

# РАСЧЕТ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ИЗ ТУРБИНЫ С ИНТЕГРИРОВАННЫМ СОПЛОМ ЛАВАЛЯ НА ВЫХОДЕ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО НАПЫЛЕНИЯ

Д. Е. Писарев, С. И. Митрохин  
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

## CALCULATION OF AIRFLOW SPEED FROM A TURBINE WITH AN INTEGRATED LAVAL NOZZLE AT THE OUTLET FOR METAL COATING BY COLD SPRAYING METHOD

Dmitry E. Pisarev, Sergey I. Mitrokhin  
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Аннотация.** В данной работе была поставлена задача проверить целесообразность использования устройства, обеспечивающего подачу воздушного потока в канал сопла Лавалья для обеспечения нанесения металлического покрытия методом холодного напыления. В качестве устройства, обеспечивающего подачу воздушного потока в канал сопла Лавалья, была рассмотрена турбина с интегрированным соплом Лавалья на выходе. Дано описание применяемого при проведении расчетов оборудования и экспериментального исследования, представлен процесс газодинамического расчета выходной скорости воздушного потока, нагнетаемого крыльчаткой турбины, и результаты данного расчета с приведением точных показателей. Получены функции

**Abstract.** The goal of this work was to test the practicability of using a device that provides airflow into the Laval nozzle channel to enable the application of metal coating by cold spraying. A turbine with an integrated Laval nozzle at the outlet was considered as a device to provide airflow into the Laval nozzle channel. The authors describe the equipment used in the calculations and the experimental study, the process of gas-dynamic calculation of the output velocity of the airflow injected by the turbine impeller and the results of this calculation with precise indices. As a result, functional dependences of the indicators that provide the possibility of using the turbine as a source of airflow have been obtained, and a conclusion about the inexpediency of using a

ональные зависимости показателей, от которых напрямую зависит возможность использования турбины в качестве источника воздушного потока, и сформирован вывод о нецелесообразности использования турбины с интегрированным соплом Лавала на выходе для обеспечения возможности нанесения металлического покрытия методом холодного напыления.

**Ключевые слова:** холодное напыление, газодинамический расчет, сопло Лавала, улитка компрессора, SolidWorks Flow Simulation

turbine with an integrated Laval nozzle at the outlet to provide the possibility of metal coating by cold spraying has been formed.

**Key words:** cold spraying, gas-dynamic calculation, Laval nozzle, compressor scroll, SolidWorks Flow Simulation

**Для цитирования:** Писарев, Д. Е. Расчет скорости воздушного потока из турбины с интегрированным соплом Лавала на выходе для нанесения металлического покрытия методом холодного напыления / Д. Е. Писарев, С. И. Митрохин. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-89-95. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 3 (105). – С. 89–95.

**For citation:** Pisarev, D. E., & Mitrokhin, S. I. (2023). Calculation of airflow speed from a turbine with an integrated Laval nozzle at the outlet for metal coating by cold spraying method. Architecture, Construction, Transport, (3(105)), pp. 89-95. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-89-95.

## Введение

Для нанесения металлического покрытия методом холодного напыления необходимо соблюдение нескольких условий. Данная проблематика поднималась многими исследователями, для ее тщательного разбора был изучен ряд литературных источников, посвященных различным аспектам этой темы: от основ теории работы и движения газов [1], механики газов при истечении из сопел [2–4] до вопросов нанесения металлического покрытия, в том числе методом холодного напыления [5–6]. Для проведения данного исследования возникла необходимость дополнительного изучения возможностей программного модуля SolidWorks Flow Simulation [7].

В настоящей работе рассмотрен вариант обеспечения одного из условий, а именно – необходимой скорости воздушного потока путем создания установки, которая будет источником воздушного потока. Чтобы нанести металлическое покрытие методом холодного напыления, требуется достижение скорости воздушного потока 500 м/с. Для этого используется сопло Лава-

ля – газовый канал особого профиля, имеющий сужение для изменения скорости проходящего по нему газового потока. Также требуется обеспечение скорости воздушного потока до того, как он попадет в канал сопла Лавала, для этого используется источник воздушного потока. В качестве последнего было принято решение использовать турбину (компрессор) с интегрированным соплом Лавала на выходе.

Процесс нанесения металлического покрытия методом холодного напыления, геометрические параметры сопла Лавала, используемого в данной установке, были рассмотрены в других исследованиях [8–10].

Принцип работы данного источника воздушного потока заключается в следующем: при вращении вала, на котором установлена крыльчатка, воздушные массы из-за высокой скорости вращения крыльчатки засасываются в специальный канал в корпусе. В данном канале воздушный поток ускоряется и под давлением подается в сопло Лавала, которое, в свою очередь, повышает скорость воздушного потока до сверхзвуковых скоростей.

### Объект и методы исследования

Для проверки возможности достижения необходимой скорости воздушного потока на выходе из сопла Лавая была спроектирована 3D-модель воздушной системы устройства для нанесения металлического покрытия методом холодного напыления (рис. 1). Она представляет собой турбину с интегрированным соплом Лавая и состоит из вала, на котором располагается крыльчатка, транспортирующая воздушный поток по каналу внутри корпуса к соплу Лавая, который, в свою очередь, должен увеличивать скорость воздушного потока до сверхзвуковых скоростей за счет специальной геометрии канала внутри сопла.

Для расчета скорости воздушного потока на выходе из сопла Лавая было принято решение использовать трехмерную модель вышеописанной воздушной системы в программном модуле SolidWorks Flow Simulation для моделирования потока газа, транспортируемого по каналу внутри корпуса, а также выходящего из сопла Лавая.

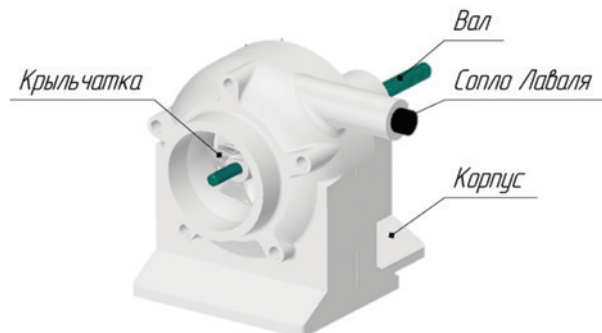


Рис. 1. 3D-модель воздушной системы  
Fig. 1. 3D model of the air system



Рис. 2. Упрощенная модель улитки  
Fig. 2. Simplified scroll model

### Экспериментальная часть

Среда SolidWorks Flow Simulation предназначена для гидродинамического расчета трехмерных моделей, выполненных в программном модуле SolidWorks или импортированных из других моделей САПР, путем моделирования потоков жидкости и газа. Изначально, чтобы приступить к расчету, была упрощена модель улитки турбины для облегчения проведения расчета (рис. 2).

Была изменена геометрия корпуса, но при этом воздушный канал внутри улитки остался неизменным, также был удален вал, на котором фиксировалась крыльчатка.

В качестве входных параметров были взяты угловые скорости воздуха при попадании в канал улитки (точные значения представлены в таблице 1), которые соответствуют скоростям вращения вала. Скорости вращения вала варьируются от 3 000 до 12 000 об/мин. Далее необходимо задать область вращения, а также цель расчета – достижение максимальной скорости – и произвести генерацию газодинамического потока.

### Результаты

Для наглядного отображения изменения скорости потока при его течении по каналу корпуса турбины на рис. 3 представлен результат газодинамического расчета турбины с интегрированным соплом Лавая на выходе, входные параметры при данном расчете – скорость вращения вала с установленной на нем крыльчаткой – 12 000 об/мин.

В таблице 1 отображены результаты газодинамического расчета турбины с интегрированным соплом Лавая при задании различной скорости вращения вала. Угловая скорость была получена по формуле:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30},$$

где  $\omega$  – угловая скорость воздуха при попадании в улитку, рад/с;

$n$  – скорость вращения вала, об/мин.

Радиальная скорость воздуха при попадании в улитку и скорость воздушного потока на

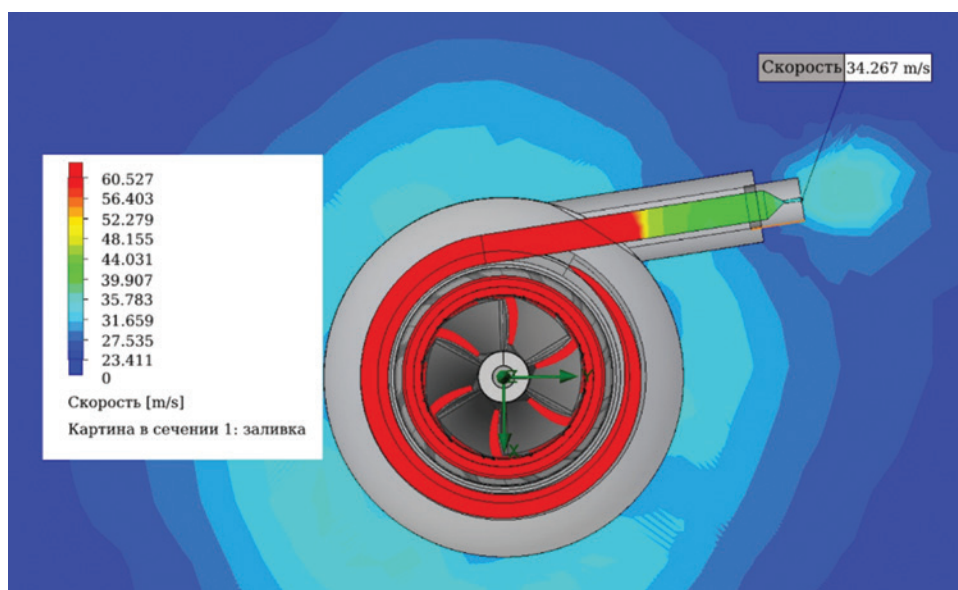


Рис. 3. Результат газодинамического расчета турбины с соплом Лавалья  
Fig. 3. Result of gas-dynamic calculation of turbine with Laval nozzle

выходе из сопла Лавалья были получены при исследовании результатов газодинамического расчета, как показано на рис. 3.

Из таблицы 1 наблюдается прямая зависимость скорости вращения вала и скорости воз-

душного потока на выходе из сопла Лавалья. С аналогичной прогрессией увеличивается и радиальная скорость воздуха при попадании в улитку. На рис. 4 представлены графики данных зависимостей.

Таблица 1  
Table 1

Зависимость скорости воздушного потока на выходе из сопла Лавалья от скорости вращения вала, на котором установлена крыльчатка  
Dependence of the airflow velocity at the Laval nozzle outlet on the shaft rotation speed with the installed impeller

| Скорость вращения вала, $n$ |      | Угловая скорость воздуха при попадании в улитку, $\omega$ , рад/с | Радиальная скорость воздуха при попадании в улитку, $v_r$ , м/с | Скорость воздушного потока на выходе из сопла Лавалья, $v$ , м/с |
|-----------------------------|------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| об/мин                      | об/с |                                                                   |                                                                 |                                                                  |
| 3 000                       | 50   | 314.16                                                            | 27.158                                                          | 15.346                                                           |
| 4 500                       | 75   | 471.24                                                            | 31.039                                                          | 17.539                                                           |
| 6 000                       | 100  | 628.32                                                            | 35.474                                                          | 20.046                                                           |
| 7 500                       | 125  | 785.4                                                             | 40.543                                                          | 22.910                                                           |
| 9 000                       | 150  | 942.48                                                            | 46.337                                                          | 26.148                                                           |
| 10 500                      | 175  | 1 099.56                                                          | 52.959                                                          | 29.926                                                           |
| 12 000                      | 200  | 1 256.64                                                          | 60.527                                                          | 34.267                                                           |

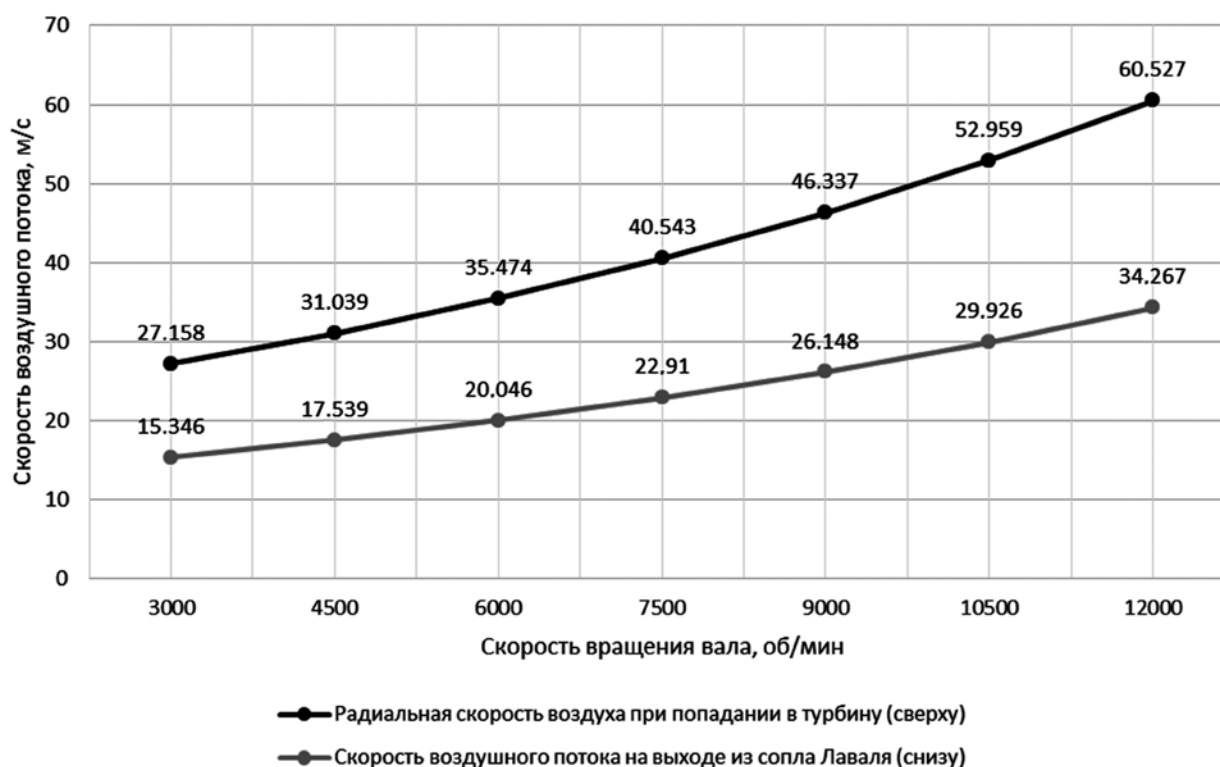


Рис. 4. Графики зависимостей скорости вращения вала от радиальной скорости воздуха при попадании в турбину и скорости воздушного потока на выходе из сопла Лавалья  
 Fig. 4. Diagrams of shaft speed dependence on radial air velocity when entering the turbine and air velocity at the Laval nozzle outlet

На графике прослеживается экспоненциальная зависимость обоих параметров от скорости вращения вала.

В результате продувки данной турбины максимальная скорость воздушного потока на выходе из сопла Лавалья при скорости вращения вала, на котором установлена крыльчатка, равной 12 000 об/мин, составила 34.267 м/с. Данная скорость значительно ниже необходимой, вследствие чего можно сделать вывод, что турбина не подходит в качестве источника воздушного потока для нанесения металлического покрытия методом холодного напыления, поскольку в результате работы турбины не нагнетается необходимое для этого процесса давление. Нагнетание необходимо для создания разности давлений внутри сопла Лавалья, за счет которой происходит увеличение скорости воздушного потока до сверхзвуковых скоростей. Также стоит отметить, что для металлического напыления методом холодного

напыления разность давлений внутри канала сопла Лавалья должна быть величиной в 6 атмосфер.

### Выводы

В ходе исследования было установлено, что при работе турбины скорость воздушного потока на выходе составляет 34.267 м/с, что значительно ниже необходимой для металлического напыления. Это означает, что использование турбины (компрессора) в качестве источника подачи воздуха для обозначенных целей нецелесообразно ввиду невозможности достижения необходимой скорости воздушного потока на выходе из сопла Лавалья. Это обуславливается тем, что турбина во время процесса засасывания воздушных масс и их ускорения по каналу улитки не обеспечивает необходимой разницы давлений, а также скорости воздушного потока, поступающего в канал сопла Лавалья, для создания сверхзвуковой скорости воздушного потока на выходе из него.

### Библиографический список

1. Моравский, А. В. Огонь в упряжке, или Как изобретают тепловые двигатели. Серия: Жизнь замечательных идей / А. В. Моравский, М. А. Файн. – Москва : Знание, 1990. – 192 с. – Текст : непосредственный.
2. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. В 10 томах. Т. 6. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Издание 3-е, стереотипное. – Москва : Издательство «Наука», 1986. – 736 с. – Текст : непосредственный.
3. Гумилевский, Л. И. Густав Лаваль. Серия: Жизнь замечательных людей / Л. И. Гумилевский. – Москва : Журнально-газетное объединение, 1936. – 254 с. – Текст : непосредственный.
4. Алхимов, А. П. Метод «холодного» газодинамического напыления / А. П. Алхимов, В. Ф. Косарев, А. Н. Папырин. – Текст : непосредственный // Доклады АН СССР. – 1990. – Т. 315, № 5. – С. 1062–1065.
5. Данилин, Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок / Б. С. Данилин. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 328 с. – Текст : непосредственный.
6. Харламов, Ю. А. Газотермическое напыление покрытий и экологичность производства, эксплуатации и ремонта машин / Ю. А. Харламов. – Текст : непосредственный // Тяжелое машиностроение. – 2000. – № 2. – С. 10–13.
7. Давлетгареев, М. Ф. Применение SolidWorks Flow Simulation для расчета аэротермодинамики охлаждения электронного блока / М. Ф. Давлетгареев, А. З. Копылов. – Текст : непосредственный // Системы автоматизированного проектирования на транспорте : Тезисы докладов V Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 17–18 апреля 2014 года / Федеральное агентство железнодорожного транспорта, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2014. – С. 47–49.
8. Писарев, Д. Е. Математическое моделирование геометрических параметров сопла Лавалья / Д. Е. Писарев. – Текст : непосредственный // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XX международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 07–08 апреля 2022 года. – Екатеринбург : Уральский государственный горный университет, 2022. – С. 212–216.
9. Писарев, Д. Е. Использование специальных отверстий в сопле Лавалья для изменения скорости воздушного потока / Д. Е. Писарев, С. И. Митрохин. – Текст : непосредственный // Материалы Международной научно-практической конференции им. Д. И. Менделеева, Тюмень, 24–26 ноября 2022 года. Том 2. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2023. – С. 255–258.
10. Новикова, А. А. Изучение геометрических параметров сопла Лавалья, влияющих на скорость воздушного потока / А. А. Новикова, Д. Е. Писарев. – Текст : непосредственный // Наука и образование: актуальные исследования и разработки : Материалы V Всероссийской научно-практической конференции. В 2 частях. Часть 2. Чита, 15–16 сентября 2022 года. – Чита : Забайкальский государственный университет, 2022. – С. 80–84.

### References

1. Moravskiy, A. V., & Fayn, M. A. (1990). Ogon' v upryazhke, ili Kak izobretayut teplovye dvigateli. Zhizn' zamechatel'nykh idey. Moscow, Znanie Publ., 192 p. (In Russian).
2. Landau, L. D., & Lifshits, E. M. (1986). Teoreticheskaya fizika. Gidrodinamika. 3<sup>rd</sup> edition. Moscow, Nauka Publ., 6, 736 p. (In Russian).

3. Gumilevskiy, L. I. (1936). Gustav Laval'. Zhizn' zamechatel'nykh lyudey. Moscow, Zhurnal'no-gazetnoe ob"edinenie Publ., 254 p. (In Russian).
4. Alkhimov, A. P., Kosarev, V. F., & Papyrin, A. N. (1990). Metod "kholodnogo" gazodinamicheskogo napyleniya. Proceedings of the USSR Academy of Sciences, 315(5), pp. 1062-1065. (In Russian).
5. Danilin, B. S. (1989). Primenenie nizkoterperaturnoy plazmy dlya naneseniya tonkikh plenok. Moscow, Energoatomizdat Publ., 328 p. (In Russian).
6. Kharlamov, Yu. A. (2000). Gazotermicheskoe napylenie pokrytiy i ekologichnost' proizvodstva, ekspluatatsii i remonta mashin. Tyazheloe mashinostroenie, (2), pp. 10-13. (In Russian).
7. Davletgareev, M. F., & Kopylov, A. Z. (2014). Primenenie SolidWorks Flow Simulation dlya rascheta aerotermodinamiki okhlazhdeniya elektronnoy bloka. Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya na transporte: Tezisy dokladov V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, April, 17-18. Saint-Petersburg, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University Publ., pp. 47-49. (In Russian).
8. Pisarev, D. E. (2022). Matematicheskoe modelirovanie geometricheskikh parametrov sopla Lavalya. Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti: sbornik trudov XX mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Chteniya pamyati V. R. Kubacheka", April, 07-08. Ekaterinburg, Ural State Mining University Publ., pp. 212-216. (In Russian).
9. Pisarev, D. E., & Mitrokhin, S. I. (2023). Ispol'zovanie spetsial'nykh otverstiy v sople Lavalya dlya izmeneniya skorosti vozdushnogo potoka. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii im. D. I. Mendeleeva, November, 24-26. Tyumen, Industrial University of Tyumen Publ., (2), pp. 255-258. (In Russian).
10. Novikova, A. A., & Pisarev, D. E. (2022). Izuchenie geometricheskikh parametrov sopla Lavalya, vliyayushchikh na skorost' vozdushnogo potoka. Nauka i obrazovanie: aktual'nye issledovaniya i razrabotki: Materialy V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, September, 15-16. Chita, Transbaikal State University Publ., (2), pp. 80-84. (In Russian).

#### **Сведения об авторах**

Писарев Дмитрий Евгеньевич, лаборант кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, e-mail: pisarevde@tyuiu.ru

Митрохин Сергей Иванович, обучающийся кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, e-mail: mitrokhinserega@mail.ru

#### **Information about the authors**

Dmitry E. Pisarev, Laboratory Assistant at the Department of Mechanical Engineering Technology, Industrial University of Tyumen, e-mail: pisarevde@tyuiu.ru

Sergey I. Mitrokhin, Student at the Department of Mechanical Engineering Technology, Industrial University of Tyumen, e-mail: mitrokhinserega@mail.ru

*Получена 5 апреля 2023 г., одобрена 16 мая 2023 г., принята к публикации 28 сентября 2023 г.*

*Received 5 April 2023, Approved 16 May 2023, Accepted for publication 28 September 2023*