



Óbudai Egyetem

azachar_360_25



ÓBUDAI EGYETEM BÁNKI DONÁT GÉPÉSZ ÉS
BIZTONSÁGTECHNIKA MÉRNÖKI KAR
GÉPÉSZETI ÉS TECHNOLÓGIAI INTÉZET

Hőtranszport-intenzitás és a hőmérséklet-rétegződés vizsgálata a
termikus energiatárolás hatékonyságának javítása céljából

MTA doktori értekezés

Tézisfüzet

Dr. Zachár András
egyetemi tanár

Budapest 2025

A termikus energiatárolás és az energiatárolással szoros összefüggésben lévő termikus energiatranszport, és az energiatranszport hatékonyságának fokozásához kapcsolódó új ismeretek és eredmények rendkívül fontosak a XXI. század következő évtizedeiben a globális energiaszükséglet minden téren megnyilvánuló, egyre növekvő tendenciái, igényei miatt. Az energiaellátás és ezzel szoros összefüggésben, az energiabiztonság viszonylatában Európa és ezen belül Magyarország különösképpen előnytelen helyzetben van, mivel a különféle energiahordozók, energiaforrások tekintetében rendkívül szegényes saját, belső erőforrásokkal, lehetőségekkel rendelkezik. Magyarország Európán belül is a körülményekhez képest az egyik legrosszabb helyzetben van, mivel nem rendelkezik saját, önálló tengeri kikötővel, ami két nagyon fontos szempontból is tovább nehezíti, amúgy sem túl előnyös helyzetünket energetikai téren.

Egyrészt így alapvetően kénytelenek vagyunk lemondani a tengeri hajózási szállítókapacitások által esetlegesen biztosított nagy volumenű energiahordozók behozatalának lehetőségeiről. Ez különösképpen aktuális egész Európa viszonylatában, amit a földgázszállítások gyökeresen megváltozó formája is mutat, hogy azon országok, akik rendelkeznek saját nyílttengeri-kikötőkkel, kevésbé kiszolgáltatott helyzetben vannak, mint például Magyarország.

Ennek egyenes következményeként Magyarország teljes mértékben kiszolgáltatott helyzetben van a környező országokkal fennálló partneri viszonyrendszerben, továbbá a körülöttünk zajló esetleg számunkra kedvezőtlen politikai változások, válságok rendkívül nehéz helyzetbe taszíthatják Magyarországot az energiaellátás és energiabiztonság terén. Erre aktuális példaként hozható fel a 2022 kora tavaszán kezdődött Ukrajnai fegyveres konfliktus is, ami a Magyarországra vezetően érkező szénhidrogén alapú olaj és földgázellátást teszi rendkívül bizonytalanná.

A dolgozat és ennek alapján a tézisfüzet is három jól elkülöníthető, önállóan is tanulmányozható részre bontható, amely struktúra egyfajta időbeli sorrendiséget is tükröz abból a szempontból, ahogy az eredmények időrendben egymást követő sorrendben születtek meg.

- Spirális hőcserélők belső oldali hőtranszport-intenzitás fokozásának vizsgálata, ami célját tekintve az ipar szinte bármely területén felhasználható, ahol termikus energiaátviteli folyamatok zajlanak akár kényszerkonvekciós, akár természetes konvekciós áramlás dominál a spirális hőcserélő külső oldali hőátadó felületén (1. és 2. tézis).
- Hőmérséklet-rétegződés javítása spirális hőcserélőkkel üzemeltetett termikus energiatároló tartályokban, továbbá a spirális hőcserélő külső oldali hőtranszport-intenzitásának vizsgálata (3., 4. és 5. tézis).
- A hőmérséklet-rétegződés egyszerűsített leírására szolgáló matematikai modell analitikus megoldása, valamint az analitikus megoldás összehasonlítása különféle numerikus számítások eredményeivel (6. tézis).

Célkitűzések

Vizsgálataim egyik alapvető célja egyrésről spirális hőcserélők energiatranszportjának fokozása, amelynek eredményei az ipar szinte minden területén alkalmazhatók, ahol termikus energiaátviteli folyamatok zajlanak.

Szoláris melegvíz-előállító rendszerekben is gyakran alkalmazott eszköz a spirális hőcserélő, amelyben a hőcserélő folyadék térfogatárama általában kicsi, mivel a napkollektorokból kilépő folyadék hőmérséklete csak alacsony áramlási sebességek mellett éri el a kívánatos hőmérsékletet. Ez a térfogatáram lamináris vagy laminárishoz közeli átmeneti állapotú áramlást hoz létre, ami a kollektorköri hőtranszport szempontjából kedvezőtlen, ugyanis nagy teljesítményű hőtranszport folyadék halmazállapotú munkaközegek esetén csak turbulens áramlással érhető el. A spirális hőcserélőkben indukálódó szekunder áramlások intenzitása tovább fokozható a hőcserélő spirál belsejében valamilyen további, az örvénylest elősegítő alapvetően geometriai jellegű megoldással.

A kérdés, hogy a lassú áramlású kollektorkörben kinyert energiát, hogyan lehet a kollektorköri hőcserélőspirál segítségével minél hatékonyabban a tartályban tárolt vízbe, mint energiatároló közegbe eljuttatni. Az ilyen melegvíz-előállító rendszerek alapvető áramlástechnikai jellemzője, hogy a kollektorkörben elhelyezkedő folyadék, jellemzően lassú áramlású, a Reynolds szám relatíve kicsi. További fontos alapjellemző, hogy a spirális hőcserélő külső falán természetes konvekciós áramlások alakulnak ki, amelyek jellemzően jóval kisebb hőtranszport-intenzitást hoznak létre a hőcserélő külső felületén, mint a kényszerkonvekciós áramlások.

Ha a kollektorkör nem közvetlen beáramlású a tartályba, akkor hőcserélővel kell a kollektorkör által szállított energiát a tartályban tárolt folyadékba eljuttatni. A kollektorkörben található folyadék általában nem víz, hanem valamilyen elegye a víznek és például az ethylene glycolnak. Ez a folyadék mivel mérgező, nem kerülhet bele ivóvizet is szolgáltató tartályokba. Emiatt is elengedhetetlenül szükséges egy hőcserélő közbeiktatása a kollektorkörben keringő munkaközeg és a tartályban található víz közé.

A beiktatott hőcserélő eredendően két alaptípusba sorolható.

- A tartály belsejében elhelyezett spirális hőcserélő
- A tartályon kívül elhelyezett lemezes hőcserélő

Jelen dolgozat a továbbiakban a belső hőcserélő spirállal szerelt megoldások energiahatékonyságának javítási lehetőségeire fókuszál.

A másik fontos célkitűzés, hogy a termikus rétegződést, mint fizikai folyamatot minél részletesebben tanulmányozzam, ezáltal a mérnöki gyakorlat számára is felhasználható eredményeket adjak, amelyek a tervezésben felhasználhatók, valamint olyan eszközöket vizsgáljak, amelyek a legkülönbözőbb beáramlási feltételek mellett is képesek kialakítani, illetve fenntartani a termikus rétegződést spirális hőcserélőkkel üzemeltetett tartályokban.

A tézisfüzetben röviden összefoglalom az eredményeket, illetve a három tématerületre vonatkozó esetleges további kutatási, fejlesztési irányvonalakat is vázolom, valamint fokozott hangsúlyt fektetek a dolgozatban közölt eredményeknek a nemzetközi, tudományos szakmai közönség körében kiváltott reakcióinak bemutatására is. Ez utóbbi talán egy kicsit szokatlan és rendhagyó, de úgy gondolom a nemzetközi szakmai közönség véleménye és a bemutatott tézisekhez kapcsolható további kutatási eredmények jobban tükrözik az általam kapott eredmények értékét és fontosságát. A nemzetközi szakmai közönség véleményét, reakcióit, az eredményeim tudományos visszhangját a különféle publikációkban megjelent idézetek szöveges és ábrákkal is illusztrált képeiből állítottam össze, amelyek a mellékletben találhatóak meg.

Az új tudományos eredményeket hat önálló tézisben foglaltam össze. A dolgozat utolsó fejezetében az új tudományos eredmények bemutatása mellett, röviden összefoglalom az eredményeket, illetve a három tématerületre vonatkozó esetleges további kutatási, fejlesztési irányvonalakat is vázolom.

Spirális hőcserélők passzív hőtranszport-intenzitásának fokozása

A dolgozat alapvetően három jól elkülöníthető részre bontható, ahol először a spirális hőcserélők passzív hőtranszport-intenzitásának fokozását vizsgáltam, a hőcserélő külső oldalának spirális hornyolásával, amelynek következményeként egy spirális belső hornyolás jön létre a hőcserélő belső felületén. Az általam kapott eredmények igazolják, hogy egy hornyolt spirális hőcserélő hőtranszport-intenzitása akár a kétszerese is lehet egy sima falú spirális csővel összehasonlítva azt.

1. Tézis

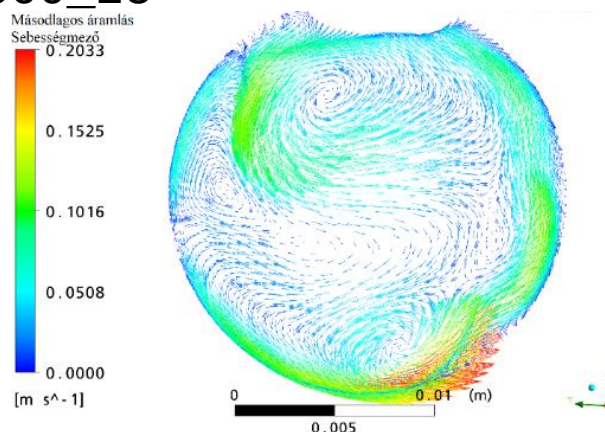
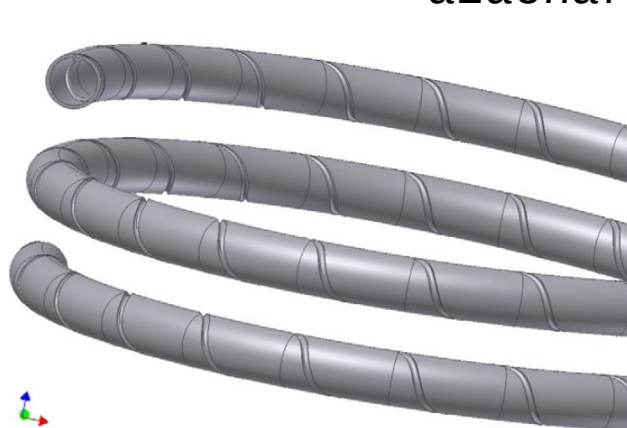
Spirális hőcserélők spirálisan bordázott falkialakításának hatását vizsgáltam a hőtranszport-intenzitás fokozásának céljából. Matematikai összefüggést dolgoztam ki a Nusselt szám meghatározására a Dean és a Prandtl számok, a spirális cső átmérőjének (d), a bordázottság mélységének (h) és a bordázási spirál menetemelkedésének (p) függvényében.

$$Nu = 0.5855De^{0.6688}Pr^{0.408}\left(\frac{h}{d}\right)^{0.166}\left(\frac{p}{d}\right)^{-0.192}. \quad (1.1)$$

A Nusselt szám meghatározására kidolgozott formula, a következő Dean és Prandtl szám tartományokban érvényes, $30 < De < 1400$ és $3 < Pr < 30$.

A T1a ábra egy spirálisan bordázott csövet mutat a hozzá tartozó alap geometriai paraméterekkel, a T1b ábra pedig a bordázott cső belsejében kialakuló másodlagos áramlásokat mutatja, ami felelős a hőtranszport-intenzitás fokozódásáért.

azachar_360_25

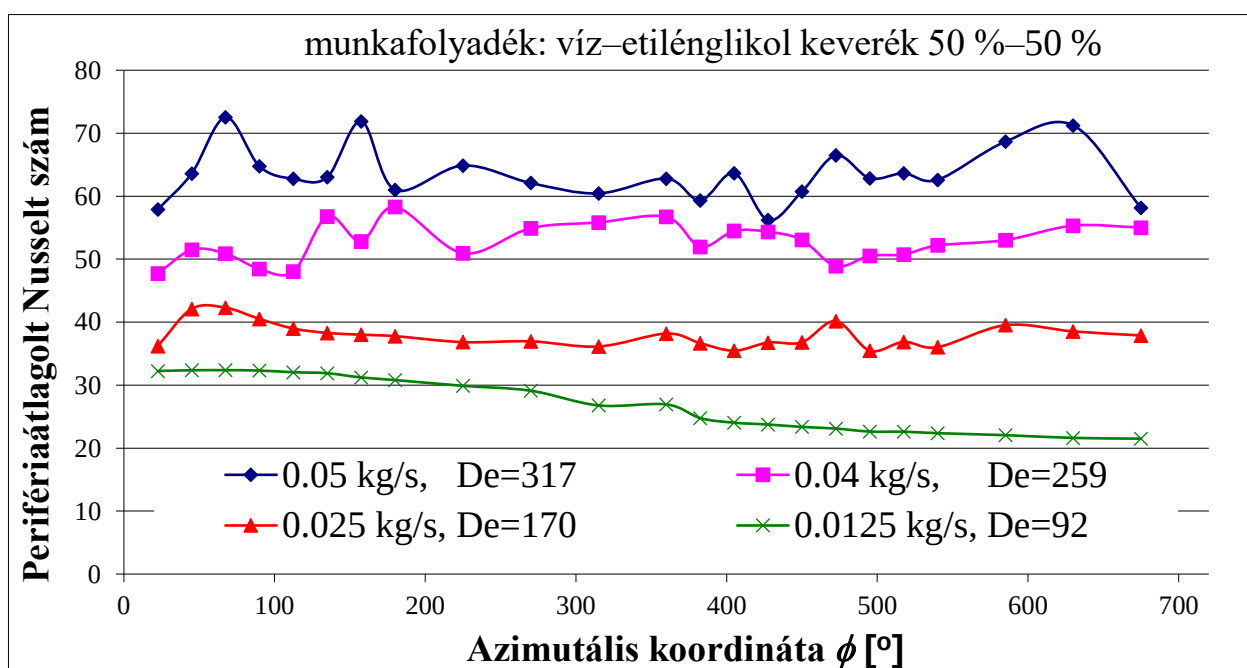


T1a. ábra Spirálisan hornyolt cső
 $d=20$ mm, $p_c=40$ mm, $p=44.5$, $h=2$ mm

T1b. ábra Sebességmező hornyolt
hőcserélő spirál esetén

2. Tézis

Megállapítottam, hogy a perifériaátlagolt Nusselt szám tengelyirányú változása erős oszcillációt mutat, amelynek nagysága a sima falú spirálcsőves hőcserélőkhöz képest szignifikánsan nagyobb, amint az a T2 ábrán is látható. A Nusselt szám oszcillációját a Dean szám nagysága befolyásolja elsősorban, olyan módon, hogy növekvő Dean számok mellett az oszcilláció amplitúdójának és frekvenciájának nagysága növekszik.



T2. ábra Perifériaátlagolt Nusselt szám értékei a spirálcső tengelye mentén, ahol $Pr \approx 15$.

Megállapítottam továbbá, hogy a Nusselt szám tengelyirányú változása 100-nál kisebb Dean számok esetén ($De < 100$) nem mutat oszcilláló viselkedést,

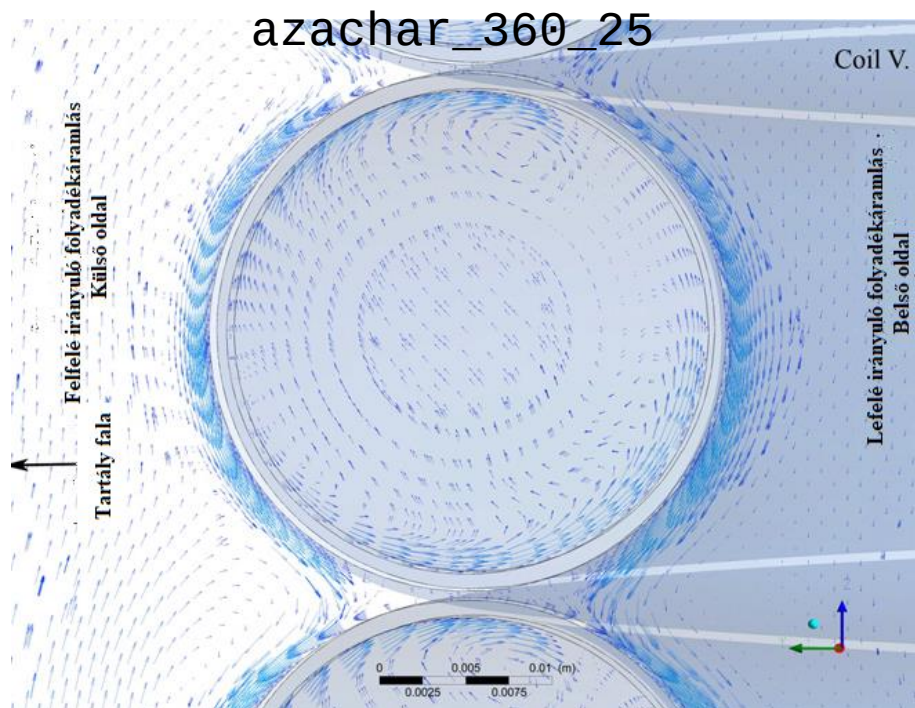
viszont a $100 < De < 200$ –as Dean szám-tartományban már megfigyelhető kisebb mértékű oszcilláció. $De > 200$ -as Dean szám értékek felett pedig egyértelműen jelentkezik a Nusselt számok oszcilláló viselkedése a csőspirál tengelye mentén.

Hőmérséklet-rétegződés vizsgálata és javítása spirális hőcserélőkkel üzemeltetett tartályokban

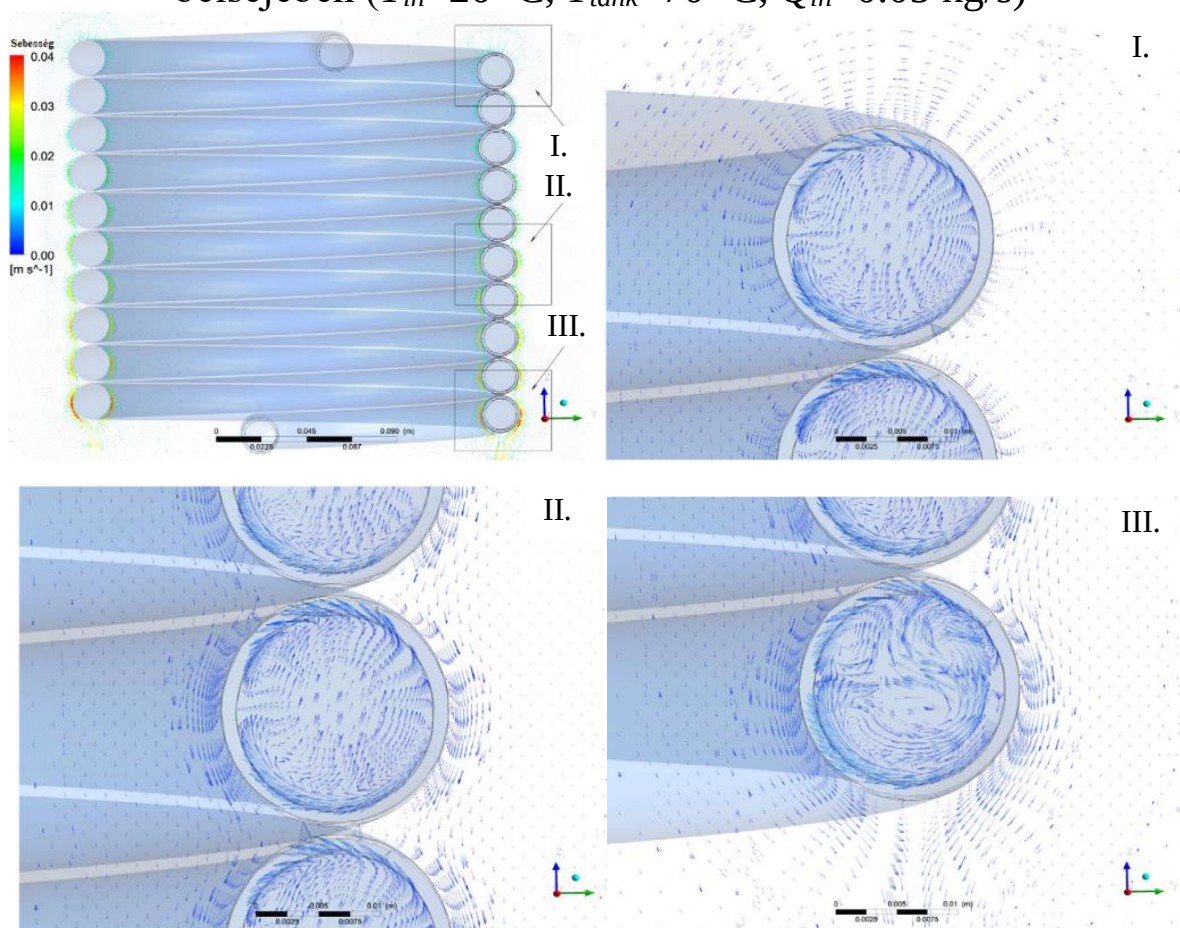
A dolgozat második, egyben legterjedelmesebb része spirális hőcserélők hőmérséklet-rétegződésre gyakorolt hatásával foglalkozik. Megoldást kerestem olyan speciális felépítésű, a természetes konvekciós áramlást módosító kialakításokra, amelyek alkalmazásával lehetőség van különféle folyadékokkal üzemeltetett tartályok belsejében jó minőségű hőmérséklet-rétegződés létrehozására. Az általam elvégzett vizsgálatok alapján a spirális áramlásterelő képes a tartályokban mind a termikus energia betárolása során, mind pedig annak a tartályból való kinyerése során magas fokú rétegződés felépítésére, illetve annak fenntartására. Fontos kihangsúlyozni, hogy a dolgozatban bemutatott spirális áramlásterelő megoldás képes a termikus energia kitermelése során is megőrizni a tartály belsejében elhelyezkedő folyadék magas minőségű rétegződését. Ezt azért fontos kiemelni, mivel ez utóbbi üzemállapotra nem ismert másfajta áramlásterelő megoldás, amely képes lenne a jóminőségű rétegződést megőrizni a tartályban.

3. Tézis

Megállapítottam, hogy a kis menetemelkedésű ($d_{out} \leq p_c \leq 1.1 d_{out}$) spirális hőcserélők körül kialakuló határrétegáramlás és az azt körülvevő áramlási mező speciális jellemzőkkel bír. Hidegebb hőcserélő felület esetén a határrétegáramlás mellett a hőcserélő belső (core) régiójában kialakuló áramlás lefelé irányuló. Ezzel ellentétben a külső oldalon, a lefelé mozgó határrétegáramlás mellett egy felfelé emelkedő áramlási mező jön létre, ami egy nettó cirkulációs áramlást alakít ki a hőcserélő spirál belső és külső oldali falai körül. Ennek a cirkulációs áramlási mezőnek egy-egy részletét mutatja a T3a és a T3b ábra.



T3a. ábra Áramlási mező a hőcserélő spirál környezetében és a hőcserélő spirál belsejében ($T_{in}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{tank}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Q_{in}=0.05\text{ kg/s}$)

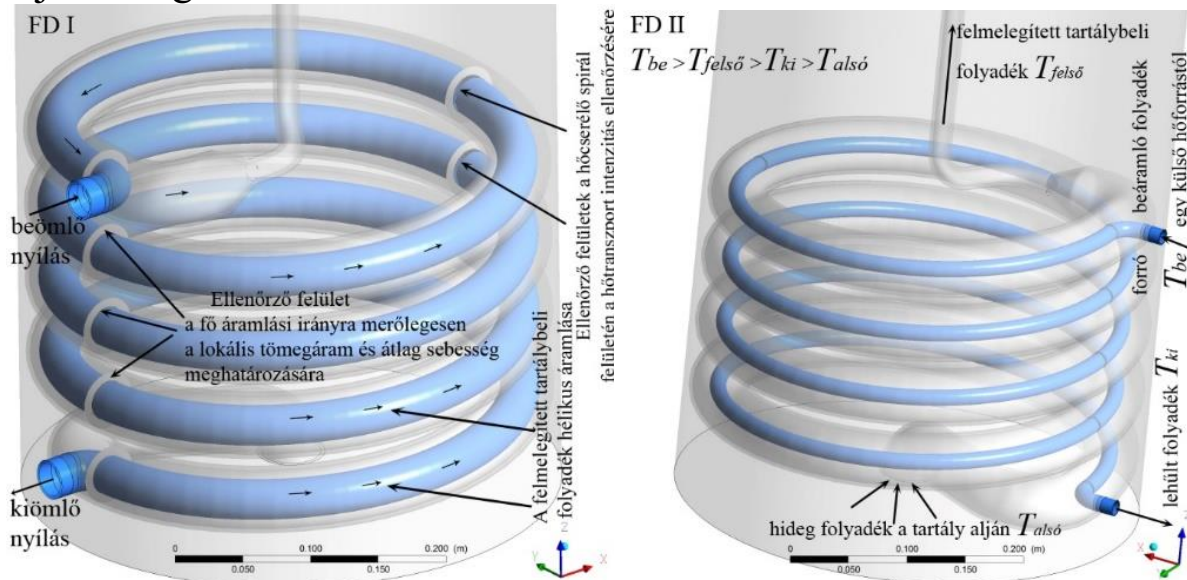


T3b. ábra Áramlási mező a hőcserélő spirál környezetében és a hőcserélő spirál belsejében

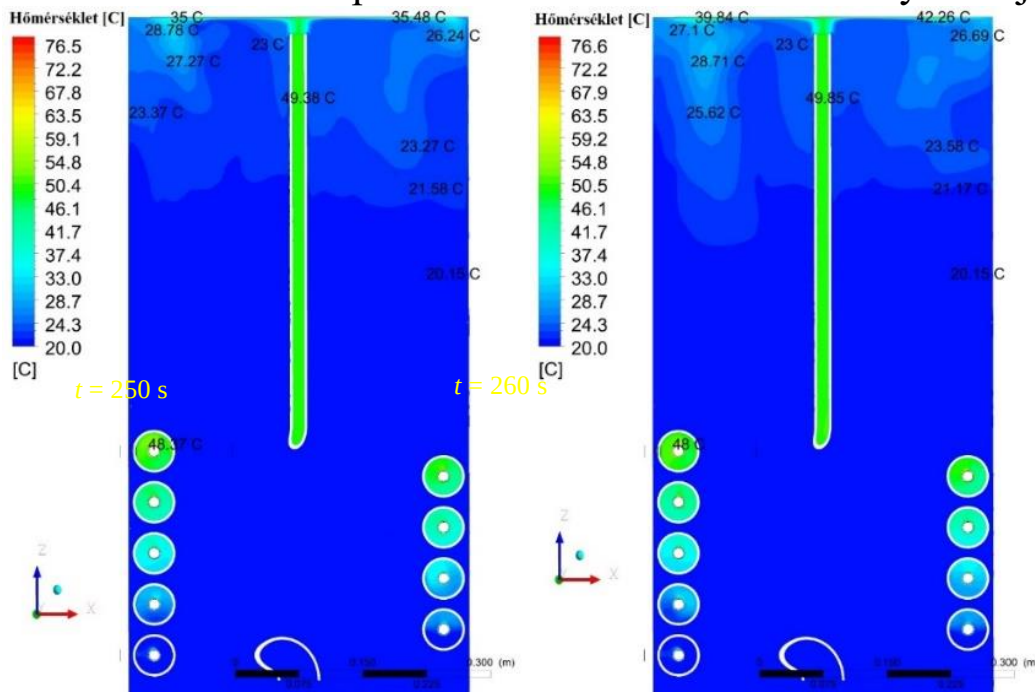
4. Tézis

azachar_360_25

Egy új, innovatív kialakítású spirálcsoves áramlásterelőt hoztam létre spirális hőcserélőkkel üzemeltetett forróvítartó tartályok hőmérséklet-rétegződésének javítására, ami a T4a ábrán látható. Numerikus szimulációk felhasználásával igazoltam, hogy az áramlásterelő biztosítja a hőmérséklet-rétegződés kifejlődését a tartályban tárolt munkaközegben, amit a T4b ábrán látható hőmérsékletmező is igazol. A spirális áramlásterelő a termikus energia tartályba való betöltése során biztosítja a rétegződést.



T4a. ábra A hőcserélő spirál az áramlásterelővel a tartály belsejében



T4b. ábra Hőmérsékletmező szintvonalas ábrái különböző időpillanatokban az FD II. áramlásterelő esetén $T_{in} = 90 \text{ °C}$

A T5a ábra a hőcserélő spirált és az áramlásterelő elhelyezkedését mutatja a tartályban. A T5b ábrán szintvonalas hőmérsékleti izotermák felhasználásával a tartályban kialakuló hőmérsékleti mező tanulmányozható, illetve hasonlítható össze az áramlásterelő alkalmazása esetén, valamint áramlásterelő nélküli üzemben, különböző időpillanatokban.

A dolgozatban javasolt áramlásterelő geometria kialakítása relatíve, elég bonyolult felépítésű. Ezen ok miatt célszerűen műanyag elemekből kell összeállítani, ezért a gyártása nem okoz túlságosan nagy problémát, elsősorban a tartályba beszerelése okozhat kisebb nehézségeket. Ennek okán az egyszerűbb és olcsóbb szerelhetőség érdekében kellene az áramlásterelőt tovább fejleszteni, esetlegesen módosítva a hőcserélő spirál tartályba való belépési és kilépési pontjait. Ennek folyamányaként célszerű azt is vizsgálni, hogy miként lehet a két alapüzemmódot (termikus energia betárolása illetve kinyerése) egyetlen hőcserélő spirál segítségével hatékonyan megvalósítani.

Plume-Entrainment modell analitikus megoldása

A dolgozat végül bemutatja egy olyan egyszerűsített matematikai modell analitikus megoldását, amely jól használható azokban az esetekben, amikor a tartályban tárolt közeg lehűlési folyamatát kell nyomon követni. A modell sajátossága, hogy olyan kezdeti feltétel mellett is meg lehet analitikusan oldani, ahol két élesen elkülönülő hőmérsékleti réteg helyezkedik el a tartályban, és a beáramló folyadék hőmérséklete a felső és az alsó réteg hőmérséklete közé esik.

6. Tézis

Analitikus megoldást dolgoztam ki nem-polinomiális függvénysorok felhasználásával, fizikailag reális kezdeti és peremfeltételek mellett az egyszerűsített konvekció domináns Plume-Entrainment modellt leíró differenciálegyenlet rendszer megoldására. A Plume-Entrainment modellt egy lineáris elsőrendű parciális differenciálegyenlet és egy lineáris elsőrendű közönséges differenciálegyenlet írja le.

$$T_t'(x,t) - a x T_x'(x,t) = 0, \quad (x,t) \in]0, L] \times \mathbf{R}^+, \quad a \in \mathbf{R}^+, \quad a = \frac{c_{ent} m_0}{\rho A D}$$

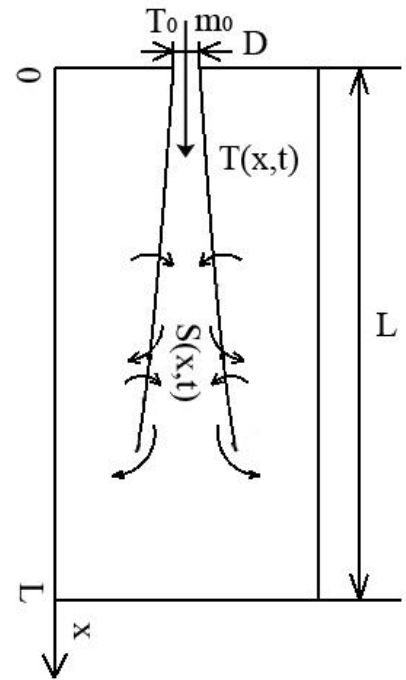
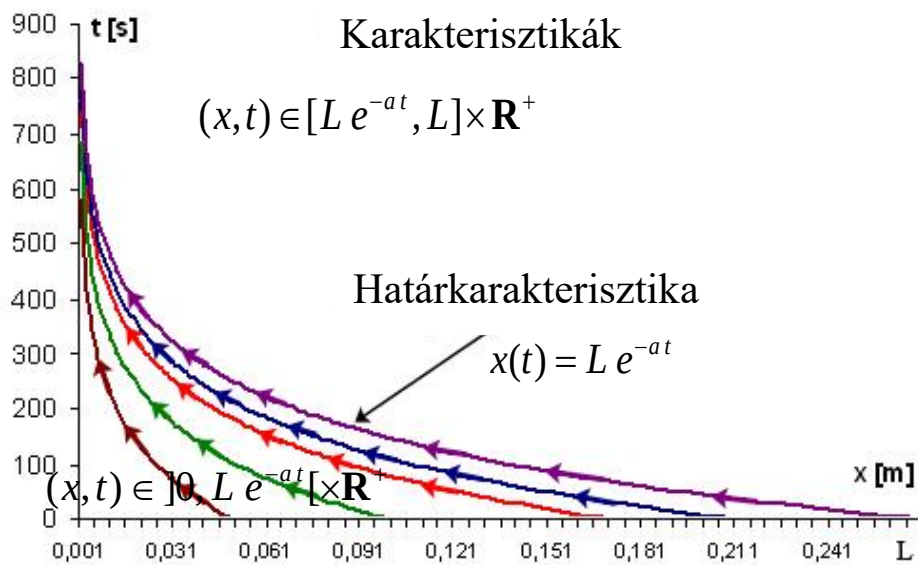
$$T(x,0) = T_u, \quad x \in]0, L[, \quad T_u \in \mathbf{R}^+$$

$$T(L,t) = S(L,t) \quad L \in \mathbf{R}^+$$

$$((1 + \gamma x) S(x,t))'_x = \gamma T(x,t), \quad \gamma \in \mathbf{R}^+, \quad \gamma = \frac{c_{ent}}{D}$$

$$S(0,t) = T_0, \quad T_0 \in \mathbf{R}^+, \quad T_0 < T_u$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} T(x,t) = T_0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} S(x,t) = T_0$$



T6. ábra Az elsőrendű parciális differenciálegyenlet karakterisztikus görbéi

A megoldás általános alakja a karakterisztikus görbék (karakterisztikák) ismeretében:

$$T(x,t) = F(\xi) = F\left(t + \frac{1}{a} \ln(x)\right)$$

A differenciálegyenletek megoldása a megadott kezdeti és peremfeltételek mellett.

$$T(x,t) = \begin{cases} T_u, & (x,t) \in]0, L e^{-at}[\times \mathbf{R}^+ \\ T_L(x,t) = T_0 + \sum_{i=1}^n c_i e^{-a \xi(x,t)i}, & (x,t) \in [L e^{-at}, L] \times \mathbf{R}^+ \end{cases}$$

$$S(x,t) = \begin{cases} S_u(x,t) & (x,t) \in]0, L e^{-at}[\times \mathbf{R}^+ \\ S_L(x,t) & (x,t) \in [L e^{-at}, L] \times \mathbf{R}^+ \end{cases}$$

A soralakú megoldás két különféle alakja az achar: 360_25

$$T_I(x, t) = T_0 + \sum_{i=1}^{\infty} c_i e^{-i a \left(t + \frac{1}{a} \ln \left(\frac{x}{L} \right) \right)} = T_0 + \sum_{i=1}^{\infty} c_i e^{-i a t} \left(\frac{L}{x} \right)^i$$

$$T_{II}(x, t) = T_0 + c_1 e^{-a t} \left(\frac{L}{x} \right) + c_2 e^{-\frac{a}{2} t} \left(\frac{L}{x} \right)^{\frac{1}{2}} + \dots + \lim_{n \rightarrow \infty} c_n e^{-\frac{a}{n} t} \left(\frac{L}{x} \right)^{\frac{1}{n}} = T_0 + \sum_{i=1}^{\infty} c_i e^{-\frac{a}{i} t} \left(\frac{L}{x} \right)^{\frac{1}{i}}$$

A $T_I(x, t)$ és $T_{II}(x, t)$ függvények közvetlen behelyettesítésével igazolható, hogy a $T_I(x, t)$ és $T_{II}(x, t)$ megoldásai a parciális differenciálegyenletnek.

A 6. tételben leírt eredményekhez kapcsolódóan vizsgálható azaz eset is, amikor a termikus diffúzió nincs elhanyagolva a matematikai modellben, ami által a parciális differenciálegyenlet másodrendűvé válik, de továbbra is lineáris marad. Ez a másodrendű parciális differenciálegyenlet az első rendű tagjában nem állandó együtthatós, hanem egy lineáris függvényegyütthatóval rendelkezik, aminek kezelése speciális függvények alkalmazását teszi szükségessé. Viszont ebben az esetben az elsőrendű parciális differenciálegyenlet karakterisztikáinak alkalmazásával a másodrendű egyenlet a közönséges hővezetési egyenletté transzformálható, számítási nehézségek a $T(L, t) = S(L, t)$ peremfeltétel teljesítésénél jelentkeznek.

- [1] Zachar, A, Analysis of coiled-tube heat exchangers to improve heat transfer rate with spirally corrugated wall, INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER 53 : 19-20 pp. 3928-3939. , 12 p. (2010), Journal Ranking: D1, IF: 1.899
- [2] A., Zachár, Investigation of natural convection induced outer side heat transfer rate of coiled-tube heat exchangers, INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER 55 : 25-26 pp. 7892-7901. , 10 p. (2012), Journal Ranking: D1, IF: 2.315
- [3] András, Zachár, Investigation of a new tube-in-tube helical flow distributor design to improve temperature stratification inside hot water storage tanks operated with coiled-tube heat exchangers, INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER 63 pp. 150-161. , 12 p. (2013), Journal Ranking: Q1, IF: 2.522
- [4] Zachár, András, Investigation of a new helical flow distributor design to extract thermal energy from hot water storage tanks, INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER 80 pp. 844-857. , 14 p. (2015), Journal Ranking: D1, IF: 2.857
- [5] Zachár, András, Analytic solution for convection dominant heat transport induced by buoyant jet entrainment inside hot fluid storage tanks, SOLAR ENERGY 195 pp. 239-248. , 10 p. (2020), Journal Ranking: Q1, IF: 4.674

Az 1. tézisben bemutatott összefüggés közvetlenül felhasználható bordázott spirális hőcserélők belső oldali hőtranszport-intenzitásának meghatározására. A hőtranszport-intenzitás ismeretében pedig méretezhető a hőcserélő hőátadó felülete, továbbá a spirális bordázottság geometriai paraméterei, úgy mint a bordázottság mélysége és a spirális borda menetemelkedése.

A 2. tézisben megfogalmazott eredmény gyakorlati felhasználása olyan alkalmazásokban lehet fontos, ahol a hőcserélő hőtranszport-intenzitásának kiegyenlítetttsége, illetve kiegyenlítetlensége valamilyen szempontból fontos lehet. Például az élelmiszeriparban tej, illetve tejtermékek gyors pasztörözése során a túlságosan nagy kiegyenlítetlenség egyes helyeken túlzottan magas hőmérsékletet vagy esetleg a szükségesnél éppen kisebb hőmérsékleti értéket eredményezhet. Az első eset a beltartalmi érték csökkenését, az utóbbi a nem elégséges pasztörözést vonhatja maga után.

A 3. tézisben megfogalmazott eredmény jól szemlélteti a spirális hőcserélők környezetében kialakuló áramlási mezőt és a termikus határréteg kialakulását, illetve leválását a spirálcső külső felületén.

A 4. és 5. tézisek eredményei lehetővé teszik, hogy tetszőleges geometriai kialakítású tartályokban ahol a hőmérséklet-rétegződés fizikailag lehetséges, a bemutatott spirális áramlásterelő képes létrehozni, illetve megőrizni a tartályban elhelyezkedő folyadék hőmérséklet-rétegződését. A spirális áramlásterelő, geometriai kialakításánál fogva jóval nagyobb rugalmasságot, tervezői szabadságot biztosít a tartályba beépített hőcserélő elhelyezésére, kialakítására illetve annak méretezésére. Továbbá az 5. tézisben bemutatott elrendezés az egyetlen jelenleg ismert megoldás, amely képes a hőmérséklet-rétegződést megőrizni a termikus energia tartályból való kinyerése során.

A 6. tézis eredményei elsősorban elvi jelentőségűek. Az analitikus eredmény egyrészről felhasználható konvekciós tagokat diszkretizáló numerikus sémák tesztelésére, vizsgálatára. Másrészről az analitikus megoldás képes kellő pontossággal és gyorsan előre jelezni a tartályban tárolt folyadék függőleges hőmérséklet-eloszlásának időbeli változását felhajtóerő által befolyásolt folyadéksugár/csóva jelenlétében. Fontos megemlíteni viszont azt a megkötést, hogy a belépő folyadék hőmérséklete alacsonyabb, mint a tartályban tárolt folyadék hőmérséklete. Tehát az analitikus eredmény egy lehűlési folyamat időbeli fejlődését képes előre jelezni, a tartályban tárolt folyadék hőmérsékleténél alacsonyabb hőmérsékletű beáramló folyadéksugár hatása mellett.

A tézisfüzetet lezáró mellékletben fokozott hangsúlyt fektetek a dolgozatban közölt eredményeknek a nemzetközi, tudományos szakmai közönség körében kiváltott reakcióik bemutatására. Ez utóbbi talán egy kicsit szokatlan és rendhagyó, de a nemzetközi szakmai közönség véleménye és a bemutatott tézisekhez kapcsolható további kutatási eredmények bemutatása jobban tükrözik az általam kapott eredmények értékét és fontosságát. A nemzetközi szakmai közönség véleményét, reakcióit, az eredményeim tudományos visszhangját a különféle publikációkban megjelent idézetek szöveges és ábrákkal is támogatott képeiből állítottam össze.

Nemzetközi szakmai közönség véleménye, reakciói az 1. és 2. tézisekhez kötődően

Az általam közölt eredményeket és az 1. tézisben közölt összefüggést számos a szakterülettel foglalkozó kutató és kutatócsoport vizsgálta, mind mérésekkel, mind pedig további numerikus szimulációkkal. Rainieri és társai több egymást követő munkáikban vizsgálták és értékelték az általam kidolgozott a hőtranszport-intenzitás leírására szolgáló összefüggést.

Az alábbi cikkben Rainieri és társai az általuk végzett mérésekkel hasonlították össze az általam kidolgozott formula által szolgáltatott Nusselt számokat. Az eredmények jó egyezést mutatnak még amellet is, hogy a méréseket jóval magasabb Prandtl szám tartományba eső folyadékon végezték a hőcserélőben.

International Journal of Heat and Mass Transfer 55 (2012) 498–504



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect
International Journal of Heat and Mass Transfer

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijhmt



Technical Note

Experimental investigation on the convective heat transfer in straight and coiled corrugated tubes for highly viscous fluids: Preliminary results

S. Rainieri *, F. Bozzoli, G. Pagliarini

Department of Industrial Engineering, University of Parma, Parco Area delle Scienze 181/A, 43124 Parma, Italy

$$Nu = 0.5855De^{0.6688}Pr^{0.408}\left(\frac{e}{D_{env}}\right)^{0.166}\left(\frac{p}{D_{env}}\right)^{-0.192}$$

for $30 < De < 1400$ and $3 < Pr < 30$ (4)

In the present note we intend to experimentally verify the effectiveness of such compound passive enhancement technique in case of highly viscous Newtonian fluids. To the authors' knowledge, such passive heat transfer enhancement technique has never been experimentally investigated. In particular the heat transfer performances

by Janssen and Hoogendoorn [8] and evaluated by Eq. (2) and Eq. (3) with $De = 72$, $Pr = 82$ and $De = 249$, $Pr = 93$ respectively for $Re \cong 325$ and $Re \cong 916$. The asymptotic Nusselt number values predicted by Eq.(4) by Zachár [9] for the corrugated coiled tube are 37.4 and 90.4 for the test condition referred to in Fig. 7(a) and Fig. 7(b) respectively. The value predicted by Eq. (4) for $Re \cong 325$ overestimates the experimental value, while for $Re \cong 916$ the correlation derived by Zachár [9] correctly accounts for the enhancement effect witnessed by the experimental results, although the numerical value is about 20% higher than the experimental one.

Rainieri és társai folytatták elsősorban mérésekre alapozott ez irányú kutatási tevékenységüket, amelynek során maguk is kidolgoztak egy formulát

spirálisan bordázott, spirális hőcserélők belsejében a belső oldali Nusselt szám meghatározására. Az általam kidolgozott formula és Rainieri és társai által javasolt összefüggés összehasonlítása látható az alábbi ábrán.

Az is látható és hangsúlyozzák, hogy Rainieri és társai által végzett vizsgálatok és a kidolgozott formula magasabb Prandtl szám tartományban érvényes, mint az általam kidolgozott formula és ezt ők is kiemelik, amit piros színű vonallal aláhúzva jelöltem is a dokumentumba beillesztett ábrán, illetve szövegben.

International Journal of Heat and Mass Transfer 59 (2013) 353–362



International Journal of Heat and Mass Transfer

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijhmt

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect



Compound convective heat transfer enhancement in helically coiled wall corrugated tubes

S. Rainieri^{a,b,*}, F. Bozzoli^a, L. Cattani^a, G. Pagliarini^{a,b}

^a Department of Industrial Engineering, University of Parma, Parco Area delle Scienze 181/A, I-43124 Parma, Italy
^b SITEIA/PARMA Interdepartmental Centre, University of Parma, Parco Area delle Scienze 181/A, I-43124 Parma, Italy

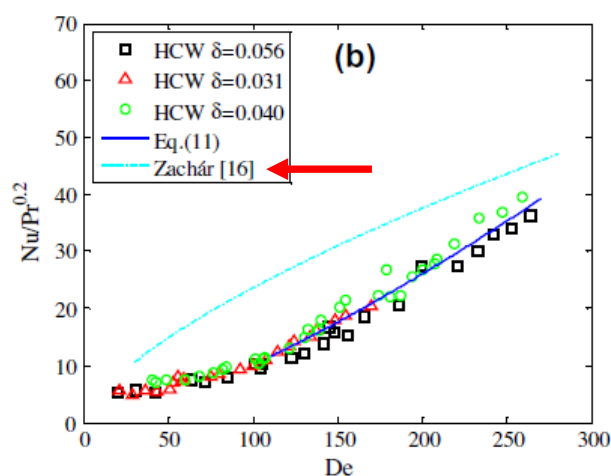
$$Nu = 0.0191 \cdot De^{1.36} \cdot Pr^{0.2} \quad (11)$$

holding in the range $120 < De < 290$, $125 < Pr < 280$.

The correlation coefficient associated to Eqs. (10) and (11) was found equal to 0.93 and 0.98 respectively.

The present data confirm the outcome of Zachár [16] with regards to the fact that for a given corrugation profile the asymptotic Nusselt number is well described by the Dean number and Prandtl number. Although this, the exponents here found are different from the one numerically predicted by Zachár [16]. The disagreement could be explained by considering that in [16] a different Prandtl number range was considered. The experimental data are compared to the optimal correlations for the smooth and the corrugated tubes in Fig. 9a and b respectively.

Heat and Mass Transfer 59 (2013) 353–362



Egy másik kutatócsoport, Kirkar és társai publikációjukban számításokkal hasonlították össze Rainieri és társai, Darzi és társai valamint az általam kidolgozott összefüggést. Jól látható az alább következő két ábrán, hogy az általam kidolgozott összefüggés illeszkedik leginkább Kirkar és társai által kapott számítási eredményekhez.

Table 6

The correlations Nu and f for single-phase flow in the coiled tubes with corrugated walls from the literature.

Researcher (s)	Correlation
Zachár [5]	$Nu_{CCT} = 0.5855 De^{0.6688} Pr^{0.408} \left(\frac{c}{d}\right)^{0.166} \left(\frac{p}{d}\right)^{-0.192}$ for $\begin{cases} 30 \leq De \leq 1400 \\ 3 \leq Pr \leq 30 \\ 0.044 \leq d/D \leq 0.07 \\ 0.05 \leq c/d \leq 1 \\ 1.48 \leq p/d \leq 3.56 \end{cases}$
Rainieri et al. [14]	$Nu_{CCT} = 0.0191 De^{1.36} Pr^{0.2}$ for $\begin{cases} 120 \leq De \leq 290 \\ 125 \leq Pr \leq 280 \\ 0.031 \leq d/D \leq 0.056 \\ c/d = 0.071 \\ p/d = 1.143 \end{cases}$
Darzi et al. [22]	$Nu_{CCT} = 21.4 De^{0.507} \left(\frac{c}{d}\right)^{1.1} \left(\frac{p}{d}\right)^{-0.25}$ for $\begin{cases} 496 \leq De \leq 2806 \\ 0.062 \leq d/D \leq 0.123 \\ 0.125 \leq c/d \leq 0.25 \\ 1.875 \leq p/d \leq 3.75 \end{cases}$



A sensitivity analysis of the effect of curvature ratio on the thermal-hydraulic performance in helically coiled tubes with corrugated walls

Safak Metin Kırkar^{a,*}, Alişan Gönül^b, Ahmet Selim Dalkılıç^a

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Yıldız Technical University, Istanbul, 34349, Türkiye

^b Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Sırt University, Sırt, 56100, Türkiye

($p_{\text{corrugation}}/d$) is almost 1.043. According to the comparison results as shown in Fig. 5, the correlations proposed by Zachár [5], and Darzi et al. [22] predict the numerical outcomes of the current work within the deviations of 30%. The worst prediction occurs on the correlation of Rainieri et al. [14], which might be explained by the following three main issues. The first issue is that the working fluids used in the existing

Az általam kapott eredményeket fekete körök (●) jelzik az alábbi két ábrán.

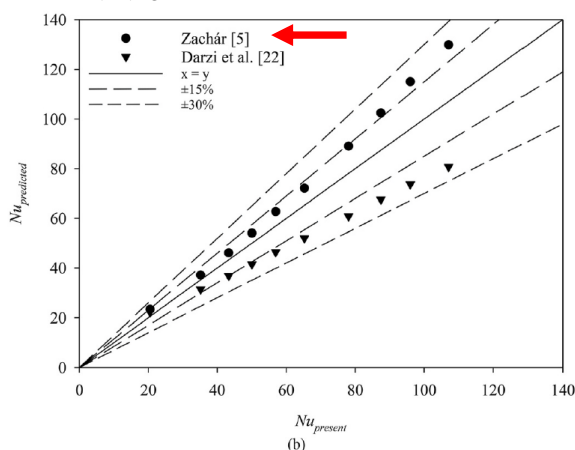
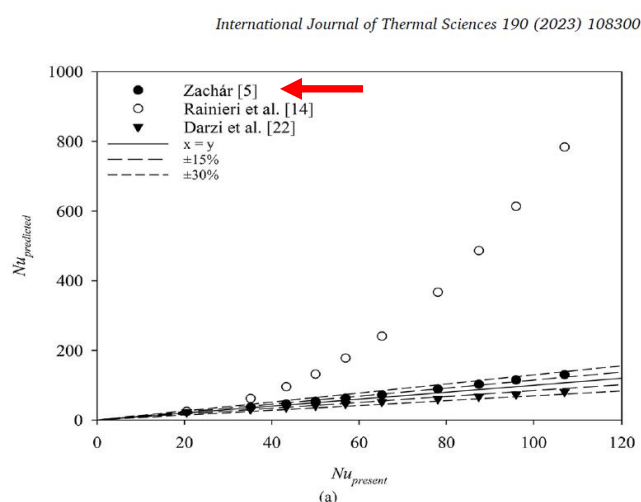
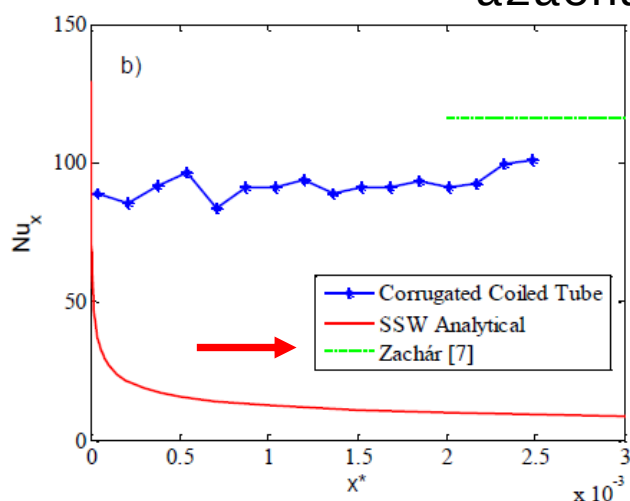


Fig. 5. The comparisons of Nu values of the corrugated coiled tube (CCT-4) with (a) the correlations from the literature, and (b) its close-up view to the correlations by Zachár [5], and Darzi et al. [22].

Fontos megjegyezni továbbá azt is, hogy ezekben a vizsgálatokban teljesen kifejlődött áramlási állapotot feltételezve az általam kidolgozott összefüggés a Nusselt számra vonatkozóan nem tud számot adni, annak a hőcserélő spirál tengelye mentén létrejövő oszcillációs változásairól. Érdeemes lenne egy olyan összefüggés kidolgozása, ahol a hőcserélő spirál tengelye mentén (ϕ) képes egy-egy adott keresztmetszeti helyen a Nusselt szám megadására a különféle áramlási (Re), anyagtulajdonságokkal összefüggő (Pr), valamint geometriai paraméterek (h , p , d) függvényében. Ezt Rainieri és társai által végzett mérések is motiválják, ahol az alább következő ábrán Rainieri és társai által mért és az általam kidolgozott összefüggés összehasonlítása látható.



Experimental investigation on the convective heat transfer enhancement for highly viscous fluids in helical coiled corrugated tubes

S Rainieri^{1,2}, F Bozzoli², L Cattani² and G Pagliarini^{1,2}

¹ SITEA.PARMA Interdepartmental Centre, University of Parma, Parco Area delle Scienze 181/A, I-43124 Parma, Italy.

² Department of Industrial Engineering, University of Parma, Parco Area delle Scienze 181/A I-43124 Parma, Italy

For the smooth coiled tube a thermal entrance effect is instead still present in the Nusselt number distribution. The smooth wall coiled tube Nusselt number values are higher than the values predicted by Janssen and Hoogendoorn [9], while the coiled corrugated wall tube thermal performance approaches to values numerically predicted by Zachár [7].

Az itt látható ábra a Nusselt számok spirálcső tengelye mentén kialakuló változásába nyújt betekintést.

Nemzetközi szakmai közönség véleménye, reakciói a 3., 4., és 5. tézisekhez kötődően

Ezeket az eredményeket is számos kutató és kutatócsoport értékelte rangos nemzetközi szakfolyóiratokban, amelyekről az itt látható beillesztett képek közölnek rövid összefoglalót.

International Journal of Thermal Sciences 159 (2021) 106618



Experimental study on the tube-side thermal-hydraulic performance of spiral wound heat exchangers

International Journal of Heat and Mass Transfer 161 (2020) 120239



Numerical investigation on the flow and heat transfer characteristics of waxy crude oil during the tubular heating

Jian Zhao*, Junyang Liu, Hang Dong*, Weiqiang Zhao, Lixin Wei

Key Laboratory of Enhance Oil and Gas Recovery of Educational Ministry, Department of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, PR China

[10] A. Zachár, Investigation of natural convection induced outer side heat transfer rate of coiled-tube heat exchangers, *Int. J. Heat Mass Transf.* 55 (25–26) (2012) 7892–7901.

[11] Zachar, A.. Investigation of a new tube-in-tube helical flow distributor design to improve temperature stratification inside hot water storage tanks operated with coiled-tube heat exchangers.. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2013:150–161.

Nuclear Engineering and Design 378 (2021) 111176



Numerical investigation on turbulent penetration and thermal stratification for the in-surge case of the AP1000 pressurizer surge line

Bin Tang*, Yuan Zhou*

College of Physics, Key Laboratory of Radiation Physics and Technology of the Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610005, China

transfer characteristics of SWHEs [22–28]. Zachár [22] studied the heat transfer inducing by natural convection on the external surface of the helically coiled-tube heat exchanger. Along the tube-axial direction, the author found a stable thermal boundary layer. The results also indicated that, with the increase of temperature difference between the tube-side inlet temperature and the working fluid temperature in the tank, the heat transfer rate of the external side is slightly dependent on the inner flow rate. Based on the MOGA (multi-objective genetic algorithm)

heating tubes was little affected by its tilt angle. Aiming at the geometric configuration of the heating tubes, Zachar [10,11] studied the natural convection coefficient of the outer surface of the spiral tubes with different curvature under the influence of different flow parameters through numerical simulation. And they studied the evolution process of the velocity and temperature field induced by tubular heating. In addition, Zachar also proposed the method of adding small spiral tubes inside the spiral tubes to realize the transition between hot and cold water to reduce the entrainment effect caused by natural convection. The influence of temperature of heated medium, flow rate and distance between the outer wall and inner wall of the spiral tubes on the velocity and temperature field was studied by numerical simulation. Das [12] analyzed the

storage efficiency. Zachár (2013) investigated a new design of hot water storage tank, which uses a tube-in-tube helical flow distributor to improve temperature stratification, and thus it increases heat storage efficiency. Fan et al. (2019) employed experimental methods of Thermal

International Journal of Energy and Environmental Engineering
<https://doi.org/10.1007/s40095-022-00516-2>

ORIGINAL RESEARCH

Simple analytical considerations on a thermal-flow operating parameters of a heat storage tank

Oktawia Dolna¹  · Weronika Wiśniewska²

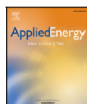
Applied Energy 333 (2023) 120614



Contents lists available at ScienceDirect

Applied Energy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/apenergy



A fast and accurate 1-dimensional model for dynamic simulation and optimization of a stratified thermal energy storage

Alix Untrau^{a,*}, Sabine Sochard^a, Frédéric Marias^a, Jean-Michel Reneaume^a, Galo A.C. Le Roux^b, Sylvain Serra^a

^a Université de Paris et des Pays de l'Adour, IZS UPPA, LaTEP, Paris, France
^b Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, Brazil

3100,

- [25] Zachár A. Analytic solution for convection dominant heat transport induced by buoyant jet entrainment inside hot fluid storage tanks. Sol Energy 2020;195:239–48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.008>.

employed. In the paper by Zachár [4], transient heat transfer process as well as temperature distribution in a hot water storage tank was analysed theoretically, among others. Author of [4] has solved the aforementioned problem by applying a coupled system of a first-order partial and a first-order ordinary differential equation (PDE-ODE). Based on the developed analytical solutions, a temperature distribution within the water in the hot storage tank may be obtained. It

computed using the plume depth [16,44]. Analytical solutions have also been developed, neglecting the diffusion term [25]. Although this model is promising since it is based on physics and is written in the form of ODEs, it is not appropriate for optimization studies because of the discontinuities in the flow rates computed inside the storage tank.