



УКРАЇНА

(19) UA (11) 105399 (13) C2  
(51) МПК  
G01N 25/18 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(21) Номер заявки: а 2012 04878	(72) Винахідник(и): Ткаченко Станіслав Йосипович (UA), Пішеніна Надія Володимирівна (UA), Дишлюк Сергій Васильович (UA)
(22) Дата подання заявки: 18.04.2012	(73) Власник(и): ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 12.05.2014	(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: UA 97021 C2; 26.12.2011 UA 24616 U; 10.07.2007 SU 1078301 A; 07.03.1984 ( ) US 5004354 A; 02.04.1991 JPH 07253404 A; 03.10.1995 JP 2011257351 A; 22.12.2011
(41) Публікація відомостей про заяву: 25.10.2013, Бюл.№ 20	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 12.05.2014, Бюл.№ 9	

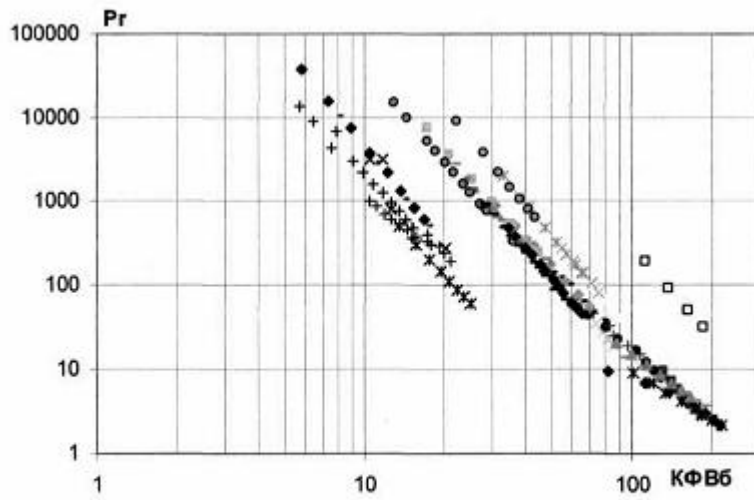
## (54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОВІДДАЧІ ЗА УМОВ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ ОРГАНІЧНОЇ СУМІШІ

### (57) Реферат:

Винахід належить до галузі теплофізичних вимірювань і може бути використаний для оцінки теплофізичних властивостей та визначення коефіцієнтів тепловіддачі багатокомпонентних, багатофазних рідин та сумішей органічного походження. Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші полягає в тому, що вимірюють температури теплоносіїв, визначають експериментальний коефіцієнт конвективної тепловіддачі в базовому режимі теплообміну  $\alpha_{\text{експ}}^{\text{баз}}$  при температурі суміші  $t_c$ , яка відповідає шуканим режимам, а комплекс фізичних властивостей для базового режиму теплообміну визначають за залежністю, яка визначається з врахуванням напрямку теплообміну, експериментально-розрахунковий шуканий коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_{\text{ер}}^{\text{шук}}$  визначають за структурованим критеріальним рівнянням. Проводять серію вимірювань та експериментально визначають залежності комплексу фізичних властивостей, середньої теплосмості, середньої густини від середньої температури органічної суміші, коефіцієнт температурного розширення в даному діапазоні температур, причому проводять додатковий експеримент по визначенню кінематичної в'язкості органічної суміші при температурі навколишнього середовища або близької, а закономірність зміни в'язкості органічної суміші від температури та середньої в заданому діапазоні температур теплопровідності визначається з врахуванням залежності  $K_{\text{ФВ}}^{\text{баз}} = f(t)$ . Значення поправок на напрямок теплообміну в базовому і шуканому режимах розраховують за допомогою теплофізичних властивостей частково-модельної рідини. Вибір частково-модельної рідини та її теплофізичних параметрів здійснюють з урахуванням температур, залежності  $K_{\text{ФВ}}^{\text{баз}} = f(t)$  та графічних залежностей критерію Прандтля від розрахункового комплексу фізичних властивостей для частково-модельних рідин. Функцію перетворення  $\Pi_{\text{ТФВ}}$  та умови і режим теплообміну визначають з використанням реальних

UA 105399 C2

теплофізичних властивостей органічної суміші. Винахід забезпечує значне зменшення похибки визначення  $\alpha_{ер}^{шук}$ , підвищення ефективності способу та зменшення матеріалоемності теплообмінного обладнання.



Фиг. 2

Винахід належить до області теплофізичних вимірювань і може бути використаний для оцінки теплофізичних властивостей та визначення коефіцієнтів тепловіддачі до багатоконпонентних, багатофазних рідин та сумішей органічного походження, що використовуються як сировина в харчовій, переробній промисловості, в системах біоконверсії, біоенергетики.

Відомим є спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші [Патент на корисну модель України № 24616, кл. G01N25/18. заявл. 05.02.2007.: опубл. 10.07.2007., Бюл. №10], який полягає у вимірюванні температури теплоносіїв, вимірюванні маси грійного теплоносія та суміші, а температуру грійного теплоносія та суміші вимірюють через проміжки часу і визначають експериментальний коефіцієнт конвективної тепловіддачі в базовому режимі теплообміну  $\alpha_{\text{експ}}^{\text{баз}}$  при температурі суміші  $t_c$  і температурному напорі між грійною стінкою і сумішшю  $\Delta t$ , які відповідають шуканим режимам, а комплекс фізичних властивостей (КФВ) для базового режиму теплообміну визначають за залежністю

$$\text{КФВ}_{\text{експ}}^{\text{баз}} = \frac{\alpha_{\text{експ}}^{\text{баз}}}{A}, \quad (1)$$

де  $A$  - коефіцієнт, що враховує всі параметри, які входять в критеріальне рівняння для базового режиму теплообміну, окрім теплофізичних властивостей, а з використанням критеріальних рівнянь, які відповідають шуканому режиму теплообміну, і значень комплексу фізичних властивостей для базового режиму розраховують комплекс фізичних властивостей,

що відповідає шуканому режиму теплообміну  $\text{КФВ}_{\text{експ}}^{\text{шук}}$ , причому експериментально-розрахунковий шуканий коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_{\text{ер}}^{\text{шук}}$  визначають за структурованим критеріальним рівнянням з врахуванням  $\text{КФВ}_{\text{експ}}^{\text{шук}}$ .

Недоліком відомого способу є те, що забезпечення одночасної відповідності  $t_c$  і  $\Delta t$  в базових і шуканих умовах практично неможливе, так як при дотриманні рівності  $t_c$  в обох режимах спостерігається розбіжність значень  $\Delta t$ , і навпаки, при досягненні рівності  $\Delta t$ ,  $t_c$  в базових і шуканих умовах неоднакове, і, внаслідок цього, допущення, що значення поправки  $(Pr_p/Pr_{\text{ст}})^{0,25}$  однакове в базових і шуканих умовах теплообміну недостатньо точне. Крім того, не подано обґрунтування вибору модельної рідини та її теплофізичних параметрів для визначення поправки на теплофізичні властивості суміші  $\Pi_{\text{ТФВ}}$ , що призводить до похибки при визначенні  $\alpha_{\text{ер}}^{\text{шук}}$ .

Найбільш близьким по суті є спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші [Патент на винахід України № 97021, кл. G01N25/18(2006.01). заявл. 11.05.2010.: опубл. 26.12.2011., Бюл. №24], який включає вимірювання температури теплоносіїв, причому вимірюють масу грійного теплоносія та суміші, а температуру грійного теплоносія та суміші вимірюють через проміжки часу і визначають експериментальний коефіцієнт конвективної тепловіддачі в базовому режимі теплообміну  $\alpha_{\text{експ}}^{\text{баз}}$  при температурі суміші  $t_c$ , яка відповідає шуканим режимам, а комплекс фізичних властивостей для базового режиму теплообміну визначають за залежністю, яка визначається з врахуванням напряму теплообміну

$$\text{КФВ}_{\text{експ}}^{\text{баз}} = \frac{\alpha_{\text{експ}}^{\text{баз}}}{A \cdot (\Pi_{\text{НТ}})_{\text{б}}^m}, \quad (2)$$

$$A = 0,54 \cdot \frac{(g \cdot \Delta t)^{0,25}}{H^{0,25}}$$

де  $A$  - коефіцієнт, що враховує всі параметри, які входять в критеріальне рівняння для базового режиму теплообміну, окрім теплофізичних властивостей,

$(\Pi_{\text{НТ}})_{\text{б}}^m = (Pr_p/Pr_{\text{ст}})_{\text{б}}^m = (\mu_p/\mu_{\text{ст}})_{\text{б}}^m$  - поправка на напрямок теплообміну в суміші в базовому режимі,

а експериментально - розрахунковий шуканий коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_{\text{ер}}^{\text{шук}}$  визначають за структурованим критеріальним рівнянням

$$\alpha_{\text{ер}}^{\text{шук}} = C \cdot g^{n_1} \cdot \underbrace{\left( \Pi_{\text{ТФВ}} \cdot \text{КФВ}_{\text{експ}}^{\text{баз}} \right)}_{\text{КФВ}_{\text{експ}}^{\text{шук}}} \cdot w^{n_2} \cdot l^{n_3} \cdot \bar{\Delta t}^{n_4} \cdot (\Pi_{\text{НТ}})^m, \quad (3)$$

де  $(\Pi_{\text{НТ}})^m = (Pr_p / Pr_{\text{ст}})^m = (\mu_p / \mu_{\text{ст}})^m$  - поправка на напрямок теплообміну в суміші в шуканому режимі;

$\bar{\Delta t} = (t_c - t_0)$ , де  $t_c$  - температура стінки теплообмінної поверхні, °C,  $t_0$  - при вимушеній течії - температура рідини на вході в трубу, при вільному русі - температура рідини за межами шару, що рухається, °C;

$w$  - визначальна швидкість, м/с;

$l$  - визначальний розмір, м;

$g$  - прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

10  $Pr_p$  - критерій Прандтля за температури рідини (суміші);

$Pr_{\text{ст}}$  - критерій Прандтля за температури стінки;

$C$  - константа, що залежить від режиму теплообміну;

$n_1, n_2, n_3, n_4$  - показники степеня; з врахуванням комплексу фізичних властивостей, що

15 відповідає шуканому режиму теплообміну  $\text{КФВ}_{\text{експ}}^{\text{шук}}$ , який визначають за допомогою функції перетворення  $\Pi_{\text{ТФВ}}$ , причому вибір модельної рідини та її теплофізичних параметрів здійснюють

з урахуванням  $\text{КФВ}_{\text{експ}}^{\text{баз}}$  та  $t_c$ , а значення поправок на напрямок теплообміну в базовому режимі розраховують методом послідовних наближень за допомогою теплофізичних властивостей модельної рідини, приймаючи в першому наближенні модельною рідиною воду, та значення  $\Pi_{\text{ТФВ}}$  і значення поправок на напрямок теплообміну в шуканому режимі розраховують з використанням теплофізичних властивостей модельної рідини. Основним недоліком відомого способу є те, що значення функції перетворення  $\Pi_{\text{ТФВ}}$  і значення поправок на напрямок теплообміну в шуканих умовах розраховують з використанням теплофізичних властивостей модельної рідини. Крім того, в способі не передбачено оцінка таких теплофізичних властивостей для даної органічної суміші, як в'язкість  $\nu$  та теплопровідність  $\lambda$ , та визначення залежності зміни їх від температури і, внаслідок цього, умови і теплообміну визначаються гіпотетично, що призводить до похибки при виборі структурованого критеріального рівняння

теплообміну для шуканих умов, значної похибки визначенні  $\alpha_{\text{ер}}^{\text{шук}}$  та проектування неефективного теплотехнологічного обладнання.

30 В основу винаходу поставлено задачу створення способу визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші, в якому за рахунок дослідження в комплексі теплофізичних властивостей органічної суміші та визначення функції перетворення  $\Pi_{\text{ТФВ}}$  з використанням оцінки реальних фізичних властивостей органічної суміші, досягається можливість оцінки теплофізичних властивостей для даної органічної суміші, визначення залежності зміни їх від температури, підвищення надійності визначення умов

35 теплообміну і границь режимів руху для шуканих умов, що призводить до значного зменшення похибки визначення  $\alpha_{\text{ер}}^{\text{шук}}$ , підвищення ефективності та зменшення матеріаломісткості теплообмінного обладнання.

40 Поставлена задача вирішується способом визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші, що включає вимірювання температури теплоносіїв, причому вимірюють масу грійного теплоносія та суміші, а температуру грійного теплоносія та суміші вимірюють через проміжки часу і визначають експериментальний

45 коефіцієнт конвективної тепловіддачі в базовому режимі теплообміну  $\alpha_{\text{експ}}^{\text{баз}}$  при температурі суміші  $t_c$ , яка відповідає шуканим режимам, а комплекс фізичних властивостей для базового режиму теплообміну визначають за залежністю, яка визначається з врахуванням напряму теплообміну

$$\text{КФВ}_{\text{експ}}^{\text{баз}} = \frac{\alpha_{\text{експ}}^{\text{баз}}}{A \cdot (\Pi_{\text{НТ}})^m},$$

де  $A$  - коефіцієнт, що враховує всі параметри, які входять в критеріальне рівняння для базового режиму теплообміну, окрім теплофізичних властивостей,

$$(\Pi_{HT})_6^m = (Pr_p / Pr_{ст})_6^m = (\mu_p / \mu_{ст})_6^m$$

- поправка на напрямок теплообміну в суміші в базовому режимі, а експериментально - розрахунковий шуканий коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_{ер}^{шук}$  визначають за структурованим критеріальним рівнянням

$$\alpha_{ер}^{шук} = C \cdot g^{n_1} \cdot \underbrace{(\Pi_{ТФВ} \cdot КФВ_{експ}^{баз})}_{КФВ_{експ}^{шук}} \cdot w^{n_2} \cdot l^{n_3} \cdot \Delta t^{n_4} (\Pi_{HT})^m,$$

5 де  $(\Pi_{HT})^m = (Pr_p / Pr_{ст})^m = (\mu_p / \mu_{ст})^m$  - поправка на напрямок теплообміну в суміші в шуканому режимі;

$\Delta t = (t_c - t_0)$ , де  $t_c$  - температура стінки теплообмінної поверхні, °С,  $t_0$  - при вимушеній течії - температура рідини на вході в трубу, при вільному русі - температура рідини за межами шару, що рухається, °С;

10  $w$  - визначальна швидкість, м/с;

$l$  - визначальний розмір, м;

$g$  - прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$Pr_p$  - критерій Прандтля за температури рідини (суміші);

$Pr_{ст}$  - критерій Прандтля за температури стінки;

15  $\mu_p$  - динамічна в'язкість за температури рідини (суміші);

$\mu_{ст}$  - динамічна в'язкість за температури стінки;

$C$  - константа, що залежить від умов теплообміну;

$m, n_1, n_2, n_3, n_4$  - показники степеня; з врахуванням комплексу фізичних властивостей, що

20 відповідає шуканому режиму теплообміну  $КФВ_{експ}^{шук}$ , який визначають за допомогою функції перетворення  $\Pi_{ТФВ}$ , а значення поправок на напрямок теплообміну в базовому режимі розраховують методом послідовних наближень, коефіцієнт  $A$  розраховують за формулою

$A = C \cdot (g \cdot \Delta t)^{0,25} / H^{0,25}$ , де  $H$  - висота поверхні теплообміну, оцінюють реальні теплофізичні властивості органічної суміші і проводять серію базових експериментів, із яких визначають

залежність комплексу фізичних властивостей  $КФВ_{експ}^{баз}(t)$ , середньої теплоємності  $\bar{C}_{р_{експ}}(t)$ ,

25 середньої густини  $\bar{\rho}_{експ}(t)$ , від середньої температури органічної суміші  $\bar{t}$ , коефіцієнт

температурного розширення  $\beta_{експ}(t)$  в заданому діапазоні температур суміші, причому проводиться додатковий експеримент по визначенню кінематичної в'язкості органічної суміші

при температурі навколишнього середовища або близької  $v_0(t_{0,н.с.})$ , а закономірність зміни

в'язкості органічної суміші  $v(t)$  від температури та значення середньої в заданому діапазоні

30 температур суміші теплопровідності  $\bar{\lambda}(t)$  визначається з врахуванням залежності  $КФВ_{експ}^{баз} = f(t)$

значення поправок на напрямок теплообміну в базових умовах розраховують за допомогою теплофізичних властивостей "частково-модельної рідини", причому вибір "частково-модельної рідини" із бази даних та її теплофізичних параметрів із довідника здійснюють з урахуванням

температур  $t_c$  і  $t_0$ , залежності  $КФВ_{експ}^{баз} = f(t)$  та графічних залежностей критерію Прандтля від

35 розрахункового комплексу фізичних властивостей  $Pr_{ч-м} = f(\{КФВ_{експ}^{розр}\}_{ч-м})$  для "частково-модельних рідин", а функцію перетворення  $\Pi_{ТФВ}$  за умовами теплообміну розраховують з використанням оцінок реальних теплофізичних властивостей.

На фіг. 1 представлено залежності критерію Прандтля від розрахункового комплексу

фізичних властивостей  $КФВ_{експ}^{розр}$  в діапазоні  $КФВ_{експ}^{розр} = 10 \dots 100$ , на фіг.2 - в діапазоні  $КФВ_{експ}^{розр}$

40  $= 1 \dots 300$  для різних "частково-модельних рідин": 1 - яблучний сік, концентрація  $c=70\%$ ; 2 - яблучний сік,  $c=60\%$ ; 3 - машинне масло; 4 - мазут; 5 - томатний сік,  $c=10\%$ ; 6 - трансформаторне масло; 7 - масло МС-20; 8 - гліцерин,  $c = 100\%$ ; 9 - соняшникова олія; 10 - цукровий розчин,  $c = 70\%$ ; 11, 12, 13 - гліцерінова вода  $c = 90\%$ ; 85%; 80%. На фіг. 3

представлено залежність густини від температури: 1, 2 - соняшникова олія технічна,

45 вимірювання за допомогою ареометра; 3 - гліцерин-сирець, 4 - гліцерин-дистиллят, вимірювання

методом зважування. На фіг.4. наведено графік зміни температури теплоносіїв в процесі

базового експерименту, один дослід: 1 - холодний теплоносіє, органічна суміш; 2 - гарячий теплоносіє, вода. На фіг. 5. подано приклад експериментальної залежності середньої теплоємності від температури: а) гліцерин-дистилят; б) гліцерин-сирець. На фіг. 6. представлено залежність експериментального базового коефіцієнту тепловіддачі від стінки до суміші від температури суміші: а) гліцерин-дистилят; б) гліцерин-сирець. На фіг. 7. наведено залежність  $K_{\text{ФВ}}^{\text{баз}} = f(\bar{t})$  для гліцерину-дистиляту: 1 - експериментальну, 2 - розраховану за табличними теплофізичними властивостями. На фіг. 8 наведено експериментальну залежність  $K_{\text{ФВ}}^{\text{баз}} = f(\bar{t})$  для гліцерину-сирцю. На фіг. 9 представлено залежність кінематичної в'язкості від температури: 1 - гліцерину-дистиляту, оцінена за п.7 (див. нижче); 2 - гліцерину-дистиляту, довідникові значення; 3 - гліцерину-сирцю, оцінена за п.7 (див. нижче). На фіг. 10 представлено порівняння довідникових і експериментальних значень коефіцієнта теплопровідності гліцерину-дистиляту. На фіг. 11 наведено зіставлення розрахункових значень коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_{\text{розр}}$ , та отриманих за способом  $\alpha_{\text{ЕРМ}}$ , гліцерин-дистилят. На фіг. 12 представлено залежність коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha_{\text{ЕРМ}}$ , отриманих за способом, від температури, гліцерин-сирець: 1 - температурний напір між грійною стінкою та гліцерином-сирцем 10 °С; 2-15 °С; 3-20 °С.

Спосіб здійснюється наступним чином.

Здійснення способу супроводжується конкретним прикладом. Спосіб включає експериментальну і розрахункову частину. Експериментальна частина реалізується на базовій експериментальній установці, яка являє собою портативний пристрій для дослідження інтенсивності теплообміну від твердої циліндричної стінки до органічної суміші, в якому об'єм досліджуваної органічної суміші дозволяє забезпечити закономірності теплообміну, що описуються критеріальними рівняннями зі структурою рівнянь теплообміну у "великому об'ємі" зі квазістабільною вільною конвекцією ньютонівської рідини. В установці реалізуються умови теплообміну за умов вільної конвекції органічної суміші "у великому об'ємі", який названий базовим режимом теплообміну. Суть базового експерименту полягає у періодичному фіксуванні через встановлений проміжок часу температур і гарячого (води) і холодного (органічної суміші) теплоносіїв у п'яти точках вздовж теплообмінної поверхні.

Протягом одного базового експерименту (Е) виконується n одночасних фіксувань розподілу температур (ОФРТ) в грійному та нагріваному теплоносіях у десяти точках, час опитування десяти датчиків 100 мс. Серія базових експериментів (СБЕ) складається із m Е. Для ОФРТ, а, отже, і для Е і СБЕ, виконуються попередні вимірювання мас грійного  $M_1$  та нагріваного  $M_2$  теплоносіїв. Опис експериментальної установки і методики проведення експерименту наведено у [Пішеніна Н. В. Теплообмін в складних сумішах в умовах природної конвекції / Н. В. Пішеніна // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. - Вінниця: Універсум-Вінниця, 2011. - № 2. - С. 124-131]. Розрахункова частина способу містить алгоритм, який дозволяє оцінити інтенсивність теплообміну від твердої стінки до органічної суміші в шуканих умовах теплообміну, які створюються в теплообмінних установках, що проектується.

При викладенні суті способу розуміємо таке: середня температура органічної суміші  $\bar{t}$  - осереднена по висоті теплообмінної поверхні і в часі, яка визначається за результатами вимірювань одного базового експерименту.

За допомогою експериментальної установки для дослідження тепловіддачі за умов вільної конвекції проводять СБЕ по теплообміну в органічній суміші, інформація про теплофізичні властивості якої обмежена, визначають  $\alpha_{\text{експ}}^{\text{баз}}$  для кожного Е. Органічною сумішшю вважається полікомпонентна, одно- та багатофазна рідка система (рідина, розчин, суміш), для якої найчастіше інформація про її теплофізичні властивості обмежена (невідомі).

Розраховують m комплексів фізичних властивостей за рівнянням (2) в першому наближенні  $\left[ K_{\text{ФВ}}^{\text{баз}} \right]_{1 \dots m}^I$  та отримують залежність  $\left[ K_{\text{ФВ}}^{\text{баз}} \right]_{f(\bar{t})}^I$ . При цьому поправку  $(\Pi_{\text{НТ}})^m$  розраховують за осередненими температурами стінки  $\bar{t}_c$  та органічної суміші  $\bar{t}_0$  з використанням теплофізичних властивостей води.

Із отриманої залежності для даної органічної суміші  $\left[ K_{\text{ФВ}}^{\text{баз}} \right]_{f(\bar{t})}^I$  визначають комплекс фізичних властивостей для рідини за температурами стінки  $\bar{t}_c$  -  $\left[ K_{\text{ФВ}}^{\text{баз}} \right]_c^I$ , та органічної суміші  $\bar{t}_0$  -  $\left[ K_{\text{ФВ}}^{\text{баз}} \right]_0^I$  для кожного Е.

Проводиться аналіз бази даних попередньо побудованих графічних залежностей критерію Прандтля від розрахункового комплексу фізичних властивостей  $Pr_{q-m} = f\left(\left\{KФВ_6^{розр}\right\}_{q-m}\right)$  для "частково-модельних рідин", теплофізичні властивості яких достатньо досліджені (див. Фіг.1, Фіг.2). Для даного діапазону  $\left\{KФВ_{експ}^{баз}\right\}_p \dots \left\{KФВ_{експ}^{баз}\right\}_{ст}$  із бази даних вибираємо "частково-

5 модельну рідину", за теплофізичними властивостями якої визначаємо  $(\Pi_{нт})_6^m$  для наступного наближення. Подальше уточнення  $(\Pi_{нт})_6^m$  і розрахунок  $KФВ_{експ}^{баз}$  із  $\alpha_{експ}$  виконують доти, поки розбіжність між значеннями  $KФВ_{експ}^{баз}$  попереднього і наступного наближення складатиме не

більше ніж 3 %. Значення  $KФВ_{експ}^{баз}$  останнього наближення вважають достатніми, а визначена

залежність  $KФВ_{експ}^{баз}(\bar{t})$  є основною залежністю, яка характеризує закон зміни теплофізичних властивостей від температури даної органічної суміші, інформація по теплофізичних властивостях якої обмежена при даних умовах теплообміну. Таким чином, "частково-модельна рідина" це - однорідна рідина або розчин на водній основі, для якої залежність теплофізичних властивостей від температури досліджена. Призначення "частково-модельної рідини" - моделювати в конкретному діапазоні температур зміну ТФВ органічної суміші з невідомими теплофізичними властивостями. Теплофізичні властивості "частково-модельної рідини" вибираються із довідника і застосовуються для оцінювання поправок на напрям теплообміну  $(\Pi_{нт})_6^m$  у визначенні експериментальної характеристики  $KФВ_6^{експ}(\bar{t})$ .

Використовуючи СБЕ визначають залежність середньої теплоємності від температури  $\bar{C}_{p,експ}(\bar{t})$  за рівняннями теплового балансу базової експериментальної установки з врахуванням тепловтрат.

Визначення густини від температури  $\bar{\rho}_{експ}(\bar{t})$ , здійснюють методом зважування та оцінювання коефіцієнта температурного розширення  $\beta(\bar{t})$  в даному проміжку температур проводять з врахуванням  $\bar{\rho}_{експ}(\bar{t})$ .

Проводять додатковий експеримент по визначенню кінематичної в'язкості при температурі навколишнього середовища, або близької до неї  $t_{0,н.с}$ . Тоді, використовуючи залежності  $KФВ_{експ}^{баз}(\bar{t})$ ,  $\bar{C}_{p,експ}(\bar{t})$ ,  $\bar{\rho}_{експ}(\bar{t})$ , та значення  $\beta(\bar{t})$  і  $v_0(t_{0,н.с})$  визначають середній коефіцієнт теплопровідності органічної суміші при температурі навколишнього середовища, або близької до неї,  $\bar{\lambda}_0(t_{0,н.с})$  із формули

$$KФВ_{експ}^{баз} = \underbrace{C_p^{n1} \cdot \rho^{n2} \cdot \beta^{n3}}_A \cdot \underbrace{\lambda^{n4} \cdot v^{n5}}_B, \quad (4)$$

$$30 \quad \lambda = \left( \frac{KФВ_{експ}^{баз}}{C_p^{n1} \cdot \rho^{n2} \cdot \beta^{n3} \cdot v^{n5}} \right)^{1/n4},$$

де  $n1, n2, n3, n4, n5$  - показники степеня, що відповідають умовам теплообміну в базовій експериментальній установці;  $\beta$  - коефіцієнт температурного розширення досліджуваної рідини,  $^{\circ}C^{-1}$ ;  $v$  - кінематична в'язкість,  $m^2/c$ ;  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності,  $Вт/(m \cdot K)$ ;  $\rho$  - густина,  $кг/m^3$ ;  $C_p$  - теплоємність,  $кДж/(кг \cdot K)$ ;  $A$  - комплекс властивостей, які визначаються експериментально на базовій установці,  $B$  - комплекс властивостей, які потрібно визначати іншими методами.

Відомо, що теплопровідність рідин незначно змінюється з температурою, тоді приймають  $\bar{\lambda}(\bar{t}) \approx \bar{\lambda}_0 = const$  в даному діапазоні температур.

Закономірність зміни в'язкості органічної суміші від температури оцінюють за допомогою залежності  $KФВ_{експ}^{баз}(\bar{t})$  таким чином.

Із залежності  $KФВ_{експ}^{баз}(\bar{t})$  визначаємо дві точки з температурами  $\bar{t}_1$  та  $\bar{t}_2$ , та відповідно до формули (4) отримуємо систему рівнянь

$$\begin{cases} \text{КФВ}_{61}^{\text{експ}} = f(\bar{t}_1) = \underbrace{C_{p1}^{n1} \cdot \rho_1^{n2} \cdot \beta_1^{n3}}_{A_1} \cdot \underbrace{\lambda_1^{n4} \cdot v_1^{n5}}_{B_1} \\ \text{КФВ}_{62}^{\text{експ}} = f(\bar{t}_2) = \underbrace{C_{p2}^{n1} \cdot \rho_2^{n2} \cdot \beta_2^{n3}}_{A_2} \cdot \underbrace{\lambda_2^{n4} \cdot v_2^{n5}}_{B_2} \end{cases} \quad (5)$$

де індексами 1 і 2 позначені теплофізичні властивості органічної суміші та їх комплекси при температурах  $\bar{t}_1$  та  $\bar{t}_2$ , відповідно.

За умов, що значення комплексів  $A_1$  та  $A_2$  відомі та  $\overline{\lambda(t)} \approx \overline{\lambda_0} = \text{const}$ , система рівнянь (5) перетворюється в наступне

$$\frac{v_1}{v_2} = \left( \frac{B_1}{B_2} \right)^{1/n5} \cong \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (6)$$

де  $\mu_1, \mu_2$  - динамічна в'язкість рідини при температурах  $t_1, t_2$ , відповідно.

Динамічна в'язкість рідин в залежності від температури змінюється за законом  $\mu_2 = \mu_1 \cdot e^{-\beta_0(t_2-t_1)}$ ,

де  $\beta_0$  - показник степеня, тоді із рівняння (6)

$$\left( \frac{B_1}{B_2} \right)^{1/n5} = e^{\beta_0 \cdot (t_2-t_1)}, \quad (7)$$

звідки знаходимо рівняння визначення показника степеня для конкретної досліджуваної органічної суміші (рідина)

$$\beta_0 = \ln \left[ \left( \frac{B_1}{B_2} \right)^{1/n5} \right] \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} \quad (8)$$

Отже, маючи значення  $v_0, \overline{\lambda_0}$ , закономірності зміни в'язкості, теплоємності, густини від температури, визначають реальні теплофізичні властивості для досліджуваної органічної суміші (рідина) в даному діапазоні температур, з використанням яких здійснюють оцінку границь режимів руху суміші за певних умов теплообміну, визначають шукані умови теплообміну, а також розраховують функцію перетворення  $\Pi_{\text{ТФВ}}$  для визначення комплексу фізичних

властивостей, що відповідає шуканим умовам теплообміну  $\text{КФВ}_{\text{експ}}^{\text{шук}}$  та  $\alpha_{\text{ер}}^{\text{шук}}$ .

Наведемо приклад застосування способу. За органічну суміш, теплофізичні властивості якої не досліджені, умовно прийнято гліцерин-дистилят, з метою перевірки працездатності методу та підтвердження його достовірності. На практиці спосіб, що заявляється, застосований для розрахунків теплотехнологічного обладнання переробки гліцерину-сирцю. Гліцерин-сирець, з яким проводилася серія базових експериментів, має наступний склад: (Сіль ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) - 4 %; Жири - 2,2 %; Вода - 8,3 %; Гліцерин - 85,5 %), і являє собою складну систему, в якій можуть бути реалізовані всі можливі асоціативні та сольватаційні ефекти, а також, накладення їх один на один. В довідковій літературі відсутня інформація про теплофізичні властивості багатокомпонентних розчинів гліцерину. Тому, поряд із результатами перевірних розрахунків способу для гліцерину-дистиляту, подано і результати досліджень та розрахунків коефіцієнтів тепловіддачі для гліцерину-сирцю.

1. Задають початкові дані відносно шуканих умов теплообміну: діапазон температур суміші 30-60 °С; температурний напір між грійною стінкою та сумішшю – 10-25 °С; шукані умови - теплообмін за умов вільної конвекції у "великому" об'ємі біля вертикальної стінки висотою  $H=7,4$  м.

Експериментально досліджують залежність густини суміші  $\bar{\rho}_{2\text{експ}}$  в потрібному діапазоні температур методом зважування або за допомогою набору ареометрів. Для оцінювання залежності середньої густини натурної суміші  $\bar{\rho}_{2\text{експ}}$  від температури досліджувану рідину нагрівають до потрібної температури в установці, заливають в мірний циліндр (250 мл, ГОСТ 1770-74) і зважують на лабораторних електронних вагах, клас точності 4, похибка вимірювання  $\pm 0,01$  г. Одночасно виконують вимірювання температури термометром опору з аналогово-цифровим перетворювачем з точністю  $\pm 0,1$  °С (роздільна здатність). Похибка визначення  $\bar{\rho}_{2\text{експ}}$



знаходиться в межах +2,5...-1,2 %. Внесена корекція на зміну температури під час експериментального визначення густини. В результаті отримуємо графічну залежність (Фіг. 3).

Виконують апроксимацію експериментальних точок (Фіг. 3) і у подальшому густину гліцерину-дистилляту розраховують за емпіричною залежністю  $\rho_{2\text{експ}} = -0,5683t + 1262,6$ , коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,978$ .

Визначають температурний коефіцієнт об'ємного розширення суміші в заданому діапазоні, використовуючи отриману емпіричну залежність, за рівнянням ( $P = \text{const}$ ) [Исаченко В. П. Теплопередача: учебн. для вузов / В. П. Исаченко [и др.] - [3-е изд. доп.]. - М.: Энергия, 1975. - 488 с.].

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \cdot \left( \frac{\Delta \rho}{\Delta t} \right)_{(p)} \quad (9)$$

2. Проводять базовий експеримент. Для проведення одного Е заливають 1 дм<sup>3</sup> органічної суміші в базову експериментальну установку, проводять n ОФРТ. Установка і методика проведення базового експерименту описана у [Пішеніна Н. В. Теплообмін в складних сумішах в умовах природної конвекції / Н.В.Пішеніна // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. - Вінниця: Універсум-Вінниця, 2011. - № 2. - С 124-131]. Необхідна мінімальна кількість Е базового експерименту по теплообміну в натурній органічній суміші повинна дорівнювати не менше  $m_{\text{min}} = 6$ , для достатньої точності визначення експериментальних базових коефіцієнтів теплопередачі  $k_{\text{експ}}$  та тепловіддачі до натурної рідини  $\alpha_{2\text{експ}}$ .

Осереднення температур по висоті теплообмінної поверхні в момент часу  $\tau$  в зовнішній  $t_{\text{сеп1}}$  та внутрішній порожнині базової експериментальної установки  $t_{\text{сеп2}}$  виконують таким чином

$$t_{\text{сеп1}} = \frac{\sum_{i=1}^5 t_{1i}}{i}; \quad t_{\text{сеп2}} = \frac{\sum_{i=1}^5 t_{2i}}{i}; \quad (10)$$

де  $i$  - кількість термометрів.

Результатом Е є графік залежності зміни осередненої температури теплоносіїв в часі (Фіг. 4).

Розраховують різницю температур, осереднених по висоті теплообмінної поверхні

$$\Delta t_{\text{сеп1}} = t'_{\text{сеп1}} - t''_{\text{сеп1}};$$

у зовнішній порожнині базової установки

$$\text{у внутрішній посудині базової установки} \quad \Delta t_{\text{сеп2}} = t''_{\text{сеп2}} - t'_{\text{сеп2}};$$

де  $t'_{\text{сеп1}}$ ,  $t'_{\text{сеп2}}$ ,  $t''_{\text{сеп1}}$ ,  $t''_{\text{сеп2}}$  - осереднена по висоті теплообмінної поверхні температура у зовнішній та внутрішній порожнині в початковий і кінцевий момент часу експерименту, відповідно. Визначають середній температурний напір між грійним теплоносієм і органічною сумішшю  $\bar{\Delta t}$ , для чого проводять осереднення температур по висоті теплообмінної поверхні і в часі у зовнішній  $\bar{t}_1$  та внутрішній порожнині  $\bar{t}_2$

$$\bar{t}_1 = \frac{\sum_{j=1}^n t_{\text{сее1}j}}{n}; \quad \bar{t}_2 = \frac{\sum_{j=1}^n t_{\text{сее2}j}}{n}; \quad (11)$$

де  $n$  - кількість ОФРТ за час проведення досліду.

3. Виконують п. 2  $m=17$  разів, змінюючи початкову температуру суміші та гарячого теплоносія таким чином, щоб охопити заданий діапазон температур.

4. Виконують обробку результатів базового експерименту. Обробка результатів вимірювань і отримання експериментального коефіцієнта тепловіддачі описано у [Ткаченко С.Й. Тепломасообмінні та гідродинамічні процеси в елементах систем біоконверсії: монографія / С. Й. Ткаченко, Н. В. Резидент. - Вінниця: Універсум - Вінниця, 2011. - 132 с.]. Для кожного досліду із рівняння теплового балансу установки експериментально визначають залежність середньої теплоємності суміші від температури

$$Q_2 = Q_1 - Q_{\text{втр}}, \quad (12)$$

тепловий потік, який надходить від гарячого теплоносія

$$Q_1 = \frac{M_1 \cdot C_{p1} \cdot \Delta t_{сер1}}{\tau}, \quad (13)$$

т тепловий потік, що сприймається холодним теплоносієм (натурною рідиною)

$$Q_2 = \frac{M_2 \cdot \overline{C_{p2експ}} \cdot \Delta t_{сер2}}{\tau}, \quad (14)$$

де  $M_1, M_2, C_{p1}, C_{p2}$  - маса та питома теплоємність гарячого і холодного теплоносіїв, відповідно. Гарячим теплоносієм є вода, тоді  $M_1, M_2, C_{p1}$  - відомі,  $C_{p2}$  - невідома, яку визначають із рівняння (14)

$$\overline{C_{p2експ}} = \frac{Q_2 \cdot \tau}{M_2 \cdot \Delta t_{сее2}}$$

При цьому  $Q_{втр}$  оцінюють із тарувального графіка залежності тепловтрат базової установки від температури теплоносія. Загальні максимальні тепловтрати установки знаходяться в межах 9-11 Вт, що становить 2,5-7,5 % від загального теплового потоку [Пішеніна Н. В. Теплообмін в складних сумішах в умовах природної конвекції / Н. В. Пішеніна // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. - Вінниця: Універсум-Вінниця, 2011. - № 2. - С. 124-131].

Приймають  $Q_2$  за визначальний тепловий потік у подальших розрахунках.

За результатами СБЕ отримують залежність (середньої теплоємності від температури (Фіг. 5).

Визначають експериментальний коефіцієнт теплопередачі в системі [Ткаченко С.Й.Тепломасообмінні та гідродинамічні процеси в елементах систем біоконверсії: монографія / С. Й. Ткаченко, Н. В Резидент. - Вінниця: Універсум - Вінниця, 2011. - 132 с.]

$$k_{експ} = \frac{Q_2}{F_{то} \cdot \Delta t} \quad (15)$$

де  $F_{то}$  - площа теплообмінної поверхні;  $\Delta t = \overline{t_1} - \overline{t_2}$  - середній температурний напір між холодним і гарячим теплоносієм.

Визначають експериментальний коефіцієнт тепловіддачі від стінки до суміші  $\alpha_{2експ}^б$  [Ткаченко С. Й. Тепломасообмінні та гідродинамічні процеси в елементах систем біоконверсії: монографія / С.Й.Ткаченко, Н. В Резидент. - Вінниця: Універсум - Вінниця, 2011. - 132 с.]

$$\alpha_{2експ}^б = \left( \frac{1}{k_{експ}} - \frac{1}{\alpha_1} - \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} \right)^{-1}, \quad (16)$$

де  $\alpha_1$  - розрахунковий коефіцієнт тепловіддачі від гарячого теплоносія (води) до стінки;  $\alpha_1$  визначається за критеріальними рівняннями, які описують умови теплообміну у зовнішній порожнині установки з використанням теплофізичних властивостей.  $\delta_{ст}, \lambda_{ст}$  - товщина та теплопровідність стінки теплообмінної поверхні;  $\overline{t_{ст}}$  - середня температура стінки, яка розраховувалась за формулою  $\overline{t_{ст}} = \overline{t_1} - 0,25 \cdot \Delta t_б$  із подальшим уточненням.

Прийнято, що у зовнішній порожнині базової установки відбувається теплообмін за умов вільної конвекції у "великому об'ємі", ламінарний режим руху гарячого теплоносія. Відповідно, розрахунок  $\alpha_1$  виконують за рівняннями

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{H_б}; \quad \alpha_1 = 0,76 \cdot \left( \frac{g \cdot \beta_1 \cdot (\overline{t_1} - \overline{t_{ст}}) \cdot H_б^3 \cdot Pr_p}{\nu_1^2} \right)^{0,25} \cdot \frac{\lambda_1}{H_б} \cdot \left( \frac{Pr_p}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \quad (17)$$

Результат розрахунків за (10-16) для експерименту, наведеному на Фіг. 4 представлено нижче у табл. 1.

Таблица 1

Результати обробки одного базового експерименту Фіг. 4

$t_{сер1}$	$t_{сер2}$	$\overline{\Delta t}$
64,5	45,8	18,7
Експериментальна середня теплоємність гліцерину-дистилляту		
$\overline{Cp}_{2експ}$	Дж/(кгК)	2817,9

кількість теплоти, переданої гарячою водою	кількість теплоти, що прийнято гліцеринном		Експериментальний коефіцієнт теплопередачі	Відсоток тепловтрат	Температура стінки (остаточне уточнення)
$Q_1$ , Дж	$Q_2$ , Дж	$Q_2$ , Вт	$k_{експ}$	%	$\overline{t_{ст}}$
36547,7	32165,2	89,3	145,1	11,9	59,8

Теплопередача у великому об'ємі (зовнішня порожнина, розрахункові значення)

$Gr_1$	$Ra_1$	$Nu_1$	$\alpha_1$
1.5E+08	4,3E+08	106,9	648,5

$\alpha_{2експ}^б$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)
187

5

Отримують експериментальні залежності базового коефіцієнта тепловіддачі в заданому діапазоні температур. Результати обробки дослідів, для гліцерину-дистилляту та гліцерину-сирцю наведено на Фіг. 6. 5. Знаходять комплекс  $KФВ_б^{експ}$  із базового коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_{2експ}^б$  методом ітерацій. Для визначення базового комплексу  $KФВ_б^{експ}$  із  $\alpha_{2експ}^б$  застосовують

10

$$\alpha_{2експ}^б = 1,3 \cdot KФВ_б^{експ} \cdot \underbrace{\left[ g^{0,25} \cdot \overline{\Delta t}_б^{0,25} \cdot N_б^{-0,25} \right]}_{\Pi_б} \cdot \left( \frac{Pr_p}{Pr_{ст}} \right)_б^{0,25}, \quad (18)$$

ламінарного руху теплового шару де  $\Pi_б$  - множник, який враховує визначальний геометричний параметр базової експериментальної установки  $N_б$  та температурний напір  $\overline{\Delta t}_б = \overline{t_{ст}} - \overline{t_2}$  між твердою стінкою та органічною сумішшю;  $g$  - прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $(Pr_p/Pr_{ст})^{0,25}$  - поправка врахування напрямку теплообміну;  $Pr_p$  - критерій Прандтля для суміші за температурою суміші;  $Pr_{ст}$  -

15

$$KФВ_б^{експ} = \frac{\alpha_{2експ}^б}{1,3 \cdot \Pi_б \cdot \left( \frac{Pr_p}{Pr_{ст}} \right)_б^{0,25}},$$

критерій Прандтля за температурою стінки. Визначають  $KФВ_б^{експ}$  (19) уточнюючи поправку на напрямок теплообміну  $(Pr_p/Pr_{ст})^{0,25}$  методом послідовних наближень з використанням ТФВ "частково-модельної" рідини, який наведено вище. Результат розрахунків за формулами (18, 19) для експерименту, наведеному на Фіг. 4 подано у табл. 2.

20

Таблица 2

$\Pi_б$	$\overline{t_{ст}}$	$KФВ_б^{експ}$
5,6	60	24,59

Результат обробки дослідів базового експерименту гліцерину-дистилляту за пп. 2-5 і отриману залежність  $KФВ_б^{експ}(t)$  подано на Фіг. 7, для чого за п. 5 виконано 4 наближення.

"Частково-модельні" рідини, що приймалися для ітераційного визначення  $(Pr_p/Pr_{ст})^{0,25}$  наведено у табл. 3.

Таблиця 3

«Частково-модельні» рідини для визначення  $KФВ_6^{експ}(t)$

1 наближення $(Pr_p/Pr_{ст})^{0,25}$ за ТФВ* води	2 наближення $(Pr_p/Pr_{ст})^{0,25}$ за ТФВ яблучного соку 70 %	3 наближення $(Pr_p/Pr_{ст})^{0,25}$ за ТФВ трансформаторного масла	4 наближення $(Pr_p/Pr_{ст})^{0,25}$ за ТФВ гліцерину 100 %
---	---	---	---

\*Примітка: ТФВ - теплофізичні властивості; "частково-модельна рідина не характеризує органічну суміш по ТФВ, а тільки застосовується для визначення  $(Pr_p/Pr_{ст})^{0,25}$ .

- 5 Розбіжність експериментальних і розрахованих за довідниковими ТФВ значень комплексів  $KФВ_6^{експ}(t)$  (Фіг. 7) у середньому становить 5-10 %. Експериментальну залежність  $KФВ_6^{експ}(t)$  для гліцерину-сирцю (Фіг. 8) отримано аналогічно, виконуючи 2 наближення, при цьому для ітераційного визначення  $(Pr_p/Pr_{ст})^{0,25}$  "частково - модельними" рідинами прийнято воду та гліцерин-дистилят. 6 Виконують дослідження і визначають кінематичну в'язкість  $\nu_0, \nu_0''$ , при температурах навколишнього середовища або близьких  $t_0, t_0''$ , за допомогою віскозиметра Енглера, або, за наявності, ротаційних віскозиметрів. Результат вимірювань кінематичної в'язкості гліцерину-дистиляту і гліцерину-сирцю наведено у табл. 4.

Таблиця 4

Результати вимірювань кінематичної в'язкості

Температура $t_{0,н.с.}$	Кінематична в'язкість $m^2/c$	Температура $t_{0,н.с.}$	Кінематична в'язкість $m^2/c$
Гліцерин-дистилят		Гліцерин-сирець	
28,3	0,000479	41,1	0,000311
30	0,000481	33,4	0,00035
28,7	0,000568	36,5	0,000319
29,1	0,000494	45,7	0,000242
30	0,000500	47	0,000187
середнє значення 29,2	0,000504	40,7	0,000282

- 15 7 Виконують оцінювання теплофізичних властивостей суміші з врахуванням експериментальної залежності  $KФВ_6^{експ}(t)$  (Фіг.7) та залежностей густини і середньої теплоємності (Фіг. 3, 5).

Визначена залежність  $KФВ_6^{експ}(t_2)$ , характеризує закон зміни ТФВ досліджуваної рідини від

$$KФВ_6^{експ} = \underbrace{C_p^{0,25} \cdot \rho^{0,25} \cdot \beta^{0,25}}_A \cdot \underbrace{\lambda^{0,75} \cdot \nu^{0,75}}_B = f(t_2)$$

температури , (20)

- 20 де А - комплекс ТФВ, які оцінюємо на базовій експериментальній установці та за допомогою додаткових експериментів:  $\bar{C}_p^{експ}(t_2)$ ,  $\bar{\rho}^{експ}(t_2)$ ,  $\beta(t_2)$ ; В - комплекс ТФВ, які визначаємо наступним чином.

Із  $KФВ_6^{експ}(t_2)$  виділяють дві точки  $t_1$  і  $t_2$ , отримують систему рівнянь

$$\begin{cases} \text{КФВ}_{61}^{\text{експ}} = f(\bar{t}_{\tau 1}) = \underbrace{C_{\rho 1}^{0,25} \cdot \rho_1^{0,25} \cdot \beta_1^{0,25}}_{A_{\tau 1}} \cdot \underbrace{\lambda_1^{0,75} \cdot \nu_1^{-0,25}}_{B_{\tau 1}} \\ \text{КФВ}_{62}^{\text{експ}} = f(\bar{t}_{\tau 2}) = \underbrace{C_{\rho 2}^{0,25} \cdot \rho_2^{0,25} \cdot \beta_2^{0,25}}_{A_{\tau 2}} \cdot \underbrace{\lambda_2^{0,75} \cdot \nu_2^{-0,25}}_{B_{\tau 2}} \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \lambda_1^{0,75} \cdot \nu_1^{-0,25} = B_{\tau 1} = \text{КФВ}_{61}^{\text{експ}} / A_{\tau 1} \\ \lambda_2^{0,75} \cdot \nu_2^{-0,25} = B_{\tau 2} = \text{КФВ}_{62}^{\text{експ}} / A_{\tau 2} \end{cases} \quad (22)$$

За результатами базового експерименту - залежність  $\text{КФВ}_6^{\text{експ}}(\bar{t}_2)$ , та результатами додаткового експерименту - конкретного значення при  $\bar{t}_{0,\text{н.с.}} - \nu_0(t_{0,\text{н.с.}})$ , визначають із (20)

5 середній коефіцієнт теплопровідності досліджуваної  $\bar{\lambda}_0(t_{0,\text{н.с.}})$  у проміжку температур  $t_{0,\text{н.с.}} = (t_0 \dots t_0)$ . Під час дослідів визначення  $\nu_0(t_{0,\text{н.с.}})$  відстежували зміну температури. У зв'язку з тим, що теплопровідність рідин незначно змінюється з температурою, приймають що  $\lambda_1 \approx \lambda_2 \approx \bar{\lambda}_0 = \bar{\lambda}(t)$ . В результаті перетворень із (22) отримують рівняння

$$\frac{\nu_1}{\nu_2} = \left( \frac{B_{\tau 1}}{B_{\tau 2}} \right)^{-1/0,25} \cong \frac{\mu_1}{\mu_2}, \quad (23)$$

10 де  $\mu_1, \mu_2$  - динамічна в'язкість рідини при температурах  $t_{\tau 1}, t_{\tau 2}$ , відповідно,

$$\text{якщо } \mu_2 = \mu_1 \cdot e^{-\beta_0 \cdot (t_2 - t_1)}, \quad (24)$$

$$\text{тоді } \left( \frac{B_{\tau 1}}{B_{\tau 2}} \right)^{-4} = e^{\beta_0 \cdot (t_{\tau 2} - t_{\tau 1})}, \quad (25)$$

звідки знаходять рівняння визначення показника степеня для конкретної досліджуваної органічної суміші

$$\beta_0 = \ln \left[ \left( \frac{B_{\tau 2}}{B_{\tau 1}} \right)^4 \right] \cdot \frac{1}{t_{\tau 2} - t_{\tau 1}}. \quad (26)$$

15

Залежність кінематичної в'язкості від температури для натурної суміші будують за рівнянням

$$\nu(\bar{t}_2) = \frac{1}{\rho(\bar{t})} \mu(t_0) \cdot e^{-\ln \left[ \left( \frac{B_2}{B_1} \right)^4 \right] \cdot \frac{(t - t_0)}{t_{\tau 2} - t_{\tau 1}}}, \quad (27)$$

де  $t$  - поточне значення температури. Для прикладу застосування методики (20-27) вибрали дві контрольних точки із залежності  $\text{КФВ}_6^{\text{експ}}(\bar{t}_2)$  гліцерину-дистилляту з температурами  $\bar{t}_{\tau 1} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\bar{t}_{\tau 2} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ . Результати оцінювання теплофізичних властивостей гліцерину-дистилляту за п. 7, а також розрахункові коефіцієнти до формул (20-27) наведено нижче у табл. 5, 6.

20

Таблица 5

Оцінювання  $\bar{\lambda}_0(t_{0,\text{н.с.}})$  із застосуванням  $\text{КФВ}_6^{\text{експ}} = f(\bar{t})$

Початкові (експериментальні) дані:									
	t	$\mu$	$\rho$	$\bar{\lambda}_0(t_{0,\text{н.с.}})$	$\nu$	Ср експ	$\beta$	КФВ6	Pr
	$^\circ\text{C}$	Па·с	кг/м <sup>3</sup>	Вт/(мК)	м <sup>2</sup> /с	кДж/(кгК)	$^\circ\text{C}^{-1}$		
$\bar{t}_{\tau 1} \quad t_0$	30	0,61	1245,6	0,306	0,000491	2,48	0,000459	16,97	4944
$\bar{t}_{\tau 2}$	45	0,21	1237,0	0,306	0,000169	2,55	0,000459	22,28	1747

Таблиця 6

Розрахункові коефіцієнти та комплекси до формул (21-27)

Комплекси (21)	$A_{T1}$	6,14
	$A_{T2}$	6,17
	$B_{T1}$	2,77
	$B_{T2}$	3,61
Коефіцієнт (26)	$\beta_0$	0,07

Оцінені розрахунком теплофізичні властивості гліцерину-дистилляту за п. 7, якщо прийняти, що теплопровідність в даному діапазоні температур стала наведено у табл. 7.

Таблиця 7

Оцінені ТФВ гліцерину-дистилляту за контрольними точками  $\bar{t}_{T1} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\bar{t}_{T2} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$

t	$\mu$	$\rho$	$\bar{\lambda}(t)$	$\nu$	Ср експ	$\beta$	КФВб	Pr
$^\circ\text{C}$	Па·с	кг/м <sup>3</sup>	Вт/(мК)	м <sup>2</sup> /с	кДж/(кгК)	$^\circ\text{C}^{-1}$		
20	1,25	1251	0,306	0,00099	2,43	0,000459	13	9890
25	0,87	1248	0,306	0,00070	2,45	0,000459	15	6993
35	0,43	1243	0,306	0,00034	2,50	0,000459	19	3495
40	0,29	1240	0,306	0,00024	2,52	0,000459	21	2471
45	0,21	1237	0,306	0,00017	2,55	0,000459	22	1747
50	0,15	1234	0,306	0,00012	2,57	0,000459	24	1234
55	0,10	1231	0,306	$8,4 \cdot 10^{-05}$	2,59	0,000459	26	872
60	0,07	1229	0,306	$5,9 \cdot 10^{-05}$	2,62	0,000459	28	616
65	0,05	1226	0,306	$4,1 \cdot 10^{-05}$	2,64	0,000459	29	317
70	0,035	1223	0,306	$2,9 \cdot 10^{-05}$	2,67	0,000459	31	224
75	0,025	1220	0,306	$2,0 \cdot 10^{-05}$	2,69	0,000459	33	158

5

Для перевірки вибрали інші дві контрольні точки із залежності  $\text{КФВ}_b^{\text{експ}}(\bar{t}_2)$  з температурами  $\bar{t}_0 = \bar{t}_{T1} = 46 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\bar{t}_{T2} = 58 \text{ }^\circ\text{C}$ . Результати оцінювання теплофізичних властивостей гліцерину-дистилляту за п. 7, наведено у табл. 8.

Таблиця 8

Оцінені ТФВ гліцерину-дистилляту за контрольними точками  $\bar{t}_{T1} = 46 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\bar{t}_{T2} = 58 \text{ }^\circ\text{C}$ .

t	$\mu$	$\rho$	$\lambda$	$\nu$	Ср експ	$\beta$	КФВб	Pr
$^\circ\text{C}$	Па·с	кг/м <sup>3</sup>	Вт/(мК)	м <sup>2</sup> /с	кДж/(кгК)	$^\circ\text{C}^{-1}$		
20	1,81	1251	0,307	0,0014	2,43	0,000462	9	14327
25	1,21	1248	0,307	0,00096	2,45	0,000462	11	9638
35	0,54	1243	0,307	0,00043	2,50	0,000462	16	4361
40	0,36	1240	0,307	0,00029	2,52	0,000462	19	2933
45	0,24	1237	0,307	0,00019	2,55	0,000462	22	1972
50	0,16	1234	0,307	0,00013	2,57	0,000462	24	1326
55	0,11	1231	0,307	$8,6 \cdot 10^{-05}$	2,59	0,000462	27	892
60	0,07	1229	0,307	$5,7 \cdot 10^{-05}$	2,62	0,000462	29	600
65	0,05	1226	0,307	$3,8 \cdot 10^{-05}$	2,64	0,000462	32	317
70	0,03	1223	0,307	$2,6 \cdot 10^{-05}$	2,67	0,000462	34	224
75	0,02	1220	0,307	$1,7 \cdot 10^{-05}$	2,69	0,000462	37	158

10

Порівняння залежностей кінематичної в'язкості, гліцерину-сирцю, гліцерину-дистилляту та коефіцієнта теплопровідності від температури, отриманої за способом у п. 7 (табл. 7, 8) із табличними значеннями для гліцерину-дистилляту наведено на Фіг 9, Фіг. 10. 8.

Виконують перевірку шуканих умов теплообміну, розраховують безрозмірні числа Грасгофа  $Gr_h$  та Прандтля  $Pr$ , Рейнольдса  $Re$  за оціненими ТФВ органічної суміші

$$Gr_h = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot H_1^3 \cdot \rho^2}{\mu^2}; Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda}, Re = \frac{w \cdot \ell}{\nu} \quad (28)$$

9. Розраховують коефіцієнти тепловіддачі в шуканих умовах (інших, відмінних від базових умов) теплообміну  $\alpha_{ер}^{шук}$ , для чого визначають комплекс фізичних властивостей для шуканого режиму  $KФВ_{експ}^{шук}$ .

$$KФВ_{експ}^{шук} = \Pi_{ТФВ} \cdot KФВ_{експ}^{баз} \quad (29)$$

Для цього використовується функція перетворення  $\Pi_{ТФВ}$ , яка являє собою поправку на перехід від базових умов - до шуканих, відповідає критеріальному рівнянню для певних шуканих умов, і включає теплофізичні властивості. Функція перетворення  $\Pi_{ТФВ}$  розраховують за реальними теплофізичними властивостями досліджуваної органічної суміші у даному діапазоні

15 температур і умовах теплообміну, а  $KФВ_б^{експ}$  отримують за допомогою базового експерименту. Реальними для досліджуваної органічної суміші вважаємо теплофізичні властивості, які оцінено експериментально для конкретного діапазону температур та з використанням

експериментальної характеристики суміші  $KФВ_б^{експ}(t)$  за п.7.

20 Формула для розрахунку функції перетворення  $\Pi_{ТФВ}$  отримується із рівняння  $\Pi_{ТФВ} = KФВ^{шук}/KФВ_б$ , де залежності комплексів фізичних властивостей для базових умов теплообміну  $KФВ_б$  і шуканих умов теплообміну  $KФВ^{шук}$  отримують в результаті приведення до розмірного вигляду критеріальних рівнянь, що описують базові і шукані умови теплообміну, відповідно. Наприклад, для переходу із базових умов, де вільна конвекція, ламінарний режим руху, до шуканих умов теплообміну

25 - за умов вільної конвекції у "великому" об'ємі біля вертикальної стінки, турбулентний рух,  $\Pi_{ТФВ}$  визначається за формулою [Патент України на винахід № 97021, (51) МПК (2006.01) G01N 25/18 Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші Ткаченко С.И., Пішеніна Н.В., Резидент Н.В; заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. - №а201005661; заявл. 11.05.2010; опубл. 26.05.2011, Бюл.№2.]

$$\Pi_{ТФВ} = \frac{(\beta_p \cdot C_p \cdot \rho_p)^{0,08}}{(\lambda_p \cdot \nu_p)^{0,08}} \quad (30)$$

35 Приведені до розмірного вигляду (структуризовані) критеріальні рівняння та залежності для розрахунку  $\Pi_{ТФВ}$  наведено у публікації, яка є найбільш близьким по суті до способу, що заявляється [Патент України на винахід № 97021, (51) МПК (2006.01) G01N 25/18 Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші Ткаченко С.И., Пішеніна Н.В., Резидент Н.В; заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. - №а201005661; заявл. 11.05.2010; опубл. 26.05.2011, Бюл.№2].

40 Виконано зіставлення розрахункових значень коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_{розр}$ , та отриманих за наведеним способом  $\alpha_{ЕРМ}$  (формули 20-30) для гліцерину-дистилляту в діапазоні температур  $t=20-60$  °С (Фіг. 11). Шукані умови теплообміну - вільна конвекція у "великому" об'ємі біля вертикальної стінки висотою  $H=7,4$  м, турбулентний рух.

45 Розрахункові значення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_{розр}$  отримані традиційним способом за відомими критеріальними рівняннями як для рідини, теплофізичні властивості якої відомі [Пішеніна Н. В. Теплообмін в складних сумішах в умовах природної конвекції / Н. В. Пішеніна // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. - Вінниця: Універсум-Вінниця, 2011. - № 2. - С 124-131]. Експериментально-розрахункові  $\alpha_{ЕРМ}$  для гліцерину-дистилляту отримані за результатами базового експерименту із застосуванням запропонованого способу (пп. 1-9). Із Фіг. 11 видно, що розбіжність між  $\alpha_{розр}$  та  $\alpha_{ЕРМ}$  знаходиться в межах точності, допустимої в теплофізичних експериментах для визначення коефіцієнтів тепловіддачі.

50 Також за запропонованим способом було визначено можливий діапазон коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha_{ЕРМ}$  від вертикальної стінки до гліцерину-сирцю за таких же шуканих умов

теплообміну, для температур  $t=40-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Фіг. 12). При цьому температурний напір між грійною стінкою та гліцерином-сирцем в шуканих умовах:  $10-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

5

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов конвективного теплообміну органічної суміші, що включає вимірювання температури теплоносіїв, причому вимірюють масу грійного теплоносія та суміші, а температуру грійного теплоносія та суміші вимірюють через проміжки часу і визначають експериментальний коефіцієнт конвективної тепловіддачі в базовому режимі теплообміну  $\alpha_{\text{експ}}^{\text{баз}}$  при температурі суміші  $t_c$ , яка відповідає шуканим режимам, а комплекс фізичних властивостей для базового режиму теплообміну визначають за залежністю, яка визначається з врахуванням напрямку теплообміну

$$\text{КФВ}_{\text{експ}}^{\text{баз}} = \frac{\alpha_{\text{експ}}^{\text{баз}}}{A \cdot (\Pi_{\text{HT}})_6^m},$$

15

де  $A$  - коефіцієнт, що враховує всі параметри, які входять в критеріальне рівняння для базового режиму теплообміну, окрім теплофізичних властивостей,  $(\Pi_{\text{HT}})_6^m = (Pr_p / Pr_{\text{CT}})_6^m = (\mu_p / \mu_{\text{CT}})_6^m$  - поправка на напрямок теплообміну в суміші в базовому режимі, а експериментально-розрахунковий шуканий коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_{\text{ер}}^{\text{шук}}$  визначають за структурованим критеріальним рівнянням

20

$$\alpha_{\text{ер}}^{\text{шук}} = C \cdot g^{n_1} \cdot \underbrace{(\Pi_{\text{ТФВ}} \cdot \text{КВФ}_{\text{експ}}^{\text{баз}})}_{\text{КВФ}_{\text{експ}}^{\text{шук}}} \cdot w^{n_2} \cdot l^{n_3} \cdot \overline{\Delta t}^{n_4} \cdot (\Pi_{\text{HT}})^m,$$

де  $(\Pi_{\text{HT}})^m = (Pr_p / Pr_{\text{CT}})^m = (\mu_p / \mu_{\text{CT}})^m$  - поправка на напрямок теплообміну в суміші в шуканому режимі;

$\overline{\Delta t} = |(t_c - t_0)|$ , де  $t_c$  - температура стінки теплообмінної поверхні,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_0$  - при вимушеній течії - температура рідини на вході в трубу, при вільному русі - температура рідини за межами шару, що рухається,  $^{\circ}\text{C}$ ;

25

$w$  - визначальна швидкість, м/с;

$l$  - визначальний розмір, м;

$g$  - прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$Pr_p$  - критерій Прандтля за температури рідини (суміші);

30

$Pr_{\text{CT}}$  - критерій Прандтля за температури стінки;

$\mu_p$  - динамічна в'язкість за температури рідини;

$\mu_{\text{CT}}$  - динамічна в'язкість за температури стінки;

$C$  - константа, що залежить від режиму теплообміну;

$m, n_1, n_2, n_3, n_4$  - показники степеня;

35

з врахуванням комплексу фізичних властивостей, що відповідає шуканому режиму теплообміну  $\text{КВФ}_{\text{експ}}^{\text{шук}}$ , який визначають за допомогою функції перетворення  $\Pi_{\text{ТФВ}}$ , а значення поправок на напрямок теплообміну в базовому режимі розраховують методом послідовних наближень, який

**відрізняється** тим, що коефіцієнт  $A$  розраховують за формулою  $A = C \cdot (g \cdot \Delta t)^{0,25} / H^{0,25}$ , де  $H$  - висота поверхні теплообміну, оцінюють реальні теплофізичні властивості органічної суміші і

40

проводять серію базових експериментів, із яких визначають залежність комплексу фізичних властивостей  $\text{КВФ}_{\text{експ}}^{\text{баз}}(\bar{t})$ , середньої теплоємності  $\bar{C}_{\text{пексп}}(\bar{t})$ , середньої густини  $\bar{\rho}_{\text{експ}}(\bar{t})$ , від

середньої температури органічної суміші  $\bar{t}$ , коефіцієнт температурного розширення  $\beta_{\text{експ}}(\bar{t})$  в заданому діапазоні температур суміші, причому проводиться додатковий експеримент по визначенню кінематичної в'язкості органічної суміші при температурі навколишнього

45

середовища або близької  $\nu_0(t_{0,\text{н.с.}})$ , а закономірність зміни в'язкості органічної суміші  $\nu(\bar{t})$  від температури та значення середньої в заданому діапазоні температур суміші теплопровідності

$\bar{\lambda}(\bar{t})$  визначається з врахуванням залежності  $\text{КВФ}_{\text{експ}}^{\text{баз}} = f(\bar{t})$ , значення поправок на напрямок теплообміну в базових умовах розраховують за допомогою теплофізичних властивостей

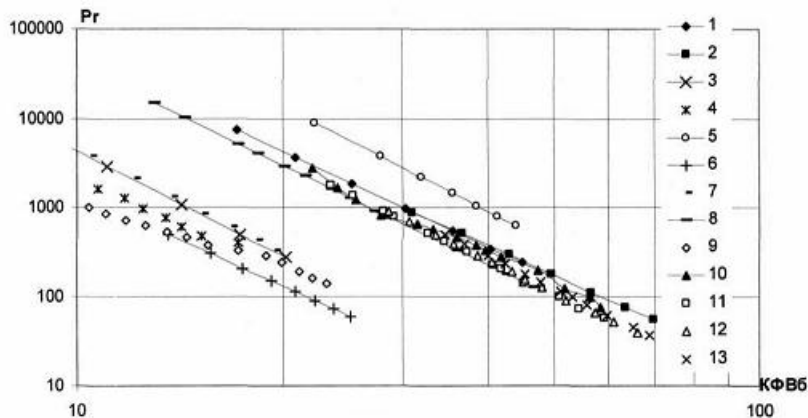
50

частково-модельної рідини, причому вибір частково-модельної рідини із бази даних та її теплофізичних параметрів із довідника здійснюють з урахуванням температур  $t_c$  і  $t_0$ , залежності

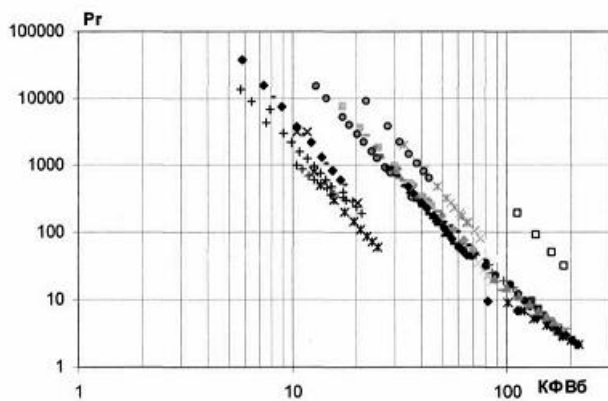


$K\Phi B_{\text{експ}}^{\text{баз}} = f(\bar{t})$  та графічних залежностей критерію Прандтля від розрахункового комплексу фізичних властивостей  $Pr_{\text{ч-м}} = f(\{K\Phi B_{\text{б}}^{\text{розр}}\}_{\text{ч-м}})$  для частково-модельних рідин, а функцію перетворення  $\Pi_{\text{ТФВ}}$  за умовами теплообміну розраховують з використанням оцінок реальних теплофізичних властивостей органічної суміші.

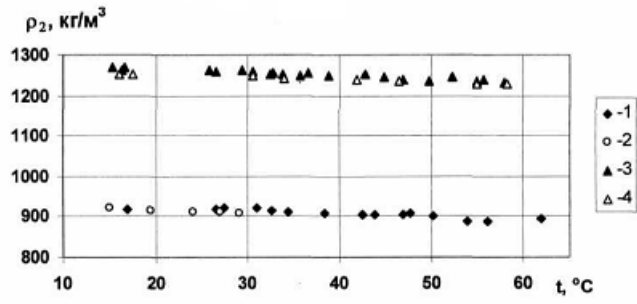
5



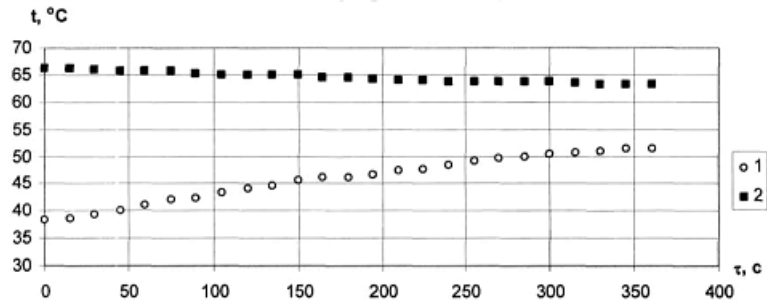
Фіг. 1



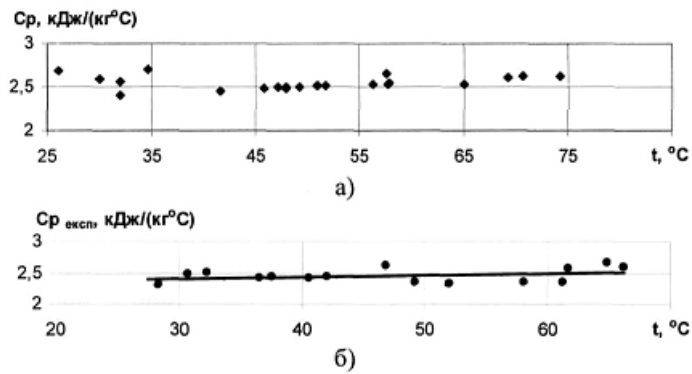
Фіг. 2



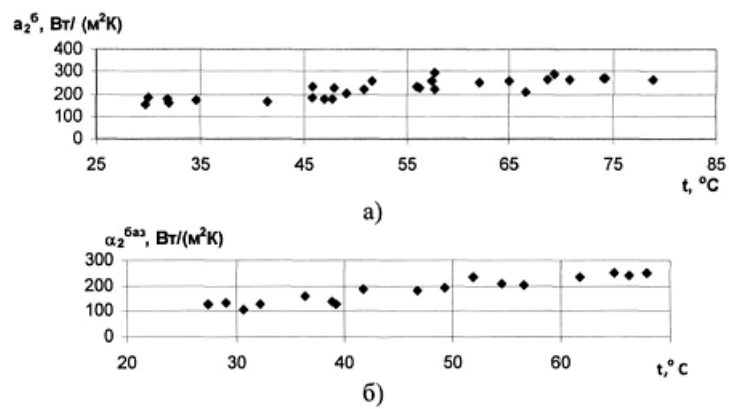
Фиг. 3



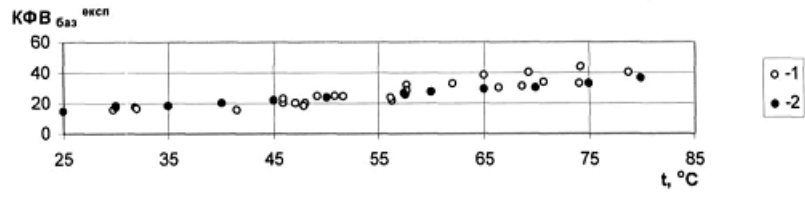
Фиг. 4



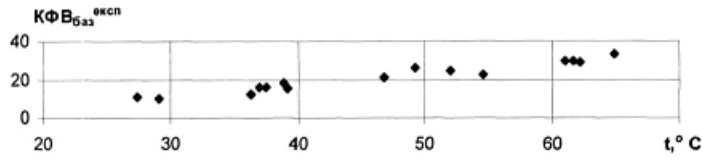
Фиг. 5



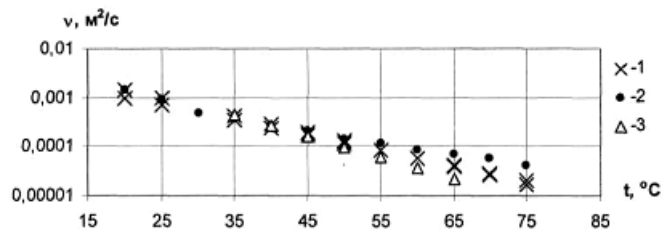
Фиг. 6



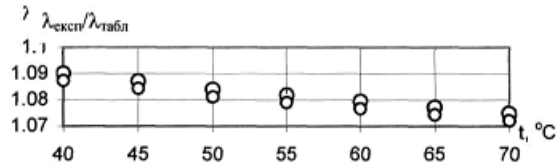
Фиг. 7



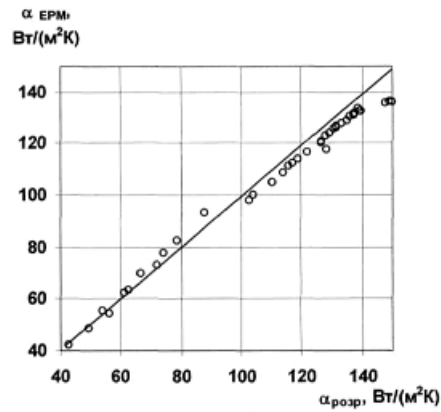
Фиг. 8



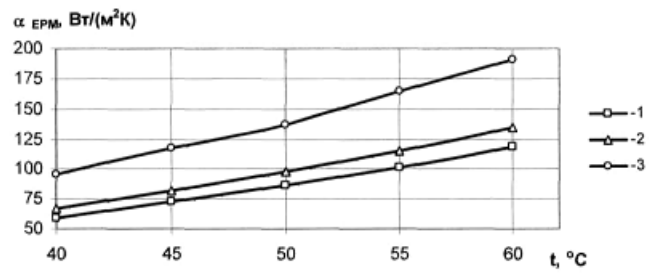
Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11



Фиг. 12

---

Комп'ютерна верстка Л. Бурлак

---

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

---

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601