

## КРИТЕРИАЛЬНАЯ БАЗА РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ТРУБЫ ГАРТМАНА—ШПРЕНГЕРА

В. В. Макаров<sup>1</sup>, В. И. Кузнецов<sup>1</sup>, И. О. Кузнецова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Омский государственный технический университет,  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

<sup>2</sup> Омский институт водного транспорта (филиал)  
Сибирского государственного университета водного транспорта,  
Россия, 644099, г. Омск, ул. Ивана Алексеева, 4

Рассмотрен вопрос создания критериальной базы рабочего процесса трубы Гартмана—Шпренгера на базе замкнутой математической модели.

На базе замкнутой математической модели записаны основные параметры, влияющие на повышение полной температуры газа в конце тупиковой полости выше температуры торможения набегающего потока.

Объединены параметры с одинаковой размерностью в одну группу, чтобы для всех этих величин получить только один безразмерный комплекс.

Нахождение безразмерных комплексов на базе теории моделирования позволило определить критериальную базу рабочего процесса трубы Гартмана—Шпренгера.

**Ключевые слова:** критериальная база, труба Гартмана—Шпренгера, тупиковая полость, повышенная температура торможения, обмен работой, обмен теплотой.

Во втором десятилетии двадцатого века российским ученым немецкого происхождения Юлиусом Гартманом было совершено открытие аэроакустического эффекта. Позже данному изобретению присвоили его имя и назвали свистком Гартмана. Далее, в шестидесятых годах, Шпренгер обнаружил, что в конце тупиковой полости температура торможения газа выше температуры заторможенного потока при адиабатическом торможении.

По законам механики жидкости и газа температура торможения может меняться только при обмене работой и теплотой. Т.к. при движении в замкнутой полости подвода теплоты нет, исследователями начались поиски, за счет чего подводится работа.

Были предположения, что подводится за счет движения виртуального поршня. Затем в качестве виртуального поршня были приняты ударные волны, возникающие при сверхзвуковом движении газового потока.

Несмотря на все попытки работы в данном направлении, не удалось составить замкнутую математическую модель, описывающую рабочий процесс трубы Гартмана—Шпренгера (ТГШ).

Актуальность данной работы заключается в создании более полной критериальной базы рабочего процесса трубы Гартмана—Шпренгера (рис. 1).

Тупиковые полости с различной геометрией используются в различной технике, в аэродинамических трубах, в аэрокосмической технике. Теория моделирования применяется для оптимизации устройств с трубой Гартмана—Шпренгера.

Математическая модель, описывающая рабочий процесс трубы Гартмана—Шпренгера, имеет следующий вид [1, 2].

Мощность, передаваемая от набегающего потока к потоку, вошедшему в тупиковую полость каса-

тельными напряжениями, возникающими в вязкой жидкости

$$N_H = N_{TH} \quad (1)$$

где  $N_H = G_H L_H$  — мощность набегающего потока, Вт;

$N_{TH} = G_{TH} L_{TH}$  — мощность подведенная к потоку в тупиковой полости, Вт;

$G_H, G_{TH}$  — расход набегающего потока и потока газа, вошедшего в тупиковую полость, соответственно, кг/с;

$L_H, L_{TH}$  — удельная работа, отведенная от набегающего потока и подведенная к потоку в тупиковой полости, соответственно, Дж/кг;

$$L_H = C_p T_{он}^* \left( 1 - 1 / \pi_{тн}^{* \frac{k-1}{k}} \right) \eta_p^*, \quad (2)$$

$$L_{TH} = C_p T_{он}^* \left( \pi_c^{* \frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_c^*}, \quad (3)$$

где  $C_p$  — теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/Кг·К;

$T_{он}^*$  — температура заторможенного набегающего потока газа, К;

$\pi_{тн}^*$  — степень понижения полного давления набегающего потока газа

$$\left( \pi_{тн}^* = \frac{P_{он}^*}{P_{онк}^*} \right); \quad (4)$$

$\pi_c^*$  — степень повышения полного давления потока в тупиковой полости от взаимодействия с набегающим потоком силами вязкости за счёт возникновения касательных напряжений;

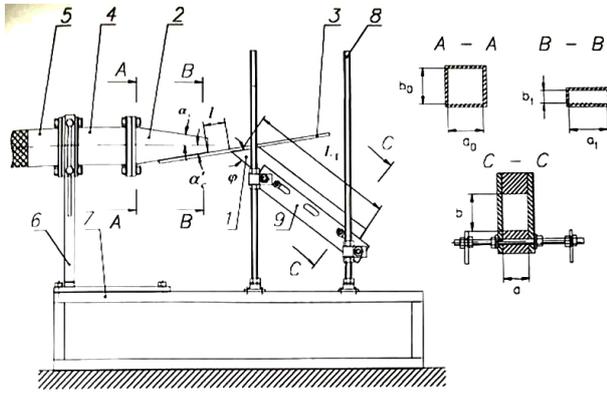


Рис. 1. Схема трубы Гартмана-Шпренгера [2]:  
 1 — модель тупиковой полости,  
 2 — сопло с прямоугольным поперечным сечением,  
 3 — направляющая плоскость, 4 — мерная вставка,  
 5 — трубопровод высокого давления, 6 — подставка,  
 7 — рама,  
 8 — стойка, 9 — тупиковая полость  
 Fig. 1. Diagram of the Hartmann-Sprenger pipe [2]:  
 1 — is a model of a dead-end cavity,  
 2 — is a nozzle with a rectangular cross section,  
 3 — is a guide plane, 4 — is a dimensional insert,  
 5 — is a high-pressure pipeline, 6 — is a stand,  
 7 — is a frame, 8 — is a rack, 9 — is a dead-end cavity

$$\left( \pi_c^* = \frac{p_{\text{тнк}}^*}{p_{\text{отн}}^*} \right), \quad (5)$$

$p_{\text{тнк}}^*$  — полное давление газа в конце тупиковой полости, Па;

$p_{\text{отн}}^*$  — полное давление газа на входе в тупиковую полость, Па.

Величина касательных напряжений, с помощью которых клинчатая энергия передается от набегающего потока к потоку, вошедшему в тупиковую полость, определяется разностью полных давлений конца тупиковой полости и входа в нее:

$$\tau = p_{\text{тнк}}^* - p_{\text{отн}}^*, \text{ Па}. \quad (6)$$

Касательные напряжения возникают за счёт разности скорости набегающего потока и потока, вошедшего в тупиковую полость. Количество кинетической энергии, которую можно передать с помощью касательных напряжений в вязкой жидкости, зависит от свойств жидкости и длины пути взаимодействия высоконапорного и низконапорного потоков.

Величину касательных напряжений можно определять эмпирической зависимостью Ж. Буссинеска, по гипотезам Прандля, Тейлора, А. Ферри, Колмогорова [3, 4].

Расход газа определяется по формуле [3]:

$$G = mF \frac{p^* q(\lambda)}{\sqrt{T^*}}, \text{ кг/с}, \quad (7)$$

где  $m = \sqrt{\frac{k}{R} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$ ,  $(\text{кг} \cdot \text{К} / \text{Дж})^{0.5}$  — коэффициент (для воздуха  $m = 0,0404$ );  $F$  — площадь,  $\text{м}^2$ ;  $p^*$  — полное давление газа, Па;  $T^*$  — полная температура газа, К;  $q(\lambda)$  — приведенный расход (газодинамическая функция).

Полная температура в конце тупиковой полости определяется величиной сжатия газа, т.е.

$$T_{\text{тн}}^* = T_{\text{отн}}^* \left( 1 + \frac{\pi_c^* \frac{k-1}{k} - 1}{\eta_c^*} \right), \text{ К}. \quad (8)$$

Полное давление набегающего потока

$$p_{\text{отн}}^* = p_{\text{н}} \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_{\text{н}}^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (9)$$

где  $M_{\text{н}}$  — число Маха набегающего потока.

Расход газа в тупиковой полости

$$G_{\text{тн}} = m \cdot F_{\text{тн}} \frac{p_{\text{тн}}^* q(\lambda_{\text{тн}})}{T_{\text{тн}}^*}. \quad (10)$$

Динамическая вязкость набегающего потока

$$\mu_{\text{н}} = \mu_0 \frac{273 + C_{\mu}}{T_{\text{н}} + C_{\mu}} \left( \frac{T_{\text{н}}}{273} \right)^{1.5}. \quad (11)$$

Набегающий поток газа для входа в тупиковую полость должен повернуть на некоторый угол ( $\delta$ ), который обычно лежит в пределах  $20^\circ - 40^\circ$  [5, 6].

Поворот потока вызывает падение полного давления за счёт гидравлических сопротивлений. Потери полного давления на поворот потока можно определить по уравнению [7–9]:

$$\Delta p_{\text{пов}} = \xi_{\text{пов}} \frac{V_{\text{н}}^2}{2} \rho_{\text{н}}, \quad (12)$$

где  $\xi_{\text{пов}} = f = (F_{\text{н}}, \delta)$  [4]. (13)

Полное давление на входе в тупиковую полость снижается на величину потерь:

$$p_{\text{вх}}^* = p_{\text{н}}^* - \Delta p_{\text{пов}}. \quad (14)$$

Длина пути газа в тупиковой полости по линии тока:

$$l_{\text{ва}} = \frac{2d_0 \tau}{\rho_{\text{н}} \xi_{\text{н}} V_{\text{н}}^2}. \quad (15)$$

Длина тупиковой полости:

$$l = \frac{l_{\text{ва}}}{2\pi}. \quad (16)$$

Система уравнений, описывающих рабочий процесс трубы Гартмана-Шпренгера, замыкается добавлением газодинамических функций  $\pi(\lambda)$ ,  $\tau(\lambda)$ ,  $q(\lambda)$ ,  $z(\lambda)$ ,  $\xi(\lambda)$ .

На основе математической модели, изложенной в формулах (1)–(16), можно заменить все основные параметры, влияющие на температурную эффективность рабочего процесса трубы Гартмана-Шпренгера и разработку критериальной базы ТГШ:

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_{\text{ТП}}} = f \left( \begin{array}{l} a, B, a_1, B_1, l, d_3, \chi, F_{\text{вх}}, F_{\text{н}}, \\ F_{\text{ТП}}, T_{\text{отн}}, T_{\text{ТП}}, T_{\text{онк}}, p_{\text{н}}^*, p_{\text{кпп}}^*, k, \Delta p_{\text{пов}}, \\ p_{\text{вх}}^*, \rho_{\text{н}}, a_{\text{н}}, v_{\text{н}}, a_{\text{кр}}, v_{\text{вх}}, \\ c_0, \mu_0, \mu_{\text{н}}, \xi, k, \mu = G_{\text{н}} / G_{\text{ТП}}, \text{Pr}, \text{Re}, \lambda \end{array} \right).$$

Если объединить параметры с одинаковой размерностью в одну группу, то для всех этих величин будет только один безразмерный комплекс [10–12].

В одну группу объединятся:

— величины, имеющие размерность длины

$$(a, b, a_1, b_1, \eta, d_3, \chi, l_{вк}).$$

Обозначаются через  $l$  — характерный линейный размер ( $M, L$ );

— величины, имеющие размерность площади (FBX, FH, FTP), обозначаются  $F(M^2, L^2)$ ;

— величины, имеющие размерность температуры ( $T_{он}, T_{тп}, T_{онк}, T_{н'}, T_{к'тп}, T_{н'к}, T_{н}$ ), обозначаются ( $K, \theta$ );

— величины, имеющие размерность давления ( $p_{он}, p_{онк}, p_{тпк}, p_{охтн}, p_{н'}, p_{к'тп}, p_{н'к}, \Delta p_{пов'}, p_{вк}$ ), обозначаются  $p$  (Па,  $MT^2/L$ );

— величины, имеющие размерность плотности,  $\rho_{н'}$ , обозначаются  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>,  $MT^{-3}$ );

— величины, имеющие размерность скорости ( $a_{н'}, v_{н'}, a_{кр}, v_{вк}, c_0$ ), обозначаются  $V$  (м/с,  $LT^{-1}$ );

— величины, имеющие размерность динамической вязкости ( $\mu_0, \mu_{н'}$ ), обозначаются  $\mu$  (ПА·с,  $L^{-1}MT^{-1}$ ).

Кроме того что температурная эффективность ( $\eta$ ) зависит от безразмерных критериев:  $k$  — показатель адиабаты; ( $\mu = G_{н'}/G_{тп}$ ) — отношение расходов газов набегающего потока и вошедшего в тупиковую полость;  $Pr$  — критерий Прандтля,  $Re$  — критерий Рейнольдса,  $\xi$  — коэффициент сопротивления трения,  $M = G_m/G_{тп}$  — отношение расходов газов набегающего потока и вошедшего в тупиковую полость;  $Pr$  — критерий Прандтля,  $Re$  — критерий Рейнольдса,  $\lambda$  — коэффициент скорости (отношение скорости потока газа к критической скорости).

Таким образом, температурная эффективность является функцией следующих параметров:

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_{нп}} = f(\rho, T, V, l, F, p, \mu, k, \xi, \mu, Pr, Re, \lambda).$$

Из 13 параметров, определяющих  $\eta$ , четыре имеют независимую размерность ( $\rho, T, V, l$ ), три — зависимую размерность ( $F, p, \mu$ ) и шесть — безразмерные величины ( $k, \xi, \mu, Pr, Re, \lambda$ ). Следовательно, необходимо найти  $\Pi_{н-к}$  безразмерных комплексов [4] для составления критериальной базы

$$\Pi_{н-к} = \Pi - k + 1 = 6 - 4 + 1 = 3.$$

Безразмерные комплексы находятся с помощью  $\pi$ -теоремы Бэкингема:

$$[\Pi] = \frac{[\eta]}{[\rho]^{a_1} \cdot [T]^{a_2} \cdot [V]^{a_3} \cdot [l]^{a_4}} = \frac{L^{3a_1} \cdot T^{a_2}}{M^{a_1} \cdot \theta^{a_2} \cdot L^{a_3} \cdot L^{a_4}} = L^{3a_1 - a_3 - a_4} \cdot T^{a_2} \cdot M^{-a_1} \cdot \theta^{-a_2}.$$

Так как комплекс есть безразмерная величина, следовательно, степени размерных величин должны быть равны нулю:

$$a_1 = 0; a_2 = 0; a_3 = 0; a_4 = 0;$$

и 
$$\Pi = \frac{[\eta]}{\rho^0 \cdot T^0 \cdot V^0 \cdot l^0} = \eta.$$

Комплекс

$$\Pi_1 = \frac{\rho}{[\rho]^{B_1} \cdot [T]^{B_2} \cdot [V]^{B_3} \cdot [l]^{B_4}} = \frac{M^1 \cdot L^{3a_1} \cdot T^{a_2}}{(M)^{B_1} \cdot (\theta)^{1-B_2} \cdot (L)^{1-B_3} \cdot (L)^{1-B_4}} = M^{1-B_1} \cdot T^{B_2} \cdot L^{3B_1-3-B_3-B_4} \cdot \theta^{-B_2}.$$

Т.е. комплекс

$$1 - B_1 = 0; -B_2 = 0; B_3 = 0; 3B_1 - 3 - B_3 - B_4 - B_2 = 0; \text{т.е. } B_1 = 0; B_2 = 0; B_3 = 0; B_4 = 3 \cdot 1 - 3 - 0 - 0 = 0.$$

$$\Pi_1 = \frac{\rho}{\rho^1 \cdot T^0 \cdot V^0 \cdot l^0} = 1.$$

Комплекс

$$\Pi_2 = \frac{[T]}{[\rho]^{c_1} \cdot [T]^{c_2} \cdot [V]^{c_3} \cdot [l]^{c_4}} = \frac{\theta \cdot L^{3c_1} \cdot T^{c_2}}{M^{c_1} \cdot \theta^{c_2} \cdot L^{c_3} \cdot L^{c_4}} = M^{-c_1} \cdot \theta^{1-c_2} \cdot T^{c_2} \cdot L^{3c_1-c_3-c_4};$$

т.к. все степени равны нулю, то  $c_1 = 0; 1 - c_2 = 0; c_3 = 0; 3c_1 - c_3 - c_4 = 0$ , откуда  $c_1 = 0; c_2 = 1; c_3 = 0; 3 \cdot 0 - 0 - c_4$  или  $c_4 = 0$ .

$$\text{Откуда } \Pi_2 = \frac{T}{\rho^0 \cdot T^1 \cdot V^0 \cdot l^0} = 1.$$

Комплекс

$$[\Pi_3] = \frac{[V]}{[\rho]^{d_1} \cdot [T]^{d_2} \cdot [V]^{d_3} \cdot [l]^{d_4}} = \frac{L^{3d_1} \cdot T^{d_2}}{T \cdot M^{d_1} \cdot \theta^{d_2} \cdot L^{d_3} \cdot L^{d_4}} = M^{-d_1} \cdot \theta^{-d_2} \cdot T^{-d_3} \cdot L^{1+d_1-d_3-d_4},$$

откуда  $d_1 = 0; d_2 = 0; d_3 - 1 = 0; 1 + 0 - 1 - d_4 = 0$ , т.е.  $d_4 = 0$ .

$$\text{Или } d_1 = 0; d_2 = 0; d_3 = 1; d_4 = 0,$$

$$\text{т.е. } \Pi_3 = \frac{V}{\rho^0 \cdot T^0 \cdot V^1 \cdot l^0} = 1 \text{ или } \Pi_3 = 1.$$

Комплекс

$$[\Pi_4] = \frac{[l]}{[\rho]^{e_1} \cdot [T]^{e_2} \cdot [V]^{e_3} \cdot [l]^{e_4}} = \frac{L \cdot L^{3e_1} \cdot T^{e_2}}{M^{e_1} \cdot \theta^{e_2} \cdot L^{e_3} \cdot L^{e_4}} = M^{-e_1} \cdot \theta^{-e_2} \cdot T^{-e_3} \cdot L^{1+3e_1-e_3-e_4}.$$

Т.к. степени равны нулю, то  $e_1 = 0; e_2 = 0; e_3 = 0; e_1 - e_2 - e_3 - e_4 = 0$  или  $1 + 3 \cdot 0 - 0 - e_4 = 0$ .

$$\text{Т.е. } e_4 = 1.$$

$$\text{Комплекс } \Pi_4 = \frac{[l]}{\rho^0 \cdot T^0 \cdot V^0 \cdot l^1} = 1 \text{ или } \Pi_4 = 1.$$

Комплекс

$$\Pi_5 = \frac{[F]}{[\rho]^{f_1} \cdot [T]^{f_2} \cdot [V]^{f_3} \cdot [l]^{f_4}} = \frac{L^2 \cdot L^{3f_1} \cdot T^{f_2}}{M^{f_1} \cdot \theta^{f_2} \cdot L^{f_3} \cdot L^{f_4}} = M^{-f_1} \cdot \theta^{-f_2} \cdot T^{f_2} \cdot L^{2+3f_1-f_3-f_4}.$$

Т.к. степени равны нулю, то  $f_1 = 0; f_2 = 0; f_3 = 0, 2 + 3f_1 - f_2 - f_3 - f_4 = 0$  или  $2 + 3 \cdot 0 - 0 - f_4 = 0$ , т.е.  $f_4 = 2$ .

Или  $\Pi_5 = \frac{F}{\rho^0 \cdot T^0 \cdot V^0 \cdot I^2} = \frac{F}{I^2}$ , т.е. комплекс  $\Pi_5$  выражает геометрическое подобие.  
Комплекс

$$\begin{aligned} [\Pi_6] &= \frac{[P]}{[\rho]^{g_1} \cdot [T]^{g_2} \cdot [V]^{g_3} \cdot [I]^{g_4}} = \\ &= \frac{M \cdot L^{3g_1} \cdot T^{g_3}}{[T]^{g_2} \cdot L \cdot M^{g_1} \cdot \theta^{g_2} \cdot L^{g_3} \cdot L^{g_4}} = \\ &= M^{1-g_1} \cdot \theta^{g_2} \cdot T^{g_3-2} \cdot L^{3g_1-1-g_3-g_4} \end{aligned}$$

Откуда  $g_1 = 1; g_2 = 0; g_3 = 2; g_4 = 3 \cdot 1 - 1 - 2 = 0$  и

$$\Pi_6 = \frac{P}{\rho^1 \cdot T^0 \cdot V^2 \cdot I^0} = \frac{P}{\rho V^2} = Eu,$$

т.е. комплекс  $\Pi_6$  — критерий Эйлера.  
Комплекс

$$\begin{aligned} [\Pi_7] &= \frac{[v]}{[\rho]^{h_1} \cdot [T]^{h_2} \cdot [V]^{h_3} \cdot [I]^{h_4}} = \\ &= \frac{L^2 \cdot L^{3h_1} \cdot T^{h_3}}{T \cdot M^{h_1} \cdot \theta^{h_2} \cdot L^{h_3} \cdot L^{h_4}} = \\ &= M^{-h_1} \cdot \theta^{-h_2} \cdot T^{h_3-1} \cdot L^{2+3h_1-h_3-h_4}. \end{aligned}$$

Откуда  $h_1 = 0; h_2 = 0; h_3 = 1; h_4 = 2 + 3 \cdot 0 - 1 = 1$   
и

$$\Pi_7 = \frac{v}{\rho^0 \cdot T^0 \cdot V^1 \cdot I^1} = \frac{v}{VI} = \frac{1}{Re}.$$

Т.е. комплекс  $\Pi_7$  является величиной, обратной критерию Рейнольдса.

В результате размерная функциональная зависимость  $\eta = \frac{\Delta T}{T_{\text{нп}}}$  принимает вид безразмерных комплексов

$$\Pi = f(1, 1, 1, F / I^2, Eu, Re^{-1}, Re^{-1}), \text{ или}$$

$$\eta = f(F / I^2, Eu, Re, k, \xi, \lambda).$$

Из последнего уравнения видно, что температурная эффективность трубы Гартмана–Шпренгера является функцией семи переменных, которые образуют критериальную базу эффективности трубы Гартмана–Шпренгера. Если геометрические размеры модели и природы совпадают ( $F = I^2$ ), коэффициент сопротивления  $\xi$  есть функция числа Рейнольдса, критерий Эйлера есть функция  $Eu = f(Re, Pr, Gr)$ , то его можно исключить из определяющих критериальную базу.

С учетом вышеизложенного, температурную эффективность трубы Гартмана–Шпренгера определяют следующие безразмерные комплексы:

$$\eta = \frac{\Delta T}{T} = f(Re, k, \mu, \lambda),$$

где  $Re$  — число подобия (критерий Рейнольдса),  $k$  — показатель адиабаты,  $\mu = \frac{G_{\text{тн}}}{G_{\text{н}}}$  — отношение расходов газа, вошедшего в трубу Гартмана–Шпренгера, к расходу газа, подошедшему к трубе;  $\lambda$  — коэффициент скорости.

Таким образом, при испытании одного натурального и модельного газов ( $k = \text{const}$ ), при одинаковом  $\mu = \frac{G_{\text{тн}}}{G_{\text{н}}}$ , одинаковом коэффициенте скорости  $\lambda$  температурная эффективность  $\eta$  трубы Гартмана–Шпренгера будет зависеть от критерия Рейнольдса.

#### Список источников

1. Бочарова А. В., Лебедев М. Г. Аэроакустический эффект Гартмана: Сто лет исследований и текущего состояния вопроса // Инженерный журнал: Наука и инновации. 2018. Вып. 9. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-9-1803.
2. Макаров В. В., Кузнецов В. И. Труба Гартмана–Шпренгера: эксперимент, теория, расчет: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2023. 64 с. ISBN978-5-8149-3579-3.
3. Зарипов Ф. А., Павлов Г. И., Накоряков П. В. [и др.]. Экспериментальное исследование колебательного процесса в цилиндрических трубах, заполненных газопузырьковой жидкостью // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2022. Т. 8, № 4 (32). С. 81–94. DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-4-81-94.
4. Терехов В. И., Богатко Т. В. Исследование аэродинамики и теплообмена отрывного течения в осесимметричном диффузоре при внезапном расширении трубы // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56, № 3. С. 147–155. DOI: 10.15372/PMTF20150317. EDN: UEAZYL.
5. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. В 2 ч. 5-е изд., перераб. и доп. Москва: Наука, 1991. Ч. 2. 304 с. ISBN 5-02-01 4962-4.
6. Кузнецов В. И., Шандер А. Ю. Эффект Гартмана–Шпренгера и его применение на летательных аппаратах // Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение». 2019. Т. 3, № 2. С. 150–155. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-150-155.
7. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Москва: Машиностроение, 1975. 559 с.
8. Попович С. С. Экспериментальное исследование влияния ударных волн на эффект безмашинного энергоразделения // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2016. № 3. С. 64–84. DOI: 10.7463/0316.0835444.3.
9. Волков К. Н., Емельянов В. Н., Ефремов А. В. [и др.]. Структура течения и колебания давления при взаимодействии сверхзвуковой недорасширенной струи газа с трубной полостью // Журнал технической физики. 2020. Т. 90 (8). 1254. DOI: 10.21883/JTF.2020.08.49534.328-19.
10. Седов А. И. Методы подобия и размерности в механике. 8-е изд., перераб. Москва: Наука, 1977. 440 с.
11. Emelyanov V. N., Teterina I. V., Volkov K. N. [et al.]. Pressure oscillations and instability of working processes in the combustion chambers of solid rocket motors // Acta Astronautica. 2017. Vol. 135. P. 161–171. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.09.
12. Голубев А. Ю., Ефимцов Б. М. Экспериментальные исследования аэроакустического возбуждения потоком резонансных колебаний в глубокой полости // Ученые записки ЦАГИ. 2014. № 3. С. 76–85. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-aeroakusticheskogo-vozbuhdheniya-potokom-rezonansnyh-kolebaniy-v-glubokoy-polosti (дата обращения: 13.03.2024).

**МАКАРОВ Владимир Вячеславович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Авиа- и ракетостроение» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск. SPIN-код: 9846-7090

AuthorID (SCOPUS): 57193513945  
ResearcherID: R-6939-2018  
Адрес для переписки: kosmos070969@mail.ru  
**КУЗНЕЦОВ Виктор Иванович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.  
SPIN-код: 1763-0468  
AuthorID (РИНЦ): 161955  
ResearcherID: N-9618-2016  
Адрес для переписки: vik.kuznetzov@yandex.ru  
**КУЗНЕЦОВА Ирина Олеговна**, кандидат технических наук, доцент кафедры естественных наук и информационных технологий Омского института водного транспорта (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта, г. Омск; доцент факультета очного отделения Си-

бирского института бизнеса и информационных технологий, г. Омск.  
SPIN-код: 8418-3130  
AuthorID (РИНЦ): 486124  
Адрес для переписки: oat-schuka@mail.ru

#### Для цитирования

Макаров В. В., Кузнецов В. И., Кузнецова И. О. Критерияльная база рабочего процесса трубы Гартмана – Шпренгера // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 2. С. 61–67. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-2-61-67.

Статья поступила в редакцию 26.03.2024 г.  
© В. В. Макаров, В. И. Кузнецов, И. О. Кузнецова

## CRITERIA BASE OF THE HARTMANN–SPRENGER PIPE WORKFLOW

V. V. Makarov<sup>1</sup>, V. I. Kuznetsov<sup>1</sup>, I. O. Kuznetsova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Omsk State Technical University,  
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

<sup>2</sup> Omsk Institute of Water Transport – branch FSBEI  
of HE «Siberian State University of Water Transport»,  
Russia, Omsk, Ivan Alekseev St., 4, 644099

**The issue of creating a criteria base for the Hartmann–Sprenger pipe workflow based on a closed mathematical model is considered.**

**On the basis of a closed mathematical model, the main parameters affecting the increase in the total temperature of the gas at the end of the dead-end cavity above the deceleration temperature of the incoming flow are recorded.**

**Parameters with the same dimension are combined into one group so that only one dimensionless complex is obtained for all these quantities.**

**Finding dimensionless complexes based on the modeling theory allowed us to determine the criteria base of the Hartmann–Sprenger pipe workflow.**

**Keywords: criterion base, Hartmann–Sprenger tube, dead-end cavity, increased braking temperature, work exchange, heat exchange.**

### References

1. Bocharova A. V., Lebedev M. G. Aeroakusticheskiy effekt Gartmana: Sto let issledovaniy i tekushchego sostoyaniya voprosa [The aero-acoustic Hartmann effect: hundred years of research and the current state of the matter] // *Inzhenernyy zhurnal: Nauka i innovatsii. Engineering Journal: Science and Innovation*. 2018. Issue 9. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-9-1803. (In Russ.).

2. Makarov V. V., Kuznetsov V. I. Truba Gartmana-Shprengera: eksperiment, teoriya, raschet [Hartmann–Sprenger tube: experiment, theory, calculation]. Omsk, 2023. 64 p. ISBN 978-5-8149-3579-3. (In Russ.).

3. Zaripov F. A., Pavlov G. I., Nakoryakov P. V. [et al.]. Eksperimental'noye issledovaniye kolebatel'nogo protsessa v tsilindricheskikh trubakh, zapolnennykh gazopuzyr'kovoy zhidkost'yu [Experimental study of the oscillatory process in cylindrical pipes filled with gas-bubble liquid] // *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoye modelirovaniye. Neft', gaz, energetika. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*. 2022. Vol. 8, no. 4 (32). P. 81–94. DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-4-81-94. (In Russ.).

4. Terekhov V. I., Bogatko T. V. Issledovaniye aerodinamiki i teploobmena otryvnogo techeniya v osesimmetrichnom diffuzore pri vnezapnom rasshirenii truby [Aerodynamics and heat transfer in a separated flow in an axisymmetric diffuser with sudden expansion] // *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2015. Vol. 56, no. 3. P. 471–478. DOI: 10.15372/PMTF20150317. EDN: UEAZYL. (In Russ.).

5. Abramovich G. N. Prikladnaya gazovaya dinamika [Applied gas dynamics]. In 2 Parts. 5th ed., reprint. and add. Moscow, 1991. Part 2. 304 p. ISBN 5-02-01 4962-4. (In Russ.).

6. Kuznetsov V. I., Shander A. Yu. Effekt Gartmana – Shprengera i ego primeneniye na letatel'nykh apparatakh [Hartmann–Sprenger effect and its application on aircraft] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya «Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye». Omsk Scientific Bulletin*.

*Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2019. Vol. 3, no. 2. P. 150–155. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-150-155. (In Russ.).

7. Idelchik I. E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Handbook of hydraulic resistance]. Moscow, 1975. 559 p. (In Russ.).

8. Popovich S. S. Eksperimental'noye issledovaniye vliyaniye udarnykh voln na effekt bezmashinnogo energorazdeleniya [Experimental Research of Machineless Energy Separation Effect Influenced by Shock Waves] // *Nauka i obrazovaniye: nauchnoye izdaniye MGTU im. N. E. Bauman. Science and Education of the Bauman MSTU*. 2016. No. 3. P. 64–84. DOI: 10.7463/0316.0835444.3. (In Russ.).

9. Volkov K. N., Emel'yanov V. N., Efremov A. V. [et al.]. Struktura techeniya i kolebaniya davleniya pri vzaimodeystvii sverkhzvukovoy nedorasshirennoy strui gaza s trubnoy polost'yu [Flow Structure and Pressure Oscillations during the Interaction of a Supersonic Underexpanded Gas Jet with a Tubular Cavity] // *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. Journal of Technical Physics*. 2020. Vol. 90 (8). 1254. DOI: 10.21883/JTF.2020.08.49534.328-19. (In Russ.).

10. Sedov A. I. Metody podobiya i razmernosti v mekhanike [Methods of similarity and dimensionality in mechanics]. 8th ed., reprint. Moscow, 1977. 440 p. (In Russ.).

11. Emel'yanov V. N., Teterina I. V., Volkov K. N. [et al.]. Pressure oscillations and instability of working processes in the combustion chambers of solid rocket motors // *Acta Astronautica*. 2017. Vol. 135. P. 161–171. DOI: 10.1016/j.actastro.2016.09. (In Engl.).

12. Golubev A. Yu., Efimtsov B. M. Eksperimental'nyye issledovaniya aeroakusticheskogo vzbuzhdeniya potokom rezonansnykh kolebaniy v glubokoy polosti [Experimental studies of aeroacoustic excitation by a flow of resonant vibrations in a deep cavity] // *Uchenyye zapiski TsAGI. Scientific Notes of TsAGI*. 2014. No. 3. P. 76–85. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-aeroakusticheskogo-vzbuzhdeniya-potokom-rezonansnyh-kolebaniy-v-glubokoy-polosti> (accessed: 13.03.2024). (In Russ.).

---

**MAKAROV Vladimir Vyacheslavovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Aircraft and Rocket Building Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 9846-7090

AuthorID (SCOPUS): 57193513945

ResearcherID: R-6939-2018

Correspondence address: kosmos070969@mail.ru

**KUZNETSOV Viktor Ivanovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1763-0468

AuthorID (RSCI): 161955

ResearcherID: N-9618-2016

Correspondence address: vik.kuznetsov@yandex.ru

**KUZNETSOVA Irina Olegovna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Natural Sciences and

Information Technologies Department, Omsk Institute of Water Transport — branch FSBEI of HE «Siberian State University of Water Transport», Omsk; Associate Professor at the Full-Time Faculty, Siberian Institute of Business and Information Technologies, Omsk.

SPIN-code: 8418-3130

AuthorID (RSCI): 486124

Correspondence address: oat-schuka@mail.ru

#### For citations

Makarov V. V., Kuznetsov V. I., Kuznetsova I. O. Criteria base of the Hartmann–Sprenger pipe workflow // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2024. Vol. 8, no. 2. P. 61–67. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-2-61-67.

Received March 26, 2024.

© V. V. Makarov, V. I. Kuznetsov,  
I. O. Kuznetsova