

3. Sommer T. P., SO RM. C., Lai Y. G. A near-wall two-equation model for turbulent heat flux.
4. Vogel J. C., Eaton J. K. Combined Heat Transfer and Fluid Dynamic Measurements Downstream of a Backward-Facing Step // Journal of Heat Transfer. 1985. Vol. 107. P. 922–929.
5. Rodi W. The prediction of free turbulent boundary layers by use of a two-equation model of turbulence: Ph. D. Thesis, Imperial College London, 1972.

ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ КОНИЧЕСКОЙ СБОРКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЭЛЕКТРОНАСОСА ПРИ ПЕРЕКАЧКЕ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СМЕСИ

В. М. Конюхов¹, И. В. Конюхов¹, С. В. Краснов²

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет,
²НПЦ «Нефтегаз», г. Саров

Математическое и численное моделирование сложных процессов тепломассопереноса при течении многофазных сред в трубах добывающих скважин, оборудованных установками электроцентробежных насосов (УЭЦН), является одним из наиболее эффективных и экономичных способов исследования режимов работы механизированного подъемника, оптимизации и подбора подземного оборудования. При этом необходимо учитывать, что насосная скважина и пласт представляют собой единую систему, характеризующую тесной взаимосвязанностью происходящих в ней термодинамических процессов, причем нередко УЭЦН эксплуатируются при достаточно низких значениях давления на входе в первую ступень насосного узла, когда объемное расходное газосодержание в потоке достигает 30–40 %. Такое количество свободной газовой фазы в перекачиваемой продукции существенно ухудшает напорные и энергетические характеристики насоса [1, 2]. Поэтому важным моментом повышения надежности работы подъемника перед началом его эксплуатации является правильный подбор, если считать критерием оптимальности максимум КПД УЭЦН, типа установки и определение глубины ее размещения в скважине, согласованные с конкретными свойствами пластовой продукции, геометрическими параметрами наклонно-направленной скважины и фильтрационно-емкостными свойствами пласта. Кроме того, в процессе эксплуатации скважины со временем может произойти изменение состава продукции на забое скважины (и, соответственно, на входе в первую ступень ЭЦН), в результате которого насос начинает работать вне оптимальной области интегральных характеристик «напор – подача», «КПД – подача», «мощность – подача», что приводит к перегрузу либо недогрузу погружного электродвигателя (ПЭД), вращающего вал установки. В таких случаях можно попытаться оптимизировать работу насосного оборудования и всей системы «пласт – скважина» без прекращения их работы с помощью современных наземных средств [3, 4] воздействия. В настоящее время для этой цели могут быть использованы прежде всего: 1) станции управления, предназначенные не только для приема и контроля рабочих параметров двигателя и насоса, измеряемых телеметрическими датчиками, но и для изменения режима работы ПЭД за счет изменения величины его напряжения или частоты силы тока; 2) специальные штуцерные устройства, позволяющие изменить сечение трубы на устье скважины.

Для решения соответствующих задач двух типов – оптимизации и управления – используется программно-технический комплекс ИСКЕНДЕР [4–6], разработанный на основе современных методов математического и численного моделирования процессов, происходящих при движении многофазных потоков в трубах скважины, проточных каналах электроцентробежного насоса и пористой среде пласта. К первому типу относятся оптимизационные задачи, ориентированные на прогноз эксплуатационных режимов работы механизированного подъемника, например, такие как

- рациональный подбор подземного оборудования к скважине,

- определение оптимальной глубины спуска УЭЦН в скважине,
- оптимизация сборки УЭЦН за счет ее компоновки ступенями различного типа.

Второй тип задач (задачи оптимального регулирования) связан с оптимизацией текущих эксплуатационных режимов УЭЦН в работающих добывающих скважинах посредством частотной и штуцерной корректировки параметров всей системы «пласт–скважина».

В данной статье мы рассмотрим решение задачи оптимизации сборки УЭЦН за счет ее компоновки ступенями различного типа на основе методов математического описания процессов в рабочих органах ЭЦН.

Дифференциальная модель процессов в ЭЦН

Для расчета характеристик течения водонефтегазовой смеси в насосном узле и параметров работы отдельных его ступеней воспользуемся математической моделью [7–9], обобщающей дискретную схему П. Д. Ляпкина и В. И. Игровского [2]:

$$l_c \frac{\partial P}{\partial \xi} = gr\Delta H, \quad \frac{1}{f_3} \sum_{i=1}^3 G_i C_{Pi} \frac{\partial T}{\partial \xi} = \frac{1}{v_c} \left(T \sum_{i=1}^3 \frac{G_i}{\rho_i} \alpha_{Pi} + \frac{1-\eta}{\eta} \right) grQ\Delta H - JL, \quad (1)$$

$$\rho = \sum_{i=1}^3 \rho_i \beta_i, \quad \rho_1 = \frac{\rho_{пл} \rho_{дег} (1 - C_n F) \zeta_1(P, T)}{\rho_{дег} (1 - F) + \rho_{пл} F (1 - C_n) \zeta_1(P_{ат}, T_{20})}, \quad \rho_2 = \frac{P}{gZ_r RT},$$

$$\rho_3 = \rho_{3пл} \zeta_3(P, T), \quad C_n = \frac{\rho_{2,0} V_0}{\rho_{пл}}, \quad F(P, T) = F^*(P) + \delta_F^*(P) [T - T^*],$$

$$\beta_3 = \frac{G_3 (\rho_1 (1 - \beta_2) + \rho_2 \beta_2)}{\rho_3 (G - G_3) + \rho_1 G_3}, \quad \beta_2 = \frac{G_2 \rho_1 \rho_3}{\rho_3 [\rho_1 G_2 + \rho_2 (G - G_2)] + G_3 \rho_2 (\rho_1 - \rho_3)}.$$

Здесь ξ – координатная ось с началом на входе в первую ступень, проходящая вдоль оси насосного узла; $0 < \xi < L_3$; $L_3 = l_c M_c$ – общая длина пакета ступеней, l_c – длина отдельной ступени, M_c – общее число ступеней в насосном узле; $f_3 = \pi r_3^2$, r_3 и $v_c = f_3 l_c$ – эффективные радиус каналов и объем проточной области ступени; ΔH , $\eta = gr\Delta H Q / \Delta N$, $Q = G/\rho$ и ΔN – напор, коэффициент полезного действия, объемный расход и потребляемая мощность, характеризующие работу отдельной ступени при перекачке смеси; ρ_i , G_i и β_i – средние по сечению f_3 плотность, массовый расход и расходное объемное содержание i -ой фазы; P , T , ρ и $G = G_1 + G_2 + G_3$ – давление (одинаковое для всех фаз), температура, плотность и массовый расход смеси; α_{Pi} , α_{Ti} – коэффициенты теплового расширения и объемной упругости i -ой фазы; R – универсальная газовая постоянная, Z_r – коэффициент сверхсжимаемости реального газа; $\zeta_i(P, T) = 1 - \alpha_{Pi} (T - T_{пл}) + \alpha_{Ti} (P - P_{пл})$; $P_{пл}$ и $T_{пл}$ – начальные пластовые давление и температура; $\rho_{пл}$ и $\rho_{3пл}$ – значения плотности нефти и воды при $P = P_{пл}$, $T = T_{пл}$; $\rho_{2,0}$ и $\rho_{дег}$ – плотность газа и дегазированной нефти в нормальных условиях (при атмосферном давлении $P_{ат}$ и температуре $T_{20} = 20$ °C); J – массовая скорость образования газовой фазы за счет нефтяной, отнесенная к единице объема смеси; L – скрытая теплота растворения газа в нефти; C_n – массовая концентрация газа, растворенного в нефти при давлении P выше давления P_n насыщения нефти газом; $F(P/P_n, T)$ – обобщенный коэффициент растворимости газа в нефти; F^* и δ_F^* – коэффициент растворимости и угловой коэффициент при некотором

характерном значении температуры T^* и соответствующем давлении насыщения P_H^* ; $V_0(T)$ – нормальный объем газа, выделяющийся из нефтяной фазы при $P = 0$.

Для расчета параметров ΔH , η и ΔN при работе ступени ЭЦН на неоднородной смеси воспользуемся методикой П. Д. Ляпкина [1, 2], в основе которой лежат полуэмпирические зависимости коэффициентов относительных подачи $K_Q = Q/Q_B$, напора $K_H = \Delta H/\Delta H_B$ и кпд $K_\eta = \eta/\eta_B$, отражающих снижение параметров ступени Q , ΔH , η при перекачке ею вязкой среды по сравнению с соответствующими показателями с ΔH_B , η_B работы ступени на воде. В интересующем нас диапазоне относительных подач $0,5 \leq q_B = Q/Q_B^* \leq 1,3$, при ламинарном и турбулентном режимах течения эти зависимости как функции числа Рейнольдса Re_3 , выраженного через объемный расход Q и коэффициент эффективной кинематической вязкости ν смеси, имеют вид [1, 2]:

$$K_Q^L = K_H^L = K_{Q,H}^L = \frac{Re_3}{Re_3 - 50 + 200q_B}, \quad Re_3 = f(n_S) \frac{Q}{\nu} \sqrt[3]{\frac{\omega}{Q_B^*}}, \quad Re_3 < 10^4, \quad (2)$$

$$K_{Q,H}^T = 1 - (3,585 - 0,821 \cdot \lg Re_3)(0,027 + 0,0485q_B), \quad Re_3 \geq 10^4, \quad (3)$$

$$n_S = 193\omega(Q_B^*)^{0,5} (g\Delta H_B^*)^{-0,75}, \quad f(n_S) = (4,3 + 0,816n_S^{0,274})n_S^{-0,575}.$$

Здесь Q_B^* , ΔH_B^* , η_B^* – паспортные значения подачи, напора и кпд при работе ступени ЭЦН в оптимальном режиме на воде; n_S – коэффициент быстроходности ступени; ω – угловая скорость вращения вала насоса (ротора электродвигателя); $\nu = \mu/\rho$, μ – эффективная динамическая вязкость смеси, зависящая от концентрации дисперсных составляющих потока и определяемая с учетом эффекта инверсии фаз [7, 8]. Величину мощности ΔN , потребляемой ступенью ЭЦН, и ее кпд η при перекачке эмульсии в диапазоне $0,5 < q_B < 1,3$ определим соотношениями [2]:

$$\Delta N = \Delta N_B(Q_B) \cdot \rho/\rho_3 \cdot K_Q^2/K_\eta, \quad K_\eta = \min(1, \min(K_\eta^L, K_\eta^T)), \quad (4)$$

$$K_\eta^T = 0,274 \lg Re_3 - 0,06 - 0,14q_B, \quad K_\eta^L = 0,485 \lg Re_3 - 0,63 - 0,26q_B, \quad \eta = K_\eta \eta_B,$$

где K_η^L и K_η^T – коэффициенты относительного кпд ступени при ламинарном и турбулентном режимах течения смеси. Зависимости $\Delta N_B(Q_B)$ и $\Delta H_B(Q_B)$ задаются как табличные функции подачи Q_B .

При $\xi = 0$ на входе в насосный узел задаются граничные условия для давления и температуры:

$$P|_{\xi=0} = P_{вх}, \quad T|_{\xi=0} = T_{вх}. \quad (5)$$

Состав трехфазной водонефтегазовой смеси при $\xi = 0$ определяется значениями $G_1|_{\xi=0} = G_{1вх}$, $G_2|_{\xi=0} = G_{2вх}$ и $G_3|_{\xi=0} = G_{3вх}$ массовых расходов нефтяной, газовой и водяной фаз. При этом массовые расходы смеси $G = G_{1вх} + G_{2вх} + G_{3вх}$ и воды $G_3 = G_{3вх}$ постоянны вдоль насосного узла, а расходы $G_1(\xi)$ и $G_2(\xi)$ изменяются за счет растворения газа в нефти по мере роста давления в ЭЦН.

При перекачке смеси параметры Q , ΔH и η работы ступеней непрерывно меняются от приема к выкиду в силу сжатия и нагрева смеси, а также растворения свободного газа в нефти. Происходящие при этом взаимосвязанные изменения характеристик потока и рабочих параметров ступеней вдоль насосного узла учитываются моделью (1)–(5), поэтому при ее численной реализации на каждом шаге разбиения интервала $0 \leq \xi \leq L_3$ необходимо осуществлять пересчет величин Q , ΔH и η .

Согласно методике [2], значение $K_{Q,H}$ определяется как $\min(K_{Q,H}^{\text{л}}, K_{Q,H}^{\text{т}})$. Расчет напора ΔH ступени, перекачивающей неоднородную смесь при заданных величинах Q , μ , ρ и ω , выполняется по формулам (2), (3) на основе итерационной процедуры, в которой происходит уточнение неизвестных значений $Q_{\text{в}}$ и $\Delta H_{\text{в}}$, соответствующих подаче Q смеси и определяемых по паспортной водяной характеристике ступени $\Delta H_{\text{в}} = \Delta H_{\text{в}}(Q_{\text{в}})$. Для начала итерационного процесса задается некоторое начальное приближение относительной подачи $q_{\text{в}}$.

Очевидно, что использование итерационного алгоритма усложняет расчет и увеличивает время решения задачи (1)–(5). Поэтому методика [2] была модифицирована в работе [5] так, чтобы расчет параметров Q , ΔH и η ступеней можно было выполнять без итераций. Во-первых, специальные оценки показали, что в диапазоне $0,5 \leq q_{\text{в}} \leq 1,3$ значения $K_{Q,H}^{\text{л}}$ и $K_{Q,H}^{\text{т}}$, вычисленные по формулам (2) и (3), отличаются лишь на 1–2 %. Поэтому с достаточной степенью точности в обоих случаях можно использовать соотношение (2), положив $K_{Q,H} = K_{Q,H}^{\text{л}} \approx K_{Q,H}^{\text{т}}$. Во-вторых, параметр Re_3 можно представить в виде: $\text{Re}_3 = q_{\text{в}} K_Q \text{Re}$, где $\text{Re} = f(n_S) \sqrt[3]{\omega/Q_{\text{в}}} (Q_{\text{в}}^*/\nu)$ – модифицированное число Рейнольдса потока смеси в ЭЦН, определяемое только по оптимальным параметрам $Q_{\text{в}}^*$, $\Delta H_{\text{в}}^*$ работы ступени на воде и величине ν смеси. Теперь соотношение (2) можно записать как функцию аргументов Re и $q_{\text{в}}$:

$$K_{Q,H} = 1 - (200q_{\text{в}} - 50)/(q_{\text{в}} \text{Re}). \quad (6)$$

Из равенства $K_{Q,H}^{\text{л}} = K_{Q,H}$, получим $\text{Re}_3 = q_{\text{в}} \text{Re} - 200q_{\text{в}} + 50$. Отсюда при $q_{\text{в}} = 1$ вытекает *важное следствие*:

$$\text{Re}_3 = \text{Re} - 150, \quad (7)$$

т. е. в оптимальном режиме работы ступени числа Re и Re_3 отличаются лишь на константу. При этом $K_Q^* = Q^*/Q_{\text{в}}^* = (\text{Re} - 150)/\text{Re}$, так что в окрестности оптимальной подачи, где $Q \neq Q^*$, параметр $\text{Re}_3 = Q/Q^* \cdot K_Q^* \text{Re} = Q/Q^* (\text{Re} - 150)$, а также $\text{Re}_3 = (Q^*/Q_{\text{в}}^*) \text{Re}$. Нетрудно видеть, что величины $q_{\text{в}}$ и Q/Q^* связаны соотношением: $q_{\text{в}} = (Q/Q^* (\text{Re} - 150) - 50)/(\text{Re} - 200)$. С учетом полученных результатов, исключая относительную подачу $q_{\text{в}}$ из соотношения (6), приведем его к виду

$$K_{Q,H} = \frac{Q(\text{Re} - 200)}{Q\text{Re} - 50Q_{\text{в}}^*}. \quad (8)$$

Оно включает в себя неявную зависимость величин Q/Q^* и $q_{\text{в}}$. При заданных значениях ω , ρ , μ и Q на приеме ступени сначала по формуле (7) определяется значение коэффициента K_Q и соответствующая данным условиям подача $Q_{\text{в}} = Q/K_Q$. Далее по паспортной кривой $\Delta H_{\text{в}} = \Delta H_{\text{в}}(Q_{\text{в}})$ находится напор $\Delta H_{\text{в}}$, а затем осуществляется расчет напора $\Delta H = K_H \Delta H_{\text{в}}$ ступени при перекачке смеси. Таким образом, в отличие от методики [2] предлагаемый подход не требует выполнения итераций.

Отметим, что вдоль ступеней ЭЦН происходит непрерывное изменение не только параметров Q , ΔH и η , но и оптимальных величин Q^* , $\Delta H_{\text{в}}^*$ и η^* , обусловленное ростом давления, температуры и плотности смеси, снижением газонасыщенности в потоке, а также изменением эффективной вязкости μ перекачиваемой среды на входе каждой ступени. В результате значения относительного расхода смеси Q/Q^* могут отличаться от единицы, вплоть до их выхода за пределы оптимального диапазона $0,7 \leq Q/Q^* \leq 1,3$. Это может привести к значительному снижению эффективности и на-

дежности работы всей установки, включая насосный узел и погружной двигатель. Для повышения эксплуатационных характеристик УЭЦН используются так называемые конические сборки ЭЦН, которые компонуются из пакетов ступеней с различной производительностью, увеличивающейся в направлении от входа к выходу насоса [8, 10]. При этом более производительные ступени, работая в околооптимальном режиме, интенсивно диспергируют и сжимают газожидкостную смесь, подготавливая тем самым благоприятные условия для работы последующих менее производительных ступеней. Как правило, в настоящее время при сборке конических ЭЦН используют пакеты из ступеней двух или трех типов.

Задача оптимальной компоновки ЭЦН

На основе математической модели (1)–(5) найти такие распределенные параметры $Q_B^*(\xi)$, $\Delta H_B^*(\xi)$, $\eta_B^*(\xi)$ ступеней ЭЦН при $0 \leq \xi \leq L_s$, чтобы при перекачке газожидкостной смеси каждая ступень работала в режиме оптимальной подачи смеси $q = Q/Q^* \approx 1$ с максимальным значением КПД.

Для построения алгоритма решения задачи воспользуемся соотношением (7). При заданных значениях ω , μ , ρ , Q с учетом выражений для Re_s и Re оно может быть записано как нелинейное уравнение

$$\frac{\sqrt[3]{\omega}}{B} \left(4,3 + A(Q_B^*)^{0,137} \right) (Q - Q_B^*) + v \cdot 150(Q_B^*)^{0,62083} = 0, \quad (9)$$

относительно неизвестных Q_B^* и ΔH_B^* , определяемых конструктивными особенностями ступени, в котором $A = 0,816w^{0,274}$, $B = w^{0,575}$, $w = 193\omega(g\Delta H_B^*)^{-0,75}$. Как показал анализ паспортных характеристик ступеней различных заводов-изготовителей, значения оптимальных напоров ΔH_B^* меняются в относительно небольшом диапазоне (от 3 до 9 м). Поэтому величину ΔH_B^* можно задать как среднее значение напоров ступеней тех типоразмеров, которые предполагается использовать в конической сборке насосного узла. Тогда коэффициенты A и B уравнения (9) становятся определенными, и его можно решать относительно оптимальной подачи Q_B^* , например, методом простых итераций:

$$Q_B^{*s+1} = Q + \frac{B}{\sqrt[3]{\omega}} v \cdot 150 \left(Q_B^{*s} \right)^{0,62083} \left/ \left(4,3 + A \left(Q_B^{*s} \right)^{0,137} \right) \right., \quad s = 0, 12, \dots \quad (10)$$

Здесь s – номер итерационного шага. В качестве нулевого приближения Q_B^{*0} при $s = 0$ можно задать значение объемного расхода Q смеси. Итерации прекращаются при достижении заданной точности ϵ нахождения корня уравнения (9), когда выполнится условие $\left| Q_B^{*s+1} - Q_B^{*s} \right| < \epsilon$. Как показали результаты расчетов, при использовании среднего значения напора $\Delta H_{B,cp}^*$ погрешность нахождения оптимальной подачи Q_B^* ступени составляет порядка 3–5 %.

Таким образом, при решении задачи оптимальной компоновки ЭЦН сначала вычисляются величины ρ , μ , Q и др. на входе ступени. Затем по формуле (9) определяется теоретическое значение оптимальной подачи Q_B^* ступени. Далее в базе данных (БД), содержащей паспортные характери-

стики ступеней различных типов и заводов-изготовителей, находится ступень с оптимальной подачей $Q_{в,БД}^*$, наиболее близкой к теоретическому значению. После этого решаются уравнения (1)–(4) до входа в следующую ступень, и повторяется процедура подбора наиболее подходящего типоразмера.

Решение данной задачи реализовано в программно-техническом комплексе ИСКЕНДЕР [4–6], имеющем в своем составе базы данных по подземному оборудованию (ПЭД, ЭЦН и т. д.), а также модули, предназначенные для поиска, сортировки, обработки и прочих операций с информацией БД.

Демонстрация результатов

Пусть на вход ЭЦН поступает газоводонефтяная смесь при $P|_{\xi=0} = 3,1$ МПа, $T|_{\xi=0} = 40$ °С, $G_{1вх} = 0,925$ кг/с, $G_{2вх} = 0,017$ кг/с, $G_{3вх} = 0,058$ кг/с ($G = 1$ кг/с). Свойства фаз и все необходимые параметры, входящие в уравнения (1)–(5), задавались так (см. [3–9]), чтобы они в среднем соответствовали условиям разработки девонских месторождений с пластовыми давлением $P_{пл} = 16$ МПа и температурой $T_{пл} = 40$ °С. При таких условиях объемный расход $Q|_{\xi=0}$ смеси равен 134 м³/сут, а газо- и водонасыщенность смеси $\beta_2|_{\xi=0}$ и $\beta_3|_{\xi=0}$ составляют соответственно 28 и 5 %.

Рассмотрим результаты формирования конической конструкции насосного узла за счет такой его сборки из 240 разнотипных ступеней диаметром $D = 92$ мм, которая обеспечила бы работу каждой из них с максимально высоким кпд. На рис. 1,а представлены распределения $Q_{в}^*(N_{ст})$ и $Q_{в,БД}^*(N_{ст})$, полученные по формуле (9) и в результате поиска ступеней в БД ПТК ИСКЕНДЕР. Фрагмент БД, содержащий набор найденных ступеней, показан в табл. 1. При решении уравнения (9) среднее значение напора $\Delta H_{в}^*$ задавалось равным 4,2 м. Нетрудно видеть, что диапазон [107,5, 170] теоретических значений $Q_{в}^*$ не совпадает с дискретным набором оптимальных подач $Q_{в,БД}^*$, представленным в табл. 1. Это объясняется объективными причинами: заводы-изготовители выпускают высокопроизводительные насосы с достаточно большим шагом по оптимальной подаче $Q_{в}^*$.

На рис. 1,б показаны интегральные характеристики «напор H_3 – подача $Q_{ввх}$ », «кпд η_3 – подача $Q_{ввх}$ » и «потребляемая мощность N_3 – подача $Q_{ввх}$ », где $Q_{ввх}$ – объемный расход жидкой (нефть + вода) составляющей потока, приведенный к нормальным условиям. Кривые 2 и 3 соответствуют двум предельным ситуациям, в которых насосы собраны только из однотипных ступеней ЭЦНДП5-125 и ЭЦНД5-100, соответствующих максимальному (150 м³/сут) и минимальному (102 м³/сут) значениям $Q_{в,БД}^*$. Точки (3) соответствуют интегральным значениям H_3 , η_3 и N_3 при перекачке смеси коническим ЭЦН, построенным на основе решения задачи оптимальной компоновки. Конический насос оптимальной конструкции состоит из пакетов ступеней пяти типов (см. табл. 1), расчетное количество которых равно 39, 20, 27, 42 и 112 штук. Видно, что рабочие точки однотипного насоса со ступенями ЭЦНДП5-125 смещены влево от оптимального интегрального значения $Q_{ввх}^*$, соответствующего максимуму кпд η_3 (кривые 1). По сравнению с ним коническая сборка ЭЦН имеет лучшие рабочие характеристики: более высокие напор и кпд при более низкой потребляемой мощности (точки 3). Точки H_3 , η_3 и N_3 рабочего режима однотипного насоса, состоящего из ступеней ЭЦНД5-100, на рис. 1,б отсутствуют, поскольку при данных условиях на входе его работа вообще невозможна.

Рис. 2,б иллюстрирует нелинейный характер изменения объемного расхода смеси Q , ее кинематической вязкости ν и газонасыщенности β_2 вдоль ступеней насосного узла. По мере роста давления происходит снижение доли свободного газа в потоке и уменьшение величин Q и ν . Относи-

тельная подача $q = Q/Q^*$ меняется немонотонно в соответствии с изменением типоразмера ступеней. При этом, несмотря на достаточно большую разницу величин Q_B^* у ступеней различных типоразмеров, вошедших в сборку конического ЭЦН (см. табл. 1), все они работают в околооптимальном диапазоне относительных подач $0,92 \leq q \leq 1,17$, причем их среднеинтегральное значение $\bar{q} = \int_0^{L_3} q(\xi) d\xi / L_3$, полученное в расчетах, равно 1,065.

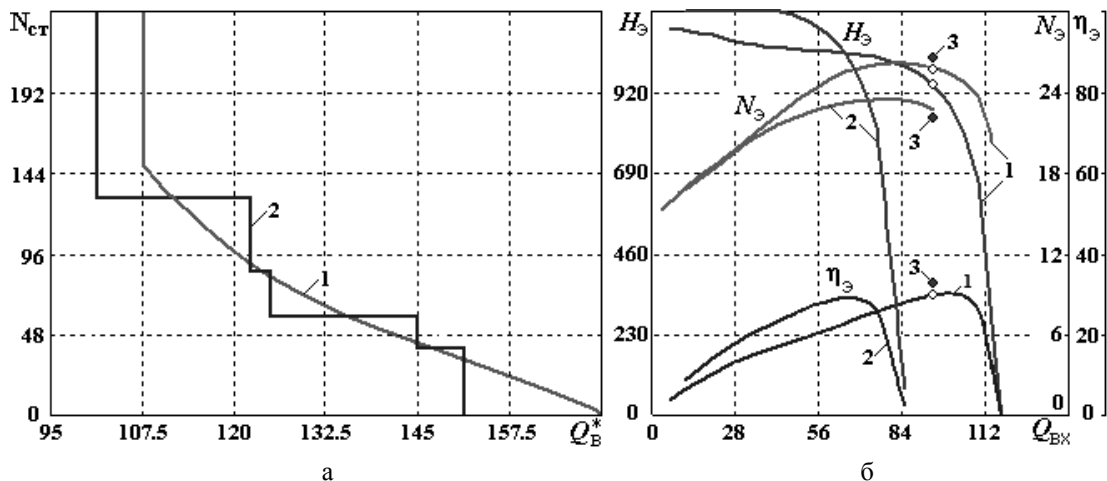


Рис. 1. Построение конического ЭЦН при перекачке газодонефтяной смеси: а – зависимости подач Q_B^* (1) и $Q_{в,БД}^*$ (2) от номера $N_{ст}$ ступени, б – характеристики сборок ЭЦН: 1 – однотипная (ЭЦНДП5-125, $Q_B^* = 150 \text{ м}^3/\text{сут}$), 2 – однотипная (ЭЦНД5-100, $Q_B^* = 102 \text{ м}^3/\text{сут}$), 3 – коническая при $Q_B^* = f(N_{ст})$

Таблица 1

$Q_{в,БД}^*$, $\text{м}^3/\text{сут}$	$\Delta H_{в}^*$, м	$\eta_{в}^*$, %	D , мм	Типоразмер ступени	Завод
102,0	4,37	51,64	92	ЭЦНД5-100	Борец
122,5	4,15	52,48		1ЭЦН(ПМ)5-125	ИжНефтеПласт
125,0	4,51	54,02		ЭЦНАКИ5-125	Бэнз
146,0	4,19	57,07		ЭЦНД5-125	Борец
150,0	3,73	53,01		ЭЦНДП5-125	Алмаз

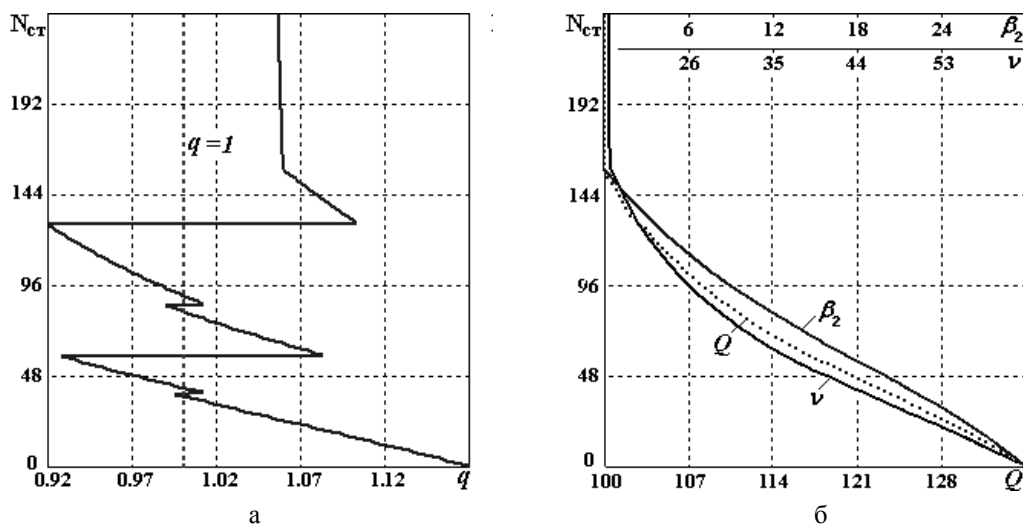


Рис. 2. Изменение относительной подачи $q = Q/Q^*$, объемного расхода Q ($\text{м}^3/\text{сут}$), вязкости ν (м/с) и газонасыщенности β_2 (%) смеси по длине ЭЦН

Выводы

1. На основе математического моделирования решена задача оптимальной компоновки ЭЦН ступенями различного типа.

2. Показано, что коническая конструкция позволяет, во-первых, обеспечить повышенную надежность работы ЭЦН на газожидкостной смеси, максимально снизив вредное влияние газа. Во-вторых, из-за уменьшения мощности $N_э$, потребляемой насосным узлом при перекачке смеси, погружную коническую установку можно снабдить менее мощным электродвигателем, что приведет не только к экономии электроэнергии в процессе эксплуатации УЭЦН в добывающей нефтяной скважине, но и благоприятно скажется на температурном режиме ПЭД.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров, а также субсидии для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

Литература

1. Ляпков П. Д. Способ пересчета характеристики погружного центробежного насоса с воды на эмульсию // Нефтяное хозяйство. 1979. № 5. С. 38–40.
2. Ляпков П. Д. Подбор установки погружного центробежного насоса // Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений. Добыча нефти / Под ред. Ш. К. Гиматудинова. М.: Недра, 1983. С. 237 – 293.
3. Конюхов В. М., Конюхов И. В., Чекалин А. Н. Математическое моделирование и параллельные вычисления процессов теплопереноса при эксплуатации единого комплекса «нефтяной пласт – система скважин – электроцентробежные насосы» // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 10. С. 195–203.
4. Конюхов В. М., Конюхов И. В., Краснов С. В. Моделирование и расчет в ПТК «Искендер» переходных процессов в системе «скважина – пласт – УЭЦН» при ее выводе на рабочий режим //

Ашировские чтения: Сб. трудов Международной научно-практической конференции. Том II / Под ред. В. В. Живаева. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. С. 17–26.

5. Конюхов В. М., Конюхов И. В., Краснов С. В. Математическое обеспечение программно-технического комплекса ИСКЕНДЕР // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Матем. моделирование физ. процессов. 2012. Вып. 3. С. 34–44.

6. Конюхов В. М., Краснов С. В. Компьютерные модели для расчета и оптимизации эксплуатационных режимов добывающих скважин // Теория и практика современных методов интенсификации добычи нефти и увеличения нефтеотдачи пластов: Материалы международной научно-практ. конф. (23–25 мая 2012, г. Речица). Гомель: ОАО «Полеспечать», 2012. С. 79–87.

7. Саламатин А. Н. Математические модели дисперсных потоков. Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 1987.

8. Конюхов В. М. Дисперсные потоки в нефтяных скважинах. Казань: Изд-во КГУ, 1990.

9. Конюхов В. М., Конюхов И. В. Численное моделирование нестационарных процессов тепло-массопереноса при движении газоводонефтяной смеси в каналах центробежного электронасоса // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Матем. моделирование физ. процессов. 2012. Вып. 4. С. 60–69.

10. Пещеренко С., Каплан А., Пещеренко М., Ивашов А. Рабочие характеристики ЭЦН с предвключенным диспергатором при работе на газожидкостной смеси // Информационный бюллетень группы компаний НОВОМЕТ «Арсенал нефтедобычи». № 2 (12). С. 30–33.

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ РЕЖИМАМИ КОМПЛЕКСА «НЕФТЯНОЙ ПЛАСТ – СИСТЕМА СКВАЖИН»

В. М. Конюхов, И. В. Конюхов, А. Н. Чекалин

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань

Математические модели, применяемые для расчета процессов тепло-массопереноса в отдельных элементах комплекса «нефтяной пласт – система добывающих и нагнетательных скважин», должны учитывать специфические особенности многофазных потоков в областях их движения – в пористой среде и трубах скважин соответственно. Если в добывающих скважинах для подъема пластовой продукции используются установки погружных электроцентробежных насосов (УЭЦН), то возникает еще одна группа областей течения газожидкостных смесей – проточные каналы рабочих ступеней насосных узлов, которые в свою очередь могут иметь собственные конструкционные особенности. Эти модели, как правило, сами по себе представляют собой сложные системы нелинейных дифференциальных уравнений различного типа, существенно отличающиеся методами их численного решения. Расчет термогидродинамических процессов во всем комплексе как едином целом невозможен без совместного решения этих систем уравнений, что приводит к дополнительным трудностям, обусловленным значительными затратами машинного времени для проведения многовариантных вычислительных экспериментов. Эффективность реализации подобных расчетов и решения задач анализа, прогнозирования и оптимизации рабочих характеристик всех элементов комплекса «пласт – система скважин» может быть существенно повышена за счет использования многопроцессорных компьютеров и суперЭВМ, технологий параллельных вычислений и алгоритмических языков программирования.