

ЕДИНООБРАЗИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ СТРУЙНОГО И ВИХРЕВОГО ЭЖЕКТОРОВ, ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ И ТРУБЫ ГАРТМАНА—ШПРЕНГЕРА

В. И. Кузнецов, В. В. Макаров

Омский государственный технический университет
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

На основании рассмотренных ранее физико-математических моделей струйного и вихревого эжекторов, вихревой трубы и трубы Гартмана—Шпренгера сделан вывод об идентичности процессов обмена работой и теплотой в этих устройствах.

Показано влияние вязкости, тангенциальных напряжений, градиента линейных и угловых скоростей на передачу кинетической энергии от высоконапорного к низконапорному газу.

Учитывается разность термодинамических температур на теплообмен высоконапорного и низконапорного газов.

Ключевые слова: струйный и вихревой эжектор, вихревая труба, труба Гартмана—Шпренгера, обмен работой, обмен теплотой, вязкость, тангенциальное напряжение.

Введение

Газовый эжектор или струйный компрессор, вихревой эжектор или вихревой компрессор, вихревая труба и труба Гартмана—Шпренгера — простейшие и распространенные газодинамические устройства, применяемые в разнообразных отраслях промышленности, в частности в авиа- и ракетостроении, в газовой и химической промышленности, вакуумной технике и различных экспериментальных аэродинамических установках. Эжектором можно назвать любое устройство, в котором полное давление одного потока увеличивается за счет энергообмена его с другим (высоконапорным) потоком, имеющим более высокое полное давление. В результате энергообмена в эжекторе (струйном и вихревом) образуется их смесь, имеющая среднее давление выше начального давления низконапорного газа.

В вихревой трубе один поток газа разделяется на два, которые в результате энергообмена между собой имеют разные полные давления и температуру на выходе из вихревой трубы.

В трубе Гартмана—Шпренгера одна часть высоконапорного газа движется по касательной к отверстию, в которое входит другая часть и вращаясь перемещается к закрытому торцу отверстия. В конце тупиковой полости температура торможения газа становится выше той, которая была у высоконапорного газа, движущегося по касательной к тупиковой плоскости.

Постановка задачи

Более широкое распространение струйного и вихревого эжекторов, вихревой трубы и трубы Гартмана—Шпренгера во многих областях машиностроения, в аэрокосмической технике, а также промышленной аэродинамике сдерживает отсутствие физико-математической модели, объединяющей все реальные процессы, происходящие в этих устройствах.

На основании вышеизложенного основной задачей данной работы является попытка создания еди-

ной физической модели, соответствующей реальным процессам, протекающим в этих устройствах.

На базе физической модели составить замкнутую математическую модель с учетом особенностей работы струйного и вихревого эжекторов, вихревой трубы и трубы Гартмана—Шпренгера.

Материал и методы исследования

Существует несколько физико-математических моделей, объясняющих работу струйного и вихревого эжекторов [1—5]. Основной их недостаток в том, что по ним нельзя составить замкнутую математическую модель. В некоторых работах эжекторы признают компрессорами без движущихся частей, но ни в одной работе нет уравнений, показывающих передачу энергии от высоконапорного газа к низконапорному газу [6—8].

По рабочему процессу вихревой трубы имеется несколько физических моделей [9, 10], по которым не были составлены математические модели, следовательно, расчет характеристик вихревых труб по этим моделям сделать невозможно. Существует только одна физическая модель, по которой составлена замкнутая математическая модель [11]. По этой модели составлены две методики расчета вихревой трубы [11, 12]:

— методика расчета геометрических размеров при заданных термодинамических параметрах;

— методика расчета термодинамических параметров при известных геометрических размерах.

Суть физической модели — кинетическая энергия от оси к периферии передается силами вязкости за счет разности угловых скоростей [11].

В струйном эжекторе высоконапорный газ передает свою избыточную энергию низконапорному газу силами вязкости за счет разности линейных скоростей с помощью касательных напряжений [13—15]. Результатом их взаимодействия будет рост полного низконапорного газа и понижение полного давления высоконапорного газа. Этот процесс будет идти до тех пор, пока давление высоконапорного

и низконапорного газа не станет равным давлению на выходе из струйного эжектора [16].

Удельная работа высоконапорного газа, которая совершается над низконапорным, может быть определена по уравнению механики сплошной среды:

$$L_1 = C_p \cdot T_{01} \left(1 - \frac{1}{\pi_p^{* \frac{k-1}{k}}} \right) \eta_p^*, \quad (1)$$

где C_p — теплоемкость газа при постоянном давлении Дж/(кг·К); T_{01} — полная температура высоконапорного газа, К; π_p^* — степень понижения полного да-

вления высоконапорного газа $\pi_p^* = \frac{p_{01}}{p_{03}}$; p_{01} — полное

давление высоконапорного газа до начала взаимодействия с низконапорным газом, Па; p_{03} — полное давление высоконапорного газа после окончания взаимодействия с низконапорным газом, Па; η_p — КПД процесса расширения.

Удельная энергия низконапорного газа, которая получена от высоконапорного газа, определяется по уравнению механики сплошной среды:

$$L_2 = C_p T_{02} \left(\pi_c^{* \frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_c^*}, \quad (2)$$

где T_{02} — полная температура низконапорного газа на входе в эжектор, К; η_c^* — КПД процесса сжатия;

$\pi_c^* = \frac{p_{03}}{p_{02}}$ — степень повышения полного давления

низконапорного газа за счет энергообмена с высоконапорным газом; p_{03} — полное давление низконапорного газа после завершения энергообмена с высоконапорным газом, Па; p_{02} — полное давление низконапорного газа до начала энергообмена с высоконапорным газом, Па; k — показатель адиабаты.

Энергия газа на выходе из струйного эжектора равна сумме энергий высоконапорного и низконапорного газов:

$$N_3 = N_1 + N_2, \quad (3)$$

где $N_i = G_i \cdot L_i$, $i = 1, 2, 3$; G_i — расход газа.

Энергообмен высоконапорного и низконапорного газов приводит к изменению их полных температур, которые определяются по уравнениям механики сплошной среды:

$$T_{01k} = T_{01} \left[1 + \left(1 - \frac{1}{\pi_p^{* \frac{k-1}{k}}} \right) \eta_p^* \right], \quad (4)$$

$$T_{02k} = T_{02} \left(1 + \pi_c^{* \frac{k-1}{k}} - 1 \right) \eta_c^*, \quad (5)$$

где T_{01k} , T_{02k} — температура высоконапорного и низконапорного газов после завершения энергообмена соответственно.

В вихревой трубе осевой поток газа совершает работу над периферийным [11].

Для упрощения расчетов предложена мат. модель, учитывающая состояние газа только в трех сечениях: на входе в вихревую трубу, на выходе из диафрагмы; на подходе к вентилю, когда периферийный поток

разделяется на два потока: переход к оси, движение к диафрагме и выход через вентиль к потребителю.

Энергия газа на входе в вихревую трубу:

$$N_1 = G_1 \cdot L_1, \quad \text{Вт}, \quad (6)$$

где G_1 — расход воздуха, кг/с;

$$L_1 = C_p T_{01} \left(1 - \frac{1}{\pi_p^{* \frac{k-1}{k}}} \right) \eta_p^*, \quad \text{Дж/кг} \quad \text{— удельная энер-$$

гия газа на входе в вихревую трубу; T_{01} — полная температура газа на входе в вихревую трубу, К; η_p^* —

КПД процесса расширения газа; $\pi_p^* = \frac{p_{01}}{p_H}$ — сте-

пень понижения полного давления газа, $\pi_{T1}^* = (p_H / p_{01})$; p_H , p_{01} — атмосферное и полное давление газа на входе в вихревую трубу соответственно, Па.

Энергия, подведенная к периферийному потоку газа, для его сжатия

$$\Delta N = G_1 L_{сж}, \quad \text{Вт}, \quad (7)$$

где $L_{сж} = C_p T_{01} \left(\pi_{сж}^{* \frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_{сж}^*}$, Дж/кг — удельная работа сжатия периферийного потока;

$\pi_{сж}^* = \frac{p_{03}}{p_{01} - \Delta p}$ — степень повышения полного давле-

ния периферийного потока газа после обмена работой с осевым потоком; Δp — диссипативные потери полного давления периферийного потока газа при движении вдоль стены вихревой камеры от входного сопла до вентиля, Па; $\Delta p = \tau_1$, τ_1 — касательные напряжения, Па; $\eta_{сж}^*$ — КПД сжатия.

Энергия периферийного потока газа перед вентиляем

$$N_3 = G_1 L_3, \quad (8)$$

где $L_3 = C_p T_{03} \left(1 - \frac{1}{\pi_3^{* \frac{k-1}{k}}} \right) \eta_p^*$ — удельная энергия

периферийного потока газа перед вентиляем; $\pi_3^* = (p_{03} / p_H)$ — степень понижения полного давления периферийного потока газа на выходе из вентиля; η_p^* — КПД процесса расширения.

Энергия осевого потока газа, которая подводится к периферийному потоку силами вязкости, возникающими за счет градиента угловых скоростей, в результате энергообмена.

$$N_2 = G_2 L_2, \quad (9)$$

где G_2 — расход газа через диафрагму;

$$L_2 = C_p T_{03} \left(1 - \frac{1}{\pi_{T2}^{* \frac{k-1}{k}}} \right) \eta_p^* \quad \text{— удельная работа рас-$$

ширения осевого потока, совершающего работу над периферийным потоком; $\pi_{T2}^* = p_{03} / p_{02}$ — степень понижения полного давления осевого потока газа при его движении от вентиля до диафрагмы; p_{03} — полное давление газа перед вентиляем, Па; p_{02} — полное давление газа перед диафрагмой, Па ($p_{02} = 1,06 p_H$).

Осевые слои газа совершают работу над периферийными, следовательно, полная температура будет падать и на выходе из диафрагмы определяется уравнением

$$T_{02} = T_{03} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\pi_{T_2}^* \frac{k-1}{k}} \right) \eta_p \right]. \quad (10)$$

Касательные напряжения, которые возникают между осевыми и периферийными слоями газа при их контакте, передают кинетическую энергию от оси к периферии силами вязкости за счет градиента угловых скоростей [11]. Если вся избыточная энергия осевых слоев передается от оси к периферии, то величину касательных напряжений можно определить разностью давлений осевого потока перед вентиляем и диафрагмой

$$\tau_2 = p_{03} - p_{02} \text{ или } \tau_2 = p_{03} - 1,06 p_n,$$

где коэффициент 1,06 перед атмосферным давлением p_n характеризует ту часть энергии, которая необходима газу для выхода из диафрагмы.

Полная температура газа на выходе из вентиля определяется сжатием периферийного потока или величиной работы, совершенной осевыми слоями над периферийными:

$$T_{03} = T_{01} \left(1 + \frac{\pi_{сж}^* \frac{k-1}{k}}{\eta_{сж}^*} \right). \quad (11)$$

Рабочий процесс в трубе Гартмана–Шпренгера объясняют движением ударных волн и скачками уплотнения [17]. Замкнутой математической модели, описывающей рабочий процесс, нет. Поскольку в тупиковой полости температура торможения потока газа растет по сравнению с температурой торможения набегающего потока, следовательно, должна быть подведена полезная работа в виде механической или тепловой энергии [18]. Подвода тепловой энергии нет. Остается механическая работа. Из сил, действующих в данный момент на поток, есть только силы вязкости, создающие касательные напряжения из-за разности скоростей набегающего на тупиковую полость потока и скорости потока, вошедшего в тупиковую полость. С помощью касательных напряжений силами вязкости кинетическая энергия передается от набегающего потока к потоку, вошедшему в тупиковую полость. В тупиковой полости кинетическая энергия преобразуется в потенциальную, и, когда эта энергия станет больше энергии набегающего потока, происходит выброс газа из тупиковой полости во внешний поток. За счет инерционных сил истечение из тупиковой полости будет идти до давления ниже статического давления набегающего потока. Далее процесс повторяется, т.е. происходит последующее нагнетание газа в тупиковую полость. Часть газа в конце тупиковой полости остается постоянно, так как истечение из тупиковой полости не может происходить до образования абсолютного вакуума [12].

Энергия, передаваемая силами вязкости от внешнего потока, вызывает повышение полного давления в тупиковой полости. Удельная работа, которая подводится от внешнего потока к внутреннему, может быть определена по формулам механики сплошной среды:

$$L_c = C_p T_{01} \left(\pi_c^* \frac{k-1}{k} - 1 \right) \frac{1}{\eta_c^*}, \quad (12)$$

где L_c — удельная работа сжатия, Дж/кг; C_p — теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг·К); T_{01} — температура торможения набегающего потока, К; π_c^* — степень повышения полного давления газа в тупиковой полости; η_c^* — КПД процесса сжатия; k — показатель адиабаты; $\pi_c^* = p_{02}/p_{01}$; p_{02} — полное давление газа в тупиковой полости, Па; p_{01} — полное давление набегающего потока, Па.

Силами вязкости, в результате которых возникают касательные напряжения, создается работа, совершаемая набегающим потоком над газом в тупиковой полости.

За счет обмена работой растет не только давление, но и температура [11]:

$$T_{02} = T_{01} \left(1 + \frac{\pi_{сж}^* \frac{k-1}{k}}{\eta_{сж}^*} \right). \quad (13)$$

Удельная работа расширения набегающего потока определяется уравнением механики сплошной среды:

$$L_p = L_c = C_p T_{01} \left(1 - \frac{1}{\pi_p^* \frac{k-1}{k}} \right) \eta_p^* \quad (14)$$

— удельная энергия газа на входе в вихревую трубу; $\pi_p^* = p_{01}/p_{02}$ — степень понижения полного давления набегающего (высоконапорного) потока; p_{01} — полное давление набегающего потока, Па; p_{02} — полное давление набегающего потока после завершения энергообмена с потоком, находящимся в тупиковой полости, Па; η_p^* — КПД процесса расширения; k — показатель адиабаты.

Набегающий высоконапорный поток совершает работу, следовательно, его полная температура падает в соответствии с законами механики сплошной среды:

$$T_{02} = T_{01} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\pi_p^* \frac{k-1}{k}} \right) \eta_p \right], \quad (15)$$

где T_{02} — температура высоконапорного газа после завершения энергообмена с газом тупиковой полости, К.

На основании вышеизложенного можно заключить, что все процессы в струйном и вихревом эжекторах, вихревой трубе и трубе Гартмана–Шпренгера описываются одними и теми же уравнениями. Следовательно, во всех этих устройствах работа от высоконапорного газа передается низконапорному потоку силами вязкости с помощью касательных напряжений, возникающих за счет разности скоростей. В струйном и вихревом эжекторах возникает разность линейных и угловых скоростей осевого и периферийного потоков. В вихревой трубе возникает разность угловых скоростей осевого и периферийного потоков. В трубе Гартмана–Шпренгера возникает разность скоростей высоконапорного потока и потока, вошедшего в тупиковую полость.

Обсуждение результатов

Вышеприведенное исследование показало, что в струйном и вихревом эжекторах, вихревой трубе

и трубе Гартмана — Шпренгера обмен работой и теплотой происходит под влиянием сил вязкости, вызывающих возникновение касательных напряжений.

В струйном эжекторе касательные напряжения возникают за счет разности линейных скоростей высоконапорного и низконапорного газов.

В вихревом эжекторе касательные напряжения появляются за счет разности угловых скоростей высоконапорного и низконапорного газов.

Осевой поток в вихревой трубе совершает работу над периферийными силами вязкости за счет градиента угловых скоростей.

Касательные напряжения, возникающие за счет разности скоростей набегающего потока и потока, вошедшего в тупиковую полость, вызывает повышение полной температуры и полного давления в тупиковой полости трубы Гартмана — Шпренгера. Когда полное давление в тупиковой полости становится выше давления набегающего потока, происходит выброс газа из тупиковой полости. Далее процесс повторяется.

Процесс сжатия и расширения низконапорного и высоконапорного газов описывается одними и теми же уравнениями механики сплошной среды.

Таким образом, процессы в струйном и вихревом эжекторах, в вихревой трубе и трубе Гартмана — Шпренгера идентичны, т.к. описываются одними и теми же уравнениями.

Заключение

Математические модели, описывающие рабочие процессы струйного и вихревого эжекторов, вихревой трубы и трубы Гартмана — Шпренгера, описываются одними и теми же уравнениями механики сплошной среды.

Изменение полной температуры и полного давления во всех случаях объясняется обменом работой и теплотой между низконапорным потоком и высоконапорными потоками газа. Механизмом передачи энергии являются силы вязкости, возникающие за счет разности линейных или угловых скоростей.

Совпадение расчетных данных по методикам, составленным по приведенным математическим моделям, с экспериментальными данными самих авторов [1, 9, 17] удовлетворительное.

Список источников

1. Аркадов Ю. К. Новые газовые эжекторы и эжекционные процессы. Москва: Физматлит, 2001. 336 с. ISBN 5-94052-025-1.
2. Черкез А. Я. Теория газового эжектора // Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Наука, 1969. С. 485 — 560.
3. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator // AJP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876. 020025. DOI: 10.1063/1.4998845.
4. Усс А. Ю., Чернышев А. В., Атамасов Н. В. Разработка метода расчета и создание вихревого струйного устройства для управления потоком газа // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3, № 2. С. 78 — 86. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-78-86.
5. Усс А. Ю., Пугачук А. С., Чернышев А. В., Тухбатуллин Ф. Г. Разработка стенда для визуализации и экспериментального исследования рабочего процесса в вихревом струйном устройстве // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 3. С. 45 — 55. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-3-45-55.
6. Quemard C., Mignosi A., Seraudie A. Studies Relative to an Induction Pressurized Transonic Wind Tunnel. A: Air Pump Performance; Circuit Losses. NASA TT F-16, 187. Washington D.C., 1975. 27 p.

7. Уколов А. И., Родионов В. П. Моделирование дефекта внутренней поверхности струйного кавитатора // Вестник Донского государственного технического университета. 2018. Т. 18, № 2. С. 146 — 156. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-2-146-156.

8. Лазарев Е. А., Помаз А. Н. Эффективность эжекционного охлаждения наддувочного воздуха и особенности ее экспериментальной оценки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2016. Т. 16, № 3. С. 21 — 28. DOI: 10.14529/engin160303.

9. Меркулов А. П. Вихревой эффект и его применение в технике. Москва: Машиностроение, 1969. 184 с.

10. Taylor A. Vortex devices in aircraft fluid systems // 4th Cranfield Fluidics Conference, 17—20 March. Coventri, 1970. P. 2—21.

11. Кузнецов В. И., Макаров В. В. Эффект Ранка: Эксперимент, теория, расчет: моногр. Москва: Инновационное машиностроение, 2017. 376 с. ISBN 978-5-9500364-2-2.

12. Кузнецов В. И., Макаров В. И., Шандер А. Ю. Сходство и различие рабочих процессов эффекта Ранка и трубы Гартмана — Шпренгера // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 1. С. 61 — 70. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-61-70.

13. Rostami zadeh E., Majd A., Arbabian S. Effects of Electromagnetic Fields on Seed Germination in Urtica Dioica L // International Journal of Scientific & Technology Research. 2014. Vol. 3, Issue 4. P. 365 — 368.

14. Sankar, Lakshmi N. Three-Dimensional Navier — Stokes Full — Potential Coupled Analysis for Viscous Transonic Flow // AJAA Journal. 1993. Vol. 31 (10). P. 1857 — 1864. DOI: 10.2514/3.11859.

15. Климов В. Ф., Магерамов Л. К.-А., Михайлов В. В. [и др.] К вопросу выбора эжектора системы очистки воздуха танков с двухтактными двигателями // Интегрирование технологии и энергосбережение. 2014. № 3. С. 125 — 129.

16. Кузнецов В. И., Якимускин Р. В., Шерберген А. Ю. Результаты сравнительных испытаний охладителя наддувочного воздуха комбинированного дизеля // Специальная техника и технологии транспорта: сб. науч. ст. Санкт-Петербург, 2019. С. 131 — 139.

17. Попович С. С. Экспериментальное исследование влияния ударных волн на эффект безмашинного энергоразделения // Наука и образование. 2016. № 3. С. 64 — 80. DOI: 10.7463/0316.0835444.

18. Краснов Н. Ф., Кошевой В. Н., Калутин В. Т. Аэродинамика отрывных течений. Москва: Высшая шк., 1988. 351 с. ISBN 5-06-001196-8.

КУЗНЕЦОВ Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение».

SPIN-код: 1763-0468

AuthorID (РИНЦ): 161955

ResearcherID: N-9618-2016

Адрес для переписки: vi.kuznetsov@yandex.ru

МАКАРОВ Владимир Вячеславович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Авиа- и ракетостроение».

SPIN-код: 9020-9010

AuthorID (РИНЦ): 947855

Адрес для переписки: kosmos070969@mail.ru

Для цитирования

Кузнецов В. И., Макаров В. В. Единообразие рабочих процессов струйного и вихревого эжекторов, вихревой трубы и трубы Гартмана — Шпренгера // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 4. С. 83 — 88. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-83-88.

Статья поступила в редакцию 29.08.2021 г.

© В. И. Кузнецов, В. В. Макаров

UNIFORMITY OF WORKING PROCESSES OF JET AND VORTEX EJECTORS, VORTEX TUBE AND HARTMANN–SPRENGER PIPE

V. I. Kuznetsov, V. V. Makarov

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

Based on the previously considered physical and mathematical models of jet and vortex ejectors, vortex tube and Hartmann–Sprenger tube, it makes a conclusion about the identity of the processes of exchange of work and heat in these devices.

The influence of viscosity, tangential stresses, and the gradient of linear and angular velocities on the transfer of kinetic energy from a high-pressure to a low-pressure gas is shown.

The difference of thermodynamic temperatures for heat exchange of high-pressure and low-pressure gases is taken into account.

Keywords: jet and vortex ejector, vortex tube, Hartmann–Sprenger tube, work exchange, heat exchange, viscosity, tangential stress.

References

1. Arkadov Yu. K. Novyye gazovyye ezhektoy i ezhektsionnyye protsessy [New gas ejectors and ejection processes]. Moscow, 2001. 333 p. ISBN 5-94052-025-1. (In Russ.).
2. Cherkez A. Ya. Teoriya gazovogo ezhektoora [Gas ejector theory] // Prikladnaya gazovaya dinamika [Applied gas dynamics] / G. N. Abramovich. 3d ed. Moscow, 1969. P. 485 – 560. (In Russ.).
3. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator // AJP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876. 020025. DOI: 10.1063/1.4998845.
4. Uss A. Yu., Chernyshev A. V., Atamasov N. V. Development of a calculation method and the creation of a vortex jet device to control the gas flow // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2019. Vol. 3, no. 2. P. 78 – 86. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-78-86. (In Russ.).
5. Uss A. Yu., Pugachuk A. S., Chernyshev A. V., Tukhbatulin F. G. Development of stand for visualization and experimental study of working process in vortex jet device // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2020. Vol. 4, no. 3. P. 45 – 55. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-3-45-55. (In Russ.).
6. Quemard C., Mignosi A., Seraudie A. Studies Relative to an Induction Pressurized Transonic Wind Tunnel. A: Air Pump Performance; Circuit Losses. NASA TT F-16, 187. Washington D. C., 1975. 27 p. (In Engl.).
7. Ukolov A. I., Rodionov V. P. Modelirovaniye defekta vnutrenney poverkhnosti struynogo kavitatora [Modeling the inside defect of the jet cavitator] // Vestnik donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. *Advanced Engineering Research*. 2018. Vol. 18, no. 2. P. 146 – 156. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-2-146-156. (In Russ.).
8. Lazarev E. A., Pomaz A. N. Effektivnost' ezhektsionnogo okhlazhdeniya nadduvochnogo vozdukh i osobennosti eye eksperimental'noy otsenki [The ejection efficiency of cooling charge air and its experimental evaluation] // Vestnik Yuzhno-ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Mashinostroyeniye». *Bulletin of the SUSU. Series «Mechanical Engineering Industry»*. 2016. Vol. 16, no. 3. P. 21 – 28. DOI: 10.14529/engin160303. (In Russ.).
9. Merkulov A. P. Vikhrevoy effekt i ego primeneniye v tekhnike [Vortex effect and its application in technology]. Moscow, 1969. 184 p. (In Russ.).
10. Taylor A. Vortex devices in aircraft fluid systems // 4th Cranfield Fluidics Conference, 17–20 March. Coventri, 1970. P. 2 – 21. (In Engl.).
11. Kuznetsov V. I., Makarov V. V. Effekt Ranka: Eksperiment, teoriya, raschet [Rank effect: experiment, theory, calculation]. Moscow, 2017. 376 p. ISBN 978-5-9500364-2-2. (In Russ.).
12. Kuznetsov V. I., Makarov V. V., Shander A. Yu. Skhodstvo i razlichkiye rabochikh protsessov efekta Ranka i trubyy Gartmana-Shprengera [Similarities and differences between working processes of Ranque effect and the Hartmann–Sprenger tube] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 1. P. 61 – 70. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-61-70. (In Russ.).
13. Rostami zadeh E., Majd A., Arbabian S. Effects of Electromagnetic Fields on Seed Germination in *Urtica Dioica L* // International Journal of Scientific & Technology Research. 2014. Vol. 3, Issue 4. P. 365 – 368. (In Engl.).
14. Sankar, Lakshmi N. Three- Dimensional Navier – Stokes Fuli — Potantional Coupled Analysis for Viscous Transonic Flow // AJAA Journal. 1993. Vol. 31 (10). P. 1857 – 1864. DOI: 10.2514/3.11859. (In Engl.).
15. Klimov V. F., Mageramov L. K.-A., Mikhaylov V. V. [et al.]. K voprosu vybora ezhektoora sistemy ochistki vozdukh tankov s dvukhtaktnymi dvigatelyami [On the issue of choosing an ejector for the air purification system of tanks with two-stroke engines] // Integrirovannyye tekhnologii i energosberezheniye. *Integrated Technologies and Energy Conservation*. 2014. No. 3. P. 125 – 129. (In Russ.).
16. Kuznetsov V. I., Yakimushkin R. V., Sherbergen A. Yu. Rezul'taty sravnitel'nykh ispytaniy okhladitelya nadduvochnogo vozdukh kombinirovannogo dizelya [Results of Comparative Tests of the Combined Diesel Engine Charge Air Cooler] // Spetsial'naya tekhnika i tekhnologii transporta. *Spetsial'naya tekhnika i tekhnologii transporta*. 2019. P. 131 – 139. (In Russ.).
17. Popovich S. S. Eksperimental'noye issledovaniye vliyaniya udarnykh voln na effekt bezmashinnogo energorazdeleniya [Experimental research of machineless energy separation influenced by shock waves] // Nauka i obrazovaniye. *Science*

and Education of the Bauman MSTU. 2016. No. 3. P. 64–80.
DOI: 10.7463/0316.0835444. (In Russ.).

18. Krasnov N. F., Koshevoy V. N., Kalugin V. T. Aerodinamika otryvnykh techeniy [Separated flow aerodynamics]. Moscow, 1988. 351 p. ISBN 5-06-001196-8. (In Russ.).

KUZNETSOV Viktor Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Aviation and Rocketry Department.

SPIN-code: 1763-0468

AuthorID (RSCI): 161955

ResearcherID: N-9618-2016

Correspondence address: vik.kuznetzov@yandex.ru

MAKAROV Vladimir Vyacheslavovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Aviation and Rocketry Department.

SPIN-code: 9846-7090

AuthorID (SCOPUS): 57193513945

ResearcherID: R-6939-2018

Correspondence address:

kosmos070969@mail.ru

For citations

Kuznetsov V. I., Makarov V. V. Uniformity of working processes of jet and vortex ejectors, vortex tube and Hartmann–Sprenger pipe // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2021. Vol. 5, no. 4. P. 83–88. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-83-88.

Received August 29, 2021.

© V. I. Kuznetsov, V. V. Makarov