

# Надежные центробежные установки с малой подачей для добычи нефти в осложненных условиях

Агеев<sup>1</sup> Ш.Р., Куприн<sup>2</sup> П.Б., Маслов<sup>2</sup> В.Н., Мельников<sup>2</sup> М.Ю.,  
Перельман<sup>2</sup> О.М., Пещеренко<sup>2</sup> С.Н., Рабинович<sup>2</sup> А.И.

<sup>1</sup>ОКБ КОННАС, г. Москва, Россия,

<sup>2</sup>ЗАО Новомет-Пермь, г. Пермь, Россия

*Созданы погружные установки с насосами 362 и 400 серий, номинальными подачами от 25 до 160 м<sup>3</sup>/сут при частоте 50 Гц и средним временем безотказной работы не менее 1000 сут. Их особенностями являются: новая центробежно-вихревая ступень, изготавливаемая по новой для нефтедобывающей отрасли порошковой технологии, специальная конструкция насоса, обеспечивающая радиальную устойчивость вала на протяжении всей его службы, новые газосепараторы-диспергаторы повышенной эффективности. Подбор оборудования к скважинам и измерение надежности погружных установок по эксплуатационным данным осуществляли по оригинальным методикам.*

В настоящее время одной из важных проблем нефтедобывающей отрасли России является увеличение надежности погружного оборудования, работающего в скважинах с повышенной концентрацией твердых частиц (более 500 мг/л) и газовым фактором (до 300 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>).

Компанией Новомет разработаны и серийно выпускаются погружные установки, способные устойчиво и надежно работать в таких условиях. Предложенные решения по повышению надежности установок можно разделить на следующие группы:

1. Разработана новая центробежно-вихревая конструкция ступени с повышенным напором, для которой предельное содержание свободного газа в 1.5-2 раза выше, чем для центробежной.
2. Для изготовления ступеней применена новая для отрасли порошковая технология, обеспечивающая более высокую точность изготовления ступеней, а следовательно более высокую степень балансировки рабочих колес и высокую гидравлическую гладкость проточных каналов.
3. Разработана конструкция насоса, обеспечивающая радиальную устойчивость вала на протяжении всей службы насоса.
4. Созданы высокоэффективные газосепараторы-диспергаторы и оптимизирована технология добычи нефти с высоким газовым фактором, основанная на одновременном использовании центробежного и эжекторного насосов.
5. Разработаны оригинальные компьютерные программы подбора погружных установок к скважинам и анализа их надежности по эксплуатационным данным.

Данная работа посвящена, в основном, описанию результатов работы по повышению износостойкости насосов. Технические решения Новомет, направленные на повышение устойчивости работы насосов при добыче газосодержащих сред, описаны в [1]. Методика определения надежности погружных установок по неполным эксплуатационным данным, основанная на математической теории надежности, описана в [2].

**Новая конструкция ступени.** Особенностью конструкции является сочетание элементов центробежной и вихревой ступени в одном изделии. ИмPELLер получен добавлением вихревого венца к центробежной конструкции. Вихревой венец располагается на ведущем диске (рис. 1). Направляющий аппарат имеет конструкцию

близкую к центробежной. Геометрические размеры проточных частей ступени оптимизированы с учетом влияния вихревого венца на течение жидкости. На данную конструкцию ступеней получены патенты [3] и [4].

Вихревой венец создает дополнительный поток жидкости, который попадает на лопасти направляющего аппарата. Кинетическая энергия этого потока преобразуется в напор, который складывается с давлением, создаваемым центробежной частью рабочего колеса. Это позволило увеличить напор ступеней на 15–25% (см. рис. 2 и рис. 3). Кроме того, вихревые лопасти уменьшают осевую силу, действующую на импеллер, а значит, снижают трение и износ в осевом подшипнике.

Наиболее ярко преимущества центробежно-вихревых насосов проявляются при работе в скважинах с высоким газовым фактором. Пузырьки газа, попадая в область вихревого венца, интенсивно диспергируются, что повышает устойчивость работы насоса при перекачке нефтегазовых смесей. Так согласно результатам стендовых испытаний, на смеси воздух-вода, предельная объемная концентрация свободного газа на входе в центробежно-вихревой насос может быть в 1.5-2 раза больше, чем у центробежных насосов (см. рис. 4).

На рис. 5 показана зависимость относительного напора от расхода на смеси вода-ПВ-воздух. Данная рабочая среда более близка по характеристикам к нефтегазовым смесям и потому лучше имитирует процессы слияния и диспергирования пузырьков. Относительный напор определялся в долях от напора при нулевом содержании газа.

Из рис.4 и рис. 5 видно, что преимущество центробежно-вихревых ступеней тем больше, чем выше содержание газа.

Таким образом, была разработана и серийно выпускается новая высокоэффективная нефтяная ступень, в которой гидродинамические процессы протекают иначе, чем в центробежных ступенях, спроектированных Арутюновым почти 70 лет назад [5].

### **Создание порошковой технологии изготовления ступеней погружных насосов.**

Ступени погружных насосов обычно изготавливаются методом литья. Технология литья, используемая в данное время, имеет ограничения по точности изделий и шероховатости поверхности проточных каналов, что не позволяет в полной мере оптимизировать взаимодействие ступеней с перекачиваемой жидкостью. Одним из способов решения этой проблемы является применение порошковой технологии.

Предложенный метод изготовления деталей состоит из двух стадий. На первой – отдельные сложнопровольные элементы деталей формируются из порошка. Нами разработана оригинальная оснастка и автоматизированная высокопроизводительная технология изготовления таких изделий. На второй стадии изделия соединяются в требуемую конструкцию диффузионным методом через термодинамически высоконерасовесный разделительный слой. Данный этап совмещен с пропиткой всего изделия расплавленным металлом. Технология обладает новизной и запатентована [6].

Порошковая технология обеспечивает шероховатость поверхностей проточных каналов порядка 20–30 мкм. Этого, как показывают оценки, достаточно, чтобы шероховатость каналов практически не влияла на характеристики ступеней.

Порошковые ступени лучше сбалансированы, а значит, создают меньшую вибрацию, что повышает надежность насоса. Средний уровень вибрации насосных секций, по результатам стендовых испытаний, порядка 2-3 мм/сек.

Еще одним важным преимуществом порошковых ступеней является возможность сочетания разных материалов в одном изделии. Так, например, в одном технологическом цикле изготавливаются ступени из нержавеющей стали с подшипниками из антифрикционных или износостойких материалов.

Каждый год компания производит более миллиона порошковых ступеней примерно 50 наименований с подачами от 15 до 200 м<sup>3</sup>/сут.[7]. Основным ограничением дальнейшего роста номенклатуры производства является пока не решенная проблема трудоемкости производства ступеней с наклонно-цилиндрическими и пространственными лопатками, имеющими более высокие подачи.

**Обеспечение радиальной устойчивости валов погружных насосов в осложненных условиях эксплуатации.** Надежность насосов, работающих в абразивосодержащих средах, обычно определяется износостойкостью подшипников. Вибрация создает периодическое силовое воздействие в узлах трения и усиливает износ. Ее уменьшают за счет повышения точности изготовления рабочих колес и валов, а также – установкой поддерживающих вал износостойких подшипников.

Обычно считается, что расстояние между износостойкими подшипниками  $L$  следует выбирать тем меньше, чем больше абразива в перекачиваемой жидкости. Проведенные нами расчеты показали, что это не вполне верно. Действительно, с уменьшением  $L$  износы уменьшаются, но не монотонно. Существует такое расстояние между износостойкими подшипниками  $L_c$ , что при  $L < L_c$  радиальные перемещения вала резко уменьшаются. В этом случае, на протяжении всего срока службы насоса, износы в радиальных подшипниках ступеней остаются на таком низком уровне, что гидравлические характеристики насоса не меняются. Поэтому срок службы насосов, с такой схемой расположения промежуточных подшипников, определяется только износом в промежуточных подшипниках. Материал и конструкцию подшипников мы выбрали так, чтобы насосы могли работать не менее 1000 суток.

Кроме того, как было отмечено ранее, были приняты меры по осевой разгрузке ступеней, что ограничило износ осевых подшипников ступеней.

Для проверки результатов расчетов были проведены ускоренные абразивные испытания насосных секций в лабораторных условиях. В качестве рабочей жидкости взяли воду с различным содержанием кварцевого песка.

Характерный пример полученных нами результатов, показан на рис. 6, где проведено сопоставление распределения максимального износа ступиц рабочих колес по длине секции насоса в случае, когда нет промежуточных подшипников (рис. 6а, пунктир). Когда их количество соответствует проведенному расчету (сплошная линия на рис. 6а и 6б) и когда число промежуточных подшипников в 1.5 раза меньше расчетного (пунктир на рис. 6б). Видно, что приведенные результаты, подтверждают правильность расчетов. Износостойкость насосов удалось поднять более, чем в 10 раз.

Кроме того, было установлено, что внутри каждого блока ступеней, заключенного между промежуточными подшипниками, ступицы радиальных подшипников направляющих аппаратов изнашиваются примерно равномерно по длине окружности. Это означает, что вал, изогнутый под действием центробежных сил, совершает круговое вращение. Направления изгибов вала в соседних блоках чаще всего были противоположны.

**Программа подбора и сопровождения погружных установок NeoSel-Pro** – учитывает все основные факторы, влияющие на эффективность эксплуатации данной скважины. Ниже перечислены некоторые важные особенности алгоритма программы.

В ходе подбора насоса, уточняется коэффициент продуктивности скважины по результатам предыдущей эксплуатации скважины. Используется новая аппроксимационная формула индикаторной линии, обобщающая известную зависимость Вогеля для забойных давлений значительно ниже давления насыщения [8]. Это позволило описать работу скважины при снижении дебита из-за выделения свободного газа в пласте.

При выборе длины подвески установки минимизируются ее прогиб, который рассчитывается по всей длине, включая НКТ (что было сделано нами, по-видимому,

впервые). Учет изгиба НКТ может существенно повлиять на выбор места подвески. Так в скважине № 16 Белокаменного месторождения имелся прямолинейный участок, на котором спускаемая установка, диаметром 120 мм, могла разместиться целиком. Тем не менее, из-за изгиба НКТ прогиб установки в этом месте оказался более 3 мм.

Для уточнения места подвески рассчитывается структура газожидкостного потока, омывающего ПЭД [9]. Недопустимо объединение пузырьков газа в пробки, создающие дополнительные низкочастотные вибрации УЭЦН, снижающие надежность.

Имеется возможность проведения диагностики работающей установки. Программа позволяет получить графические зависимости 40 параметров газожидкостной смеси от расстояния в интервале от призабойной зоны до устья скважины: давления, температуры, обводненности, газосодержания, вязкости, плотности, структуры потока и др.

**Эксплуатационные испытания износостойких насосов** были проведены в нескольких нефтяных компаниях, работающих в Западной Сибири: Юганскнефтегаз, Сургутнефтегаз, Сибнефть – Ноябрьскнефтегаз и Лукойл – Западная Сибирь. На рис. 7 представлены полученные результаты.

Расчеты надежности выполняли с помощью созданной нами [2] программы обработки эксплуатационных данных NeoStat-Pro, основанной на методах математической статистики, точнее ее раздела – статистической теории надежности. Новизна нашего подхода к определению надежности погружного оборудования заключается в сочетании вычислительных алгоритмов непараметрической статистики, обеспечивающих высокую точность вычисления надежности и параметрической статистики, позволяющих прогнозировать работу оборудования. Программа рассчитывает основные статистические функции, исчерпывающим образом описывающие надежность погружных установок. Получена зависимость точности измерения надежности от объема выборки и времени испытаний [10].

Результаты расчетов конструкционной надежности насосов приведены на рис. 7. По вертикальной оси отложена вероятность безотказной работы или доля исправного оборудования, по горизонтальной – время.

Видно, что  $T_{0,5}$  не менее 1000 сут. Следовательно, в среднем (а  $T_{0,5}$  примерно равно средней наработке на отказ, см. [2]) износостойкие погружные установки и насосы, даже в самых сложных условиях эксплуатации, которые можно найти в Западной Сибири, безотказно работают не менее 1000 суток.

Надежность насосов в условиях эксплуатации нефтяных компаний Юганскнефтегаз и Сибнефть – Ноябрьскнефтегаз ниже, чем в Сургутнефтегаз и Лукойл – Западная Сибирь потому, что в первых двух компаниях широко применяется технология гидроразрывов пластов. В образовавшиеся трещины пластов закачиваются высокоабразивные частицы, препятствующие их смыканию. При добыче нефти эти частицы вымываются из пласта и в большом количестве попадают в насосы.

### **Заключение**

Разработана новая нефтяная ступень центробежно-вихревого типа и организовано ее массовое производство новым для нефтедобывающей промышленности методом порошковой металлургии.

Предложена износостойкая конструкция насоса, обеспечивающая радиальную и осевую устойчивость вала на протяжении более 1000 суток работы в абразивосодержащих средах. В настоящее время на месторождениях России находятся в эксплуатации более 6000 таких насосов.

Подбор насосов к скважинам и анализ их надежности по эксплуатационным данным проводится по новым усовершенствованным методикам, которые позволяют точно задавать и контролировать условия эксплуатации. Эти методики, реализованные в виде

компьютерных программ NeoSel-Pro и NeoStat-Pro, дают объективный анализ результатов эксплуатации и полностью исключают субъективный фактор.

Комплексный подход к надежности выпускаемого оборудования, включающий оптимизацию конструкции установки, контроль технологии ее изготовления, подбор к скважине и супервайзеровское сопровождение, позволили фирме Новомет довести гарантийный срок до 1000 суток.

### Литература

1. *Агеев Ш.Р., Джалаев А.М., Дроздов А.Н., Маслов В.Н., Перельман М.О.* Опыт эксплуатации скважин с высоким газовым фактором погружными насосно-эжекторными системами// ESP Workshop 2005
2. *Перельман О.М., Пещеренко С.Н., Рабинович А.И., Слепченко С.Д.* Методика определения надежности погружного оборудования и опыт ее применения// ESP Workshop 2005
3. Заявка №99/27257 РСТ, МКИ<sup>6</sup> F04 D 13/10. Stage in a submerged multiple-stage pump/ A.I.Rabinovich, O.M. Perelman, P.V.Kuprin; Zakrytoe Aksionernoe Obschestvo "Novomet-Perm" (РФ). №98/00396; Заяв. 24.11.98; Оpubл. 03.06.99; Приоритет 25.11.97, № 97120198 (РФ).
4. Патент 2133878 РФ, МКИ<sup>6</sup> F04 D 13/06. Погружной многоступенчатый насос / *И.В. Выдрина, Г.А.Штенникова, Ю.Л.Семенов и др.* №97119549/06; Заявл. 25.11.97; Оpubл. 27..07.99. Бюл. №21. 4с.:ил.
5. Пат. 2,270,666 США, НКИ 103-87. Deep Well Pump/ A.Arutunoff, Reda Pump Company. №172,761. Заяв. 4.11.37; Оpubл. 20.01.42. 6 с.:ил.
6. Патент 2056973 РФ, МКИ<sup>6</sup> В 22 F 7/02. Способ изготовления составных изделий / *А.И.Рабинович, О.М. Перельман, Г.Л. Дорогокупец и др.* №930186616/02; Заявл. 13.04.93; Оpubл. 27..03.96. Бюл. №9. 3 с.:ил. .
7. [www.novomet.ru](http://www.novomet.ru)
8. Сагдиев Р. Ф. Особенности установления режима работы добывающей скважины при эксплуатации с забойным давлением ниже давления насыщения. Автореф. дис. канд. техн. наук. М. 2003. 17 с.
9. K. Aziz, G. Govier, M. Fogarasi. Pressure drop in wells producing oil and gaz. – The Journal of Canadian Petroleum Technology, 1972, Montreal, July – September, PP 38-48.
10. *Перельман О.М., Пещеренко С.Н., Рабинович А.И., Слепченко С.Д.* Статистический анализ надежности погружных установок в реальных условиях эксплуатации//Надежность и сертификация оборудования для нефти и газа. 2003. N 3. С. 28–34



а)



б)

Рис. 1. Импеллеры нефтяных ступеней: а) центробежно-вихревой, б) центробежный.

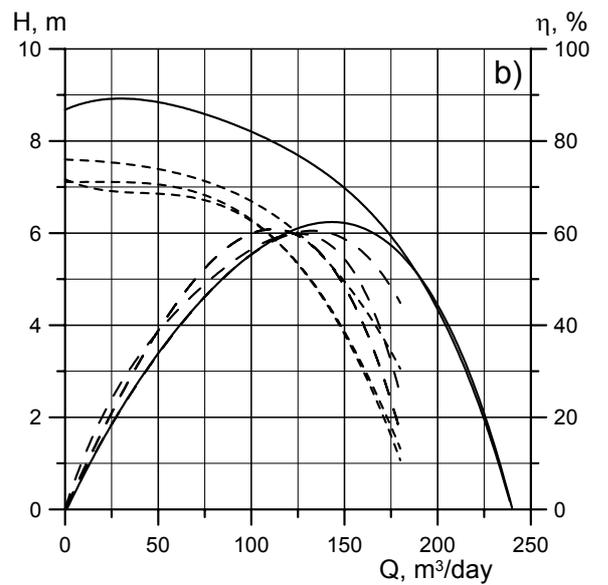
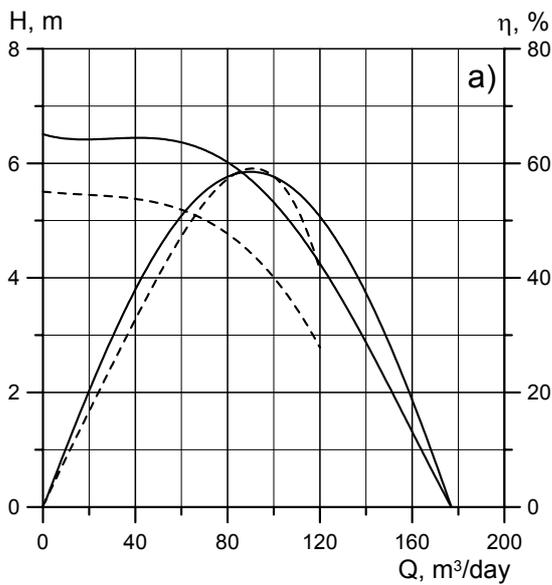


Рис. 2. Сопоставление рабочих характеристик центробежно-вихревых ступеней (сплошные линии) и центробежных (пунктирные) на частоте 50 Гц: а) – ВНН5-79 и ступень насоса 362 серии, характеристики которой рассчитаны методом подобию по лучшим ступеням насосов 338 и 400 серий; б) – ВНН5А-124 и лучшие ступени насосов 400 серии.

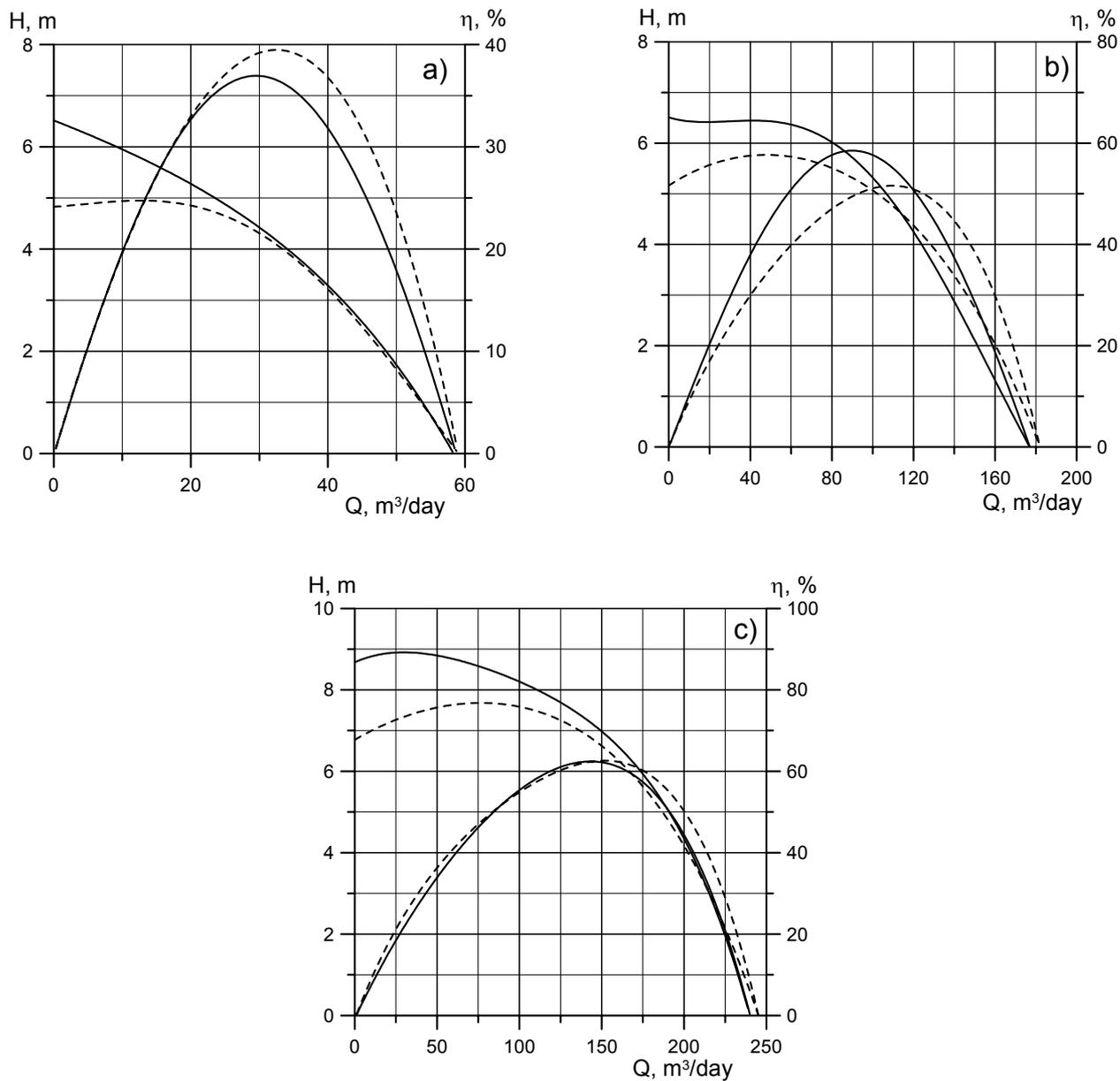


Рис. 3. **Влияние вихревого венца** на рабочие характеристики центробежно-вихревых ступеней ВNH5-25 (a), ВNH5-79 (b) и ВNH5A-124 (c) на частоте 50 Гц. Сплошные линии – ступени с вихревым венцом, пунктирные – без вихревого венца.

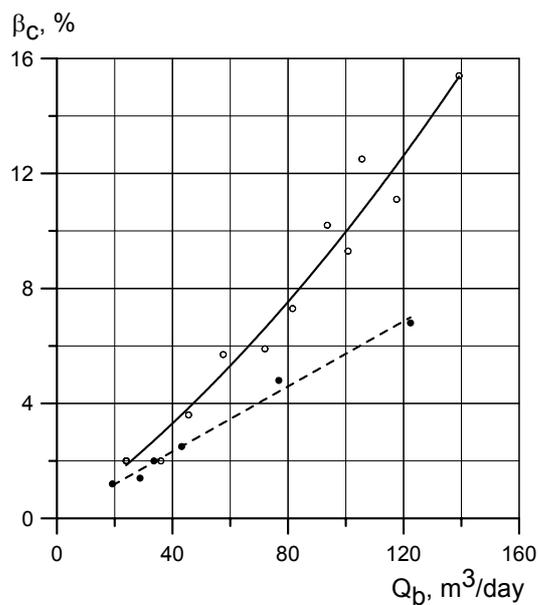


Рис. 4. Зависимость критической объемной концентрации газа от начальной подачи центробежно-вихревой ступени ВNH5-79 на частоте 50 Гц: сплошная линия – ступень с вихревым венцом, пунктирная – без вихревого венца (на смеси вода – воздух).

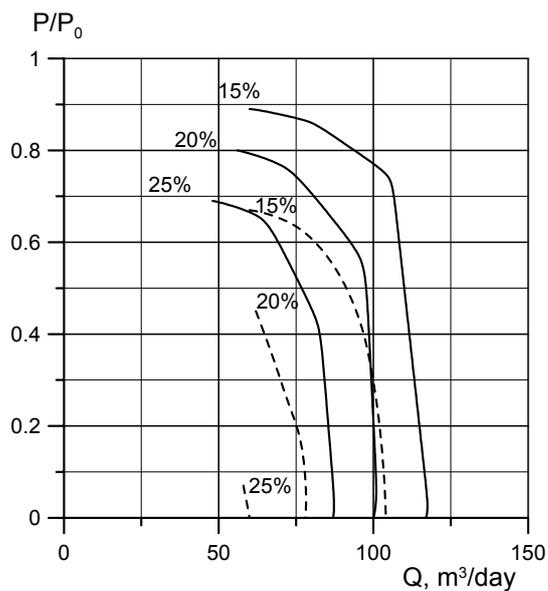


Рис. 5. Зависимость относительного напора ступеней ВNH5A-124 от содержания нерастворенного газа на входе при частоте 50 Гц: сплошная линия – ступень с вихревым венцом, пунктирная – без вихревого венца (на смеси вода – ПАВ – воздух).

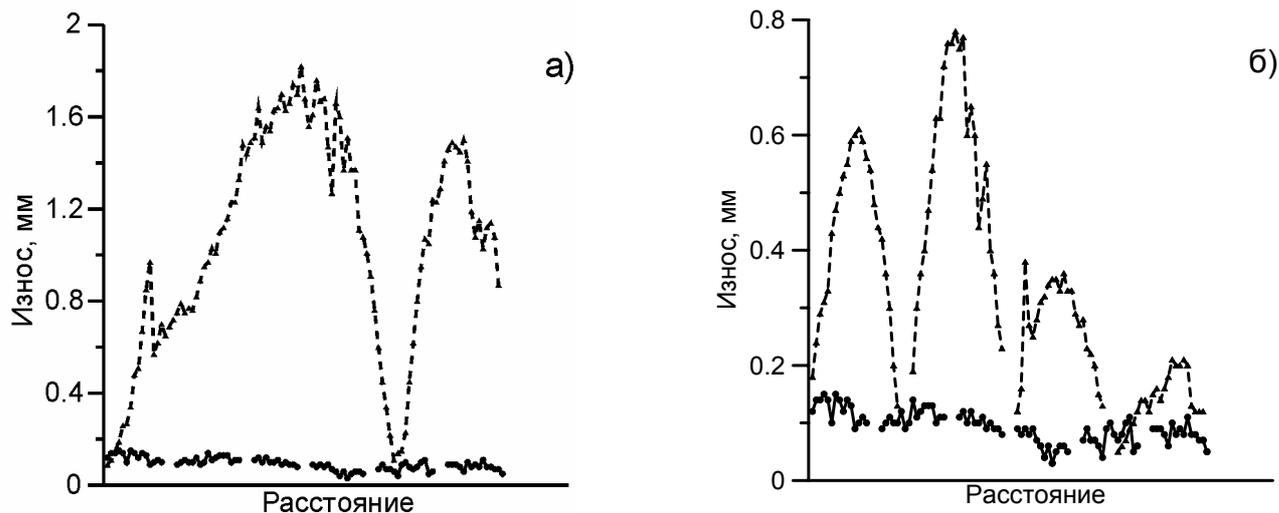


Рис. 6. Сопоставление износов радиальных подшипников ступеней: а) пунктир – без промежуточных подшипников (ПП), сплошная линия – 5 ПП; б) пунктир 3 ПП, сплошная линия 5 ПП.

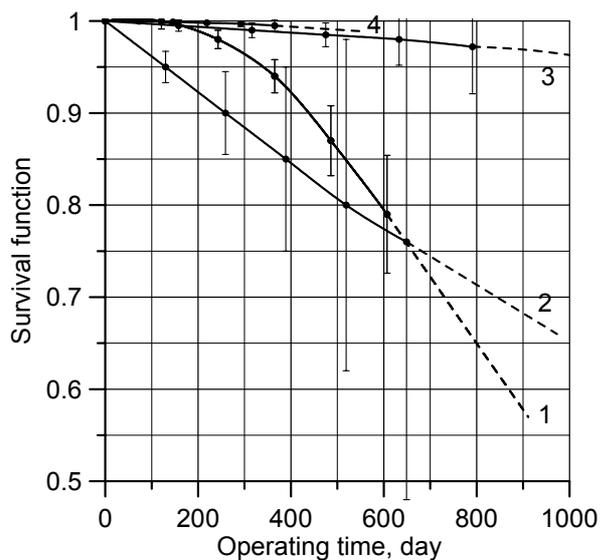


Рис 7. Конструкционная надежность износостойких насосов Новомет: 1 – Сибнефть – Ноябрьскнефтегаз, 2 – Юганскнефтегаз, 3 – Сургутнефтегаз, 4 – ЛУКОЙЛ – Западная Сибирь»