

М.М. Власенко (канд. техн. наук, доц.), Е.М. Нємцев
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
mykola.vlasenko@donntu.edu.ua, eduard.niemtsev@donntu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛООБМІННОГО ПРОЦЕСУ В ОХОЛОДЖУВАЧІ ТУРБІННОГО МАСТИЛА МО-2 В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД СХЕМИ РОЗТАШУВАННЯ ТРУБОК У ТРУБНИХ ҐРАТАХ

Дослідження спрямовані на вивчення впливу схеми розташування теплообмінних трубок у трубних ґратах на ефективність охолодження турбінного мастила ТП-22. Для досягнення поставленої мети застосовувався метод комп'ютерного моделювання у програмному комплексі SolidWorks. У цій програмі були створені геометричні моделі охолоджувача турбінного мастила МО-2 з коридорною, шаховою і радіальними схемами розташування трубок. При створенні геометричної моделі і подальших досліджень приймалися основні технічні характеристики кожухотрубного горизонтального охолоджувача МО-2, а саме: температура мастила на вході 45°C, номінальна витрата мастила – 3,1 м³/год, температура води на вході 20°C, номінальна витрата води – 15 м³/год. У результаті модельних досліджень було встановлено, що найбільш ефективною є шахова схема розташування трубок.

Ключові слова: охолоджувач турбінного мастила МО-2, турбінне мастило ТП-22, програмний комплекс SolidWorks, геометрична модель, коридорна, шахова і радіальна схеми розташування трубок, трубні ґрати, комп'ютерне моделювання, ефективність теплопередачі, температурне поле теплоносіїв, теплофізичні характеристики теплоносіїв.

Постановка проблеми. Серцем будь-якої енергетичної системи є турбіна, яких існує багато різновидів, але загальною рисою для більшості з них є колесо ротора, прикріплене до обертового валу, який здійснює механічну роботу, що у подальшому перетворюється у генераторі в електричну енергію. Обертання валу створює надмірне тепло в підшипниках, яке видаляється мастилом. Тепло від мастила може бути надмірним [1] і потребує розсіювання системою охолодження [2], яка найчастіше використовує проточну воду як охолоджуючу рідину.

Теплові характеристики системи охолодження повинні бути оцінені для гарантії, що вироблене тепло може бути відведено без досягнення надмірних температур. Температура мастила, що надходить на підшипники, повинна бути не нижче 35°C і не вище 45°C. Цю температуру регулюють шляхом зміни підведення охолодної води до маслоохолоджувача, який являє собою трубчастий теплообмінник (звичайно кожухотрубний), усередині трубок якого проходить охолодна вода, а між трубками масло.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом багатьох років різними авторами запропоновано, випробувано та реалізовано ряд нових технічних рішень для модернізації великої кількості різноманітних теплообмінників паротурбінних установок; вони забезпечили задовільні вирішення проблем, що виникають під час роботи теплообмінника, наприклад [3-5]:

- оцінка вибору матеріалу трубних систем і елементів оболонки (водяних камер);
- використання високоефективних профільних труб з різних матеріалів з оптимальними параметрами профілювання;
- оптимізація конфігурації трубних пучків в теплообмінниках (в окремих випадках - збільшення поверхні теплообміну в розмірах корпусів комерційних теплообмінників);
- оптимізація розташування проміжних перегородок, підвищення вібраційної надійності трубної системи шляхом встановлення демпферних поясів і хомутів;
- застосування високоефективного способу кріплення труб до трубних дошок з використанням кільцевих рельєфів, виконаних у металі трубних ґрат;
- ефективна герметизація шпарин між проміжними перегородками і оболонкою (для теплообмінників типу «рідина - рідина»);
- використання спеціальних захисних покриттів.

Корпус маслоохолоджувача і його деталі, як правило, виготовляють з вуглецевої сталі, а трубні дошки - з листів вуглецевої сталі або з різних видів латуні. На більшості теплових електростанцій в маслоохолоджувачах встановлені трубки з латуні Л68. При проведенні техніко-економічного обґрунтування і використання в маслоохолоджувачах труб з корозійностійких сталей можна виготовляти водяні камери і трубні дошки зі сталей Х18Н10Т або Х23Н17М2Т. Останнім часом в маслоохолоджувачі все частіше встановлюють трубки з нержавіючої сталі.

© Власенко М.М., Нємцев Е.М., 2023

Оптимізація схеми трубного пучка теплообмінників, у тому числі маслоохолоджувачів, є одним із найперспективніших шляхів їх вдосконалення. Воно повинно здійснюватися на основі комплексного розрахунку теплових, гідродинамічних і надійних характеристик кожного даного апарату. Методика такого оптимізаційного розрахунку розроблена для маслоохолоджувачів [6-9] як з гладкими, так і з крученими профільними трубами (КПТ), що використовуються в енергетиці. Це дозволяє врахувати зміни параметрів мастила в різних зонах апарату, які були виділені за потоком мастила. Одним з основних факторів, що визначають ефективність роботи маслоохолоджувачів, є протікання мастила через отвори в проміжних перегородкових пластинах і в зазорах між проміжними перегородковими пластинами і кожухом маслоохолоджувача.

Виконані теоретичні розрахунки дозволяють оптимізувати схему розташування трубних пучків маслоохолоджувачів і визначити такі особливості, як кількість рядів трубок, що виводяться з центру трубного пучка; відстань між трубами (задній крок); відстань між проміжними перегородками, тобто кількість проходів для масла; та інші.

Для пошуку оптимальних розмірів, форми, положення та механічних характеристик кільцевих рельєфів були проведені обчислювальні дослідження та експерименти, які дали наступні результати:

- в області кільцевого рельєфу контактний тиск значно зростає (у 2-3 рази);
- оптимальна форма рельєфу з точки зору найбільш повного вкладання в поверхню труби – трикутник з плавним переходом від основи до стінок отвору;
- оптимальна висота виступу на рельєфі знаходиться в межах від 0,07 до 0,15 мм;
- максимальне збільшення контактного тиску досягається, коли твердість поверхні виступу в середньому на 30-35% вище, ніж твердість металу трубних ґрат;
- кільцевий рельєф повинен розташовуватися на відстані не менше 5 мм від межі зони кріплення (розвальцьовування) труби в трубній плиті.

Відомо, що трубні ґрати маслоохолоджувачів можна захистити від корозії за рахунок охолоджуючої води кількома способами:

- раціональним вибором матеріалу;
- шляхом нанесення металевих покриттів і покриттів на основі фарб, склоемалей, різних смол тощо.

При виготовленні маслоохолоджувачів доцільно використовувати нержавіючі матеріали для захисту трубних дошок або наносити на них захисні покриття.

Приведений вище геть не повний перелік факторів, що суттєво впливають на експлуатаційні характеристики маслоохолоджувачів, потребує їх вивчення і дослідження. Незважаючи на великий обсяг накопиченої на сьогодні інформації, проблема підвищення ефективності теплообмінних апаратів і, зокрема, маслоохолоджувачів залишається актуальною. Суттєвий внесок у розвиток окремих аспектів вдосконалення маслоохолоджувачів може зробити комп'ютерне моделювання.

Мета досліджень. Методом комп'ютерного моделювання дослідити вплив схеми розташування теплообмінних трубок у трубних ґратах на ефективність охолодження турбінного мастила в кожухотрубному охолоджувачі МО-2.

Методика досліджень. За допомогою програмного комплексу SolidWorks була створена геометрична модель охолоджувача турбінного мастила МО-2 з трьома схемами розміщення теплообмінних трубок у трубних ґратах: коридорної, радіальної і шахової. Дотримуючись показників технічних характеристик даного охолоджувача, були обрані номінальні показники температур і витрат теплоносіїв (охолоджувальної води і турбінного мастила ТП-22). Результатом розрахунків були температурні поля теплоносіїв і траєкторії руху частинок мастила у міжтрубному просторі охолоджувача.

Результати досліджень. За основу створення геометричної моделі були взяті габаритні розміри промислового охолоджувача турбінного мастила МО-2, який приведений на рис.1.

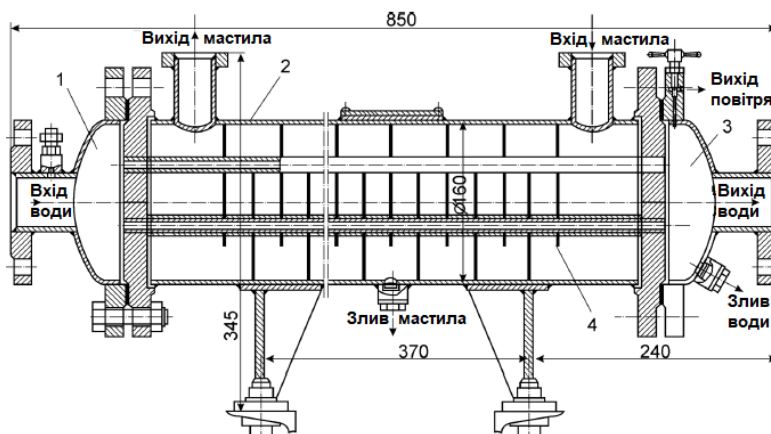


Рисунок 1 – Горизонтальний кожухотрубний охолоджувач турбінного мастила МО-2

Основні технічні характеристики цього охолоджувача приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики охолоджувача мастила МО-2

Характеристика	МО-2
Площа поверхні охолодження, м ²	1,49
Номінальна витрата, м ³ /год:	
мастила	3,1
води	15
Номінальна температура мастила, °С	
на вході	45
на виході	37
Номінальна початкова температура води, °С	20
Гідравлічний опір охолоджувача при номінальній витраті, МПа	
по мастилу	0,034
по воді	0,005
Загальна кількість труб, шт.	64
Діаметр і товщина стінки труб, мм	12×1
Повна довжина апарата, мм	850
Зовнішній діаметр корпусу, мм	160
Маса апарата суха, кг	65

Використовуючи розміри габаритного креслення та інформацію про кількість, розміри і матеріал трубок трубних ґрат (латунь Л68), була створена геометрична модель даного охолоджувача (рис.2), у якій відсутні елементи, що є несуттєвими для подальших теплофізичних досліджень.

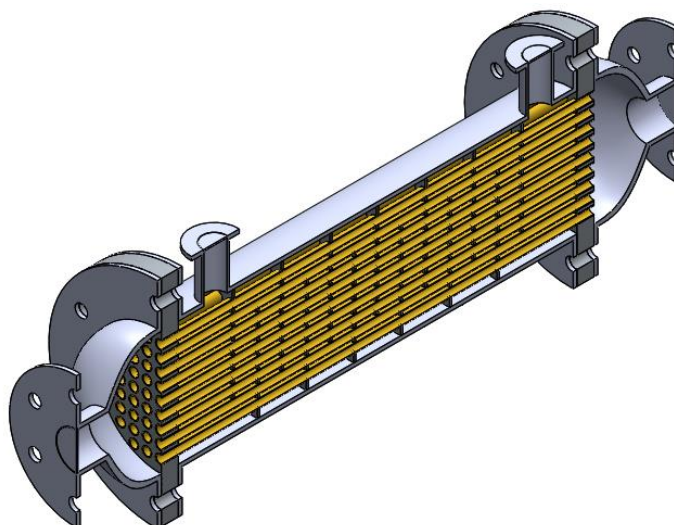


Рисунок 2 – Тривимірна модель охолоджувача турбінного мастила МО-2 у повздовжньому перерізі

Основною складовою даної моделі були трубні ґрати з коридорною, радіальною і шаховою схемами розташування теплообмінних трубок. На рис.3 приведені моделі трубних дошок з вищезгаданими схемами отворів у них.

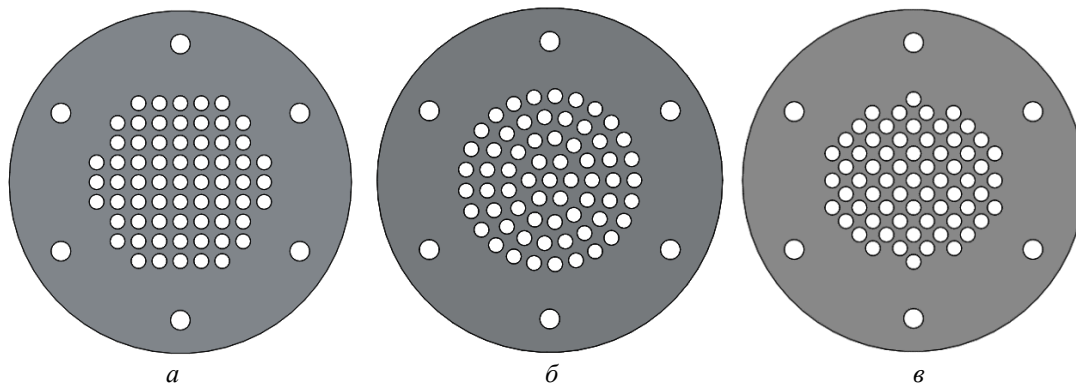


Рисунок 3 – Схеми розташування отворів під трубки у трубних дошках:
а – коридорна; б – радіальна; в – шахова

Моделювання потоків теплоносіїв проводилось у блоці Flow Simulation програми SolidWorks. У налаштуваннях проекту встановлювались температури води і мастила на вході відповідних патрубків, витрати даних теплоносіїв, згідно технічних характеристик охолоджувача мастила МО-2, обирався режим їх плинку – ламінарний і турбулентний, а також встановлювався розмір сітки в області геометричної моделі. У базу даних рідин програми SolidWorks додавались теплофізичні характеристики мастила ТП-22, оскільки вони у ній відсутні.

На рис.4 приведені температурні поля води і мастила для коридорної схеми розташування трубок. Входи і виходи теплоносіїв, як і у подальшому, відповідають напрямам, вказаним на рис.1.

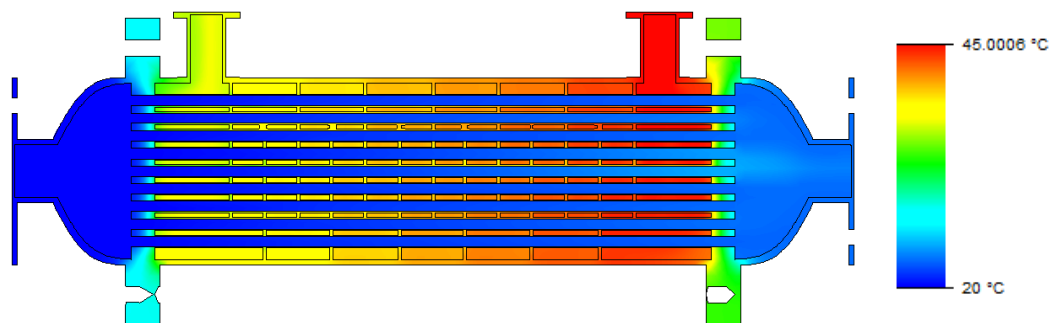


Рисунок 4 – Температурні поля води і мастила ТП-22 при коридорній схемі

Після завершення ітераційного процесу, у результатах розрахунків можна отримати різного роду інформацію, зокрема графік залежності температури мастила по довжині охолоджувача від осі вхідного патрубка до осі вихідного. Такий графік приведений на рис.5.

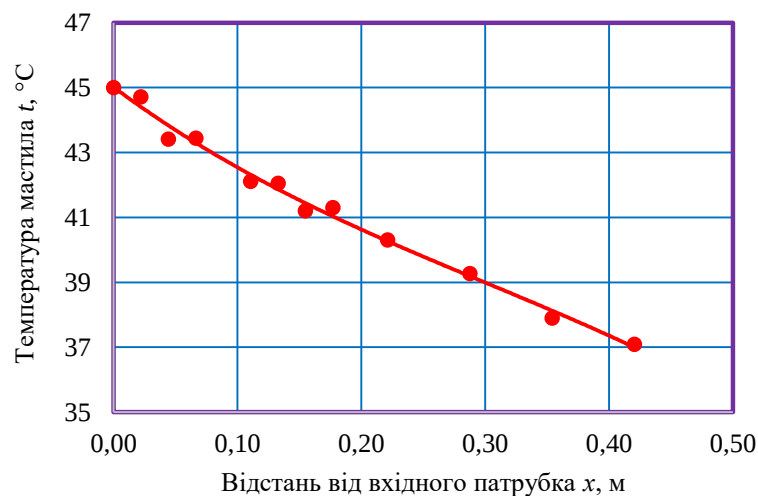


Рисунок 5 – Зміна температури мастила вздовж охолоджувача для коридорної схеми

З графіка видно, що на виході охолоджувача температура мастила досягає номінального значення 37°C , як це і передбачено технічними характеристиками даного апарату.

Після заміни у моделі трубних ґрат коридорного типу на радіальний, при тих же самих початкових і граничних умовах, проводились нові розрахунки. Отримані температурні поля води і мастила, для цього випадку, приведені на рис.6.

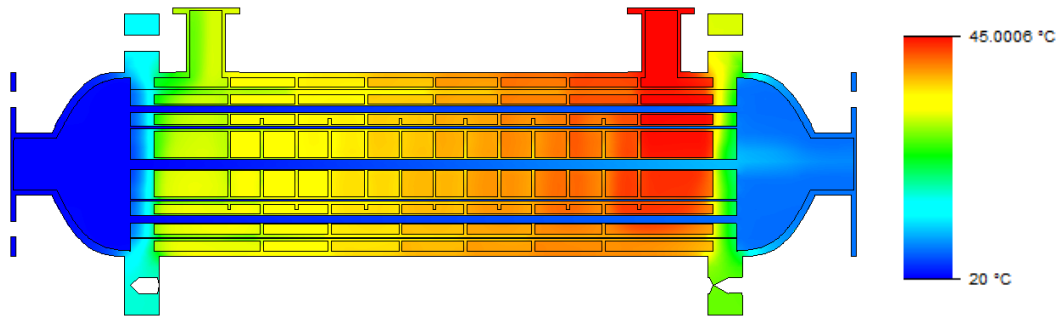


Рисунок 6 - Температурні поля води і мастила ТП-22 при радіальній схемі

Графік залежності температури мастила по довжині охолоджувача приведений на рис.7.

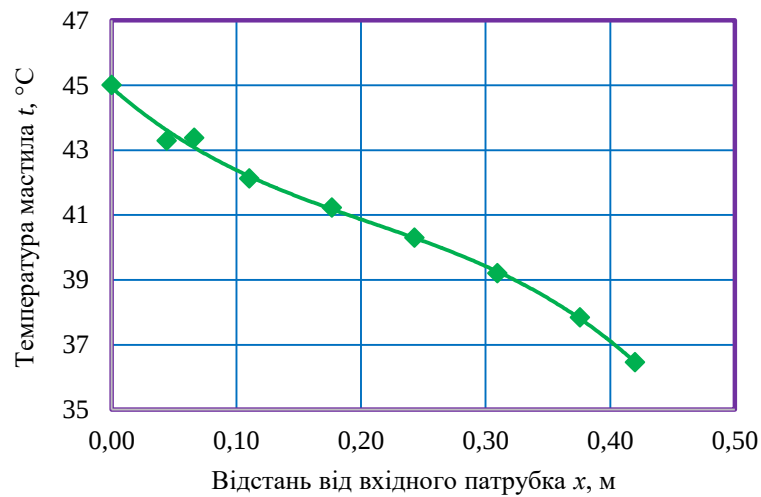


Рисунок 7 - Зміна температури мастила вздовж охолоджувача для радіальної схеми

Аналогічні розрахунки були проведені для шахової схеми. Отримані результати узагальнені на рис.8 і рис.9.

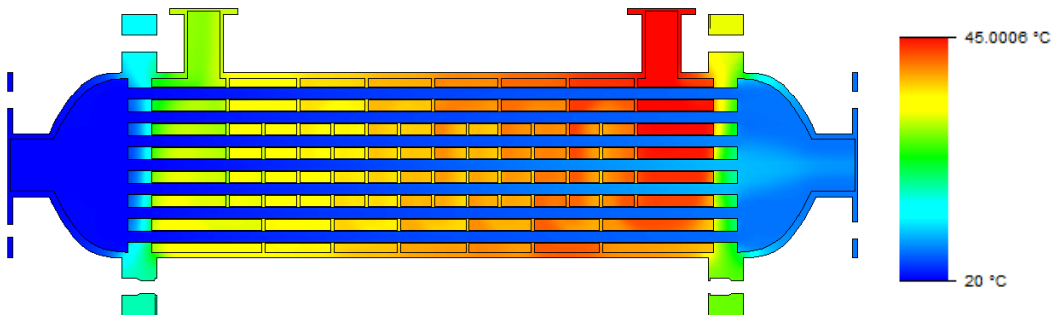


Рисунок 6 - Температурні поля води і мастила ТП-22 при шаховій схемі

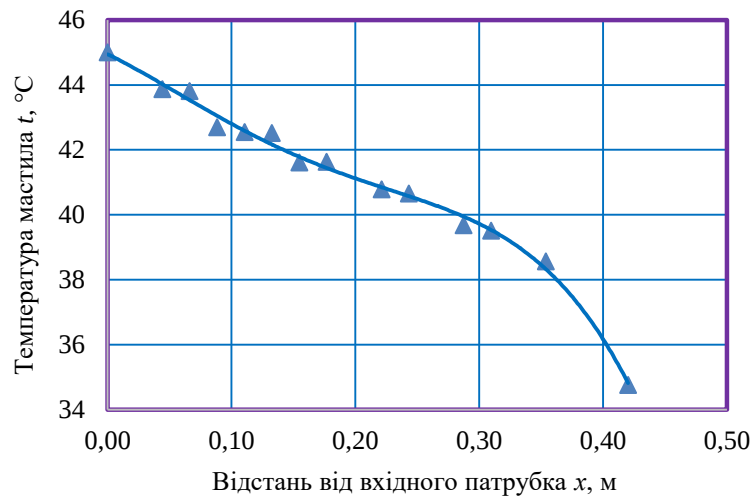


Рисунок 7 - Зміна температури мастила вздовж охолоджувача для шахової схеми

Як видно з останніх двох графіків, ефективність охолодження мастила поступово зростає при переході від радіальної схеми до шахової. Температура мастила на виході з охолоджувача у першому випадку становить 36,5°C, а у другому 34,8°C, тобто досягають значень нижчих за припустиме 37°C. Цю температуру можна легко підвищити шляхом зниження витрати охолодної води, що потягне за собою зниження потужності насосів для прокачування води через охолоджувач. При порівнянні графіків також видно, що зниження температури мастила на перших секціях охолоджувача, ближче до вхідного патрубка, майже однакове для різних схем розташування трубок. Ближче до вихідного патрубка інтенсивність охолодження зростає при переході від коридорної до радіальної і далі до шахової схеми. Причиною такої тенденції є зростання ступеня завихрювання потоку мастила при поперечному обтіканні теплообмінних трубок охолоджувача мастила. Для підтвердження такого пояснення можна навести ілюстрації траєкторій руху частинок мастила у міжтрубному просторі на першій і другій секціях охолоджувача мастила, що узагальнені на рис.8.

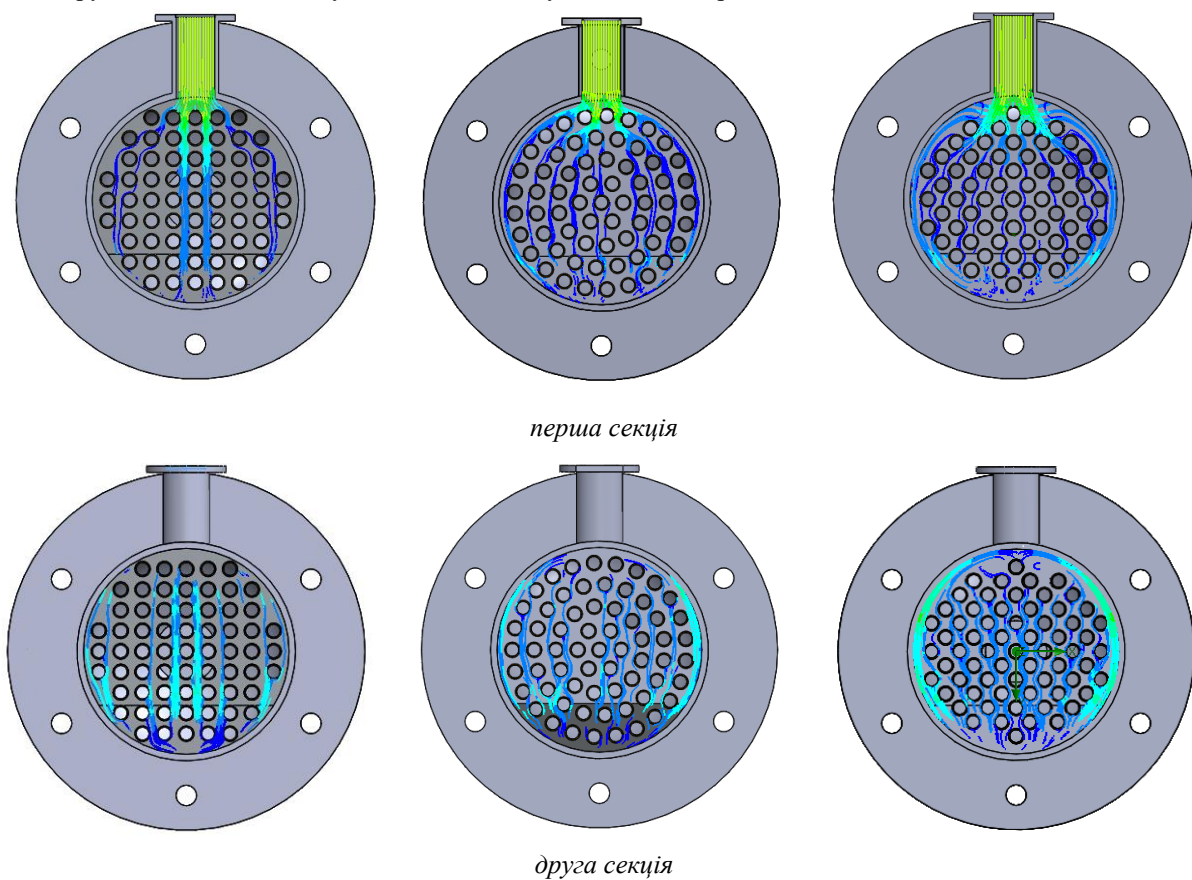


Рисунок 8 – Траєкторії руху частинок мастила у міжтрубному просторі

Висновки. Проведене комп'ютерне моделювання дозволило дослідити вплив схеми розташування теплообмінних трубок у трубних ґратах на ефективність охолодження турбінного мастила в кожухотрубному охолоджувачі МО-2. Було показано, що найбільш ефективною, серед досліджених схем, є шахове розташування теплообмінних трубок у трубних ґратах. Така схема дозволяє знизити витрати охолодної води, відносно номінальної, що дозволить використовувати водяні насоси меншої потужності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Wasilczuk M. Friction and Lubrication of Large Tilting-Pad Thrust Bearings. *Lubricants*. 2015; 3(2):164-180. <https://doi.org/10.3390/lubricants3020164>
2. Kahraman, G. 2020. Increasing the Power Generation by Raising the Capacity of the Thrust Bearing Oil Cooling System in Hydroelectric Power Plants. *J Fail. Anal. and Preven.* 20, 1445-9. <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00969-9>
3. Ryabchikov, A.Yu., Aronson, K.E., Brodov, Yu.M., Khaet, S.I., Blinkov, S.N., Zhelonkin, N.V. "Modernization of Heat Exchangers in Steam Turbine Units Taking Features of Their Operation at Specific Thermal Power Plants into Account", 2010. *Thermal Power Stations*. № 3. p.p. 28-32.
4. Brodov, Yu.M., Aronson, K.E., Ryabchikov, A.Yu., Plotnikov, P.N., Bukhman, G.D. "Retrofitting of Oil Coolers for Steam-Turbine Installations". 1998. *Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika)*. № 12. p.p. 1012-1016.
5. Aronson, K.E., Brodov, Yu.M., Ryabchikov, A.Yu., Brezgin, V.I., Brezgin, D.V. "Experience Gained from Development of Modernized Oil Coolers for the Oil Supply Systems Used in 800-MW Turbines", 2009. *Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika)*. № 8. p.p. 636-643.
6. Brodov, Yu.M., Gal'perin, L.G., Savel'ev, R.Z., Ryabchikov, A.Yu., "Hydrodynamics and Heat Transfer in Film Condensation of Steam on Vertical Twisted Tubes," 1987. *Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika)*, 34 (7), pp. 382-385.
7. Berg, B.V., Aronson, K.E., Brodov, Yu.M., Ryabchikov, A.Yu. "Condensation of Steam in Transverse Flow to a Vertical Tube," 1988. *Heat transfer. Soviet research*, 20 (4), pp. 472-479.
8. Brodov, Yu.M., Aronson, K.E., Ryabchikov, A.Yu., "Heat Transfer with a Cross Flow of Steam Condensing on Vertical Tubes". 1989. *Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika)*, 36 (5), pp. 270-273.
9. Brodov, Yu.M., Aronson, K.E., Ryabchikov, A.Yu., Lokalov, G.A. "An experimental investigation of heat transfer for viscous liquid flowing over bundles of smooth and profiled tubes as applied to turbine unit oil coolers", 2008. *Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika)*, 55 (3), pp. 196—200.

REFERENCES

1. Wasilczuk M. Friction and Lubrication of Large Tilting-Pad Thrust Bearings. *Lubricants*. 2015; 3(2):164-180. <https://doi.org/10.3390/lubricants3020164>
2. Kahraman, G. 2020. Increasing the Power Generation by Raising the Capacity of the Thrust Bearing Oil Cooling System in Hydroelectric Power Plants. *J Fail. Anal. and Preven.* 20, 1445-9. <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00969-9>
3. Ryabchikov, A.Yu., Aronson, K.E., Brodov, Yu.M., Khaet, S.I., Blinkov, S.N., Zhelonkin, N.V. "Modernization of Heat Exchangers in Steam Turbine Units Taking Features of Their Operation at Specific Thermal Power Plants into Account", 2010. *Thermal Power Stations*. № 3. p.p. 28-32.
4. Brodov, Yu.M., Aronson, K.E., Ryabchikov, A.Yu., Plotnikov, P.N., Bukhman, G.D. "Retrofitting of Oil Coolers for Steam-Turbine Installations". 1998. *Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika)*. № 12. p.p. 1012-1016.
5. Aronson, K.E., Brodov, Yu.M., Ryabchikov, A.Yu., Brezgin, V.I., Brezgin, D.V. "Experience Gained from Development of Modernized Oil Coolers for the Oil Supply Systems Used in 800-MW Turbines", 2009. *Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika)*. № 8. p.p. 636-643.
6. Brodov, Yu.M., Gal'perin, L.G., Savel'ev, R.Z., Ryabchikov, A.Yu., "Hydrodynamics and Heat Transfer in Film Condensation of Steam on Vertical Twisted Tubes," 1987. *Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika)*, 34 (7), pp. 382-385.
7. Berg, B.V., Aronson, K.E., Brodov, Yu.M., Ryabchikov, A.Yu. "Condensation of Steam in Transverse Flow to a Vertical Tube," 1988. *Heat transfer. Soviet research*, 20 (4), pp. 472-479.
8. Brodov, Yu.M., Aronson, K.E., Ryabchikov, A.Yu., "Heat Transfer with a Cross Flow of Steam Condensing on Vertical Tubes". 1989. *Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika)*, 36 (5), pp. 270-273.
9. Brodov, Yu.M., Aronson, K.E., Ryabchikov, A.Yu., Lokalov, G.A. "An experimental investigation of heat transfer for viscous liquid flowing over bundles of smooth and profiled tubes as applied to turbine unit oil coolers", 2008. *Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika)*, 55 (3), pp. 196—200.

Надійшла до редколегії

Рецензент:

M. VLASENKO, E. NIEMTSEV

Investigation of the efficiency of the heat exchange process in the MO-2 cooler of turbine oil depending on the arrangement scheme of tubes in tube grids. Effective cooling of the turbine oil is important for the reliability and optimal operation of the turbogenerator. The oil is used for lubrication and cooling of the support and radial bearings of the turbine, bearings of the generator and reducer, gears and splined rollers. It is also used as a hydraulic fluid in the hydraulic turbine start-up system. For reliable and safe operation of the system, it is necessary to maintain the correct temperature of the lubricant. Research is aimed at studying the influence of the layout of the heat exchange tubes in the tube grids on the cooling efficiency of the TP-22 turbine oil. To achieve the goal, the method of computer modeling in the SolidWorks software complex was used. In this program, geometric models of the MO-2 turbine oil cooler with corridor, checkerboard and radial tube layouts were created. When creating a geometric model and further research, the main technical characteristics of the shell-and-tube horizontal cooler MO-2 were adopted, namely: the temperature of the turbine oil at the inlet is 45°C, the nominal flow rate of the oil is 3.1 m³/h, the temperature of the water at the inlet is 20°C, the nominal flow rate water - 15 m³/h. As a result of model studies, it was established that the most effective is the checkerboard arrangement of tubes.

Key words: *MO-2 turbine oil cooler, TP-22 turbine oil, SolidWorks software complex, geometric model, corridor, checkerboard and radial tube arrangement schemes, tube grids, computer modeling, heat transfer efficiency, temperature field of coolants, thermophysical characteristics of coolants.*