

д. т. н., професор **Вірченко Г. А.**,
kpivir@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9586-4538

к. т. н., доцент **Голова О.О.**,
olgagolovafire@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6984-8673

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ГРАФОАНАЛІТИЧНЕ ОБРОБЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ДЕЯКИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОБОЧИХ РІДИН У РОТОРНИХ ПЛІВКОВИХ АПАРАТАХ

У технологічних виробництвах з видалення компонентів з різних матеріалів, які легко випаровуються, особливе місце займають процеси безперервного термічного оброблення сировини в тонких плівках поточних рідин. Під плівковим перебігом мається на увазі рух тонкого шару рідини вздовж твердої стінки, при якому зовнішня поверхня плівки залишається вільною. У хімічній та харчовій промисловості часто доводиться мати справу з речовинами, які можна обробляти тільки в тонких шарах, зокрема це виробництво окремих видів пластмас та кремнійорганічних продуктів, упарювання харчових продуктів, чутливих до високих температур, нагрівання та концентрування речовин, які можуть пригоряти та полімеризуватися при тривалому контакті з поверхнею нагріву тощо.

Плівкові випарники та дистилятори широко використовуються при виготовленні дріжджів, соків, епоксидних смол, нафтопродуктів і т. п. Особливо добре зарекомендували себе ці апарати для оброблення продуктів, схильних до утворення піни та кристалізації. При нагріванні та випаровуванні хімічних і харчових продуктів у плівкових випарниках унаслідок короткочасного контакту з поверхнею нагріву зберігаються всі хімічні властивості речовини, а у харчових продуктах – вітаміни. Вибір оптимального режиму видалення компонентів, які легко випаровуються, та його апаратного забезпечення безпосередньо пов'язані з оброблюваним продуктом. Найбільш суттєвими факторами процесу концентрування є теплофізичні властивості, такі як кінематична в'язкість, питома теплоємність, густина. Тому саме ці показники використовують в оцінці технологічної ефективності.

Відомо, що головною перевагою графічних моделей становить наочність, а аналітичних – точність. Їхнє поєднання забезпечує відповідний інтегральний ефект. Прогресивним напрямком є реалізація зазначеного підходу у вигляді належних сучасних комп'ютерних засобів. Ефективне оброблення результатів експериментів дозволяє не тільки перевіряти на практиці напрацьовані наукові положення, а й необхідним чином визначати подальший розвиток теоретичних знань. У даній статті подано

застосування графоаналітичного комп'ютерного моделювання при дослідженні теплофізичних властивостей оброблюваних продуктів із концентруванням у роторних плівкових апаратах.

Ключові слова: комп'ютерне геометричне моделювання; роторний плівковий апарат; концентрування; кінематична в'язкість; густина; питома теплоємність; коефіцієнт теплопровідності.

Постановка проблеми. Багато масообмінних процесів хімічної, газота нафтопереробної, харчової й інших галузей промисловості, які пов'язані з розділенням рідких сумішей або виділенням окремих компонентів із газового чи іншого середовища, здійснюється технічним обладнанням роторного типу. Зокрема, для випарювання чутливих до нагрівання, в'язких та пастоподібних розчинів застосовуються роторні плівкові апарати. Отримання належних розв'язків даних задач суттєво ускладнюється значною кількістю факторів, які впливають на процеси в цьому обладнанні. Тому ефективно їх опрацювання для підвищення якості виробництва становить важливу наукову прикладну проблему. Комп'ютерне геометричне моделювання сприяє успішному вирішенню окреслених питань завдяки продуктивному унаочненню отримуваної експериментальної інформації з метою проведення її систематизації та подальшого теоретичного узагальнення.

Аналіз досліджень і публікацій. Основні засади процесів масообміну в апаратах та установках хімічної й нафтопереробної промисловості подано у виданнях [1, 3]. Це стосується функціонування та конструкції технологічного обладнання для розділення складних речовин і газових сумішей, кристалізації та сушіння дисперсійних продуктів, аналізу фізико-хімічних властивостей нафтопродуктів і вуглеводневих газів, проведення відповідних проектних робіт. Публікації [4, 5] викладають відомості стосовно застосовуваних у харчовій галузі гідромеханічних, масообмінних, теплових та біохімічних процесів, їх оптимізації. У літературних джерелах зазначається, що точний розрахунок технологічних параметрів обладнання важко здійснити без попереднього належного експериментального визначення фізико-хімічних властивостей наявних середовищ і взаємодіючих речовин. Математичні засоби сучасної комп'ютерної графіки представлені у праці [6].

Мета та завдання статті полягають у викладенні запропонованої методики графоаналітичного подання результатів вимірювання теплофізичних властивостей робочих рідин у роторних плівкових апаратах.

Основна частина. Вибір технологічного обладнання для процесу концентрування значною мірою визначається густиною оброблюваних продуктів. Конструкцію роторного плівкового апарата показано на рис. 1. Його основними складовими є корпус 1 з сорочкою 2 для обігріву сухою насиченою парою. Позицією 10 позначено термоелементи, розташовані вздовж висоти апарата. Через підшипник корпус з'єднується з сепаратором

8 інерційного типу. Чотирилопатеве робоче колесо 7 змонтовано на одному валу 3 з шарнірно закріпленим ротором, який має три маточини 5 і лопаті 4. Лопаті вільно обертаються в обидві сторони на 45 градусів. На валу над верхньою маточиною кріпиться розподільче кільце 6, призначене для рівномірного зрошення робочою рідиною внутрішньої поверхні корпусу, нижня частина якого закінчується конічним днищем 11. Кут 120 градусів при його вершині сприяє швидкому видаленню продукту з апарата. На верхньому кінці вала розміщується датчик 9 тахометра.

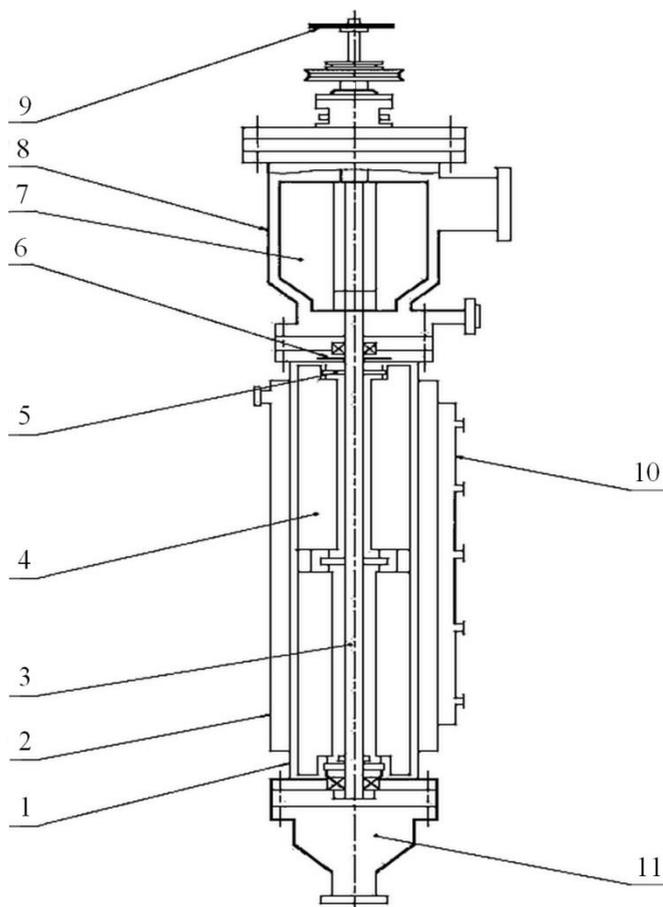


Рис.1. Конструкція роторного плівкового апарата з шарнірним кріпленням лопатей

Характерною рисою процесу концентрування є істотна зміна теплофізичних властивостей продукту при видаленні розчинника. Тому особливий практичний інтерес являє визначення їх залежностей від концентрації компонента, що випаровується, з метою обрання оптимальних технологічних режимів. Було досліджено суміші масляного розчину присадки С-150 з бензином залежно від концентрації n розчинника та температури T продукту. Отримані дані для проміжків

$$n \in [0\%, 60\%], T \in [293 K, 353 K] \quad (1)$$

наведено в табл. 1,
де λ – коефіцієнт теплопровідності,

C_p – питома теплоємність,
 ν – кінематична в'язкість,
 ρ – густина,
 Pr – число (критерій) Прандтля.

Значення λ , C_p , ν , ρ визначено експериментально, а число Прандтля обчислено за формулою

$$Pr = \frac{\nu \cdot \rho \cdot C_p}{\lambda} \quad (2)$$

Безрозмірні величини (2) дозволяють оцінити співвідношення перенесень молекулярного імпульсу та теплоти в рідині або газі в задачах конвективного теплоперенесення.

Опрацьовувані дані

Таблиця 1

Вміст n бензину, %	T , K	λ , $Вт/(м \cdot K)$	C_p $Дж/(кг \cdot K)$	$\nu \cdot 10^6$, $м^2/с$	ρ , $кг/м^3$	Pr
1	2	3	4	5	6	7
0	293	0,1515	2145	1350	1022	19553
	303	0,1504	2184	800	1015	11826
	313	0,1492	2223	447	1008	6747
	323	0,1480	2262	242	1001	3721
	333	0,1469	2301	145	995	2271
	343	0,1457	2340	107	988	1701
	353	0,1446	2379	93	982	1509
5	293	0,1498	2141	528	997	7524
	303	0,1486	2180	310	991	4507
	313	0,1474	2220	171	984	2534
	323	0,1461	2259	96	978	1450
	333	0,1450	2298	61	971	940
	343	0,1438	2338	55,5	965	871
	353	0,1426	2377	54,4	959	870
10	293	0,1480	2137	167	976	2339
	303	0,1468	2176	100	970	1429
	313	0,1456	2216	56	964	817
	323	0,1443	2256	37	957	550
	333	0,1431	2296	29	951	440
	343	0,1418	2336	28	945	433
	353	0,1406	2375	27	938	425
20	293	0,1445	2128	39	934	536
	303	0,1432	2169	28	928	394
	313	0,1419	2209	19,5	922	280
	323	0,1405	2250	13,5	915	198
	333	0,1392	2290	9,5	909	142
	343	0,1379	2331	8,6	903	131
	353	0,1366	2371	8,1	898	126
30	293	0,1410	2126	38	895	515
	303	0,1396	2161	27	889	374
	313	0,1382	2202	18	882	255
	323	0,1368	2243	11	876	159
	333	0,1354	2285	6,7	869	99
	343	0,1340	2326	4,2	863	63
	353	0,1326	2367	3,8	856	59

Продовж. табл. 1

40	293	0,1375	2111	5,6	860	74
	303	0,1360	2153	4,7	852	63
	313	0,1346	2195	3,8	846	52
	323	0,1330	2237	3,3	838	47
	333	0,1316	2279	3	831	43
	343	0,1301	2321	2,8	825	42
	353	0,1286	2363	2,7	818	41
50	293	0,1340	2103	5,4	820	69
	303	0,1325	2146	4,3	813	56
	313	0,1309	2188	3,3	806	44
	323	0,1293	2231	2,7	798	37
	333	0,1278	2274	2,4	791	33
	343	0,1262	2317	2,2	784	31
	353	0,1247	2360	2,1	777	30
60	293	0,1305	2094	3,5	786	44
	303	0,1289	2138	2,7	779	35
	313	0,1272	2181	2,1	771	28
	323	0,1256	2225	1,7	763	23
	333	0,1239	2269	1,5	755	21
	343	0,1223	2312	1,4	748	20
	353	0,1207	2356	1,3	740	19

Це засвідчують перетворення

$$Pr = \frac{v \cdot \rho \cdot C_p}{\lambda} = \frac{v}{\lambda / (\rho \cdot C_p)} = \frac{v}{a}, \quad (3)$$

де a – коефіцієнт теплопровідності.

Вираз (3) є відношенням кінематичної в'язкості ν (дифузії імпульсу) та коефіцієнта теплопровідності a (дифузії тепла).

Як видно з табл. 1, проміжкам (1) відповідають діапазони досліджуваних величин

$$\lambda \approx [0,121 \frac{Вт}{м \cdot К}; 0,151 \frac{Вт}{м \cdot К}], \quad (4)$$

$$C_p \approx [2100 \frac{Дж}{кг \cdot К}, 2380 \frac{Дж}{кг \cdot К}], \quad (5)$$

$$\nu \approx [1,3 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{с}, 1350 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{с}], \quad (6)$$

$$\rho \approx [741 \frac{кг}{м^3}, 1023 \frac{кг}{м^3}]. \quad (7)$$

Виконану методом найменших квадратів поліноміальну апроксимацію даних табл. 1 для теплофізичних властивостей (4) ... (7) залежно від значень (1) ілюструють формули (8) ... (11) та рис. 2, де точками показано вихідну інформацію.

$$\lambda(n, T) = k_{\lambda_1}(n) \cdot T + k_{\lambda_0}(n), \quad (8)$$

$$C_p(n, T) = k_{C_{p1}}(n) \cdot T + k_{C_{p0}}(n), \quad (9)$$

$$v(n, T) = k_{v_3}(n) \cdot T^3 + k_{v_2}(n) \cdot T^2 + k_{v_1}(n) \cdot T + k_{v_0}(n), \quad (10)$$

$$\rho(n, T) = k_{\rho_1}(n) \cdot T + k_{\rho_0}(n), \quad (11)$$

де $k_{\lambda_1}(n) = -8,005202 \cdot 10^{-7} \cdot n - 1,159414 \cdot 10^{-4}$; $k_{\lambda_0}(n) = -1,158244 \cdot 10^{-4} \cdot n + 0,185495$;
 $k_{C_{p1}}(n) = 7,68107 \cdot 10^{-3} \cdot n + 3,897589$; $k_{C_{p0}}(n) = -3,099687 \cdot n + 1003,134897$;
 $k_{v_3}(n) = 1,46963958 \cdot 10^{-10} \cdot n^5 - 2,751574151 \cdot 10^{-8} \cdot n^4 + 1,978478 \cdot 10^{-6} \cdot n^3 -$
 $- 6,8224605 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 + 1,13059 \cdot 10^{-3} \cdot n - 7,2557 \cdot 10^{-3}$;
 $k_{v_2}(n) = -1,549747018 \cdot 10^{-7} \cdot n^5 + 2,2899559058 \cdot 10^{-5} \cdot n^4 - 2,0819326176 \cdot 10^{-3} \cdot n^3 +$
 $+ 0,071615808 \cdot n^2 - 1,18257156 \cdot n + 7,5635248369$;
 $k_{v_1}(n) = 5,458704543117 \cdot 10^{-5} \cdot n^5 - 0,0102039654 \cdot n^4 + 0,7314377336 \cdot n^3 -$
 $- 25,091027581 \cdot n^2 + 412,697154374 \cdot n - 2629,49586534$;
 $k_{v_0}(n) = -6,4228443 \cdot 10^{-3} \cdot n^5 + 1,1993153 \cdot n^4 - 85,806374 \cdot n^3 + 2934,5848 \cdot n^2 -$
 $- 48064,21345 \cdot n - 3,0497865843 \cdot 10^5$;
 $k_{\rho_1}(n) = -7,9225352 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 + 2,66222 \cdot 10^{-3} \cdot n - 0,6548416$;
 $k_{\rho_0}(n) = 0,03226125 \cdot n^2 - 5,21556 \cdot n + 1211,98$.

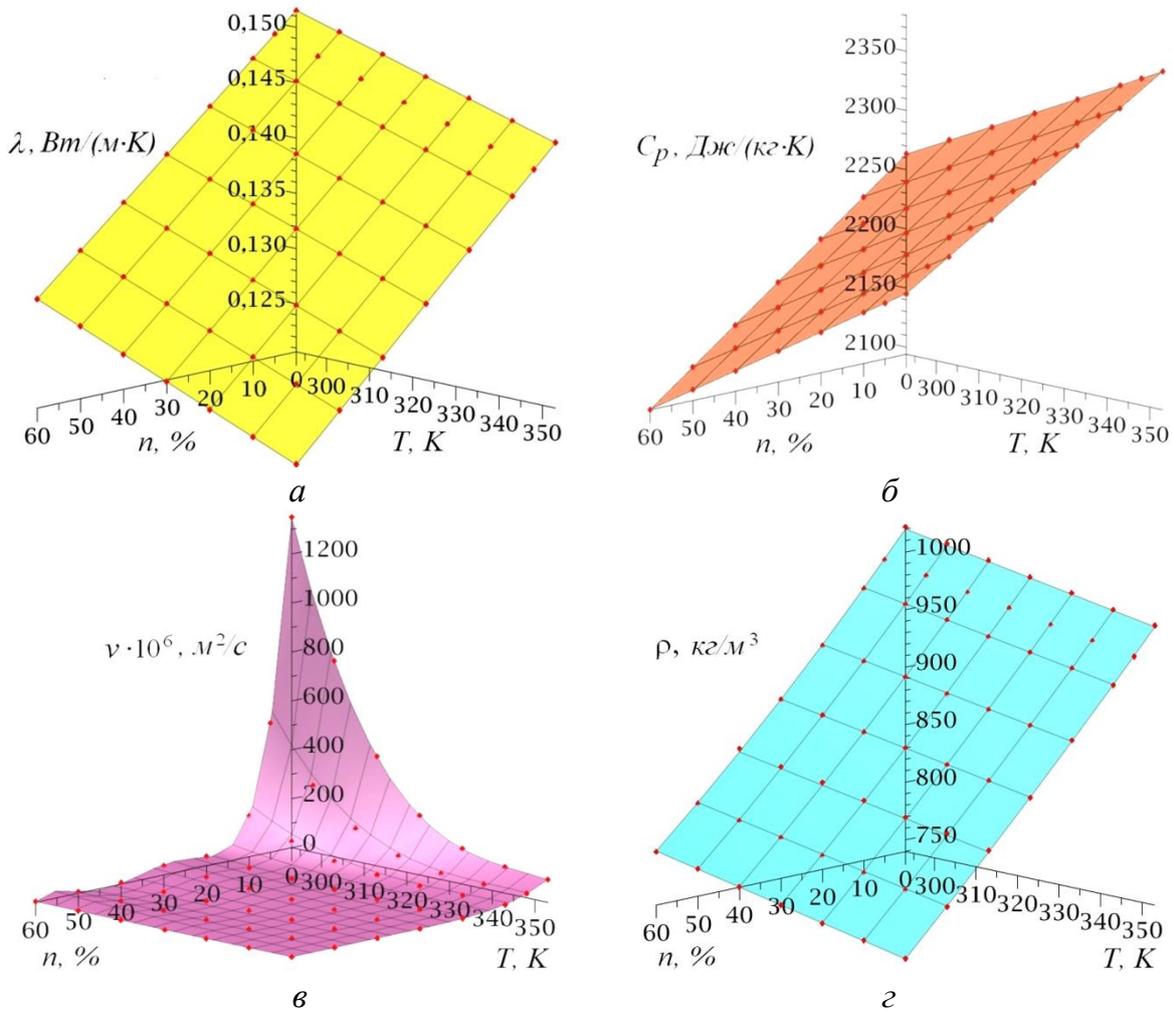


Рис. 2. Візуалізація залежностей опрацьовуваних теплофізичних властивостей:
 а – λ , б – C_p , в – v , з – ρ

У випадку (8) максимальне відхилення становить $7,4 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Для виразів (9), (10) та (11) це $0,643 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $5,24 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ та $2,83 \text{ кг}/\text{м}^3$. Рис. 2 в свідчить про те, що на проміжку $\nu \in [293 \text{ К}, 303 \text{ К}]$ в області $n \approx 30\%$ наявні осциляції з найбільшими відхиленнями, обумовленими експериментами та застосуванням математичним апаратом. Зазначені аспекти потребують уточнення перших і спеціальних методів апроксимації. Акцентоване може становити предмет відповідних подальших наукових розвідок. Через окреслені факти аналізуємо проміжок $\nu \in [303 \text{ К}, 353 \text{ К}]$. Для нього з використанням залежностей (8) ... (11) побудовано графік числа Прандтля (див. рис. 3), на якому точками відображено дані останнього стовпця табл. 1.

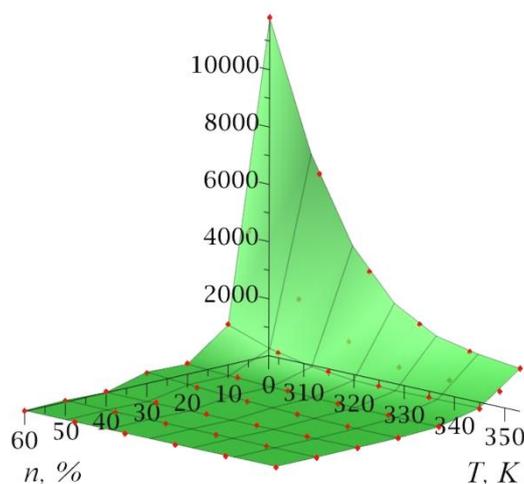


Рис. 3. Критерій Прандтля

Отримані відомості свідчать, що вплив температури та концентрації компонента, який легко випаровується, на коефіцієнт теплопровідності й питому теплоємність відносно невеликий. Суттєвіше варіюється густина продукту. Найбільше змінюється його кінематична в'язкість, що визначає характер критерію Прандтля. Порівняння точності визначення вказаного числа, отриманого за експериментальними даними теплофізичних властивостей і внаслідок їхньої апроксимації, показує наступне. Для концентрацій до 10 % цей критерій значний, відхилення не більше 9 %, в основному 1 ... 2 %. В інтервалі концентрацій 10 ... 40 % досліджувана величина спадає, розбіжності становлять до 17 %, як правило 2 ... 12 %. На проміжку концентрацій 40 ... 60 % маємо малі, порівняно з початковими, числа Прандтля. Останнє обумовлює те, що при невеликих абсолютних різницях отримуємо значні відносні. Для усунення цього доречно провести більш докладні експерименти з означеними концентраціями та аналітично опрацювати окремо вказані діапазони.

Висновки. Результати виконаного комп'ютерного геометричного моделювання становлять основу для подальших технологічних, енергетичних та конструкційних розрахунків роторних плівкових апаратів в умовах змінювання властивостей оброблюваних продуктів під час

видалення розчинників. Зауважимо, що використання відповідних середніх величин призводить до значних неточностей при проектуванні даних апаратів. Застосування уточнених теплофізичних властивостей дозволяє підвищувати якість конструювання та експлуатації проаналізованого обладнання.

Література

1. *Врагов А. П.* Масообмінні процеси та обладнання хімічних і газо-нафтопереробних виробництв. Суми: Університетська книга, 2007. 284 с.
2. *Склябінський В. І., Ляпощенко О. О., Артюхов А. Є.* Технологічні основи нафто- та газопереробки. Суми: СДУ, 2011. 186 с.
3. *Склябінський В. І., Артюхов А. Є., Ляпощенко О. О., Шостаківський І. І.* Обладнання газо- та нафтопереробних виробництв. Суми: Сумський державний університет, 2015. 343 с.
4. *Черевко О. І., Поперечний А. М.* Процеси і апарати харчових виробництв. Харків: Світ книг, 2014. 495 с.
5. *Бойко В. С., Самойчук К. О., Тарасенко В. Г., Верхованцева В. О.* Процеси і апарати. Механічні та гідромеханічні процеси. Мелітополь: ТДАТУ, 2021. 445 с.
6. *Janke S. J.* Mathematical structures for computer graphics. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. 392 p.

References

1. *Vrahov, A. P.* (2007). Masoobminni protsesy ta obladdannia khimichnykh i hazo-naftopererobnykh vyrobnytstv [Mass transfer processes and equipment for chemical and gas-oil refining industries]. Sumy: Universytetska knyha {in Ukrainian}.
2. *Sklabinskyi, V. I., Liaposhchenko, O. O., & Artiukhov, A. Ye.* (2011). Tekhnolohichni osnovy nafto- ta hazopererobky [Technological fundamentals of oil and gas refining]. Sumy: SDU {in Ukrainian}.
3. *Sklabinskyi, V. I., Artiukhov, A. Ye., Liaposhchenko, O. O., & Shostakivskyi, I. I.* (2015). Obladdannia hazo- ta naftopererobnykh vyrobnytstv [Equipment for gas and oil refining plants]. Sumy: Sumskyi derzhavnyi universytet {in Ukrainian}.
4. *Cherevko, O. I., & Poperechnyi, A. M.* (2014). Protsey i aparaty kharchovykh vyrobnytstv [Food production processes and equipment]. Kharkiv: Svit knih {in Ukrainian}.
5. *Boiko, V. S., Samoichuk, K. O., Tarasenko, V. H., & Verkholantseva, V. O.* (2021). Protsey i aparaty. Mekhanichni ta hidromekhanichni protsey [Mechanical and hydro mechanical processes]. Melitopol: T DATU {in Ukrainian}.
6. *Janke, S. J.* (2015). Mathematical structures for computer graphics. Hoboken: John Wiley & Sons {in English}.

Doctor of Technical Sciences, Professor **Gennadii Virchenko**,
kpivir@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9586-4538
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor **Olga Golova**,
olgagolovafire@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6984-8673
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

GRAPHICAL-ANALYTICAL PROCESSING OF MEASUREMENT RESULTS OF SOME PROPERTIES OF WORKING FLUIDS IN ROTARY FILM DEVICES

In technological productions for removing components from various materials that evaporate easily, a special place is occupied by the processes of continuous thermal treatment of raw materials in thin films of flowing liquids. Film flow usually refers to the movement of a thin layer of liquid along a solid wall, in which the outer surface of the film remains free. In the chemical and food industries, one often has to deal with substances that can only be processed in thin layers, in particular the production of certain types of plastics and organosilicon products, the evaporation of food products sensitive to high temperatures, the heating and concentration of substances that can burn and polymerize upon prolonged contact with a heating surface, etc.

Film evaporators and distillers are widely used in the production of yeast, juices, epoxy resins, petroleum products, etc. These devices have proven themselves especially well for processing products prone to foaming and crystallization. When heating and evaporating chemical and food products in film evaporators, due to short-term contact with the heating surface, all chemical properties of the substance are preserved, and in food products – vitamins. The choice of the optimal mode for removing components that evaporate easily and its hardware design are directly related to the product being processed. One of the most important factors in the concentration process is the thermo physical properties, such as kinematic viscosity, specific heat, and density. Therefore, these indicators are used in assessing technological efficiency.

It is known that the main advantage of graphical models is their clarity, and analytical models are their accuracy. The combination of these approaches provides the corresponding integral effect. The progressive direction is the implementation of the latter in the form of appropriate modern computer tools. Effective processing of experimental results allows not only to verify the scientific provisions in practice, but also to determine the further development of theoretical knowledge in the necessary way. This article presents the application of graphical analytical computer modelling in the study of the thermo physical properties of processed products with concentration in rotary film apparatuses.

Keywords: computer geometric modelling; rotary film apparatus; concentration; kinematic viscosity; density; specific heat capacity; thermal conductivity coefficient.