

УДК 65-1/-9

doi 10.54708/22259309\_2025\_33494

## ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ВЫХЛОПНОМ ТРАКТЕ ГПА

Н. К. Горшкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>holynady@gmail.com

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

**Аннотация.** В данной работе выполнен гидравлический расчет выхлопного тракта, входящего в состав ГПА-Ц-25 (КС «Арская»), где в качестве газотурбинного привода используется двигатель АЛ-41СТ. Рассмотрен выхлопной тракт, непрерывно отводящий выхлопные газы от газотурбинной установки (ГТУ) мощностью 32 МВт.

**Ключевые слова:** газоперекачивающий агрегат; выхлопной тракт; улитка; газотурбинная установка.

### ВВЕДЕНИЕ

В данной работе представлены результаты гидравлического расчета выхлопного тракта газоперекачивающего агрегата (ГПА) ГПА-Ц-25 (компрессорная станция (КС) «Арская»), где в качестве газотурбинного привода используется двигатель АЛ-41СТ. Расчет приведен для газотурбинной установки (ГТУ), имеющей мощность 32 МВт.

Газоперекачивающий агрегат – это устройство, предназначенное для сжатия природного газа на КС газопроводов и подземных хранилищ.

Компоновка ГПА включает: блок центробежного компрессора, блок ГТУ, комплексное воздухоочистительное устройство, выхлопную систему.

Выхлопной тракт предназначен для непрерывного отвода выхлопных газов от двигателя АЛ-41СТ на различных эксплуатационных режимах. В настоящей работе необходимо иметь в виду то, что за счет обеспечения минимальных потерь давления в тракте достигаются наилучшая производительность двигателя АЛ-41СТ и повышение его технико-экономических показателей.

### ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВЫХЛОПНОГО ТРАКТА ГПА

Проведен гидравлический расчет выхлопного тракта ГПА, схема которого показана на рис. 1, в соответствии с методикой [1].

Для упрощения расчета произвели разбиение тракта выхлопа на более простые по геометрической форме участки, связанные с изменением сечения по длине, изменением направления движения воздуха в канале, а также внезапным расширением или сужением канала.

Далее в гидравлическом расчете были приняты следующие опорные значения некоторых данных: молекулярная динамическая вязкость газа  $\mu = 4.03 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ , расход воздуха  $G = 95 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$ , плотность газа  $\rho = 1.3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ , давление окружающей среды  $P_H = 101\,325 \text{ Па}$ , ускорение свободного падения  $g = 9.8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ .

Расчет по участкам:

1. Улитка:

Гидравлический диаметр:

$$D_r = D_1 - D_2 = 1.840 - 0.800 = 1.040 \text{ м.}$$

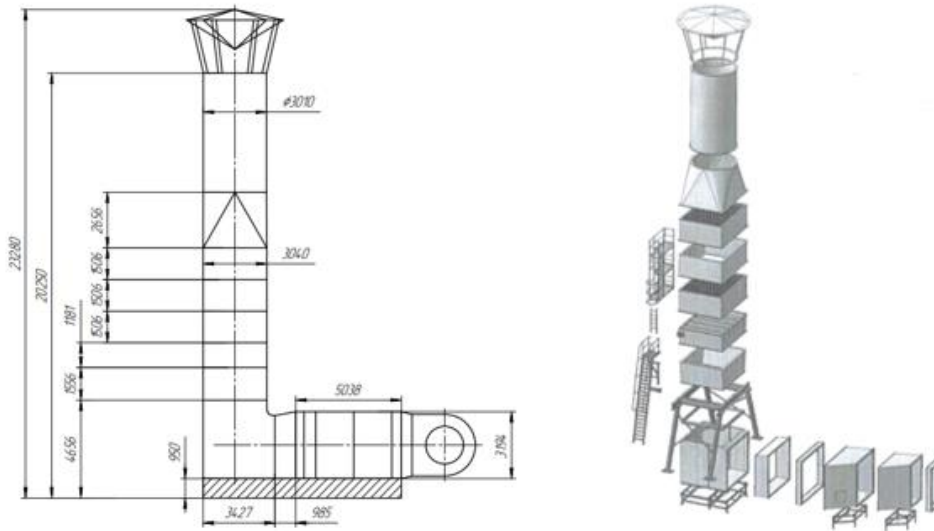


Рис. 1 Схема выхлопного тракта ГПА

Площадь поперечного сечения:

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot (D_1^2 - D_2^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (1.840^2 - 0.800^2) = 2.16 \text{ м}^2.$$

Согласно балансу расходов, скорость движения воздуха на участке равна:

$$W = \frac{G}{\rho \cdot F} = \frac{95}{1.3 \cdot 2.16} = 33.83 \text{ м/с}.$$

Перепад полного давления на данном участке по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$\begin{aligned} \Delta p_1 &= [\xi_{\text{тр}} + \xi_{\text{м}}] \cdot \frac{\rho \cdot W^2}{2} \pm \Delta z \cdot \rho \cdot g = \frac{\xi \cdot W^2 \cdot \rho}{2} - \Delta z \cdot \rho \cdot g = \\ &= \frac{1.2 \cdot 33.83^2 \cdot 1.3}{2} = 892.69 \text{ Па}, \end{aligned}$$

где  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления, равный для данного участка 1.2.

1. Прямой участок с прямоугольным сечением:

Гидравлический диаметр:

$$D_{\text{г}} = \frac{4 \cdot F}{\Pi} = \frac{4 \cdot 8.14}{11.49} = 2.83 \text{ м},$$

$$F = a \cdot b = 3.194 \cdot 2.550 = 8.14 \text{ м}^2,$$

$$\Pi = 2 \cdot (a + b) = 2 \cdot (3.194 + 2.550) = 11.49 \text{ м},$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;

$\Pi$  – периметр, м;

$a, b$  – стороны прямоугольника, м.

Согласно балансу расходов, скорость движения воздуха на участке равна:

$$W = \frac{G}{\rho \cdot F} = \frac{95}{1.3 \cdot 8.14} = 8.98 \text{ м/с}.$$

Число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{D_{\text{г}} \cdot W \cdot \rho}{\mu} = \frac{2.83 \cdot 8.98 \cdot 1.3}{4.03 \cdot 10^{-5}} = 819787 > 2300,$$

следовательно, турбулентный режим течения.

Для турбулентного режима течения и гидравлически гладких стенок канала согласно формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}} = \frac{0.3164}{819787^{0.25}} = 0.0105.$$

Коэффициент трения на данном участке:

$$\xi_{\text{тр}} = \frac{\lambda \cdot L}{D_r} = \frac{0.0105 \cdot 6.023}{2.83} = 0.022,$$

где  $L$  – длина рассматриваемого участка канала, м.

Перепад полного давления на данном участке по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$\begin{aligned} \Delta p_2 &= [\xi_{\text{тр}} + \xi_M] \cdot \frac{\rho \cdot W^2}{2} \pm \Delta z \cdot \rho \cdot g = \frac{\xi \cdot W^2 \cdot \rho}{2} - \Delta z \cdot \rho \cdot g = \\ &= \frac{0.022 \cdot 8.98^2 \cdot 1.3}{2} = 1.15 \text{ Па.} \end{aligned}$$

2. Участок с поворотом направления движения воздуха на  $90^\circ$ :

Гидравлический диаметр:

$$\begin{aligned} D_r &= \frac{4 \cdot F}{\Pi} = \frac{4 \cdot 9.61}{12.4} = 3.1 \text{ м,} \\ F &= a \cdot b = 3.1 \cdot 3.1 = 9.61 \text{ м}^2, \\ \Pi &= 2 \cdot (a + b) = 2 \cdot (3.1 + 3.1) = 12.4 \text{ м,} \end{aligned}$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;

$\Pi$  – периметр, м;

$a, b$  – стороны прямоугольника, м.

Согласно балансу расходов скорость движения воздуха на участке равна:

$$W = \frac{G}{\rho \cdot F} = \frac{95}{1.3 \cdot 9.61} = 7.60 \text{ м/с.}$$

Число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{D_r \cdot W \cdot \rho}{\mu} = \frac{3.1 \cdot 7.60 \cdot 1.3}{4.03 \cdot 10^{-5}} = 760000 > 2300,$$

следовательно, турбулентный режим течения.

Для турбулентного режима течения и гидравлически гладких стенок канала согласно формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}} = \frac{0.3164}{760000^{0.25}} = 0.0107.$$

Коэффициент гидросопротивления:

$$\xi = \xi_M + 0.0175 \cdot R_0 \cdot \frac{\delta \cdot \lambda}{D_r} = 0.55 + 0.0175 \cdot 1.52 \cdot \frac{90 \cdot 0.0107}{3.1} = 0.56,$$

где  $\xi_M$  – коэффициент местного сопротивления на данном участке, равный 0.55.

Перепад полного давления на данном участке по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$\begin{aligned} \Delta p_3 &= [\xi_{\text{тр}} + \xi_M] \cdot \frac{\rho \cdot W^2}{2} \pm \Delta z \cdot \rho \cdot g = \frac{\xi \cdot W^2 \cdot \rho}{2} + \Delta z \cdot \rho \cdot g = \\ &= \frac{0.56 \cdot 7.60^2 \cdot 1.3}{2} + 7.38 \cdot 1.3 \cdot 9.8 = 115.05 \text{ Па,} \end{aligned}$$

где  $\Delta z$  – перепад нивелировочных высот, м

1. Прямой участок квадратного сечения:

Гидравлический диаметр:

$$\begin{aligned} D_r &= \frac{4 \cdot F}{\Pi} = \frac{4 \cdot 9.242}{12.16} = 3.04 \text{ м,} \\ F &= a \cdot b = 3.04 \cdot 3.04 = 9.242 \text{ м}^2, \\ \Pi &= 2 \cdot (a + b) = 2 \cdot (3.04 + 3.04) = 12.16 \text{ м,} \end{aligned}$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;

$\Pi$  – периметр, м;

$a, b$  – стороны квадрата, м.

Согласно балансу расходов скорость движения воздуха на участке равна:

$$W = \frac{G}{\rho \cdot F} = \frac{95}{1.3 \cdot 9.242} = 7.91 \text{ м/с.}$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{D_r \cdot W \cdot \rho}{\mu} = \frac{3.04 \cdot 7.91 \cdot 1.3}{4.03 \cdot 10^{-5}} = 775690 > 2300,$$

следовательно, турбулентный режим течения.

Для турбулентного режима течения и гидравлически гладких стенок канала, согласно формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} = \frac{0.3164}{775690^{0.25}} = 0.0107.$$

Коэффициент трения на данном участке:

$$\xi_{тр} = \frac{\lambda \cdot L}{D_r} = \frac{0.0107 \cdot 72.55}{3.04} = 0.255,$$

где  $L$  – длина рассматриваемого участка канала, м.

Перепад полного давления на данном участке по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$\Delta p_4 = [\xi_{тр} + \xi_M] \cdot \frac{\rho \cdot W^2}{2} \pm \Delta z \cdot \rho \cdot g = \frac{\xi \cdot W^2 \cdot \rho}{2} - \Delta z \cdot \rho \cdot g = \frac{0.255 \cdot 7.91^2 \cdot 1.3}{2} = 10.37 \text{ Па}.$$

2. Участок с переходом из квадратного сечения в круглое:

Гидравлический диаметр:

$$D_r = \frac{4 \cdot F}{\Pi} = \frac{4 \cdot 9.15}{12.1} = 3.02 \text{ м},$$

$$F = a \cdot b = 3.04 \cdot 3.01 = 9.15 \text{ м}^2,$$

$$\Pi = 2 \cdot (a + b) = 2 \cdot (3.04 + 3.01) = 12.1 \text{ м},$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;

$\Pi$  – периметр, м;

$a, b$  – стороны прямоугольника, м.

Согласно балансу расходов, скорость движения воздуха на участке равна:

$$W = \frac{G}{\rho \cdot F} = \frac{95}{1.3 \cdot 9.15} = 7.99 \text{ м/с}.$$

Перепад полного давления на данном участке по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$\Delta p_5 = [\xi_{тр} + \xi_M] \cdot \frac{\rho \cdot W^2}{2} \pm \Delta z \cdot \rho \cdot g = \frac{\xi \cdot W^2 \cdot \rho}{2} - \Delta z \cdot \rho \cdot g = \frac{0.14 \cdot 7.99^2 \cdot 1.3}{2} = 5.81 \text{ Па},$$

где  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления, равный для данного участка 0.14.

3. Вертикальный участок с круглым сечением:

Гидравлический диаметр:

$$D_r = 3.01 \text{ м}.$$

Площадь поперечного сечения:

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot D_r^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 3.01^2 = 7.12 \text{ м}^2.$$

Согласно балансу расходов, скорость движения воздуха на участке равна:

$$W = \frac{G}{\rho \cdot F} = \frac{95}{1.3 \cdot 7.12} = 10.26 \text{ м/с}.$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{D_r \cdot W \cdot \rho}{\mu} = \frac{3.01 \cdot 10.26 \cdot 1.3}{4.03 \cdot 10^{-5}} = 996213 > 2300,$$

следовательно, турбулентный режим течения.

Для турбулентного режима течения и гидравлически гладких стенок канала, согласно формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} = \frac{0.3164}{996213^{0.25}} = 0.01.$$

Коэффициент трения на данном участке:

$$\xi_{\text{ТР}} = \frac{\lambda \cdot L}{D_r} = \frac{0.01 \cdot 5.683}{3.01} = 0.0189,$$

где  $L$  – длина рассматриваемого участка канала, м.

Перепад полного давления на данном участке по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$\begin{aligned} \Delta p_6 &= [\xi_{\text{ТР}} + \xi_{\text{М}}] \cdot \frac{\rho \cdot W^2}{2} \pm \Delta z \cdot \rho \cdot g = \frac{\xi \cdot W^2 \cdot \rho}{2} - \Delta z \cdot \rho \cdot g = \\ &= \frac{0.0189 \cdot 10.26^2 \cdot 1.3}{2} + 5.683 \cdot 1.3 \cdot 9.8 = 73.69 \text{ Па.} \end{aligned}$$

4. Участок с выходом газов в окружающую среду:

Гидравлический диаметр:

$$D_r = 3.01 \text{ м.}$$

Площадь поперечного сечения:

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot D_r^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 3.01^2 = 7.12 \text{ м}^2.$$

Согласно балансу расходов, скорость движения воздуха на участке равна:

$$W = \frac{G}{\rho \cdot F} = \frac{95}{1.3 \cdot 7.12} = 10.26 \text{ м/с.}$$

Перепад полного давления на данном участке по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$\begin{aligned} \Delta p_7 &= [\xi_{\text{ТР}} + \xi_{\text{М}}] \cdot \frac{\rho \cdot W^2}{2} \pm \Delta z \cdot \rho \cdot g = \frac{\xi \cdot W^2 \cdot \rho}{2} - \Delta z \cdot \rho \cdot g = \\ &= \frac{0.3 \cdot 10.26^2 \cdot 1.3}{2} = 20.53 \text{ Па,} \end{aligned}$$

где  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления, равный для данного участка 0.3.

Суммарные потери полного давления равны:

$$\Delta p_{\Sigma} = \sum_{i=1}^7 \Delta p_i = 892.69 + 1.15 + 115.05 + 10.37 + 5.81 + 73.69 + 20.53 = 1119.29 \text{ Па,}$$

где  $i$  – номер участка выхлопного тракта.

Перепад полного давления от выходного устройства двигателя до выхода отработавших газов в атмосферу составляет 1119.29 Па, следовательно, давление на выходе из СТ ГТУ должно составлять 102.5 кПа. Чтобы снизить потери в выхлопном тракте и тем самым повысить эффективность ГТУ, нужно оптимизировать проточную часть улитки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен гидравлический расчет выхлопного тракта ГПА типа ГПА-Ц-25 (КС «Арская»), в составе которого используется ГТУ на базе АЛ-41СТ.

Основной вклад в гидравлические потери в выхлопном тракте вносят потери в улитке, что говорит о необходимости оптимизации ее геометрии с целью достижения минимального значения потерь.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О.Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.: ил.

### ОБ АВТОРАХ

ГОРШКОВА Надежда Константиновна, студ. каф. АД.

### METADATA

**Title:** Hydraulic losses in the exhaust line of the gas pumping unit

**Author:** N. K. Gorshkova<sup>1</sup>

**Affiliation:**

<sup>1</sup> Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>holynady@gmail.com

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 3 (34), pp. 94-99, 2025. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** In this work, a hydraulic calculation of the exhaust tract included in the GPU-C-25 (CS "Arskaya"), where the AL-41PT engine is used as a gas turbine drive, is performed. An exhaust tract continuously removing exhaust gases from a gas turbine unit (GTU) with a capacity of 32 MW is considered.

**Key words:** gas pumping unit; exhaust tract; gas outlet; gas turbine unit.

**About authors:**

**GORSHKOVA Nadezhda Konstantinovna**, student, Dept. of AVIATION ENGINES (UUST).