

## ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ И ДРУГИЕ СИЛОВЫЕ УСТАНОВКИ

УДК 621.5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНО НЕОБХОДИМОГО ПОДОГРЕВА СЖАТОГО ВОЗДУХА НА ВХОДЕ В АВТОМОБИЛЬНЫЙ ПНЕВМОДВИГАТЕЛЬ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**А.И. Воронков, доц., к.т.н., Э.В. Тесленко, асп., Т.А. Удовик, асп.,  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет**

*Аннотация.* Рассмотрено изменение параметров минимально необходимого подогрева сжатого воздуха на входе в автомобильный поршневой четырехцилиндровый пневмодвигатель  $D/S=76/66$  мм в зависимости от температуры окружающей среды и уровня давления в воздушных баллонах.

*Ключевые слова:* поршневой пневмодвигатель, сжатый воздух, рабочий процесс, подогрев воздуха, минимально допустимая температура отработанного воздуха.

### ВИЗНАЧЕННЯ МІНІМАЛЬНО НЕОБХІДНОГО ПІДІГРІВУ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ НА ВХОДІ В АВТОМОБІЛЬНИЙ ПНЕВМОДВИГУН ЗА РІЗНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

**О.І. Воронков, доц., к.т.н., Е.В. Тесленко, асп., Т.А. Удовик, асп.,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет**

*Анотація.* Розглянуто змінення параметрів мінімально необхідного підігріву стисненого повітря на вході в автомобільний поршневий чотирициліндровий пневмодвигун  $D/S=76/66$  мм залежно від температури навколишнього середовища і рівня тиску в повітряних балонах.

*Ключові слова:* поршневий пневмодвигун, стиснене повітря, робочий процес, підігрів повітря, мінімально допустима температура відпрацьованого повітря.

### DETERMINATION OF THE MINIMUM REQUIRED VEHICLE PNEUMOENGINE COMPRESSED INLET AIR HEATING UNDER DIFFERENT OPERATING CONDITIONS

**A. Voronkov, Assoc. Prof., Cand. Sc. (Eng.), E. Teslenko, P. G., T. Udovik, P.G.,  
Kharkiv National Automobile and Highway University**

*Abstract.* The change of parameters of the minimum required heating of the  $D/S=76/66$  mm four piston motor compressed inlet air, depending on the ambient temperature and pressure level in the air cylinders.

*Key words:* piston air motor, compressed air, workflow, heated air, minimum allowable temperature of the exhaust air.

#### Введение

При использовании в автомобиле гибридной силовой установки, когда в паре с бензино-

вым работает пневматический двигатель, возникает проблема необходимости подогрева потребляемого сжатого воздуха. Вызывается это тем, что воздух на борту автомобиля

хранится при весьма высоких давлениях, достигающих 40–50 и более МПа, тогда как применяемые пневмодвигатели работают, в основном, при давлениях 0,4–0,6 и не более 1,0 МПа. Для достижения такого рабочего давления поступающий из баллона воздух дросселируется в регулируемом газовом редукторе до задаваемого уровня независимо от его исходного значения. Однако в газовом редукторе снижается не только давление воздуха, но и его температура, в результате общеизвестного Джоуль-Томсоновского эффекта. При понижении начальной температуры этот охлаждающий эффект возрастает. Так, например, в случае дросселирования с 40,0 до 1,0 МПа при начальной температуре 20 °С воздух в результате Джоуль-Томсоновского эффекта охлаждается на 42 градуса, а при начальной температуре минус 30 °С – на 62 градуса. Конечная температура в первом случае достигает минус 22 °С, во втором – минус 92 °С. Это обстоятельство требует подогрева сжатого воздуха перед его поступлением в цилиндры пневматического двигателя.

В статье рассматриваются вопросы минимально необходимого подогрева воздуха, потребляемого поршневым пневмодвигателем.

#### Анализ публикаций

На сегодняшний день известно много публикаций, посвященных исследованию рабочего процесса пневмодвигателей и их применению на различных машинах. Основная литература по этой теме указана в монографии А.И. Воронкова и И.Н. Никитченко [1].

В этой монографии впервые рассмотрены некоторые вопросы подогрева сжатого воздуха в пневмодвигателе выше температуры окружающей среды + 20 °С. Однако проблема минимально необходимого подогрева воздуха при эксплуатации пневмодвигателя на автомобиле там не обсуждается. В данной статье эта проблема рассматривается впервые.

#### Цель и постановка задачи

Целью исследования является определение основных расчетных параметров минимально необходимого подогрева сжатого воздуха на входе в пневмодвигатель при его работе на режиме максимальной эффективной мощности  $N_e^{\max}$  по скоростной характеристике при давлении на входе 0,9 МПа.

В качестве основных задач исследования можно выделить следующие.

Во-первых, необходимо принять условия минимально необходимого подогрева воздуха и установить уровень его температуры, при котором обеспечиваются эти условия.

Во-вторых, для принятых условий изменения температуры окружающей среды и уровней давлений в бортовых емкостях для хранения сжатого воздуха (для краткости назовем их «баллонами») определить с помощью  $T, s$ -диаграммы эффект Джоуль-Томсона  $\Delta T_d, K$ .

Завершающей задачей исследования является определение затрат тепловой энергии на нагрев сжатого воздуха, потребляемого исследуемым двигателем при его работе на выбранном режиме.

#### Выбор температуры воздуха для его необходимого подогрева

Объектом исследования является созданный на кафедре ДВС ХНАДУ поршневой четырехцилиндровый пневмодвигатель с золотниковым воздухораспределением размерностью  $D/S = 76/66$  мм, имеющий рабочий объем цилиндра  $V_h = 0,2994$  дм<sup>3</sup>, относительное вредное пространство  $\varepsilon_0 = 0,935$ , степень наполнения  $\varepsilon_1 = 0,288$ , степень обратного сжатия  $\varepsilon_3 = 0,491$ . При давлении воздуха на входе  $p_{вх} = 0,9$  МПа и температуре  $t_{вх} = 20$  °С пневмодвигатель развивает эффективную мощность  $N_e = 4,17$  кВт, имея при этом частоту вращения коленчатого вала  $n = 700$  мин<sup>-1</sup>, эффективный крутящий момент  $M_e = 56,9$  Н·м и расход сжатого воздуха  $G = 360$  кг/ч.

Под минимально необходимым подогревом поступающего в пневмодвигатель сжатого воздуха будем называть его подогрев до такой температуры, при которой на выбранном режиме максимальной мощности по скоростной характеристике  $p_{вх} = 0,9$  МПа сохраняются минимально допустимые температурные условия для работы системы смазки деталей цилиндра-поршневой группы и не происходит обмерзания выпускных каналов.

Это условие обеспечивается, если согласно опытным данным [2] при обычных сортах смазки принять нижний расчетный (теоретический) температурный предел отработанного воздуха на выпуске из цилиндра минус 50 °С. Минимальная температура рабочего тела по теоретическому рабочему циклу находится в точке 2 (рис. 1). При таком расчетном уровне температуры отработанного воздуха действительная температура работы системы смазки и выпускной системы пневмодвигателя будет на уровне минимально допустимой [2].

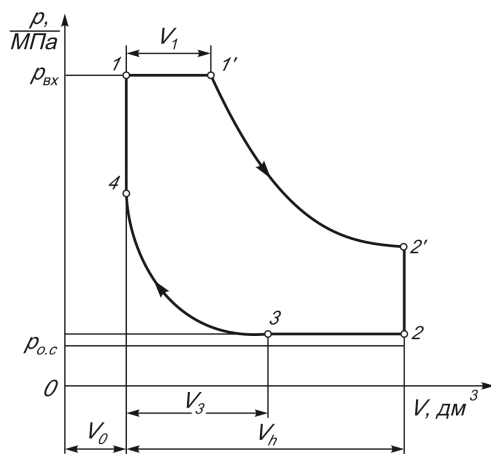


Рис. 1. Теоретическая индикаторная диаграмма – статическая модель рабочего цикла пневматического поршневого двигателя

То обстоятельство, что действительная температура рабочего тела на выходе из цилиндра пневмодвигателя получается существенно выше расчетной по теоретическому циклу, объясняется рядом известных причин. Напомним основные.

Во-первых, в расчете воздух считается сухим и процесс его расширения принимается адиабатным с показателем адиабаты  $k = 1,4$ . В действительности в баллонах воздух имеет относительную влажность 100 % и при расширении влага конденсируется с выделением теплоты. При практическом отсутствии теплоподвода из окружающей среды показатель политропы расширения, как показали эксперименты, равен  $n = 1,32$  [2], что приводит к более высокой температуре в конце расширения.

Во-вторых, в отличие от идеальных обратимых процессов, происходящих в цилиндре пневмодвигателя, реальные быстротекущие необратимые процессы сопровождаются раз-

личного рода гидравлическими и механическими потерями энергии, которые превращаются в теплоту, частично поглощаемую рабочим телом, что повышает его температуру.

В-третьих, низшая расчетная температура отработанного воздуха в точке 2 теоретического цикла (рис. 1) относится не к средней температуре всей массы вытекающего из цилиндра воздуха, а только к его оставшейся меньшей части (составляющей, по нашим расчетам, не более 20–25 %), вытесняемой поршнем из рабочей камеры. Основная же масса отработавшего воздуха (75–80 % всей массы) имеет более высокую температуру, главным образом, потому, что выпуск начинается задолго до теоретического конца расширения на величину предварения выпуска, которое в исследуемом двигателе составляет 40 градусов до н.м.т., т.е. при температуре более высокой по сравнению с температурой теоретического конца расширения.

Таким образом, как пишет в своей работе К.С. Борисенко [2], «если принять во внимание влажность воздуха, ... тепло от трения поршня и среднюю температуру стенок цилиндра, которая несколько выше конечной температуры сжатого воздуха, можно нижний расчетный температурный предел считать ... порядка –50 или даже –60 °С. Только при этой расчетной температуре смазка будет работать в области наименьшей допустимой для нее температуры».

Принятая расчетная (теоретическая) температура рабочего тела в точке 2 (рис. 1)  $t_2 = -50$  °С является важной определяющей величиной, зависящей от изменения температуры воздуха при подогреве, но использовать ее в качестве критерия подогрева воздуха весьма неудобно из-за сложности определения. В качестве оценочного показателя минимально необходимого подогрева удобно принять величину температуры сжатого воздуха на входе в пневмодвигатель  $t_{вх}$ , °С. Эта температура для данной конструкции пневмодвигателя может быть константой, если принять, что  $t_2 = t_{2'}$ , т.е. температуре теоретического конца расширения. А это вполне допустимо, т.к. процесс 2'–2 (рис. 1) – это процесс дросселирования без совершения газом полезной работы и при сравнительно небольшом изменении давления в области невысоких давлений, где, по данным справочника [3, с. 40], воздух при дросселирова-

нии имеет положительный джоуль-томсоновский эффект (что означает охлаждение)  $1/4$  °C на  $0,1$  МПа падения давления. Между температурами  $t_{\text{вх}}$  и  $t_2$  для рассматриваемого пневмодвигателя существует однозначная зависимость, если учесть, что для теоретического рабочего цикла принимается равенство

$$t_{\text{вх}} = t_1 = t_2 \left( \frac{1 + \varepsilon_0}{\varepsilon_1 + \varepsilon_0} \right)^{k-1} = \\ = (273 - 50) \left( \frac{1 + 0,9352}{0,288 + 0,9352} \right)^{1,4-1} = 268 \text{ К} = -5 \text{ °C}.$$

Из этого следует, что  $t_{\text{вх}} \geq -5$  °C может быть принято оценочным показателем нормальной работы системы минимально необходимого подогрева сжатого воздуха на входе в пневмодвигатель, у которого относительное вредное пространство  $\varepsilon_0 = 0,935$  и степень наполнения  $\varepsilon_1 = 0,288$ . Температура на входе  $t_{\text{вх}} = -5$  °C – это верхняя граница минимально необходимого подогрева поступающего в двигатель сжатого воздуха, не зависящая от его давления на входе  $p_{\text{вх}}$ , от его давления в баллоне  $p_{\text{бал}}$ , от температуры окружающей среды  $t_{\text{о.с}}$  и величины  $\Delta T_{\text{д}}$ . Это для данного двигателя – константа, определяемая его конструктивными характеристиками  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_1$ .

### Результаты исследования

Прежде всего заметим, что программа исследования по определению величины минимально необходимого подогрева сжатого воздуха, поступающего в пневмодвигатель, принята с учетом научных и практических интересов и климата Украины. Так, рассмотрены условия работы пневмодвигателя при изменении температуры окружающей среды  $t_{\text{о.с}}$  в пределах от минус 30 °C до плюс 40 °C, а давление в бортовых баллонах для сжатого воздуха было ограничено уровнем  $p_{\text{бал}} = 40,0$  МПа. Ограничение вызвано тем, что этот уровень давления находится на линии инверсии при начальной температуре минус 30 °C. Это означает, что при более высоких давлениях эффект Джоуля–Томсона при дросселировании становится отрицательным – воздух нагревается, а не охлаждается. Из  $T, s$ -диаграммы следует, что с увеличением

давления в баллоне свыше 40,0 МПа  $\Delta T_{\text{д}}$  снижается.

Заметим также, что в исследовании рассматривается в основном интегральный джоуль-томсоновский эффект, т.е. изменение температуры в широком диапазоне падения давления воздуха при его дросселировании, измеряемое, например, десятками МПа. Существует также и понятие дифференциального джоуль-томсоновского эффекта, представляющее собой соотношение бесконечно малого изменения температуры к бесконечно малому изменению давления  $\alpha_i = (dT / dp)_i$ . Однако практически дифференциальным эффектом считают изменение температуры при падении давления на  $0,1$  МПа. Для воздуха в области нормальной температуры (0 °C) в первом приближении  $\alpha_i = 0,25$  градуса на  $\Delta p = 0,1$  МПа [3].

Интегральный  $\Delta T_{\text{д}}$  и средний дифференциальный эффекты имеют естественную связь [3]

$$\Delta T_{\text{д}} = T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} \alpha_i \cdot dp = \alpha_i^m \cdot \Delta p_{\text{общ}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_i^m$  – среднее значение изменения температуры при уменьшении давления на  $0,1$  МПа в интервале  $\Delta p_{\text{общ}} = p_1 - p_2$ .

В исследовании принято, что температура сжатого воздуха в баллоне равна температуре окружающей среды  $t_{\text{бал}} = t_{\text{о.с}}$  и что при всех рассмотренных начальных давлениях в баллоне  $p_{\text{бал}} = 40,0; 20,0; 10,0$  и  $5,0$  МПа конечное давление после дросселирования (давление на выходе из газового редуктора)  $p_{\text{ред.вых}}$  одинаково и равно  $1,0$  МПа. На входе в пневмодвигатель давление  $p_{\text{вх}} = 0,9$  МПа. В промежутке между газовым редуктором и двигателем на автомобиле установлен подогреватель сжатого воздуха, в котором гидравлические потери давления условно приняты равными  $0,1$  МПа.

В исследовании рассматривается один рабочий режим – режим максимальной мощности по скоростной характеристике  $p_{\text{вх}} = 0,9$  МПа, при частоте вращения коленчатого вала  $n = 700 \text{ мин}^{-1}$ . При работе с подогревом воз-

духа его температура на входе в двигатель принята неизменной:  $t_{\text{вх}} = -5 \text{ }^\circ\text{C} = \text{const}$ , как принятый оценочный показатель минимально необходимого подогрева, не зависящий ни от давления сжатого воздуха на входе  $p_{\text{вх}}$ , ни от частоты вращения вала  $n$ , ни от внешних условий. При этом пневмодвигатель потребляет количество сжатого воздуха  $G_\rho = 394 \text{ кг/ч}$  (вместо  $360 \text{ кг/ч}$  при  $t_{\text{вх}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Основные результаты данного аналитического исследования представлены на рис. 2–10 и в табл. 1.

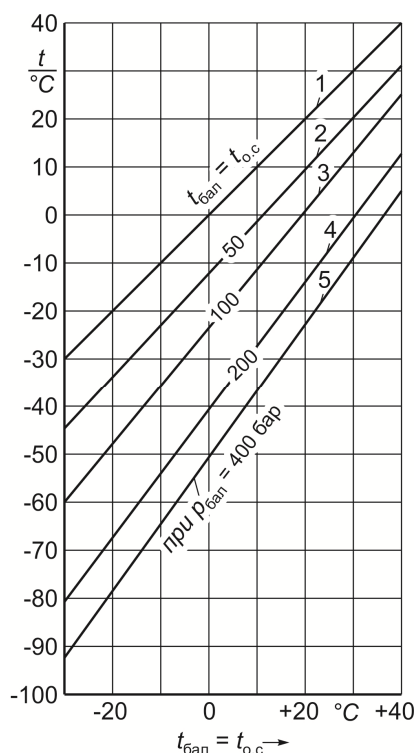


Рис. 2. Изменение температуры сжатого воздуха в процессах дросселирования в газовом редукторе в зависимости от его начальных температуры и давления в баллоне  $t_{\text{балл}}$  и  $p_{\text{балл}}$  при неизменном давлении в конце дросселирования  $p_{\text{ред.вых}} = 1,0 \text{ МПа}$

На графиках рис. 2 показано, как изменяется температура сжатого воздуха в процессах его дросселирования в газовом редукторе. По представленным графикам можно проследить изменение эффекта Джоуля–Томсона в зависимости от температуры воздуха в начале дросселирования и как зависит интегральная величина эффекта от начального давления в баллоне. Численная величина джоуль-томсоновского эффекта выражается расстоянием по вертикали между линией 1 и после-

дующими линиями, т.е. величиной ординаты, соответствующей данной начальной температуре. Линия 1 – это линия начальной температуры воздуха<sup>1</sup> в начале процессов дросселирования при всех рассматриваемых давлениях в баллоне и температурах окружающей среды. Следующие ниже – это линии конечных температур воздуха на выходе из газового редуктора, т.е. линии конца дросселирования, где давление достигает  $1,0 \text{ МПа}$ , а температура соответствует сработавшему перепаду давлений<sup>2</sup>. Эти температурные линии для простоты обозначены значениями давлений в баллоне в начале дросселирования, поскольку отражают величины охлаждающего эффекта Джоуля–Томсона при данном давлении в баллоне.

Из графиков на рис. 2 видно, что охлаждающий интегральный джоуль-томсоновский эффект  $\Delta T_{\text{д}}$ , К, определяется в первую очередь величиной срабатывающего в процессе дросселирования перепада давления, а также существенно зависит от температуры воздуха в начале процесса – при снижении начальной температуры эффект заметно возрастает. Так, при давлении в баллоне  $p_{\text{балл}} = 40,0 \text{ МПа}$  и начальной температуре  $+40 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>3</sup>,  $\Delta T_{\text{д}} = 35$  градусов, при  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $\Delta T_{\text{д}} = 42$  градуса, при  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $\Delta T_{\text{д}} = 50,5$  градуса и при минус  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $\Delta T_{\text{д}} = 62$  градуса.

На рис. 3, 4 показаны изменения среднего дифференциального джоуль-томсоновского эффекта  $\alpha_i^m$  в зависимости от температуры и давления сжатого воздуха в баллоне при заданных условиях дросселирования до  $1,0 \text{ МПа}$ .

Из графиков на рис. 3, 4 видно, что средний дифференциальный джоуль-томсоновский эффект  $\alpha_i^m$ , К/бар, при снижении температуры в начале процесса дросселирования также возрастает, как и эффект интегральный, но с повышением начального давления воздуха дифференциальный эффект, в отличие от интегрального, снижается с нарастающим темпом, что можно также увидеть из данных табл. 1.

<sup>1</sup> При всех рассматриваемых начальных давлениях в баллоне, т.е. это линия начальных температур в баллоне.

<sup>2</sup> Эффект Джоуля–Томсона определяется перепадом давления  $\Delta p = p_{\text{балл}} - p_{\text{ред.вых}}$ .

<sup>3</sup> Как видно из графиков на рис. 2.

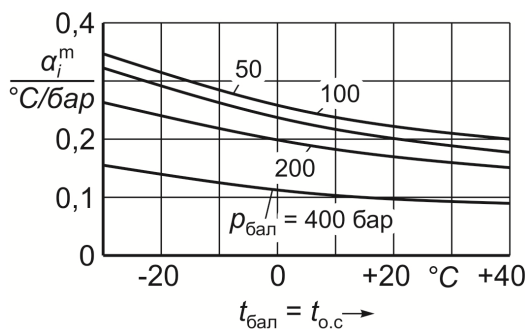


Рис. 3. Изменение среднего дифференциального джоуль-томсоновского эффекта  $\alpha_i^m$ , °С при дросселировании сжатого воздуха в газовом редукторе в зависимости от его температуры в баллоне  $t_{бал}$ , °С при различном уровне его давления в баллоне  $p_{бал}$ , МПа и при неизменном его давлении в конце дросселирования  $p_{ред.вых} = 1,0$  МПа

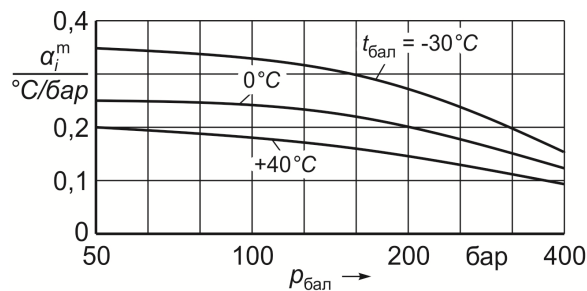


Рис. 4. Изменение среднего дифференциального джоуль-томсоновского эффекта  $\alpha_i^m$ , °С при дросселировании сжатого воздуха в газовом редукторе в зависимости от его давления в баллоне  $p_{бал}$ , бар при различной его температуре в баллоне  $t_{бал}$  и при неизменном его давлении в конце дросселирования  $p_{ред.вых} = 1,0$  МПа

На рис. 5–8 показаны изменения температуры сжатого воздуха на выходе из газового редуктора  $t_{ред.вых}$  (самая низкая температура в воздушной системе пневмодвигателя) и величины подогрева воздуха  $\Delta t_{под} = |t_{вх}^{min} - t_{ред.вых}|$  в зависимости от температуры воздуха в баллоне  $t_{бал} = t_{о.с}$  при давлениях в баллонах  $p_{бал} = 40,0; 20,0; 10,0$  и  $5,0$  МПа.

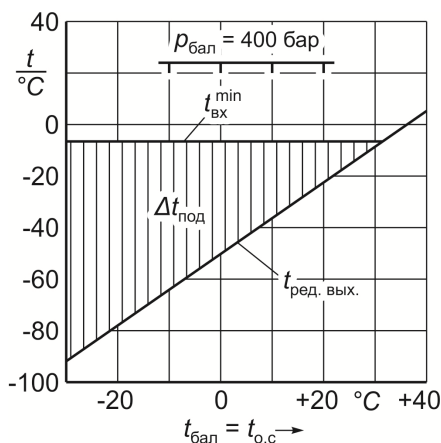


Рис. 5. Изменение температуры сжатого воздуха на выходе из газового редуктора  $t_{ред.вых}$  и величины его подогрева  $\Delta t_{под}^{min} = |t_{вх}^{min} - t_{ред.вых}|$  в зависимости от температуры окружающей среды  $t_{о.с}$ , при давлении в баллоне  $p_{бал} = 40$  МПа

Из рис. 5–8 видно, что глубина охлаждения сжатого воздуха при дросселировании определяется двумя факторами: начальным давлением  $p_{бал}$  и начальной температурой  $t_{бал}$ . Самая низкая температура  $t_{ред.вых}^{min} = -92$  °С достигнута при самом высоком из числа рассмотренных давлений в баллоне  $p_{бал} = 40,0$  МПа и при самой низкой из числа рассмотренных температур сжатого воздуха в баллоне  $t_{бал} = -30$  °С. Именно при этих условиях имеет место наибольший джоуль-томсоновский охлаждающий эффект  $\Delta T_{д}^{max} = 62$  градуса. И при этих же условиях возникает необходимость и самого значительного подогрева поступающего в двигатель сжатого воздуха  $\Delta t_{под}^{max} = 87$  градусов. При этом же давлении в баллоне – 40,0 МПа, как видно из рис. 5, по мере повышения температуры в баллоне подогрев  $\Delta t_{под}$  снижается и теоретически заканчивается только при температуре  $t_{бал} = -32$  °С. При меньших давлениях в баллоне, как видно из рис. 6–8, подогрев заканчивается при меньших температурах воздуха в баллоне: 26 °С – при  $p_{бал} = 20,0$  МПа; 14 °С – при  $p_{бал} = 10,0$  МПа и 6 °С – при  $p_{бал} = 5,0$  МПа. Конечно, только опыт эксплуатации пневмодвигателей подскажет, когда целесообразно заканчивать подогрев воздуха.

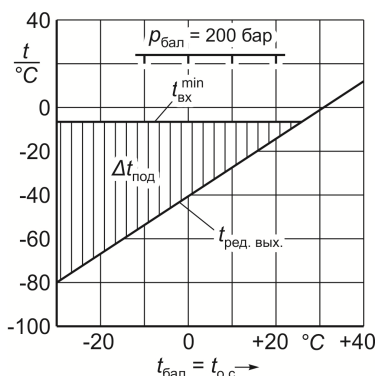


Рис. 6. Изменение температуры сжатого воздуха на выходе из газового редуктора  $t_{ред.вых}$  и величины его подогрева  $\Delta t_{под} = |t_{вх}^{min} - t_{ред.вых}|$  в зависимости от температуры окружающей среды  $t_{о.с}$  при давлении в баллоне  $p_{бал} = 20$  МПа

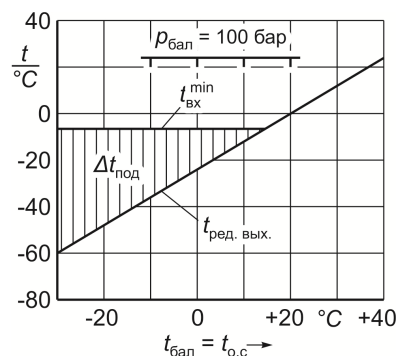


Рис. 7. Изменение температуры сжатого воздуха на выходе из газового редуктора  $t_{ред.вых}$  и величины его подогрева  $\Delta t_{под} = |t_{вх}^{min} - t_{ред.вых}|$  в зависимости от температуры окружающей среды  $t_{о.с}$  при давлении в баллоне  $p_{бал} = 10$  МПа

Таблица 1 Параметры минимально необходимого подогрева сжатого воздуха на входе в пневмодвигатель на режиме максимальной мощности при  $p_{вх} = 9$  бар,  $n = 700$  мин<sup>-1</sup>

Параметры процессов в газовом редукторе и подогревателе	Задаваемые условия									
	$p_{бал}$ , бар	400		200		100		50		
Давление воздуха в баллоне	$p_{бал}$ , бар	400		200		100		50		
Давление воздуха на выходе из редуктора	$p_{ред.вых}$ , бар	10	10	10	10	10	10	10	10	
Температура окружающей среды при максимальном и минимальном подогреве	$t_{о.с}$ , °C	-30	+20	-30	+20	-30	0	-30	0	
Температура воздуха на выходе из газового редуктора	$t_{ред.вых}$ , °C	-92	-22	-81	-13,5	-60	-22,5	-44	-10,5	
Интегральный джоуль-томсоновский эффект	$\Delta T_d$ , К	62	42	51	33,5	30	22,5	14	10,5	
Средний дифференциальный джоуль-томсоновский эффект	$\alpha_i^m$ , К/бар	0,159	0,108	0,268	0,176	0,333	0,250	0,350	0,263	
Минимально необходимый подогрев сжатого воздуха	$\Delta T_{под}^{min}$ , К	87	17	76	8,5	55	17,5	39	5,5	
Секундная затрата тепловой энергии на подогрев воздуха	$Q_{под}$ , кДж/с	12,9	2,28	11,04	1,13	7,70	2,34	5,36	0,72	
Отношение $Q_{под}$ к номинальной мощности двигателя $N_0 = 4,17$ кВт	$Q_{под} / N_0$	3,09	0,55	2,65	0,27	1,85	0,56	1,28	0,17	

В данном исследовании подогрев воздуха рассматривается только до  $t_{бал} = +20$  °C – при  $p_{бал} = 40,0$  и  $20,0$  МПа и до  $t_{бал} = 0$  °C – при  $p_{бал} = 10,0$  и  $5,0$  МПа. В табл. 1 для краткости представлены данные только для условий, представляющих наибольший практический интерес – когда подогрев макси-

мальный и когда он минимальный из числа рассмотренных по принятой программе.

На рис. 9 наиболее наглядно показано изменение величины минимально необходимого подогрева сжатого воздуха  $\Delta T_{под}^{min}$  в зависимости от давления и температуры в баллоне.

Приведенные графики пояснений не требуют.

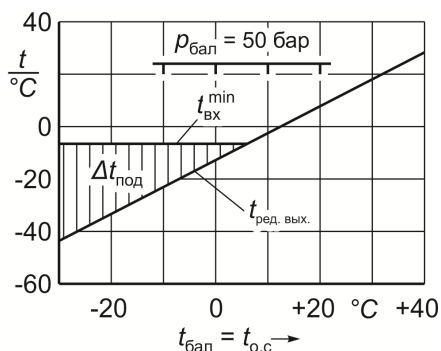


Рис. 8. Изменение температуры сжатого воздуха на выходе из газового редуктора  $t_{ред.вых}$  и величины его подогрева  $\Delta t_{под} = |t_{вх}^{min} - t_{ред.вых}|$  в зависимости от температуры окружающей среды  $t_{о.с}$  при давлении в баллоне  $p_{бал} = 5 \text{ МПа}$

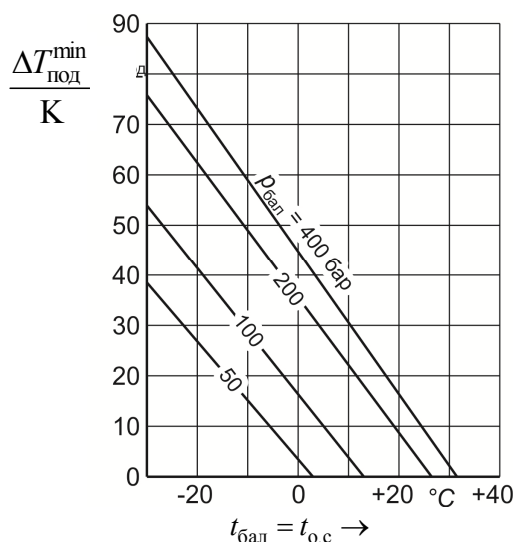


Рис. 9. Изменение величины минимально допустимого подогрева сжатого воздуха на входе в пневмодвигатель  $\Delta T_{под}^{min}$  в зависимости от температуры окружающей среды  $t_{о.с}$  и при давлении в баллоне  $p_{бал}$

На рис. 10 представлены графики секундных затрат энергии на подогрев сжатого воздуха, потребляемого на расчетном режиме максимальной мощности при давлении на входе  $p_{вх} = 0,9 \text{ МПа}$  и частоте вращения коленчатого вала  $n = 700 \text{ мин}^{-1}$

$$Q_{под} = G_d \cdot c_{pm} \cdot \Delta T_{под}^{min} / 3600, \text{ кДж/с}, \quad (2)$$

где  $G_d$  – действительный массовый часовой расход сжатого воздуха на расчетном режиме работы двигателя, кг/ч;  $G_d = 394 \text{ кг/ч}$  (данные эксперимента);  $c_{pm}$  – массовая изобарная средняя для рассматриваемого диапазона температур и заданного давления теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К);  $c_{pm}$  является функцией давления воздуха и его абсолютной средней температуры при подогреве; давление при подогреве практически равно давлению на входе  $p_{под} = p_{вх} = 0,9 \text{ МПа}$ ; средняя температура подогреваемого сжатого воздуха по шкале Кельвина  $T_m = 0,5(T_{вх} + T_{ред.вых})$ ; величина  $c_{pm}$  в зависимости от  $T_m$  и  $p_{под}$  находится по справочным таблицам [5].

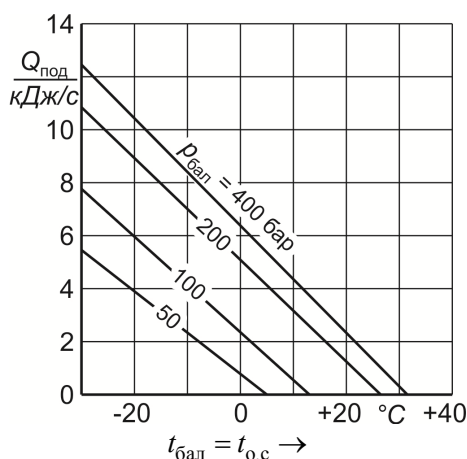


Рис. 10. Изменение секундных затрат энергии на подогрев сжатого воздуха  $Q$ , кДж/с, в зависимости от его температуры  $t_{бал}$  и давления в баллоне  $p_{бал}$ , бар

Из рис. 10 и данных табл. 1 следует, что при максимальном давлении в баллоне  $p_{бал} = 40,0 \text{ МПа}$  и минимальной температуре в баллоне  $t_{бал} = -30 \text{ °C}$  имеют место максимальные затраты энергии на минимально необходимый подогрев (на 87 градусов) потребляемого двигателем воздуха. Эти затраты составляют  $Q_{под} = 12,9 \text{ кДж/с}$ , что в 3,09 раза превышает номинальную эффективную мощность пневмодвигателя. Такой уровень затрат следует оценить, по-видимому, как весьма высокий, что вызвано прежде всего высоким удельным эффективным расходом сжатого воздуха  $g = G_d / N_e = 394/4,17 = 94,5 \text{ кг/(кВт·ч)}$ , что, в свою очередь, объясняется его сравнительно низким



уровнем удельной располагаемой работоспособности (эксергии). Так, например, удельная эксергия бензина  $ex_{бен} = 46118$  кДж/кг [1], тогда как удельная эксергия воздуха при давлении 0,9 МПа и температуре  $T_1 = 290$  К открытая система (окружающая среда  $T_{о.с} = 290$  К;  $p_{о.с} = 0,1$  МПа)  $ex_{возд} = 182,9$  кДж/кг, что меньше в 252 раза.

При более низких давлениях и более высоких температурах воздуха в баллоне затраты тепловой энергии на его подогрев сокращаются, но остаются существенными.

### Выводы

По изложенным результатам аналитического исследования можно сделать следующие выводы.

1. Установлен оценочный показатель работы системы минимально необходимого подогрева сжатого воздуха, поступающего в пневмодвигатель, – его температура на входе в воздухораспределитель должна быть не ниже минус 5 °С, что обеспечивает сохранение работоспособности двигателя; при более низкой температуре поступающего воздуха на входе  $t_{вх} < -5$  °С нарушаются условия смазки в первую очередь деталей цилиндропоршневой группы и возникает обмерзание выпускных каналов.

2. Хранение на борту автомобиля запаса сжатого воздуха под высоким давлением связано с потребностью его дросселирования до рабочего давления и с неизбежным падением при этом его температуры, и чем выше давление в баллоне и ниже его начальная температура, тем в большей мере охлаждается воздух в газовом редукторе. Все это неизбежно влечет за собой потребность подогревать воздух до минимально допустимой температуры (минус 5 °С) перед поступлением в пневмодвигатель.

3. Подогрев воздуха для питания пневмодвигателя – процесс весьма энергозатратный. Так, например, при давлении в баллоне 40,0 МПа и начальной температуре минус 30 °С и дросселировании его до 1,0 МПа температура после редуктора падает до минус 92 °С, и на его подогрев до минус 5 °С надо тратить 12,9 кВт энергии, что в три с лишним раза больше номинальной мощности пневмодвигателя  $Ne = 4,17$  кВт. Если же дросселирование начинается не с минус 30 °С, а с плюс 20 °С, то на его подогрев тратится уже 2,28 кВт, что составляет 55 % мощности двигателя.

4. Определены величины температуры сжатого воздуха на выходе из газового редуктора  $t_{ред. вых}$ , интегральный джоуль-томсоновский эффект  $\Delta T_d$ , средний дифференциальный джоуль-томсоновский эффект  $\alpha_i^m$  и затраты тепловой энергии на минимально необходимый подогрев воздуха  $Q_{под}$  в зависимости от его давления и температуры в баллоне в представляющем практический интерес диапазоне их изменений.

### Литература

1. Воронков А.И. Рабочий процесс автомобильного пневмодвигателя: монография / А.И. Воронков, И.Н. Никитченко. – Х.: ХНАДУ, 2015. – 200 с.
2. Борисенко К.С. Пневматические двигатели горных машин / К.С. Борисенко. – М.: Углетехиздат, 1958. – 206 с.
3. Малков М.П. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения / М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович, А.Б. Фрадков. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 416 с.

Рецензент: А.Н. Врублевский, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 3 октября 2016 г.