

Т. В. ДОНИК, О. О. САФРОНОВА, М. Н. ПАРАШАР

ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ГТ-МГР З ГВИНТОВИМИ ЗАКРУЧЕНИМИ ТРУБНИМИ ПУЧКАМИ

Розглянуто високотемпературний парогенератор ядерної енергетичної установки ГТ-МГР з використанням гелію в якості первинного теплоносія для виробництва електроенергії та водню. Розроблена математична модель для теплового розрахунку високотемпературного парогенератора з гвинтовими закрученими трубними пучками, завдяки якій було реалізовано п'ять різних методів розрахунку теплообміну при кипінні у вертикальній трубі, заснованих на експериментальних кореляційних залежностях та проведено оцінку залежності коефіцієнтів тепловіддачі двофазного потоку від величини масового витратного паровмісту.

Ключові слова: ядерна енергетична установка, високотемпературний парогенератор, трубний пучок, тепловий розрахунок.

Т. В. ДОНИК, О. О. САФРОНОВА, М. Н. ПАРАШАР

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ГТ-МГР С ВИНТОВЫМИ ЗАКРУЧЕННЫМИ ТРУБНЫМИ ПУЧКАМИ

Рассмотрен высокотемпературный парогенератор ядерной энергетической установки ГТ-МГР с использованием гелия в качестве первичного теплоносителя для производства электроэнергии и водорода. Разработана математическая модель для теплового расчета высокотемпературного парогенератора с винтовыми закрученными трубными пучками, благодаря которой было реализовано пять различных методов расчета теплообмена при кипении в вертикальной трубе, основанных на экспериментальных корреляционных зависимостях и проведена оценка зависимости коэффициентов теплоотдачи двухфазного потока от величины массового расходного паросодержания.

Ключевые слова: ядерная энергетическая установка, высокотемпературный парогенератор, трубный пучок, тепловой расчет.

T. DONYK, O. SAFRONOVA, M. PARASHAR

THERMAL DESIGN OF THE HIGH-TEMPERATURE STEAM GENERATOR FOR THE NUCLEAR POWER PLANT GT-MGR WITH HELICAL (COIL-IN-BOX) PIPE BUNDLES

This scientific paper is devoted to a thermal design of the high-temperature steam generator for the nuclear power plant GT-MGR of the fourth generation using helium as a primary heat carrier for the production of electric energy and hydrogen. The steam generator in question consists of the shell in the form of secondary circuit with the tube bundle of a small size as a secondary circuit with helical (coil-in-box) pipes that are arranged inside the shell in the form of tubular cylinders connected in parallel. A mathematical model of the steam generator for the NPP was constructed to give consideration to the boiling liquid flow in the vertical channel of an arbitrary shape with the heating along the entire length. The developed mathematical model allowed us to realize five different methods for the computation of heat exchange during the boiling in the vertical tube that are based on experimental correlation relationships. The obtained results showed that a peculiar maximum of the value of heat transfer coefficient for the two-phase flow exists when the methods of Chen and Gungor-Winterton are used. The behavior patterns of heat-transfer coefficients for the two-phase flow as a function of the value of mass consumed steam content were compared for the five different methods of the computation of heat exchange in the boiling liquid. The analysis showed that the average value of heat transfer coefficients for the two-phase flow at $0.2 < x < 0.8$, is in the range of 827500...37500 for all the methods in question except for the Steiner-Taborque method. A critical value of the mass consumed steam content was defined using Bias correlations.

Key words: nuclear power plant, high temperature steam generator, tubular bundle, thermal design.

Вступ

В час постійного зростання цін на паливні ресурси і скорочення їх запасів одним із шляхів вирішення енергетичних проблем людства є активний розвиток ядерної енергетики та пошук альтернативного палива. В якості останнього широко використовується водень, одним із способів отримання якого є розкладання молекули води, що потребує великі об'єми енергії.

На сьогодні єдиною ядерною технологією, здатною найбільш повно вирішити задачу витіснення органічного палива з промислового електро-, теплопостачання та виробництво водню є високотемпературні модульні гелієві реактори [1]. Особлива увага приділяється концепції ВТГР –

високотемпературного газоохолоджувального реактора, яка лягла в основу міжнародного проекту «ГТ-МГР» – «Газова турбіна – модульний гелієвий реактор», що призначений для виробництва електроенергії і перегрітої пари необхідних параметрів з метою отримання водню методом високотемпературного електролізу [2].

В даний час розробляються перспективні проекти створення газоохолоджувальних ядерних енергетичних установок четвертого покоління, які можуть розглядатися не тільки як установки для виробництва теплової та електричної енергії, а також в якості виробників високотемпературної пари для потреб хімічних технологій і водневої енергетики.

Так в газоохолоджувальних ЯЕУ виробництво

© Т. В. Доник, О. О. Сафронова, М. Н. Парашар, 2018

пари для виробництва водню методом високотемпературного електролізу пари здійснюється у високотемпературних парогенераторах. В парогенераторах виробляється високотемпературна перегріта пара з використанням відведеної теплоти від активної зони реактора охолоджуючого середовища першого контуру омиваючої поверхні нагрівання парогенератора. Основними вимогами до парогенераторів АЕС є: забезпечення необхідної паропродуктивності та заданих параметрів пари при будь-яких режимах роботи установки; одинична потужність парогенератора повинна бути максимально можливою при заданих проектних умовах; всі елементи парогенератора повинні володіти безумовною надійністю і безпекою; з'єднання елементів і деталей парогенератора повинні забезпечувати необхідну щільність, яка виключає можливість перетоків з одного контуру в інший; повинна вироблятися пара необхідної чистоти, що дозволить забезпечити надійність роботи високотемпературних пароперегрівачів; простота і компактність конструкції елементів парогенератора, що забезпечує зручність монтажу та обслуговування, можливість виявлення і ліквідації пошкоджень, можливість повного дренажування; схема і конструкція парогенератора повинні забезпечувати високі техніко-економічні показники.

У зв'язку з цим, розробка наукових основ проектування високоекономічних і надійних високотемпературних парогенераторів, що мають високі теплогідрравлічні характеристики, компактність, надійність і низьку металоємність конструкції є актуальною задачею теплоенергетики.

Мета досліджень

Метою даної роботи є розробка математичної моделі високотемпературного парогенератора ЯЕУ з використанням гелію в якості первинного теплоносія та проведення оцінки залежності коефіцієнтів тепловіддачі двофазного потоку від величини масового витратного паровмісту в парогенераторі.

Матеріали та методика досліджень

Парогенератор представляє собою теплообмінний апарат для виробництва водяної пари з тиском вище атмосферного за рахунок теплоти первинного теплоносія, що надходить з ядерного реактора.

Розглядається парогенератор для гелієвої реакторної установки четвертого покоління, який представляє собою корпус первинного контуру з розміщеним в ньому пакетом труб невеликого діаметра (2–4 см) в якості вторинного контуру, а саме гвинтовими закрученими (змівиковими) трубами, розміщеними в корпусі у вигляді ряду паралельно з'єднаних трубних циліндрів [3].

Типова конструктивна схема парогенератора ЯЕУ представлена на рис. 1а.

Як видно, парогенератор складається з економайзера, в якому відбувається підігрів води до температури насичення; випарника, в якому здійснюється процес повного випаровування води; перегрівача (або попереднього пароперегрівача); кінцевого пароперегрівача, в якому відбувається нагрівання пари до її максимальної температури.

Таким чином парогенератор складається з чотирьох умовних теплообмінників, в яких в якості первинного (гарячого) теплоносія використовується гелій, а в якості вторинного теплоносія в економайзері використовується вода, в випарнику – двофазний потік води і вологої пари, і в попередньому і кінцевому пароперегрівачах – сухий пар.

У загальному випадку спрощена розрахункова схема парогенератора може бути представлена у вигляді з'єднаних послідовно чотирьох окремих теплообмінних модулів (рис. 2б) з протиточною схемою руху теплоносіїв, в яких вторинний теплоносіє перебуває в різних фазових станах і реалізуються різні умови процесу теплопередачі. Кожен з розглянутих теплообмінних модулів в свою чергу розбивається на $i=1...N$ теплообмінних елементів, які складаються з $j=1...N_{тр}$ паралельно з'єднаних між собою гвинтових закручених труб. У кожному елементарному теплообмінному елементі приймається протиточна схема руху.

Для моделювання парогенератора ЯЕУ розглядається течія киплячої рідини в вертикальному каналі довільної форми, в якому нагрів відбувається по всій довжині. По мірі руху рідини в каналі в ній утворюється все більша і більша кількість пари через безперервне підведення теплоти по висоті каналу. В результаті режим течії поступово переходить від режиму емульсійної (бульбашкової) течії до пробкової течії і, нарешті, до стержневого режиму течії. Зрештою, рідка плівка на поверхні випаровується і встановлюється дисперсний режим течії («туман»). Після випаровування всіх дисперсних крапель рідини в потоці встановлюється режим однофазної течії парової фази.

Вимоги дослідних і проектно-конструкторських розробок перспективних ЯЕУ з газоохолоджувальними реакторами в даний час зумовили необхідність застосування методів комп'ютерного моделювання та аналізу процесів в парогенераторах з урахуванням різних конструктивних і технологічних обмежень [2, 4]. Таким чином, для моделювання парогенератора ЯЕУ розглядається течія киплячої рідини в вертикальному каналі довільної форми, в якому нагрів відбувається по всій довжині.

Результати дослідження

У даній роботі була розроблена математична модель, завдяки якій було реалізовано п'ять різних методів розрахунку теплообміну при кипінні у вертикальній трубі, заснованих на експериментальних кореляційних залежностях [5–9].

Теплопередача в елементарному трубчастому теплообмінному елементі з урахуванням зміни теплофізичних властивостей по довжині теплообмінника описується для кожної труби трубного пучка рівнянням для теплового потоку через циліндричну стінку при граничних умовах третього роду:

$$Q_i = K_i l_{\text{тр}_i} \Delta T_{\text{ср}_i} = \frac{\pi l_{\text{тр}_i} \Delta \bar{T}_{\text{lg}_i}}{\frac{1}{\alpha_{\text{r}_i} d_{\text{зовн}}} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_{\text{зовн}}}{d_{\text{вн}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{x}_i} d_{\text{вн}}}}$$

де K_i – локальний лінійний коефіцієнт теплопередачі;

$\Delta \bar{T}_{\text{lg}_i}$ – локальне значення середньологарифмічного температурного напору;

$\alpha_{\text{r}_i}, \alpha_{\text{x}_i}$ – коефіцієнти тепловіддачі зі сторони гарячого і холодного теплоносій;

$d_{\text{зовн}}, d_{\text{вн}}$ – зовнішній і внутрішній діаметр труби;

$l_{\text{тр}_i}$ – довжина ділянки труби.

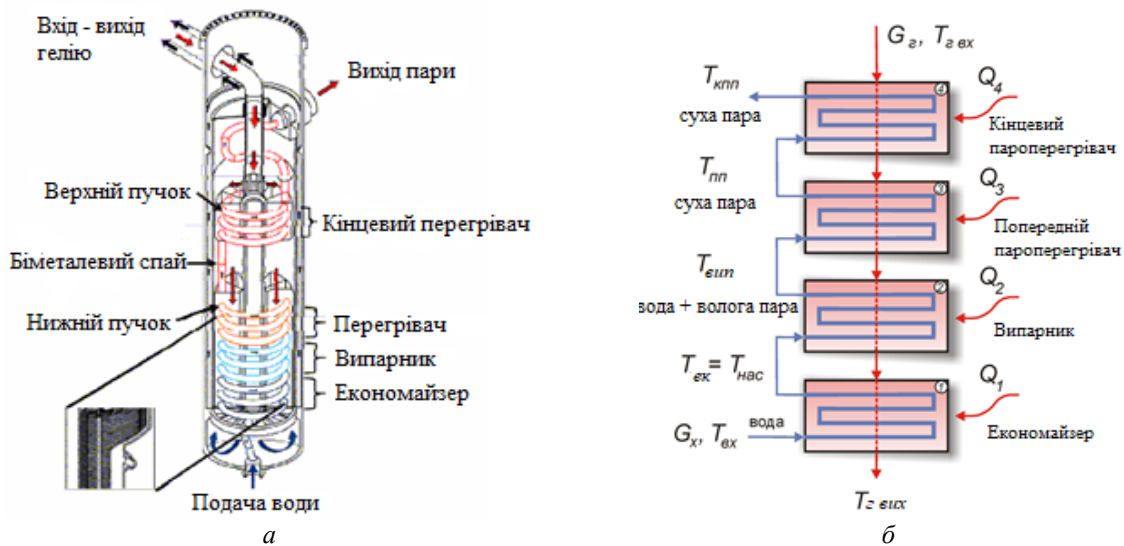


Рис. 1 – Схеми парогенератора з гвинтовими закрученими трубами: а – типова конструктивна; б – розрахункова

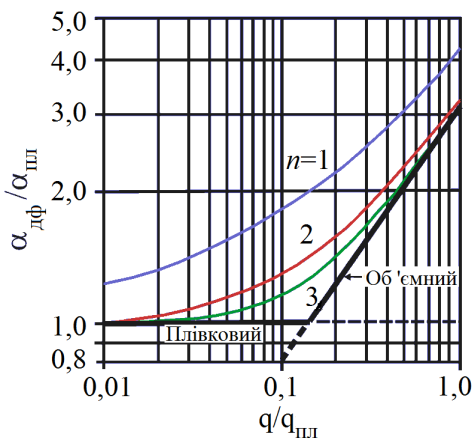


Рис. 2 – Залежність відносного коефіцієнта тепловіддачі для двофазного потоку від відносного питомого теплового потоку

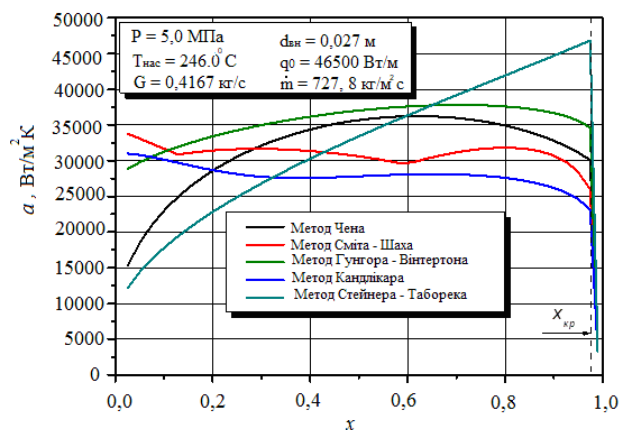


Рис. 3 – Залежності коефіцієнтів тепловіддачі двофазного потоку від величини масового витратного паровмісту

Коефіцієнти тепловіддачі з гарячого і холодною боку в елементарному мікротеплообміннику визначаються за відомими значеннями чисел Нуссельта з виразів:

$$\alpha_{gi} = \frac{Nu_{gi} \lambda_{gi}}{d_{зовн}}, \quad \alpha_{xi} = \frac{Nu_{xi} \lambda_{xi}}{d_{вн}}$$

Коефіцієнт тепловіддачі під час руху киплячої рідини (двофазного потоку) в каналі прийнято представляти у вигляді такої узагальненої асимптотичної залежності:

$$\alpha_{дф} = \left[(\alpha_6)^n + (\alpha_{пл})^n \right]^{1/n},$$

де $\alpha_{дф}$ – коефіцієнт тепловіддачі двофазного потоку;

α_6 – коефіцієнт тепловіддачі бульбашкового кипіння;

$\alpha_{пл}$ – коефіцієнт тепловіддачі плівкового кипіння;

n – показник степені.

На рис. 2 представлена залежність відносного коефіцієнта тепловіддачі для двофазного потоку від величини відносного питомого теплового потоку. З рисунка видно, що з ростом теплового потоку, що підводиться, внесок механізму бульбашкового кипіння на величину коефіцієнта тепловіддачі зростає і при повністю бульбашковому режимі кипіння значення коефіцієнта тепловіддачі виявляється в 3,2...4,5 рази більше, ніж при плівковому кипінні.

Представлені коефіцієнти тепловіддачі в залежності від взаємного розташування труб в пучку визначаються з експериментальних кореляційних залежностей [5–9].

У табл. 1 представлені значення параметрів двофазного потоку і діапазони діаметрів труб для яких були отримані кореляційні залежності для п'яти різних методів розрахунку теплообміну при кипінні рідини: x – масовий витратний паровміст; w – швидкість потоку; \dot{m} – масова швидкість двофазного потоку; q – тепловий потік; $d_{вн}$ – внутрішній діаметр труб.

З аналізу даних табл. 1 можна зробити висновок, що методи Чена і Шаха коректно застосовні до значень масового витратного паровмісту 0,7, а методи Стейнера-Таборека, Кандлікара і Гунгор-Вінтертона справедливі у всьому діапазоні зміни

значень x (коефіцієнт масового витратного паровмісту). Причому розрахункові значення коефіцієнтів тепловіддачі в області високих значень масового витратного паровмісту мають максимальні значення в порівнянні з іншими методами розрахунку.

На рис. 3 представлено порівняння характеру протікання залежностей коефіцієнтів тепловіддачі двофазного потоку (α) від величини масового витратного паровмісту (x) для п'яти різних методів розрахунку теплообміну при кипінні рідини за заданими параметрами тиску P , температури насичення $T_{нас}$, масової витрати G , внутрішнього діаметру труб $d_{вн}$, питомого теплового потоку q_0 , масової швидкості двофазного потоку \dot{m} . Критичне значення масового витратного паровмісту при цьому визначалося з використанням кореляцій Біази [11].

Подальші дослідження будуть направлені на моделювання теплофізичних властивостей теплоносіїв, на вивчення гідравлічних втрат в трактах парогенератора, а також на розрахунок елементарного теплообмінного елементу.

Висновки

1. Найбільш коректне з фізичної точки зору є протікання залежностей $\alpha_{дф} = f(x)$ отриманих з використанням методів Чена і Гунгор-Вінтертона (існує характерний максимум значення коефіцієнта тепловіддачі двофазного потоку при $x = 0,6...0,7$).

2. Найменш фізично коректним для обраних режимних та геометричних параметрів видається протікання залежності отриманої з використанням методу Стейнера-Таборека.

3. Найменші значення коефіцієнтів тепловіддачі двофазного потоку мають місце при використанні методу Кандлікара.

4. Середні значення коефіцієнтів тепловіддачі двофазного потоку для $0,2 < x < 0,8$ знаходяться в діапазоні 27500...37500 для всіх розглянутих методів (за винятком методу Стейнера-Таборека).

Таблиця 1 – Параметри двофазного потоку

№ пп	Метод розрахунку теплообміну при кипінні	Тиск, МПа	x	w , м/с	\dot{m} , кг/м ² с	q , Вт/см ²	$d_{вн}$, мм
1	Чен (1980) [5]	0,55...3,5	0,01...0,71	0,06...4,5	—	0,6...240	—
2	Сміт-Шах (1982) [6]	—	0...0,7	—	—	9,0...122	5...16
3	Стейнер-Таборека (1992) [7]	0,01...10,8	0...1,0	—	4...4850	0,08...460	1...32
4	Кандлікар (1990, 1991) [8, 9]	—	0...0,98	—	13...8179	0,03...228	4,6...32
5	Гунгор-Вінтертон (1986) [10]	—	0...1,0	—	67...61518	0,11...228	2,95...32

Список літератури

1. Халатов А. А., Северин С. Д., Доник Т. В. Влияние КПД элементов блока преобразования энергии на эффективность цикла модульной ЯЭУ с газохладаемым гелиевым реактором. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ», 2015. № 16(1125). С. 19–25. Бібліогр.: 4 назв. ISSN 2078-774X.
2. Радченко Р. В., Мокрушин А. С., Тюльпа В. В. *Водород в енергетиці*. Екатеринбург: Урал. ун-та, 2014. 229 с.
3. Oh C. H., Kim E.S. Heat Exchanger Design Options and Tritium Transport Study for the VHTR Systems. *Report INL/EXT-08-14700*. 2008. pp. 131–136.
4. Hoffer N. V., Sabharwall P., Anderson N. A. Modeling a Helical-coil Steam Generator in RELAP5-3D for the Next Generation Nuclear Plant. *Report INL/EXT-10-19621*. 2011. pp. 4–14.
5. Chen J. C. Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow. *Industrial Engineering Chemical Process Design and Development*. 1966. Vol. 5, No. 3, pp. 322–339.
6. Shah M. M. Chart correlations for saturated boiling heat transfer: Equations and further study. *ASHRAE Transactions*. 1982. Vol. 88, Part 1, pp. 185–196.
7. Steiner D., Taborek J. Flow boiling heat transfer in vertical tubes correlated by an asymptotic model. *Heat Transfer Engineering*. 1992. Vol. 13, No. 2.
8. Kandlikar S. G. A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes. *J. Heat Transfer*. 1990. Vol. 112. pp. 219–228.
9. Kandlikar S. G. A model for correlating flow boiling heat transfer in augmented tubes and compact evaporators. *J. Heat Transfer*. 1991. Vol. 113. pp. 966–972.
10. *Справочник по теплообменникам* : в 2-х т.: пер. с англ. / Под ред. Б. С. Петухова и В. К. Шикова. Москва: Энергоатомиздат, 1987. Т. 1. 560 с.; Т. 2. 352 с.
11. Исаченко В. П. *Теплопередача* : учеб. для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. Москва: Энергия, 1975. 488 с.

References (transliterated)

1. Khalatov A. A., Severin S. D., Donyk T. V. (2015), "Influence of the Efficiency Factor of Energy Conversion Block Elements on the Cycle Efficiency of the Modular Nuclear Power Plant (NPP) Equipped with the Gas Cooled Helium Reactor", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 16(1125), pp. 19–25, ISSN 2078-774X.
2. Radchenko R. V., Mokrushin A. S. and Tyul'pa V. V. (2014), *Vodorod v energetike* [Hydrogen in power engineering], Ural. un-ta, Yekaterinburg, 229 p.
3. Oh C. H. and Kim E. S. (2008), "Heat Exchanger Design Options and Tritium Transport Study for the VHTR Systems", *Report INL/EXT-08-14700*, pp. 131–136.
4. Hoffer N. V., Sabharwall P. and Anderson N. A. (2011), "Modeling a Helical-coil Steam Generator in RELAP5-3D for the Next Generation Nuclear Plant", *Report INL/EXT-10-19621*, pp. 4–14.
5. Chen J. C. (1966), "Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow", *Industrial Engineering Chemical Process Design and Development*, vol. 5, no. 3, pp. 322–339.
6. Shah M. M. (1982), "Chart correlations for saturated boiling heat transfer: Equations and further study", *ASHRAE Transactions*, vol. 88, part 1, pp. 185–196.
7. Steiner D. and Taborek J. (1992), "Flow boiling heat transfer in vertical tubes correlated by an asymptotic model", *Heat Transfer Engineering*, vol. 13, No. 2.
8. Kandlikar S. G. (1990), "A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes", *J. Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 219–228.
9. Kandlikar, S. G. (1991), "A model for correlating flow boiling heat transfer in augmented tubes and compact evaporators", *J. Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 966–972.
10. Petukhova B. S. and Shikova V. K. (1987), *Spravochnik po teploobmennikam* [Handbook of heat exchangers.], Energoatomizdat, Moscow, Vol. 1, 560 p.; Vol. 2, 352 p.
11. Isachenko V.P. (1975), *Teplotperedacha* [Heat transfer. Textbook for high schools], Izd. 3-ye, pererab. i dop. Energiya, Moscow, 488 p.

Надійшла (received) 03.02.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Доник Тетяна Василівна (Доник Татьяна Васильевна, Donyk Tetiana) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший викладач, Інститут технічної теплофізики НАН України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; м. Київ, Україна; e-mail: doniktv@ukr.net.

Сафронова Олена Олегівна (Сафронова Елена Олеговна, Safronova Olena) – студентка, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; м. Київ, Україна; e-mail: e.o.safronova@gmail.com.

Парашар Майанкіта Назендер (Парашар Майанкита Назендер, Parashar Maiankita) – студентка, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; м. Київ, Україна; e-mail: mayankitajess@gmail.com.