



Влияние вязкости на рабочие характеристики центробежных насосов



С. АБАХРИ,
инженер-исследователь
инженерно-технического
центра департамента
инновационных разработок

М. О. ПЕРЕЛЬМАН,
директор департамента
внешнеэкономической
деятельности

С.Н. ПЕЩЕРЕНКО,
начальник инженерно-
технического центра
департамента инновационных
разработок д.ф.-м.н.
PSN@novomet.ru

А.И. РАБИНОВИЧ
советник генерального
директора по новой технике
ЗАО «Новомет-Пермь»

Обычно рабочие характеристики погружных насосов на высоковязкой жидкости рассчитывают по его характеристикам на воде, используя эмпирические зависимости, установленные более 50 лет назад. Ошибка такого расчета составляет 10 – 25% и обусловлена изменением конструкции насосов за это время. Нами проведены прямые измерения рабочих характеристик серийных насосных ступеней ЗАО «Новомет-Пермь» 3, 4, 5 и 5А габаритов с номинальными подачами до 300 м³/сут в диапазоне вязкостей 10 – 400 сСт. Погрешность измерений напора, подачи и мощности составила 5%. Предложена методика подбора насоса для скважин с высоковязкой нефтью.



INFLUENCE OF VISCOSITY ON CENTRIFUGAL PUMPS' WORKING CHARACTERISTICS

S. ABAKHRI, M. PERELMAN, S. PESHCHERENKO, A. RABINOVICH, Novomet-Perm, CJSC

The authors conducted direct measurements of working characteristics of series' pump stages of Novometperm CSC. 5% was measuring error of thrust, supply & power. There are proposed methods to choose a pump for wells with high-viscous oil.

Key words: Novometperm CSC, centrifugal pumps, working characteristics, wells with high-viscous oil

Введение

Вопрос влияния вязкости жидкости на рабочие характеристики центробежного насоса находился в центре внимания в течение многих десятилетий. С каждым годом запасы легко добываемой мало-вязкой нефти сокращаются и все более актуальной становится задача добычи вязкой нефти. Во многих случаях ее добыча возможна серийными центробежными насосами, однако при их подборе к скважине следует учитывать влияние вязкости на рабочие характеристики.

В настоящее время для прогнозирования рабочих характеристик насосов, перекачивающих вязкие жидкости, приме-

няются две группы моделей: эмпирические и вычислительные.

Эмпирические методы позволяют получить характеристики насоса перекачивающего вязкую жидкость на основании пересчета с характеристик на воде, по безразмерным параметрам и поправочным коэффициентам, полученным из экспериментов на высоковязких жидкостях. Зачастую такие методы дают приемлемые результаты, только когда насос работает в точке оптимальной эффективности, что является сильным ограничением в случае, когда центробежный насос используется для подъема жидкости из нефтяной скважины. Это происходит, пото-

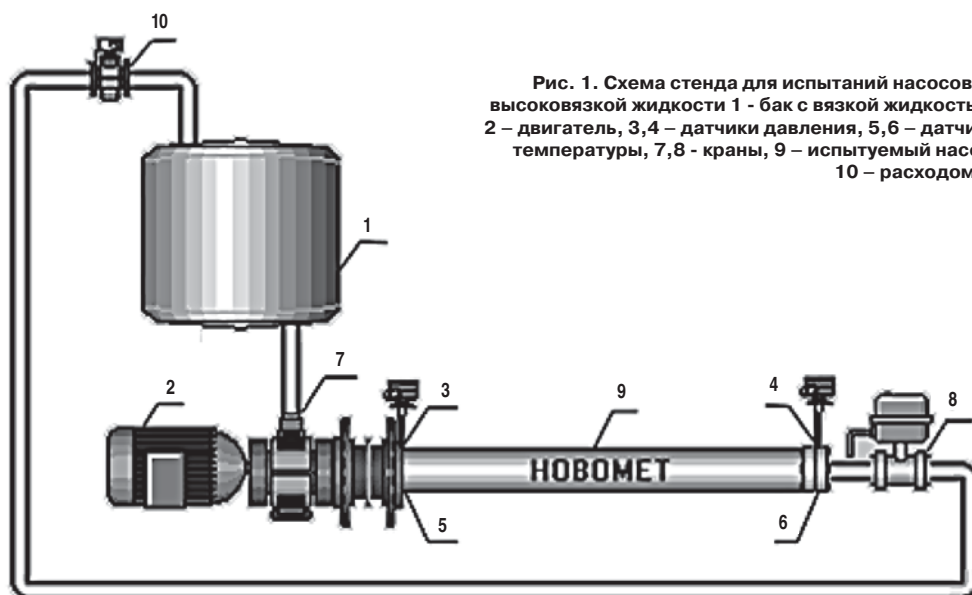


Рис. 1. Схема стенда для испытаний насосов на высоковязкой жидкости 1 - бак с вязкой жидкостью, 2 – двигатель, 3,4 – датчики давления, 5,6 – датчики температуры, 7,8 - краны, 9 – испытуемый насос, 10 – расходомер

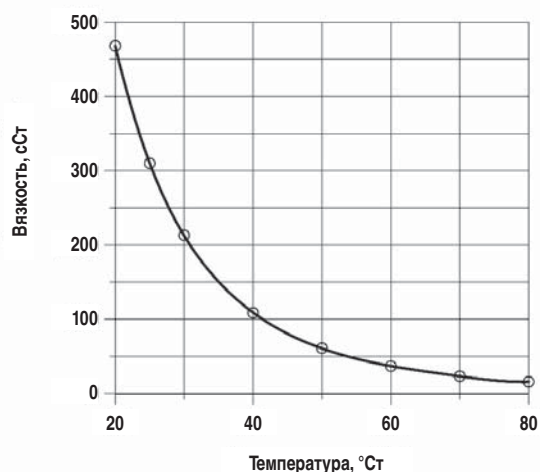


Рис. 2. Зависимость вязкости модельной жидкости от температуры

му что поправочные коэффициенты проходили для модельных насосов, а не тех, к которым в дальнейшем применяется этот метод. Преимущество данного метода заключается в быстром определении характеристик, если имеются данные по испытаниям на воде аналогичных насосов.

Один из эмпирических методов был предложен Л.И. Степановым [1] для центробежных насосов. Другой был предложен институтом гидравлики, США [2], где насосы различных размеров испытывались в широком диапазоне расхода и напора для вязкостей жидкости между 1 сСт и 3600 сСт.

Процедура Й.Ф. Гулича [3] опирается на оценку вязких потерь внутри насоса.

По данным Й.Ф. Гулича и В.Г. Ли [4] институт гидравлики проводил испытания в узких пределах быстроходности насоса, не свойственных нефтяным насосам. В.Г. Ли собрал данные по работе стандартного насоса API на воде и нефти с вязкостью от 1 до 200 сСт. Его поправочные коэффициенты расходились с коэффициентами института гидравлики на 10% для напора, 5% для подачи и 9,7% для КПД.

В докладе [5], представленном на ежегодной выставке-конференции общества инженеров нефтяников США в 2007 г., говорится, что подобные методики получения поправочных коэффициентов могут быть некорректны, в случае насосов, отличных от модельных.

Советский ученый П.Д. Ляпков [6] предложил свою методику, которая основана на экспериментальных данных испытаний погружных насосов на вязкой жидкости. В ней предложены коэффициенты пересчета напора и КПД для разных подач, зависящие от вязкости жидкости. Многие отечественные нефтяные компании используют способы пересчета, основанные именно на методике П.Д. Ляпкина.

Вычислительные модели используют вычислительную гидродинамику (computational fluid dynamics, CFD) для расчета потока внутри каналов насоса и определения влияния вязкости на конечную характеристику. Их основные недостатки: они трудоемкие, занимают много времени, используют эмпирические модели турбулентности, протестированные для условий сильно отличающихся от исследуемых и поэтому зачастую не дают верных прогнозов характеристик.

Понятно, что предпочтительнее выбирать эмпирическую модель, т. к. ее точность и применимость много выше, чем у вычислительной. Как показано выше, результаты эмпирических методик зависят от конструкции насосов и условий испытаний, и могут сильно отличаться друг от друга. Конструкции нефтяных насосов постоянно совершенствуются: появляются новые технологии производства ступеней, например порошковая [7], или новые, центробежно-вихревые и энергоэффективные ступени [8]. Поэтому не корректно применять к современным центробежным насосам обобщенные методики, разработанные несколько лет, а иногда и десятиков лет назад. Для точного пересчета характеристики погружного насоса с воды на вязкую жидкость необходимо экспериментально определить зависимость изменения его рабочих характеристик от вязкости жидкости. Появление компьютеризированных стендов с точными электронными датчиками позволяет снять реальные параметры ступеней намного быстрее и точнее, чем получить с помощью CFD расчета.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ИСПЫТАНИЯ

Для прямого определения характеристик погружных нефтяных центробежных насосов при работе на высоковязкой жидкости разработан стенд, схема которого представлена на рис. 1. Давление на входе в насос поддерживается за счет уровня жидкости в баке 1 на уровне 0,1 атм. Диаметр подводящего трубопровода 60 мм для предотвращения кавитационного срыва подачи. В качестве рабочей жидкости используется раствор глицерина в воде. Вязкость рабочей жидкости можно задавать в пределах от 1 до 1000 сСт за счет системы термостатирования (в пределах 20 – 55°C), находящейся в баке 1, и изменения концентрации глицерина. Температура жидкости на входе в насос выдерживается с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$. Нагрев жидкости при прохождении через насос 9, состоящий из 3 – 7 ступеней, не превышает 3 – 4 °С. На рис. 2 приведена типичная зависимость вязкости модельной жидкости от температуры, при содержании 95% глицерина и 5% воды. Расход жидкости измерялся расходомером объемного типа с диапазоном подач 60 – 600 м³/ч, диапазон вязкости измеряемой вязкости 1,1 – 6 сСт. Для корректирования показаний расходомера при других подачах и вязкости перекачиваемой жидкости была произведена проверка при помощи мерной емкости. Установлено, что в диапазоне подач 0 – 400 м³/сут и вязкости перекачиваемой жидкости от 1 до 400 сСт показания погрешность расходомера составляет

Табл. 1. Перечень ступеней, испытанных на высоковязкой жидкости (указана номинальная подача, м³/сут)

Габарит:	3	4	5	5A
Центробежные радиальные ступени	80	30, 50, 80, 200	-	200, 225
Центробежно-вихревые ступени	40	-	15, 20, 25, 30, 44, 59, 80, 100, 125	25, 34, 35, 50, 100, 124, 159, 199
Диагональные ступени	-	-	200	320
Парциальные ступени	-	-	-	25

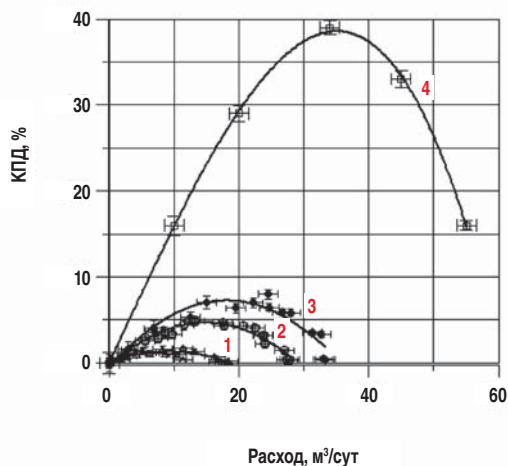


Рис. 3. Зависимость КПД от подачи ступени ВНН 5А-34 при разных вязкостях: 1 – 130 сСт, 2 – 55 сСт, 3 – 40 сСт, 4 – 1 сСт

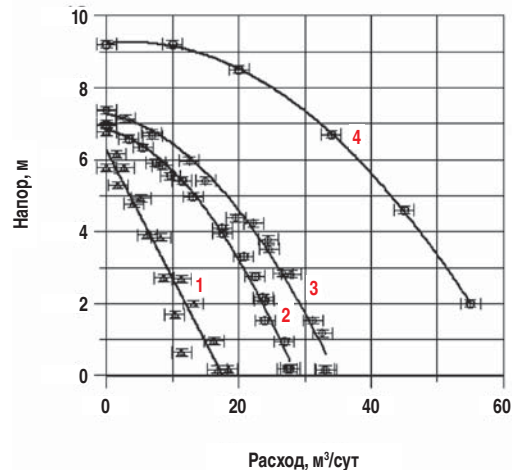


Рис. 4. Зависимость напора от подачи ступени ВНН 5А-34 при разных вязкостях: 1 – 130 сСт, 2 – 55 сСт, 3 – 40 сСт, 4 – 1 сСт

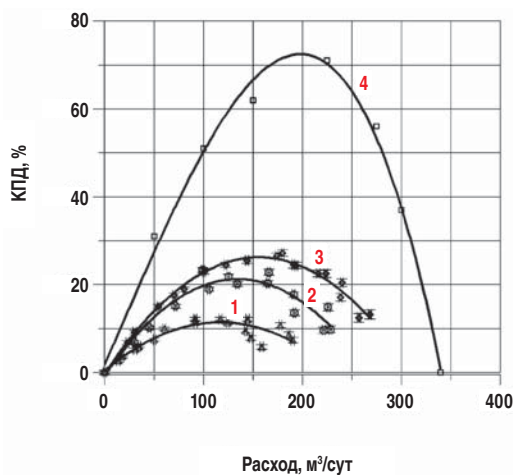


Рис. 5. Зависимость КПД от подачи ступени ЭЦН 5А-225 при разных вязкостях: 1 – 130 сСт, 2 – 55 сСт, 3 – 40 сСт, 4 – 1 сСт

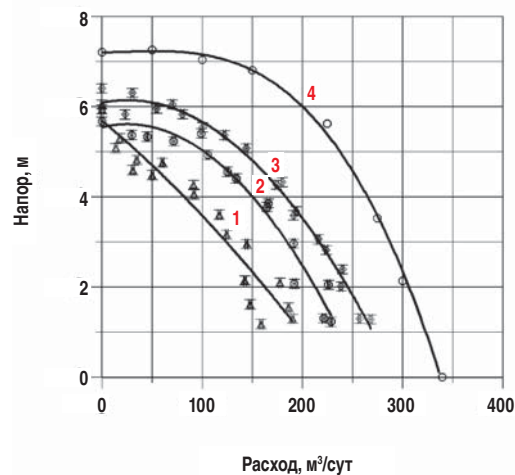


Рис. 6. Зависимость напора от подачи ступени ЭЦН 5А-225 при разных вязкостях: 1 – 130 сСт, 2 – 55 сСт, 3 – 40 сСт, 4 – 1 сСт

около 3 – 5%. Частота вращения вала насоса – 2910 об/мин. Момент на валу насоса измерялся моментной муфтой класса точности 0,1.

Давление, создаваемое насосом, регистрировалось с помощью датчиков давления, установленных до и после насосной сборки (рис. 1, поз. 3, 4). Данный метод сравнивался с методом снятия давления непосредственно в ступени, через отверстие в стенке направляющего аппарата, и данные напора на ступень совпали.

В ходе работы испытаны серийные ступени производства ЗАО «Новомет-Пермь». Перечень приведен в табл. 1.

В ходе экспериментов установлены общие закономерности для некоторых типов ступеней, в частности, падение КПД ступеней сильнее с уменьшением быстроходности, что согласуется с результатами [1]. К примеру, при увеличении вязкости от 1 до 40 сСт КПД ступени ВНН 5А-34 понизился в 5 раз (рис. 3), в то время как КПД ступени ЭЦН 5А-225 снизился лишь в 2,7 раз (рис. 5).

Установлено, что вязкость не оказывает влияние на вихревой эффект в центробежно-вихревых ступенях погружных насосов рассчитанных на малые и

средние подачи. Испытаны ступени с номинальными подачами 25, 79 и 125 м³/сут с вихревым венцом и без. Характеристики соответствующих ступеней совпали. Отличие в характеристиках сопоставимо с погрешностью измерений.

В целом, общих закономерностей по изменению напорно-расходных характеристик для всех типов испытанных погружных насосов не прослеживается (рис. 4, 6).

На рис. 7 – 8 приведено сравнение полученных результатов с расчетом по методике [5]. В рабочей зоне ступени расчет по [5] приводит к ошибке на 10 – 25%. На практике это приведет к аварийному срыву подачи и подъему установки.

В результате экспериментов выведены полиномиальные зависимости характеристик каждой насосной ступени от вязкости жидкости, что позволяет оценить рабочие параметры ступеней погружных насосов, такие как развиваемый напор, подача и потребляемая мощность, при перекачке пластовой жидкости в широком диапазоне вязкостей (от 1 до 400 сСт). Подтверждено, что законы подобия сохраняют силу при перекачке жидкостей любой вязкости, но с меньшей степенью точности, чем для воды [1]. При увеличении числа оборотов потребляемая мощность увеличива-

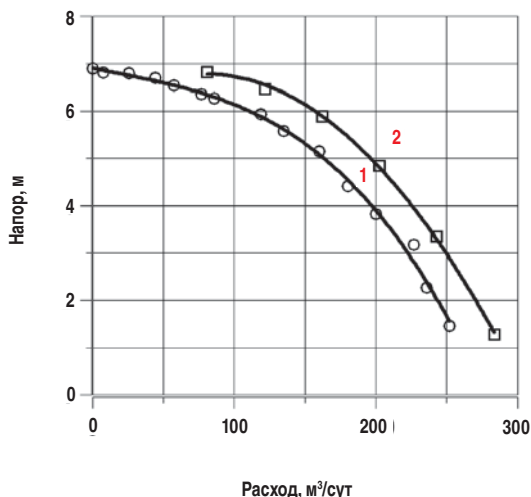


Рис. 7. Зависимость напора от подачи ступени ЭЦН 5А-225: 1 – 40 сСт, эксперимент; 2 – 40 сСт, пересчет по методике [5]

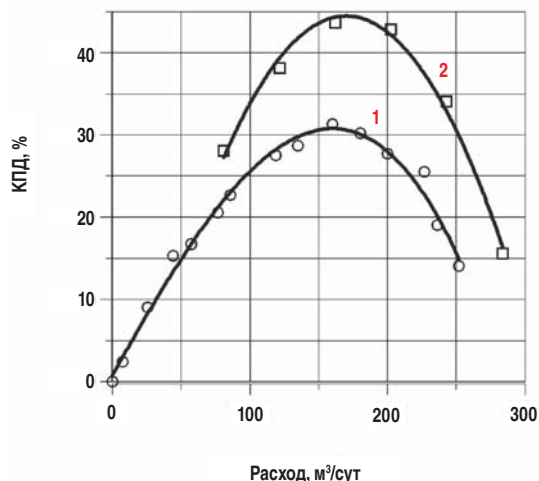


Рис. 8. Зависимость КПД от подачи ступени ЭЦН 5А-225: 1 – 40 сСт, эксперимент; 2 – 40 сСт, пересчет по методике [5]

ется меньше, чем по кубу числа оборотов, а напор увеличивается больше, чем по квадрату.

Также подтверждено, что с увеличением вязкости ее вредное влияние ослабевает, в том смысле, что при увеличении вязкости от 1 до 20 сСт характеристики упадут сильнее, чем при увеличении от 20 до 40 сСт.

МЕТОДИКА УЧЕТА ВЯЗКОСТИ ПРИ ПОДБОРЕ УЭЦН К СКВАЖИНЕ

При добыче нефть нагревается в насосе, ее вязкость падает, поэтому рабочие характеристики одинаковых ступеней изменяются по длине насоса. Для определения суммарного напора и энергопотребления всей насосной установки необходимо произвести расчет рабочих характеристик каждой ступени.

Входными параметрами для расчета являются:

- характеристики центробежных ступеней, полученные из испытаний на высоковязкой жидкости, представленные в виде зависимостей $N = f(Q, v, m)$, $N = f(Q, v, m)$, где N – напор, Q – подача, v – вязкость перекачиваемой жидкости, N – мощность, приходящаяся на одну ступень, m – частота вращения вала насоса во время испытаний;

- зависимость вязкости пластовой жидкости v от температуры: $v = v(T)$;

- зависимость плотности пластовой жидкости ρ и теплоемкости C от температуры: $\rho = \rho(T)$, $C = C(T)$ (зависимость от температуры слабая: при $\Delta T = 40^\circ C$: $\Delta \rho / \rho = 0,02$, $\Delta C / C = 0,06$;

- температура пластовой жидкости T_1 на приеме насоса.

Порядок расчета параметров насоса с z ступенями, работающего на высоковязкой жидкости с частотой n :

1. Определяем вязкость жидкости в первой ступени:

$$v_1 = v(T_1), \quad (1)$$

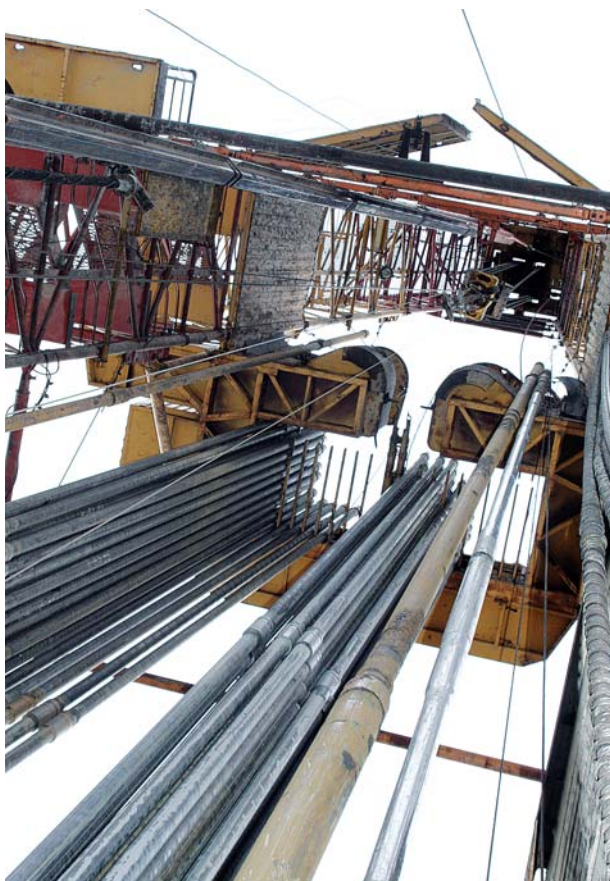
2. Определяем температуру жидкости в каждой ступени:

$$T_i = T_{i-1} + \frac{(1 - \eta_i(Q, v_{i-1})) \cdot N_i(Q, v_{i-1}, n)}{Q \cdot \rho \cdot C_i} \quad i = 2 \dots z, \quad (2)$$

где $\eta_i(Q, v_{i-1})$ – зависимость КПД ступени от подачи и вязкости жидкости, поступающей в ступень.

Табл. 2. Расчетные характеристики ступеней насоса ВНН5-25 при перекачке высоковязкой жидкости

	КПД, %	Напор, м	Мощность, кВт	Вязкость перекачиваемой жидкости, сСт
Первая ступень	0,3	0,7	0,559	212
Последняя ступень	12,2	4,0	0,067	23,6
Усреднение по насосу	5,3	2,8	0,108	63,67
На воде	28,0	5,4	0,032	1



Выражаем КПД через подачу и известные зависимости напора и мощности от подачи, вязкости, пересчитанные на частоту вращения вала УЭЦН:

$$\eta_i(Q, v_{i-1}) = \frac{g \cdot Q \cdot \left(\frac{n}{m}\right)^2 \cdot H_i\left(\frac{m}{n} Q, v_{i-1}\right) \cdot \rho}{\left(\frac{n}{m}\right)^3 \cdot N_i\left(\frac{m}{n} Q, v_{i-1}\right)} =$$

$$= \frac{g \cdot Q \cdot H_i\left(\frac{m}{n} Q, v_{i-1}\right) \cdot \rho}{\frac{n}{m} \cdot N_i\left(\frac{m}{n} Q, v_{i-1}\right)} \quad (3)$$

С учетом выражения (3) раскрываем уравнение (2):

$$T_i = T_{i-1} + \left(1 - \frac{g \cdot Q \cdot H_i\left(\frac{m}{n} Q, v_{i-1}\right) \cdot \rho}{\frac{n}{m} \cdot N_i\left(\frac{m}{n} Q, v_{i-1}\right)} \right) \cdot \left(\frac{n}{m}\right)^3 \cdot N_i\left(\frac{m}{n} Q, v_{i-1}\right) / Q \cdot \rho \cdot C_i \quad (4)$$

3. Рассчитываем вязкость жидкости в каждой ступени по известной зависимости

$$v_i = v(T_i), \quad (5)$$

4. Определяем суммарные характеристики всего насоса, с учетом напора и мощности каждой ступени:

$$H_{i \text{ суммарно}} = \sum_{i=1}^z \left(\frac{n}{m}\right)^2 H_i\left(\frac{m}{n} Q, v_{i-1}\right) \quad (6)$$

$$N_{i \text{ суммарно}} = \sum_{i=1}^z \left(\frac{n}{m}\right)^3 N_i\left(\frac{m}{n} Q, v_{i-1}\right) \quad (7)$$

$$\eta_{\text{насоса}} = \frac{g Q H_{\text{насоса}} \rho}{N_{\text{насоса}}} \quad (8)$$

В табл. 2 приведен пример расчета по приведенной методике характеристик насоса ВНН5-25, состоящего из 200 ступеней, работающего на глицерине

Табл. 3. Расчетные характеристики ступеней насоса ЭЦН5А-225 при перекачке высоковязкой жидкости

	КПД, %	Напор, м	Мощность, кВт	Вязкость перекачиваемой жидкости, сСт
Первая ступень	12	3,4	0,396	212
Последняя ступень	22	5,7	0,366	44
Усреднение по насосу	14	4,4	0,371	101
На воде	48	6,9	0,160	1

($\rho = 1250 \text{ кг/м}^3$), вязкостью 212 сСт, теплоемкостью 2430 Дж/(кг*К) и температуре 30°C при подаче 15 м³/сут. Развиваемый напор такого насоса составляет 550 м.

В табл. 3 приведен пример расчета по приведенной методике характеристик насоса ЭЦН5А-225, состоящего из 200 ступеней, работающего на глицерине ($\rho = 1250 \text{ кг/м}^3$), вязкостью 212 сСт, теплоемкостью 2430 Дж/(кг*К) и температуре 30°C при подаче 100 м³/сут. Развиваемый напор такого насоса составляет 880 м.

Согласно расчетным данным, потребляемые мощности и напоры, первой и последней ступени насоса могут различаться в несколько раз. Поэтому для объективной оценки работы погружного насоса на высоковязкой жидкости необходимо рассчитывать параметры работы в каждой ступени.

Выводы

В ходе данной работы разработан стенд и проведены замеры зависимостей напора и мощности ступеней нефтяных насосов от подачи при различной вязкости перекачиваемой жидкости из диапазона от 1 до 400 сСт. Предложена методика подбора ЭЦН к скважине, которая позволяет более точно определять необходимое количество ступеней и точку оптимальной работы насоса.

Литература

1. Степанов Л.И. Центробежные и осевые насосы – теория, конструирование и применение. Второе издание. Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, М.: 1960.
2. Hydraulic Institute, Standard for Effects of Liquid Viscosity on Rotodynamic (Centrifugal and Vertical) Pump Performance, 1983, USA.
3. Gulich J.F., Centrifugal pumps. Second Edition, Springer, 2010.
4. Li.V.G. Experimental Research of Technical Characteristic centrifugal pumps. World Pumps, 2002, №26.
5. Gilmar Amaral, Valdir Estevam, Petroleo Brasileiro and Fernando A. Franco, SPE, State University of Campinas, Influence of Viscosity on ESP Performance, 2007 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, California, 11 – 14 November.
6. Ляпков П.Д. О влиянии вязкости на характеристику погружных центробежных насосов. Труды ВНИИ, вып.41, М.: Недра, 1964.
7. Агеев Ш.Р., Григорян Е.Е., Макиенко Г.П. Российские установки лопастных насосов для добычи нефти и их применение. Энциклопедический справочник. Пермь: ООО «Пресс-Мастер», 2007. 645 с.
8. Якимов С. Основные направления деятельности по повышению энергоэффективности механизированной добычи // Инженерная практика. 2011. № 5. С. 45 – 48.
9. Каплан Л.С., Семенов А.В., Разгоняев Н.Ф. Эксплуатация осложненных скважин центробежными электронасосами, Москва. Недра. 1994.
10. Фукс Г.И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2003. 328 с. ■

Ключевые слова: ЗАО «Новомет-Пермь», центробежные насосы, рабочие характеристики, скважины с высоковязкой нефтью