

УДК 643.336547.128

Е. В. БІЛЕЦЬКИЙ, кандидат технічних наук, заступник директора  
Харківського торговельно-економічного інституту Київського  
торговельно-економічного університету, м. Харків

## ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОМОЛЕКУЛЯРНИХ ТЕПЛОНОСІЇВ У ГАЛУЗІ РЕОДИНАМИКИ

*В статті розглядається сучасний стан досліджень використання неньютоновських жидкостей в качестве теплоносителей при проведенні теплових процесів на підприємствах хімічної, харчової та переробної галузей*

*У статті розглядається сучасний стан досліджень використання неньютонівських рідин, як проміжних теплоносіїв для проведення теплових процесів на підприємствах хімічної, харчової та переробної галузей.*

### Вступ

Більшість процесів хімічної, харчової та переробної промисловості присвячено вирішенню проблем удосконалення та надання нових якостей хімічним, харчовим продуктам при одночасному зменшенні енерговитрат. Особливості переробки в'язких матеріалів насамперед пов'язані з тепловими процесами та з реологічними властивостями матеріалів [1]. При проведенні теплових процесів одне з головних завдань, що доводиться вирішувати фахівцям – це вибір оптимального теплоносія. Теплоносії, які повинні використовуватися в циркуляційних контурах теплових апаратів, мають відповідати цілому комплексу вимог, до яких належать: сприятливі теплофізичні властивості, хімічна інертність щодо конструктивних матеріалів, пожежо- і вибухонебезпечність, низька леткість, невисокий тиск пари при робочих температурах, нешкідливість для людей і навколишнього середовища, сприятливі техніко-економічні показники [2]. Оскільки універсальних теплоносіїв, що відповідають усім перерахованим вимогам, практично не існує, тому в кожному конкретному випадку обирають теплоносії, який максимально відповідає першорядним за важливістю вимогам з урахуванням технологічної мети його застосування.

### Основна частина

З великої кількості процесів теплообміну переважно вибір теплоносія припадає на користь вологої насиченої пари. На вологу насичену пару впливає дуже велика питома теплота паротворення, крім того вона нетоксична, пожежобезпечна та має оптимальні економічні показники. Незважаючи на вказані переваги цього теплоносія, у нього є суттєві недоліки, а саме: корозія металевих частин під дією вологої пари, утворювання накипу на стінках обладнання, зміна складу теплоносія в процесі експлуатації та відповідно до його теплофізичних властивостей, а також значна залежність підвищеного тиску від температури [2]. Усе вищезазначене приводить до ускладнення та подорожчення конструкцій апаратів саме завдяки збільшенню товщини стінок трубопроводів і нагрівальних порожнин апаратів, ускладнення апаратури та її обслуговування, зниження безпеки експлуатації. У зв'язку з вищезазначеним, на підприємствах хімічної та харчової галузей використовують вологу пару низького тиску до 150 кПа, при отриманні робочої температури 110 °С. Це свідчить про низьку ефективність щодо використання пари на підприємствах хімічної та харчової галузі. Крім цього відома велика кількість теплових процесів, які протікають при температурі 150 °С і вище [2].

З кожним роком потреба у високотемпературних теплоносіях зростає не тільки у хімічній і харчовій промисловості, а й у машинобудівній та переробних галузях. Можливість використання високомолекулярних органічних теплоносіїв у теплових процесах розглядалася у роботах [3, 4]. Було зазначено, що теплоносії повинні мати комплекс властивостей, щоб забезпечити проведення високотемпературних процесів та відсутність недоліків, які характерні для вологої насиченої пари.

У роботах [3, 4] розглядалося питання про можливість використання у теплових апаратах діарилметану-дитолілметану (ДТМ), з температурою кипіння 296 °С, замерзання мінус 24 °С.

Ці рідини жовтого кольору, з різким характерним запахом. Вони можуть використовуватися, як в однофазному, так і двофазному стані (суміш рідина-пар). Ці рідини не викликають корозію металів, мають достатню термічну стійкість, але треба зазначити, що широкого використання вказані теплоносії не зазнали, завдяки токсичності та неприємного запаху. Крім того, для зниження високої температури кипіння, необхідно проводити вакуумування системи, що значно ускладнює конструкцію теплового апарату. Також недоліком є висока температура плавлення і недостатня термостійкість.

Зарубіжними фірмами «Monsato», «Prasil» використовуються терфінільні суміші як теплоносії, які серійно виробляються. До їх основних недоліків слід віднести високу температуру плавлення (20 °С і вище), високу вартість. Переважно вказані суміші використовують для охолодження ядерних реакторів .

У роботі [5] була запропонована поліпшена терфінільна суміш з температурою плавлення мінус 27 °С, але її серійний випуск так і не був започаткований. У деяких видах технологічного устаткування пропонується використовувати як проміжний теплоносій гліцерин, за умови нагрівання до 220...250 °С. Цей теплоносій є вибухобезпечним, неотруйним, має порівняно невисоку вартість. Але при більш високих температурах він розкладається з утворенням акролеїну, який викликає сльозотечу та кашель [5].

Властивості деяких рідин органічних теплоносіїв, які знайшли використання у роботах [3, 4] та наведені у табл. 1 та 2 .

Таблиця 1

Основні показники окремих проміжних теплоносіїв [4]

Найменування теплоносія	Густина при 20 °С, (кг/м <sup>3</sup> )	Температура, °С			Теплоємність при 20° С, (кДж/кг·К)	Теплопровідність, (Вт/м·К)
		плавлення	кипіння, при 1 атм	спалаху		
1	2	3	4	5	6	7
Силіконове мастило Силтерм 800	920	мінус 30	370	160	1,601	0,134
Дітолїлметанові рідини – ДТМ	1089	мінус 32	258	190	1,553	0,125
Мінеральне мастило «Вапор-Т»	920	мінус 30	250	190	1,712	0,11
Марлотерм-L	965	мінус 17	296	136	1,56	0,134
Гліцерин	1269	мінус 18	290	170	2,32	0,284
АМТ – 300	820	мінус 20	300	185	1,57	0,12
Даутерм – ДФС	1063,5	мінус 12	258	113	1,56	0,139

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7
Поліфенілметил-сілоксани (ПМФС)	1100	мінус 60	250	300	1,575.....2,56	0,143
Поліетил-сілоксани (ПЕС)	970... ...1180	мінус 60	250	300	1,72... ...1,92	0,167
Поліметил-сілоксани (ПМС)	910... ...980	мінус 60	300	330	1,632	0,167

Таблиця 2

Основні характеристики сучасних проміжних теплоносіїв [6]

Торгова назва	Склад	Тепло-фізичні показники		Діапазон робочих температур	Експлуатаційні показники	Вартість, грн/кг
		Gr · Pr	Фазовий стан			
1	2	3	4	5	6	7
ПМС-1000	Поліметил-сілоксанові рідини	$1,322 \cdot 10^5$	Рідина	-30... +350	Безпечний	55
Сілтерм 800 Siltherm-800	Диметилполі-сілоксанові рідини	$1,146 \cdot 10^7$	Рідина	-30... +350	Невисока токсичність, обмежений термін експлуатації	60
ПЕС	Поліетил-сілоксанові рідини	$1,984 \cdot 10^4$	Рідина	-30... +350	Безпечний	110
ПФМС	Поліфеніл-метилсілоксанові рідини	$4,796 \cdot 10^3$	Рідина	-30... +350	Безпечний	110
Гліцерин	Трьохатомний спирт	$3,687 \cdot 10^4$	Рідина	-18... +290	Безпечний, обмежений термін експлуатації	10
Марло-терм-L Marlo-term-L	Бензилбензоліві рідини	$3,267 \cdot 10^6$	Рідина	-14... +340	Токсичний, обмежений термін експлуатації	50
АМТ-300 Mobil-term	Вакуум дистилят нафтових мастил	$5,009 \cdot 10^6$	Рідина	-20... +280	Токсичний, обмежений термін експлуатації	20
Вапор-Т	Циліндрове мастило	$5,971 \cdot 10^6$	Рідина	-10... +250	Вибухонебезпечний, обмежений термін експлуатації	25

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5	6	7
ДФС. Dow- therm-A	Дифеніл та дифеніл-оксид	$2,232 \cdot 10^5$	Рідина-пара	+30... 380	Токсичний, обмежений термін експлуатації	50
ДТМ	Дитоліл- метанові рідини	$2,392 \cdot 10^6$	Рідина-пара	+40... 320	Токсичний, обмежений термін експлуатації	40

Серед багатокомпонентних високотемпературних органічних теплоносіїв досить широко використовується дифенільна суміш. Ця суміш використовується в діапазоні температур від 15 °С до 385 °С (короткочасно до 400 °С) як в рідкому, так і пароутворюючому стані. Основними недоліками є відносно висока температура плавлення 12 °С, відносно низька температура кипіння (258 °С), висока вартість [5].

У роботах [4, 5] розглядалось питання про можливість використання як теплоносіїв в мінеральних мастил Вапор-Т, 12-м, 19-Т. Температура кипіння мастил знаходиться в інтервалах 250 °С...300 °С. Вони застосовуються тільки в рідкому стані. Суттєвим недоліком вказаного теплоносія є нетривалий термін збереження термостійкості. Крім того, мастило Вапор-Т має різку залежність в'язкості від температури та високу інерційність нагріву, що призвело, в деяких випадках, до вибуху теплових апаратів. Через названі недоліки мінеральні мастила мало використовуються для обігріву теплових апаратів на підприємствах хімічної та харчової промисловості.

За кордоном використовують мінеральні мастила, що проходять спеціальну обробку, це розширило діапазон температур їх використання до 320 °С. Мастила, які знайшли найбільш поширене використання це: Mobil, Castrol, Shell, ESSO, Arel [5].

Останнім часом науковців-дослідників привертає увагу можливість використання кремнійорганічних рідин (силіконових мастил) як теплоносіїв. У монографії [4] з достатньою повнотою наведені теплофізичні властивості цих рідин, які дозволяють проводити інженерні розрахунки. Успішні спроби використання кремнійорганічних рідин, як теплоносіїв, описані в літературі [3, 4, 7]. У роботах зазначено, що вказані рідини відповідають цілому комплексу вимог до їх термодинамічних, фізико-хімічних, біологічних і технологічних властивостей.

На основі одержаних теоретичних та експериментальних даних були розроблені нові апарати для термостатування готових страв, для охолодження напоїв, жаріння основним способом та у фритюрі [3.4]. Розроблені апарати відзначаються підвищеною надійністю й довговічністю, забезпечують високу якість продукції, а також поліпшення умов праці та екологічного стану на підприємствах харчової промисловості.

Основні властивості вивчених у теперішній час кремнійорганічних рідин вітчизняного виробництва, які рекомендовані для використання на підприємствах різних галузей, наведені у табл. 2.

Вказані фізичні властивості визначають можливість практичного використання деяких кремнійорганічних рідин в досить широкому температурному інтервалі від мінус 70 °С до 370° С. Найбільшу термічну стійкість мають поліфенілметилсилоксанові рідини ПФМС-5 та ПФМС-6, які рекомендують використовувати для циркуляції у контурах теплових апаратів з робочою температурою 350 °С [6].

За кордоном кремнійорганічні рідини, відомі як силіконові мастила, використовуються як теплоносіїв, відомі під торговельними марками TAS-10А, TAS-130, TAS-155, TAS-200, DC-200, DC-702. [98]. Вони використовуються в температурному інтервалі від 70 °С до 350 °С. Головний недолік вказаних теплоносіїв є здатність до гідролізу, відносно велика вартість. Кремнійорганічні рідини, що виробляються на підприємствах хімічної промисловості України мають більш сприятливі економічні показники [6].

Таблиця 3

Основні властивості деяких кремнійорганічних теплоносіїв за даними [6]

Показник	ПМС-10	ПМС-1000	ПФМС-4	ПФМС-6	ФС-Т-5	ХС-2-1ВВ	Сополімер 2
1	2	3	4	5	6	7	8
Густина при 20 <sup>0</sup> С, кг/м <sup>3</sup>	901	965	1100	1079	1090.. ...1100	1030... ...1040	1027... ...1046
Кінематичний коефіцієнт в'язкості при 20 <sup>0</sup> С, м <sup>2</sup> /с · 10 <sup>-6</sup>	9,77	1013	600... 1000	1800...3 000	38...45	85	25...40
Температура спалаху, у відкритому тиглі, <sup>0</sup> С	170	315	335	330	285	330	240
Температура нормального кипіння, <sup>0</sup> С	250	330	290	350	250	250	200
Температура застигання, <sup>0</sup> С	мінус 60	мінус 60	мінус 20	мінус 5	мінус 105	мінус 90	мінус 63
Питома теплоємність при 100 <sup>0</sup> С, Дж/(кг·К)	1760	1565	1657	1657	1838	1998	–
Коефіцієнт теплопровідності при 100 <sup>0</sup> С, Вт/(м · К)	0,125	0,154	0,138	0,139	0,130	0,153	–

В технічному аспекті у кремнійорганічних рідин типу ПМС найважливішою властивістю є їх порівняно слабка залежність в'язкості від температури (зокрема, при температурах нижче 0<sup>0</sup> С), що виключає необхідність застосування потужних циркуляційних насосів у циркуляційних контурах теплових апаратів [6, 7].

Як видно з даних табл. 2 марка ПМС відповідає значенню коефіцієнтів кінематичної в'язкості. Характерні значення в'язкості кремнійорганічних рідин пов'язані з їхньою молекулярною масою. Як правило, кремнійорганічні рідини це високомолекулярні речовини з молекулярною масою  $M$ , що лежить у межах:  $10^2 \leq M \leq 10^6$ .

Величина в'язкості  $\mu_0$  сильно залежить від молекулярної ваги полімеру, експериментальним шляхом установлені такі закономірності [6]:

$$\begin{aligned} \mu_0 &\sim const_1 \cdot M^n, \quad n = 1/2 \div 1, \quad M \leq M_{кр}, \quad M_{кр} \approx 3 \cdot 10^4, \\ \mu_0 &\sim const_2 \cdot M^n, \quad n \approx 3,5, \quad M > M_{кр}, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $M$  и  $M_{кр}$  – це молекулярна маса полімеру, а  $M_{кр}$  – значення молекулярної маси, при якому показник ступеня  $n$  змінюється стрибком.

Кремнійорганічні рідини є степеневими, тобто такими, в'язкість яких залежить від швидкості зрушення за степеневим законом наступного вигляду [7]:

$$\mu = \kappa (\dot{\epsilon}^n) \quad (2)$$

В'язкість кремнійорганічних рідин залежить від температури й тиску таким чином [7]:

$$\mu = \mu_0 (\exp - E / RT) \cdot (\exp P / P^*) \cdot \dot{\epsilon}^{n-1} \quad (3)$$

Перший множник є Арреніусовим, як у хімічній кінетиці, а в другому множнику величина  $(\dot{\epsilon})$  має таке оціночне значення:  $k_p \sim 10^{-8n^{2/h}}$ .

Треба зазначити, що показник ступеня  $n$  для різних кремнійорганічних рідин є різним і його значення слід визначати експериментальним шляхом [7].

### Висновки

Наведені властивості та отримані результати попередніх досліджень, про застосування кремнійорганічних рідин, як теплоносіїв дозволяють зробити наступні висновки. Інтенсивність теплообміну суттєво залежить від руху теплоносія, що визначається гідравлічним опором трубопроводів і каналів теплообмінних пристроїв. При циркуляції кремнійорганічних рідин, як теплоносія, рух у трубах, каналах теплогенеруючих пристроїв буде переважно ламінарним на відміну від води або пари, рух яких є турбулентним. При цьому температурні приграничні шари будуть значно тонші, ніж гідродинамічні, але мале значення температурного приграничного шару не зможе цілком компенсувати зменшення числа Рейнольдса, яке пов'язане з ламінарним характером теплообміну. Крім цього, завдяки достатньо високій в'язкості, зростає навантаження на гідравлічні прилади і тому необхідно вміти проводити інженерні розрахунки гідравлічних опорів при течії рідин високої в'язкості в каналах різної геометрії. Але на сьогодні майже немає науково обґрунтованих розрахункових методик визначення реодинамічних та теплообмінних параметрів течії неньютонівських рідин, що суттєво стримує їх подальше широке використання, як теплоносіїв, на підприємствах хімічної та харчової галузей.

З огляду на це, перспективним напрямком є вивчення реодинаміки та основних теплообмінних параметрів високомолекулярної рідини, як альтернативного теплоносія з метою підвищення ефективності теплообміну при проведенні різноманітних технологічних процесів хімічних та харчових виробництв.

### 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. Білецький Е. В. Розробка апарата для термостатування готових страв з проміжним кремнійорганічним теплоносієм для малих підприємств харчування: дис. канд. техн. наук : 05.18.12: захищена 17.11.1998 р. : затверджена 17.01.1999 р. / Білецький Едуард Володимирович. – Х., 1998. – 155 с.
4. Потапов В. О. Нові технічні рішення в проектуванні обладнання для теплової обробки харчової сировини : монографія в 3 ч. Ч. 1. Підвищення ефективності жарильного обладнання з використанням кремнійорганічних речовин / В. О. Потапов, О. В. Петренко ; за заг. ред О. І. Черевка, В. М. Михайлова. – Х. : ХДУХТ, 2012. – 139 с.

5. Кремнийорганические вещества [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.polimer.net/klassifikaciya-materialov/item/1718-kremnijorganicheskie>
6. Высокотемпературные теплоносители [Электронный ресурс]. – Режим доступа : < <http://www.libriz.net/.../80834-visokotemperaturnie-teplonositeli-i-ih-primenenie.html>>.
8. Олигоорганосилоксаны. Свойства, получение, применение / Соболевский М. В., Скороходов И. И., Гриневич К. П. и др./Под ред. М. В. Соболевского — М.,: Химия, 1985. — 264 с, ил.

## USE OF HIGH MOLECULAR HEAT CARRIERS IN RHEODYNAMICS

E. V. BILETSKIY, Candidate of Science (technology), deputy director  
Kharkiv institute of trade and economics of Kyiv University of trade and economics,  
Kharkiv

*The article analyses state-of-the-art research in the use of non-Newtonian fluids as heat carriers in heat processes in chemical, food, and processing industries.*

1. Baranov, D.A., Blinichev, V.N., Vyaz'min et al. (2002). Mechanical and hydrodynamical processes. [Mekhanicheskiye i gidromekhanicheskiye protsessy]. In: Kutypov, 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, pp. 34-39.
3. Organic silicon substances. [Kremnijorganicheskiye veshchestva]. Available at <http://www.polimer.net/klassifikaciya-materialov/item/1718-kremnijorganicheskie>.
4. Biletskiy, E.V. (1998). Design of the machinery for thermostating prepared food products with intermediate organic silicon heat carriers for small-sized food enterprises. [Rozrobka aparata dlya termostatuvannya gotovykh strav z promizhnim kremnijorganichnym teplonosiyem dlya malykh pidpriyemstv kharchuvannya]. Cand. diss. (tech.), defended 17.11.1998, adopted 17.01.1999. Kharkiv, 155 p.
5. High temperature heat carriers. [Vysokotemperaturniye teplonositeli]. Available at: <http://www.libriz.net/.../80834-visokotemperaturnie-teplonositeli-i-ih-primenenie.html>.
6. Potapov, V.O., Petrenko, O.V. (2012). Improvement of frying equipment using organic silicon substances. [Pidvyshchennya efektyvnosti zharyl'nogo obladnannya z vykorystannyam kremnijorganichnykh rehovyn]. In: Potapov V.O. New technical solutions in designing equipment for heat treatment of raw food materials. [Novi tekhnichni rishennya u proektuvanni obladnannya dlia teplovoyi obrobky kharchovoyi syrovyny]. Editors Cherevka O.I., Mikhaylova, V.M. In 3 Vol., Vol. 1, HDUHT, 2012, 139 p.
7. Soboлевskiy, M.V., Skorokhodov, I.I., Grinevich, K.P. et al. (1985). Oligoorganosiloxanes. Properties, production, employment. [Oligoorganosiloksany. Svoystva, polucheniye, primeneniye]. Editor Soboлевskiy, M.V., Moscow, Khimiya, 264 p.

Поступила в редакцию 16.12 2013 г.