

УДК 643.336547.128

Білецький Едуард Володимирович, доктор технічних наук, заступник директора
Харківський торговельно-економічний інститут Київського національного торговельно-економічного
університету, м. Харків, Україна, 61045, м. Харків, пров. Отакара Яроша, 8, bileckyj@meta.ua.

СУЧАСНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ТЕЧІЇ НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ РІДИН

У статті приведено аналіз сучасного стану досліджень в області теплообміну неньютонівських рідин. Виявлено, що на теперішній час відсутній чіткий алгоритм, який дозволяє проводити теоретичні розрахунки теплообмінних характеристик при течії не ньютонівських рідин.

Ключові слова: теплообмін, неньютонівські рідини, ламінарність, профіль течії, бінгамівська рідина, дисипація.

Белецкий Эдуард Владимирович, доктор технических наук, заместитель директора,
Харьковский торгово-экономический институт Киевского национального торгово-экономического
университета, г. Харьков, Украина, 61045, г. Харьков, пер. Отакара Яроша, 8, bileckyj@meta.ua.

СОВРЕМЕННЫЙ ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

В статье приводится анализ современного состояния исследований в области теплообмена неньютоновских жидкостей. Установлено, что на сегодня отсутствует четкий алгоритм проведения теоретических расчетов теплообменных характеристик при течении в каналах.

Ключевые слова: теплообмен, неньютоновские жидкости, ламинарность, профиль течения, бингамовская жидкость, диссипация.

Biletskiy Eduard Volodimirovich, doctor of technical science, deputy director
Kharkiv institute of trade and economics of Kyiv national university of trade and economics, 8 prov. Otakara Yarosha,
Kharkiv 61045, Ukraine, bileckyj@meta.ua.

CURRENT SURVEY OF STUDIS OF HEAT EXCHANGE IN NON-NEWTONIAN FLUD FLOWS

The article presents the analysis of the current studies in heat exchange in non-Newtonian fluid flows. It is revealed that there is no efficient algorithm for making theoretical calculations of heat exchange data for non-Newtonian fluid flows.

Key words: heat transfer, non-Newtonian fluids, flow profile, bingham fluid, dissipation.

Вступ

Теплообмін відіграє важливу роль у процесах хімічних та харчових виробництв. Детальне вивчення структури теплового потоку дозволяє на високому рівні організувати проведення відповідних технологічних процесів. Відомо, що більшість рідин, що використовуються при виробництві хімічних та харчових продуктів, мають аномальний характер течії, тому вивчення закономірностей процесу теплообміну неньютонівських рідин є дуже актуальним [1].

На сьогоднішній день вивченню теплообміну у неньютонівських рідинах присвячено недостатню кількість наукових робіт і зазвичай це теоретичні дослідження. Нелінійність течії неньютонівських рідин створює додаткові труднощі при рішенні задач конвективного теплообміну, тому часто дослідники вирішують задачі у спрощеному вигляді і як правило тільки для ламінарного режиму руху [2]. Слід зазначити, що для інтенсифікації процесу теплообміну більш сприятливими є турбулентні умови течії, але, враховуючи на те, що більшість неньютонівських рідин є високомолекулярними рідинами, створення турбулентності течії в реальних умовах є досить важким завданням.

Основна частина

При вивченні конвективного теплообміну на підставі формулювання математичної задачі використовується методика, яка приводить до складання системи рівнянь в яку входять: рівняння реологічного стану матеріалу, рівняння безперервності, енергії та рівняння

термодинамічного складу рідини. Рішенням цієї задачі є функції, які задовольняють вказаним рівнянням та визначеним граничним умовам. До крайових умов належать початкові умови, які складаються з розподілу швидкості, температури, і так далі, у початковий період часу.

Якщо рух рідини та теплообмін є стаціонарними, тоді наявність початкових умов відпадає. Граничні умови визначаються геометричною формою області течії системи та напрямками її руху та теплообміну. Течія рідини в трубі обмежена внутрішньою поверхнею стінок, вхідним та вихідним перетинами, які теж складають граничні умови. Як правило, граничні умови для швидкості на поверхні стінки задають без врахування проковзування рідини. Граничні умови для температури формуються на підставі безперервності температурного носія на границі розподілу рідини – стінка.

Вперше задачу про течію рідини з в'язкістю, що залежить від температури, розв'язав Л. С. Лейбензон [3]. Він одержав рішення задачі при умові однорідності температури і в'язкості у поперечному перетині вздовж вісі труби. Рішення задачі було одержано шляхом окремого інтегрування рівнянь руху і теплової енергії. На сьогоднішній день вивчення явища теплообміну при течії степеневих рідин розглядається в залежності від виду профілю швидкості течії.

Розглядаються такі течії: квазітверда течія, при якій величина швидкості є постійною, а показник поведінки рідин $n = 0$; течія з повністю встановленим параболічним профілем, тобто $n = 1$; течія з повним встановленим профілем швидкості в рідині, яка підпорядковується степеневому закону, тобто $n < 1$.

Також у роботі [4] розглядалася течія рідини, яка описується реологічним рівнянням Шведова-Бінгамова з повністю встановленим профілем швидкості.

Треба зазначити, що при формулюванні теоретичних залежностей було допущено низку припущень, а саме: ламінарність руху течії матеріалу, стаціонарність процесу, незалежність властивостей матеріалу від температури, відсутність дисипації, ізотермічність процесу, відсутність пристінного проковзування. З урахуванням вищезазначених припущень теплообмін розглядається окремо для кожного профілю швидкості.

Стисло розглянемо деякі з них. У роботі [5], у випадку квазітвердої течії, після проведення деяких перетворень витрати теплоти за довжиною пропонується визначати за формулою:

$$\dot{Q} = \bar{\alpha}_{cp} \pi d \cdot L \Delta T, \quad (1)$$

де L – довжина труби, м;

ΔT – різниця температур, К.

Виходячи з цього рівняння, після деяких математичних перетворень, одержали формулу для визначення коефіцієнта теплообміну:

$$\alpha_{cp} = \rho v_k c_p \frac{d}{4L} \cdot \frac{T_2 - T_1}{\Delta T}, \quad (2)$$

де ρ – густина рідини, кг/м³,

v_k – середня швидкість ядра, м/с.

Для визначення критерію Nu пропонується використовувати наступну формулу:

$$Nu = \frac{v_k d^2}{2La} \cdot \left\{ \frac{1 - \pi d^2}{1 + \pi d^2} \right\}, \quad (3)$$

де d – діаметр труби, м;

L – довжина труби, м;

a – коефіцієнт температуропровідності, м²/с.

Вперше М. А. Левек у роботі [6] запропонував наближене рішення для повністю стабілізованого профілю течії при $n = 1$. Отримане рівняння дозволяє визначити критерій Нуссельта при ламінарній течії рідини у вигляді:

$$Nu = \frac{\alpha_{cp} d}{\lambda} = 1,62 \left(\frac{\Delta v c_p \rho \delta^3}{8 \lambda L} \right)^{1/3}. \quad (4)$$

де c_p – питома теплоємність матеріалу, кДж/кг·К;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м²·К;

Δv – градієнт швидкості коло стінки, м/с.

Розглянувши запропоновані рівняння, Р.Л. Пігфорд у роботі [7] отримав формулу, яка дозволяє враховувати зміни густини теплового переносу:

$$\frac{\alpha_{cp} d}{\lambda} = 1,75 \delta^{1/3} \cdot \left(\frac{8n}{d} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{C_p \Delta v}{\lambda L} \right), \quad (5)$$

де δ – відношення градієнта швидкості біля стінки для неньютонівської рідини до відповідної величини ньютонівської рідини, яка дорівнює $8v/d$ і визначається як:

$$\delta = \frac{\Delta v}{(8v/d)}.$$

У випадку повного розподілу профілю швидкостей для рідин, які описуються степеневим законом, розподіл швидкостей у випадку ламінарної течії можна визначити за формулою:

$$\left(\frac{3n+1}{n+1} \right) \left[1 - \left(\frac{2y}{d} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] = \alpha \left(\frac{d^2 T}{dz^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} \right). \quad (6)$$

У випадку, якщо $n=0$ рівняння співвідносять з залежностями квазітвердої течії, якщо $n = 1$ то співвідносять з рівняннями, які описують поведінку ньютонівських рідин.

Автори у роботі [8] продовжили дослідження і після математичних перетворень формули (6) запропонували рівняння, яке дозволяє знайти рішення у випадку коли $n = 1/2$ і $n = 1/3$:

$$\frac{d^2 R^*}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dR^*}{dr} + \Delta v \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \cdot R^* = 0. \quad (7)$$

Задачу щодо конвективного теплообміну бінгамівських матеріалів у круглій трубі вперше розглянув Є. Хираї [9]. Однак при рішенні не було враховано умов переходу між ділянками квазітвердої та в'язкої течії. Крім цього, розглядалось явище теплообміну в круглій трубі для моделі Шведова-Бінгама в умовах стаціонарного режиму з встановленим профілем швидкостей з припущенням незмінності фізичних величин і відсутності дисипації. Автори запропонували рівняння:

$$R^2 \nu (R^*) \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{a}{R^*} \cdot \frac{\partial}{\partial R^*} \left(R^* \frac{\partial T}{\partial R^*} \right), \quad (8)$$

де R^* – радіус квазітвердого ядра, м.

З наведеного рівняння, після проведення відповідних перетворень, було отримано рівняння для визначення профілю швидкості течії для реологічної моделі Шведова-Бінгама:

$$\nu(R^*) = \nu_{\max} \left[1 - \left(\frac{R^* - \beta_0}{1 - \beta_0} \right)^2 \right], \quad (9)$$

де β_0 – ділянка квазітвердої течії, м.

Розглянувши наведене рівняння, автори у роботі [10] запропонували формулу, яка

дозволяє отримати теплофізичні параметри теплообміну при ламінарній течії в'язко пластичної рідини у круглій трубі, які співпадають з експериментальними даними.

$$\Theta = \frac{T - T_v}{T_0 - T_v} = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \psi_n(R^*) \exp(-\varepsilon_n^2 Z), \quad (10)$$

де Z – приведена довжина, м.

Але слід зазначити, що аналітичне рішення наведеного рівняння є досить складним завданням. В останній час межі досліджень теплообміну суттєво розширились. У монографії [11] було розглянуто моделювання гідродинаміки та теплопереносу неньютонівських рідин у кільцевих каналах. Було запропоновано методику моделювання процесу теплопереносу при екструзії середовищ різного реологічного стану. Зокрема, особлива увага приділялась напірній течії степеневих рідин у кільцевих каналах поперечного перетину. Були отримані результати розподілу температури по перетину каналу при екструзії різноманітних матеріалів. Розроблена та запропонована математична модель дозволяє здійснювати оптимізацію технологічних параметрів виготовлення кільцевих профілів.

У роботі [12] розглядався теплообмін та тертя неньютонівської рідини при ламінарній конвекції з урахуванням зміни в'язкості. Було досліджено вплив локального теплообміну при примусовій та вільній конвекції в ізотермічній поверхні, охолодженої чи нагрітої по відношенню до циркуляційного середовища. При рішенні були використана модель рідини, реологічний стан яких описувався рівнянням:

$$\mu = k \cdot \dot{\varepsilon}^n. \quad (11)$$

Наведена реологічна модель достатньо добре описує криву течії псевдо-пластичних рідин. Було встановлено, що зі зміною температури у межах пограничного шару у в'язких рідинах сильно зменшується в'язкість. Інші фізичні властивості крапельних рідин досить слабо залежать від температури і практично не впливають на теплообмін.

Висновки

Наведений аналіз проблеми з теплообміну при течії неньютонівських матеріалів дозволяє зробити наступні висновки. На сьогоднішній день відсутній чіткий алгоритм, який би дозволив проводити теоретичні розрахунки з теплообміну, які підтверджувались експериментальним шляхом з високим ступенем вірогідності. Найбільш поширений метод, який використовується при дослідженні теплообміну, є аналіз розмірностей.

Крім цього проведений аналіз літературних джерел свідчить, що проблема теплообміну в умовах перехідного та турбулентного режиму течії неньютонівських матеріалів на сьогоднішній день практично не вивчалась. І якщо турбулентний режим течії для більшості неньютонівських рідин не є характерним, завдяки високій в'язкості матеріалів, то дослідження перехідного режиму має не тільки загальнонаукове, але й прикладне значення. Існують великі класи рідин, які мають в'язкість більшу ніж у води. Течія саме таких рідин у трубах і каналах здійснюється як у ламінарному, так і безпосередньо у перехідному режимах. Відомо, що для ньютонівських рідин перехід між ламінарним і турбулентними режимами здійснюється не при якомусь певному значенні числа Re а досить широкому інтервалі його значень $2320 < Re < 10^4$. І це свідчить, що вказаний інтервал є набагато більшим проміжком ніж існування ламінарного режиму течії. Але виходячи з проведеного аналізу наукової та технічної літератури, можна стверджувати, що проблема опису перехідного режиму є однією із самих складних у сучасній науці і на сьогодні вивчена недостатньо.

З огляду на вищезазначене, актуальним завданням є дослідження і розробка моделей течії неньютонівської рідини не тільки в умовах ламінарного, але і в умовах перехідного режиму течії. Це дозволить, на підставі отриманих даних дослідити теоретичні основи теплообміну між неньютонівською рідиною та навколишнім середовищем, дозволить обчислити коефіцієнти теплообміну, опорів тертя та місцевих опорів, створити модель пристінних течій. Отримані результати дозволять проектувати технологічне обладнання з підвищеними енергозберігаючими та ресурсозберігаючими показниками.

Список літератури

1. Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование : В 5 т. Т. 2 : Механические и гидромеханические процессы / [Д. А. Баранов, В. Н. Блиничев, А. В. Вязьмин и др.]; Под ред.: А. М. Кутепов. К. : Логос – 2002. – 599 с. : ил., табл.
2. Білецький Е. В. Лопухіна О. А. Пути оптимизации технологических процессов пищевых производств // «Химия, химическая технология и экология». Вестник национального технического университета «ХПИ». Сб. научн. тр. – Вып. 23. – Харьков: НТУ«ХПИ» 2001. – С. 34–39.
3. Лейбензон Л. С. О движении подогретой вязкой жидкости / Л. С. Лейбензон // Азербайдж. народное хозяйство. – 1922. – № 2 (3) и 4 (5); 1924; № 3 (27).
4. Селиванов И. В. Теплообмен и трение при ламинарной конвекции в неньютоновских средах с учетом переменной вязкости жидкости / И. В. Селиванов, С. И. Кузьмин // Естественные науки. – 2004. – С. 91–98.
5. Кузьмин С. И. Теплообмен и трение в неньютоновских жидкостях при свободной конвекции / С. И. Кузьмин // Вестн. Астрах. гос. техн. ун-та, 2004. – № 1. – С. 260–267.
6. Lévêque M. A. Les lois de la transmission de chaleur par convection / M. A. Lévêque // Ann. Mines Mem. Ser. – 1928. – 13. – P. 201–299.
7. Pigford R. L., Chem. Engng. Progr. Symp. Service, No.17, 51, 79, 1955.
8. Brodkey R. S. A generalized velocity distribution for non – newtonian fluids / R. S. Brodkey, J. Lee, R. C. Chase // American Institute of Chemical Engineers Journal. – 1961. – V. 7, № 3. – P. 392.
9. Hirai E. AIChE Journal, 5, 130, 1959.
10. Смородинский Э. М. Теплообмен при ламинарном течении вязкопластичных жидкостей в круглых трубах / Э. М. Смородинский, Г. Б. Фройштетер // Теоретические основы химической технологии – М.: Наука. – 1969. – Т. III, № 4. – С. 570–575.
11. Колодяжнов В. Н. Моделирование гидродинамики и теплопереноса для неньютоновских жидкостей в каналах кольцевого поперечного сечения / В. Н. Колодяжнов, С. И. Амзин. – Воронеж : ВГТА, 2005. – 192 с.
12. Boyadger Chr. Non liner mass transfer and hydrodynamic stability / Chr. Boyadger // Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов гидродинамики и тепломассобмена в энергетических установках : Труды 13 Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика А. М. Леонтовича. – М. : МЭИ, 2001. – Т. 1. – С. 203–212.

References

1. Baranov, D. A., Blinichev, V. N., Vyaz'min et al. (2002). Mechanical and hydrodynamical processes. [Mekhanicheskiye i gidromekhanicheskiye protsessy]. In: Kutyepov, A.M. (editor). Processes and machinery of chemical technology. Transfer phenomena, similarity, modeling, designing. [Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. Yavleniya perenosa, mikrokinetiki, modelirovaniye, proyektirvaniye]. In 5 Vol., Vol. 2. Kiev, Logos, 2002, 599 p., illustrations, tables.
2. Biletskiy, E. V., Lopukhina O. A. (2001). Ways of optimization of food production technological processes. [Puti optimizatsii tekhnologicheskikh protsessov pishchevykh proizvodstv]. Vestnik of NTU "HPI", Kharkiv, Vol. 23, P. 34-39.
3. Leybenzon, L. C. (1922). About motion of heated viscous fluid. [O dvizhenii podogretoy viazkoy zhidkosti]. Azerbayzhan state economy, 1922, Vol. 2(3), 4(5), 1924, Vol. 3(27).
4. Selivanov I. V. (2004). Heat exchange and friction at laminar convection in non-Newtonian mediums taking into account fluid viscosity variable. [Teploobmen i treniye v nenyutonovskikh sredakh s uchetom peremennoy viazkosti zhidkosti]. / Selivanov I.V., Kuz'min S.I. In: Yestestvenniye nauki, 2004, P. 91–98.
5. Kuz'min S.I. (2004). Heat exchange and friction in non-Newtonian fluids at free convection. [Teploobmen i treniye v nenyutonovskikh zhidkostiakh pri svobodnoy konveksii]. Vestnik of Astrakhn' state technical university, 2004, Vol. 1, P. 260–267.
6. Lévêque M. A. Les lois de la transmission de chaleur par convection / M. A. Lévêque // Ann. Mines Mem. Ser. – 1928. – 13. – P. 201–299.
7. Pigford R. L., Chem. Engng. Progr. Symp. Service, No.17, 51, 79, 1955.
8. Brodkey R. S. A generalized velocity distribution for non – newtonian fluids / R. S. Brodkey, J. Lee, R. C. Chase // American Institute of Chemical Engineers Journal. – 1961. – v. 7, № 3. – P. 392.
9. Hirai E. AIChE Journal, 5, 130, 1959.
10. Smorodinskiy E. M. (1969). Heat exchange in laminar flow of viscoplastic fluids in round pipes. [Teploobmen pri laminarnom techenii viazkoplastichnykh zhidkostey v kruglykh trubakh] / Smorodinskiy E.M., Froysheter. In: Theoretical fundamentals of chemical technology. [Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii]. Nauka, Moscow, 1969, Vol.3, #4, P. 570–575.
11. Kolodiazhnov V. N. (2005). Modelling of hydrodynamics and heat transfer for non-Newtonian fluids in channels with annular cross-section. [Modelirovaniye gidrodinamiki i teploperenosa dlia nenyutonovskikh zhidkostey v kanalakh kol'tsevogo poperechnogo secheniya]. / Kolodiazhnov V. Amzin C.I. Voronezh: NGTA, 2005, P. 192.
12. Boyadger Chr. (2001). Non liner mass transfer and hydrodynamic stability. In: Physical fundamentals of experimental and mathematical modelling of hydrodynamics and heat mass exchange processes in power installations. Moscow, MEI, 2001, Vol. 1, P. 203–212.

Поступила в редакцию 15.09 2014 г.