



К вопросу о расчете и методе испытаний насосов на ГЖС

Метод расчета и требования к методике получения характеристики единичной ступени

В.Г. ГИЛЕВ,
к.т.н., инженер-исследователь,
инженерно-технический центр
Gilev@novomet.ru

А.И. РАБИНОВИЧ,
советник генерального
директора по новой технике

А.Е. КОБЯКОВ,
инженер-исследователь,
инженерно-технический центр
ЗАО «Новомет-Пермь»

Предложена методика расчета насоса при работе на ГЖС, основанная на некой характеристике ступени $H_{ст}-f(\beta, P)$, имеющей вид 3D поверхности в трехмерных координатах $H_{ст}, \beta, P$. Сформулированы требования к методике испытаний, обеспечивающие получение необходимой характеристики ступени.

ON THE ISSUE OF CALCULATION AND TEST METHOD FOR PUMPS AT WORK IN GAS-LIQUID MIXTURE

V. GILEV, A. RABINOVICH, A. KOBJAKOV
Novomet-Perm, CJSC

Calculation method of pump at work on gas-liquid mixture was suggested, which based on certain stage characteristic $H_{st}-f(\beta, P)$. This characteristic have the appearance of 3D surface in three-dimensional coordinates H_{st}, β, P . Requirements to test method are formulated, which ensure acquisition of required stage characteristic.

Key words: multistage submersible centrifugal pump, gas-liquid mixture

Исследования работы многоступенчатых центробежных насосов на ГЖС ведутся давно, однако до сих пор нет единого понимания вопроса [1 – 10]. Наиболее известны и считаются классическими работы Ляпкина П.Д. и его последователей [2 – 4, 6 – 9]. Исследованы основные факторы, влияющие на работу насоса на ГЖС: давление у входа в насос [3,6], пенность перекачиваемой среды [3,7], дисперсность ГЖС [3], особенности конструкции ступени [4].

В практике используются различные алгоритмы расчета характеристик ЭЦН на ГЖС. По нашему мнению, наиболее обоснованным является алгоритм, разработанный Дроздовым А.Н. [14], который использует все идеи, высказанные различными исследователями до него, уточненные по экспериментально полученным зависимостям. Алгоритм вошел в программу подбора УЭЦН к скважинам Novomet Sel-Pro.

В настоящей работе предлагается несколько иной подход к методам расчета и испытаний насосов, работающих на ГЖС. Метод расчета не охватывает всех перечисленных выше факторов, однако, по мнению авторов, может быть полезен для понимания работы насосов, по крайней мере, на модельных смесях.

Необходимо ввести понятие собственной характеристики ступени, по которой можно было бы рассчитать характеристику насоса при любых значениях таких факторов как: длина насоса, газосодержание и давление на входе в насос.

Такой характеристикой является зависимость напора, создаваемого ступенью от объемного газосодержания и давления на входе $H_{ст} = f(\beta, P)$ в широких диапазонах этих параметров. Трехмерную характеристику можно получить, снимая серию двумерных характеристик $H_{ст} = f(\beta)$ при разных давлениях на входе в испытываемую сборку.

Применение для съема двумерных характеристик $H_{ст} = f(\beta)$ при фиксированных давлениях сравнительно коротких сборок позволяет избежать ошибок из-за усредненности «средне-интегральных характеристик [9]», однако накладывает более строгие требования к методике испытаний, которая должна быть отличной от общепринятой.

Прежде всего, для получения достоверных результатов при снятии зависимостей $H_{ст} = f(\beta)$ в широком диапазоне газосодержаний, необходимо соблюдение следующих трех условий:

1. Обеспечение равномерной и дисперсной структуры ГЖС на входе в насос.



Для этого ГЖС типа вода-воздух и вода-воздух-ПАВ необходимо готовить прямо перед входом в первую ступень, вводя газ в воду через большое количество отверстий при небольшом перепаде давлений, что дает возможность уменьшить размер пузырьков газа. В случае горизонтального расположения насоса необходимо избегать расслоения ГЖС перед входом в насос, например за счет сужения сечения подводящего канала, или с помощью специальных пазов с отверстиями на дне, позволяющих увеличить уровень жидкости над отверстиями ввода газа.

При соблюдении этого условия при любом газосодержании на входе в насос любой длины газовые пробки внутри насоса не образуются, а при соблюдении еще двух условий, о которых речь будет впереди, не будет срыва подачи, а величина $H_{ст} = f(\beta)$ будет положительной, хотя и малой при больших газосодержаниях.

Чтобы проиллюстрировать первое условие, приводим данные эксперимента, (рис. 1). На рис. 1б показано, что в узле 1 для предотвращения расслоения ГЖС, отверстия ввода газа выполнены в нижнем секторе, при любых условиях покрываемом водой. Но, если жидкость подается с малой скоростью, то такие меры недостаточны, поскольку толщина слоя воды над отверстиями и скорость движения воды будут малы, что приведет к расслоению ГЖС перед входом в ступень. В узле ввода 2 (рис. 1в) снижена площадь сечения подводящего канала, а также добавлен паз с нижней стороны, имеющий отверстия ввода газа на дне. Это позволило подводить к первой ступени газ и воду в виде ГЖС даже при малых расходах жидкости.

Поэтому если при использовании первого узла ввода (рис. 1б) кривая $H_{ст} - f(\beta)$ построена до $\beta = 5\%$, то при использовании узла ввода 2 (рис. 1в), диапазон измерения увеличился до $\beta = 35\%$.

2. Устранение срыва подачи насоса во время испытаний с помощью регулирования потребного напора гидравлической системы стенда (отсутствие перегрузки).

Под перегрузкой понимается превышение потребного напора системы $H_{с}^{*1}$, над напором H , который может создать насос в данных условиях испытания, то есть напор насоса должен быть больше или равен потребному напору системы, в которой работает насос.

$$H \geq H_{с}^{*} \quad (1)$$

Это общеизвестное условие работы насоса [10,16]. Другими словами, можно сказать, что насос в процессе снятия кривой $H_{ст} - f(\beta)$ не должен быть перегружен, что даст возможность промерить его свойства в более широком диапазоне β .

В связи с тем, что с возрастанием объемного газосодержания на входе в насос создаваемый насосом напор уменьшается, методика испытаний должна предусматривать снижение потребного напора гидравлической системы стенда при повышении газосодержания на входе в насос. Напомним, что потребный напор

состоит из двух составляющих: статической и динамической [15].

$$H_{с} = h_{ст} + h_{дин} \quad (2)$$

Согласно нашей методике потребный напор снижается уменьшением $h_{ст}$.

При испытании на воде

$$h_{ст} = H_{вых} - H_{вх}, \quad (3)$$

где $H_{вх}$, $H_{вых}$ – высота столба воды на входе и выходе из насоса.

В случае испытания на ГЖС $H_{вых}$ заменяется интегралом [12,13]:

$$h_{ст} = \frac{1}{\rho_{г}g} \int_0^{H_{вх}} \rho_h g \Delta h - H_{вх}, \quad (4)$$

где ρ_h – плотность ГЖС на высоте h .

А при использовании бустерного насоса на входе в насос $H_{вх}$ в (4) заменяется на высоту столба жидкости, создающего давление эквивалентное $P_{вх}$:

$$h_{ст} = \frac{1}{\rho_{г}g} \int_0^{H_{вх}} \rho_h g \Delta h - \frac{P_{вх}}{\rho_{г}g}, \quad (5)$$

При использовании бустерного насоса на входе в насос и отсутствии столба ГЖС на выходе из насоса

$$h_{ст} = - \frac{P_{вых} - P_{вх}}{\rho_{г}g}. \quad (6)$$

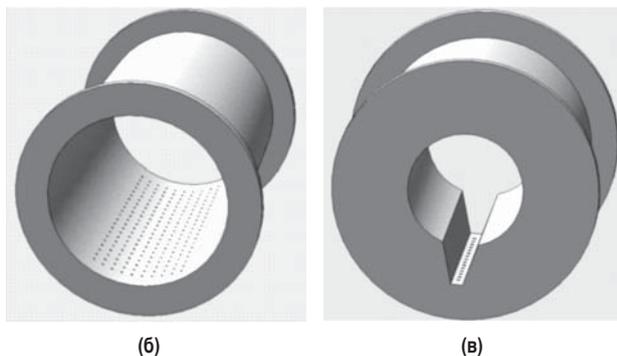
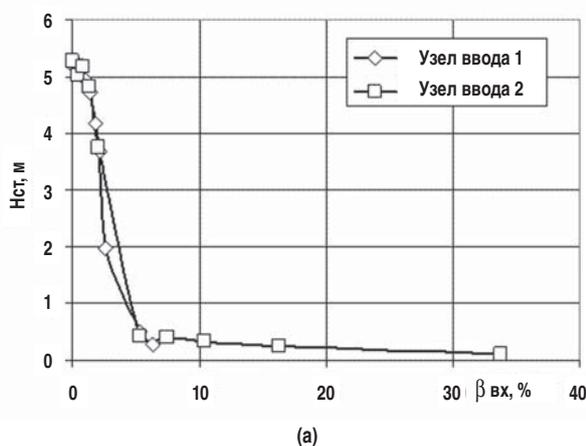


Рис. 1. а – Результаты измерений на сборке из пяти ступеней 1ВННП5-15 при $Q_{ж,нач} = 15,4 \text{ м}^3/\text{сут}$ с двумя узлами ввода газа (узлами подготовки ГЖС). Испытание на смеси вода-воздух; б – вид узла 1; в – вид узла 2

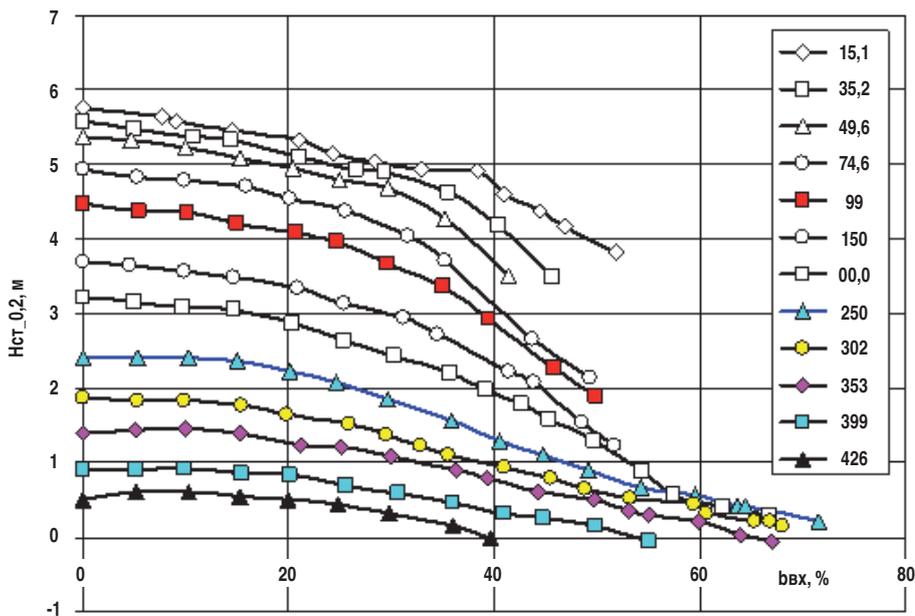


Рис. 2. Зависимости напора на одну ступень от газосодержания на входе сборки из 22 ступеней МФОН5-200 производства ЗАО «Новомет-Пермь». Испытание проведено с ПАВ при $P_{вх} = 3$ атм. В рамке справа приведены значения $Q_{ж.нвч}$ в $m^3/сут$, которые характеризуют положение крана задвижки для каждой кривой. Испытание на смеси вода-воздух-ПАВ

Динамическая или иначе скоростная составляющая потребного напора:

$$h_{дин} = kQ^2 \quad (7)$$

В наиболее простых вариантах методики снижения $h_{ст}$ можно добиться уменьшением высоты столба ГЖС на выходе из насоса.

3. Обеспечение необходимой величины потребного напора гидравлической системы стенда (отсутствие недогрузки насоса во время испытаний).

Под недогрузкой насоса понимается ситуация, при которой потребный напор системы, в которой работает насос, H_C меньше чем напор, который может создать насос при заданных $\beta_{вх}$, P , и дисперсности ГЖС. Если такая ситуация возникает на испытательном стенде, то измеряемый на стенде напор насоса $H_{и}$ будет меньше некоего потенциального напора насоса $H_{п}$ $H_{и} < H_{п}$.

Это следствие фундаментального закона, выраженного уравнением $H = H_C$. Если мы искусственно занижаем величину H_C , то, как следствие получаем заниженную величину измеряемого напора $H_{и} < H_{п}$. В крайней ситуации, если мы искусственно задаем отрицательную величину H_C , то и получаем отрицательную величину измеряемого напора $H_{и}$ при отсутствии срыва подачи.

Наша же цель – определить величину $H_{п}^{*2}$. Для этого необходима система подстройки H_C до уровня $H_{п}$ при каждом измерении. Совершенно недостаточно использования крана-задвижки в качестве гидравлического сопротивления и основной составляющей $h_{дин}$. Требуется еще возможность регулирования статической составляющей $h_{ст}$, т. к. характер изменений $H_{п}$ и H_C ($h_{дин}$) с изменением β может быть разным, хотя обе величины с ростом β уменьшаются. Излишне быстрое падение $h_{дин}$ нужно компенсировать положительным значением статической

составляющей $h_{ст}$, величину которой необходимо регулировать.

С одной стороны, величину статической составляющей потребного напора $h_{ст}$ по мере увеличения β требуется уменьшать, чтобы не было перегрузки, а с другой стороны, испытания должны проходить в условиях, не сильно удаленных от условий, близких к срыву подачи.

О роли $h_{ст}$ говорится в работе [13], где утверждается, что недостаток статической составляющей нагрузки во время испытаний приводит к искажению результатов. В крайнем проявлении недостаток $h_{ст}$ – это отрицательные значения этой величины.

Кстати, отрицательная величина $h_{ст}$ типична при проведении испытаний с использованием бустерного насоса для повышения давления на входе, потому что обычно никаких мер по увеличению $h_{ст}$ не предпринимается. В этом случае значение $h_{ст}$ становится отрицательным. Величина $H_C = h_{ст} + h_{дин}$ также может приобрести отрицательное значение при стремлении $h_{дин}$ к нулю

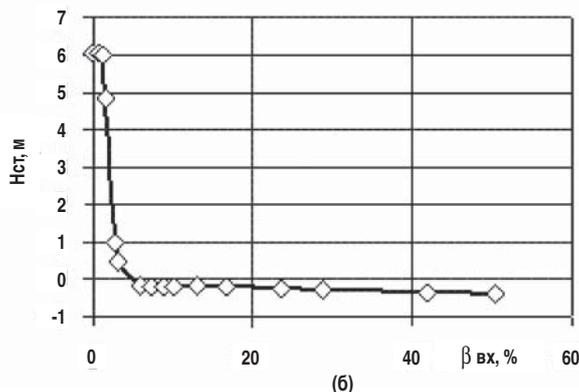
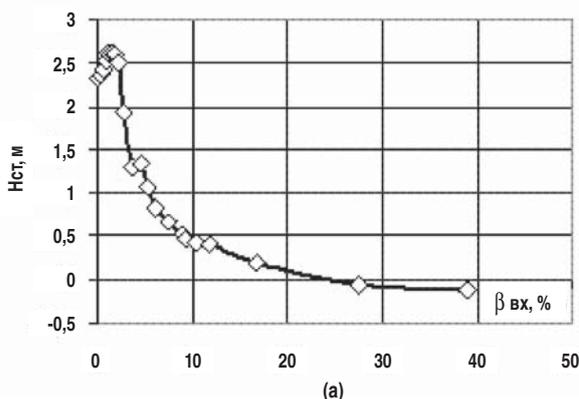


Рис. 3. Зависимости напора на одну ступень от газосодержания на входе в пятиступенчатых сборках ступеней: а – 1ВННП5-15 при $Q_{ж.нвч} = 25,5 m^3/сут$; б – 2ВННП5-44 при $Q_{ж.нвч} = 12,5 m^3/сут$ при $h_{ст} \approx -1$ м. Испытание на смеси вода-воздух

*2 В принципе нельзя исключать в качестве цели исследование работы насоса в недогруженном состоянии, т. к. это скорее всего типичное состояние, но в качестве параметра насоса при заданных $\beta_{вх}$, P , и дисперсности ГЖС, очевидно, надо брать величину $H_{п}$.



при увеличении β , что имеет место на коротких сборках и сборках длиной порядка 20 – 30 ступеней. Эта ошибка проявляется тем сильнее, чем короче сборка испытуемого насоса, т. к. величина $h_{\text{дин}}$ определяется газосодержанием в ГЖС на выходе из насоса.

В качестве примера приведем результат испытания сборки из 22 ступеней МФОН5-200 производства ЗАО Новомет-Пермь с ПАВ (рис. 2). Испытания проводились на стенде [5] с избыточным давлением на входе $P_{\text{вх}} = 3$ атм. Кривые зависимости напора от газосодержания при трех положениях задвижки (полностью открытой и двух близких к нему положениях) переходят в область отрицательных значений. Срыва подачи при этом не происходит. Учитывая, что на выходе из насоса не было столба ГЖС, в этом случае $h_{\text{ст}} = -30$ м, согласно уравнению (5).

Если дляборок средней длины ($N = 20 - 30$) отрицательных величин измеряемых значений напора не принято замечать, т. к. это проявляется только в крайних положениях задвижки, то для пятиступенчатыхборок центробежно вихревых ступеней 1ВННП5-15 и 1ВННП5-44 при достаточно малой отрицательной величине $h_{\text{ст}} \sim -1$ м это явление проявляется во всем интервале $Q_{\text{ж.нач}}$ при значительно меньших значениях газосодержания на входе в насос (рис. 3). Приведенные на рис. 3 данные получены на 5-ти ступенчатых сборках, замеры давлений вели между 2-ой и 5-ой ступенями, избыточное давление на входе в сборку было порядка 1 м водяного столба, на выходе из насоса столба ГЖС не было. Напор указан в метрах водяного столба.

Возникает вопрос, почему это явление так хорошо проявляется на коротких сборках и менее заметно на более длинных. Это следствие того, что в длинных сборках успевает пройти сжатие газа и газосодержание на выходе значительно меньше, чем на входе, поэтому $h_{\text{дин}}$ превышает отрицательную $h_{\text{ст}}$, и $H_{\text{с}}$ остается положительной величиной до больших значений $\beta_{\text{вх}}$ и $Q_{\text{ж.нач}}$.

Обратим еще раз внимание на рис. 3б, на котором в диапазоне 5 – 50% измеренные величины напора на одну ступень имеют отрицательные значения.

Наличие подобной ситуации отмечается, но не обсуждается в работе [9].

По нашему мнению, отрицательные значения измеряемого напора (рис. 3), можно считать методической ошибкой – следствием отрицательности величины $h_{\text{ст}}$ и соответственно отрицательности величины $H_{\text{с}}$ в этом диапазоне газосодержаний. При правильном выборе $h_{\text{ст}}$ (этот параметр должен быть положительным и небольшим по величине) эта кривая пойдет выше нулевой линии.

В том случае, когда перечисленные три условия выполняются, характеристика типичной ступени центробежного или центробежно-вихревого насоса при $P_{\text{вх}} = 1$ атм приобретает вид, представленный на рис. 4. Срыва не происходит в широком диапазоне газосодержаний, а напор ступени остается положительным, хотя и малым по величине. На рис. 4 приведена зависимость напора, создаваемого 4-ой ступенью в пятиступенчатой сборке, от газосодержания на входе в сборку.

Подобные кривые $H_{\text{ст}} = f(\beta_{\text{вх}})$ (рис. 4) получены на коротких сборках с давлением у входа, близким к атмосферному, т. е. их можно считать сечениями трехмерной

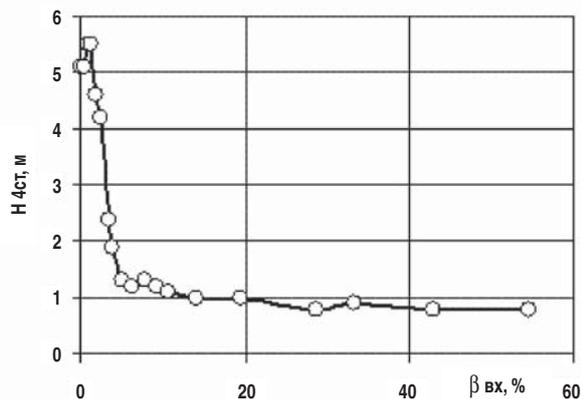


Рис. 4. Зависимость напора, создаваемого четвертой ступенью в 5-ти ступенчатой сборке 1ВННП5-15 при $Q_{\text{ж.нач}} = 19,2 \text{ м}^3/\text{сут}$ от газосодержания на входе в сборку

поверхности $H_{\text{ст}} = f(\beta, P)$ плоскостью $P = 1$ атм. В принципе аналогичные сечения могут быть получены и при других значениях P , если будут соблюдены вышеприведенные требования к методике. Этого будет достаточно для определения функции $H_{\text{ст}} = f(\beta, P)$ необходимой для расчета работы длинныхборок (обсуждение влияния размера пузырьков мы опускаем, ограничиваясь требованием дисперсности ГЖС на входе в насос, чтобы не увеличивать объем статьи).

Конкретно методика испытаний в данной статье не рассматривается. Однако следует отметить, что она должна обеспечивать регулируемое абсолютное внутреннее давление в испытуемой сборке при достаточном малом и в свою очередь регулируемом перепаде давления между $P_{\text{вх}}$ и $P_{\text{вых}}$.

Расчет имеет пошаговый характер. На каждом шаге из значений β , P и значения $H_{\text{ст}} = f(\beta, P)$ для данных β , P на входе в одну из ступеней определяются эти же параметры на входе в следующую ступень. Ограничимся рассмотрением расчета обычных цилиндрических насосов, состоящих из одинаковых ступеней.

Идея расчета и сами расчеты просты. Каждая ступень повышает давление, при этом уменьшается объем газа, напор насоса равен сумме напоров ступеней.

Предполагаем, что расчеты верны при следующих допущениях.

- выполнены три вышеуказанных условия. В результате напор $H_{\text{ст}} = f(\beta_{\text{вх}})_P$ в диапазоне β вплоть до 80 – 90% положителен;

- напор насоса – простая сумма напоров, создаваемых отдельными ступенями. Срыв происходит только из-за невыполнения условия $\sum_1^N H_n \geq H_{\text{с}}$;

- различия в результатах, получаемых на длинных и коротких сборках, обусловлены в основном влиянием давления, величина которого достигаемая в насосе, зависит от длины насоса. При этом мы допускаем, что влияние давления полностью учитывается в исходных трехмерных функциях $H_{\text{ст}} = f(\beta, P)$, используемых для расчета.

В основе расчетов лежит закон Бойля – Мариотта: $pV = \text{const}$.

На каждом шаге счета высчитывается давление P_n на входе в ступень n по величине P_{n-1} и величине $H_{\text{ст}}$ при данном текущем газосодержании на входе в ступень и данным давлении

$$P_n = P_{n-1} + H_{\text{ст}} \quad (8)$$

На входе в ступень n-1 газосодержание β_{n-1} . Соответственно, в единице объема ГЖС на входе $V_{Г1} = \beta_{n-1}$ и $V_B = 1 - \beta_{n-1}$. Затем считаются эти же величины на выходе из этой ступени, и соответственно на входе в ступень n.

Объем газа на выходе ступени n-1 в соответствии с законом $pV = \text{const}$ будет равен

$$V_{Г2} = P_{n-1} * \beta_{n-1} / P_n \quad (9)$$

Объем воды не изменяется, поэтому сумма объемов воды и газа на выходе составит

$$V_{Г2} + 1 - \beta_{n-1} \quad (10)$$

Газосодержание на выходе ступени n-1 и входе в ступень n

$$\beta_n = (P_{n-1} * \beta_{n-1} / P_n) / (P_{n-1} * \beta_{n-1} / P_n + 1 - \beta_{n-1}) \quad (11)$$

Далее цикл счета повторяется, в нем используется новое значение функции $H_{\text{ст}} = f(\beta, P)$, соответствующее новому значению газосодержания β_n и новому значению давления P_n .

В результате достаточно указать функцию $H_{\text{ст}} = f(\beta, P)$, например, полученную из серии кривых $H_{\text{ст}} = f(\beta)$ при разных P , указать $\beta_{\text{вх}}$ и $P_{\text{вх}}$ и число ступеней N . В итоге мы получаем напор, создаваемый всей сборкой, а также распределение давления и газосодержания по длине сборки. Можно также определить распределение создаваемых отдельными ступенями напоров, плотности ГЖС и т. п.

Следует отметить, что подобным методом можно обсчитывать и результаты испытаний длинныхборок, с замерами давления по длине насоса, т. е. получить все вышеуказанное из графика распределения давления по длине насоса $P = f(N)$. Это будет содержанием второй статьи [17].

Таким образом, предложен метод расчета длинныхборок простым сложением напоров отдельных ступеней, с использованием некоей характеристической функции напора ступени от двух основных параметров – газосодержания и давления $H_{\text{ст}} = f(\beta, P)$. Для его осуществления необходимо более широкое варьирование параметра β в ходе испытаний, для чего предложено варьировать величину статической составляющей потребного напора стенда в процессе измерений.

Разработанный в работе метод расчета работы насосов на ГЖС в перспективе позволяет надеяться на более строго обоснованный подбор насоса к скважинам.

Авторы благодарны Ш.Р.Агееву за конструктивный диалог по обсуждаемым в статье проблемам.

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. Технология и техника добычи нефти погружными насосами в осложненных условиях. М.: МАКС пресс., 2008. 312 с.

4. 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.

5. Пещеренко С.Н., Долгих А.В. Области применения мультифазных насосов и газосепараторов // Нефтегазовая вертикаль. 2010. №11. С. 64 – 67.

6. Дроздов А.Н. Влияние давления на образование каверны в потоке газожидкостной смеси за моделью лопасти центробежного насоса // Бурение и нефть. 2010. №2. С. 20 – 23.

7. Дроздов А.Н. Закономерности работы многоступенчатого погружного центробежного насоса на газожидкостных смесях с низкой и высокой пенистостью // Территория нефтегаз. 2009 г. № 6. С. 86 – 89.

8. Дроздов А.Н., Сафиева Р.З., Филатов В.М. Пенистость нефти как важный фактор влияния свободного газа на характеристики погружного центробежного насоса // Территория нефтегаз. 2008 г. № 6. С. 104 – 109.

9. Дроздов А.Н., Сальманов Р.Г. Характеристики погружных лопастных насосов при откачке газожидкостных смесей // Территория нефтегаз. 2009. №2. С. 36 – 40.

10. Муравьев И.М., Мищенко И.Т. Эксплуатация погружных центробежных электронасосов в вязких жидкостях и газожидкостных смесях. М.: Недра. 1969. 248 с.

11. Гилев В.Г., Рабинович А.И. Особенности работы ступеней погружных насосов на смесях вода-воздух // Нефтепромысловое дело. 2006. №9. С. 40 – 48.

12. Гилев В.Г., Рабинович А.И. Исследование распределения давлений в коротких сборках погружных насосов при работе на смесях вода-воздух // Нефтепромысловое дело. 2008. №6. С. 56 – 62.

13. Гилев В.Г., Рабинович А.И., Агеев Ш.Р. Методика оценки параметров многоступенчатых погружных насосов на единичной ступени // Нефтепромысловое дело. 2009. №2. С. 36 – 41.

14. Дроздов А.Н. Разработка, исследование и результаты промышленного использования погружных насосно-эжекторных систем для добычи нефти: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.06. М., 1998. 423 с.

15. Яременко О.В. Испытания насосов. Справочное пособие. М.: Машиностроение. 1976. 225 с.

16. Гусин Н.В. Лопастные насосы: учебн. пособие. Часть I. Общие сведения и основы теории / Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 1995. 169 с.

17. Гилев В.Г., Рабинович А.И., Ивашов А.А. К вопросу о расчете и методе испытаний насосов на ГЖС. Ч.2. Применение метода расчета к обработке данных по распределению давления в длинных сборках. ■

Ключевые слова: многоступенчатый погружной центробежный насос, газожидкостная смесь, потребный напор