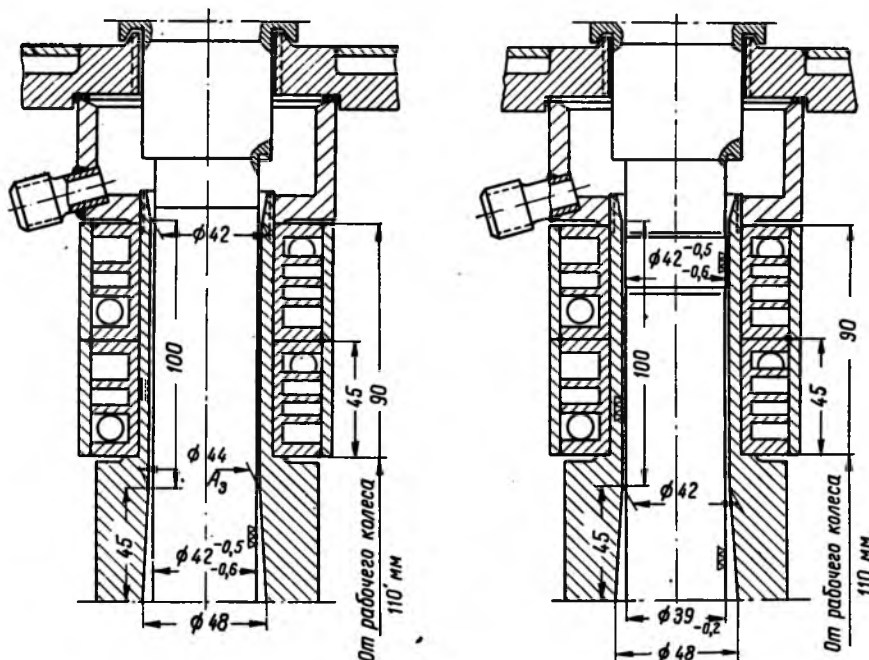


Рис. 4. Схемы конструкций уплотнений из замороженного натрия.

Применять воду для охлаждения в нем было опасно, поэтому охлаждение производилось сплавом натрия—калий. Сплав прокачивался через камеры охлаждения электромагнитным насосом, а перед входом охлаждался в теплообменнике. Этот насос проработал более 5000 ч при средних температурах 400—500° С.

Мы не приводим здесь характеристик насосов «напор—расход», полученных на натрии или сплавах, так как они совпадают с характеристиками, полученными на воде. На основе опыта эксплуатации описанных насосов можно сделать вывод, что для перекачки натрия насос с подшипником из замороженного натрия является одним из наиболее простых и надежных.

600° С, при которых использование индуктивных насосов практически невозможно из-за отсутствия электрической изоляции.

Однофазный кондуктивный насос переменного тока (рис. 5) потребляет ток 30 а при напряжении 220 в и обеспечивает расход жидкости до 4 м³/ч при напоре 2 кг/см². Магнитопровод из электротехнической стали Э-42 общий для питающего трансформатора и насоса. Для первичной обмотки, состоящей из двух катушек, использован прямоугольный провод марки ПСД сечением 4,55 мм². В каждой катушке 130 витков. Обмотка насоса и вторичная обмотка трансформатора изготовлены как одно целое из медной трубы диаметром 20×5 мм. Труба охлаждается водой, что позволяет получать

повышенную плотность тока и делать обмотку более компактной. Шины вторичной обмотки подводятся к электродам рабочего участка, который представляет собой две сплюснутые тонкостенные трубы, примыка-

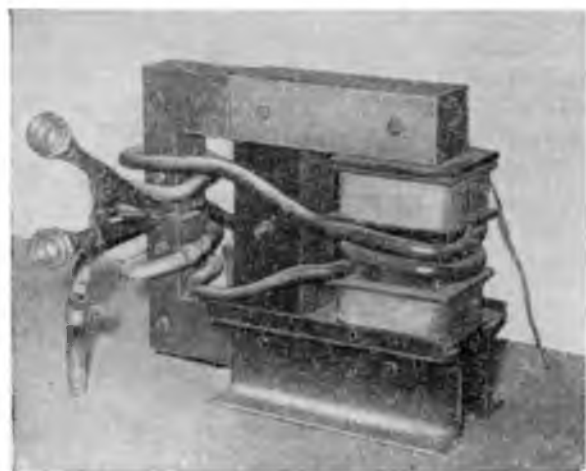


Рис. 5. Кондуктивный однофазный электромагнитный насос.

ющие друг к другу и соединенные последовательно. Такая конструкция рабочего участка дает возможность увеличить напор насоса почти в два раза и скомпенсировать реакцию якоря. Толщина стенок трубы 0,5 мм, мате-



Рис. 6. Индуктивный электромагнитный насос.

риалом труб рабочего участка служит сталь 1X18Н9Т.

Применение общего магнитопровода, сдвигание рабочего участка, повышение плотности тока в обмотке и т. д. позволили создать весьма компактный насос. Несколько таких

насосов работало на различных установках. Один из них проработал 250 ч на натрии при температуре 450° С, другой — более 2500 ч на сплаве натрия с калием при температуре в среднем около 250° С, третий — более 3500 ч на сплаве натрия с калием при температуре 40—50° С, четвертый — 1000 ч на натрии при температуре 300—400° С. Опыт

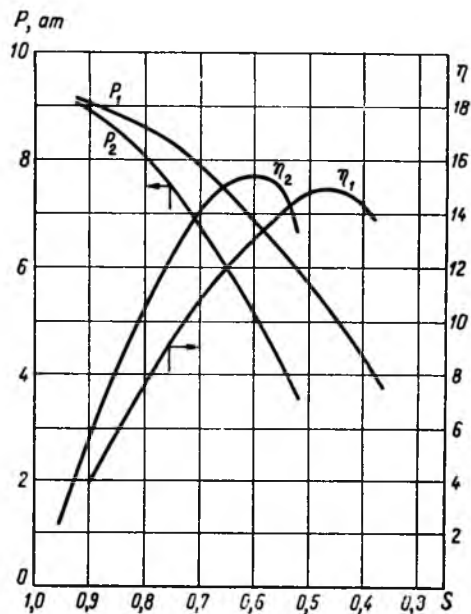


Рис. 7. Характеристики индуктивного насоса.

эксплуатации этих насосов показывает, что они просты в обслуживании и надежны.

Кондуктивные насосы переменного тока целесообразно применять лишь при небольших расходах жидкости (до 10 м³/ч). При больших расходах жидкости выгоднее строить насосы индуктивного типа с бегущим магнитным полем. Один из таких насосов, который работал на сплаве натрия с калием, изображен на рис. 6. Он состоит из двух плоских индукторов, расположенных сверху и снизу канала, по которому прокачивается жидкий металл. В пазах индуктора уложена трехфазная восьмиполюсная обмотка из провода марки ПСД. Для охлаждения обмотки в пазах размещены медные трубки, по которым циркулирует вода. Ширина канала 150 мм, высота—6,1 мм для одного варианта насоса и 8,7 мм—для другого. Стенки выполнены из стали 1X18Н9Т толщи-

ной 0,8 мм. Внутри канала по бокам вставлены медные полосы, которые играют роль замыкающих колец на роторе асинхронного двигателя. Характеристики насоса приведены на рис. 7 в координатах $p = f_1(S)$ и $\eta = f_2(S)$, где $S = 1 - \frac{Q}{Q_c}$ — относительное скольжение; Q — расход жидкости через насос ($\text{м}^3/\text{ч}$); Q_c — расход при скорости металла в канале, равной скорости движения поля ($\text{м}^3/\text{ч}$); p — напор жидкости ($\text{кг}/\text{см}^2$); η — коэффициент полезного действия (%). Этот насос работал на сплаве натрия с калием при температуре 150—200°С в течение 300 ч. Система охлаждения оказалась неудачной, так как не обеспечивала достаточно эффективной тепловой защиты обмотки. Кроме того, вследствие увлажнения обмотки за счет конденсации водяных паров из воздуха дважды происходил электрический пробой изоляции. После внесения некоторых улучшений в конструкцию насоса его можно исполь-

зовать в лабораторных установках с температурами 200—250°С, где требуются расходы до 30 $\text{м}^3/\text{ч}$.

В заключение авторы считают необходимым отметить большой вклад, который внес в создание центробежных насосов для жидкого металла коллектив конструкторов, руководимый Г. В. Складневым, В. Д. Ростовцевым. Этим коллективом спроектирован насос, показанный на рис. 1. Проект насоса, изображенный на рис. 2, разработан под руководством М. Н. Ивановского. Проекты центробежных насосов с замерзающим уплотнением разработаны В. И. Орловым. Кондуктивный насос переменного тока спроектирован под руководством Н. М. Турчина. Проект и изготовление индуктивного насоса с бегущим магнитным полем были выполнены коллективом сотрудников под руководством И. А. Тютиня.

Поступила в Редакцию 10/II 1959 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жидкометаллические теплоносители. Перевод под ред. А. Е. Шейндлина. Изд-во иностр. лит., 1958.
2. H. Savage. Chem. Engng Progr., Symp. Ser., 50, No. 13, 171 (1954).
3. P. Fortescue. J. Nucl. Energy, 1, No. 1, 5 (1954).
4. Вопросы ядерной энергетики, № 3, 40 (1957).
5. D. Watt. Engineering, 181, 264 (1956).
6. Вопросы ядерной энергетики, № 5, 42 (1957).
7. Тр. Института физики АН Латвийской ССР, т. VIII, Прикладная магнитоидродинамика, 1956.

