

Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 1. С. 41–47
Thermal processes in engineering, 2026, vol. 18, no. 1, pp. 41–47

Научная статья
УДК 66.045.123
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187469>
EDN: <https://www.elibrary.ru/OKNETV>

Экспериментальное исследование свойств нанографенового теплоносителя на процессы теплообмена в каналах устройств

М.А. Трофимов^{1✉}, А.А. Сатаев²

^{1,2}ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Российская Федерация

¹Travl24@yandex.ru[✉]

Аннотация. В статье приведены модели, условия, методика проведения экспериментов с графено-водным теплоносителем, направленных на определение возможной интенсификации теплообменных процессов. Графеновая составляющая представляет собой наножидкость (водный раствор, содержащий частицы графена с характерным размером 0,1–100 нм) диспергированную в дистиллированной воде. Использование данного вида теплоносителя возможно в широком диапазоне отраслей и теплообменных аппаратов, благодаря размеру частиц, а также теплофизическим свойствам материала.

В данном исследовании приведены результаты экспериментов, проводимых с упомянутым выше типом теплоносителя. Производится сравнение результатов испытаний на «чистой» воде и графено-водной смеси. По результатам экспериментов получена максимальная прибавка к интенсивности теплообмена порядка 20 %.

Ключевые слова: интенсификация теплообмена, графен, изменение коэффициента теплоотдачи, теплообменные аппараты, противоточные теплообменники, прямоточные теплообменники, наножидкость, графено-водный теплоноситель, одноатомный слой графена, эффективная концентрация графена

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность компании ООО «Русграфен» за предоставленный графеновый материал.

Для цитирования. Трофимов М.А., Сатаев А.А. Экспериментальное исследование свойств нанографенового теплоносителя на процессы теплообмена в каналах устройств // Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 1. С. 41–47. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187469>

Original article

Experimental determination of the effect of the addition of graphene nanofluid to the coolant on heat exchange processes

M.A. Trofimov¹, A.A. Sataev²

^{1,2}Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseeva, Nizhny Novgorod, Russian Federation

¹Travl24@yandex.ru

Abstract. The article presents models, conditions, and methods of conducting experiments with graphene-aqueous coolant aimed at determining the possible intensification of heat exchange processes. At the moment, the introduction of additives into the coolant is a promising direction. Experiments with various substances. Oxides of copper (II), aluminum, graphite tubes and graphene are used as additives, which are studied by the authors in this work. The graphene component is a nanofluid (an aqueous solution containing graphene particles with a characteristic size of 0,1–100 nm) dispersed in distilled water. The use of this type of coolant is possible in a wide range of industries and heat exchangers, due to the particle size, as well as the thermal and physical properties of the material. However, graphene's efficiency is not absolute. This additive behaves most effectively provided that the nanoparticles cover the surface in a single atomic layer, therefore, it is necessary to control this fact. In the study, the condition was controlled by ensuring the required concentration of nanofluid in the coolant.

This study presents the results of experiments conducted with the type of coolant mentioned above. The results of the tests on “pure” water and graphene-water mixture are compared. According to the experimental results, a maximum increase in heat exchange intensity of about 20 % was obtained.

Keywords: intensification of heat transfer, graphene, change of heat transfer coefficient, heat exchangers, countercurrent heat exchangers, direct-flow heat exchangers, nanofluid, graphene-aqueous coolant monatomic graphene layer, effective graphene concentration

Acknowledgements. The team of authors expresses its gratitude to rusGraphene LLC for the graphene material provided.

For citation. Trofimov M.A., Sataev A.A. Experimental determination of the effect of the addition of graphene nanofluid to the coolant on heat exchange processes. *Thermal processes in engineering*. 2026, vol. 18, no. 1, pp. 41–47. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187469>

Введение

В настоящее время теплообменные аппараты широко используются в повседневной жизни, промышленности, энергетике. В зависимости от условий эксплуатации теплообменники различаются по конструкции, используемому теплоносителю и свойствам. Методика расчета данных устройств сводится к составлению уравнения теплового баланса (1) [1, 2].

$$Q_{\text{гор}} = Q_{\text{хол}} \quad (1)$$

В качестве исходных для расчета данных необходимо задать условия эксплуатации теплооб-

менника, возможные типы рабочих сред и уровни температур на входе и выходе аппарата. В процессе расчета выбирается оптимальная рабочая схема аппарата, его габариты, тепловая нагрузка и ресурс работы. При этом с целью повышения КПД устройства возникает необходимость оптимизации комплекса термо-газодинамических и теплообменных процессов, определяющих механизм его работы.

Для большинства типов аппаратов в настоящее время получены зависимости для определения оптимальных размеров, тепловой нагрузки и ресурса работы теплообменников. Предложены также рекомендации по выбору теплоносителя

для различных по назначению схем аппаратов. В большинстве типов теплообменных аппаратов в качестве рабочего тела используются различные жидкости, чаще всего вода в связи с высокими значениями ее физических и теплофизических свойств. Однако интенсивные условия эксплуатации теплообменников в ряде современных изделий требуют вместо водяного применять теплоносители с более высокими свойствами. Для разработки таких теплоносителей проводятся научные исследования с использованием современных технологий. Анализ алгоритма проведения таких исследований и полученных результатов является предметом данной статьи.

Обоснование использования в качестве охладителя наножидкости

Интенсификация процессов теплообмена в разных устройствах - одна из важнейших задач современной энергетики. Одним из возможных путей решения данной проблемы является использование наножидкостей в качестве теплоносителя. Наножидкости обладают высоким коэффициентом теплопроводности. По определению, наножидкость – это жидкость, в которую диспергированы частицы химически устойчивых металлов и/или оксидов, например, частицы в виде: углеродных нанотрубок, графен и другие материалы размером от 1 до 100 нм. В качестве базовой жидкости используются: дистиллированная вода, этиленгликоль, масла, спирты и т. п. В качестве суспензии наножидкостей чаще всего используют: алюминий, медь, серебро, титан, цинк, магний, углеродные нанотрубки, графен, алмазные частицы. Спектр исследований в области применения наножидкостей в теплообменниках весьма широк. Результаты таких исследований указывают на то, что применение нанотеплоносителей могут значительно повысить эффективность теплообменных систем. Однако, ключевой проблемой, требующей постановки таких исследований, является разработка методов и средств получения таких перспективных теплоносителей.

В настоящее время выявлены два метода получения наножидкостей – одностадийный и двухстадийный.

В первом способе, наночастицы непосредственно производятся и распределяются в базовой жидкости в ходе одного технологического

цикла: химических реакций или фазового перехода – испарения в жидкости.

Во втором случае (первая стадия) получают наночастицы, затем их вводят в базовую жидкость. Затем (вторая стадия) полученную таким образом смесь подвергают разным способам диспергирования.

Установлено, что наиболее эффективными наночастицами в плане получения наножидкостей с заданными свойствами, являются частицы графена. Графен был открыт российскими учеными в 2004 году. Однако, открытие не находило массового применения в изделиях промышленности в связи со сложностью технологического процесса и его высокой цены получения наночастиц графена. Тем не менее в России, в результате проведения научных изысканий, разработаны оптимальные технологии как получения наночастиц графена, так и графеновых наножидкостей.

В работе [3] показано, что применение наножидкостей в теплоэнергетике является весьма перспективным поскольку значительно (в несколько раз) повышает эффективность теплообменных аппаратов, например, аппаратов с колебательной циркуляцией теплоносителя.

В работе [4] проведено исследование процессов теплообмена при использовании в двухтрубном теплообменнике наножидкости вода–оксид алюминия (Al_2O_3). Установлено, что использование в аппарате указанной наножидкости коэффициент теплоотдачи на длине внешней трубки увеличился на 94 % и 253 %. А на длине внутренней трубки для потока горячей жидкости на 308 % и 144 %.

Установлено так же, что падение давления на длине трубок изменяется незначительно.

В работе [5] проведены экспериментальные исследования по выявлению влияния объемной концентрации наночастиц оксида меди (CuO) и рабочих температур на процессы теплообмена, реализуемые в компактном теплообменнике. Показано, что добавление в воду наночастиц CuO размером 40 нм и изменением массовой концентрации от 2 % до 6 % увеличивает коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи на 17,3 % и 40 %, соответственно.

В работе [6] показано, что даже при низких концентрациях наночастиц графена, образованная таким образом наножидкость значительно

(на 20–40 %) увеличивает коэффициенты теплообмена, в сравнении с базовой жидкостью (вода). При этом вязкость теплоносителя не изменяется.

Полученные в указанных работах результаты подтверждены исследованиями с использованием ротационного вискозиметра, проведенными авторами данной статьи.

В работе [6] приведены так же данные исследований характеристик наножидкостей, содержащих наночастицы графена в смеси воды и этиленгликоля. Установлено, что оба образца наножидкости с концентрациями по объему 0,15 % и 0,10 % имеют повышенные в среднем на 21 % и 26 %, соответственно, коэффициенты теплоотдачи по сравнению с базовой жидкостью.

В работе [7] при одной и той же скорости движения теплоносителя коэффициент теплопроводности наножидкости увеличился с 0,715 Вт/м×К до 0,85 Вт/м×К. При этом коэффициент теплоотдачи увеличился на 22 %.

Показано, что наличие наночастиц мультиграфена в суспензии с коэффициентом теплопроводности 0,85 Вт/м×К, привело к увеличению интенсивности теплоотдачи на 30 % по сравнению с базовой жидкостью.

Полученные экспериментальные данные обработаны с использованием теории подобия. В результате, авторы работы получили критериальные соотношения расчета теплоотдачи в каналах для турбулентного режима течения суспензий, (жидкость – твердые частицы).

В настоящей статье авторами исследовано влияние на теплофизические свойства нанотеплоносителя добавление водяной теплоноситель графеновых наночастиц с массовой долей 5 %, диспергированные в теплоноситель с концентрацией частиц до 0,13 %.

Установлено, что нанографен наиболее эффективен, когда на поверхности стенки канала сформировался его атомарный слой. Это условие реализуется если в суспензии установилась определенная концентрация наночастиц. Кроме того, необходимо организовать процесс перемешивания нанотеплоносителя в резервуаре.

Экспериментальный стенд. Описание

Стенд, на котором проводились серии экспериментов представляет собой теплообменник по типу «труба в трубе». По внутренней трубе, выполненной из меди, протекает горячий теплоно-

ситель, содержащий добавку частиц нанографена. По кольцевому зазору протекает холодная вода. В качестве базового теплоносителя использовалась техническая вода. С целью обеспечения создания атомарного слоя нанографена на поверхности стенки его массовая концентрация в теплоносителе составляла 0,13 % [8, 9].

Горячий контур содержит бак-резервуар, в котором происходит перемешивание нанографеновой добавки, а также нагревание теплоносителя.

Горячий поток подается в теплообменник центробежным насосом и далее и возвращается обратно в резервуар.

Холодный теплоноситель поступает из водопровода технической воды, его температура измеряется термометрами, установленными в нескольких точках теплообменника, затем отводится в дренажную систему.

Датчики, фиксирующие температуру горячего потока, установлены на входе и выходе из теплообменника во внутренней медной трубе.

Датчики, фиксирующие температуру холодного потока, установлены на входе и выходе теплообменника как в его кольцевой, так и промежуточной областях. В качестве датчиков использовались платиновые терморезисторы марки РТ-100 класса Б. Точность измерения температуры в интервале до 200 °С составляла $\pm 0,3$ °С.

Термосенсоры на входах и выходах потоков расположены в центре (ядре) потоков. Изменение температуры в пограничном слое учитывались расчетом.

Промежуточные датчики внедрены также в кольцевую область на некотором расстоянии от медной) трубы.

Датчики, расположенные на холодной ветке, внедрены в патрубки, положение которых перпендикулярно теплообменнику, на некотором расстоянии с целью усреднения температуры потока по поперечному сечению труб.

Таблица 1. Геометрические характеристики теплообменника

Внутренний диаметр «внешней» трубы, мм	49,5
Внутренний диаметр трубы, мм	11
Толщина стенки «внутренней» трубы, мм	1,35
Длина теплообменного участка, мм	1005
Внутренний диаметр подвода и отвода межтрубного потока, мм	16,5

Таблица 2. Основные расчетные параметры теплообменника

Расход теплоносителя во внутренней трубке, л/мин	10; 5
Расход теплоносителя в межтрубном пространстве, л/мин	10
Температура горячего потока на входе в теплообменник, °С	60
Значения числа Рейнольдса, используемые в расчетах	$1,0 \times 10^4 - 4,1 \times 10^4$



Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда



Рис. 2. Фото графено-водного теплоносителя

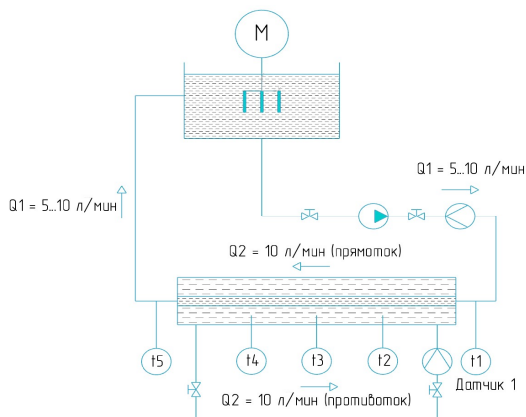


Рис. 3. Схема теплообменного контура (по схеме противоток)

В связи с вертикальным расположением стенда, при проведении экспериментов учтена разность высот, поэтому при прямотоке гибкий шланг, отводящий теплоноситель из теплообменного аппарата, расположен на одном уровне со шлангом подвода. Для уменьшения вероятности промахов и повышения степени объективности результатов каждая серия экспериментов проводилась несколько раз и затем данные усреднялись.

Математическая модель расчета

Расчет коэффициента теплоотдачи в каналах теплообменника проводился с использованием критериальных соотношений и эмпирических зависимостей.

Критерии Рейнольдса и Нуссельта рассчитывались по соотношениям (2) и (3).

$$Re(Q, d, \nu) = \frac{4 \times Q}{\pi \times d \times \nu}, \quad (2)$$

$$Nu = 0,021 \times Re^{0,8} \times Pr^{0,43}, \quad (3)$$

$$y(x) = y_0 \times \frac{x - x_1}{x_0 - x_1} + y_1 \times \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}, \quad (4)$$

где Q – объемный расход, d – диаметр поперечного сечения трубы, ν – кинематическая вязкость.

Критерий Прандтля определялся с использованием полинома Лагранжа (4). Аналогично вычислялись: кинематическая вязкость, теплопроводность меди, теплоемкость воды.

Критериальное уравнение для коэффициента теплоотдачи от потока жидкости к внутренней стенке трубы:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \times \lambda(t_1)}{l}. \quad (5)$$

Уравнение расчета плотности теплового потока в стенку.

$$q_s = \frac{Q \times \rho \times \Delta t \times C_p}{2\pi \times r \times l}, \quad (6)$$

где ρ – плотность горячего теплоносителя, C_p – теплоемкость воды, r – радиус поперечного сечения горячего потока, l – длина теплообменного участка.

Соотношения расчета температур стенок:

А) внутренней:

$$t_{\text{внут}} = -\frac{q_s}{\alpha_1} + t_1; \quad (7)$$

Б) внешней:

$$t_{\text{внеш}} = \frac{-q_s \times \ln\left(\frac{d_{\text{внеш}}}{d_{\text{внут}}}\right) \times d_{\text{внеш}}}{2 \times \lambda(t_1)} + t_{\text{внут}} \quad (8)$$

Расчет коэффициента теплоотдачи от горячей трубки к потоку межтрубного пространства определяется по формуле Ньютона–Рихмана:

$$\alpha_2 = \frac{q_s}{(t_{\text{внеш}} - t_2)}, \quad (9)$$

где t_2 – температура охлаждающей жидкости.

Вычисления проводились для 5 точек: вход и выход горячего потока, а также 3 промежуточные точки.

Авторами оценена относительная погрешность измерений, которая составила $\approx 5\%$. Помимо сравнения чистой воды и графено-водного теплоносителя, также в ходе исследования сравнивались прямоточный и противоточный режимы. Результаты вычислений представлены в виде таблицы 3 значений коэффициента теплоотдачи.

Результаты расчета

Ключевые результаты работы представлены в таблице 3.

Таблица 3. Полученные результаты экспериментов

Номер точки (нумерация по горячему потоку)	Коэффициент теплоотдачи прямоток α , Вт/(м ² ×К)					
	Q = 5 л/мин			Q = 10 л/мин		
	Вода	Графено-водный теплоноситель	Относительная эффективность, %	Вода	Графено-водный теплоноситель	Относительная эффективность, %
Точка 1	471,88	556,17	17,86	443,39	509,39	14,89
Точка 2	552,31	643,8	16,57	509,28	586,59	15,18
Точка 3	673,03	756,22	12,36	596,72	692,96	16,13
Точка 4	870,29	922,31	5,98	739,96	688,64	0
Точка 5	616,42	747,7	21,3	541,85	632,38	16,69
Среднее значение	636,79	725,24	13,89	566,24	621,99	9,85
Номер точки (нумерация по горячему потоку)	Коэффициент теплоотдачи противоток α , Вт/(м ² ×К)					
	Q = 5 л/мин			Q = 10 л/мин		
	Вода	Графено-водный теплоноситель	Относительная эффективность, %	Вода	Графено-водный теплоноситель	Относительная эффективность, %
Точка 1	428,13	448,36	4,73	292,87	329,95	12,66
Точка 2	419,83	444,3	5,83	283,72	320,99	13,14
Точка 3	424,56	446,55	5,18	282,44	318,65	12,82
Точка 4	437,95	466,24	6,46	285,56	325,5	13,99
Точка 5	422,67	444,78	5,23	270,81	304,36	12,39
Среднее значение	426,63	450,05	5,49	283,08	319,89	13

Анализ полученных результатов

По итогам проведенных авторами исследований и обработки полученных данных, сделаны следующие выводы:

1. Разработан алгоритм расчета коэффициента теплоотдачи для вышеуказанного стенда с учетом расположения датчиков, конфигурации и используемых теплоносителей;

2. Получено экспериментальное подтверждение эффективности графено-водного теплоносителя;

3. В силу полученных данных, исследование требует дальнейшей проработки, а также более обширного изучения графено-водного теплоносителя с учетом различной концентрации, основного (несущего) теплоносителя.

Заключение

Нанорафено-водный теплоноситель имеет ряд преимуществ над другими видами водяного теплоносителя. Это обусловлено:

- увеличением интенсивности теплообмена при использовании нанорафено-водного теплоносителя на 20 %;

- использование наножидкости увеличивает параметры теплообмена и тем самым улучшает интенсивность теплообменных процессов;

- графен как наночастица имеет преимущества над другими добавками в силу своего размера и необходимости использования его в системах в относительно низких концентрациях;

- исследуемый нанотеплоноситель не создает в каналах трубопроводов дополнительного гидравлического сопротивления;

- поверхностный атомарный слой наночастиц графена исключает коррозионные процессы, являясь защитным покрытием.

- исследованный нанорафеновый теплоноситель рекомендован для использования в разных типах теплообменных аппаратов. Например, в качестве теплоносителя для охлаждения лазерных модулей или систем высокой плотности энергии, в электронике и соответствующих охлаждаемых элементах изделий промышленности.

Необходима постановка дальнейших научных исследования нанорафена для определения наиболее выгодных конфигураций оборудования и массового содержания наножидкости в теплоносителе. Такие исследования необходимо проводить и с другими типами нанопорошков.

Список источников

1. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: «Энергия», 1977. 344 с.
2. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам. М: Энергоатомиздат, 1990. 360 с.
3. Макеев А.Н., Кирюхин Я.А. Проблемы и перспективы использования наножидкостей в теплоэнергетике // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022. Т. 49. № 3.
4. Porgar S., Rahmanian N. Investigation of Effect of Aluminium Oxide Nanoparticles on the Thermal Properties of Water-Based Fluids in a Double Tube Heat Exchanger // *Biointerface Research in Applied Chemistry*. 2022. Vol. 12. № 2. pp. 2618–2628. DOI: 10.33263/BRIAC122.26182628
5. Nasir F., Mohamad A.Y. Heat transfer of CuO-water based nanofluids in a compact heat exchanger. 2016. Vol. 11. № 4. 2517–2523.
6. Lakshmanan Periyannan, Periyasamy Saravanan, kanagarajan Saranya, Dhairiyasamy Ratchagaraja. Analysis of Heat Transfer Performance and Thermo-hydraulic Characteristics of Graphene Nanofluids: Impact of Sedimentation Effects. *Materials Research Express*. 2023. Vol. 10. DOI: 10.1088/2053-1591/acf7b2
7. Жаров А.В., Горшков Р.В., Савинский Н.Г. Теплоотдача в системах охлаждения судовых двигателей при циркуляции теплоносителя, содержащего высокотеплопроводные наночастицы мультиграфена // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2019. Т. 11. № 4. С. 745–754. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-114-745-754
8. Рахмонов Т.Т., Камиллов Ш.Х., Тешабоева Д.Р.К. Графен и области его использования // *Eurasian Journal of Academic Research*. 2024
9. Kapilan Natesan, Sadashiva Prabhu S., Samuel Varghese Kodathu et al. Effect of graphene on the performance of heat exchangers and related simulation studies // *Materials Today: Proceedings*. 2021.
10. Periyannan Lakshmanan, Saravanan Periyasamy, Saranya kanagarajan, Ratchagaraja Dhairiyasamy. Analysis of heat transfer performance and thermo-hydraulic characteristics of graphene nanofluids: impact of sedimentation effects // *Materials Research Express*. 2023. Vol. 10.
11. Панченко А.Н. Двумерные материалы, их свойства и применение // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2023.

References

1. Mikheev MA, Mikheeva IM. *Basics of Heat Transfer*. Moscow: Ehnergiya; 1977. 344 p.
2. Kirillov PL, Yur'ev YuS, Bobkov VP. *Handbook of Thermal Hydraulic Calculations*. Moscow: Ehnergoatomizdat; 1990. 360 p.
3. Makeev AN, Kiryukhin YaA. Problems and prospects of using nanofluids in thermal power engineering. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2022;49(3).
4. Porgar S, Rahmanian N. Investigation of Effect of Aluminium Oxide Nanoparticles on the Thermal Properties of Water-Based Fluids in a Double Tube Heat Exchanger. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. 2022;12(2): 2618–2628. DOI: 10.33263/BRIAC122.26182628
5. Nasir F, Mohamad AY. Heat transfer of CuO-water based nanofluids in a compact heat exchanger. 2016;11(4): 2517–2523.
6. Lakshmanan Periyannan, Periyasamy Saravanan, kanagarajan Saranya, Dhairiyasamy Ratchagaraja. Analysis of Heat Transfer Performance and Thermo-hydraulic Characteristics of Graphene Nanofluids: Impact of Sedimentation Effects. *Materials Research Express*. 2023;10. DOI: 10.1088/2053-1591/acf7b2
7. Zharov AV, Gorshkov RV, Savinskii NG. Heat transfer in cooling systems of marine engines with circulation of a coolant containing highly thermally conductive multi-graphene nanoparticles. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2019;11(4):745–754. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-114-745-754
8. Rakhmonov TT, Kamilov ShKh, Teshaboeva DRK. Graphene and its applications. *Eurasian Journal of Academic Research*. 2024.
9. Kapilan Natesan, Sadashiva Prabhu S, Samuel Varghese Kodathu et al. Effect of graphene on the performance of heat exchangers and related simulation studies. *Materials Today: Proceedings*. 2021.
10. Periyannan Lakshmanan, Saravanan Periyasamy, Saranya kanagarajan, Ratchagaraja Dhairiyasamy. Analysis of heat transfer performance and thermo-hydraulic characteristics of graphene nanofluids: impact of sedimentation effects. *Materials Research Express*. 2023;10.
11. Panchenko AN. Two-dimensional materials, their properties and applications. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2023.