

Работа многоступенчатого компрессора при наполнении емкости

© Т.С. Дегтярева, В.И. Захаров, А.А. Зурнаджиев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Поршневые многоступенчатые компрессоры часто используются для заполнения емкостей различного объема. В этом случае имеет место переменный режим работы, т.е. компрессор работает при переменном давлении нагнетания. В статье дано описание математической модели работы поршневого многоступенчатого компрессора в режиме наполнения емкости с учетом последовательного нагружения ступеней. Модель позволяет учесть влияние переменного давления нагнетания на изменение промежуточных межступенчатых давлений, степени повышения давлений по ступеням, коэффициенты подачи ступеней компрессора и затрачиваемую мощность. Дана блок-схема алгоритма расчета, на основании которой разработана программа на языке программирования Delphi. Приведены результаты расчета времени наполнения емкости до заданного давления и результаты эксперимента, подтверждающие адекватность разработанной расчетной модели. Методика расчета может быть использована также для определения времени перекачки газа из одной емкости в другую.

Ключевые слова: поршневой многоступенчатый компрессор, переменное давление нагнетания, математическая модель, время наполнения.

В технике компрессоры часто используются для заполнения емкостей различного объема. В этом случае имеет место переменный режим работы, т. е. компрессор работает при переменном давлении нагнетания. При работе многоступенчатого компрессора ступени нагружаются последовательно. Причем по мере роста давления в емкости повышаются и промежуточные давления, что приводит к постепенному снижению производительности компрессора. Для определения времени наполнения емкости необходимо знать, как изменяется производительность компрессора в зависимости от давления газа в емкости. Для одноступенчатого компрессора малой производительности такая задача была рассмотрена в [1].

В настоящей работе предложена методика определения времени наполнения емкости до заданного давления многоступенчатым компрессором.

Методика основана на математической модели работы поршневого многоступенчатого компрессора в режиме наполнения емкости постоянного объема (далее — баллона).

Основные допущения, принятые при построении математической модели трехступенчатого компрессора.

1. Процесс наполнения баллона трехступенчатым компрессором происходит в три последовательных этапа: На первом этапе работает только первая ступень компрессора, на втором — 1-я и 2-я ступени, на третьем — все три ступени.

1-й этап (начальный) — сжатие происходит только в первой ступени, во второй и третьей ступенях давление газа лишь снижается за счет гидравлических сопротивлений;

2-й этап (переходный) — сжатие происходит последовательно в первой и второй ступенях, третья ступень играет роль гидравлического сопротивления;

3-й этап (основной) — сжатие происходит последовательно во всех трех ступенях.

Переход от одного этапа к другому происходит при равенстве массовых расходов в ступенях.*

2. Газ подчиняется уравнению состояния идеального газа.

3. Рабочие процессы в ступенях компрессора происходят по политропам конечных параметров.

Определение составляющих коэффициента подачи, показателей политроп конечных параметров, потерь давления в клапанах производится по методике, описанной в [2].

Основные обозначения, принятые в описании модели: T_0 — температура на всасывании; ΔT — недоохлаждение газа перед 2-й и 3-й ступенями; p_0 — давление всасывания (атмосферное давление); p_{i1} — усредненное давление всасывания i -й ступени (ступени нумеруются римскими цифрами); p_{i2} — усредненное давление нагнетания i -й ступени (ступени нумеруются римскими цифрами); p_{im} — межступенчатое давление между i -й и $(i+1)$ -й ступенями; p — давление в баллоне текущее; P_{\max} — максимальное (конечное) давление в баллоне; $\delta_{\text{вс}}$ — относительные потери давления на всасывании i -й ступени; $\delta_{\text{ин}}$ — относительные потери давления на нагнетании i -й ступени; λ_i — коэффициент подачи i -й ступени; λ_{oi} — объемный коэффициент подачи i -й ступени; λ_{dri} — коэффициент дросселирования i -й ступени; a_i — относительный мертвый объем i -й ступени; m_i — показатель политропы конечных параметров i -й ступени; A — коэффициент, используемый для расчета потерь давления на всасывании и нагнетании в ступенях. Здесь $A = 2,66$; V — объем наполняемого

* Переход ко второму этапу происходит при равенстве расходов в 1-й и 2-й ступенях, к третьему этапу — при равенстве расходов во 2-й и 3-й ступенях; при этом коэффициент подачи в неработающей ступени равен коэффициенту дросселирования.

баллона; V_{hi} — объем цилиндра i -й ступени; N_i — индикаторная мощность i -й ступени; N — индикаторная мощность компрессора; k — показатель адиабаты; n_0 — частота вращений коленчатого вала, t — время наполнения баллона. Расчетная схема приведена на рис. 1.

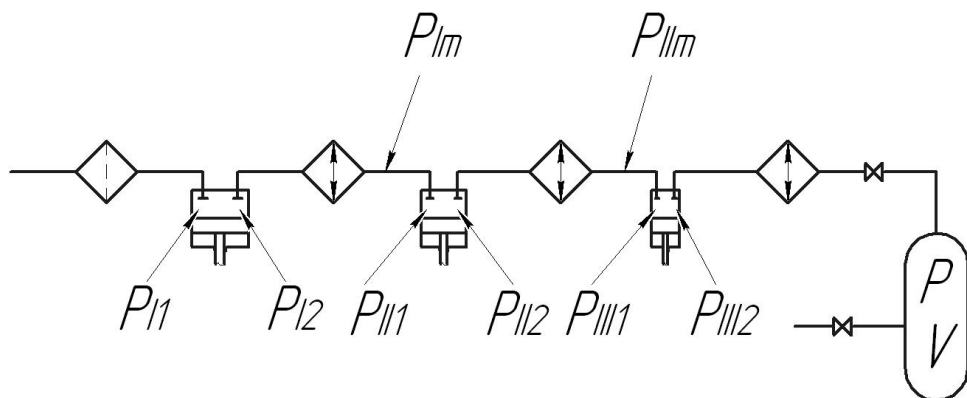


Рис. 1. Расчетная схема:

p_{i1}, p_{i2} — усредненные давления всасывания и нагнетания в i -й ступени;
 p — давление в баллоне объемом V

Параметры модели. К входным параметрам модели следует отнести объемы цилиндров по ступеням V_{hi} , относительные мертвые объемы a_i , недоохлаждение ΔT , частоту вращения коленчатого вала n_0 (определяются моделью конкретного компрессора, используемого для наполнения баллона); давление и температуру на всасывании p_0 и T_0 (задаются в зависимости от параметров окружающей среды); объем баллона V и необходимое давление в баллоне p_{\max} (задаются в зависимости от условий конкретной задачи и могут варьироваться в широком диапазоне).

К выходным параметрам следует отнести время наполнения баллона t , индикаторные мощности по ступеням N_i , межступенчатые давления по ступеням p_{im} , коэффициенты подачи по ступеням λ_i .

Описание алгоритма и его блок-схема. Расчет происходит итерационно: задается шаг по давлению dp ; вычисляется время dt , необходимое для повышения давления в баллоне с p до $(p + dp)$ из равенства расходов:

$$dpV = p_0 V_{hi} \lambda_1 n_0 dt.$$

Происходит первоначальный расчет выходных параметров (считается, что на первом шаге происходит 1-й этап работы); выполняется проверка условий перехода на следующие этапы; давление в баллоне увеличивается на dp , суммарное время наполнения увеличи-

вается на вновь вычисленное dt , и если давление в баллоне меньше необходимого, расчет параметров повторяется с новым значением p по формулам для того этапа, для которого было выполнено условие перехода. Если же давление в баллоне достигло максимального давления, расчет останавливается. На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма расчета.

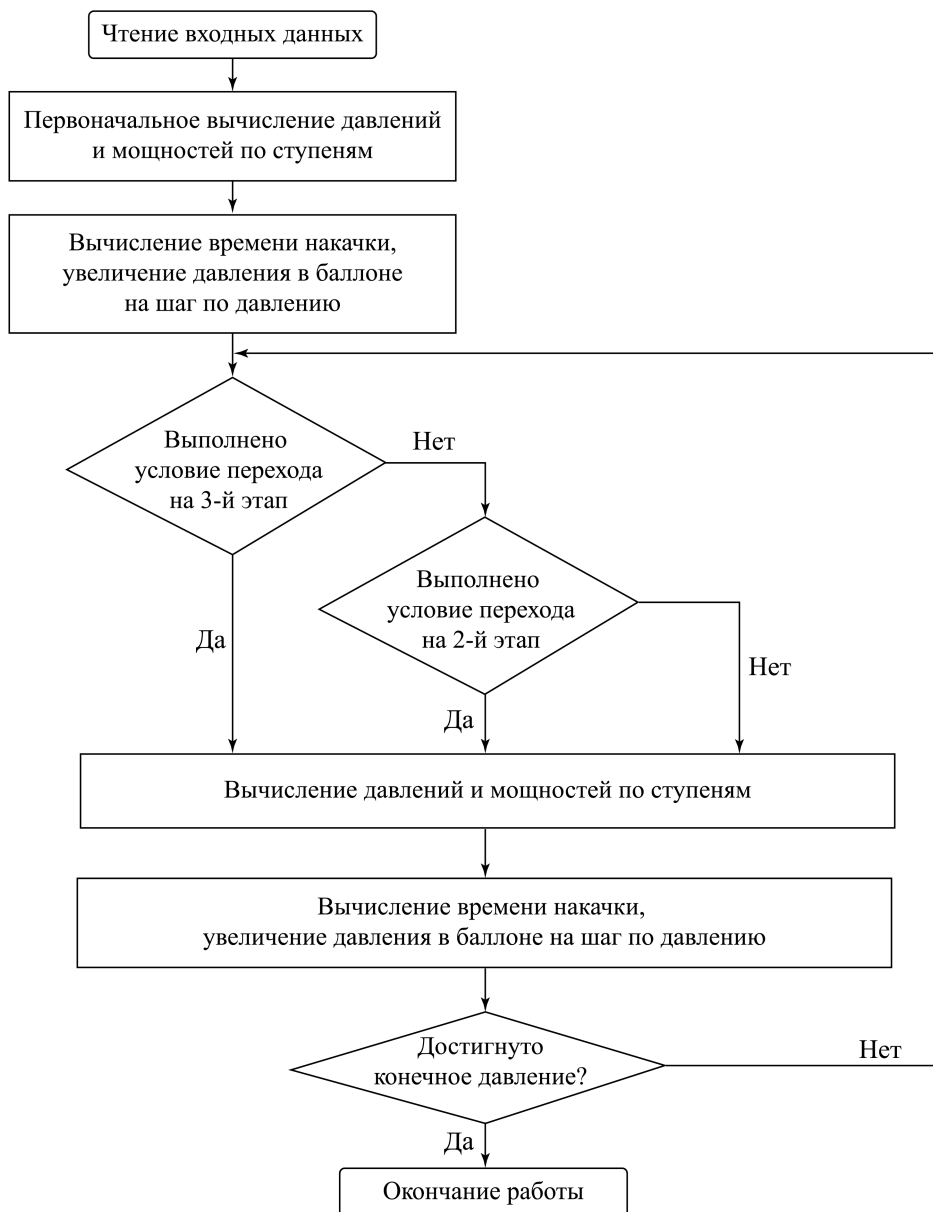


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета

Расчет параметров на 1-м этапе. Работает только 1-я ступень. При прохождении 2-й и 3-й ступени давление газа снижается за счет гидравлических потерь.

Задавая давление в баллоне p , определяем потери давления в клапанах и промежуточных холодильниках и записываем промежуточные давления между ступенями p_{I_m}, p_{II_m} :

$$\delta_{IIIH} = 0,7 \frac{A}{p^{0,25}}; \quad p_{III2} = p(1 + \delta_{IIIH});$$

$$\delta_{III B_i} = 0,3 \frac{A}{p_{II m_{i-1}}^{0,25}}; \quad p_{II m_i} = p(1 + \delta_{IIIH}) + p_{II m_{i-1}} \delta_{III B_i};$$

$$\delta_{IIH} = 0,7 \frac{A}{p_{II m}^{0,25}}; \quad p_{II2} = p_{II m}(1 + \delta_{IIH});$$

$$\delta_{II B_i} = 0,3 \frac{A}{p_{I m_{i-1}}^{0,25}}; \quad p_{I m_i} = p_{II m}(1 + \delta_{IIH}) + \delta_{II B_i} p_{I m_{i-1}};$$

$$\delta_{IH} = 0,7 \frac{A}{p_{I m}^{0,25}}; \quad p_{I2} = p_{I m}(1 + \delta_{IH});$$

$$\delta_{IB} = 0,3 \frac{A}{p_0^{0,25}}; \quad p_{II} = p_0(1 - \delta_{IB}).$$

Далее вычисляются коэффициенты подачи всех ступеней.

$$\lambda_{drI} = \frac{p_{I m}}{p_{I2}}; \quad \lambda_{oI} = 1 - a_1 \left[\left(\frac{p_{I m}}{p_0} \right)^{\frac{1}{mI}} - 1 \right]; \quad \lambda_I = \lambda_{drI} \lambda_{oI} \cdot 0,98 \cdot 0,99;$$

$$\lambda_{drII} = \frac{p_{II m}}{p_{II2}}; \quad \lambda_{II} = \lambda_{drII} \cdot 0,98 \cdot 0,99;$$

$$\lambda_{drIII} = \frac{p}{p_{III2}}; \quad \lambda_{III} = \lambda_{drIII} \cdot 0,98 \cdot 0,99.$$

Индикаторная мощность:

$$\Theta_I = 1 - a_1 \left[\left(\frac{p_{I2}}{p_{II}} \right)^{\frac{1}{k}} - 1 \right];$$

$$N = N_I = p_{II} V_{hl} n_0 \frac{k}{k-1} \Theta_I \left[\left(\frac{p_{I2}}{p_{II}} \right)^{\frac{1}{k}} - 1 \right].$$

Условие перехода на 2-й этап:

$$V_{hI}\lambda_I p_{I1} = V_{hII}\lambda_{II} p_{I2}.$$

Расчет параметров на 2-м этапе. Работают 1-я и 2-я ступени.

$$\delta_{IIIH} = 0,7 \frac{A}{p^{0,25}}; \quad p_{III2} = p(1 + \delta_{IIIH});$$

$$\delta_{III B_i} = 0,3 \frac{A}{p_{II m_i}^{0,25}}; \quad p_{II m_i} = p(1 + \delta_{IIIH}) + p_{II m_{i-1}} \delta_{III B_i};$$

$$\delta_{IHH} = 0,7 \frac{A}{p_{II m}^{0,25}}; \quad p_{II2} = p_{II m}(1 + \delta_{IHH}).$$

Промежуточное давление между 1-й и 2-й ступенями:

$$p_{Im} = \frac{p_0 V_{hI} \lambda_I (T_0 + \Delta T)}{V_{hII} \lambda_{II} T_0}; \quad \delta_{IH} = 0,7 \frac{A}{p_{Im}^{0,25}};$$

$$p_{I2} = p_{Im}(1 + \delta_{IH}); \quad \delta_{IB} = 0,3 \frac{A}{p_0^{0,25}};$$

$$p_{II} = p_0(1 - \delta_{IB}).$$

Коэффициенты подачи 1-, 2- и 3-й ступеней:

$$\lambda_{drI} = \frac{p_{Im}}{p_{I2}}; \quad \lambda_{oI} = 1 - a_I \left(\left[\frac{p_{Im}}{p_0} \right]^{1/m_I} - 1 \right); \quad \lambda_I = \lambda_{drI} \lambda_{oI} \cdot 0,98 \cdot 0,99;$$

$$\lambda_{drII} = \frac{p_{II m}}{p_{II2}}; \quad \lambda_{oII} = 1 - a_{II} \left(\left[\frac{p_{II m}}{p_{Im}} \right]^{1/m_{II}} - 1 \right);$$

$$\lambda_{II} = \lambda_{drII} \lambda_{oII} \cdot 0,98 \cdot 0,99; \quad \lambda_{drIII} = \frac{p}{p_{III2}}; \quad \lambda_{III} = \lambda_{drIII} \cdot 0,98 \cdot 0,99.$$

Индикаторные мощности:

$$\Theta_I = 1 - a_I \left(\left[\frac{p_{I2}}{p_{II}} \right]^{1/k} - 1 \right); \quad N_I = p_{II} V_{hI} n_0 \frac{k}{k-1} \Theta_I \left(\left[\frac{p_{I2}}{p_{II}} \right]^{1/k} - 1 \right);$$

$$\Theta_{II} = 1 - a_{II} \left(\left[\frac{p_{II2}}{p_{III}} \right]^{1/k} - 1 \right); \quad N_{II} = p_{III} V_{hII} n_0 \frac{k}{k-1} \Theta_{II} \left(\left[\frac{p_{II2}}{p_{III}} \right]^{1/k} - 1 \right);$$

$$N = N_I + N_{II}.$$

Условие перехода на 3-й этап:

$$V_{hII} \lambda_I I p_{III} = V_{hIII} \lambda_{III} p_{II2}.$$

Расчет параметров на 3-м этапе. Работают 3 ступени.

$$\delta_{IIIH} = 0,7 \frac{A}{p_{0,25}^{0,25}}; \quad p_{III2} = p(1 + \delta_{IIIH}).$$

Промежуточные давления между 1-й и 2-й ступенями и между 2-й и 3-й:

$$p_{Im} = \frac{p_0 V_{hI} \lambda_I (T_0 + \Delta T)}{V_{hII} \lambda_{II} T_0};$$

$$p_{IIIm} = \frac{p_{Im} V_{hII} \lambda_{II} (T_0 + 2\Delta T)}{V_{hIII} \lambda_{III} T_0};$$

$$\delta_{IIH} = 0,7 \frac{A}{p_{IIIm}^{0,25}}; \quad p_{II2} = p_{IIIm} (1 + \delta_{IIH});$$

$$\delta_{IH} = 0,7 \frac{A}{p_{Im}^{0,25}}; \quad p_{I2} = p_{Im} (1 + \delta_{IH});$$

$$\delta_{IB} = 0,3 \frac{A}{p_0^{0,25}}; \quad p_{I1} = p_0 (1 - \delta_{IB}).$$

Коэффициенты подачи:

$$\lambda_{drI} = \frac{p_{Im}}{p_{I2}}; \quad \lambda_{oI} = 1 - a_I \left(\left[\frac{p_{Im}}{p_0} \right]^{1/m_I} - 1 \right);$$

$$\lambda_I = \lambda_{drI} \lambda_{oI} \cdot 0,98 \cdot 0,99;$$

$$\lambda_{drII} = \frac{p_{IIIm}}{p_{II2}}; \quad \lambda_{oII} = 1 - a_{II} \left(\left[\frac{p_{IIIm}}{p_{Im}} \right]^{1/m_{II}} - 1 \right);$$

$$\lambda_{II} = \lambda_{drII} \lambda_{oII} \cdot 0,98 \cdot 0,99;$$

$$\lambda_{drIII} = \frac{p}{p_{III2}}; \quad \lambda_{oIII} = 1 - a_{III} \left(\left[\frac{p_{IIIIm}}{p_{IIIm}} \right]^{1/m_{III}} - 1 \right);$$

$$\lambda_{III} = \lambda_{drIII} \lambda_{oIII} \cdot 0,98 \cdot 0,99.$$

Индикаторные мощности:

$$\Theta_I = 1 - a_I \left(\left[\frac{p_{I2}}{p_{I1}} \right]^{1/k} - 1 \right); \quad N_I = p_{I1} V_{hI} n_0 \frac{k}{k-1} \Theta_I \left(\left[\frac{p_{I2}}{p_{I1}} \right]^{1/k} - 1 \right);$$

$$\Theta_{II} = 1 - a_{II} \left(\left[\frac{p_{II2}}{p_{II1}} \right]^{1/k} - 1 \right);$$

$$N_{II} = p_{II1} V_{hII} n_0 \frac{k}{k-1} \Theta_{II} \left(\left[\frac{p_{II2}}{p_{II1}} \right]^{1/k} - 1 \right);$$

$$\Theta_{III} = 1 - a_{III} \left(\left[\frac{p_{III2}}{p_{III1}} \right]^{1/k} - 1 \right);$$

$$N_{III} = p_{III1} V_{hIII} n_0 \frac{k}{k-1} \Theta_{III} \left(\left[\frac{p_{III2}}{p_{III1}} \right]^{1/k} - 1 \right);$$

$$N = N_I + N_{II} + N_{III}.$$

На основании представленного алгоритма и блок-схемы расчета разработана программа на языке программирования Delphi для определения времени наполнения баллона компрессора ВТ-1,5 0,3/150 объемом 40 л до давления 5,25 МПа. Результаты расчета показаны на рис. 3 сплошными линиями.

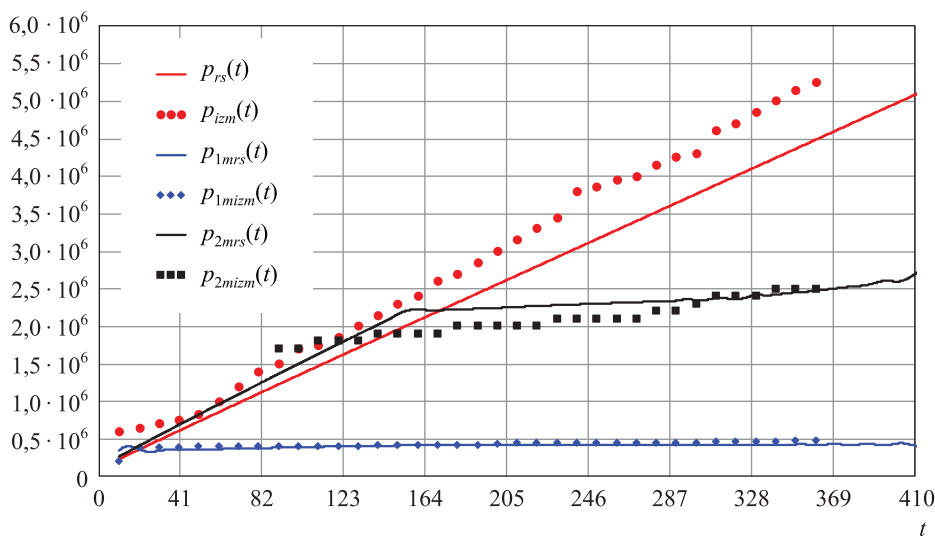


Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных при наполнении емкости 40 л до давления 5,0 МПа

Для проверки адекватности разработанной модели на экспериментальном стенде в лаборатории кафедры «Вакуумные и компрессорные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана были проведены испытания по закачке баллона объемом 40 л компрессором ВТ-1,5 0,3/150 до давления 5,0 МПа. Результаты эксперимента показаны на рис. 3 точками. В первом приближении с погрешностью менее 10% результаты измерений подтверждают адекватность разработанной расчетной модели.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Рыжов Б.М. *Авиационные поршневые компрессоры*. Москва, Оборонгиз, 1963, 332 с.
- [2] Пластинин П.И. *Поршневые компрессоры. Т. 1. Теория и расчет*. Москва, КолосС, 2006, 465 с.
- [3] *Поршневые компрессоры*. Ленинград, Машиностроение, 1987, 372 с.

Статья поступила в редакцию 31.05.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Дегтярева Т.С., Захаров В.И., Зурнаджиев А.А. Работа многоступенчатого компрессора при наполнении емкости. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 5. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/766.html>

Дегтярева Татьяна Сергеевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: tatserg@yandex.ru

Захаров Владимир Игоревич — студент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Зурнаджиев Артем Александрович — студент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана.