

УДК 621.51:621.515.4

doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160239

© Лухтура Ф.И.¹, Карнаух Н.В.², Медведева М.В.³, Ивашин В.Ю.⁴**О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ**

Рассмотрены вопросы, связанные с некоторыми способами повышения эффективности работы нагнетательных станций при неравномерной их нагрузке. Показаны примеры суточного и годового нагружения нагнетательных станций, рассмотрены характеристики графиков нагрузок станции. На основе анализа соотношения Россандера рассмотрен вариант распределения нагрузки между двумя типами установок: пиковыми и остальными установками станции с учетом переменной части приведенных затрат по станции, учитывающие среднегодовой удельный расход электроэнергии и ее расчетную стоимость, величину удельных капиталовложений в установки и их эффективность, амортизационные отчисления по установкам и др. Ввод пиковых «мощностей» позволяет повысить коэффициент нагрузки станции, при этом коэффициент заполнения графика нагрузки увеличивается, что приводит к снижению удельного расхода электроэнергии.

Ключевые слова: нагнетательная станция, нагнетатель, нагрузка, электроэнергия, пиковые установки, минимум приведенных затрат, эффективность.

Лухтура Ф.И., Карнаух Н.В., Медведева М.В., Ивашин В.Ю. Про підвищення ефективності роботи нагнітальних станцій. Розглянуто питання, пов'язані з деякими способами підвищення ефективності роботи нагнітальних станцій при нерівномірному їх навантаженні. Показані приклади добового і річного навантаження нагнітальних станцій, розглянуто характеристики графіків навантажень станції і споживання електроенергії: коефіцієнт заповнення (цільності) графіка навантажень або споживання, коефіцієнт використання максимуму навантаження, коефіцієнт нерівномірності графіка навантаження, що залежать від складу і режиму роботи споживачів продукції нагнітальних станцій. Для оптимального розподілу навантажень при паралельному і послідовному включенні нагнітачів агрегати великої потужності повинні працювати з максимальним ККД, а регулювання подачі (пікових навантажень) при паралельному включенні і регулювання напору при послідовному доцільно здійснювати насосами малої потужності з менш значущим ККД. Для визначення оптимальної частки пікових установок для покриття пікових навантажень нагнітальних станцій використана математична модель на основі співвідношення Россандера. Економічним критерієм, що визначає доцільність введення того чи іншого типу пікових установок і їх питому вагу на станції, є мінімум приведених витрат по станції в цілому. На основі аналізу цього рівняння розглянуто варіант розподілу навантаження між двома типами установок: піковими і іншими установками станції з урахуванням змінної частини наведених витрат по станції, що враховують середньорічну питому витрату електроенергії і її розрахункову вартість, величину і питому капіталовкладення в установки і їх ефективність, амортизаційні відрахування по установкам та ін. Введення пікових «потужностей» дозволяє підвищити коефіцієнт навантаження станції, при цьому коефіцієнт заповнення графіка навантаження збільшується, що призводить до зниження питомої витрати електроенергії. Показано суттєвий вплив зазначених характеристик графіків навантаження на ефективність роботи нагнітальних станцій.

¹ ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² студент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ ассистент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

⁴ студент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

Ключові слова: *нагнетательная станція, нагнітач, навантаження, електроенергія, пікові установки, мінімум приведених витрат, ефективність.*

F.I. Lukhtura, N.V. Karnaukh, M.V. Medvedieva, V.Yu. Ivashin. On the pumping stations efficiency increasing. *The issues related to some ways to improve the efficiency of pumping stations with their uneven load have been considered. Examples of daily and annual loading of pumping stations are shown, characteristics of stations load and power consumption graphs have been considered: the load graph factor or consumption graph, the limit load utilization factor, the load variation factor, depending on the consumers of the stations and their operation mode. For optimal distribution of loads with parallel and series switching on of superchargers, high power units must operate with maximum efficiency, while feed regulation (peak loads) with parallel switching and pressure control with series, should be carried out with low power pumps of less efficiency. A mathematical model based on the Rossander ratio is used to determine the optimal proportion of peak installations to cover peak loads of pumping stations. The economic criterion determining the feasibility of one or another type of peak installations and their share at the station is the minimum of the expenses for the station as a whole. Based on the analysis of this equation, a variant of load distribution between two types of installations has been considered: the peak installations and the rest of the installations at the station taking into account the variable part of the expenses at the station, and with due regard to the average annual specific energy consumption and its estimated cost, the amount of the specific investment in the installations, their efficiency, depreciation charges for the installations, etc. Peak "capacities" entry makes it possible to increase the station load factor, while this results in a decrease in specific energy consumption. The significant effect of the indicated characteristics of load graphs on the efficiency of the pumping stations has been shown.*

Keywords: *pumping station, supercharger, load, electric power, peak installations, minimum expenses, efficiency.*

Постановка проблеми. Актуальність розглянутих в статті питань визначається зростаючим значенням енергоефективності системи подачі і розподілу (СПР) сжатого газу і рідини для промислових підприємств і комунального господарства, котрим в сучасних умовах вітчизняні господарюючі суб'єкти і суспільство в цілому відводять першорядну роль. Насущна необхідність рішення цієї проблеми закріплена в Законі України від 01.07.1994 № 74/94-ВР «Об енергосбереженні». В зв'язі з ростом цін на електроенергію і, як наслідок, збільшенням витрат нагнетательних (і підвищувальних) станцій (НС), зв'язаних з оплатою електроенергії, питання ефективного і раціонального використання енергетичних ресурсів на НС стає дуже актуальним, підвищення її енергоефективності є перспективним напрямком зниження енергопотреблення НС. Визначаючу частину витрат на постачання продуктом НС споживачів складають експлуатаційні витрати систем подачі і розподілу (СПР) сжатого газу і рідини, що продовжують збільшуватися в зв'язі з ростом тарифів на електроенергію. З метою зниження енергоємності велике значення надається оптимізації СПР і НС в цілому. Нагнетательні станції, як один з основних структурних елементів СПР, в багатьох визначають її експлуатаційні і економічні показники роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [1-21] наведені рішення багатомірних оптимізаційних завдань, зв'язаних як з насосними, так і компресорними станціями для транспорту різних газів. В [5-6] представлений системний підхід до аналізу функціонування основних технологічних агрегатів компресорних станцій. Отримані залежності основних параметрів транспорту газу від режимів роботи технологічних установок, а також моделі і алгоритми, що забезпечують енергоефективну роботу магістральних газопроводів. В [7-19] показано вплив на хід оптимізаційних рішень: стану міських магістральних мереж (корозія, знос або занос, утворення відкладень і др.), здатних привести до необхідності зниження тиску, що потребує компенсувати відповідне падіння напору на ділянках, близьких до споживачів;

состояния (износ) оборудования повысительных станций (НС), обуславливающих необходимость совершенствования их работы или реконструкции для повышения надежности и КПД; развития городов и увеличения высотности домов, особенно при уплотнительной застройке, требующих обеспечения потребных подачи и напора для новых потребителей, в том числе за счет оснащения нагнетателями домов повышенной этажности, и многое другое. Вследствие изменения объемов производства по мере суточного потребления, агрегаты нагнетательной станции (НС) часто эксплуатируются в неоптимальных режимах с пониженным КПД, что может приводить к существенному перерасходу электроэнергии вплоть до 10%.

Совокупность указанных факторов является основанием для постановки задачи определения оптимальных параметров НС при имеющихся ограничениях входных напоров в условиях неопределенности и неравномерности фактических расходов. Поэтому представляется актуальным совершенствование методологических подходов, разработка моделей и комплексов, позволяющих оптимизировать параметры и состав повысительного оборудования НС и участков сети, в том числе при подготовке проектов. Создание потребного напора и подачи, а также определение в пределах НС оптимального числа и типа агрегатов с учетом расчетной подачи, обеспечат анализ вариантов схем покрытия переменной нагрузки НС. Полученные результаты могут быть интегрированы в задачу оптимизации работы НС и СПР в целом. Решение задачи снижения энергозатрат методом оптимизации работы НС требует построения математической модели системы снабжения потребителей и решения на ее основе оптимизационных задач методами математического программирования. Наиболее полные модели представлены в [20, 21]. Кроме того, по предварительным оценкам, до 50% энергозатрат НС-систем может быть сокращено за счет изменения состава повысительного (насосного, компрессорного) оборудования и способов управления.

Проведенный анализ существующей практики совершенствования СПР-системы позволил выявить ее некоторые недостатки:

1) в существующих инженерных инструментариях все элементы системы СПР рассматриваются по отдельности, без учета взаимного влияния НС и потребителей, обусловленного наличием технологических связей;

2) недостаточная информированность математических моделей относительно каждого насосного агрегата и оптимального соотношения их комплектов в случае регулирования переменной нагрузки, в т. ч. пиковой, и влияния на энергетическую характеристику всей НС.

Наиболее перспективным методом повышения эффективности технических решений и управления эксплуатацией НС с целью снижения энергозатрат является системный подход к исследованию СПР, позволяющий учитывать технологические связи ее элементов, а также влияние каждого агрегата или их совокупности на режим работы всей НС. Одним из эффективных путей экономии энергоресурсов является оптимизация состава и режимов работы оборудования. Она может производиться по следующим направлениям:

- выбор оптимального числа эксплуатируемых агрегатов;
- выбор оптимального распределения нагрузки между ними;
- оптимизация работы установок с использованием импульсного (циклического) подключения нагнетателя при работе на сеть [1-4] и др.;
- рациональное построение системы производства и транспорта сжатых газов и жидкостей для покрытия переменных нагрузок НС.

Менее исследованным является последний пункт оптимизации.

Цель работы – исследование и разработка оптимальных решений при выборе повысительного оборудования нагнетательных станций, рациональное построение системы производства и транспорта сжатых газов и жидкостей и улучшение работы НС при переменных графиках нагрузок с выбором оптимальной доли пиковых установок, в т. ч. для перспективных проектов.

Изложение основного материала. Любая энергосистема (с комплексом энергетического оборудования) производит столько энергии, сколько требуют в данный момент энергопотребители [22-24]. Этим определяется характер работы нагнетательных (компрессорных, насосных) станций (НС), тепловых электрических станций (ТЭС) и др. и их графики нагрузок, на которых изображается изменение вырабатываемой нагрузки во времени. Нагрузкой НС называется вырабатываемое станцией в данный момент количество энергоресурса (сжатого газа или жидко-

сти). Изменение вырабатываемой или потребляемой нагрузки во времени изображается в виде графика. В зависимости от отрезка времени, для которого строят графики нагрузок, различают суточные, недельные, сезонные (лето, зима и т. д.) и годовые графики. Графики нагрузок служат для выбора состава оборудования при проектировании станций, определения текущих и годовых технико-экономических показателей, распределения нагрузок и установления оптимальных режимов работы оборудования. Особенно большое значение для выбора режимов работы и эксплуатации оборудования станций имеют суточные графики нагрузок (рис. 1) [22-24]. Суточный график нагрузки нагнетательной станции, а значит график потребления электроэнергии, отличается значительной неравномерностью. Эта неравномерность объясняется неодинаковым режимом потребления продукции НС разными группами потребителей: коммунальными хозяйствами, промышленными потребителями.

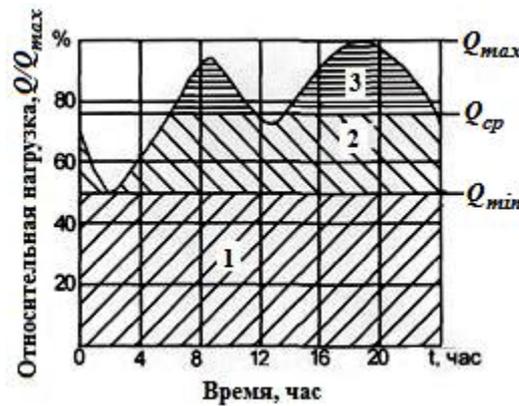


Рис. 1 – Суточный график производства продукции (сжатого газа или жидкости) и/или потребления электроэнергии нагнетательной станцией: 1 – базовая нагрузка; 2 – полупиковая нагрузка; 3 – пиковая нагрузка

В регионах, развитых в промышленном отношении, основной составляющей общей нагрузки НС могут быть промышленные потребители – приводы станков и механизмов промышленных предприятий и оросительные системы сельского хозяйства. К коммунальным потребителям относятся системы водоснабжения населения, тепловых сетей и др.

Как видно из представленного графика (на примере насосной станции системы водоснабжения населения и промышленных предприятий), нагрузка Q непрерывно изменяется, достигая в определенные моменты наибольшей (Q_{max}) и наименьшей (Q_{min}) величин. График является обычно двугорбым, т. е. имеет два пика – утренний и вечерний максимумы нагрузок. Ночной провал нагрузок связан с тем, что в этот период сохраняется только нагрузка трехсменных предприятий (предприятий с непрерывным циклом). Примерно в 6-8 часов утра нагрузка возрастает в связи с началом работы остальных предприятий, а также увеличением коммунально-бытовой нагрузки. Провал потребления нагрузки наблюдается в 12-14 часов в связи со снижением коммунально-бытовой нагрузки. Максимальная величина нагрузки достигается в вечерние часы из-за резкого увеличения этой нагрузки. Графики нагрузки видоизменяются в зависимости от времени года, от дней недели, от снабжения потребителей различными видами продукции, от метеорологических факторов, состояние магистральных сетей и др. Что касается графиков нагрузки компрессорных станций, то для предприятий с непрерывным циклом в течение суток характерны циклические колебания потребления сжатого воздуха. Для некоторых предприятий можно в этот период выделить несколько пиковых участков максимальной нагрузки на НС, в часы которых для производства необходимого количества сжатого воздуха требуются ресурсы большинства агрегатов, находящихся на станции или в работе. В оставшиеся периоды времени нагрузка на НС снижается настолько, что агрегаты могут быть выведены в глубокое дросселирование или из работы. На предприятии с дискретным циклом, например, механическом, работающем, как правило, в одну-две смены с двумя выходными днями в неделю, сжатый воздух используется для привода пневмоинструмента и различных исполнительных механизмов в прессовом, штамповочном, кузнечном и других участках производства. По-

ребление сжатого воздуха в течение смены пребывает примерно на одном уровне. В нерабочее время сжатый воздух не потребляется, компрессоры могут быть остановлены [8].

Площадь графика выражает в определенном масштабе количество производимой за сутки продукции (или потребляемой электроэнергии). При этом ее можно разбить на три зоны: пиковая часть суточного графика ограничивается горизонталями, проходящими через максимальное и среднее (Q_{cp}) значения нагрузки (зона 3), полупиковая часть графика (зона 2) ограничивается линиями, проходящими через среднюю и минимальную нагрузку, остальная часть графика нагрузки (зона 1) называется базовой.

Большое значение имеет годовой график продолжительности нагрузки (рис. 2).

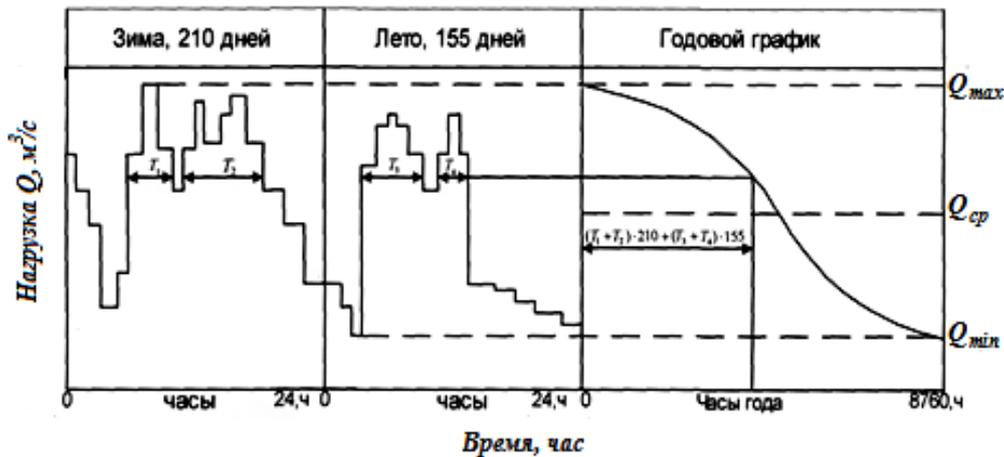


Рис. 2 – Формализованный годовой график производства сжатого газа или жидкости (и/или потребления электроэнергии)

При построении графика по горизонтальной оси откладывается продолжительность (число часов) данной нагрузки (в невисокосном году $T_2 = 8760$ часов), а по вертикали – ее вершина. Соответствующие абсциссы характеризуют общую продолжительность данной нагрузки в течение года и всех нагрузок выше данной. При построении принята определенная продолжительность зимнего и летнего периодов.

Площадь под графиком по продолжительности определяет годовую выработку продукции НС (или соответственное годовое потребление электроэнергии)

$$V_2 = \int_0^{T_2} QdT. \quad (1)$$

Можно определить величину V_2 приближенно, если знать годовое число часов работы нагнетателей (T_p) и среднегодовую нагрузку Q_{cp}

$$V_2 = Q_{cp} \cdot T_p. \quad (2)$$

Если принять число часов годового использования (T_{max}) максимума нагрузки (Q_{max}), то годовая выработка составит

$$V_2 = Q_{max} \cdot T_{max} = Q_{max}(g_{max}T_2), \quad (3)$$

где величина $g_{max} = \frac{T_{max}}{T_2}$ – коэффициент использования максимума нагрузки.

В общем случае

$$T_p = e \cdot T_2, \quad (4)$$

где $e \leq 1$ – коэффициент рабочего времени.

Если известна годовая выработка продукции НС (сжатого газа или жидкости) V_2 , то средняя нагрузка составит величину

$$Q_{cp} = \frac{V_2}{T_p} = \frac{Q_{max}T_{max}}{eT_2} = \frac{Q_{max}g_{max}}{e}. \quad (5)$$

Для анализа графика нагрузок нагнетательной станции можно ввести следующие показатели:

- коэффициент заполнения (плотности) графика нагрузки

$$m = \frac{V_z}{V_{max}} = \frac{Q_{cp} T_p}{Q_{max} T_z} = \left(\frac{T_{max}}{e T_z} \right) \frac{T_p}{T_z} = \frac{T_{max}}{T_p} \frac{T_p}{T_z} = \frac{T_{max}}{T_z} = f_{cp} e = g_{max}, \quad (6)$$

где $f_{cp} = \frac{Q_{cp}}{Q_{max}}$ – коэффициент средней нагрузки;

- коэффициент неравномерности графика нагрузки

$$m_0 = \frac{Q_{min}}{Q_{max}}. \quad (7)$$

Как видно из (6), коэффициент заполнения графика нагрузки численно совпадает с коэффициентом использования максимума нагрузки.

Показатели m и m_0 графиков нагрузки зависят от состава и режима работы нагнетателей (потребителей электроэнергии), от доли «энергоёмких» потребителей. Их значения увеличиваются с ростом этой доли.

Нагрузка определяется многими внешними, случайными воздействиями. Чем больше относительное значение этой нагрузки, тем «неспокойнее» характер суммарного графика системы. Например, уже при соотношении коммунально-бытовой и промышленной нагрузки 1:5 системный график приобретает выраженную пиковость, а его коэффициент неравномерности m_0 приближается к 50% (СПР со смешанной нагрузкой). При соотношении коммунально-бытовой и промышленной нагрузки 1:10 коэффициент неравномерности составляет 0,85-0,90 и нагрузки сглаживаются.

В отдельных НС-системах коэффициент неравномерности составляет величину $m_0 = 0,55 \div 0,85$; коэффициент заполнения графика $m = 0,8 \div 0,92$. В промышленно-развитых районах эти показатели лежат в пределах 0,35 ÷ 0,52 и 0,67 ÷ 0,79, соответственно.

Более «пиковый» характер нагрузки определяется большими коммунально-бытовыми нагрузками, меньшей загрузкой вечерних и ночных смен в промышленности.

Маневренной характеристикой нагнетателя (компрессора, насоса) или станции в целом является коэффициент регулирования

$$K_{pez} = \frac{R}{Q_{max}} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} = 1 - \frac{Q_{min}}{Q_{max}}, \quad (8)$$

где R – диапазон регулирования.

Для нагнетателя (нагнетательной станции) Q_{max} , Q_{min} – максимальная и минимальная нагрузка (m^3/c). Для станции:

$$K_{pez} = 1 - \frac{Q_{min}}{Q_{max}} = 1 - m_0. \quad (9)$$

Чем ближе K_{pez} к единице, тем больше возможности агрегатов НС для покрытия неравномерностей графика, и наоборот: чем меньше этот коэффициент, тем меньше оборудование может принимать участие в регулировании графика. На величину K_{pez} и глубину «разгрузки» нагнетателей влияет наличие границы помпажа.

Важной динамической характеристикой графика нагрузки является скорость изменения нагрузки dQ/dT . Изменение нагрузки можно выразить в % включенной «мощности» НС за короткое время.

При решении задачи оптимального распределения нагрузки между установками НС можно использовать различные методы (в т. ч. метод относительных приростов КПД). При этом в качестве критерия оптимизации используют величину суммарного расхода электроэнергии [25, 26]. Решение задачи осуществляют с использованием различных математических приемов, существенно скрывающих наглядность решения и полученных результатов, например, используя методику из литературного источника [27]. Однако существует более простой инженерный метод (подход), который может контролировать правильность использования сложного математического аппарата и трудоемких вычислений, достаточно широко известный при выборе структуры и оптимальной работы, например, насосной станции [27]:

$$\Sigma N = N_1 + N_2 + \dots + N_i; \quad (10)$$

$$\eta_{насоса} = \frac{N_n}{N_{затр}} = \frac{\rho g Q H}{N_{затр}}; \quad N_{затр} = \frac{N_n}{\eta_{насоса}} = \frac{\rho g Q H}{\eta_{насоса}},$$

где $N_{затр}$, N_n – соответственно, потребляемая и полезная мощность; Q , H , $\eta_{насоса}$ – производительность, создаваемый напор и КПД насоса, соответственно.

Эффективность использования энергоустановок (насосов) можно оценить, согласно (10), по формуле

$$\Sigma N_{затр} = \frac{\rho g Q H}{\eta_{насоса}} = \frac{\rho g Q_1 H_1}{\eta_{н1}} + \frac{\rho g Q_2 H_2}{\eta_{н2}} + \dots + \frac{\rho g Q_i H_i}{\eta_{ни}};$$

- при параллельном включении, например, насосов

$$\frac{\Sigma N_{затр}}{\rho g H} = \frac{Q}{\eta_{насоса}} = \frac{Q_1}{\eta_{н1}} + \frac{Q_2}{\eta_{н2}} + \dots + \frac{Q_i}{\eta_{ни}}; \quad (11)$$

$$\Sigma Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_i;$$

- при последовательном их включении

$$\frac{\Sigma N_{затр}}{\rho g Q} = \frac{H}{\eta_{насоса}} = \frac{H_1}{\eta_{н1}} + \frac{H_2}{\eta_{н2}} + \dots + \frac{H_i}{\eta_{ни}}; \quad (12)$$

$$\Sigma H = H_1 + H_2 + \dots + H_i.$$

Из выражений (11), (12) следует [25, 26], что для оптимального распределения нагрузок при параллельном и последовательном включении насосы большой мощности должны работать с максимальным КПД, а регулирование подачи Q (пиковых нагрузок) при параллельном включении и регулирование напора H при последовательном целесообразно осуществлять насосами малой мощности с менее значимым КПД. На этом основании и в соответствии с тремя зонами суточного графика нагрузки НС (или используемые установки на них) можно разделить на базовые, полупиковые и пиковые нагнетательные станции или установки.

Для базовых НС или их установок число часов использования установленной мощности может составлять порядка 2000-7500 ч/год, полупиковых – 2000-5000 ч/год, пиковых – 500-2000 ч/год. С течением времени морально устаревшие установки НС, имеющие меньшую экономичность, могут переходить постепенно в ряд полупиковых и пиковых.

Маневренность НС в целом зависит от соотношения «мощностей» различных типов, т. е. от структуры генерирующих «мощностей». По аналогии с производством электроэнергии на ТЭС [22-24] число часов использования установленной мощности на НС определяет структуру приведенных затрат на производство продукции (сжатого газа и жидкости) и требования к экономичности, маневренности и стоимости НС.

Вопросы сопоставления различных способов регулирования или покрытия пиковых нагрузок, выбора оптимальной доли мощности пиковых установок тесно связаны с выбором оптимальной структуры и эксплуатации всей НС. При этом необходимо рассмотреть размещение, количество и очередность монтажа (строительства) всех типов нагнетателей, выбрать параметры сети, учесть наличие межагрегатных (системных и технологических) связей и т. п.

Рассмотрим, на основе методики [23], только частную задачу – определение доли пиковых «мощностей» на нагнетательной станции при условии, что структура НС (кроме пиковых установок) определена, известны характеристики всех установленных в НС агрегатов, энергетический баланс задан. Такое решение задачи может быть полезным также при предварительном выборе пиковых мощностей на основе предполагаемых структуры НС и графиков нагрузок. Этим обуславливается определенная приближенность искомого решения.

Экономическим критерием, определяющим целесообразность ввода того или иного типа пиковых установок и их удельный вес в НС, является минимум приведенных затрат по НС в целом

$$Z = 3_1 \bar{V}_1 + 3_2 \bar{V}_2 + \dots + 3_k \bar{V}_k \rightarrow \min. \quad (13)$$

Здесь $3_1, 3_2, \dots, 3_k$ – удельные приведенные затраты по энергопотребляемым установкам различных типов; $\bar{V}_1, \bar{V}_2, \dots, \bar{V}_k$ – относительное количество продукта НС, вырабатываемое

установками одного типа; k – количество типов установок на нагнетательной станции (в НС-системе).

Кривым продолжительности нагрузок придадим аналитический вид. Такой график в относительных единицах представлен на рис. 3.

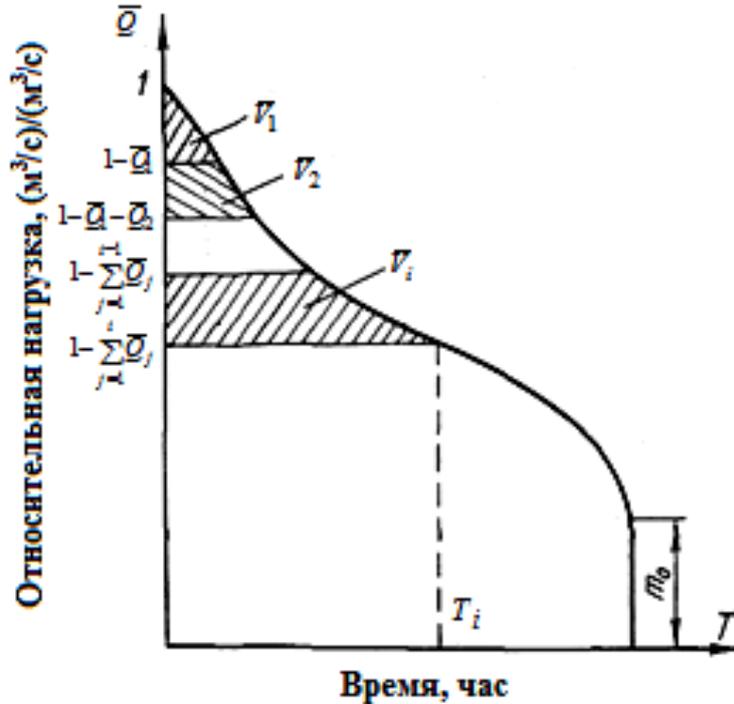


Рис. 3 – График нагрузки в относительных величинах

На рисунке $T_i = \frac{t}{T_2}$ (t – текущее время, T_2 – число часов в году); относительная нагрузка

$\bar{Q} = \frac{Q(t)}{Q_n}$ ($Q(t)$ – текущая нагрузка, Q_n – нагрузка, равная номинальной); $m_0 = \frac{Q_{min}}{Q_n}$ – коэффициент неравномерности графика нагрузки (Q_{min} – минимальная нагрузка).

Относительную текущую нагрузку представим в виде

$$\bar{Q} = a + bT^c, \tag{14}$$

где a, b, c – коэффициенты, зависящие от конфигурации графика нагрузки.

Из выражения (14) следует, что при $T = 1$ $\bar{Q} = a + b = m_0$, при $T = 0$ $\bar{Q} = a = 1$. Таким образом, $b = m_0 - 1$.

Тогда годовая выработка продукции НС (в т. ч. потребление электроэнергии) установками (коэффициент заполнения графика нагрузки) составит

$$m = \int_0^1 \bar{Q} dT = \int_0^1 [1 - (1 - m_0)T^c] dT = 1 - \frac{1 - m_0}{c + 1},$$

откуда $c = \frac{m - m_0}{1 - m}$. Подставив значения коэффициентов a, b и c в (14), получим формулу

Россандера

$$\bar{Q} = 1 - (1 - m_0)T^c = 1 - (1 - m_0)T^{\frac{m - m_0}{1 - m}}. \tag{15}$$

Потребление электроэнергии каждым типом энергопотребляющих установок, работающих в переменной части графика нагрузок, составит (рис. 3)

$$\begin{aligned} \bar{V}_1 &= \int_1^{1-\bar{Q}_1} Td\bar{Q}; \\ \bar{V}_2 &= \int_{1-\bar{Q}_1}^{1-\bar{Q}_1-\bar{Q}_2} Td\bar{Q}; \\ &\dots\dots\dots \\ \bar{V}_i &= \int_{1-\sum_{j=1}^{i-1}\bar{Q}_j}^{1-\sum_{j=1}^i\bar{Q}_j} Td\bar{Q}. \end{aligned} \tag{16}$$

Проинтегрировав выражения (16) с учетом (15), получим

$$\begin{aligned} \bar{V}_1 &= (m - m_0) \left(\frac{1}{1 - m_0} \right)^\beta \bar{Q}_1^\beta; \\ \bar{V}_2 &= (m - m_0) \left(\frac{1}{1 - m_0} \right)^\beta \left[(\bar{Q}_1 + \bar{Q}_2)^\beta - \bar{Q}_1^\beta \right]; \\ &\dots\dots\dots \\ \bar{V}_i &= (m - m_0) \left(\frac{1}{1 - m_0} \right)^\beta \left[\left(\sum_{j=1}^i \bar{Q}_j \right)^\beta - \left(\sum_{j=1}^{i-1} \bar{Q}_j \right)^\beta \right], \end{aligned} \tag{17}$$

где $\beta = \frac{1 - m_0}{m - m_0}$.

Переменную часть приведенных затрат по НС-системе представим в виде

$$Z_v = \sum_{i=1}^k b_i C_i \bar{V}_i + \frac{1}{T_c} \sum_{i=1}^k \sigma_i \kappa_i \bar{Q}_i, \tag{18}$$

где C_i – расчетная стоимость электроэнергии, потребляемой установками i -того типа; σ_i – коэффициент, учитывающий эффективность капиталовложений и амортизационные отчисления по i -м установкам; b_i , κ_i – среднегодовой удельный расход электроэнергии и удельные капиталовложения в установки i -того типа, соответственно.

С точностью до 5% величину b_i можно определить по формуле

$$b_i = b_{ni} \left(1 + \bar{\Xi}_{xi} \frac{\bar{Q}_i T_i - \bar{V}_i}{\bar{V}_i} \right), \tag{19}$$

где b_{ni} – удельный расход электроэнергии установками i -того типа при номинальной нагрузке; $\bar{\Xi}_{xi}$ – относительный часовой расход электроэнергии на холостой ход установок; T_i – предельное число часов работы установок i -того типа (рис. 3).

При нахождении минимума Z_v необходимо учесть ограничение $\sum \bar{Q}_i = 1$. Поэтому воспользуемся методом Лагранжа для нахождения условного экстремума. Составим функцию

$$\varphi = Z_v - \lambda \left(\sum_{i=1}^k \bar{Q}_i - 1 \right), \tag{20}$$

где λ – множитель Лагранжа.

Для нахождения оптимальных значений $\bar{Q}_1, \bar{Q}_2, \dots, \bar{Q}_k$ необходимо решить систему уравнений

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \bar{Q}_i} = 0, \quad (i = 1, \dots, k).$$

Взяв производные (20) по \bar{Q}_i , получим систему уравнений

$$\begin{aligned} & (1 - m_0)^{-\frac{1}{c}} \left\{ b_1 \Pi_1 \bar{Q}_1^{\frac{1}{c}} + b_2 \Pi_2 \left[(\bar{Q}_1 + \bar{Q}_2)^{\frac{1}{c}} - (\bar{Q}_1)^{\frac{1}{c}} \right] + \dots + \right. \\ & \left. + b_k \Pi_k \left[1 - (\bar{Q}_1 + \bar{Q}_2 + \dots + \bar{Q}_{k-1})^{\frac{1}{c}} \right] \right\} + \frac{1}{T_2} \sigma_1 \kappa_1 = \lambda; \\ & (1 - m_0)^{-\frac{1}{c}} \left\{ b_2 \Pi_2 (\bar{Q}_1 + \bar{Q}_2)^{\frac{1}{c}} + b_3 \Pi_3 \left[(\bar{Q}_1 + \bar{Q}_2 + \bar{Q}_3)^{\frac{1}{c}} - (\bar{Q}_1 + \bar{Q}_2)^{\frac{1}{c}} \right] + \dots + \right. \\ & \left. + b_k \Pi_k \left[1 - (\bar{Q}_1 + \bar{Q}_2 + \dots + \bar{Q}_{k-1})^{\frac{1}{c}} \right] \right\} + \frac{1}{T_2} \sigma_2 \kappa_2 = \lambda; \\ & \dots \dots \dots \\ & (1 - m_0)^{-\frac{1}{c}} \left[b_k \Pi_k (\bar{Q}_1 + \bar{Q}_2 + \dots + \bar{Q}_k)^{\frac{1}{c}} \right] + \frac{1}{T_2} \sigma_k \kappa_k = \lambda. \end{aligned}$$

Для решения этой системы (для исключения множителя λ) вычитаем последовательно из каждого предыдущего уравнения последующее. После некоторых преобразований получим систему уравнений для определения оптимальных значений \bar{Q}_i :

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{1(onm)} &= (1 - m_0) \left[\frac{\sigma_1 \kappa_1 - \sigma_2 \kappa_2}{T_2 (b_2 \Pi_2 - b_1 \Pi_1)} \right]^c; \\ \bar{Q}_{2(onm)} &= (1 - m_0) \left[\frac{\sigma_2 \kappa_2 - \sigma_3 \kappa_3}{T_2 (b_3 \Pi_3 - b_2 \Pi_2)} \right]^c - \bar{Q}_{1(onm)}; \\ & \dots \dots \dots \\ \bar{Q}_{i(onm)} &= (1 - m_0) \left[\frac{\sigma_i \kappa_i - \sigma_{i+1} \kappa_{i+1}}{T_2 (b_{i+1} \Pi_{i+1} - b_i \Pi_i)} \right]^c - \sum_{j=1}^{i-1} \bar{Q}_{j(onm)}. \end{aligned} \tag{21}$$

Система (21) решается последовательно, начиная с определения $\bar{Q}_{1(onm)}$; для установок нагнетательной станции, работающих в базовой части графика нагрузок, $\bar{Q}_{onm} = 1 - \sum_{i=1}^{k-1} \bar{Q}_i$. Величины b_i для установок разных типов рассчитываются по формуле (19).

Рассмотрим вариант распределения нагрузки между двумя типами установок: пиковыми и остальными установками нагнетательной станции. Для последних примем, что нагрузка между ними распределена оптимальным образом (с учетом работы и пиковых установок), а их технико-экономические показатели равны средневзвешенным значениям

$$\Pi_c = \sum_{i=1}^{k-1} \bar{Q}_i \Pi_i; \quad b_{нс} = \sum_{i=1}^{k-1} \bar{Q}_i b_{ni}; \quad \kappa_c = \sum_{i=1}^{k-1} \bar{Q}_i \kappa_i; \quad \bar{\vartheta}_{xc} = \sum_{i=1}^{k-1} \bar{Q}_i \vartheta_{xi}. \tag{22}$$

Тогда в соответствии с (21) оптимальная доля мощности пиковых установок составит

$$\bar{Q}_{n(onm)} = (1 - m_0) \left[\frac{\sigma_c \kappa_c - \sigma_n \kappa_n}{T_2 (b_n \Pi_n - b_c \Pi_c)} \right]^c. \tag{23}$$

Ввод пиковых «мощностей» позволяет повысить коэффициент загрузки остальных установок в НС-системе. При этом коэффициент заполнения графика нагрузки НС увеличивается и становится равным

$$m_c = \frac{m - M \cdot \bar{Q}_{n(onm)}^\beta}{1 - \bar{Q}_{n(onm)}}, \quad M = (m - m_0) \left(\frac{1}{1 - m_0} \right)^\beta. \tag{24}$$

И если среднегодовой удельный расход электроэнергии по НС-системе до ввода пиковых установок составлял (с точностью до 5%)

$$b_c = b_{nc} \left(1 + \bar{\mathcal{E}}_{xc} \frac{1-m}{m} \right), \quad (25)$$

то после их ввода он уменьшается по базовым установкам до величины

$$b'_c = b_{nc} \left(1 + \bar{\mathcal{E}}_{xc} \frac{1-m_c}{m_c} \right). \quad (26)$$

Как показывают расчеты доля пиковых «мощностей» (нагнетателей) может составлять для различных станций от 10 до 15%, ввод пиковых нагнетателей в НС-системах может повышать коэффициент заполнения графика нагрузки НС на 5-8%. При снижении коэффициентов заполнения и неравномерности графика нагрузки величина пиковой мощности нагнетателей увеличивается. Полученные зависимости позволяют решить поставленную задачу в приближенной постановке.

Поэтому более полная структурно-параметрическая оптимизация параметров в рамках НС может быть достигнута реализацией, например, следующих мероприятий [5, 6]: 1) математическая обработка статистических эксплуатационных данных НС по параметрам и объемам перекачиваемого продукта (газа, жидкости) и энергетическим показателям оборудования; 2) проведение экспериментальных измерений и технологических испытаний нагнетателей и вспомогательного оборудования (например, теплообменных аппаратов воздушного охлаждения компримированного газа и др.) с целью получения и анализа их фактических рабочих и энергетических характеристик; 3) анализ обследованных линейных участков трубопроводов с целью получения их эксплуатационных характеристик во всех возможных режимах работы магистральных трубопроводов (МТ); 4) исследование энергетической эффективности перспективных технологий, направленных на регулирование режимов работы НС для покрытия переменной нагрузки, и рационального выбора технических средств для их реализации.

Таким образом, понизить энергозатраты НС можно определением более эффективного комплекта работающих повысительных агрегатов для покрытия базовой нагрузки НС, содержащей не более k агрегатов, обеспечивающих заданную суммарную подачу и напор на выходе. При этом суммарное энергопотребление подобранных агрегатов должно быть минимальным. При покрытии пиковых нагрузок при использовании соответствующего комплекта (или типов) нагнетателей (в т. ч. с более низкими технико-экономическими показателями) для сохранения режима работы нагнетательной станции может использоваться метод дросселирования общей линии нагнетания (особенно для насосов), понижающего напор на общей линии и, соответственно, для каждого нагнетателя в отдельности на некоторую величину. Значение этой величины для каждого k -ого набора агрегатов определяется из соответствующей задачи оптимизации.

Выводы

1. С использованием представленной аналитической (технико-экономической) модели системы нагнетания жидкостей в сеть при переменных нагрузках определены основные параметры, влияющие на состав (долю) и режимы подключения нагнетателей для покрытия нагрузок в пиковой и полупиковой части графика нагрузок.
2. Для повышения эффективности работы НС-системы представлено решение задачи конструктивной оптимизации НС, заключающейся в подборе оптимального набора нагнетателей для обеспечения заданного режима работы. При подборе используется встроенная редактируемая база пиковых агрегатов.
3. Полученные результаты разработки инженерной методики для расчета оптимального состава оборудования НС в системах газо- и водоснабжения позволяют осуществлять выбор более эффективных конструктивных их характеристик при проектировании систем газо- и водоснабжения и способов эксплуатации нагнетателей на соответствующую электрическую мощность.
4. При дальнейших исследованиях в рассматриваемом направлении целесообразным являются последующие уточнения, которые могут быть сделаны на более точных моделях с использованием ЭВМ, что позволит получить более точные и эффективные методики для оптимизации работы НС в системах газо- и водоснабжения.

Список использованных источников:

1. Бондаренко Г.А. Инженерная теория регулирования винтовых компрессоров переводом на холостой ход / Г.А. Бондаренко // Вісник Сумського державного університету. – 2003. – № 3 (49). – С. 63-71. – (Серія : Технічні науки).
2. Бондаренко Г.А. Некоторые особенности работы компрессоров на пневмосеть / Г.А. Бондаренко, В.В. Шишов // Проектирование и моделирование. Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – № 1 (11). – С. 62-65.
3. Бондаренко Г.А. Винтовые компрессоры в системах обеспечения сжатым воздухом / Г.А. Бондаренко, П.Е. Жарков. – Сумы : Изд-во СумГУ. – 2003. – 130 с.
4. Бондаренко Г.А. Винтовые воздушные компрессорные станции / Г.А. Бондаренко. – Сумы : Изд-во СумГУ. – 245 с.
5. Крюков О.В. Регулирование производительности газоперекачивающих агрегатов преобразователями частоты / О.В. Крюков // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – № 3. – С. 21-24.
6. Крюков О.В. Комплексная оптимизация энергопотребления агрегатов компрессорных станций / О.В. Крюков // Газовая промышленность. – 2013. – С. 30-33.
7. Стогней В.Г. Оптимизация режимов работы компрессорных станций промышленных предприятий : учебное пособие / В.Г. Стогней, А.В. Бараков. – Воронеж : Воронеж. политехн. ин-т. – 1987. – 87 с.
8. Кочкин П.А. Методы повышения эффективности работы компрессорных станций / П.А. Кочкин, И.Н. Мухин // Информатизация и системы управления в промышленности. – 2009. – № 3 (23). – Режим доступа: <http://isup.ru/articles/6/337/>.
9. Жигулин И.Н. Оптимизация работы компрессорной станции промышленного предприятия / И.Н. Жигулин // Транспорт-2014 : труды междунар. науч.-практ. конф. (22-25 апреля 2014 г.; Ростов-на-Дону). – Ростов-на-Дону : Изд-во Ростовский государственный университет путей сообщения, 2014. – Ч. 2. – С. 224-226.
10. Штейнмиллер О.А. Статическая и полирежимная оптимизация параметров насосного оборудования системы «районная насосная станция–абонентская сеть» / О.А. Штейнмиллер, А.Н. Ким // Вестник гражданских инженеров. – 2009. – № 2 (19). – С. 41-45.
11. Штейнмиллер О.А. Численные методы решения задачи оптимального синтеза повысительных систем подачи и распределения воды микрорайона / О.А. Штейнмиллер // Вестник гражданских инженеров. – 2009. – № 4 (21). – С. 81-87.
12. Сумароков С.В. Математическое моделирование систем водоснабжения / С.В. Сумароков. – Новосибирск : Наука, 1983. – 167 с.
13. Турк В.И. Насосы и насосные станции / В.И. Турк. – М. : Стройиздат, 1976. – 304 с.
14. Шевелев Ф.А. Водоснабжение больших городов зарубежных стран / Ф.А. Шевелев, Г.А. Орлов. – М. : Стройиздат, 1987. – 347 с.
15. Штейнмиллер О.А. Задача оптимального синтеза повысительных систем подачи и распределения воды (СПРВ) микрорайона / О.А. Штейнмиллер, А.Н. Ким // Вестник гражданских инженеров. – 2009. – № 1 (18). – С. 80-84.
16. Евдокимов А. Минимизация функций и ее приложение к задачам автоматизированного управления инженерными сетями / А. Евдокимов. – Харьков : Вища школа, 1985 – 288 с.
17. Евдокимов А. Оптимальные задачи на инженерных сетях / А. Евдокимов. – Харьков : Вища школа, 1976. – 153 с.
18. Копытин А.Н. Современные подходы в определении эффективности работы насосных агрегатов / А.Н. Копытин, О.Ю. Царинник // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2007. – № 8. – С. 14-16.
19. Костин В.И. Регулирование производительности нагнетателей при смешанной схеме совместной работы / В.И. Костин // Известия ВУЗов. Строительство. – Новосибирск, 2006. – № 6. – С. 61-64.
20. Абрамов Н.Н. Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды / Н.Н. Абрамов. – М. : Стройиздат, 1972. – 288 с.
21. Алексеев М.И. Методические принципы прогнозирования расходов воды и надежности систем водоснабжения и водоотведения / М.И. Алексеев, Г.Г. Кривошеев // Вестник РААСН. – 1999. – Вып. 2. – С. 13-17.

22. Сапрыкин Г.С. Исследование операций в энергетических расчетах / Г.С. Сапрыкин. – Саратов : СПИ, 1974. – 127 с.
23. Сапрыкин Г.С. Оптимальная доля пиковых установок в перспективных энергосистемах / Г.С. Сапрыкин, В.Ф. Галушко // Известия высших учебных заведений. Энергетика. – 1975. – № 1. – С. 75-77.
24. Самойлович Г.С., Трояновский Б.М. Переменные и переходные режимы в паровых турбинах / Г.С. Самойлович, Б.М. Трояновский. – М. : Энергоиздат, 1982. – 496 с.
25. Лухтура Ф.И. Об оптимизации работы энергетических установок / Ф.И. Лухтура // Университетская наука-2014 : сб. тезисов докл. междунар. науч.-техн. конф. – Мариуполь, 2014. – Т. 2. – С. 23-25.
26. Тепловые и атомные электростанции : справочник / Под общ. ред. А.В. Клименко и В.М. Зорина. – М. : Изд-во МЭИ, 2003. – 648 с. – (Теплоэнергетика и теплотехника : справ. сер. : в 4-х кн.; Кн. 3).
27. Житаренко В.М. Диаграммы оптимального распределения нагрузок между котлами ТЭЦ / В.М. Житаренко // Вісник Приазовського державного технічного університету / ДВНЗ «ПДТУ». – Мариуполь, 2014. – Вип. 28 – С. 118-123. – (Серія : Технічні науки).

References:

1. Bondarenko, G.A. Inzhenernaya teoriya regulirovaniya vintovykh kompressorov perevodom na kholostoy khod [Engineering theory of regulation of screw compressors transfer to idle]. *Vіsnik Sums'kogo derzhavnogo universitetu. Seriya Tekhnіchnі nauki – The Sumy State University Bulletin. Seriya Tehnichni science*, 2003, no. 3 (49), pp. 63-71. (Rus.)
2. Bondarenko G.A., Shishov V.V. Nekotoryye osobennosti raboty kompressorov na pnevmoset' [Some features of the operation of compressors on the pneumatic network]. *Proyektirovaniye i modelirovaniye. Kompresornoye i energeticheskoye mashinostroyeniye – Design and modeling. Compressor and power engineering*, 2008, no. 1 (11), pp. 62-65. (Rus.)
3. Bondarenko G.A., Zharkov G.A. Vintovyye kompressory v sistemakh obespecheniya szhatym vozdukhom [Screw compressors in compressed air supply systems]. Sumy, Izd-vo SumGU Publ., 2003. 130 p. (Rus.)
4. Bondarenko G.A. Vintovyye vozdushnyye kompressornyie stantsii [Screw air compressor stations]. Sumy, Izd-vo SumGU Publ. 245 p. (Rus.)
5. Kryukov O.V. Regulirovaniye proizvoditel'nosti gazoperekachivayushchikh agregatov preobrazovatelyami chastoty [Regulation of the performance of gas pumping units frequency converters]. *Kompresornaya tekhnika i pnevmatika – Compressors and pneumatics*, 2013, no. 3, pp. 21-24. (Rus.)
6. Kryukov O.V. Kompleksnaya optimizatsiya energopotrebleniya agregatov kompressornykh stantsiy [Comprehensive optimization of power consumption of compressor station units]. *Gazovaya promyshlennost' – Gas industry*, 2013, pp. 30-33. (Rus.)
7. Stogney V.G., Barakov A.V. Optimizatsiya rezhimov raboty kompressornykh stantsiy promyshlennykh predpriyatiy: ucheb. posobiye [Optimization of operating modes of compressor stations of industrial enterprises: proc. manual]. Voronezh, Voronezh. politekhn. in-t Publ., 1987. 87 p. (Rus.)
8. Kochkin P.A., Mukhin I.N. Metody povysheniya effektivnosti raboty kompressornykh stantsiy [Methods to improve the efficiency of the compressor stations]. *Informatizatsiia i sistemy upravleniia v promyshlennosti – Informatization and control systems in the industry*, 2009, no. 3 (23). Available at: <http://isup.ru/articles/6/337/> (Accessed 23 September 2014). (Rus.)
9. Zhigulin I. N. Optimizatsiia raboty kompressornoj stantsii promyshlennogo predpriatiia. *Trudy mezhd. nauchn.-prakt. konf. «Transport-2014»* [Optimization of the operation of a compressor station of an industrial enterprise. Proceedings of the Int. sci.-pract.conf. «Transport-2014»]. Rostov-on-Don, 2014. vol. 2, p. 224-226. (Rus.)
10. Shteynmiller O.A., Kim A.N. Statische i polirezhimnaya optimizatsiya parametrov nasosnogo oborudovaniya sistemy «rayonnaya nasosnaya stantsiya-abonentskaya set'» [Static and multi-mode optimization of parameters of the pumping equipment of the system «district pumping station-subscriber network»]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineer*, 2009, no. 2 (19), pp. 41-45. (Rus.)
11. Shteynmiller O.A. Chislennyye metody resheniya zadachi optimal'nogo sinteza povysitel'nykh sistem podachi i raspredeleniya vody mikrorayona [Numerical methods for solving the problem of

- optimal synthesis of upgrading water supply and distribution systems in a microdistrict]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2009, no. 4 (21), pp. 81-87. (Rus.)
12. Sumarokov S.V. *Matematicheskoye modelirovaniye sistem vodosnabzheniya* [Mathematical modeling of water supply systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 167 p. (Rus.)
 13. Turk V.I. *Nasosy i nasosnyye stantsii* [Pumps and pumping stations]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1976. 304 p. (Rus.)
 14. Shevelev F.A., Orlov G.A. *Vodosnabzheniye bol'shikh gorodov zarubezhnykh stran* [Water supply of large cities in foreign countries]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1987. 347 p. (Rus.)
 15. Shteynmiller O.A., Kim A.N. Zadacha optimal'nogo sinteza povysitel'nykh sistem podachi i raspredeleniya vody (SPRV) mikrorayona [The task of optimal synthesis of upgrading water supply and distribution systems (SPRV) in a microdistrict]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2009, no. 1 (18), pp. 80-84. (Rus.)
 16. Yevdokimov A. *Minimizatsiya funktsiy i yeye prilozheniye k zadacham avtomatizirovannogo upravleniya inzhenernymi setyami* [Minimization of functions and its application to the tasks of automated management of engineering networks]. Khar'kov, Vishcha shkola Publ., 1985. 288 p. (Rus.)
 17. Yevdokimov A. *Optimal'nyye zadachi na inzhenernykh setyakh* [Optimal problems on engineering networks]. Khar'kov, Vishcha shkola Publ., 1976. 153 p. (Rus.)
 18. Kopytin A.N., Tsarinnik O.Yu. *Sovremennyye podkhody v opredelenii effektivnosti raboty nasosnykh agregatov* [Modern approaches in determining the efficiency of pumping units]. *Santekhnika, otopleniye, konditsionirovaniye – Plumbing, heating, air-conditioning*, 2007, no. 8, pp. 14-16. (Rus.)
 19. Kostin V.I. *Regulirovaniye proizvoditel'nosti nagnetateley pri smeshannoy skheme sovmestnoy raboty* [Regulation of supercharger performance under a mixed scheme of joint work]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo – News of universities. Building*, 2006, no. 6, pp. 61-64. (Rus.)
 20. Abramov N.N. *Teoriya i metodika rascheta sistem podachi i raspredeleniya vody* [Theory and method of calculating water supply and distribution systems]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972. 288 p. (Rus.)
 21. Alekseyev M.I., Krivosheyev G.G. *Metodicheskiye printsipy prognozirovaniya raskhodov vody i nadezhnosti sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya* [Methodological principles for predicting water consumption and reliability of water supply and drainage systems]. *Vestnik RAASN – Bulletin of RAASN*, 1997, iss. 2, pp. 13-17. (Rus.)
 22. Saprykin G.S. *Issledovaniye operatsiy v energeticheskikh raschetakh* [Research operations in energy calculations]. Saratov, SPI Publ., 1974. 127 p. (Rus.)
 23. Saprykin G.S., Galushko V.F. *Optimal'naya dolya pikovykh ustanovok v perspektivnykh energosistemakh* [Optimum share of peak installations in promising power systems]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Energetika – Proceedings of CIS higher education institutions. Energetika*, 1975, no 1, pp. 75-77. (Rus.)
 24. Samoylovich G.S., Troyanovskiy B.M. *Peremennyye i perekhodnyye rezhimy v parovykh turbinakh* [Variable and transient modes in steam turbines]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 496 p. (Rus.)
 25. Lukhtura F. I. *Ob optimizatsii raboty energeticheskikh ustanovok. Sb. tezisov dokl. Mezhd. nauch.-tekhn. konf. «Universitetskaya nauka-2014»* [On Optimizing the Operation of Power Plants. Abstracts of the Int. sci.-techn. conf. «University Science 2014»]. Mariupol', 2014. vol. 2, pp. 23-25. (Rus.)
 26. Pod obshch. red. A.V. Klimenko, V.M. Zorina. *Teplovyye i atomnyye elektrostantsii: Spravochnik. Kn. 3 – Teploenergetika i teplotekhnika* [Thermal and nuclear power plants: a Handbook. vol. 3 – Thermal Power Engineering and Heat Engineering]. Moscow, Publishing House MEI Publ., 2003. 648 p. (Rus.)
 27. Zhitarenko V.M. *Diagrammy optimal'nogo raspredeleniya nagruzok mezhdru kotlami TETS* [Diagrams of optimal load distribution between boilers of thermal power plants]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences*, 2014, iss. 28, pp.118-123. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов

д-р техн. наук, проф., ГБУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 21.10.2018