



**Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Кафедра двигунів внутрішнього згорання**

ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

**Міжнародна науково-практична конференція
11-12 березня 2024 року (онлайн)**

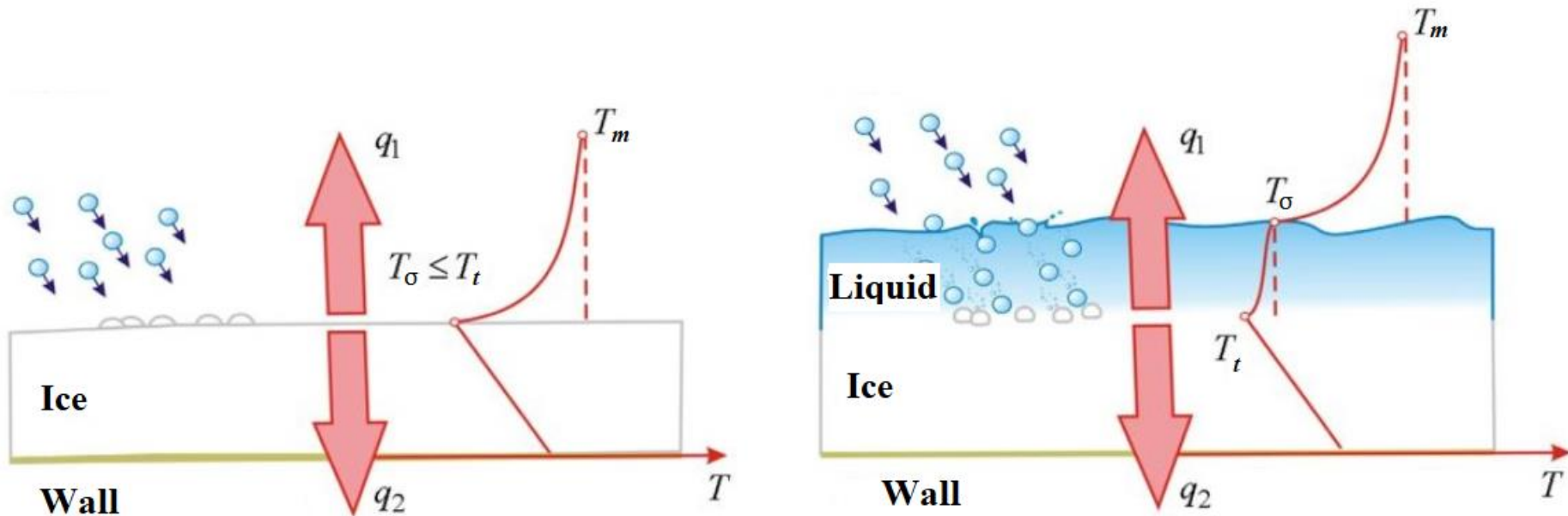
Секція 2: робочі процеси, динаміка і техніко-економічні показники енергетичних систем та машин

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ В ПРОЦЕСІ НАГРІВАННІ КРІОРІДИН В РЕКУПЕРАТОРАХ

Петухов І. І., Лисиця О. Ю.

**Національний аерокосмічний університет
ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»**

Фізична модель теплопереносу конденсованої фази



Розподіл температури в зоні утворення льоду:
сухий (а) та вологий (б) режими льодоутворення.

T_σ - температура міжфазної поверхні; T_m - температура набігаючого потоку;

T_t - температура потрійної точки

Фізична модель обледеніння

Мета роботи: удосконалення моделі тепломасопереносу при випадінні конденсованої фази на холодній поверхні.

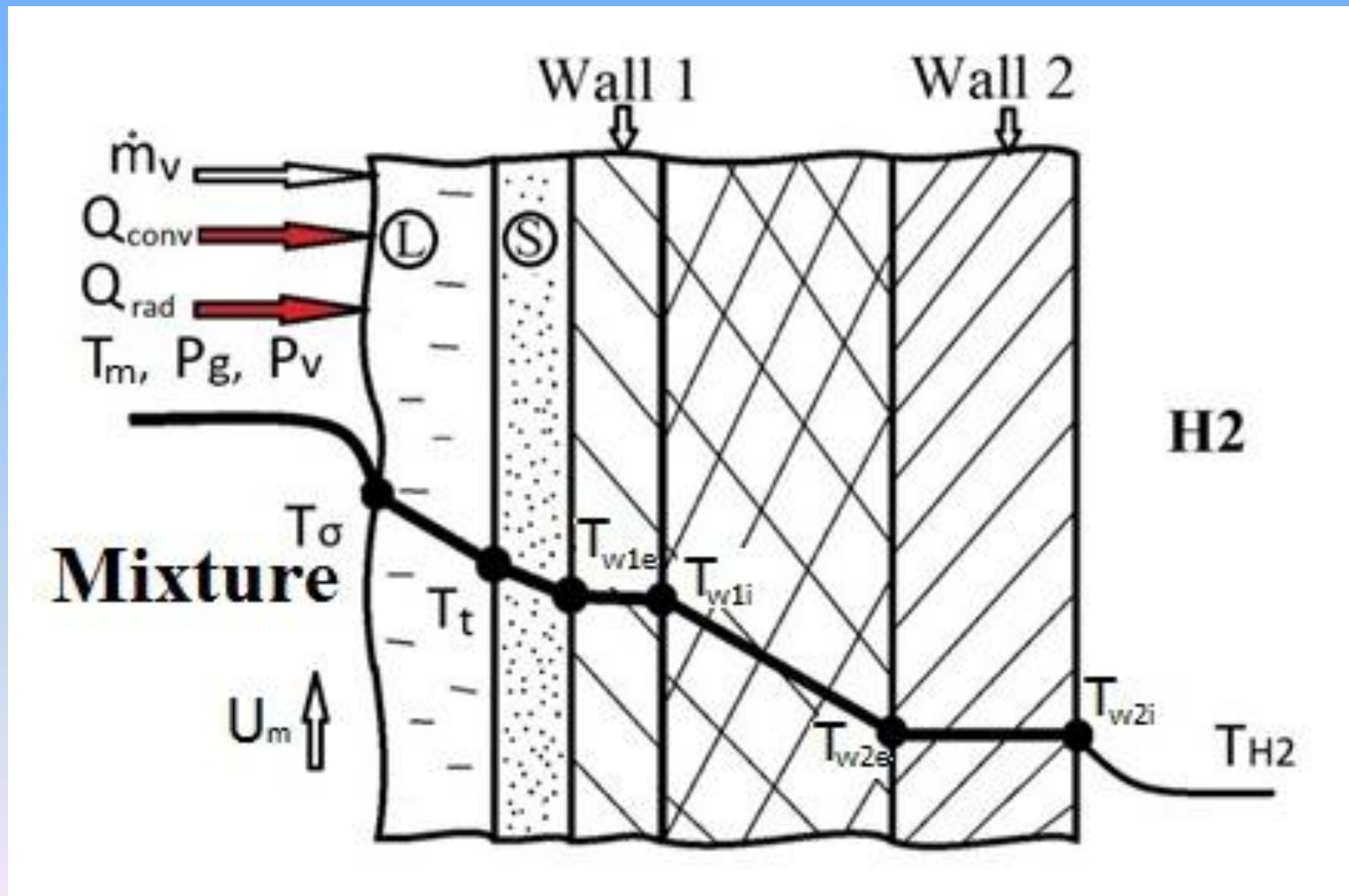


Схема теплових потоків

Властивості компонентів

Властивості компонентів при параметрах у потрібній точці

	Властивість	Компонент		
		Азот	Кисень	Вода
1	Температура, К	63,15	54,35	273,16
2	Тиск, Па	12530	150	611
3	Теплота плавлення, кДж/кг	25,74	14	334
4	Теплота пароутворення, кДж/кг	215,5	243	2501
5	Густина пару $\times 10^3$, кг/м ³	677	10,64	4,85
6	Густина рідини, кг/м ³	865,8	1288	999,8

Основні рівняння для стаціонарного процесу

Рівняння теплового балансу

$$Q_{ph} = Q_{ht} - (Q_{conv} + Q_{rad})$$

Тепловий потік в результаті фазового переходу компонентів, що дифундують

$$Q_{ph} = \sum_{j=1}^n \dot{m}_{Vj} (h_{Vj} - h_{\sigma j})$$

Потік маси до міжфазної поверхні

$$\dot{m}_{Vj} = h_{Dj} \pi d_{\sigma} L (\rho_{vj} - \rho_{v\sigma j})$$

Різниця ентальпій компонентів

$$h_{Vj} - h_{\sigma j} = L_{ivj} (T_{\sigma}) + c_{pVj} (T_m - T_{\sigma})$$

Основні рівняння для стаціонарного процесу

Конвективний тепловий потік зі сторони суміші

$$Q_{conv} = h_{cm} (T_m - T_\sigma) \pi d_\sigma L$$

Радіаційний тепловий потік зі сторони стінки каналу

$$Q_{rad} = \varepsilon_r \sigma_0 (T_m^4 - T_\sigma^4) \pi d_\sigma L$$

Тепловий потік від поверхні фазового переходу до холодоносія

$$Q_{ht} = h_{ht} (T_\sigma - T_{H2}) \pi \cdot L$$

Лінійний коефіцієнт теплопередачі

$$h_{ht} = \frac{1}{\frac{1}{h_{cH2} d_{H2}} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2k_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}$$

Основні рівняння для нестационарного процесу

Потік маси до міжфазної поверхні визначає швидкість росту льодяного шару

$$\frac{dr_{\sigma}}{dt} = \frac{1}{\pi L d_{\sigma}} \sum_{j=1}^k \frac{\dot{m}_{vj}}{\alpha_{sj} \cdot \rho_{sj}}$$

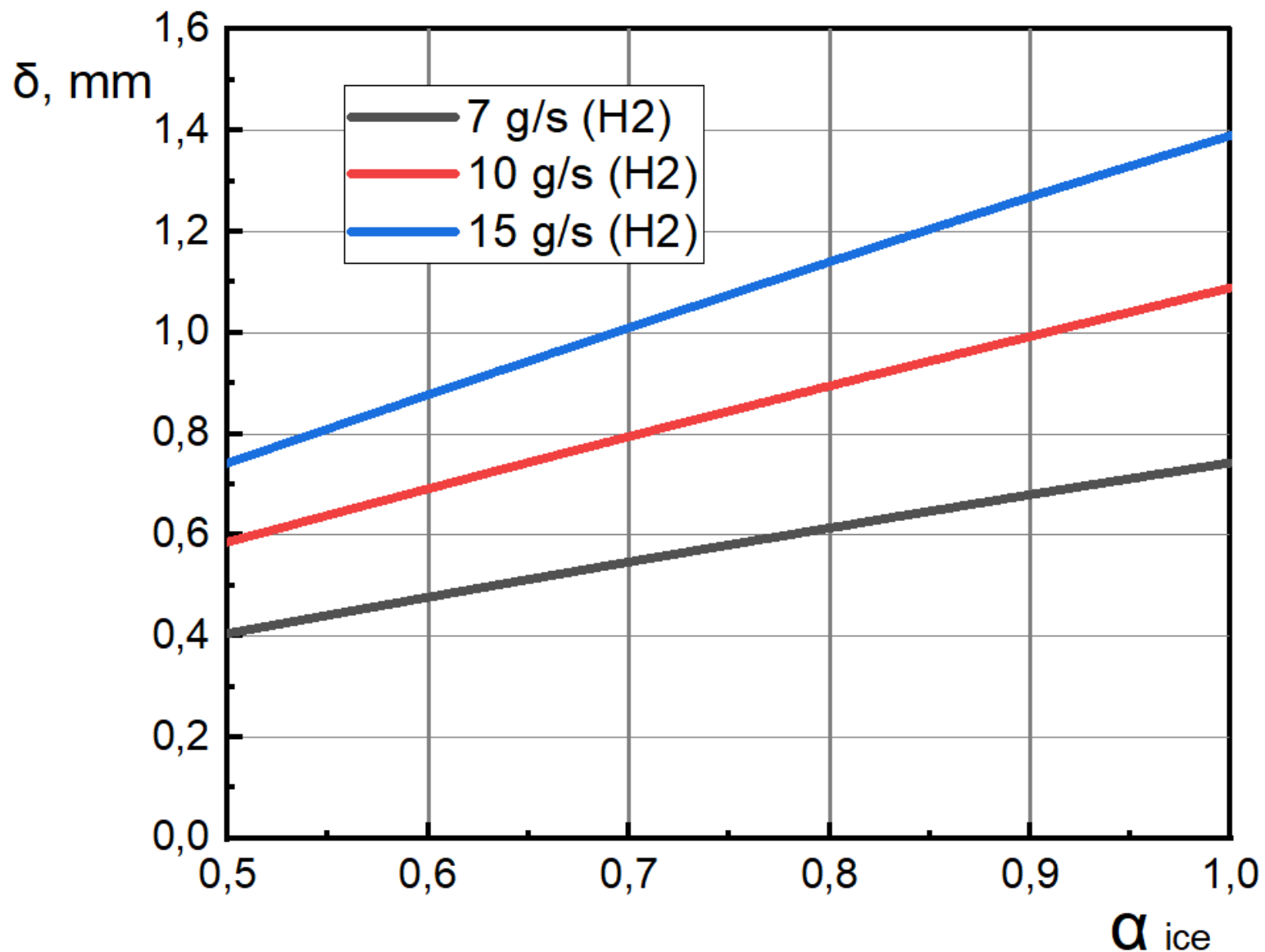
Об'ємна частка з урахуванням ефективної густини затвердівшого компонента

$$\alpha_j = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{vj}}{\alpha_{sj} \cdot \rho_{sj}} \right)}{\sum_{j=1}^k \frac{\dot{m}_{vj}}{\alpha_{sj} \cdot \rho_{sj}}}$$

Ізобарна теплоємність сумішевого льоду

$$c_{ps} = \sum_{j=1}^k Y_j \cdot c_{psj}$$

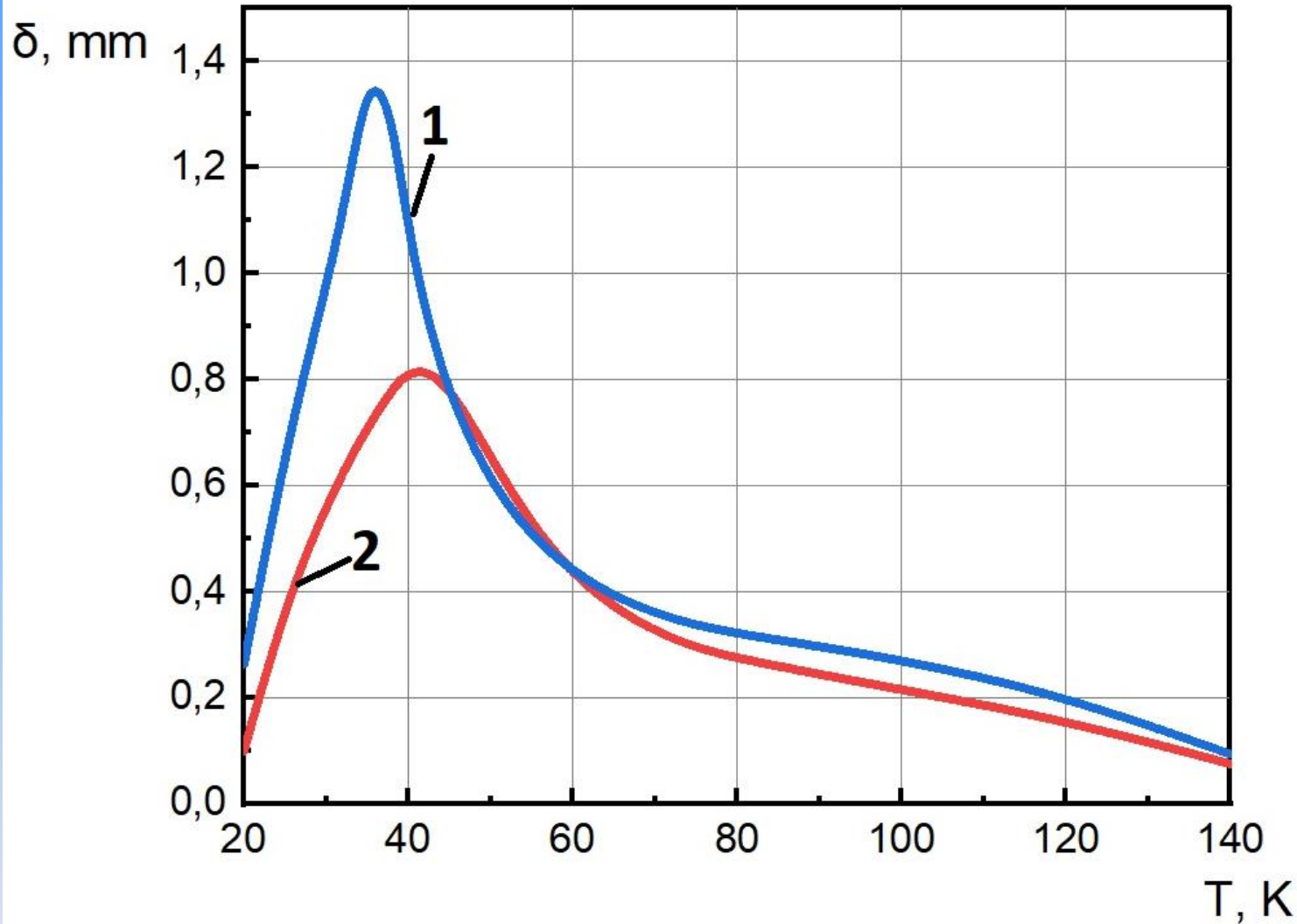
Залежність товщини льоду від пористості його структури



Трубка з нержавіючої сталі внутрішнім діаметром 10 мм і товщиною стінки 1 мм.

Холодоносій – водень при $T=40$ К і $P=40$ бар; гарячий – продукти згорання при $T= 665$ К 9

Залежність товщини льоду від температури холодоносія

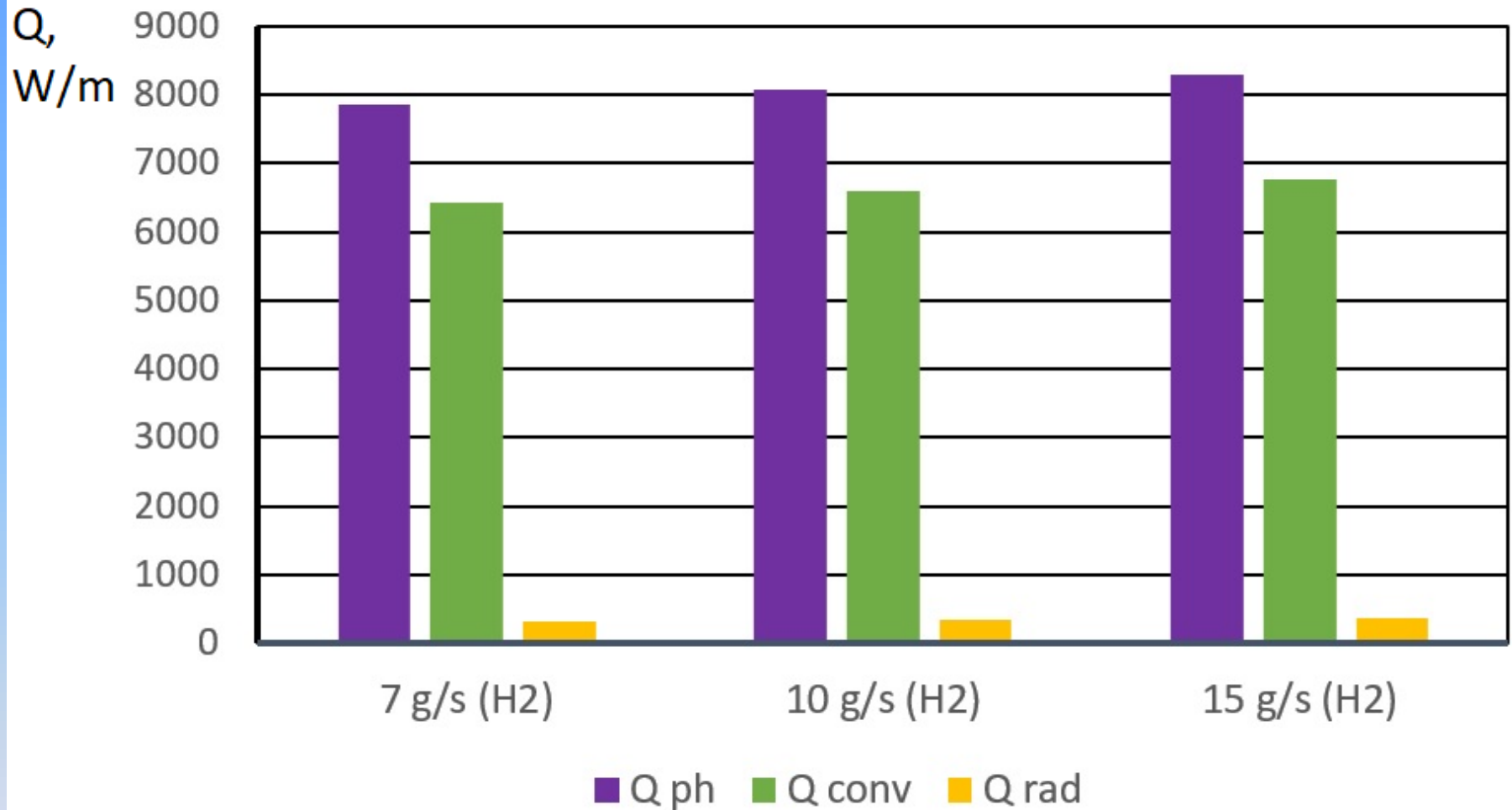


Трубка з нержавіючої сталі внутрішнім діаметром 10 мм і товщиною стінки 1 мм;

Холодоносієм – водень з витратою 10 г/с, обдув продуктами згоряння, $T = 665$ К ;

1 – тиск водню 20 бар; 2 – тиск водню 40 бар

Структура лінійного теплового потоку

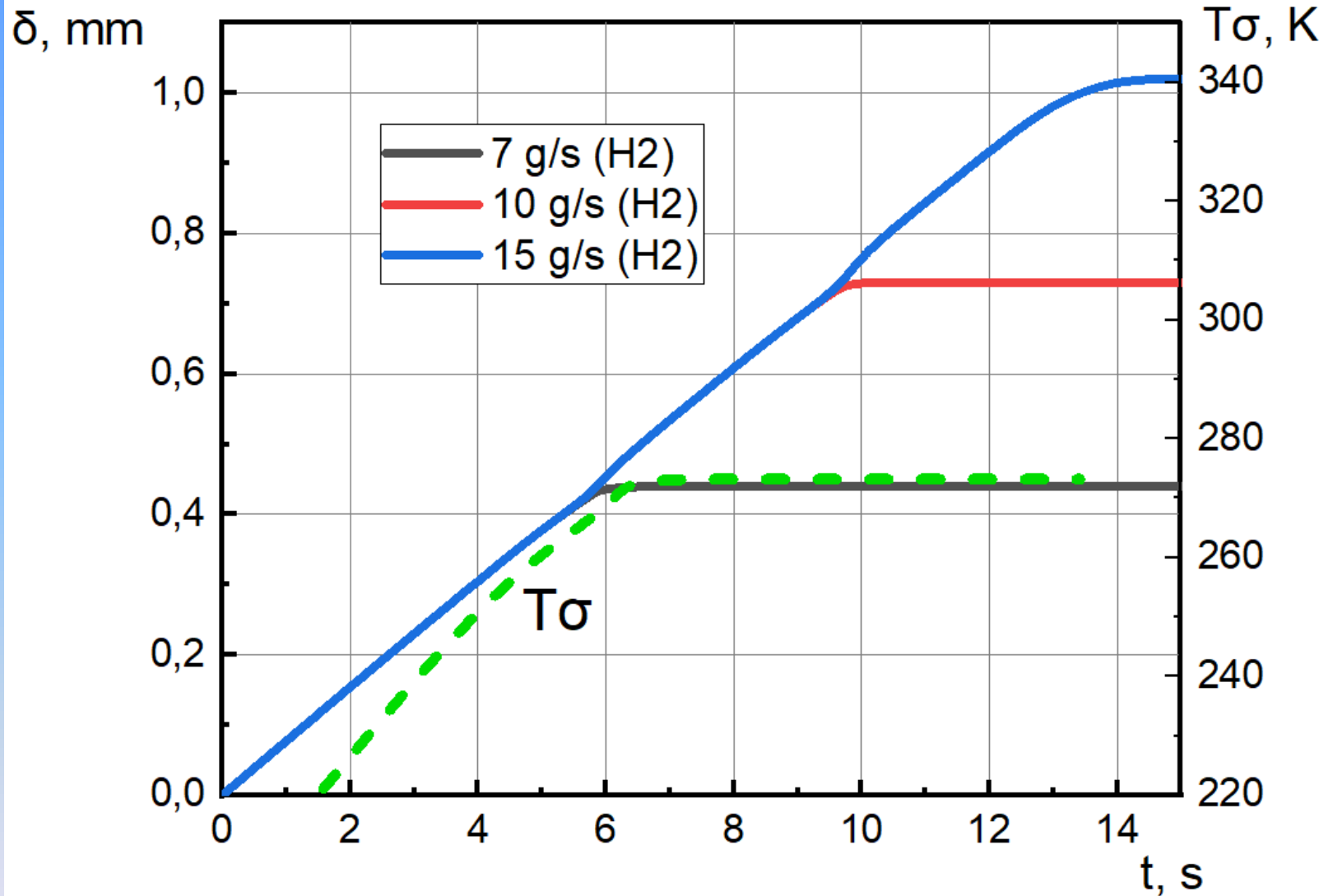


Q_{ph} – тепловий потік за рахунок масообміну; Q_{conv} – конвективний; Q_{rad} – радіаційний;

Трубка з нержавіючої сталі внутрішнім діаметром 10 мм і товщиною стінки 1 мм;

Холодоносій – водень, $T = 40$ К, $P = 20$ бар, гарячий – продукти згоряння, $T = 665$ К

Динаміка наростання льоду



Трубка з нержавіючої сталі внутрішнім діаметром 10 мм і товщиною стінки 1 мм;

Холодний теплоносієй – водень, $T=40$ К, $P=20$ бар, гарячий – продукти згорання, $T=665$ К

Висновки

Розроблена модель дозволяє врахувати в стаціонарній і нестаціонарній постановках усі значущі фактори процесу, визначити коефіцієнти теплопередачі в умовах обледеніння теплообмінних поверхонь, тривалість перехідних процесів в рекуператорах та максимальну товщину шару льоду. Це дозволить більш надійно проектувати теплообмінники та точніше визначати їх характеристики на усіх режимах роботи.

Дякую за увагу!