

УДК 621.771.23.024.2

Ольховский М. А., Белкин И. Ю., Статива К. Ю.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОЗДУХА В ГИДРОПНЕВМАТИЧЕСКОМ АККУМУЛЯТОРЕ НАСОСНО-АККУМУЛЯТОРНОЙ СТАНЦИИ ГИДРОСБИВА

По свойствам реальные газы значительно отличаются от идеального газа. Физико-химические свойства каждого газа зависят непосредственно от природы молекул, из которых он состоит. Отклонения от теории идеального газа связано с тем, что в природе имеются силы взаимодействия между молекулами (молекулы притягивают одна другую, когда расстояние между ними большое, и отталкиваются, когда они расположены очень близко), а также с тем, что молекулы обладают конечным объемом.

Понятно, что уравнение, описывающее свойства идеального газа не является универсально справедливым, но может, тем не менее, успешно применяться во многих случаях. Инженер должен быть способен оценить величину давления, выше которой этот простой расчет приводит к недопустимым ошибкам.

Например, физик Я. И. Перельман приводит наглядную демонстрацию несостоятельности уравнения Мариотта для высоких давлений [1]:

«...Закон идеального газа гласит, что плотность газа пропорциональна давлению. Применяя этот закон, можно считать, что плотность воздуха под давлением 800 бар должна быть в 800 раз больше, нежели под нормальным давлением. Окружающий нас воздух в 770 раз менее плотен, чем вода. Значит, воздух в пузырьке на глубине 800 м должен быть плотнее воды и, следовательно, не может всплыть на поверхность.

Однако на самом деле, чем больше давление, тем значительнее отступление от закона. Уже под давлением 200 бар воздух сжимается не в 200, а только в 190 раз; под давлением 400 бар – сжимается в 315 раз; при 600 бар – в 387 раз. Под давлением выше 1500 бар воздух сжимается в 510 раз и при дальнейшем увеличении давления сжимается столь же незначительно, как и жидкость...Как бы глубоко под водой ни находился воздушный пузырек – он должен непременно всплыть на поверхность...».

Неидеальность газа выражается через коэффициент сжимаемости:

$$z = \frac{P \cdot V}{\mu \cdot R \cdot T} \quad (1)$$

Для идеального газа сжимаемость равна единице [2].

В действительности же для реальных газов это отношение является переменной величиной, принимающей в зависимости от давления и температуры значения и большие и меньшие единицы, и только при малых давлениях оно для реальных газов приближается к единице.

Для описания поведения реальных газов предложено много различных уравнений. Из них наиболее общим и обоснованным является так называемое вириальное уравнение [3]. Оно выражает отклонение от уравнения состояния идеального газа в виде бесконечного степенного ряда:

$$\frac{P \cdot V}{\mu \cdot R \cdot T} = 1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \frac{D}{V^3}, \quad (2)$$

где B , C , D , ... – второй, третий, четвертый и т. д. вириальные коэффициенты соответственно.

Они зависят от природы сжимаемого газа и являются функциями температуры. При этом коэффициент B определяется взаимодействием двух молекул газа, C связан с взаимодействием трех молекул и т. д. Вириальные коэффициенты определяются экспериментально [4].

Целью данной работы является разработка алгоритма, пригодного для инженерных расчетов параметров гидропневматического аккумулятора, учитывающего свойства воздуха как реального газа.

В качестве эксперимента были проведены наблюдения за работой насосно-аккумуляторной станции системы гидросбива стана 2000 ОАО «ММК», г. Магнитогорск.

Система гидросбива предназначена для удаления окалины с поверхности горячекатаной полосы при помощи энергии водяных струй. В системе используются семь установок гидросбива, предназначенных для включения подачи воды на стан. Установки гидросбива включаются периодически по мере их прохождения прокатываемой полосой. Во время работы стана возможны различные варианты одновременной работы нескольких установок. От количества работающих установок зависит потребляемый станом расход воды. В качестве источника энергии для системы гидросбива используется насосно-аккумуляторная станция с восьмью девятиступенчатыми центробежными насосами, развивающими подачу $270 \text{ м}^3/\text{ч}$ при давлении 150 бар и тремя баллонами емкостью по $9,3 \text{ м}^3$ каждый. Принцип работы такой станции заключается в том, что во время работы гидросбива аккумулятор выдает необходимый объем жидкости, при этом давление воды в баллоне снижается. Во время паузы между сбивами насос закачивает воду в баллон, давление повышается – происходит зарядка аккумулятора. Рабочая жидкость (вода) и рабочий газ гидросистемы (воздух) находятся в непосредственном контакте без разделителя.

В ходе эксперимента были произведены замеры уровня воды (h) в баллоне и соответствующие им значения абсолютного давления (P). Полученные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные данные

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$h, \text{ м}$	1,87	3,87	4,1	4,17	4,22	4,32	4,4	4,54	4,57	4,78	4,84	5,02
$P, \text{ бар}$	128,5	145,3	147	149,8	150,3	153	155,8	157,5	159,3	162,3	162,8	165,3

Данные из первого столбца соответствуют давлению зарядки и начальному уровню воды в аккумуляторе. Для каждого значения давления найдем объем занимаемый водой [5].

Схема для расчета объемов представлена на рис. 1.

$$W = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h + W_0 = 1,307 \cdot h + 0,993. \quad (3)$$

Для каждого полученного значения объема найдем давление, которое должно было быть, если бы в аккумулятор был закачан идеальный газ:

$$P_{ид} = \frac{P_{заряд} \cdot (V_{аккумулятор} - W_{заряд})}{V_{аккумулятор} - W} = \frac{128,5 \cdot (27,9 - 3,437)}{27,9 - W} = \frac{3143,496}{27,9 - W}. \quad (4)$$

Для каждого измеренного значения давления найдем объем, который должна была занимать жидкость, если бы газ в аккумуляторе был идеальным:

$$W_{ид} = V_{аккумулятор} - \frac{P_{заряд} \cdot (V_{аккумулятор} - W_{заряд})}{P} = 27,9 - \frac{128,5 \cdot (27,9 - 3,437)}{P} = 27,9 - \frac{3143,496}{P}. \quad (5)$$

Найдем изменение объема жидкости по сравнению с объемом зарядки для воздуха и идеального газа:

$$\Delta W = W - W_{заряд}. \quad (6)$$

$$\Delta W_{ид} = W_{ид} - W_{заряд}. \quad (7)$$

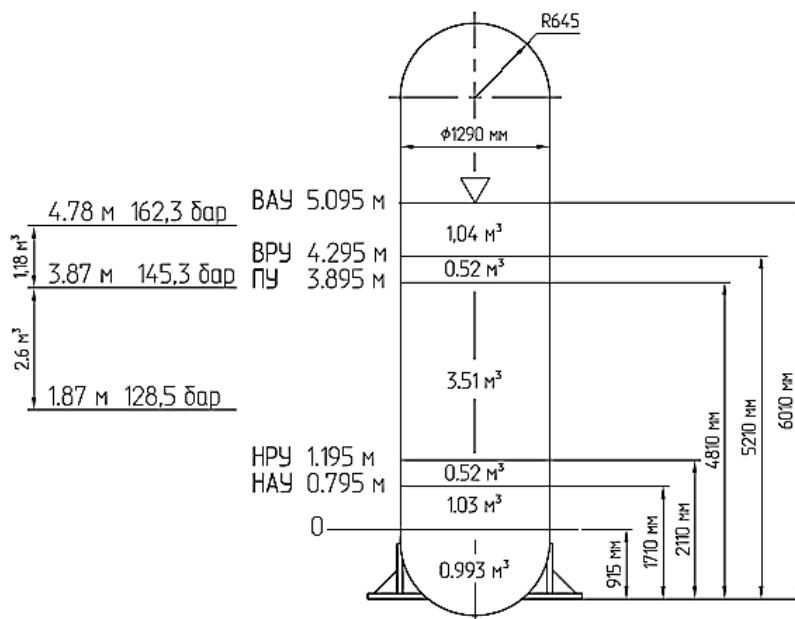


Рис. 1. Расчетная схема аккумулятора

Результаты вычислений сведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные данные

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
W	3,44	6,05	6,35	6,44	6,51	6,64	6,74	6,93	6,97	7,24	7,32	7,55
P_{ud}	128,50	143,87	145,88	146,50	146,95	147,85	148,59	149,88	150,16	152,16	152,74	154,50
W_{ud}	3,44	6,27	6,52	6,92	6,99	7,35	7,72	7,94	8,17	8,53	8,59	8,88
P/P_{ud}	1,000	1,010	1,008	1,023	1,023	1,035	1,049	1,051	1,061	1,067	1,066	1,070
ΔW	0,00	2,61	2,91	3,01	3,07	3,20	3,31	3,49	3,53	3,80	3,88	4,12
ΔW_{ud}	0,00	2,83	3,08	3,48	3,55	3,92	4,29	4,50	4,73	5,09	5,15	5,45

Как видно из полученных данных, поведение воздуха в баллоне не вписывается ни в рамки законов, которые были получены для идеального газа. Тем более что эти законы справедливы исключительно для равновесного состояния газа или, в крайнем случае, квазистатических процессов [7]. Но, тем не менее, для выполнения инженерных расчетов удобнее пользоваться уравнениями состояния идеального газа. Поэтому есть необходимость получить закон отклонения давления реального газа от давления идеального при одинаковых изменениях объема. Это позволит и в дальнейшем проводить расчеты, опираясь на классические уравнения для идеального газа, но в конце расчета скорректировать полученные результаты на величину возможного отклонения.

По результатам расчетов видно, что свойства воздуха при давлении до 145 бар близки к идеальному газу, поэтому функцию отклонения вида $\frac{P}{P_{ud}} = f(P_{ud})$ будем искать для диапазона давлений $P_{ud} = 145...155$ бар.

В соответствии с вириальним уравнением:

$$P = \frac{\mu \cdot R \cdot T}{V} \cdot \left(1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \frac{D}{V^3} \right). \quad (8)$$

Давление идеального газа подчиняется закону Бойля-Мариотта:

$$P_{ид} = \frac{\mu \cdot R \cdot T}{V}. \quad (9)$$

Разделим уравнение (8) на уравнение (9):

$$\frac{P}{P_{ид}} = \left(1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \frac{D}{V^3} \right), \quad (10)$$

учитывая, что в соответствии с формулой 2:

$$V = \frac{\mu \cdot R \cdot T}{P_{ид}}, \quad (11)$$

искомое выражение для давления реального газа запишется в виде:

$$P = P_{ид} \cdot \left(1 + B' \cdot P_{ид} + C' \cdot P_{ид}^2 + D' \cdot P_{ид}^3 \right). \quad (12)$$

Используя метод наименьших квадратов [8], найдем значения вириальных коэффициентов:

$$B' = -1,613 \cdot 10^{-1}; \quad (13)$$

$$C' = 2,110 \cdot 10^{-3}; \quad (14)$$

$$D' = -6,882 \cdot 10^{-6}. \quad (15)$$

График зависимости $\frac{P}{P_{ид}} = f(P_{ид})$ приведен на рис. 2.

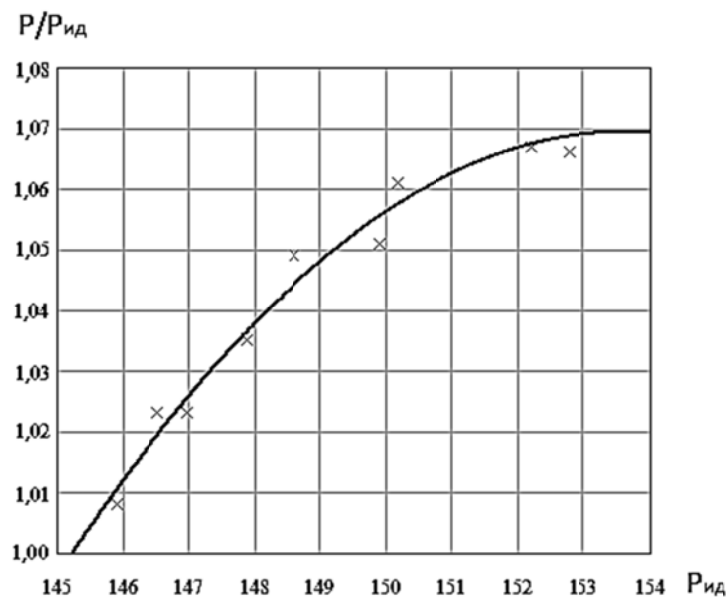


Рис. 2. График зависимости $\frac{P}{P_{ид}} = f(P_{ид})$

Вычислим значения давления P_p в каждой точке, используя полученную зависимость. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Найдем погрешность расчетов:

$$E = \left(\frac{P}{P_p} - 1 \right) \cdot 100 \% . \quad (15)$$

Таблица 3

Расчет погрешности

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P_p	–	–	147,0	148,9	150,2	152,8	154,7	157,7	158,3	161,9	162,7	164,5
$E \%$	–	–	0,02	0,60	0,04	0,14	0,71	-0,15	0,61	0,25	0,05	0,47

ВЫВОДЫ

Погрешность рассчитанных по формуле (12) значений давления не превышает 1 %. При расчетах аккумуляторных станций такого типа следует брать во внимание, что в действительности имеют место существенные отклонения в свойствах воздуха по сравнению с идеальным газом. При дальнейшем росте давления погрешность только увеличивается. Так, если при проектировании насосно-аккумуляторных станций не брать во внимание реальные свойства газов, то при достижении 165 бар ошибка в расчете маневрового объема (по отношению к идеальному газу) составит 1,3 м³ (32 %). Такой аккумулятор может не обеспечить работу системы гидросбива при относительно высоком потреблении воды на стане, вызванным, например, увеличением производительности стана или повышением требований к качеству проката. Применение приведенного алгоритма расчета позволяет производить расчет параметров насосно-аккумуляторной станции с точностью, достаточной для инженерных расчетов, с учетом реальных свойств воздуха. Также, используя приведенный алгоритм, возможно произвести оценочный анализ показателей работы существующих насосно-аккумуляторных станций установок удаления окалина на станах горячей прокатки и принять решение о возможности повышения производительности стана, либо о необходимости оптимизации циклограмм работы стана.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перельман Я. И. Занимательная механика. Знаете ли вы физику? / Я. И. Перельман. – М. : АСТ, 2005. – 462 с.
2. Рид Р. Свойства газов и жидкостей : справочное пособие / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд ; пер. с англ. под ред. Б. И. Соколова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1982. – 592 с., ил. – Нью-Йорк, 1977.
3. Юдаев Б. Н. Техническая термодинамика / Б. Н. Юдаев. – М. : Высш. шк., 1988. – 479 с.
4. Гликман Б. Ф. Математические модели пневмогидравлических систем / Б. Ф. Гликман. – М. : Наука ; Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 368 с.
5. Термодинамика : учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 416 с.
6. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях : справочник / В. Н. Зубарев, А. Д. Козлов, В. М. Кузнецов и др. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 232 с.
7. Александров А. А. Расчет свойств влажного воздуха при повышенных давлениях с учетом реальности свойств компонентов / А. А. Александров, К. А. Орлов // Материалы XI Российской конф. по теплофиз. свойствам веществ. – Т. II. – СПб. : Изд-во СПГУИПТ, 2005. – 82 с.
8. Казавчинский Я. З. Об одном методе определения постоянной виртуальной формы уравнения состояния реального газа / Я. З. Казавчинский // Докл. АН СССР. – 1954. – Т. 95. – С. 1005–1008.