

*М.П. Пещеренко, к.ф.-м.н., ведущий математик Инженерно-технического центра Департамента инновационных разработок (ИТЦ ДИР), ЗАО «Нововет-Пермь», e-mail: PeshcherenkoM@novomet.ru; С.Н. Пещеренко, д.ф.-м.н., профессор Пермского национального исследовательского политехнического университета; Е.В. Пошвин, директор ДИР, ЗАО «Нововет-Пермь», e-mail: Poshvin@novomet.ru*

## Нефтяные ступени с открытыми рабочими колесами

**В последнее время широко применяются технологии интенсификации добычи, в т.ч. увеличение депрессии на пласт за счет снижения забойного давления ниже давления насыщения, а также гидроразрывы пластов. Теперь перекачивание скважинной жидкости обычными центробежными ступенями связано с риском засорения проточных каналов механическими примесями или их закупорки скоплениями пузырьков газа. Эти проблемы могут быть решены путем применения насосов с открытыми рабочими колесами.**

Первоначально интерес к ступеням с открытыми рабочими колесами возник в связи с возможностью сокращения металлоемкости и монтажной высоты ступеней путем удаления одного или обоих дисков центробежного рабочего колеса обычной конструкции [1, 2]. Это позволило уменьшить длину насоса на 20–50%. Однако в открытых рабочих колесах возникают нежелательные утечки жидкости и вместе с ними потеря энергии потока по зазорам между открытыми торцами лопастей рабочего колеса и стенками полости, в которой оно вращается. В [1, 3, 4] было показано, что создание минимальных зазоров при сборке насосной секции и их сохранение в процессе работы обеспечивает характеристики ступени с открытым импелле-

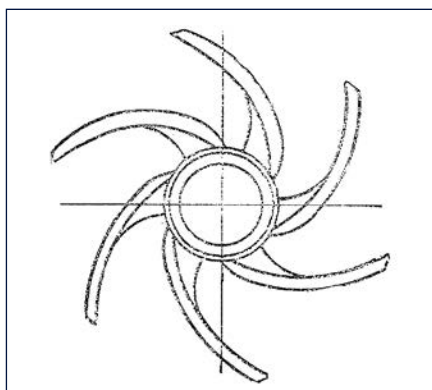
ром на уровне традиционных ступеней. Так, в 5 или 5А габаритах зазор должен составлять десятые доли миллиметра, что требует весьма жестких допусков на осевые размеры и, возможно, компрессионного типа сборки насоса. Понятно, что себестоимость такого насоса по сравнению с обычным будет существенно выше, поэтому широкого распространения такие насосы не получили.

Ситуация стала изменяться в последнее время в связи с массовым применением технологий интенсификации добычи, включающих в том числе увеличение депрессии на пласт за счет снижения забойного давления ниже давления насыщения, а также широкое применение гидроразрывов пластов. Теперь типичная скважинная жидкость содер-

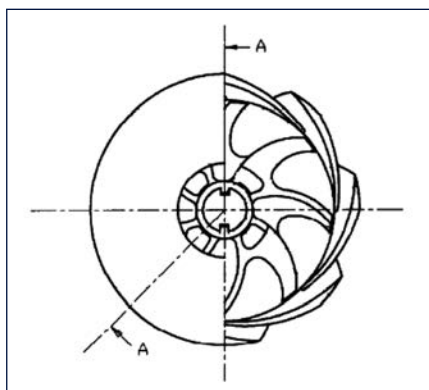
жит как пузырьки газа, так и твердые частицы, а перекачивание ее обычными центробежными ступенями (особенно для насосов на малые подачи) связано с риском засорения проточных каналов механическими примесями или их закупорки скоплениями пузырьков газа.

### **ЭТИ ПРОБЛЕМЫ МОГУТ БЫТЬ РЕШЕНЫ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ НАСОСОВ С ОТКРЫТЫМИ РАБОЧИМИ КОЛЕСАМ, ПОСКОЛЬКУ:**

- 1) течение в осевых зазорах открытых рабочих колес диспергирует как пузырьки газа, так и твердые частицы, гомогенизирует скважинную жидкость;
- 2) уменьшается вероятность «заклинивания» твердых частиц и пузырьков газа между стенками проточных кана-



а)



б)



в)

Рис. 1. Конструкции открытых рабочих колес: а) [2], б) [5], в) [6]

лов, поскольку в осевом направлении в открытых рабочих колесах этих стенок нет.

Кроме того, насосы с открытыми рабочими колесами позволяют эксплуатировать в постоянном режиме малодебитные скважины, в которых добыча обычно ведется в режиме накопления – откачки. Периодический режим в данном случае обусловлен тем, что в малодебитных скважинах с большой концентрацией механических примесей используются ступени с широкими проточными каналами, рассчитанные на большие номинальные подачи, что приводит к быстрой откачке жидкости и последующему простоя установки, связанному с ожиданием наполнения скважины. В случае же открытых рабочих колес допустимо применение ступеней с узкими проточными каналами и малыми номинальными подачами.

Ступени с открытыми рабочими колесами обеспечивают устойчивую работу насосов в осложненных условиях добычи, особенно на малых подачах (менее 50 м<sup>3</sup>/сут. для насосов 5 и 5А габаритов), если осевые зазоры между открытым импеллером и стенками полости, в которой он вращается, сохраняются неизменными. Конструкция ступени должна обеспечивать постоянство этих зазоров в течение всего срока службы. Последнее требование можно считать основным критерием качества ступени с открытым рабочим колесом.

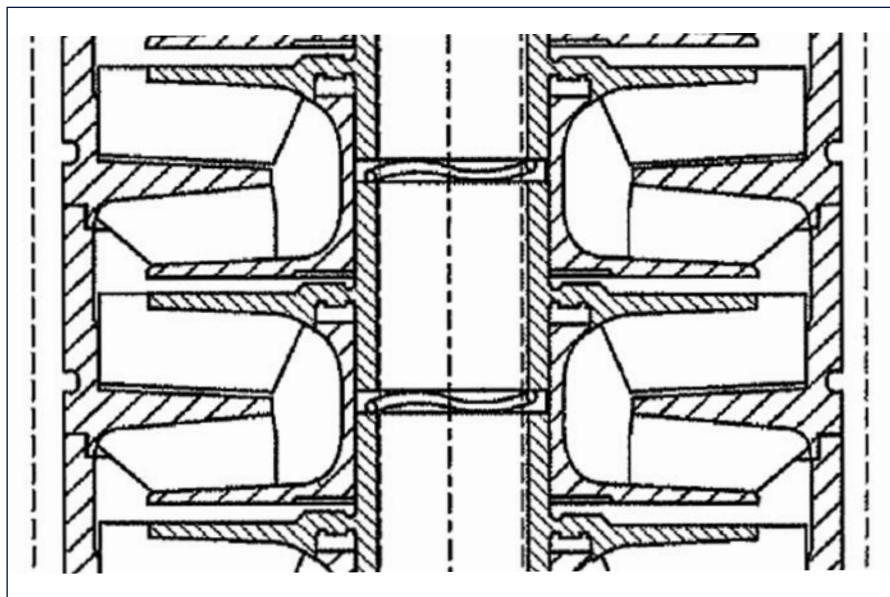


Рис. 2. Схема уравнивания открытого импеллера с помощью волновых пружин [7]

В одной из первых конструкций [2] (рис. 1а) полностью отсутствовали верхний и нижний диски рабочего колеса. Колесо было плавающим, и его осевое положение ограничивалось осевыми подшипниками уменьшенной площади, расположенными на рабочем колесе и направляющем аппарате. Осевой зазор и утечки произвольно менялись в процессе работы. В конструкциях [5] и [6] (рис. 1б и 1в) сохранены только части верхнего и нижнего дисков. Металлоемкость импеллера близка к минимальной, но осевая сила больше, чем в предыдущей конструкции.

По-прежнему мало места для надежных осевых подшипников, т.к. подшипник заужает проточный канал на входе в рабочее колесо. Поэтому при работе происходит прижатие рабочего колеса к направляющему аппарату, их совместный износ и увеличение потребляемой мощности.

В патенте [7] проблему осевого уравнивания открытого импеллера, имеющего верхний диск, предложено решить, разместив импеллер между волновыми пружинами (рис. 2). Жесткость пружин и допуски на размеры подбираются таким образом, чтобы



а)



б)

Рис. 3. Конструкции ступени с открытыми импеллерами [8]



Рис. 4. Разгружающие лопасти открытого колеса [12]

не возникало касания рабочего колеса и направляющего аппарата. Однако трение в таких осевых подшипниках будет существенно большим. А в условиях высокой концентрации твердых частиц в добываемой жидкости велика вероятность засорения пружин. Кроме того, из-за жестких требований на допуски по осевым размерам возрастает себестоимость такой ступени.

С целью дальнейшего снижения металлоемкости ступеней с открытым рабочим колесом была предложена высоконапорная конструкция [8] (рис. 3а) с рабочим колесом парциального насоса [9], имеющего прямолинейные радиальные лопасти, а также его модификация, в которой радиальные прямолинейные лопасти повернуты вокруг собственной

оси на некоторый угол (рис. 3б). Однако предложенные ступени имеют высокий напор только при достаточно большом числе лопастей, что приводит к необходимости делать лопасти тонкими. Для обеспечения их износостойкости при перекачивании жидкостей, содержащих абразивные частицы, необходимо нанесение износостойких покрытий, что в настоящее время является сложной, хотя и, по-видимому, разрешимой, технологической задачей [10, 11]. Другим недостатком данной конструкции, как и конструкций [5], [6], является некомпенсированность осевой силы и проблема размещения осевых подшипников. Основной идеей предлагаемой нами конструкции [12] (рис. 4) является полное уравнивание осевой силы, которое обеспечивает «подвешенное состояние» рабочего колеса в процессе работы. Это достигается путем создания вихревого движения жидкости над единственным диском рабочего колеса с помощью дополнительных лопастей. В предложенной конструкции нагрузка со стороны колеса на осевые (как верхний, так и нижний) подшипники ступени минимальна. Поэтому сохраняется высокая износостойкость и надежность конструкции в условиях перекачивания жидкостей с повышенным содержанием механических примесей. Конфигурация, геометрические размеры, а также количество разгружающих лопастей подбираются для каждого от-

крытого колеса индивидуально в зависимости от развиваемого давления, рабочего диапазона подач и основных геометрических размеров колеса. Правильный выбор указанных параметров является определяющим фактором долговременной и надежной работы предложенного насоса. Использование современных программных комплексов для моделирования течений позволяет выполнить этот подбор достаточно точно.

Одной из первых открытых ступеней с осевой разгрузкой была разработана ступень ВНН05-20. За счет удаления нижнего диска рабочего колеса монтажная высота уменьшилась на 35%, а напорность (напор, развиваемый 1 м насоса) увеличилась с 186 до 239 м/м по сравнению со ступенью ВНН5-20 обычной конструкции. КПД на оптимальной подаче уменьшился на 4 пункта: с 33% для ВНН5-20 до 29% для ВНН05-20.

Открытая ступень ВНН05-20 внутри диапазона подач от 7 до 25 м<sup>3</sup>/сут. работает в «подвешенном состоянии». Осевой зазор между открытыми торцами рабочих лопастей колеса и донышком направляющего аппарата составляет 0,2–0,5 мм.

Эффективность осевой разгрузки подтвердили сравнительные ресурсные испытания ступени ВНН05-20 и ступени без осевой разгрузки [6] на смеси вода + кварцевый песок (10 г/л, средний размер частиц – 500 мкм) в течение 4 часов при частоте вращения вала 2910 об./мин. Установили, что напор ступени с осевой разгрузкой практически не изменился, а КПД снизился незначительно – на 4%, в то время как напор открытой ступени без осевой разгрузки уменьшился на 40%, а КПД – на 12%. Характеристики ступеней после ресурсных испытаний приведены на рисунке 5. На рисунке 6 приведены напорно-расходные характеристики открытой ступени ВНН05-20 (рис. 6а) и ступени традиционной конструкции ВНН5-25 (рис. 6б), полученные при испытаниях на газожидкостной смеси (вода + воздух + ПАВ) с различным содержанием газа, при давлении на входе в секцию 1,5 атм. и частоте вращения вала 2910 об./мин. Видно, что в то время как обычная ступень способна перекачать смесь

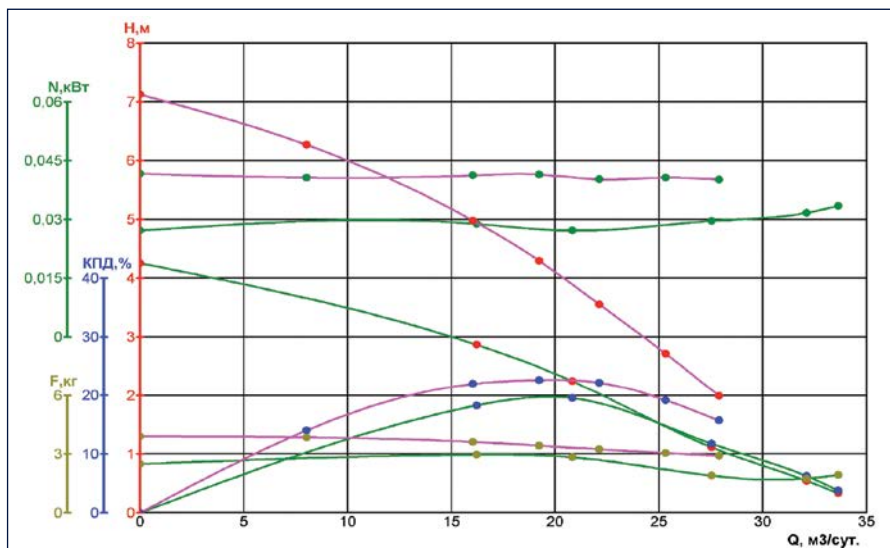


Рис. 5. Характеристики открытой ступени без осевой разгрузки по [6] (зеленые кривые) и ступени ВНН05-20 (розовые кривые) после ресурсных испытаний

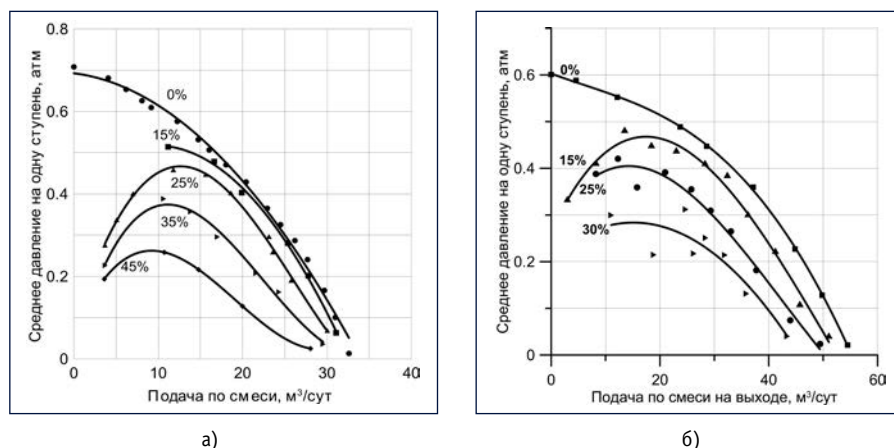


Рис. 6. Напорно-расходные характеристики на газожидкостной смеси:  
а) ВНН05-20 (сборка из 15 ступеней); б) ВНН5-25 (сборка из 17 ступеней)

с газосодержанием не более 30% (при больших содержаниях газа в смеси происходит закупорка проточных каналов газовыми пробками и срыв подачи насоса), открытые ступени успешно работают и создают положительный напор при содержании газа в смеси уже до 45%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ступени с открытыми рабочими колесами имеют очевидное преимущество – существенно меньшую монтажную высоту, а значит, меньшую длину и металлоемкость насоса. Однако в открытых рабочих колесах имеют место утечки жидкости через зазоры между открытыми торцами лопастей рабочего колеса и стенками полости, в которой оно вращается, что приводит к уменьшению напора и КПД насоса. Поэтому

зазоры не должны превышать некоторой критической величины, зависящей от подачи и напора ступени.

Другим важным преимуществом ступеней с открытыми рабочими колесами является их более устойчивая работа при добыче нефти, содержащей нерастворенный газ и механические примеси, как за счет диспергации пузырьков газа и твердых частиц в осевых зазорах, так и за счет уменьшения вероятности «закупоривания» примесями проточных каналов.

Естественно, необходимым условием безотказной работы насосов с открытыми рабочими колесами является поддержание в течение всего срока службы контролируемого осевого зазора между открытым импеллером и стенками полости, в которой он враща-

ется, причем, как это было подчеркнута выше, величина этого зазора должна быть минимально возможной.

Предложенная нами конструкция ступени удовлетворяет поставленному требованию за счет полной гидродинамической разгрузки – рабочее колесо вращается, не касаясь направляющих аппаратов. Показано, что в конструкциях без разгрузки рабочее колесо быстро изнашивается, характеристики насосов деградируют и существенно отличаются от полученных в исходном состоянии.

Простота и технологичность предложенной конструкции обуславливают ее низкую себестоимость. Ступень имеет малую монтажную высоту и высокую напорность, что позволяет существенно сократить общую длину насоса. Наличие большого числа открытых кромок лопастей, а также вихревой венец стабилизируют работу насосной секции на газожидкостной смеси.



ГРУППА КОМПАНИЙ  
**NOVOMET**

Группа компаний «Новомет»  
614065, Пермь, ш. Космонавтов,  
д. 395  
Тел.: +7 (342) 296-27-56  
Факс: +7 (342) 296-23-02  
www.novomet.ru

## Литература:

1. Богданов А.А. Погружные центробежные электронасосы для добычи нефти (расчет и конструкция). – М: Недра, 1968. – 272 с.
2. АС СССР № 106135. Рабочее колесо для многоступенчатого центробежного насоса / Авт. изобр. А.А. Богданов, П.Д. Ляпков, М.А. Кузнецов. – Заявл. 03.12.1951.
3. Gülich J.F. Centrifugal Pumps: 2-nd edition. – Springer, 2010. – 964 p.
4. Деньгаев А.В. Повышение эффективности эксплуатации скважин погружными центробежными насосами при откачке газожидкостных смесей: Дисс. ... канд. техн. наук. – М., 2005. – 212 с.
5. Патент РФ № 2308617. Ступень центробежного насоса / Авт. изобр. А.И. Голубев, М.В. Колонтай. – МПК F04D 13/10, 29/22, 29/041; заявл. 01.04.2005, 20.10.2007, бюлл. № 29.
6. Патент РФ № 2376500С2. Рабочее колесо ступени погружного центробежного насоса / Авт. изобр. Ш.Р. Агеев, Е.Ю. Дружинин и др. – МПК F04D 29/22, F04D 13/10; заявл. 07.03.2008, опубл. 20.12.2009, бюлл. № 35.
7. US patent № 2009/0285678. System, method and apparatus for open impeller and diffuser assembly for multi-stage submersible pump / Inventors Christopher Marvin Brunner, Jason Ives. – F 04D 29/44; pub. date Nov. 19, 2009.
8. Патент РФ № 73412. Ступень погружного многоступенчатого насоса / Авт. изобр. Ю.А. Сазонов, В.И. Заякин. – МПК F04D 13/10; заявл. 15.01.2008, опубл. 20.05.2008, бюлл. № 14.
9. Barske U.M. Design of Open Impeller Centrifugal Pumps. – Royal Aircraft Establishment, Farnborough, Technical Note No RPD 77 (January 1953).
10. Ивановский В.Н. Энергетика эксплуатации скважин механизированными способами, выбор способа эксплуатации, пути повышения энергоэффективности // Инженерная практика. – 2010. – № 3. – С. 4–16.
11. Ивановский В.Н. Новые перспективные ступени ЭЦН // Нефтегазовая вертикаль. – 2010. – № 11. – С. 30–35.
12. Патент РФ № 133215. Ступень погружного многоступенчатого насоса с рабочим колесом открытого типа / Авт. изобр. С.Д. Абахри, С.Н. Пещеренко и др. – МПК F04D 13/10, F04D 29/041; заявл. 11.04.2012. опубл. 10.10.2013, бюлл. № 28.