

УДК 622.78(045):622.02:543.226

**Voloshyn O.I.**, Cor. Member NASU, D. Sc. (Tech.), Professor,

**Potapchuk I.Yu.**, M.S. (Tech.),

**Zhevzyk O.V.**, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher,

**Yemelianenko V.I.**, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher,

**Теплий V.P.**, M.S. (Tech.),

**Kholyavchenko L.T.**, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher,

**Shniakin S.V.**, M.S. (Tech.)

(N.S. Polyakov IGTM NAS of Ukraine)

**MATHEMATICAL MODELING OF GAS-DYNAMIC CHARACTERISTICS  
OF THE HEAT-TRANSFER MEDIUM JET IN THE PROCESS OF  
THERMAL REAMING OF THE BOREHOLE**

**Волошин О.І.**, чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, професор,

**Потапчук І.Ю.**, магістр,

**Жевжик О.В.**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,

**Ємельяненко В.І.**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,

**Теплий В.П.**, магістр,

**Холявченко Л.Т.**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,

**Шнякін С.В.**, магістр

(ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України)

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОДИНАМІЧНИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК СТРУМИНИ ТЕПЛОНОСІЯ В ПРОЦЕСІ  
ТЕРМІЧНОГО РОЗШИРЕННЯ СВЕРДЛОВИНИ**

**Волошин А.И.**, чл.-кор. НАН Украины, д-р техн. наук, профессор,

**Потапчук И.Ю.**, магистр,

**Жевжик А.В.**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

**Емельяненко В.И.**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

**Тёплый В.П.**, магистр,

**Холявченко Л.Т.**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

**Шнякин С.В.**, магистр

(ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины)

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК СТРУИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПРОЦЕССЕ  
ТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ СКВАЖИНЫ**

**Annotation.** Purpose of the work is to develop a mathematical model for calculation of gas-dynamic characteristics (pressure, density, speed) of the heat-transfer medium at its movement along the surface of the borehole in the process of its thermal reaming. For this purpose, technique and algorithm were developed for calculation of gas-dynamic characteristics of the free and semi-bounded jet of the heat-transfer medium at its movement along the surface of the borehole.

Advantages of application of the thermal tools with electric discharge are shown in comparison with other ways of thermal destruction of rocks, as well as a number of features of mathematical description of analytical methods for solving problems of the rock thermal destruction. Results of the experimental study confirm adequacy of the developed engineering model. Relative error of calculation of gas-dynamic characteristics for the heat-transfer medium along internal lateral surface of the cross duct channel, i.e. along the surface of the borehole, is quite acceptable for such class of problems. The obtained results can be used for modeling gas-dynamic characteristics for cases when thermal tool with electric discharge is used in other technologies of thermal treatment and destruction of materials.

**Keywords:** mathematical model, thermal expansion, borehole, heat-transfer stream, gas-dynamic characteristics.

**Introduction.** Among the known devices of thermal destruction of rocks thermal tools with an arc electric discharge i.e. plasmotrons are advantageously distinguished.

In comparison to another ways of thermal destruction of rocks the destruction of rocks by means of low temperature plasma stream differs in distribution of cracks in rock in a considerable depth, high values of heat transfer coefficient and specific heat flux, simplified system of automation and remote control, compactness of thermal tool.

Mathematical description of analytical methods of thermal destruction and determination of optimal parameters of influence on rock has some specific features that must be taken into account for the successive decision of next tasks of analytical thermal destruction theory:

- determination of the temperature field induced by the heat generator, i.e. plasmatron in rock during its heating;
- determination of the thermal stress field by the certain temperature field in rock;
- determination of the total field of thermal and mechanical stresses taking into account influence of the borehole;
- determination of destruction surface and amount of destroyed rock as a result of thermal influence on it;
- choice of optimal parameters of heat generator, terms of heat exchange and modes of operations of thermal instrument on the whole.

Thus, possibilities of analytical determination of optimal parameters of thermal influence on rocks are limited by solution of thermoelasticity equations and contact tasks of durability theory.

Such task formulation is unacceptable due to complication of taking into account of substantial change of physical and thermophysical rock properties in the processes of its heating and mechanical loading.

Due to an existence of fundamental differences among the results of the known publications and limitations of investigational parameters of heat transfer medium i.e. sonic or supersonic plasma jet that interacts with the borehole surface, it is obvious necessity of engineering model development that allows to define basic gasdynamic jet parameters of heat transfer medium in the process of borehole thermal reaming.

**Methodology of gasdynamic parameters calculation of heat transfer medium.**

As an initial information given for development of engineering model of

calculation of gasdynamic properties of both free and semibounded gas jet it is necessary to have next parameters:

- mach number  $M_0$  in the outlet orifice of nozzle for the case of calculation of flow of sonic and supersonic plasma jet (velocity of plasma jet outflow  $u_0$  from a nozzle);

- diameter of outlet orifice of nozzle  $d_{s_0}$ ;

- distance from the plane of the outlet orifice of nozzle to the plane of borehole  $h$ , where gasdynamic properties of jet are calculated.

Linear sizes are expressed by the diameters of the outlet orifice of nozzle of thermal tool  $d_{s_0}$  and it is marked a hyphen above a symbol.

Parameters of the heat transfer medium at the nozzle outlet: static pressure  $P_{st}$ , braking temperature  $T_0^*$ , jet outflow velocity from a nozzle  $u_0$  and pressure ratio of the jet  $n$  are determined by the known dependences [1...3]:

$$P_{st} = \frac{P_n}{\left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_0^2\right)^{\frac{k}{k-1}}} \quad (1)$$

where  $M_0$  is a Much number in the outlet orifice of nozzle;  $P_n$  - pressure of the heat transfer medium at the nozzle outlet;  $k$ - ratio of specific heats of the heat transfer medium;

$$n = \frac{P_{st}}{P_{atm}} \quad (2)$$

The braking temperature of the heat transfer medium at the nozzle outlet is determined from equation of the state of ideal gas, assuming the condition of equality of braking temperature at any plane [4...6]:

$$T_0^* = \frac{P_n}{\rho_n \cdot R} \quad (3)$$

where  $\rho_n$  - heat transfer medium density at the nozzle outlet;  $R$  - the gas constant.

$$u_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1} \cdot R \cdot T_0^*} \quad (4)$$

Axial velocity distribution at the supersonic area of flow of free stream is calculated in accordance to Lukhtura [1993]:

$$u_n = \frac{13 \cdot \sqrt{M_{ef}^2 - 1} \cdot \left( \frac{d_{ef}}{d_0} \right) \cdot u_0}{\bar{x} - \bar{S}} \quad (5)$$

where  $M_{ef}$  - Mach number at the axis of stream in its “effective” plane;  $d_{ef}$  - diameter of “effective” plane of stream;  $\bar{x}$  - relative current coordinate along the axis of the cross duct channel;  $\bar{S}$  relative length of initial (gasdynamic) area of the jet.

Distribution of axial velocity at the subsonic area of free jet flow is proposed by Mozhayeva [1978]:

$$u_a = \frac{8 \cdot u_0}{3.3 + \bar{h}} \quad (6)$$

Linear sizes are expressed by the diameters of the outlet orifice of nozzle of thermal tool  $d_{s0}$  and it is marked a hyphen above a symbol.

Mach number at the axis of stream in its “effective” plane is calculated in accordance to Lukhtura [1993]:

$$M_{ef} = \sqrt{\frac{F_0}{F_{ef}} \cdot \left( M_0^2 \cdot n \cdot \cos^2 \alpha_0 + \frac{n-1}{k} \right)} \quad (7)$$

where  $F_0$  - an area of outlet orifice of the nozzle;  $F_{ef}$  an area of “effective” plane of the jet;  $\alpha_0$  - an angle between direction of gas absolute velocity at the outlet orifice of nozzle and axis of gas jet.

In turn, the diameter of “effective” plane of the jet is expressed by Antsupov [1974]:

$$d_{ef} = d_0 \cdot n^{0.6} \quad (8)$$

Relative length of initial (gasdynamic) area of the jet is known from Abramovich [1984]:

$$\bar{S} = 4.2 + 1.1 \cdot M_0^2 \cdot d_0 \quad (9)$$

For determination of the mode of flow of a semibounded jet along the lateral side of the cross duct channel it is necessary to calculate the extent of areas of flow from next expressions at  $\bar{h} > 6.2$  [Mozhayeva, 1978]:

- an extent of area of accelerating flow:

$$x_* = 1.09 \cdot \left( \frac{d_0}{u_0} \right)^{0.034} \cdot d_0 \quad (10)$$

Maximal velocity of the heat transfer medium on the external boundary of the cross duct channel wall's boundary layer at  $\bar{h} > 6.2$  is determined by an expression [Yakovlevskiy et al., 1964]:

$$u_* = \frac{1.42 \cdot u_0}{0.31 \cdot \bar{h}} \quad (11)$$

Velocity of the heat transfer medium on the external boundary of wall boundary layer at  $\bar{h} > 6.2$  is determined by Mozhayeva [1978]:

$$u_m = u_0 \cdot \left( 16.1 \cdot \bar{h}^{-1.54} \cdot \frac{x}{x_*} - 47 \cdot \bar{h}^{-2.94} \cdot \frac{x}{x_*} \right) \quad (12)$$

Excessive static pressure along the lateral side of the cross duct channel is determined by Yudayev et al. [1977]:

$$P_{st\ ex} = \frac{\rho_{atm} \cdot u_a^2}{2} \cdot e^{-c \cdot \bar{x}^2} \quad (13)$$

where  $c$ - coefficient in equation;  $\rho_{atm}$ - density of the heat transfer medium at atmospheric pressure.

Coefficient  $c$  in equation (13) at  $\bar{h} > 6.2$  accordingly to Yudayev et al. [1977] equals:

$$c = 5.04 \cdot \bar{h}^{-0.75} \quad (14)$$

Dynamic pressure of coolant-moderator along an obstacle:

$$P_{dyn} = \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \quad (15)$$

where  $\rho$ - current density of the heat transfer medium, that is determined by static pressure of the heat transfer medium.

The braking pressure of the heat transfer medium along the lateral side of the cross duct channel:

$$P_{ex} = P_{st\ ex} + P_{dyn} \quad (16)$$

**Verification of the mathematical model adequacy.** Comparison of experimental

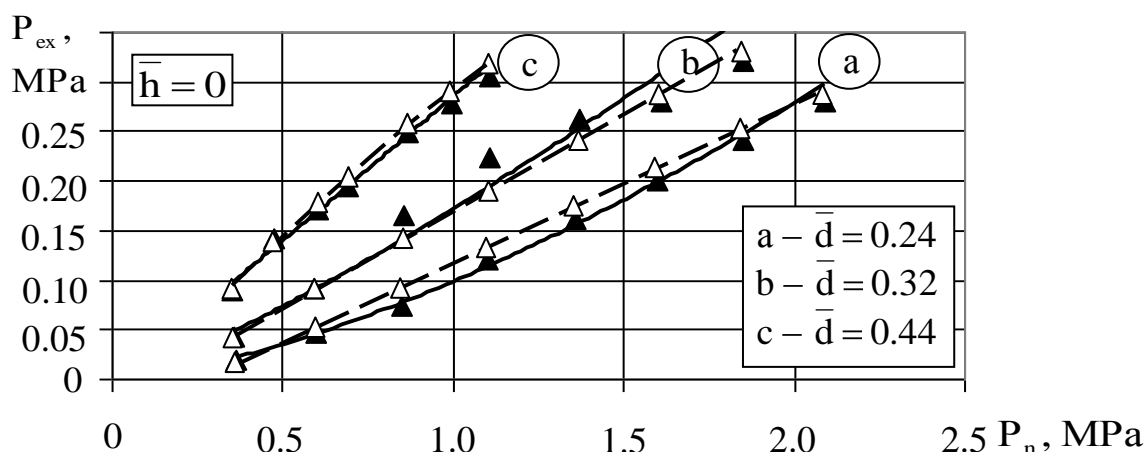




Figure 1 - Verification of the mathematical model adequacy of the process of the heat transfer medium jet interaction with the lateral side of the cross duct channel that imitated the surface of the borehole

 - experimental data;  
 - computational data.

and calculative values of excessive pressure of the heat transfer medium on the lateral side of the borehole depending on pressure of the heat transfer medium at the nozzle outlet of thermal tool and distance from the plane of the outlet orifice of nozzle to the plane of the borehole is presented, that testifies the results of experimental investigation confirm adequacy of the elaborated engineering model.

Relative error of calculation of complete pressure of the heat transfer medium on the lateral side of the cross duct channel, i.e. on the surface of rock does not exceed 22%.

**Conclusions.** The engineering modeling of gasdynamic properties of process of plasma jet interaction with the lateral surface of the borehole is executed.

An engineering model is proposed by means of that the velocity of the heat transfer medium along the lateral surface of the borehole is determined, and also distribution of density and pressure of the heat transfer medium on the lateral surface of the borehole.

#### REFERENCES

1. Emanuel, G. (2016), *Analytical fluid dynamics*, CRC Press, Boca Raton, USA.
2. Johnson, R.W. (2016), *Handbook of fluid dynamics*, CRC Press, London, United Kingdom.
3. Rieutord, M. (2015), *Fluid Dynamics. An introduction*, Springer, Heidelberg, Germany.
4. Ruban, A.I. and Gajjar, J.S.B. (2014), *Fluid Dynamics: Part 1: Classical fluid dynamics*, Oxford University Press, Oxford, United Kingdom.
5. Fernando, H.J. (2012), *Handbook of Environmental Fluid Dynamics: Volume 1: Overview and Fundamentals*, CRC Press, New York, USA.
6. Cushman-Roisin, B.-C. and Beckers, J.-M. (2011), *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics: Physical and Numerical Aspects*, Academic Press, Cambridge, USA.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Emanuel, G. (2016), *Analytical fluid dynamics*, CRC Press, Boca Raton, USA.
2. Johnson, R.W. (2016), *Handbook of fluid dynamics*, CRC Press, London, United Kingdom.
3. Rieutord, M. (2015), *Fluid Dynamics. An introduction*, Springer, Heidelberg, Germany.

4. Ruban, A.I. and Gajjar, J.S.B. (2014), *Fluid Dynamics: Part 1: Classical fluid dynamics*, Oxford University Press, Oxford, United Kingdom.

5. Fernando, H.J. (2012), *Handbook of Environmental Fluid Dynamics: Volume 1: Overview and Fundamentals*, CRC Press, New York, USA.

6. Cushman-Roisin, B.-C. and Beckers, J.-M. (2011), *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics: Physical and Numerical Aspects*, Academic Press, Cambridge, USA.

---

#### About the authors

**Voloshyn Oleksii Ivanovych**, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Deputy Director, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, worldlab.eg@gmail.com

**Potapchuk Iryna Yuriivna**, Master of Science, Junior Researcher in Department of Vibropneumatic Transport Systems and Complexes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, potapchuk@ua.fm

**Zhevzyk Oleksandr Vladyslavovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor, Senior Researcher in Department of Vibropneumatic Transport Systems and Complexes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, teploenergopro@gmail.com

**Yemelianenko Volodymyr Ivanovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor, Senior Researcher in Department of Vibropneumatic Transport Systems and Complexes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, vladivem@gmail.com

**Tepliy Valerii Petrovych**, Master of Sciences, Chief Project Designer in Department of Vibropneumatic Transport Systems and Complexes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, VPTepliy@nas.gov.ua

**Kholiavchenko Leonid Tymofiiovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor, Senior Researcher in Department of Rock Breaking Problems, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, dsl77@ua.fm

**Shniakin Sergii Volodymyrovych**, Master of Science, Principal Engineer in the Department of Vibropneumatic Transport Systems and Complexes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, SVShnyakin@nas.gov.ua

#### Про авторів

**Волошин Олексій Іванович**, чл.-кор. Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор, заступник директора, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, worldlab.eg@gmail.com

**Потапчук Ірина Юрїївна**, магістр, молодший науковий співробітник у відділі вібропневмотранспортних систем і комплексів, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, potapchuk@ua.fm

**Жевзжик Олександр Владиславович**, кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник у відділі вібропневмотранспортних систем і комплексів, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, teploenergopro@gmail.com

**Ємельяненко Володимир Іванович**, кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник у відділі вібропневмотранспортних систем і комплексів, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, vladivem@gmail.com

**Теплий Валерій Петрович**, магістр, головний конструктор проекту у відділі вібропневмотранспортних систем і комплексів, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, VPTepliy@nas.gov.ua

**Холявченко Леонід Тимофійович**, кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник у відділі проблем руйнування гірських порід, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, dsl77@ua.fm

**Шнякін Сергій Володимирович**, магістр, провідний інженер у відділі вібропневмотранспортних систем і комплексів, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), м. Дніпро, Україна, e-mail: SVShnyakin@nas.gov.ua

**Анотація.** Метою роботи є розробка математичної моделі розрахунку газодинамічних характеристик (тиск, густина, швидкість руху) теплоносія при його русі вздовж поверхні свердловини в процесі її термічного розширення. Для цього розроблено методику та алгоритм розрахунку газодинамічних характеристик вільної та напівобмеженої струмини теплоносія при його русі вздовж поверхні свердловини. Наведено переваги використання термоінструментів з дуговим електричним розрядом в порівнянні з іншими способами термічного руйнування гірських порід, а також низку особливостей математичного опису аналітичних методів розв'язання задач термічного руйнування гірських порід. Результати експериментального дослідження підтверджують адекватність розробленої інженерної моделі. Відносна похибка розрахунку газодинамічних характеристик теплоносія вздовж внутрішньої бічної поверхні наскрізного каналу, тобто вздовж поверхні свердловини, є цілком прийнятною для такого класу задач. Отримані результати можуть бути використані для моделювання газодинамічних характеристик при застосуванні термоінструмента з дуговим електричним розрядом в інших технологіях термічної обробки та руйнування матеріалів.

**Ключові слова:** математична модель, термічне розширення, свердловина, теплоносій, газодинамічні характеристики.

**Аннотация.** Целью работы является разработка математической модели расчета газодинамических характеристик (давление, плотность, скорость движения) теплоносителя при его движении вдоль поверхности скважины в процессе ее термического расширения. Для этого разработана методика и алгоритм расчета газодинамических характеристик свободной и полуограниченной струи теплоносителя при его движении вдоль поверхности скважины. Приведены преимущества использования термоинструментов с дуговым электрическим разрядом по сравнению с другими способами термического разрушения горных пород, а также ряд особенностей математического описания аналитических методов решения задач термического разрушения горных пород. Результаты экспериментального исследования подтверждают адекватность разработанной инженерной модели. Относительная погрешность расчета газодинамических характеристик теплоносителя вдоль внутренней боковой поверхности сквозного канала, т.е. вдоль поверхности скважины, является вполне приемлемой для такого класса задач. Полученные результаты могут быть использованы для моделирования газодинамических характеристик при применении термоинструмента с дуговым электрическим разрядом в других технологиях термической обработки и разрушения материалов.

**Ключевые слова:** математическая модель, термическое расширение, скважина, теплоноситель, газодинамические характеристики.

*Статья поступила в редакцию 18.11.2017*

*Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук К.К. Софийским*