

Исследование распределения давлений в пятиступенчатой сборке погружных насосов при работе на смесях вода-воздух.

/ Гилев В.Г., Инженер-исследователь 1 категории

/ Рабинович А.И., Директор по науке и новой технике

/ Долгих А.В., Инженер-исследователь 3 категории

В последнее время активизировались работы в области конструирования погружного нефтедобывающего оборудования для отягченных условий работы [1-10]. Среди последних разработок наибольший интерес представляют центробежно-вихревые (ЦВН) [4] и центробежно-осевые (ЦОН) насосы [7, 8], с улучшенными напорными характеристиками и повышенной устойчивостью работы на газожидкостных смесях (ГЖС) [1, 4-9].

Разработка новых конструкций многоступенчатых погружных насосов невозможна без решения вопроса о методах испытаний ступеней на ГЖС. Эта проблема остается актуальной, так как, несмотря на многочисленные и многолетние исследования, нет общепринятого метода испытаний насосов.

В экспериментах Ляпкова П.Д. использовались короткие сборки [2]. В более поздних работах [3] показано, что при увеличении числа ступеней насосы могут перекачивать газожидкостные смеси с большим содержанием газа. Применение длинных сборок замедляет и удорожает процесс испытаний. Кроме того, условия работы отдельных ступеней в них существенно различаются, и получаемая информация усреднена по всей длине. Короткие сборки в этом смысле выгодно отличаются от длинных. Их исследование может дать более точную информацию о работе именно ступени в данных конкретных условиях. Многоступенчатые установки ближе к реальным условиям работы насоса в скважинах, тем не менее, по мнению авторов [10, 11], короткие сборки остаются привлекательными для исследования, особенно на ранних стадиях отработки новых конструкций ступеней.

Во время испытаний ЭЦН на ГЖС определяют степень изменения характеристик в зависимости от содержания газа в смеси. Чаще всего ограничиваются построением серий напорно-расходных характеристик всего насоса в целом при различных объемных газосодержаниях на входе. Представляют интерес данные о напоре, создаваемом отдельными ступенями, расположенными в разных частях сборки. В настоящей работе приведены результаты исследования распределении давления по длине пятиступенчатой сборки при работе на смеси вода-воздух.

Методика эксперимента

Основные эксперименты проведены по стандартной методике [10, 11]. Схема использованного стенда с горизонтальным расположением исследуемой сборки приведена на рис.1. Давление на каждой ступени определяли через отверстия в направляющих аппаратах, расположенных напротив выхода из рабочего колеса. Отклонение в положение отверстий во

всех ступенях относительно установочных опорных поверхностей не превышало $\pm 0,05$ мм.

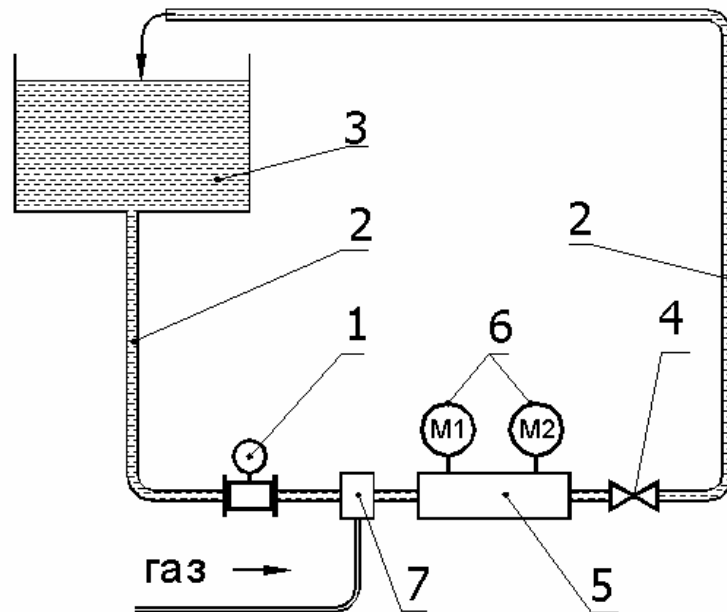


Рис.1. Схема стенда для испытаний: 1-расходомер жидкости на входе в сборку, 2-трубопроводы, 3-накопительная емкость, 4-запорная задвижка, 5-испытуемый насос (сборка ступеней), 6-манометры для определения давлений на входе и выходе насоса, 7-устройство ввода газа

Исследовали ступени типа ВНН производства ЗАО «Новомет-Пермь» с номинальной производительностью 25, 44, 59 и 125 м³/сут с плавающими рабочими колесами (РК). На ступенях 1ВННП5-44 дополнительно испытывали сборку с фиксированным положением РК, для чего между ними устанавливали кольца проставки, а в конце – осевую опору.

Результаты и их обсуждение

Из опубликованных результатов исследований работы многоступенчатых сборок на газожидкостных смесях [1-10] известно, что при больших газосодержаниях, близких к срыву подачи, несколько первых ступеней насоса или не создают напора, или создают отрицательный напор.

В настоящей работе на пятиступенчатых сборках мы также наблюдали подобные режимы, но они не приводили к срыву. После достижения этого критического (порогового) режима и дальнейшего увеличения β срыв не происходил, а насос продолжал работать при более низких параметрах расхода.

Продемонстрируем сказанное на примерах. На рис.2 и 3 приведены распределения давления по ступеням для двух сборок 1ВННП5-44 и 2ВННП5-125.

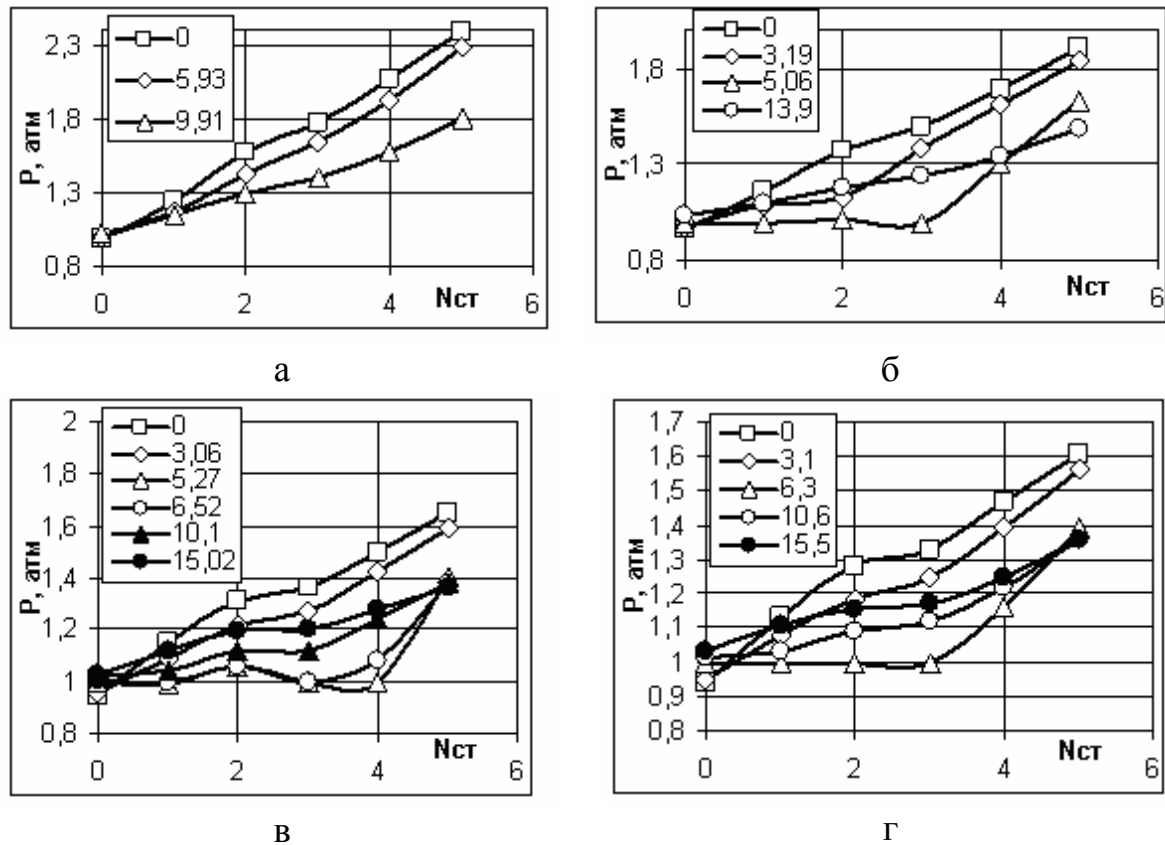


Рис.2. Распределение давления по ступеням 1ВННП5-44 при различных значениях $Q_{ж.нач}$, $m^3/сут$: а – 72,2; б – 80; в – 85,4; г– 85,7. Цифрами указаны значения β

На обеих сборках при работе с газожидкостной смесью наклон кривых на участке первых трех ступеней ниже, чем на участке 4-ой и 5-ой ступени. Но особенно ярко это проявляется на сборке 1ВННП5-44, где при $\beta = 5-6\%$ на первых ступенях давление имеет нулевое и даже небольшое отрицательное значение. При газосодержании выше 5% реализуется режим работы, похожий на критический. Три первые ступени перестают создавать напор, см. кривую при $\beta = 6,3\%$ на рис.2. Казалось бы, что при малейшем увеличении содержания газа должен наступить срыв подачи, но *этого* не происходит.

На первый взгляд результат кажется ошибочным, обусловленным несовершенством методики, однако данному явлению есть объяснение. Срыва не происходит, потому что при увеличении β расход жидкости уменьшается, рис.4в, и несколько повышается напор на входе.

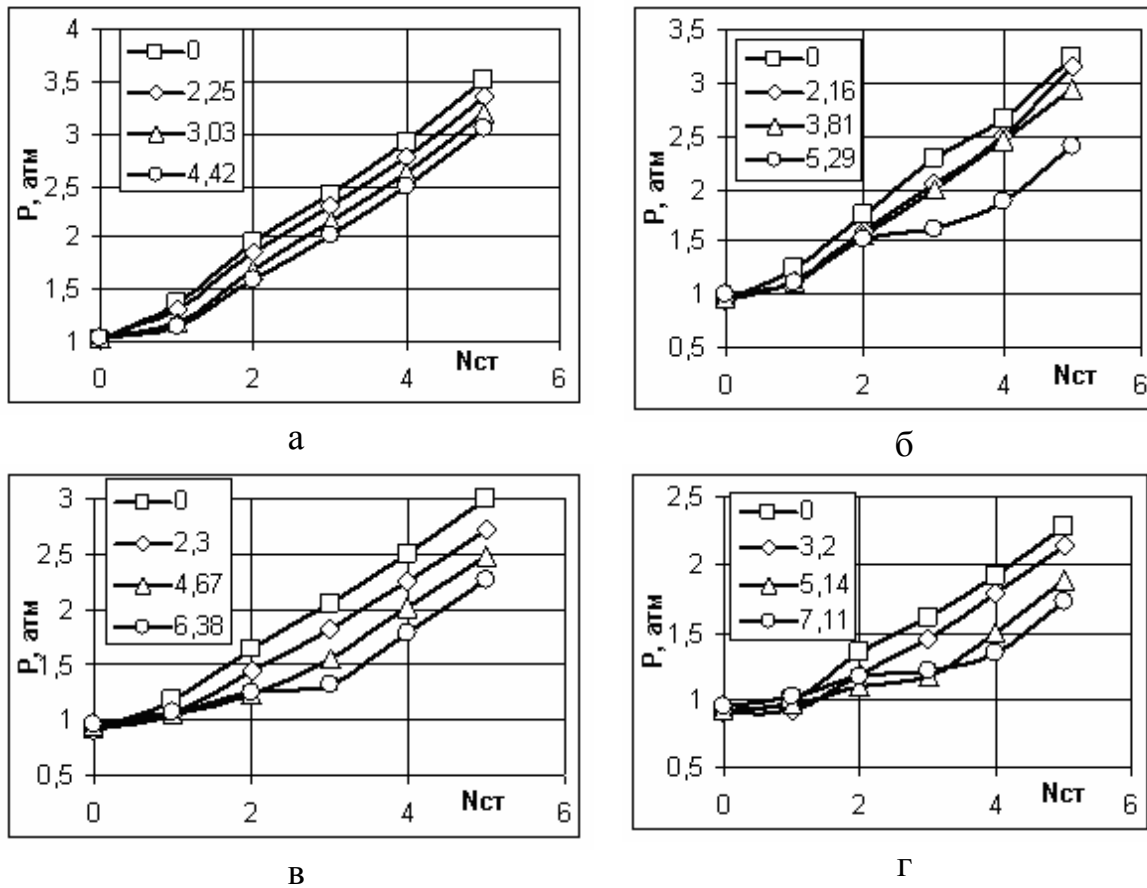


Рис.3. Зависимости $P-f(N_{ст})$ для ступеней 2ВННП5-125 при различных значениях $Q_{ж,нач}$, м³/сут: а – 57,3, б – 85, в – 106, г – 122. Цифрами указаны значения β

Причиной срыва подачи при добавлении газа обычно считается запирание газовой пробкой. Такая пробка может образовываться в своеобразной «зоне разрежения», возникающей из-за того, что первые ступени, работающие с менее дисперсной смесью и при максимальных газосодержаниях, не могут создавать напор и становятся гидродинамическими сопротивлениями, а следующие за ними, находящиеся в несколько лучших условиях, продолжают работать и откачивать жидкость из этой зоны. В ступенях в зоне пониженного давления будет накапливаться газовая фаза, что в конечном итоге может приводить к срыву. Однако в наших опытах на пятиступенчатых сборках при реализации похожего распределения давления, например, на сборке из 1ВННП5-44, рис.2, срыва по этому механизму не происходит.

Ступени 2ВННП5-125 имеют большое сечение каналов и, как следствие, низкое гидродинамическое сопротивление, поэтому для достижения при их испытании режима с «зоной разрежения» требуются большие расходы жидкости. Из-за ограничений стенда 2ВННП5-125 испытывались при расходах значительно ниже предельных для этой ступени. Поэтому не был достигнут режим с «зоной разрежения». Однако на зависимостях $P-f(N_{ст})$ на

ступенях 2ВННП5-125 четко просматривается снижение напора на первых ступенях сборки. Количество ступеней с пониженной напорностью возрастает с ростом величины β , а также с увеличением расхода жидкости, рис.3. В данном случае, как видно из рис.3, при максимальных $\beta = \beta_{кр}$ нет зоны разрежения, но наблюдается самое низкое результирующее давление на выходе из 5-ой ступени. Формально насос прекращает работу из-за того, что создаваемый им напор менее высоты столба жидкости на выходе. Однако нельзя исключать возможность срыва из-за образования газовых пробок в больших сборках.

В режимах с явно выраженной зоной разрежения наблюдаются необычные эффекты и аномалии на кривых $\Delta P_{г-f}(\beta)$, в виде пиков и провалов на кривых $\Delta P-f(\beta)$ соседних ступеней, рис.4.

Как видно из рис.4а, при $\beta \sim 5\%$ пик на кривой $\Delta P_5-f(\beta)$, совпадает с минимумом на кривой $\Delta P_4-f(\beta)$.

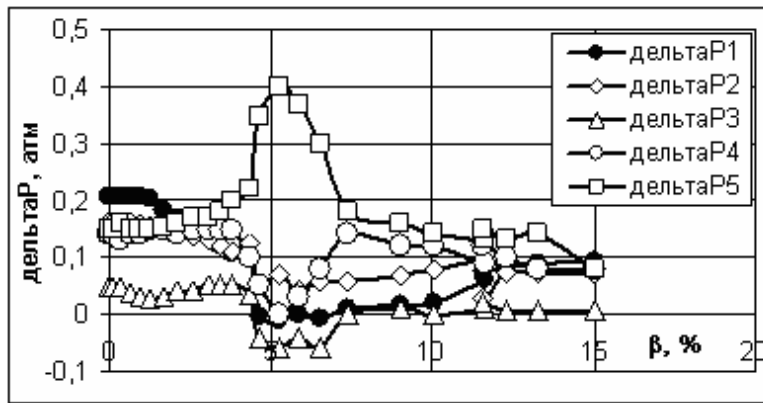
Изменение давления по ступеням при различных β для этой серии испытаний приведено на рис.2в. Можно видеть, что при данном $Q_{ж.нач} = 85,4 \text{ м}^3/\text{сут}$ и при $\beta \sim 5\%$ в сборке формируется распределение давлений с ярко выраженной «зоной разрежения». На зависимостях давления от газосодержания на ступенях №3, 4, рис.4б, также наблюдаются глубокие минимумы.

Аномалии в виде пиков и провалов обнаружены на ступенях ВНН пятого габарита с номиналами 25, 44, 59 в режимах после оптимума.

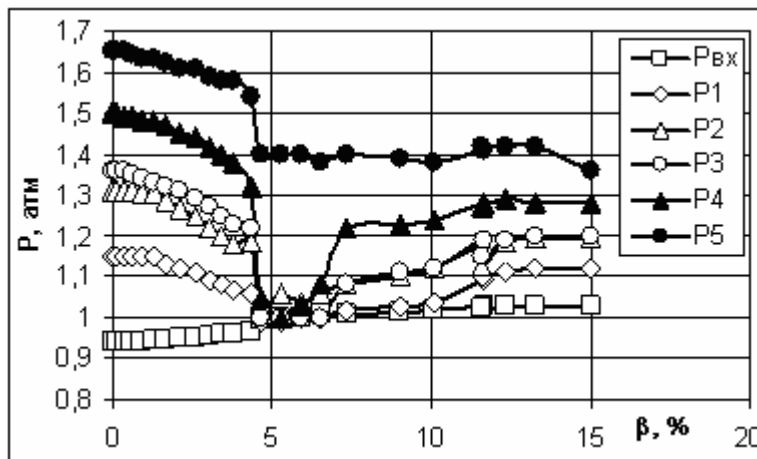
Для объяснения этого явления выдвинуто предположение, что образование аномалий связано с изменением положения РК в одной из ступеней, в то время как рабочие колеса в соседних ступенях остаются на прежних местах. Пример такого изменения в сборке показан на рис.5.

Перепад между давлением на входе в ступень $P_{вх}$ и давлением в ступени №1 P_1 обозначим как ΔP_1 , соответственно $\Delta P_2 = P_2 - P_1$, $\Delta P_3 = P_3 - P_2$, $\Delta P_4 = P_4 - P_3$, $\Delta P_5 = P_5 - P_4$.

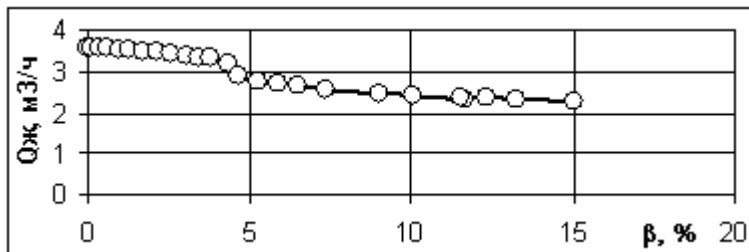
Очевидно, что при всплытии РК в ступени №4 при условии, что остальные ступени останутся в прижатом положении, произойдет увеличение ΔP_4 и снижение ΔP_3 и ΔP_5 . При этом среднее значение $H_{ст}$ изменится мало, так как всплывает всего одно РК.



а



б



в

Рис.4. Пример аномалий давления при работе сборки ступеней 1ВННП5-44 на ГЖС вода воздух при $Q_{ж.нач} = 85,4 \text{ м}^3/\text{сут}$, испытания со свободно плавающими РК: а - $\Delta P_i - f(\beta)$, б - $P_i - f(\beta)$, в - $Q_{ж} - f(\beta)$.

ступенчатой сборке при изменении содержания газа в смеси не проводилось.

Для проверки предположения, что аномалии являются следствием всплытия – опускания РК в отдельных ступенях сборки, проведены испытания в сборках, в которых такое перемещение было специально затруднено проставками – кольцами и осевой опорой. Аномальные пики особенно высоки при первом испытании ступеней, когда на них нет ржавчины и скольжение РК вдоль вала максимально облегчено.

В силу того, что величина ΔP_i сильно зависит от положения РК в ступенях, эта величина только в усредненном виде соответствует напору на одну ступень сборки. Не случайно величину $H_{ст}$ обычно определяют на интервале ступеней.

Мы наблюдали влияние добавления газа на ступенях 1ВННП5-25, на одной из которых часть стенки направляющего аппарата была сделана из стекла.

Установлено, что если при работе без газа в режимах от правой границы до режима максимально открытой задвижки, РК первоначально находятся во всплывшем положении, но после добавления газа опускаются в прижатое положение.

Однако детальное исследование процессов всплытия опускания РК в пяти-

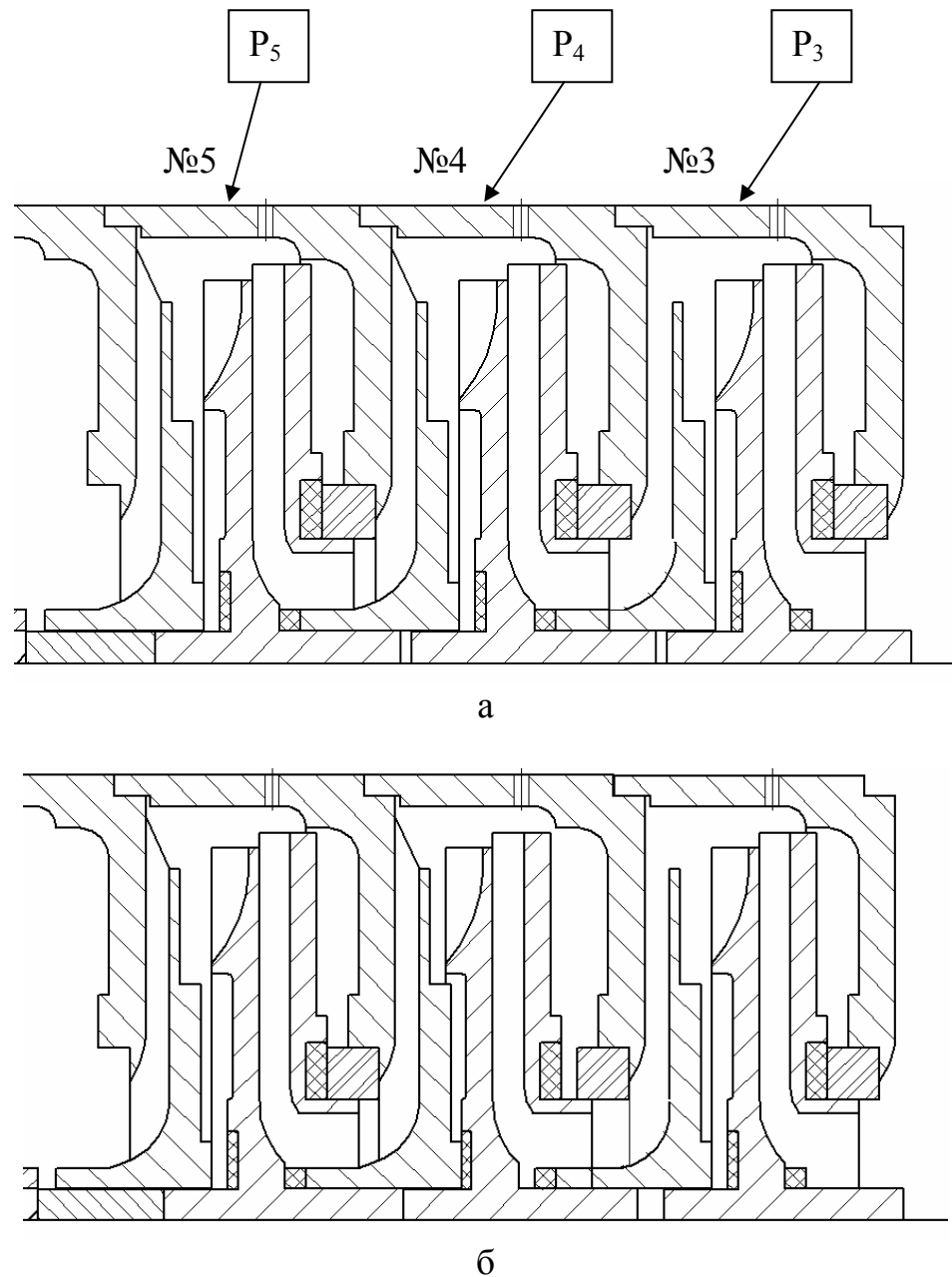


Рис.5. К объяснению аномалий на кривых $\Delta P-f(\beta)$:

а – состояние сборки, когда РК всех трех ступеней прижаты к опоре,

б – состояние сборки, когда РК 4-ой ступени всплыло, а РК 3-ей и 5-ой остались прижатыми к опорам.

Повторные испытания с затрудненными условиями перемещения РК вдоль вала приводили к снижению величины аномальных пиков. Однако полностью устранить аномальный характер изменения перепадов давления при увеличении газосодержания не удалось даже в пакетной сборке, рис.6.

Очевидно, характер кривых $\Delta P-f(\beta)$ определяется не только изменениями положения РК в отдельных ступенях, но и другими факторами.

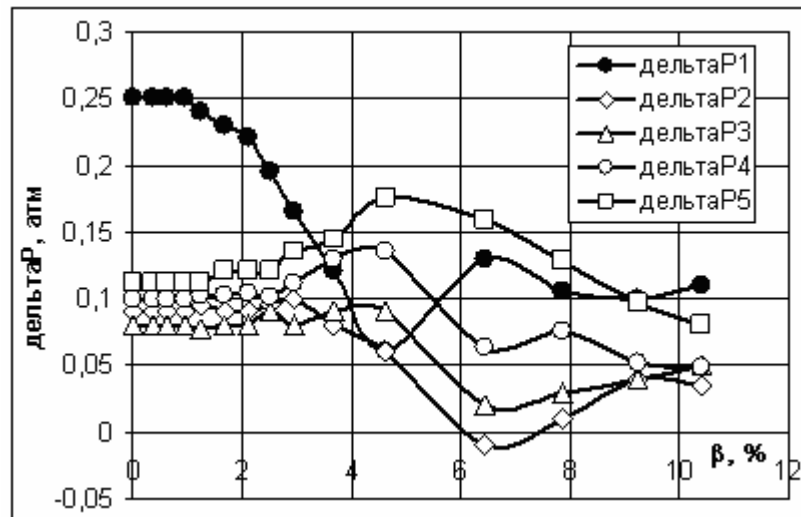


Рис. 6. Зависимость перепадов давления от газосодержания в пятиступенчатой пакетной сборке ступеней 1ВННП5-44 при $Q_{ж.нач}=85,4 \text{ м}^3/\text{сут}$

Например, нами на исследованных ступенях ВНН с номиналами 25 и 44 $\text{м}^3/\text{сут}$ неоднократно наблюдалось положительное влияние небольшого содержания газа в виде максимумов напора при $\beta \sim 5\%$. [11]. Этот эффект наиболее сильно проявляется на последних ступенях, куда ГЖС попадает в дисперсном состоянии.

Выводы:

1. В пятиступенчатых сборках 1ВННП5-25, 1ВННП5-44 при работе на газо-жидкостных смесях при достижении определенных β реализуются распределения давления с «зоной пониженного давления» во 2-ой 3-ей ступенях. Дальнейшее повышение газосодержания в смеси приводит не к срыву, а к снижению напора, расхода жидкости и более равномерному распределению давления по длине сборки.

2. Срыв подачи в исследованных пятиступенчатых сборках при работе на газо-жидкостной смеси происходит из-за снижения уровня создаваемого напора ниже минимально необходимого для преодоления нагрузки в виде столба жидкости на выходе из насоса.

Литература

1. Cirilo R., Doty D. Gas-liquid flow through electric submersible pumps // SPE Gulf Coast Section – ESP Workshop. 28-30 April 1999. Session 4, paper 4.

2. Ляпков П.Д. Влияние газа на работу ступеней погружных центробежных насосов // Тр. ВНИИ, 1959. Вып.22. С.59 - 89.

3. Дроздов А.Н. Разработка, исследование и результаты промышленного использования погружных насосно-эжекторных систем для добычи нефти:

Автореф. дис на соискание ученой степени д-ра техн. наук: 05.15.06. М., 1998. 47 с.

4. Новые центробежно-вихревые насосы для добычи нефти в осложненных условиях /О.М.Перельман, М.Ю.Мельников, П.Б.Куприн, А.И.Рабинович, И.П.Трясцын // Разработка, производство и эксплуатация турбо-, электронасосных агрегатов и систем на их основе : Труды I Международной научно-технической конференции «СИНТ'01». Воронеж: ООО РИФ «Кварта», 2001. С.61-65

5. Гусин Н.В., Мельников Д.Ю., Некрасов П.А. Центробежно-вихревые насосы и некоторые особенности их работы на газожидкостных смесях // Труды международной научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы развития гидромашиностроения в XXI веке» Россия, г. Санкт-Петербург, 4-6 июня 2003 г. С.78-82.

6. Reliable low flowrate centrifugal installations for oil production in complicated conditions / Ageev Sh.R., Kuprin P.B., Maslov V.N., Melnikov M.J., Perelman O.M., Pescherenko S.N., Rabinovich A.I. // ESP Workshop 2005. Houston.USA. April, 2005.

7. Игrevский Л.В. Экспериментальные исследования влияния свободного газа на характеристики многоступенчатых погружных центробежных и центробежно-вихревых насосов // Надежность и сертификация оборудования для нефти и газа. 2002. № 3. С.35-43.

8. Рабинович А.И., Гусин Н.В. Высоконапорная и экономичная модификация многоступенчатого центробежного насоса для добычи нефти // 2 Международная научно-техническая конференция «СИНТ'03», Россия, г. Воронеж, 15–20 сентября 2003 г. Воронеж: ООО «Оригами», 2003. С.151-156.

9. Патент №2253756 РФ, МКИ⁶ F04D13/10. Ступень погружного многоступенчатого насоса / Н.В.Гусин, А.И.Рабинович, О.М.Перельман и др. // Заявл. 10.06.2005; Опубл. 11.01.2005. Бюл.№16.

10. Гилев В.Г., Перельман М.О. Влияние конструктивных особенностей ступеней погружных насосов на работу пятиступенчатых сборок на газожидкостных смесях типа вода-воздух // Вестник ПГТУ. Проблемы современных материалов и технологий. Пермь, 2004. Вып. 10. С. 78-88.

11. Гилев В.Г., Рабинович А.И., Перельман М.О. Влияние конструктивных изменений на особенности работы ступеней погружных насосов в пятиступенчатых сборках на смесях вода-воздух // Труды международной научно-технической конференции «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» Россия. г. Санкт-Петербург, 7-9 июня 2005 г. С. 90- 95.