

Торайғыров университетінің хабаршысы  
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
Вестник Торайғыров университета

---

# Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы  
1997 жылдан бастап шығады



## ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия  
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

---

№ 2 (2024)

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**  
**Вестник Торайгыров университета**

**Энергетическая серия**  
выходит 4 раза в год

---

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о постановке на переучет периодического печатного издания,  
информационного агентства и сетевого издания  
№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития  
Республики Казахстан

**Тематическая направленность**

публикация материалов в области электроэнергетики,  
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и информационных  
систем, электромеханики и теплоэнергетики

**Подписной индекс – 76136**

<https://doi.org/10.48081/ZSHT7059>

---

**Бас редакторы – главный редактор**

Талипов О. М.,

*доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)*

Заместитель главного редактора  
Ответственный секретарь

Калтаев А.Г., *доктор PhD*  
Сағындық Ә. Б. *доктор PhD*

**Редакция алқасы – Редакционная коллегия**

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцен;</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Омарова А.Р.	<i>технический редактор</i>

---

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели  
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов  
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

МРНТИ 73.01.77, 73.39.31; 50.05.09

<https://doi.org/10.48081/NIST1450>**\*В. В. Рындин, И. К. Омарбекова**

Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

\*e-mail : [rvladvit@yandex.kz](mailto:rvladvit@yandex.kz)

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЁТ РЕЖИМА РАБОТЫ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ В ПАКЕТЕ MATHCAD**

*В статье дан расчёт режима работы компрессорной станции. Наряду с традиционным графическим методом определения расчётной точки работы центробежного нагнетателя, как точки пересечения горизонтальной линии постоянной расчётной степени сжатия с линией режимов, дан метод вычисления расчётной приведённой объёмной производительности без построения линии режимов. По найденной расчётной приведённой производительности находятся политропный КПД и приведённая относительная внутренняя мощность. Программа расчёта выполнена с использованием пакета (системы) Mathcad. Наглядность записи формул – главное преимущество Mathcad перед другими расчётными программами. Запись формул в привычном виде позволяет сразу увидеть неточности в их записи и внести соответствующие исправления. С помощью встроенной функции сплайн-аппроксимации по опытным точкам получены уравнения характеристик центробежного нагнетателя в функции от приведённой производительности нагнетателя. Развитый графический аппарат позволяет сразу строить кривые характеристик центробежного нагнетателя по этим уравнениям. Новизной работы является определение расчётной приведённой пропускной способности из уравнения расчётной степени сжатия с помощью встроенного оператора Given-Find. Разработанная программа может быть использована как в учебном процессе при*

*написании дипломов и магистерских диссертаций, так и в проектных организациях при исследовании режимов работы центробежных нагнетателей.*

*Ключевые слова: система Mathcad, центробежный нагнетатель, приведённые характеристики нагнетателя, расчётная точка нагнетателя, аналитический расчёт.*

### **Введение**

Приведена типовая методика расчёта компрессорной станции (КС) и даны рекомендации по её улучшению с целью автоматизации процесса построения графиков и определения расчётной точки работы нагнетателя. Технологическому расчёту КС предшествует технологический расчёт магистрального газопровода (МГ). Типовой расчёт МГ рассматривается во многих работах [1; 2; 3; 4; 5] и здесь не приводится. После расчёта МГ проводится расчёт режима работы компрессорной станции.

При решении многих математических задач широко используется программирование в средах Excel, Fortran, Turbo Pascal, Delphi, Matlab, Maple, Mathematica и др. В последнее время стало применяться программирование в пакете (системе) Mathcad [6]. Предложенная в статье программа Mathcad – это новое решение для ведения инженерных вычислений, которое одновременно позволяет вести сами вычисления и документировать их. Совмещение алгоритма и самой программы, позволяет сократить объём статьи в 1,5–2 раза по сравнению с программированием в других средах.

Литература по использованию Mathcad обширна, в качестве примера можно отметить [7; 8; 9]. Целью расчёта компрессорной станции является определение расчётной (рабочей) точки, обычно определяемой графически после нанесения линии режимов на опытную характеристику компрессора. В данной работе применение пакета Mathcad позволяет вычислять рабочую точку на характеристике нагнетателя без построения линии режимов.

Программа разработана в рамках выполнения магистерской диссертации по специальности 7М07203-Нефтегазовое дело.

Ниже даётся программа расчёта в пакете Mathcad. Всё ниже написанное, включая и комментарии, может составлять содержание программы расчёта – система сама определяет, где текст, а где

математические выражения (для наглядности в текстовой части символы величин будем писать курсивом, а в формулах Mathcad – прямым шрифтом).

### Материалы и методы

Задание. Выполнить технологический расчёт магистрального газопровода пропускной способностью (производительностью)  $Q_r \square\square 3.7$  млрд м<sup>3</sup>/год, диаметром 720 мм и протяжённостью  $L \square\square 830$  км (здесь  $Q$  и  $L$  записаны вертикальным шрифтом, так как они входят в формулы программы). Ввод символа присваивания «:=» (двоеточия с равно) осуществляется нажатием клавиши с символом двоеточия «:». В Mathcad для отделения целых от десятичных значений вместо запятой вводится точка.

В результате расчёта газопровода были получены следующие результаты (этот расчёт, как уже отмечалось, в статье не приводится).

Стандартные условия (СУ):  $p_{ст} := 101325$  Па;  $T_{ст} := 293,15$  К (20 °С).

Молярная газовая постоянная  $R_{и} := 8314.51$  Дж/(кмоль·К).

Удельная газовая постоянная воздуха  $R_v = 287$  Дж/(кг·К).

Расчёт физических свойств перекачиваемого газа. Состав газа [1].

Таблица 1 – Характеристика перекачиваемого газа

Компоненты	Объёмная доля	Плотность при СУ, кг/м <sup>3</sup>	Молярная масса, кг/кмоль	Газовая постоянная, Дж/(кг·К)
Метан CH <sub>4</sub>	$r_1 := 0.984$	$\rho_1 := 0.667$	$M_1 := 16.0426$	$R_1 := 518.277$
Этан C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	$r_2 := 0.0007$	$\rho_2 := 1.250$	$M_2 := 30.0694$	$R_2 := 276.511$
Пропан C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	$r_3 := 0.0001$	$\rho_3 := 1.833$	$M_3 := 44.0962$	$R_3 := 188.554$
Диоксид углерода CO <sub>2</sub>	$r_4 := 0.0041$	$\rho_4 := 1.842$	$M_4 := 44.0098$	$R_4 := 188.924$
Азот N <sub>2</sub>	$r_5 := 0.0111$	$\rho_5 := 1.165$	$M_5 := 28.0134$	$R_5 := 296.805$

Здесь  $r_i$  – индексированные переменные (матричные); индекс  $i$  ставится путём нажатия клавиши с открывающейся квадратной скобкой.

Плотность газа при стандартных условиях

$$\rho_{\text{ст}} := \sum_{i=1}^5 (r_i \cdot \rho_i) = 0.677 \text{ кг/м}^3.$$

Молярная масса смеси газов

$$M := \sum_{i=1}^5 (r_i \cdot M_i) = 16.303 \text{ кг/кмоль.}$$

Удельная газовая постоянная смеси

$$R := \frac{R_{\mu}}{M} = \frac{8314.51}{16.303} = 510.01 \text{ Дж/(кг.К).}$$

Псевдокритические температура и давление

$$T_{\text{пк}} := 155.24 \cdot (0.564 + \rho_{\text{ст}}) = 155.24 \cdot (0.564 + 0.677) = 192.707 \text{ К,}$$

$$p_{\text{пк}} := 0.1773 \cdot (26.831 - \rho_{\text{ст}}) = 0.1773 \cdot (26.831 - 0.677) = 4.637 \text{ МПа.}$$

В результате теплового и гидравлического расчёта линейного участка определены давление и температура газа в конце участка трубопровода:  $p_{\text{к}} = 5.783 \text{ МПа}$  и  $T_{\text{к}} = 282.42 \text{ К}$ . С учётом потерь давления при всасывании определяем давление

$$p_{\text{вс}} := p_{\text{к}} - \Delta p_{\text{вс}} = 5.783 - 0.120 = 5.663 \text{ МПа}$$

и температуру газа на входе в центробежный нагнетатель

$$T_{\text{вс}} := T_{\text{к}} = 282.42 \text{ К.}$$

Значения давления и температуры, приведённые к условиям всасывания,

$$p_{\text{пр}} := \frac{p_{\text{вс}}}{p_{\text{пк}}} = \frac{5.43663}{4.637} = 1.221,$$

$$T_{\text{пр}} := \frac{T_{\text{вс}}}{T_{\text{пк}}} = \frac{282.424}{192.774} = 1.465$$

Коэффициент сжимаемости газа при условиях всасывания ( $Z_{\text{ст}} := 1$ )

$$Z_{\text{вс}} := 1 - \frac{0.0241 \cdot p_{\text{пр}}}{1 - 1.68 \cdot T_{\text{пр}} + 0.78 \cdot T_{\text{пр}}^2 + 0.0107 \cdot T_{\text{пр}}^3} = 0.881.$$

Плотность газа при условиях всасывания

$$\rho_{\text{вс}} := \rho_{\text{ст}} \cdot \frac{p_{\text{вс}} \cdot T_{\text{ст}} \cdot Z_{\text{ст}}}{p_{\text{ст}} \cdot 10^{-6} \cdot T_{\text{вс}} \cdot Z_{\text{вс}}} = 0.678 \cdot \frac{5.663 \cdot 293.15 \cdot 1}{101325 \cdot 10^{-6} \cdot 282.424 \cdot 0.881} = 44.646 \text{ кг/м}^3$$

Принимаем оценочный коэффициент использования пропускной способности газопровода в интервале 0,85–0,9  $K_{\text{и}} := 0.9 [1]$ .

Суточная пропускная способность газопровода при стандартных условиях (коммерческий расход) рассчитывается так

$$Q := \frac{Q_{\Gamma} \cdot 10^3}{365 \cdot K_{и}} = \frac{3.7 \cdot 10^3}{365 \cdot 0.9} = 11.263 \text{ млн м}^3/\text{сут.}$$

На компрессорных станциях установлены газотурбинные агрегаты ГПА-Ц-6,3 оборудованные центробежными нагнетателями НЦВ-6,3/76-1,45. Номинальная подача нагнетателя  $Q_{н} := 11.4$  млн  $\text{м}^3/\text{сут}$  при стандартных условиях, частота вращения ротора  $n_{н} := 8200 \text{ мин}^{-1}$  и давление нагнетания  $p_{наг} := 7.45 \text{ МПа}$  берутся из таблицы 1.10 [1].

Введём обозначение  $Q_{КС} := Q = 11.263 \text{ МЛН М}^3/\text{СУТ}$ . Требуемое число параллельно работающих нагнетателей

$$m_{н} := \frac{Q_{КС}}{Q_{н}} = \frac{11.263}{11.4} = 0.988, \text{ принимаем } m_{н} := 1.$$

Объёмная подача компрессора при условиях всасывания (на входе)

$$Q_{вс} := \frac{Q_{КС} \cdot 10^6}{24 \cdot 60 \cdot m_{н}} \cdot \frac{\rho_{ст}}{\rho_{вс}} = \frac{11.263 \cdot 10^6}{24 \cdot 60 \cdot 1} \cdot \frac{0.678}{44.646} = 118.743 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

В связи со сложностью процессов, происходящих при сжатии газа, их аналитическое описание является достаточно громоздким. Практика показала, что гораздо проще можно получить графические характеристики по результатам стендовых испытаний и представить их в приведённых координатах, используя при этом аппарат теории подобия и размерностей [10]. При этом в статье вводятся следующие соотношения:

$$Q_{н} = Q \cdot \frac{n_{н}}{n}; \quad (1)$$

$$H_{пол.н} = H_{пол} \cdot \left(\frac{n_{н}}{n}\right)^2; \quad (2)$$

$$\frac{N_{и.н}}{\rho_{вс.н}} = \frac{N_i}{\rho_{вс}} \cdot \left(\frac{n_{н}}{n}\right)^3; \quad (3)$$

$$H_{пол} = \frac{m}{m-1} (ZRT)_{вс} \cdot (\varepsilon^{(m-1)/m} - 1), \quad (4)$$

$$\text{где} \quad \frac{m}{m-1} = \frac{k}{k-1} \cdot \eta_{\text{пол}}, \quad (5)$$

$H_{\text{пол}}$  – политропный напор (удельная работа сжатия), Дж/кг;

$\eta_{\text{пол}}$  – политропный КПД нагнетателя,  $k$  – показатель адиабаты, который принят для природного газа  $k := 1.31$ .

Степень сжатия для условий, отличных от номинальных будет определяться из соотношения, полученного с учётом уравнений (1)–(5),

$$\varepsilon = \left[ 1 + \left( \frac{n}{n_H} \right)^2 \cdot \frac{(ZRT)_H}{(ZRT)_{\text{вс}}} \left( \varepsilon^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right) \right]^{\frac{m-1}{m}}. \quad (6)$$

Их этих соотношений трудно определить от каких аргументов зависят отдельные величины. Применение пакета Mathcad позволяет сделать эти уравнения наглядными и проводить по ним расчёты.

Задаём интервал чисел частоты вращения ротора  $n := 3500..8500$  (символ множества «..» вводится нажатием клавиши «;» точка с запятой). Задаём приведённый расход  $Q_{\text{пр}}$  и приведённую относительную частоту  $n_{\text{пр}}$  в функции от частоты вращения ротора  $n$

$$n_{\text{пр}}(n) := \frac{n}{n_H} \cdot \sqrt{\frac{Z_{\text{ГПР}} \cdot R_{\text{ГПР}} \cdot T_{\text{ГПР}}}{Z_{\text{вс}} \cdot R \cdot T_{\text{вс}}}}, \quad (7)$$

$$Q_{\text{пр}}(n) := \frac{n_H}{n} \cdot Q_{\text{вс}} \quad C = \frac{Z_{\text{ГПР}} \cdot R_{\text{ГПР}} \cdot T_{\text{ГПР}}}{Z_{\text{вс}} \cdot R \cdot T_{\text{вс}}} \quad C_1 = \sqrt{\frac{Z_{\text{ГПР}} \cdot R_{\text{ГПР}} \cdot T_{\text{ГПР}}}{Z_{\text{вс}} \cdot R \cdot T_{\text{вс}}}}.$$

где  $Z_{\text{пр}}$ ,  $R_{\text{пр}}$ ,  $T_{\text{пр}}$  – условия приведения, для которых построены характеристики.

Для вывода результатов расчёта задаём интервал чисел частоты вращения ротора с шагом  $500 \text{ мин}^{-1}$   $n \square \square 3800, 4300..7800$  (диапазон чисел выбирается так, чтобы в соответствии с диаграммой характеристик ГПА-Ц-6,3 приведённые объёмные расходы лежали в диапазоне 125–250 и выводим их значения в виде матриц:

Кривая в координатах  $Q_{\text{пр}}(n)$  и  $n_{\text{пр}}(n)$  называется линией режимов (рис. 1).

В реальных условиях нагнетатель, приводимый от ГТУ, работает в определённом диапазоне частоты вращения. Поэтому характеристики



нагнетателя строят при различной приведённой частоте вращения (на рисунке 2  $n_{пр} = 0,7-1,1$ ), постоянной для каждой кривой. Наибольшее распространение в практике расчётов режимов работы ГПА получили характеристики ЦН, выпускаемые ВНИИГАЗом [11].

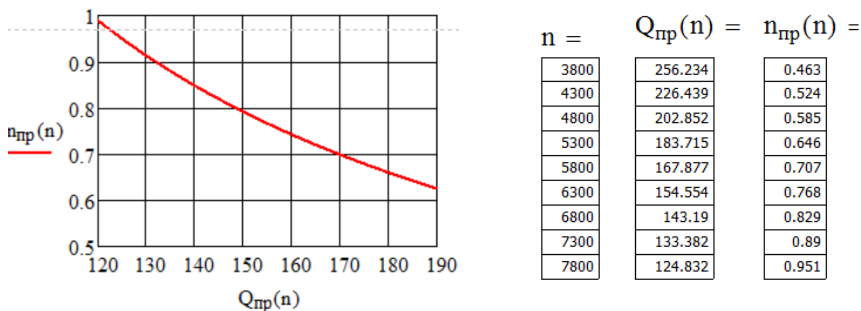


Рисунок 1 – Линия режимов

На рисунке 2 представлены зависимости степени повышения давления  $\varepsilon$ , политропного КПД ЦН  $\eta_{пол}$  и приведённой относительной внутренней мощности от приведённой объёмной подачи для ГПА-Ц-6,3 [12]. На практике полученные точки  $Q_{пр}(n)$  и  $n_{пр}(n)$  ( $Q_{пр} - [n/n_n]_{пр}$ ) наносятся ручным способом на характеристику нагнетателя и соединяются линией режимов ABC (см. рис. 2).

Требуемая (расчётная) степень повышения давления в компрессоре (номинальная степень повышения давления  $\varepsilon = 1,45$  определяется по таблице 1.10 [1])

$$\varepsilon_p := \frac{p_{нар}}{p_{вс}} = \frac{7.45}{5.66} = 1.316.$$

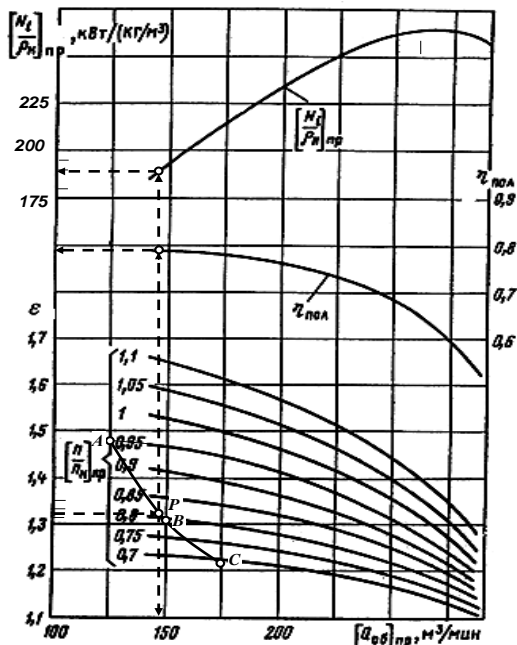


Рисунок 2 – Приведённые характеристики ГПА-Ц-6,3  $Z_{пр} = 0,9$ ;

$$R_{пр} = 491 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); T_{пр} = 288 \text{ К} [12]$$

По характеристике нагнетателя определяются расчётные значения приведённых параметров. Для этого проводим горизонтальную линию из  $\varepsilon = 1,316$  до линии режимов и находим точку пересечения (P). Восстанавливая перпендикуляр из этой точки до пересечения с горизонтальной осью, находим  $Q_{пр} = 147,5 \text{ м}^3/\text{мин}$  (см. рис. 2). Аналогично определяем  $\eta_{пол} = 0,79$  и  $[N_i / \rho_{вс}]_{пр} = 189 \text{ кВт}/(\text{кг}/\text{м}^3)$ .

Недостатком изложенного метода является трудность интерполяции (нахождение неизвестных промежуточных значений функции, по дискретному набору её известных значений) точек линии режимов по дискретным значениям  $[n/n_{пр}] = 0,7-1,1$ .

### Результаты и обсуждение

Разработана программа расчёта режима работы компрессорной станции в пакете Mathcad. В основу расчёта положены опытные характеристики ЦБ нагнетателя [12]. В качестве основной берётся кривая степени сжатия  $\varepsilon_1$  при приведённой частоте вращения ротора равной единице ( $n/n_{нпр} = 1$ ). Координаты опытных точек вносятся в таблицу (матрицу) и с помощью встроенной функции сплайн-аппроксимации получаем уравнение кривой политропного кпд  $\eta(Q_{пр})$  и степени повышения давления  $\varepsilon_1(Q_{пр})$ .

Аналитическое задание кривой политропного кпд  $\eta(Q_{пр})$  по опытным данным:

$$\begin{matrix}
 & Q_{пр} & \eta \\
 M := & \begin{pmatrix} 140 & 0.788 \\ 150 & 0.787 \\ 175 & 0.780 \\ 200 & 0.762 \\ 225 & 0.734 \\ 250 & 0.681 \\ 275 & 0.593 \end{pmatrix} & X := M^{(1)} & X = \begin{pmatrix} 140 \\ 150 \\ 175 \\ 200 \\ 225 \\ 250 \\ 275 \end{pmatrix} & Y := M^{(2)} & Y = \begin{pmatrix} 0.788 \\ 0.787 \\ 0.78 \\ 0.762 \\ 0.734 \\ 0.681 \\ 0.593 \end{pmatrix}
 \end{matrix}$$

$$S := \text{lspline}(X, Y) \quad \eta(Q_{пр}) := \text{interp}(S, X, Y, Q_{пр}).$$

Аналитическое задание степени повышения давления  $\varepsilon_1(Q_{пр})$  в компрессоре при  $[n/n_{нпр}] = 1$ :

$$\begin{matrix}
 & Q_{пр} & \varepsilon_1 \\
 M := & \begin{pmatrix} 140 & 1.535 \\ 150 & 1.529 \\ 175 & 1.496 \\ 200 & 1.46 \\ 225 & 1.41 \\ 250 & 1.352 \\ 275 & 1.276 \end{pmatrix} & X := M^{(1)} & X = \begin{pmatrix} 140 \\ 150 \\ 175 \\ 200 \\ 225 \\ 250 \\ 275 \end{pmatrix} & Y := M^{(2)} & Y = \begin{pmatrix} 1.535 \\ 1.529 \\ 1.496 \\ 1.46 \\ 1.41 \\ 1.352 \\ 1.276 \end{pmatrix}
 \end{matrix}$$

$$S := \text{lspline}(X, Y) \quad \varepsilon_1(Q_{пр}) := \text{interp}(S, X, Y, Q_{пр}).$$

На рисунках 3 и 4 приведены аналитические кривые кпд и степени повышения давления.

$$Q_{np} := 140..275$$

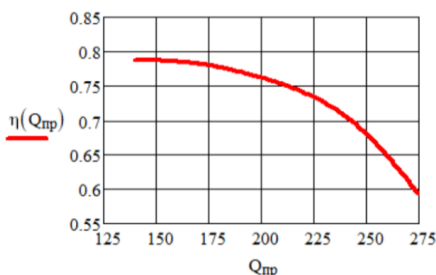


Рисунок 3 – Расчётный  
политропный КПД

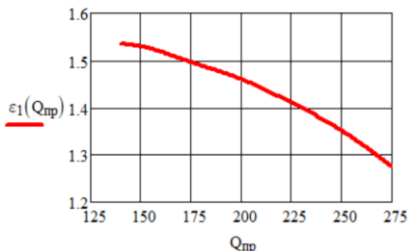


Рисунок 4 – Расчётная степень  
повышения давления

Методика получения таких функций для записи криволинейных линий проста и занимает мало места в программе. В работах ряда авторов для создания математических моделей используют полиномиальную аппроксимацию, например, для квадрата степени сжатия от приведённой объёмной пропускной способности апробация выполняется в виде полинома третьей степени

$$\varepsilon^2 = a_0 + a_1 Q_{np} + a_2 Q_{np}^2 + a_3 Q_{np}^3.$$

Значения коэффициентов аппроксимации определяются методом наименьших квадратов по точкам графических характеристик. При этом расчёты выполняются на ЭВМ с применением сложных алгоритмов.

Применение пакета Mathcad позволяет довольно просто решить уравнение (6) для определения приведённой объёмной подачи  $Q_{np,p}$  по известной степени сжатия  $\varepsilon_r$ . Для этого оно записывается в таком виде:

$$\varepsilon(Q_{np}) := \left[ n_{np} (Q_{np})^2 \cdot C \cdot \left( \varepsilon_1(Q_{np})^{\frac{k-1}{k \cdot \eta(Q_{np})}} - 1 \right) + 1 \right]^{\frac{k \cdot \eta(Q_{np})}{k-1}}, \quad (8)$$

Для его решения необходимо знать зависимости кпд  $\eta$  и степени сжатия  $\varepsilon$  от приведённой объёмной подачи  $Q_{np}$ . Как уже было отмечено выше, эта задача довольно просто решается в Mathcad с помощью встроенной функции сплайн-аппроксимации.

Приведённая частота  $n_{np}$  в функции от  $Q_{np}$  определяется по формуле (7) путём замены аргумента  $n$  на  $Q_{np}$

$$n_{\text{пр}}(Q_{\text{пр}}) := \left( \frac{n}{n_{\text{н}}} \right) \cdot C_1. \quad (9)$$

Кривая  $n_{\text{пр}}(Q_{\text{пр}})$  идентична кривой  $n_{\text{пр}}(n)$ , изображённой на рисунке (1).

Определение расчётной приведённой пропускной способности газопровода (объёмной подачи компрессорной станции) проводится по формуле (8). Для этого используем встроенный оператор Given–Find, записывая его в таком виде (знак логического равенства = вводится одновременным нажатием клавиш Ctrl+=):

Given  $Q_{\text{пр}} := 200$  (начальное приближение)

$$\varepsilon_p = \left[ n_{\text{пр}}(Q_{\text{пр}})^2 \cdot C \cdot \left( \varepsilon_1(Q_{\text{пр}})^{\frac{k-1}{k \cdot \eta(Q_{\text{пр}})}} - 1 \right) + 1 \right]^{\frac{k \cdot \eta(Q_{\text{пр}})}{k-1}}.$$

$Q_{\text{пр.р}} := \text{Find}(Q_{\text{пр}}) = 149.498 \text{ м}^3/\text{мин}$ .  $Q_{\text{пр}} := Q_{\text{пр.р}} = 149.498 \text{ м}^3/\text{мин}$ .

Графическим методом было найдено значение 147,5 м<sup>3</sup>/мин (относительная погрешность 1,3 %). Учитывая, что и аналитический метод содержит значения, получаемые графически, то данная точность расчёта подтверждает правильность математической модели. Данная математическая модель позволяет исследовать различные режимы работы газопровода с данным компрессором.

Расчётная и приведённая частота вращения ротора находится из (9)

$$n_p := n_{\text{пр.р}} \cdot \frac{n_{\text{н}}}{C_1} = 6513.06 \text{ мин}^{-1} \text{ или } n_p := Q_{\text{вс}} \cdot \frac{n_{\text{н}}}{Q_{\text{пр.р}}} = 6513.06 \text{ мин}^{-1};$$

$$n_{\text{пр.р}}(Q_{\text{пр.р}}) := \left( \frac{n_{\text{пр.р}}}{n_{\text{н}}} \right) \cdot C_1 = 0.794.$$

Внутренняя мощность, потребляемая ЦН,

$$N_i := \rho_{\text{вс}} \cdot N_{\text{ипр.р}} \cdot \left( \frac{n}{n_{\text{н}}} \right)^3 = 4233.2 \text{ кВт},$$

где  $N_{\text{ипр.р}} = [N_i / \rho_{\text{вс}}]_{\text{пр}} = 189 \text{ кВт}/(\text{кг}/\text{м}^3)$  – приведённая мощность.

## Выводы

Разработана программа расчёта режима работы компрессорной станции в пакете Mathcad.

Научная новизна работы заключается в разработке автоматизированного (без геометрического построения линии режимов) расчёта приведённой объёмной производительности для требуемой степени сжатия.

Разработанная программа может быть использована как в учебном процессе при написании дипломов и магистерских диссертаций, так и в проектных организациях при исследовании режимов работы центробежных нагнетателей, а также при отладке сложных программ, использующих менее наглядные языки программирования.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Типовые расчёты при сооружении и ремонте газонефтепроводов: учеб. пособие [Текст] / Быков, Л. И. и др. – Санкт-Петербург : Недра, 2006. – 824 с. : ил.

2 **Белицкий, В. Д.** Проектирование и эксплуатация магистральных газопроводов : методическое пособие / В. Д. Белицкий, Ломов С. М. [Текст]. – Омск : ОмГТУ, 2011. – 65 с. : ил.

3 **Щуровский В. А.** и др. Методические указания по проведению теплотехнических и газодинамических, расчётов при испытаниях газотурбинных газоперекачивающих агрегатов. ПР51-31323949. [Текст]. – ВНИИГАЗ, 1999. – 26 с.

4 **Коршак А. А.** Трубопроводный транспорт нефти, нефтепродуктов и газа / А. А. Коршак, А. М. Нечваль. [Текст]. – Уфа : ДизайнПолиграфСервис, 2005. – 515 с.

5 **Новоселов В. Ф.** Типовые расчёты при проектировании и эксплуатации газопроводов / В. Ф. Новоселов, А. И. Гольянов, Е. М. Муфтахов. [Текст]. – 534 с.

6 **Рындин В. В.** Технологический расчёт магистрального газопровода в системе Mathcad // Наука и техника Казахстана. – 2018. – № 1. – С. 83–95.

7 **Половко, А. М.** Mathcad для студентов [Текст] / А. М. Половко, Н. В. Ганичев. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 336 с. : ил.

8 **Кирьянов, Д. В.** Mathcad 13 [Текст]. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 608 с. :

**9 Макаров, Е. Г.** Инженерные расчёты в Mathcad 15 [Текст]. – СПб. : Питер, 2011. – 400 с. :

**10 Синицын С. Н., Барцев И. В., Леонтьев Е. В.** Влияние параметров природного газа на характеристики центробежных нагнетателей. [Текст]. – М. : Недра, 1967, – В кн. : Транспорт и хранение газа (Труды ВНИИГАЗа, вып. 29/37).

**11** Альбом приведённых газодинамических характеристик центробежных нагнетателей. [Текст]. – Союзоргэнергогаз. ВНИИГАЗ, – М. : 1985.– 87 с.

**12 Перевощиков С. И.** Проектирование и эксплуатация компрессорных станций : Приложения. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2004. – 58 с.

## REFERENCES

1 Tipovyye raschoty pri sooruzhenii i remonte gazonefteprovodov: ucheb. posobiye [Typical calculations for the construction and repair of gas and oil pipelines: textbook. manual] [Text]. Bykov, L. I. et.al – St. Petersburg: Nedra, 2006. – 824 p.

2 **Belitskiy, V. D.** Proyektirovaniye i ekspluatatsiya magistral'nykh gazoprovodov : metodicheskoye posobiye [Design and operation of main gas pipelines: methodological manual] [Text]. – Omsk : OmGTU, 2011. – 65 p.

3 **Shchurovskiy, V. A. i dr.** Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu teplotekhnicheskikh i gazodinamicheskikh, raschotov pri ispytaniyakh gazoturbinykh gazoperekachivayushchikh agregatov. [Guidelines for carrying out thermotechnical and gas-dynamic calculations when testing gas turbine gas pumping units]. [Text]. –VNIIGAZ, 1999. – 26 p.

4 **Korshak, A. A. i dr.** Truboprovodnyy transport nefti, nefteproduktov i gaza [Pipeline transport of oil, oil products and gas] [Text] – Ufa : Design Polygraph Service, 2005. – 515 p.

5 **Novoselov, V. F. i dr.** Tipovyye raschoty pri proyektirovanii i ekspluatatsii gazoprovodov [Typical calculations for the design and operation of gas pipelines] [Text] – Moscow : Nedra, 1982 – 534 p.

6 **Ryndin, V. V.** Tekhnologicheskyy raschot magistral'nogo gazoprovoda v sisteme Mathcad [Technological calculation of the main gas pipeline in the

Mathcad system] [Text] // Science and technology of Kazakhstan. – 2018. – No. 1. – P. 83–95.

7 **Polovko, A. M.** et al. Mathcad dlya studentov [Mathcad for students] – St. Petersburg : BHV-Petersburg, 2006. – 336 p.

8 **Kir'yanov, D. V.** Matkad 13 [Mathcad 13] [Text]. – St. Petersburg : BHV-Petersburg, 2006. – 608 p.

9 **Makarov, Ye. G.** Inzhenernyye raschoty v Mathcad 15 [Engineering calculations in Mathcad 15]. – St. Petersburg : Peter, 2011. – 400 p.

10 **Sinityn, S. N., i dr. V.** Vliyaniye parametrov prirodnogo gaza na kharakteristiki tsentrobezhnykh nagnetateley [Influence of natural gas parameters on the characteristics of centrifugal blowers. [Text]. – Moscow : Nedra, 1967, – In the book : Transport and storage of gas (Proceedings of VNIIGAZ, issue 29/37).

11 Al'bom privedonnykh gazodinamicheskikh kharakteristik tsentrobezhnykh nagnetateley [Album of the given gas-dynamic characteristics of centrifugal superchargers.] – Moscow : Soyuzorgenergogaz. VNIIGaz, 1985. – 87 p.

12 **Perevoshchikov, S. I.** Proyektirovaniye i ekspluatatsiya kompressornykh stantsiy : Prilozheniya [Design and operation of compressor stations: Applications] – Tyumen : TyumGNGU, 2004. – 58 p.

Поступило в редакцию 08.12.24.

Поступило с исправлениями 09.04.24.

Принято в печать 03.06.24.



\*В. В. Рындин, И. К. Омарбекова

Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

08.12.24 ж. баспаға түсті.

09.04.24 ж. түзетулерімен түсті.

03.06.24 ж. басып шығаруға қабылданды

## **МАТНСАД ПАКЕТІНДЕГІ КОМПРЕССОР СТАНЦИЯСЫНЫҢ ЖҰМЫС РЕЖИМІН АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ЕСЕПТІК**

*Мақалада компрессорлық станцияның жұмыс режимінің есебі берілген. Ортадан тепкіш супер зарядтағыштың жұмысының жобалық нүктесін анықтаудың дәстүрлі графикалық әдісімен қатар тұрақты конструктивті қысу коэффициентінің көлденең сызығының режим сызығымен қиылысу нүктесі ретінде есептелетін төмендетілген көлемдік өнімділікті есептеу әдістемесі келтірілген. режим сызығын құру. Табылған есептелген төмендетілген өнімділікке сүйене отырып, политроптық тиімділік және төмендетілген салыстырмалы ішкі қуат табылады. Есептеу бағдарламасы Mathcad пакеті (жүйесі) арқылы орындалды. Формулаларды жазудың анықтығы Mathcad-тың басқа есептеу бағдарламаларынан басты артықшылығы болып табылады. Формулаларды таныс формада жазу оларды жазудағы дәлсіздіктерді бірден көруге және тиісті түзетулер енгізуге мүмкіндік береді. Тәжірибе нүктелеріне негізделген кіріктірілген сплайнды жуықтау функциясын пайдалана отырып, жоғары зарядтағыштың төмендетілген өнімділігінің функциясы ретінде центрифугалық супер зарядтағыштың сипаттамаларына арналған теңдеулер алынды. Жетілдірілген графикалық аппарат осы теңдеулерді пайдалана отырып, орталықтан тепкіш супер зарядтағыштың өнімділік қисықтарын дереу құруға мүмкіндік береді. Жұмыстың жаңалығы кіріктірілген Given-Find операторының көмегімен есептелген қысу коэффициентінің теңдеуінен есептелген азайтылған өткізу қабілеттілігін анықтау болып табылады. Жасалған бағдарламаны оқу процесінде дипломдық және магистрлік диссертацияларды жазу кезінде де,*

конструкторлық ұйымдарда орталықтан тепкіш суперзарядтардың жұмыс режимдерін зерттеу кезінде де пайдалануға болады.

*Кілтті сөздер:* Mathcad жүйесі, орталықтан тепкіш суперзарядтауыш, жоғары зарядтағыштың берілген сипаттамалары, суперзарядтағыштың жобалық нүктесі, аналитикалық есептеу.

\*V. V. Ryndin, I. K. Omarbekova

Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 08.12.24

Received in revised form 09.04.24

Accepted for publication 03.06.24

## **AUTOMATED CALCULATION OF THE OPERATING MODE A COMPRESSOR STATION IN THE MATHCAD PACKAGE**

*The article provides a calculation of the operating mode of the compressor station. Along with the traditional graphical method for determining the design point of operation of a centrifugal supercharger, as the point of intersection of the horizontal line of the constant design compression ratio with the mode line, a method is given for calculating the calculated reduced volumetric productivity without constructing a mode line. Based on the found calculated reduced productivity, the polytropic efficiency and the reduced relative internal power are found. The calculation program was performed using the Mathcad package (system). The clarity of writing formulas is the main advantage of Mathcad over other calculation programs. Writing formulas in a familiar form allows you to immediately see inaccuracies in their recording and make appropriate corrections. Using the built-in spline approximation function based on experimental points, equations for the characteristics of a centrifugal supercharger were obtained as a function of the reduced performance of the supercharger. An advanced graphical apparatus allows one to immediately construct performance curves of a centrifugal supercharger using these equations. The novelty of the work is the*

*determination of the calculated reduced throughput from the equation of the calculated compression ratio using the built-in Given-Find operator. The developed program can be used both in the educational process when writing diplomas and master's theses, and in design organizations when studying the operating modes of centrifugal superchargers.*

*Keywords: Mathcad system, centrifugal supercharger, given characteristics of the supercharger, design point of the supercharger, analytical calculation.*

Теруге 03.06.2024 ж. жіберілді. Басуға 28.06.2024 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Мб RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректоры: А. Р. Омарова, М. М. Нугманова

Тапсырыс №4248

Сдано в набор 03.06.2024 г. Подписано в печать 28.06.2024 г.

Электронное издание

29.9 Мб RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректорлар: А. Р. Омарова, М. М. Нугманова

Заказ № 4248

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: [kereku@tou.edu.kz](mailto:kereku@tou.edu.kz)

[www.vestnik-energy.tou.edu.kz](http://www.vestnik-energy.tou.edu.kz)