

**“Анализ возможностей совершенствования отечественных центробежных насосов для нефтегазовой и химической промышленности”**

«Analysis of domestic centrifugal pumps improvement opportunities for the oil and gas and chemical industry»

Волков Александр Викторович<sup>1</sup>,  
Парыгин Александр Гаврилович<sup>2</sup>,  
Вихлянцев Александр Андреевич<sup>3</sup>,  
Дружинин Алексей Анатольевич<sup>4</sup>,  
Наумов Андрей Вадимович<sup>5</sup>,  
Марков Дмитрий Валентинович<sup>6</sup>,  
Соболев Геннадий Васильевич<sup>7</sup>,  
Григорьев Сергей Васильевич<sup>8</sup>.

<sup>1</sup> доктор технических наук, главный научный сотрудник (VolkovAV@mpei.ru)

<sup>2</sup> кандидат технических наук, старший научный сотрудник (parugin\_ag@mail.ru)

<sup>3</sup> инженер 1 категории (alexgidro91@mail.ru)

<sup>4</sup> инженер 1 категории (alexey2959@mail.ru)

<sup>5</sup> кандидат технических наук, старший научный сотрудник (naumovanv@bk.ru)

Российская Федерация, г.Москва, Национальный исследовательский институт «МЭИ»

<sup>6</sup> генеральный директор (hg@hydrogas.ru)

<sup>7</sup> Начальник расчетно-исследовательского сектора КБ (research@hydrogas.ru)

Российская Федерация, г.Воронеж, АО «Гидрогаз»

<sup>8</sup> кандидат технических наук, директор (gsv-6@mail.ru)

Российская Федерация, г.Воронеж, ООО НПП «Сириус»

**Аннотация:** В статье рассмотрены основные вопросы функционирования центробежных насосов в нефтегазовой и химической промышленности в соответствии с их целевым назначением и рабочими параметрами. Отражена проблематика насосов, применяемых в технологических циклах нефтеперерабатывающей и нефтехимической отрасли в рамках предъявляемых к ним требований. Выполнен анализ условий эксплуатации на конструкции насосов и вид гидравлических характеристик. Представлены некоторые наиболее перспективные направления совершенствования центробежных насосов малой быстроходности. Рассмотрены возможности применения гидрофобных покрытий и новых

подходов к формированию геометрии проточной части насосов.

**Ключевые слова:** НЕФТЕГАЗОВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ, ХИМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ, НАСОС ХИМИЧЕСКИЙ, ПРОТОЧНАЯ ЧАСТЬ, ГИДРОФОБНОСТЬ, ЛОПАСТНАЯ СИСТЕМА, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, НАДЁЖНОСТЬ

**Abstract:** The article describes the main issues of functioning of centrifugal pumps in petroleum and chemical industry in accordance with their purpose and operating parameters. Reflects the problems of pumps used in process cycles of the refining and petrochemical industry within the framework of their requirements. Performed analysis of the operating conditions on the design of the pumps and their hydraulic characteristics. Discusses some of the most promising directions of improvement of centrifugal pumps with low specific speed. Considers possibilities of application of hydrophobic coatings and new approaches to the formation of the geometry of the flow pumps.

**Key words:** OIL & GAS, CHEMICAL INDUSTRY, CHEMICAL PUMP, HYDRAULICS, HYDROPHOBICITY, BLADE SYSTEM, ENERGY EFFICIENCY, RELIABILITY

### **Введение**

Как известно, стабильность развития экономики страны во многом зависит от эффективности добычи и экспорта нефти и нефтепродуктов, напрямую связанных с инвестициями в отрасль в части внедрения передовых технологий добычи и переработки с использованием наиболее современного насосного оборудования таких ведущих зарубежных производителей как KSB, Sulzer и др. В сложившейся на сегодняшний день экономической ситуации вопросы, связанные с повышением эффективности производств нефтегазовой промышленности и импортозамещением, становятся особенно актуальными. Большое внимание уделяется повышению конкурентоспособности отечественного насосного оборудования: его энергоэффективности, надёжности и безопасности. При этом всё больше ужесточаются требования к высоким эксплуатационным ресурсам и обеспечения оборудования средствами управления и диагностики работоспособности, устанавливаемые как на уровне ГОСТ, так и на уровне международных стандартов, в частности API.

## 1. Отраслевой обзор и выявление критических областей

На сегодняшний день в нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности эксплуатируется широкий спектр насосов, различающихся как по мощностям, так и по своему целевому назначению (рисунок 1) [2,3]. Из них выделяют следующие группы насосов:

- холодные – с температурой перекачиваемых продуктов до 220 °С;
- горячие – с температурой перекачиваемых продуктов от 220 до 400 °С;
- кислотные и щелочные;
- для перекачки сжиженных нефтяных газов;
- для перекачки глинистых и цементных растворов;
- для перекачки воды и др.



Рисунок 1 – Области применения центробежных насосов в нефтегазовой и химической отрасли

На сегодняшний день нефтегазодобывающая отрасль в России довольно развита, поскольку преобладает экспорт сырья. Тем не менее, с точки зрения потребителя наибольшую ценность представляет конечный продукт и в этом плане нефтехимия и нефтепереработка представляют одни из важнейших направлений развития экономики страны.

В нефтепереработке и нефтехимии центробежные насосы применяются в широком диапазоне подач и напоров, причём отмечается существенная потребность в тихоходных насосах. Связано это прежде всего с условиями эксплуатации и технологией нефтехимиче-

ских производств. Преодоление больших сопротивлений технологических линий требует создания высоких напоров. Вместе с тем, низкая скорость химических реакций, даже в присутствии катализаторов определяет малую величину потребных расходов.

Повышение конкурентноспособности отечественного насосного оборудования для нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности в настоящее время требует существенно улучшать эксплуатационные характеристики, принимая за ориентиры соответствующие показатели стандартов API 610 и 685, задаваясь целью превышения энергетической эффективности существующих аналогов и снижения стоимости владения.

Вместе с тем, известна проблематика насосов данного сектора:

- низкий КПД (в том числе и ввиду конструктивных особенностей: низкий  $n_s$ , существенные потери на трение и вихреобразование, значительные объёмные и механические потери);
  - западающая на малых подачах напорная характеристика;
  - узкая область автомодельности (выполнения критериев подобия), проблемы, связанные с влиянием пограничного слоя, при масштабировании.

Решать указанные проблемы представляется возможным тремя путями:

- создание нового более совершенного насосного оборудования;
- доработка конструкций серийно выпускаемого оборудования на стадии производства;
- модернизация оборудования, находящегося в эксплуатации.

Первый путь сопряжён со значительными финансовыми затратами, второй же и третий – модернизация насосов – позволяют обеспечить относительно быструю и малозатратную совокупность мероприятий по увеличению эффективности и надёжности насосного оборудования. При этом область возможных решений должна формироваться с учётом имеющихся конструктивных ограничений.

## **2. Направления совершенствования насосного оборудования**

### **2.1 Особенности конструкции**

Класс химических насосов характеризуется довольно жесткими условиями эксплуатации, связанными как с климатическими факторами, так и с агрессивностью, токсичностью, взрыво- и пожароопасностью некоторых перекачиваемых жидкостей. Наиболее часто конструкцию насоса определяют следующие свойства рабочих сред:

- химическая агрессивность по отношению к конструкционным материалам;
- наличие твердых абразивных включений, многофазность перекачиваемых сред;

- склонность рабочей среды к полимеризации, образованию осадка, затвердеванию, вскипанию при снижении или повышении температуры;

- среды с повышенной вязкостью

- рабочие жидкости могут быть токсичными, горячими, пожароопасными, криогенными.

Большинство таких сред используется в специальных технологических процессах и представляют существенную опасность для окружающей среды и персонала, а зачастую, и для жителей населенных пунктов. Отсюда высочайшие требования предъявляются к эксплуатационной надежности и безопасности такого оборудования

Вышеперечисленные факторы могут быть учтены посредством:

- применения химически стойких металлов и сплавов, разнообразных покрытий, полимеров, эластомеров (в зависимости от характеристик жидкости и её температуры)

- герметизации конструкции насоса:

  - минимизация внешних утечек

  - минимизация внутренних перетечек

- исполнения с обогреваемым/охлаждаемым корпусом

- выбора оптимальных конструктивных исполнений основных рабочих органов (открытые / закрытые, шнекоцентробежные рабочие колёса и др.)

- Вспомогательные элементы конструкции (теплообменники, фильтры, системы масляного охлаждения, частотного регулирования, включая системы плавного пуска, автоматизированные системы управления и контроля и т.п.)

## **2.2 Модификация проточной части**

Насосное оборудование для нефтегазовой и химической промышленности характеризуется высокими напорами  $H$  и КПД  $\eta$  в широком диапазоне подач (рисунок 2), при обеспечении «пологой» характеристики  $H(Q)$ , за счёт минимизации совокупных потерь, включающих гидравлические, объёмные и механические потери (рисунок 3).

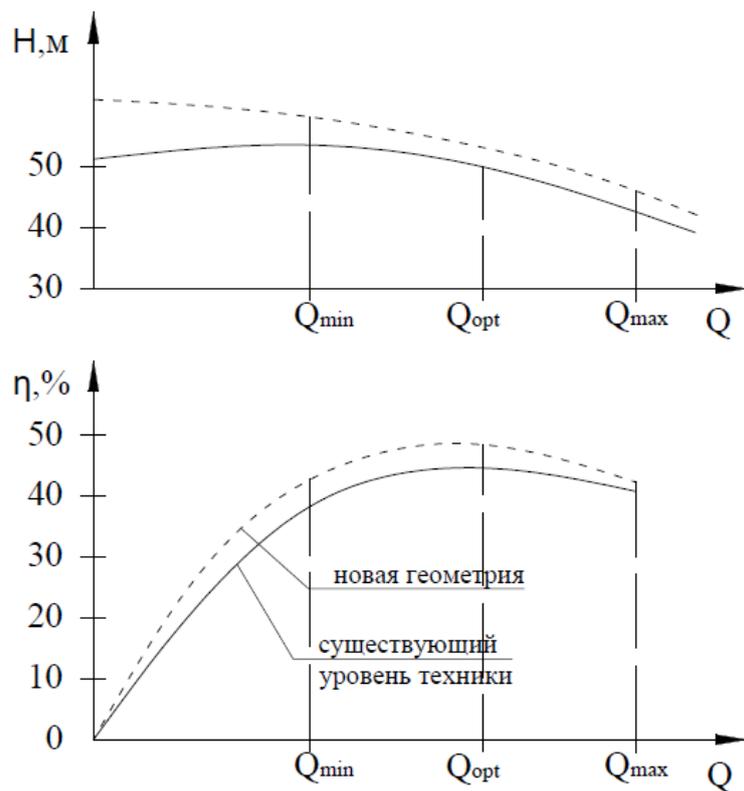


Рисунок 2 – Направления совершенствования эксплуатационных характеристик насосов нефтегазовой и химической промышленности

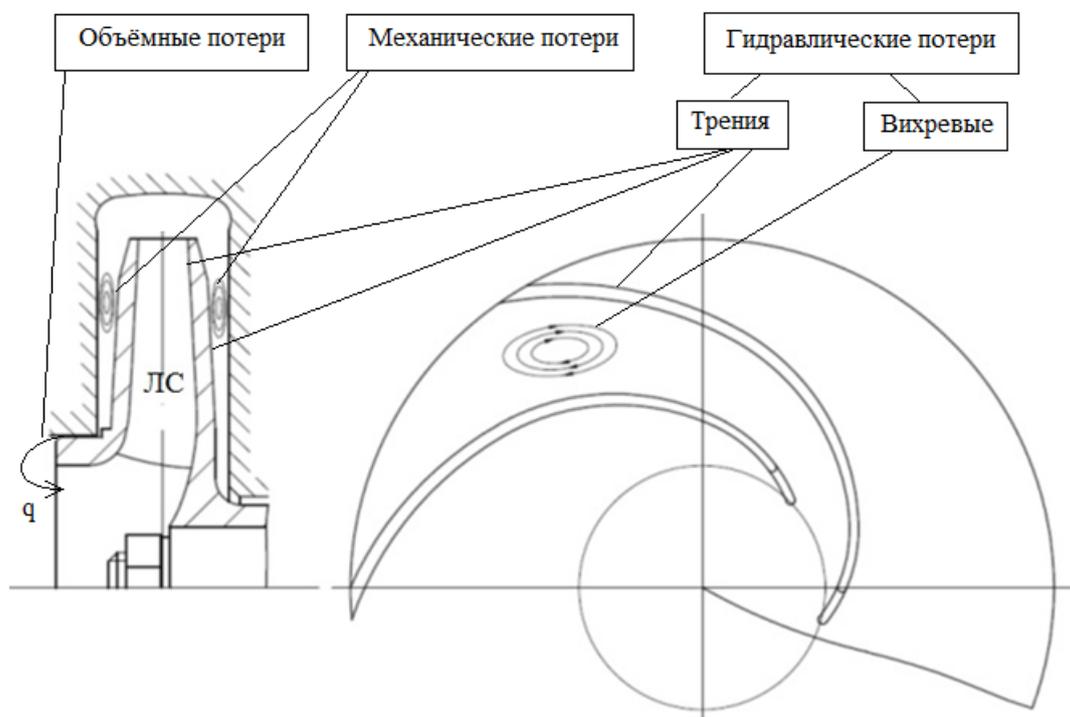


Рисунок 3 – Локализация основных видов потерь, минимизируемых за счёт совершенствования проточной части

В основном гидравлические потери в насосе определяются потерями на гидравлическое трение и вихревыми потерями, величина которых для насосов малой быстроходности относительно высока. Во многом они зависят от профиля элементов проточной части, физических свойств рабочей среды, характера взаимодействия потока жидкости с поверхностями проточной части и выбранных конструктивных решений.

Уменьшение потерь на гидравлическое трение может быть достигнуто модификацией поверхностей элементов проточной части на микро-уровне, путём их специальной обработки: механической, ионно-плазменной, газотермической и т.д. При этом основной эффект достигается за счёт снижения шероховатости.

Модификация поверхностей проточной части с использованием гидрофобных покрытий является перспективным способом повышения эффективности насосного оборудования, как для производителей, так, в некоторых случаях и для эксплуатирующих организаций [4]. Основным достоинством этого способа является сохранение без изменения геометрии рабочих элементов проточной части и конструкции насоса в целом, т.е. модификация на нано-уровне. Согласно исследованиям, в результате такой модификации поверхностей проточной части происходит:

- повышение напора
- повышение КПД, снижение энергопотребления;
- блокирование коррозионных процессов и предотвращение накопления отложений, без негативного воздействия на конструкционные материалы оборудования и снижения КПД в процессе эксплуатации.

Изменение гидравлических характеристик поверхностей при гидрофобизации происходит вследствие перехода от состояния смачивания (по Вензелю) к состоянию не смачиваемости (по Кассье-Бакстеру) или к комбинированной модели (рисунок 4). Изменяется сам механизм взаимодействия «стенка-жидкость» (рисунок 5) и, как следствие, формирования потерь в вязком подслое турбулентного пограничного слоя [5,6] (Эффект «Листа лотоса»).

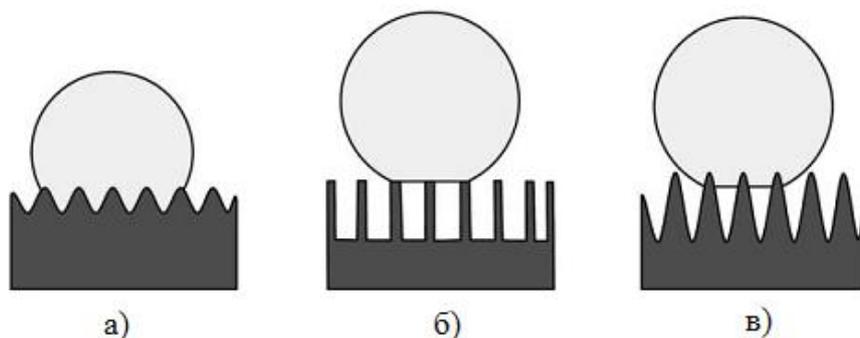


Рисунок 4 - Состояния смачивания:  
а) по Вензелю, б) по Кассье-Бакстеру, в) комбинированная модель.

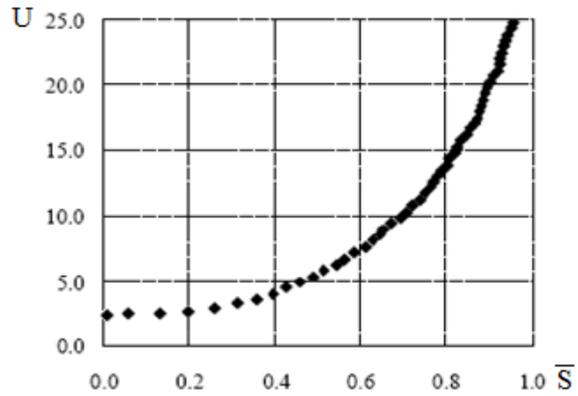
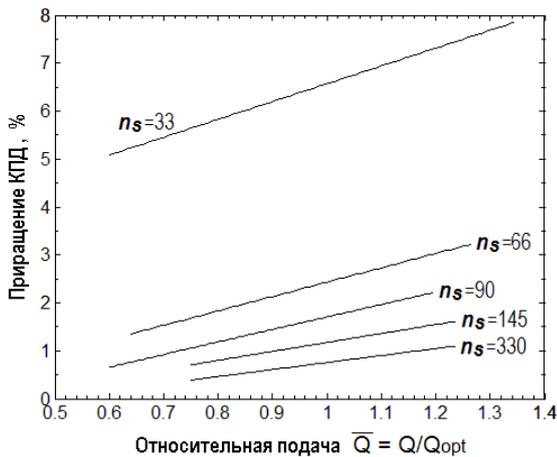
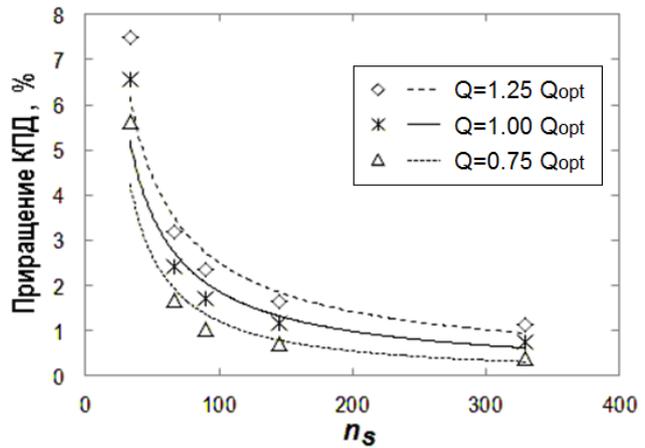


Рисунок 5 – Профиль скорости при изменении смачиваемости поверхности  
(Эффект «листа лотоса»)

Согласно результатам экспериментальных исследований, выполненных для насосов в широком диапазоне  $n_s=33\dots330$  при гидрофобизации их рабочих колёс (рисунок 6), был отмечен наибольший эффект по повышению КПД для насосов низкой быстроходности, что дополнительно подтверждает перспективность применения данного способа в указанной проблемной области.



а)



б)

Рисунок 6 – Закономерности изменения приращения КПД насосов с гидрофобизированными рабочими колёсами:

а) – в зависимости от режима работы; б) – в зависимости от быстроходности.

Эффективным способом снижения гидравлических потерь также является оптимизация профилей элементов проточной части насоса, в частности его рабочего колеса (рисунок 7) Особо следует отметить метод снижения вихревых потерь посредством минимизации диффузорности межлопастных каналов (рисунок 8). Здесь за счёт уменьшения ширины межлопастного канала выравнивается профиль скорости, а оптимизация угла раскрытия криволинейного канала снижает вероятность отрыва потока и образования вихревых течений. При этом расширяется рабочий диапазон насоса, при котором в межлопаственном канале суще-

ственно уменьшаются обратные течения. Варьируя степень диффузорности  $\beta = (R_n - R'_n) / (R_n - R_1)$  межлопастного канала можно достигнуть различных эффектов. Одной из главных сложностей при этом является то, что с уменьшением ширины межлопастного канала происходит повышение скоростей в проточной части насоса и, как следствие, увеличение потерь на гидравлическое трение. Таким образом, особый акцент при использовании таких подходов должен быть сделан на соотношении вихревых потерь и потерь на трение  $K = \Delta\eta_{\Gamma} / \Delta\eta_{\text{вих}}$ .

Следует также обратить внимание и на то, что обеспечить желаемую диффузорность можно различными способами, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки:

- увеличением толщины лопасти по тыльной стороне
- увеличением толщины лопасти по рабочей стороне
- увеличением толщины лопасти по рабочей и тыльной стороне при фиксированной средней линии тока и др.

При таких подходах может меняться угол охвата лопасти  $\Theta$ , выходной угол  $\beta_{2\text{л}}$ , закон изменения площади живого сечения и т.д. Каждое решение при этом будет иметь свои преимущества и недостатки. На рисунке 9 представлены первые результаты исследований в этом направлении на примере типового насоса с  $n_s = 66$ .

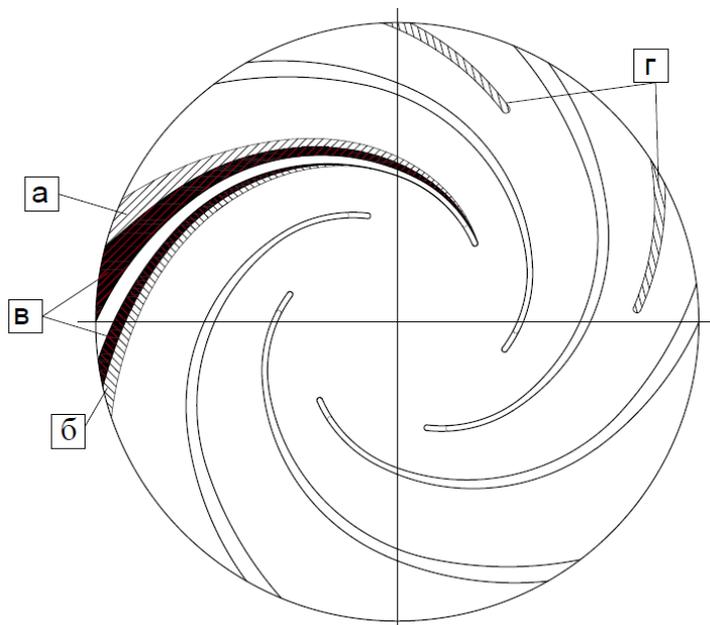


Рисунок 7 – Пути снижения вихревых потерь:

- а, б, в) – применением лопастей с увеличенной толщиной на выходе;*
- г) – добавлением промежуточных лопастей*

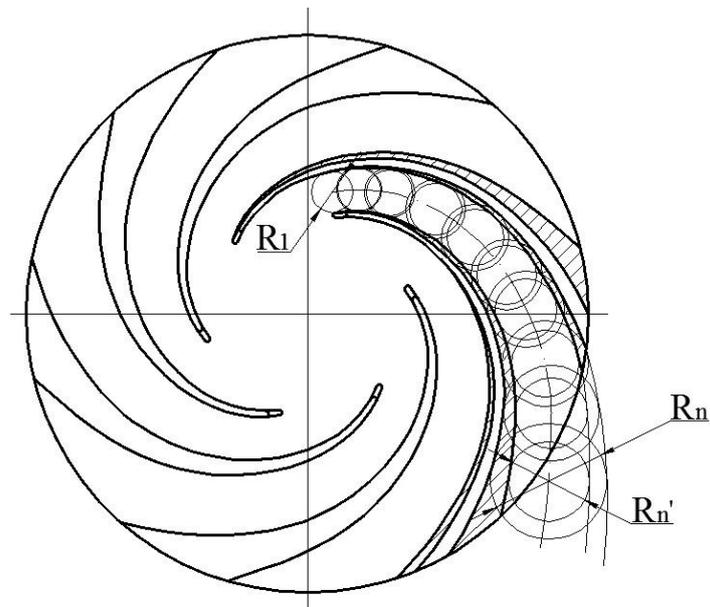


Рисунок 8 – Пример изменения диффузорности межлопастных каналов

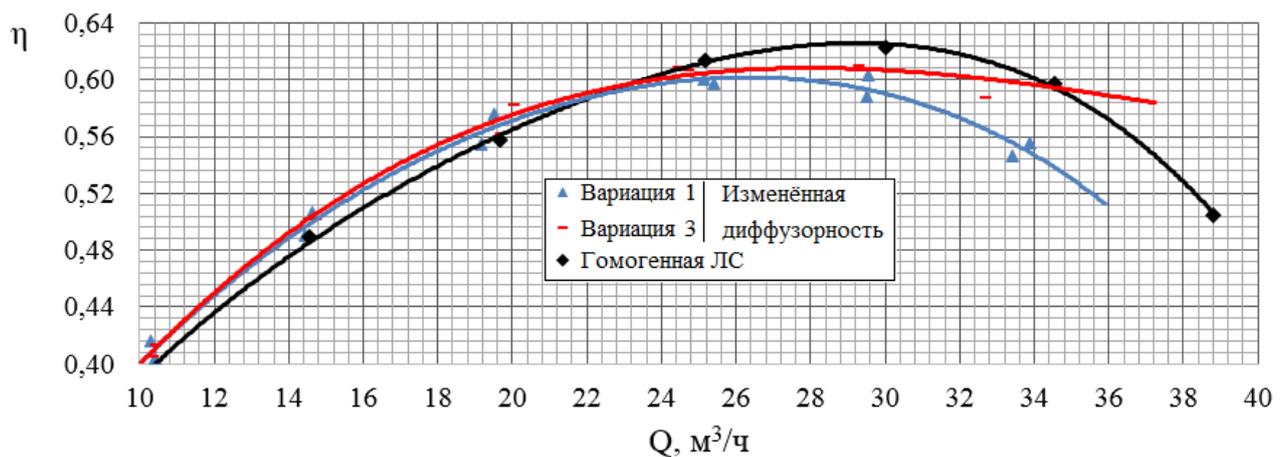


Рисунок 9 – Экспериментальные исследования влияния диффузорности межлопастных каналов насоса с  $n_s=66$  на его энергоэффективность

Результаты получены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификационный номер исследований RFMEFI57716X0227).

### Заключение

На сегодняшний день существует множество технических решений, направленных на совершенствование насосного оборудования. Анализ условий эксплуатации центробежных насосов в нефтегазовой и химической промышленности позволяет выявить специфику данного оборудования, основные проблемные области, определить конструктивные ограничения и сузить перечень возможных к применению эффективных решений. Из них, рассмотренные в настоящей статье (базирующиеся на применении гидрофобных покрытий и усо-

вершенствованных лопастных систем) представляют особой интерес.

Следует отметить, что наиболее целесообразна комплексная реализация данных решений, позволяющая обеспечить высокие эксплуатационные характеристики насоса в целом: как с точки зрения энергоэффективности, так и надёжности. Однако возможности такого подхода могут быть ограничены взаимодействием различных факторов, определяющих совокупный результат.

### Список литературы

1) Ивановский В.Н., Дарищев В.И., Сабиров А.А., Каштанов В.С., Пекин С.С. Оборудование для добычи нефти и газа. В 2 ч. Ч.1. М: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. 768 с.

2) Касьянов В.М. Гидромашины и компрессоры: Уч. для вузов. 2-е изд. М.: «Недра», 1981. 295 с.

3) Абдурашитов С.А., Тупиченков А.А., Вершинин И.М., Тененгольц С.М. Насосы и компрессоры. М.: «Недра», 1974. 296 с.

4) Вихлянцев А.А. Повышение эксплуатационных характеристик насосного оборудования, работающего в системах тепло- и водоснабжения // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Баумана. Электрон. Журн. 2016. № 9. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/848976.html> (Дата обращения 24.11.2016)

5) Морозов М.А., Волков А.В., Рыженков А.В., Парыгин А.Г., Лукин М.В., Наумов А.В. Расчет трубопроводных систем с учетом степени гидрофобности внутренних поверхностей// Нефтяное хозяйство. 2016. №4. С. 130-133.

6) Волков А.В., Парыгин А.Г., Лукин М.В., Рыженков А.В., Хованов Г.П., Наумов А.В., Soukal J., Pochyly F., Fialova S. Анализ влияния гидрофобности поверхности проточной части центробежных насосов на их эксплуатационные характеристики //Теплоэнергетика. 2015. №11. С.53-60

### References

1) Ivanovsky V.N., Darischev V.I., Sabirov A.A., Kashtanov V.S., Pekin S.S. *Oborudovanie dlja dobychi nefi i gaza* [Equipment for oil and gas]. At 2 pm. Part 1. Moscow: *Izdatel'stvo «Neft' i gaz» RGU nefi i gaza im. I.M. Gubkina = Publishing House of the State Unitary Enterprise "Oil and Gas" RSU of Oil and Gas named by I.M. Gubkin*, 2002, 768 p.

2) Kasyanov V.M. *Gidromashiny i kompressory* [Hydraulic machines and compressors]: B. for high schools. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow: "Nedra", 1981, 295 p.

- 3) Abdurashitov S.A., Tupichenkov A.A., Vershinin I.M., Tenengolts S.M. *Nasosy i kompressory* [Pumps and compressors]. Moscow: "Nedra", 1974, 296 p.
- 4) Vikhlyantsev A.A. *Povyshenie jekspluacionnyh harakteristik nasosnogo oborudovanija, rabotajushhego v sistemah teplo- i vodosnabzhenija* [Improving the performance of the heat and water supply systems pump equipment] // *Molodeznoj nauchno-tehnicheskij vestnik = Youth scientific and technical Bulletin*. Bauman MSTU. 2016. no. 9. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/848976.html> (accessed 24.11.2016)
- 5) Morozov M.A., Volkov A.V., Rizhenkov A.V., Parigin A.G., Lukin M.V., Naumov A.V., *Raschet truboprovodnyh sistem s uchetom stepeni gidrofobnosti vnutrennih poverhnostej* [The calculation of pipeline systems, taking into account the degree of hydrophobicity of the inner surfaces] // *Oil Industry*. 2016. no. 4, pp 130-133.
- 6) Volkov A.V., Parigin A.G., Lukin M.V., Rizhenkov A.V., Hovanov G.P., Naumov A.V., Soukal J., Pochyly F., Fialova S. *Analiz vlijanija gidrofobnosti poverhnosti protochnoj chasti centrobezhnyh nasosov na ih jekspluacionnye harakteristiki* [Analysis the impact of surface hydrophobicity Inst-term parts of centrifugal pumps at their performance] // *Thermal Engineering*. 2015. no. 11, pp.53-60