

INTEGRATED SYSTEM FOR AUTOMATED DESIGN OF A STANDARDIZED ISO 5801:2007 FLOWMETER VENTURI INLET NOZZLE UTILIZING 3D TECHNOLOGIES¹⁶

Assist. Prof. Ivaylo Nikolaev, PhD

Department of Department of Heat, Hydraulics and Environmental Engineering,

“Angel Kanchev” University of Ruse

Phone: +359 82 888 582

E-mail: nikolaev@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Kliment Klimentov, PhD

Department of Department of Heat, Hydraulics and Environmental Engineering,

“Angel Kanchev” University of Ruse

Phone: +359 82 888 581

E-mail: kklimentov@uni-ruse.bg

Abstract: This study introduces a concept for automating engineering processes by using existing software tools, without necessity of additional specialized software development. In this regard, a system has been designed, integrated within the platforms of Microsoft Excel and Solidworks, aiming for the automated design of a standardized nozzle in accordance with the ISO 5801:2007 standard. The design process components have been automated, including: standard-compliant calculations, integration of tabulated data and coefficients, calibration curve development, determination of the nozzle's structural parameters and accompanying flanges, as well as the creation of functional and assembly drawings. Algorithmic procedures and calculations are performed through Excel, with integrated functions for partial linear and bilinear interpolation based on VBA. The 3D models and drawings are executed in Solidworks, with dimensional data synchronized with Excel outcomes via Design Tables in XLSX format. This structured approach facilitates the completion of all design stages without direct user intervention. The nozzle's fabrication is envisaged utilizing 3D technologies, thus the design accommodates the advantages and capabilities of 3D printing.

Keywords: Standardized Nozzle, ISO 5801:2007 International Standard, Flow Measurement, Calibration Curve, Automated Design, 3D Printing, 3D Technologies.

ВЪВЕДЕНИЕ

С настъпването на иновациите в 3D технологиите, проектирането и изработването на разнообразни изделия претърпява преобразувания и модернизации. Появата на 3D печата променя динамиката в индустрията, като предоставя редица предимства, които могат да оптимизират производствения процес и качеството на крайния продукт.

Едно от най-изразените предимства на 3D печата е възможността за бързо създаване на прототипи, което позволява на инженерите и дизайнерите да имат визуален и тактилен контакт с продукта, още преди започването на масовото производство (Wohlers, T., T. Caffrey, 2017). Тази технология също така предоставя свобода на дизайна, като позволява създаването на сложна геометрия без допълнителни разходи, което е ограничено при традиционните методи за производство (Gibson, I., D. W. Rosen, B. Stucker, 2014).

Предимството на тази технология може да бъде използвано и при проектирането на стандартизирани дюзи и бленди и това дава възможност да се автоматизира до голяма степен както процеса на проектирането на дюзата, така и нейното изработване.

В настоящата работа е представена и осъществена концепция за автоматизиране процеса на проектиране и изработване на стандартизирана дюза при работа като плавен вход съгласно

¹⁶ Докладът е представен на Научната сесия на Секция „Топлотехника, хидравлика и пневматика“ на 27 октомври 2023 г. с оригинално заглавие на български език: ИНТЕГРИРАНА СИСТЕМА ЗА АВТОМАТИЗИРАНО ПРОЕКТИРАНЕ НА СТАНДАРТИЗИРАН ДЕБИТОМЕР ПЛАВЕН ВХОД – ДЮЗА ISO 5801:2007 С ПОМОЩТА НА 3D ТЕХНОЛОГИИ

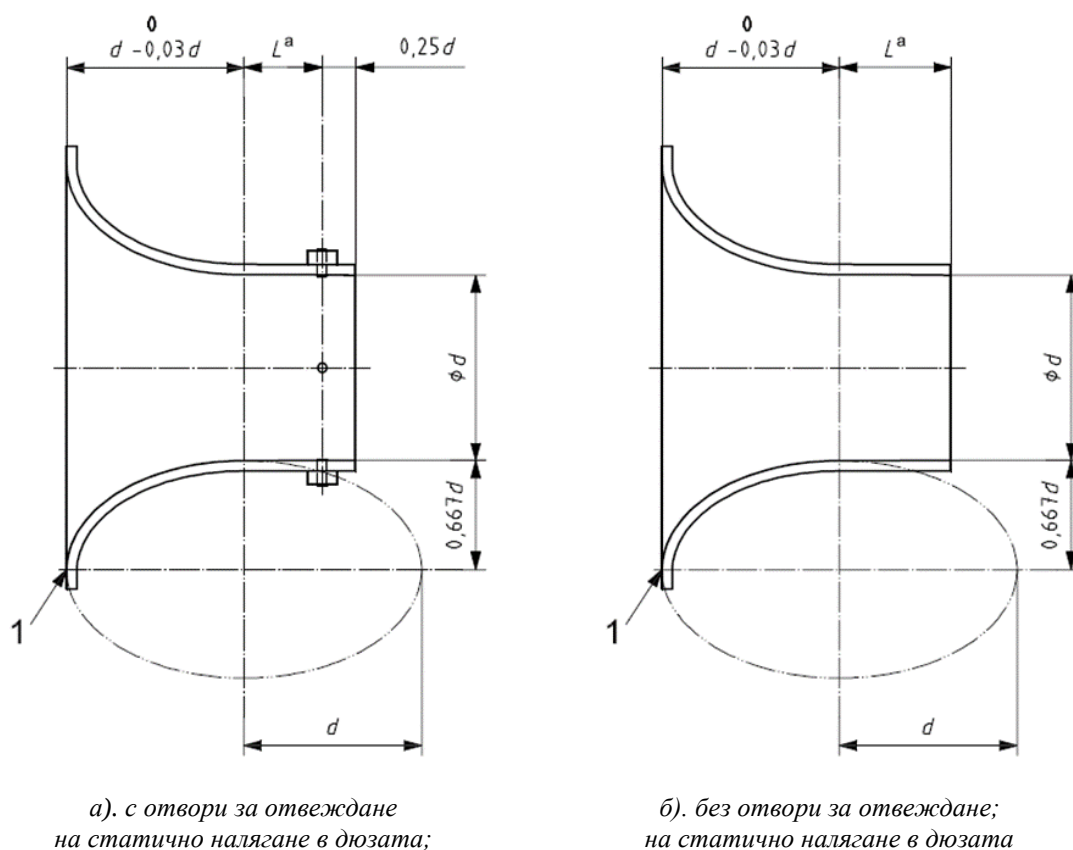
стандарта ISO 5801:2007 чрез използване на съществуващ софтуерен инструментариум и 3D технологии и печат.

В този контекст е конструирана система от файлове, интегрирана в платформите на Microsoft Excel и Solidworks. Автоматизацията на изчисленията и построяването на тарировъчната характеристика и тарировъчната функция се постигат с електронни таблици в Excel с помощта на допълнително създадени функции във Visual Basic for Application (VBA), имплементирани в електронните таблици. Автоматизацията на 3D моделирането се постига с изнесени таблици Design Tables в XLSX формат с геометричните размери и параметри на 3D модела, обвързани с изчислителните таблици. Подготвеният 3D модел е съобразен с възможностите и изискванията за 3D печат и с помощта на специализиран софтуер проектантът може бързо и лесно да генерира файл за 3D печат във формат GCODE.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Методика за изчисление на тарировъчната характеристика на дюзата по стандарт ISO 5801:2007

Методиката за изчисление на тарировъчната характеристика е съставена по стандарт ISO 5801:2007 (International Standard ISO 5801:2007) при работа на дюзата като плавен вход. Всички изчисления се осъществяват в специално създаден изчислителен файл в Excel.



Фиг. 1. Геометрични размери на дюзата по стандарт ISO 5801:2007 (International Standard ISO 5801:2007)

Геометричните размери на стандартизираната дюза са обезразмерени спрямо диаметъра на дюзата d и са представени на фиг. 1. При работа като плавен вход се използва вариантът с отвеждане на статичното налягане в тясното сечение на дюзата (фиг. 1.а). Пак според стандарта разстоянието L трябва да е $0.5d$ или $0.6d$, като за проектиране на нова дюза е препоръчително да се приема $L = 0.6d$.

Исходни начални параметри:

- Диаметър на дюзата d ;
- Максимален дебит – обем Q_{max} или масов q_{max} ;
- Абсолютна температура преди дебитомера T_u ;
- Абсолютно налягане преди дебитомера p_u (за дюза със свободен вход $p_u = p_{atm}$);
- Пад на налягане между входа на дюзата и в тясното ѝ сечение Δp (при свободен вход – вакуума в тясното сечение $p_b = \Delta p$).

Основни параметри и константи:

- Коефициент на адиабатата k_u (за въздух се приема $k = 1.4$);
- Коефициентът на кинетична енергия преди дюзата α_{Au} (за дюза със свободен вход $\alpha_{Au} = 1$);
- Коефициент на диаметъра на дюзата $\beta = d/D$ (за свободен вход - $\beta = 0$).

Изчисляване на тарировъчната характеристика:

1. *Плътност на флуида преди дюзата*

Плътността на флуида преди дюзата ρ_u се отчита от справочни данни. За несвиваеми флуиди тя се определя от температурата T_u , а за свиваеми – и от абсолютното налягане p_u . За да се автоматизира проектирането на дюзата в приложния файл с изчисляването на тарировъчната характеристика е създадена възможност за *автоматизирано „отчитане“ на таблични данни* и са добавени таблици с данни за някои видове флуиди.

2. *Коефициент на налягането*

$$r_d = 1 - p_b/p_u$$

3. *Коефициент на разширение*

$$\varepsilon = \left(\frac{k_u \cdot r_d^{\frac{2}{k_u}}}{k_u - 1} \cdot \frac{1 - \beta^4}{1 - r_d^{\frac{2}{k_u}} \cdot \beta^4} \cdot \frac{1 - r_d^{\frac{k_u-1}{k_u}}}{1 - r_d} \right)^{0.5}$$

4. *Числото на Рейнолдс при изхода на дюзата*

$$Re_d = \frac{0.95 \varepsilon d \sqrt{2 \rho_u p_b}}{17.1 + 0.048 T_u} \cdot 10^6$$

5. *Коефициентът на дебита на дюзата*

- за $L/d = 0.6$

$$\mu = \left(0.9986 - \frac{7.006}{\sqrt{Re_d}} + \frac{134.6}{Re_d} \right) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \alpha_{Au} \cdot \beta^4}} \right)$$

- за $L/d = 0.5$

$$\mu = \left(0.9986 - \frac{6.688}{\sqrt{Re_d}} + \frac{131.5}{Re_d} \right) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \alpha_{Au} \cdot \beta^4}} \right)$$

6. Масов дебит

$$q = \varepsilon \mu \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \rho_u p_u}$$

7. Абсолютно налягане на изхода на дюзата

$$p_d = p_u - p_v$$

8. Плътност на флуида на изхода на дюзата

$$\rho_d = \frac{p_d}{p_u} \rho_u$$

9. Обеман дебит на изхода на дюзата

$$Q_d = \frac{q}{\rho_d}$$

10. Граници на тарировъчната характеристика

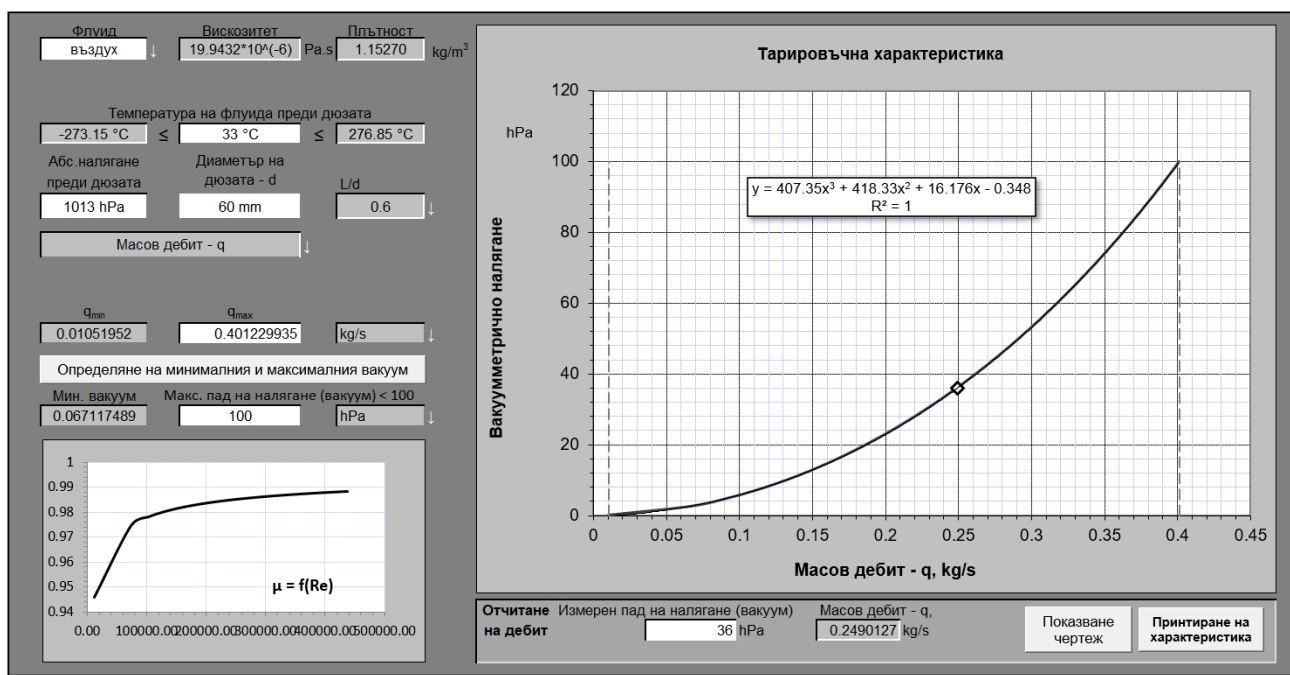
Долната граница на тарировъчната характеристика се определя от условието

$$Re_d < 12000,$$

а горната – от условието

$$p_v < 10000.$$

При тези ограничения с помощта на функцията GoalSeek е написан макрос във VBA за определяне на минималния и максималния вакуум $p_{v \min}$ и $p_{v \max}$ и съответните стойности на дебита $q_{\min}$ и $q_{\max}$ или $Q_{\min}$ и $Q_{\max}$. Ако потребителят е задал стойности за максимален дебит и максимален вакуум извън тези интервали, макросът ги заменя с най-близката гранична стойност, а тарировъчната характеристика се изчертава в този интервал. Макросът се стартира с натискане на бутон „Определяне на минималния и максималния вакуум“ (фиг. 2).



Фиг. 2. Форма за въвеждане и извеждане на данни

Форма за въвеждане и извеждане на данни

Формата за въвеждане и извеждане на данни е разположена на отделен лист (фиг. 2). Тя дава възможност за интерактивно въвеждане и извеждане на данни. Потребителят може да избере вида на флуида, при което автоматизирано се „отчитат“ плътността и вискозитета на избрания флуид. При избор на вариант „Друг“ се появяват полета за ръчно въвеждане на плътността и вискозитета. Интерактивност е предвидена и при въвеждане на максималния дебит. Потребителят може да избере между масов или обемен дебит, както и да избере мерните единици за налягането и дебита. В същите мерни единици се изчертава и изчислената тарировъчна характеристика, визуализирана в същата форма. Предвидено е и „отчитане“ на дебита от тарировъчната характеристика, като потребителят трябва да въведе отчетения пад на налягане (вакуум). Вместо тарировъчна характеристика потребителят може да ползва и апроксимираната с полином от трета степен тарировъчна функция, разположена върху графиката.

Автоматизирано „отчитане“ на таблични данни

Автоматизираното „отчитане“ на таблични данни представлява намиране/определяне на междинни таблични стойности. За това са използвани следните методи:

- за стойности зависещи от една величина Y vs X – *линейна интерполация по части* (Iyengar, S. R. K., Jain, R. K., 2009);
- за стойности зависещи от две величини Z vs X, Y – *билинейна интерполация по части* (Kirkland E.J. 2010).

За да се извършва интерполирането автоматично са създадени функции за интерполация с помощта на *Visual Basic for Applications* (VBA) и са интегрирани в Excel. Тези функции имат следният синтаксис:

- за линейна интерполация по части –

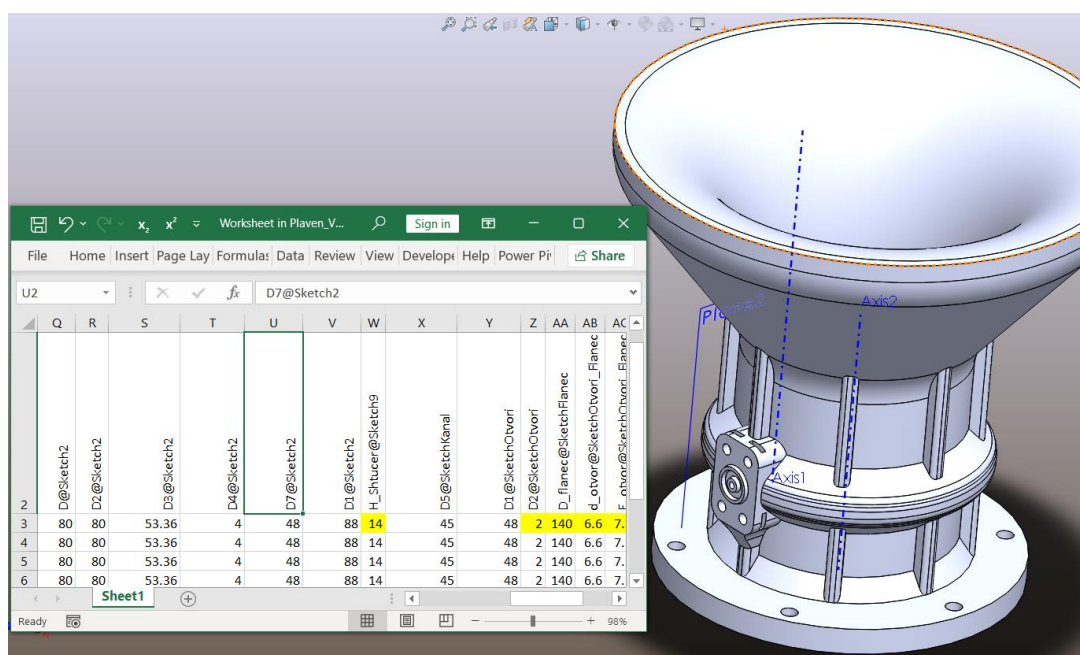
„ $Y = \text{InterpolaciaXY}(\text{DataXY}; X)$ “,

където DataXY е областта на съответната таблица от тип Range, а X – величината от тип Double, от която зависи търсената величина Y ;

- за билинейна интерполация по части –

„ $Z = \text{InterpolaciaXYZ}(\text{DataXYZ}; X; Y)$ “,

където DataXYZ е областта на съответната таблица от тип Range, а X и Y – величините от тип Double, от които зависи търсената величина Z .



Фиг. 3. Форма за въвеждане и извеждане на данни

3D моделиране и прототипиране

Предварително в моделното пространство на Solidworks е създаден 3D модел на дюзата (плавния вход), като размерните му данни са синхронизирани с резултатите от изчислителния файл в Excel посредством специфицирана Design Table в XLSX формат. 3D моделът и неговата Design Table са показани на фиг. 3. Така структурираният подход позволява предварително да се пресметнат или зададат всички размери на дюзата с минимална намеса от страна на проектанта и да се получи окончателният 3D. При нужда винаги могат да се направят корекции на размерите в Design Table. Конструкцията на 3D модела е съобразена с възможностите на 3D печата. В тялото на дюзата е оформен вътрешен канал за усредняване на отведеното налягане. За по-здрава конструкция и икономия на материал са оформени надлъжни ребра. Благодарение на предимствата на 3D печата тази по-сложна геометрия не води до допълнителни манипулации, усложняване на процеса на изработване и допълнителни разходи. Като се генерира окончателния вариант на 3D модела и се експортира в STL формат с помощта на софтуера на съответния 3D принтер се генерира файла с G-кода за печат (GCODE). Последният етап е изработването/разпечатването на дюзата като крайно изделие от устойчиви, термостабилни и химически устойчиви материали. Тъй като дюзата не е силово натоварена е достатъчно използването на материал от PLA.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интегрираната система за автоматизирано проектиране и изработване на стандартизиран дебитомер плавен вход – дюза ISO 5801:2007 с помощта на 3D технологии и 3D печат има следните предимства:

- Всички етапи на проектирането (изчисления, „отчитане“ на таблични стойности, построяване на характеристики, оразмеряване на детайлите и изготвяне на 3D модел) се извършват автоматично от системата за проектиране с много малка намеса на потребителя;

- Интегрираната система ползва ресурсите на съществуващ софтуер и това намалява работата по нейното създаване;

- 3D печатът позволява бързото създаване на физически модели на проектираните дюзи или части от тях. Това позволява да се тества и оптимизира дизайна преди окончателното въвеждане в експлоатация, което ускорява процеса на разработка и намалява разходите.

- Традиционните методи за производство често ограничават сложността на дизайна поради технически или финансови причини. 3D печатът позволява създаването на сложна геометрия без допълнителни разходи. В случая е оформен вътрешен канал за усредняване на отведеното налягане. Обикновено при традиционните методи за производство това се постига с изграждането на колекторна тръбичка.

- 3D печатът предоставя възможност за лесна персонализация на изделията. Това означава, че дюзите могат да бъдат адаптирани към конкретни нужди или условия на работа. За разлика от традиционните методи, тук това се постига само с корекция на 3D модела.

- Нови материали за 3D печат се разработват постоянно, което позволява изработката на дюзи от устойчиви, термостабилни и химически устойчиви материали за работа в агресивна среда.

REFERENCES

Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2014). *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Springer.

International Organization for Standardization. (2007) *International Standard ISO 5801:2007. Industrial fans — Performance testing using standardized airways*. Published in Switzerland.

Iyengar, S.R.K., Jain, R.K., (2009). *Numerical Methods*. New Age International.

Kirkland E.J. (2010) *Bilinear Interpolation*. In: *Advanced Computing in Electron Microscopy*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6533-2_12.

Wohlers, T., & Caffrey, T. (2017). *Wohlers report 2017: 3D printing and additive manufacturing state of the industry*. Wohlers Associates.