

# Методика определения оптимального состава работающих насосных агрегатов кустовых насосных станций

**В.В. Сушкин, Д.Т.Н.**

(Тюменский гос. нефтегазовый университет),

**М.К. Велиев**

(ОАО «Гипротюменнефтегаз»,  
Группа ГМС)

Адрес для связи: velievmk@mail.ru

**Ключевые слова:** кустовая насосная станция (КНС), снижение удельного расхода электроэнергии, определение оптимального состава насосных агрегатов, метод нижней огибающей кривой.

Поддержание пластового давления (ППД) практически на протяжении всего периода эксплуатации нефтяных месторождений Западной Сибири остается одним из наиболее энергоемких процессов в технологии добычи нефти. Основными потребителями являются насосные агрегаты кустовых насосных станций (КНС), суммарная установленная мощность которых может достигать десятков мегаватт. Вовлечение в разработку трудноизвлекаемых запасов и выход месторождений на завершающую стадию эксплуатации требуют применения новых подходов к управлению режимами работы КНС и снижению энергоемкости основных технологических процессов на фоне прогрессирующего роста тарифов на электроэнергию.

Удельный расход электроэнергии на закачку  $w_{уд}$  в системе ППД зависит от выбора состава одновременно работающих насосных агрегатов, распределения нагрузки между ними с учетом энергетических характеристик, а также энергетической эффективности управления режимами их работы.

В работе [1] получено, что использование частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) двух основных насосных агрегатов КНС и подпорных насосов позволяет расширить технологические возможности КНС и увеличить возможный объем планового задания на 19 %, а также снизить  $w_{уд}$  на 11 % по сравнению с вариантом, не предусматривающим частотное управление.

Известно, что в процессе эксплуатации производительность насосных агрегатов снижается вследствие увеличения доли внутренних объемных протечек, обусловленных износом межступенчатых уплотнений, ухудшением состояния внутренней поверхности проточной части насоса, увеличением зазора между разгрузочным диском (гидравлической пятой) и стенкой насоса. Это приводит к снижению энергетических показателей агрегатов и несоответствию между агрегатами по соотношению приращение полезной мощности – приращение подведенной энергии.

Для устранения причин высокого уровня непроизводительных потерь электроэнергии в технологической системе ППД необходимо определить оптимальный состав насосных агрегатов для выполнения планового технологического задания  $V_{пл}$  с минимальным удельным расходом электроэнергии  $w_{уд}$  на закачку воды в нефтеносный пласт.

**Procedure for determination of the optimum structure of operating pump units at well pad pump stations**

V.V. Sushkov (Tyumen State Oil and Gas University, RF, Tyumen), M.K. Veliev (Giprotymenenneftegaz OAO, HMC Group, RF, Tyumen)

E-mail: velievvmk@mail.ru

**Key words:** well pad pump station (WPPS), specific energy consumption decrease, determination of the optimum structure of pump units, lower intrinsic curve method.

Maintenance of reservoir pressure is one of the most power-consuming processes in petroleum engineering, where the main consumers are pump units at well pad pump stations. The article specifies a procedure to determine the optimum structure of WPPS pump units to ensure the optimum structure and the priority for switch pumps on/off at minimum energy consumption to water pumping, if the scheduled assignment volume is updated.

гатов для выполнения планового технологического задания  $V_{пл}$  с минимальным удельным расходом электроэнергии  $w_{уд}$  на закачку воды в нефтеносный пласт.

В общем виде оптимизация управления режимами работы насосных агрегатов системы ППД сводится к задаче условной оптимизации и решается поиском таких значений напора и подачи основных и подпорных насосных агрегатов, при которых достигается минимальный  $w_{уд}$  и выполняются ограничения как в электротехническом комплексе, так и технологии заводнения

$$w_{уд}(Q, H) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{(W_{ij}(Q_{ij}, H_{ij}) + \Delta W_{ij}(Q_{ij}, H_{ij}))}{V_{пл}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $Q_{ij}$  – подача насосного агрегата,  $\text{м}^3$ ;  $H_{ij}$  – напор насосного агрегата, м;  $W_{ij}$  – полезная энергия, потребляемая  $i$ -ым основным и  $j$ -ым подпорным насосными агрегатами, кВт·ч;  $\Delta W_{ij}$  – потери энергии в  $i$ -ом основном и  $j$ -ом подпорном

насосных агрегатах, кВт·ч;  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Q_{ij} = V_{пл}$  – суммарная по-

дача основных и подпорных насосов.

Удельный расход электроэнергии насосным агрегатом  $w_{уд} = f(Q, H, \eta_{нас} n)$  ( $\eta_{нас} = \eta_{нас} \cdot \eta_{ад}$  – коэффициент полезного действия (кп.д.) насосного агрегата;  $\eta_{нас}$ ,  $\eta_{ад}$  – кп.д. соответственно насоса и асинхронного двигателя;  $n$  – частота вращения вала,  $\text{мин}^{-1}$ ).

Потери электроэнергии в электродвигателях, комплектуемых в составе насосных агрегатов, составляют не более 3 % и незначительно изменяются в процессе эксплуатации, что определяет их наименьшее влияние на величину суммарных непроизводительных потерь электроэнергии в агрегате [2].

Для решения задачи определения оптимального состава необходимо иметь гидравлические и энергетические характеристики насосных агрегатов технологической системы. Данные характеристики можно получить аппроксимацией известных характеристик  $H = f(Q)$  и  $P = f(Q)$  и представить в виде полиномов соответственно второй и третьей степени [3]

$$H = A_1 n^2 + B_1 n Q + C Q^2; \quad (2)$$

$$P = A_2 n^2 Q - B_2 n Q^2 + D n^3, \quad (3)$$

где  $P$  – мощность на валу насосного агрегата, кВт;  $A, B, C, D$  – коэффициенты аппроксимации.

В таком случае удельный расход электроэнергии каждого насосного агрегата для обеспечения подачи  $Q_{ij}$  определяется выражением

$$w_{ydi} = \frac{P_{ij} \cdot t}{Q_{ij}} = \frac{(A_{2ij} n_{ij}^2 Q_{ij} - B_{2ij} n_{ij} Q_{ij}^2 + D_{ij} n_{ij}^3) \cdot t}{Q_{ij}}, \quad (4)$$

где  $t$  – время выполнения технологического задания, ч.

Для решения сформулированной задачи выбора оптимального состава насосные агрегаты КНС и подпорные агрегаты станции низкого давления представим в виде базовых допустимых множеств  $S_1$  и  $S_2$  некоторого пространства с элементами множества  $i$  и  $j$ :  $S_1 = \{i = 1, \dots, n\}$ ,  $S_2 = \{j = 1, \dots, m\}$  (рис. 1), где каждый элемент множества характеризуется потребляемой мощностью и непроизводительными потерями электроэнергии  $\Delta W$  вследствие бесполезного расходования в насосных агрегатах части затраченной энергии при соответствующей подаче  $Q$ .

Тогда структура элементов каждого множества задается парой значений  $\{(Q_{1i}, \Delta W_{1i})\}$  для основных насосных агрегатов и парой  $\{(Q_{2j}, \Delta W_{2j})\}$  для подпорных, а объем планового задания по закачке – суммой

$$\sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{j=1}^m Q_j = V_{\text{пл}}.$$

Представленные далее выражения применимы как для основных, так для подпорных насосных агрегатов.

В качестве критерия включения насосного агрегата в оптимальный состав для выполнения планового задания по закачке примем удельные непроизводительные потери электроэнергии на закачку  $\Delta w_{ydi}$  характеризующие техническое состояние агрегатов.

В соответствии с выражением (4)

$$\Delta w_{ydi} = \frac{\Delta W_i}{Q_i} = \frac{(P_i - N_{ri}) \cdot t}{Q_i}, \quad (5)$$

где  $N_{ri} = \rho g H_i Q_i$  – гидравлическая мощность насоса, кВт.

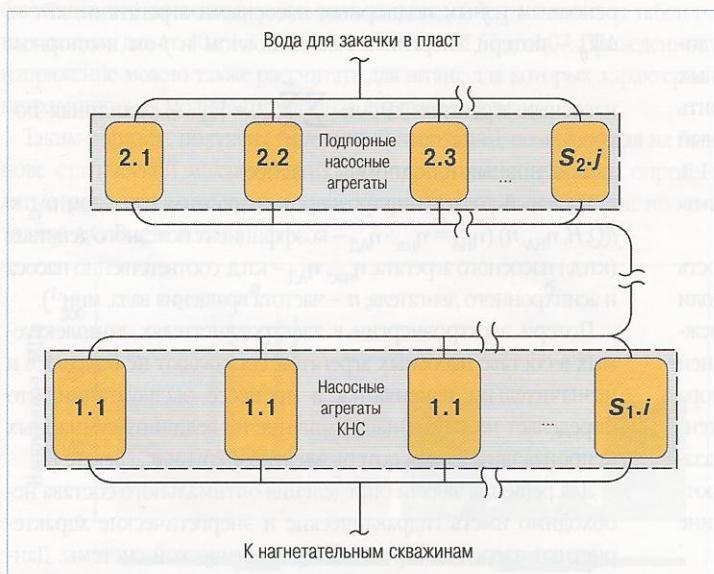


Рис. 1. Структурная схема насосных агрегатов КНС и подпорных насосных агрегатов технологической схемы ППД

При известных значениях объема планового задания  $V_{\text{пл}}$  и заданной структуре элементов  $\{(Q_{ij}, \Delta W_{ij})\}$  задача определения оптимального состава работающих насосных агрегатов сводится к минимизации суммарных удельных непроизводительных потерь электроэнергии  $\sum_{i=1}^n \Delta w_i$ . В таком случае элементы множества можно геометрически представить в виде точек, где каждый элемент множества  $S_1$  характеризуется крутизной характеристики в координатах  $(Q, \Delta w)$ ,  $\beta_i = \Delta w_i / Q_i$ . Необходимо определить крутизну характеристики каждого насосного агрегата для всех значений  $\{(Q_j, \Delta w_j)\}$ . Полученные значения дают неупорядоченную структуру элементов множества основных и подпорных агрегатов.

На рис. 2 представлена неупорядоченная геометрическая структура множества основных и подпорных насосных агрегатов в виде восходящих линий трендов. Для решения задачи определения оптимального состава работающих насосных агрегатов необходимо упорядочить элементы множеств, для чего используем метод нижней огибающей кривой (НОК), относящийся к группе методов ветвей и границ [4].

В системе координат  $Q \Delta w$  при заданном числе элементов имеем семейство  $n$ -мерных векторов  $l_i = (l_1, l_2, \dots, l_n)$ , координаты которых соответствуют каждому значению  $\{Q_{1i}, \Delta w_{1i}\}$ . В результате векторного суммирования соответствующих координат каждого вектора множество векторов  $l_i$  на плоскости  $Q \Delta w$  будет представлено множеством точек  $(Q_i^{(l)}, \Delta w_i^{(l)})$ , которые определяют положение векторов  $l$  в плоскости для каждого элемента множества  $S$ . Монотонно вогнутая кривая, проходящая через точки  $(Q_j, \Delta w_j)$ , соответствующие векторам на координатной плоскости  $(Q^{(l)}, \Delta w^{(l)})$ , является НОК, определяющей область поиска минимума целевой функции (1). Построение НОК для элементов множества выполняется при условии  $\beta_i \geq \beta_{i-1}$ . На рис. 3 представлена НОК для элементов структурной схемы, представленной на рис. 1, с характеристиками элементов (см. рис. 2).

В соответствии с разработанной методикой для различных вариантов состава работающих насосных агрегатов КНС были определены удельные расходы электроэнергии для заданного объема закачки воды ( $960 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) при пяти параллельно работающих насосах типа ЦНС240-1900, имеющих различное техническое состояние, с мощностью приводных электродвигателей 2000 кВт.

Из рис. 4 видно, что при плановом задании  $Q_{\text{пл}} = 960 \text{ м}^3/\text{ч}$  оптимальный состав представлен насосными агрегатами 1, 2, 3 и 4. При этом удельный расход электроэнергии снижается на 5 % ( $\approx 8064 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{сут}$ ) по сравнению с вариантом, когда оптимальный состав для выполнения технологического задания представлен насосными агрегатами 1, 2 и 4.

Различие энергетических характеристик насосных агрегатов обуславливает также необходимость оптимизации режима работы каждого агрегата технологической системы с целью определения оптимальных напоров и подач по условию минимума

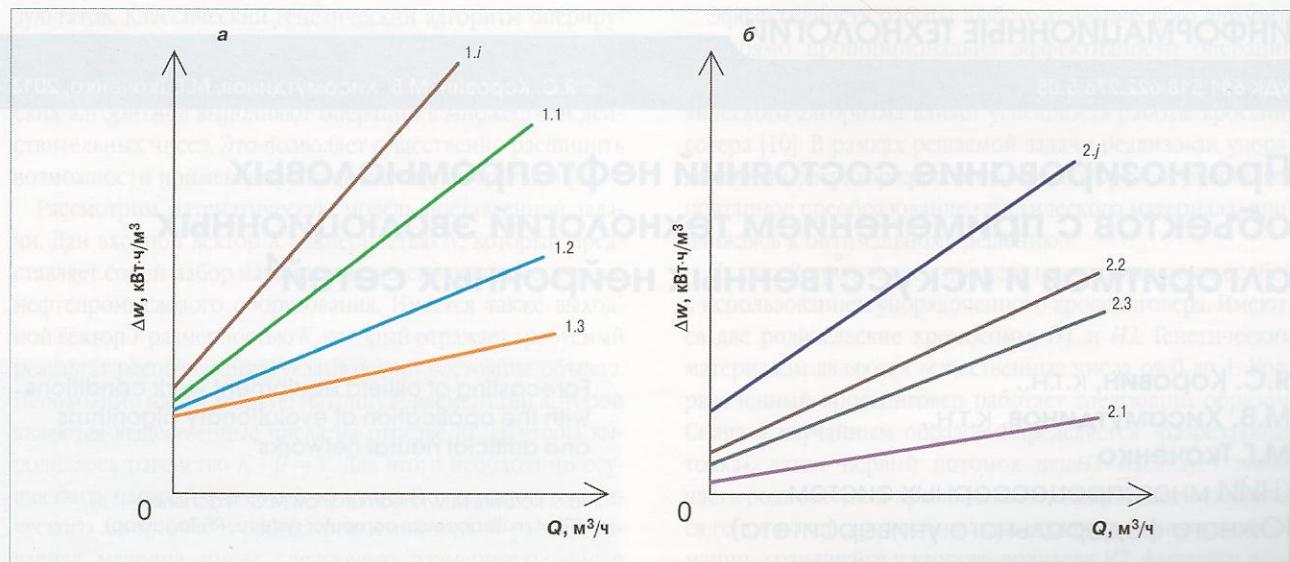


Рис. 2. Неупорядоченная структура элементов множества основных (а) и подпорных (б) насосных агрегатов

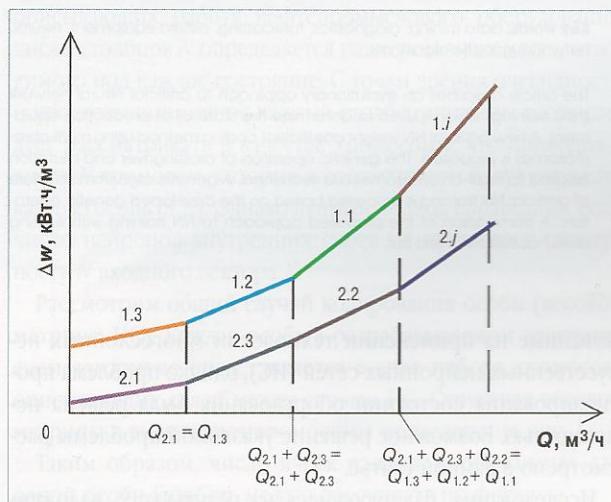


Рис. 3. НОК для оптимального состава основных и подпорных насосных агрегатов

$w_{\text{уд}}$  на выполнение планового задания по закачке. Данную задачу можно решить с использованием прикладных методов оптимизации, одним из которых является метод неопределенных множителей Лагранжа, применяемый для оптимального распределения нагрузки между электростанциями энергосистемы и других задач оптимизации в электротехнических комплексах [5].

Таким образом, разработанная методика позволяет определить оптимальный состав насосных агрегатов и при изменении объема планового задания очередность их включения/отключения при минимальном расходе электроэнергии на закачку воды. Кроме того, разработанная методика реализована в способе управления многомашинным электротехническим комплексом технологической системы ППД с использованием ЧРП [6]. Способ позволяет для выбранного состава насосных агрегатов КНС и подпорных насосных агрегатов обеспечить согласование режимов работы КНС с требуемыми объемами плановых заданий на закачку воды в нефтеносный пласт.

#### Список литературы

1. Фрайштетер В.П., Ниссенбаум И.А., Велиев М.К. Повышение технологической и энергетической эффективности кустовых насосных станций системы поддержания пластового давления // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 3. – С. 86-88.

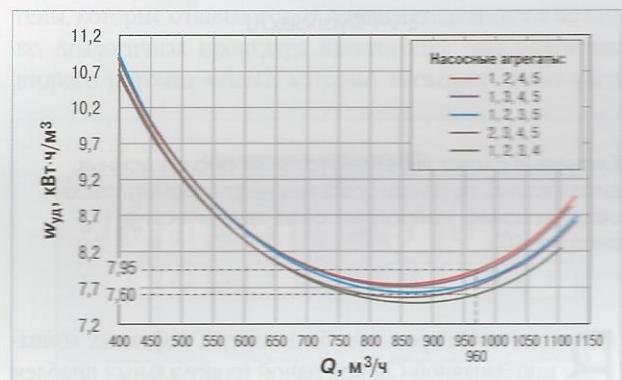


Рис. 4. Удельный расход электроэнергии  $w_{\text{уд}}$  на закачку для различных вариантов состава работающих насосных агрегатов КНС, полученных методом НОК

2. Фролов В.П., Воробьев В.В. Диагностика и энергосбережение в нефтедобыче. – Тюмень: ОАО СибНИИЭНГ, 2002. – 472 с.
3. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. – М.: Энергия, 1972. – 240 с.
4. Задача оптимального распределения дефицитных ресурсов при дискретном характере потребления / М.А. Паулаускас, А.В. Рашикнис, К.Л. Станенис, Г.А. Шаркнис // Труды Академии наук Литовской ССР. Сер. Б. – 1975. – Т. 5(90). – С. 145-151.
5. Веников В.А., Журавлев В.Г., Филиппова Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
6. Пат. 2493361 РФ, МПК E21B43/20 Способ управления много- машинным комплексом системы поддержания пластового давления // М.К. Велиев, В.В. Сушкин; заявитель и патенто- обладатель Тюменский гос. нефтегазовый университет. – №2012107206/03; заявл. 27.02.12; опубл. 20.09.13.

#### References

1. Frayshteiter V.P., Nissenbaum I.A., Veliev M.K., Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry, 2013, no. 3, pp. 86-88.
2. Frolov V.P., Vorob'ev V.V., Diagnostika i energosberezhenie v neftedobycche (Diagnostics and energy saving in oil extraction), Tyumen: Publ. of SibNIIENG OAO, 2002, 472 p.
3. Onishchenko G.B., Yun'kov M.G., Elektroprivod turbomekhanizmov (Electric drive of turbomechanisms), Moscow: Energiya Publ., 1972, 240 p.
4. Paulauskas M.A., Rashkinis A.V., Stanienis K.L., Sharknis G.A., Proceedings of Academy of Sciences of the Lithuanian SSR, Ser. B, 1975, V.5(90), pp. 145-151.
5. Venikov V.A., Zhuravlev V.G., Filippova T.A., Optimizatsiya rezhimov elektrostantsiy i energosistem (Optimization of power plants and power systems), Moscow: Energoatomizdat Publ., 1990, 352 p.
6. Patent no. 2493361 RF, MPK E21B43/20, Method for controlling multimachine complex of reservoir pressure maintenance system, Inventors: Veliev M.K., Sushkov V.V.