



**Kharkiv National Automobile and Highway University
Department of Internal Combustion Engines**

**2nd International Scientific and Practical Conference on
ENERGY SYSTEMS AND ALTERNATIVE ENERGY SOURCES '2025
(ESAES 2025)
March 11-12, 2025 (online)**

Секція 5: Наукові дослідження, діагностика, випробування, експлуатація та надійність енергосистем. Оптимізація результатів дослідження.

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ ПРИ ВИПАДІННІ КОНДЕНСОВАНОЇ ФАЗИ ТА ЇЇ КРИСТАЛІЗАЦІЇ НА СТІНКАХ КРІОГЕННИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ

Петухов І. І., Лисиця О. Ю.

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

Фізична модель обледеніння

Мета роботи: удосконалення моделі тепломасопереносу при випадінні конденсованої фази та її кристалізації на стінках криогенних теплообмінників.

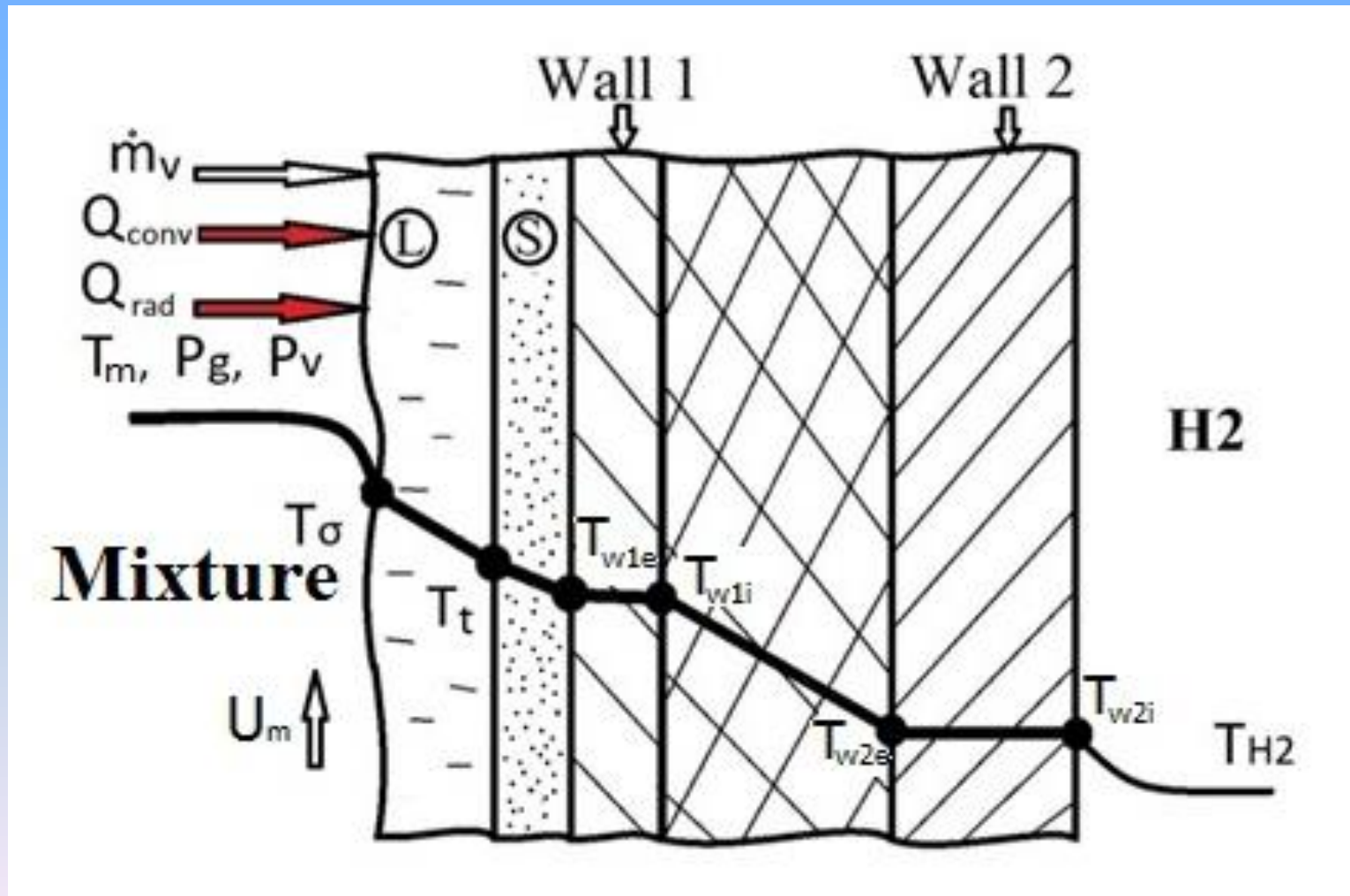


Схема теплових потоків

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 затвердішого 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

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

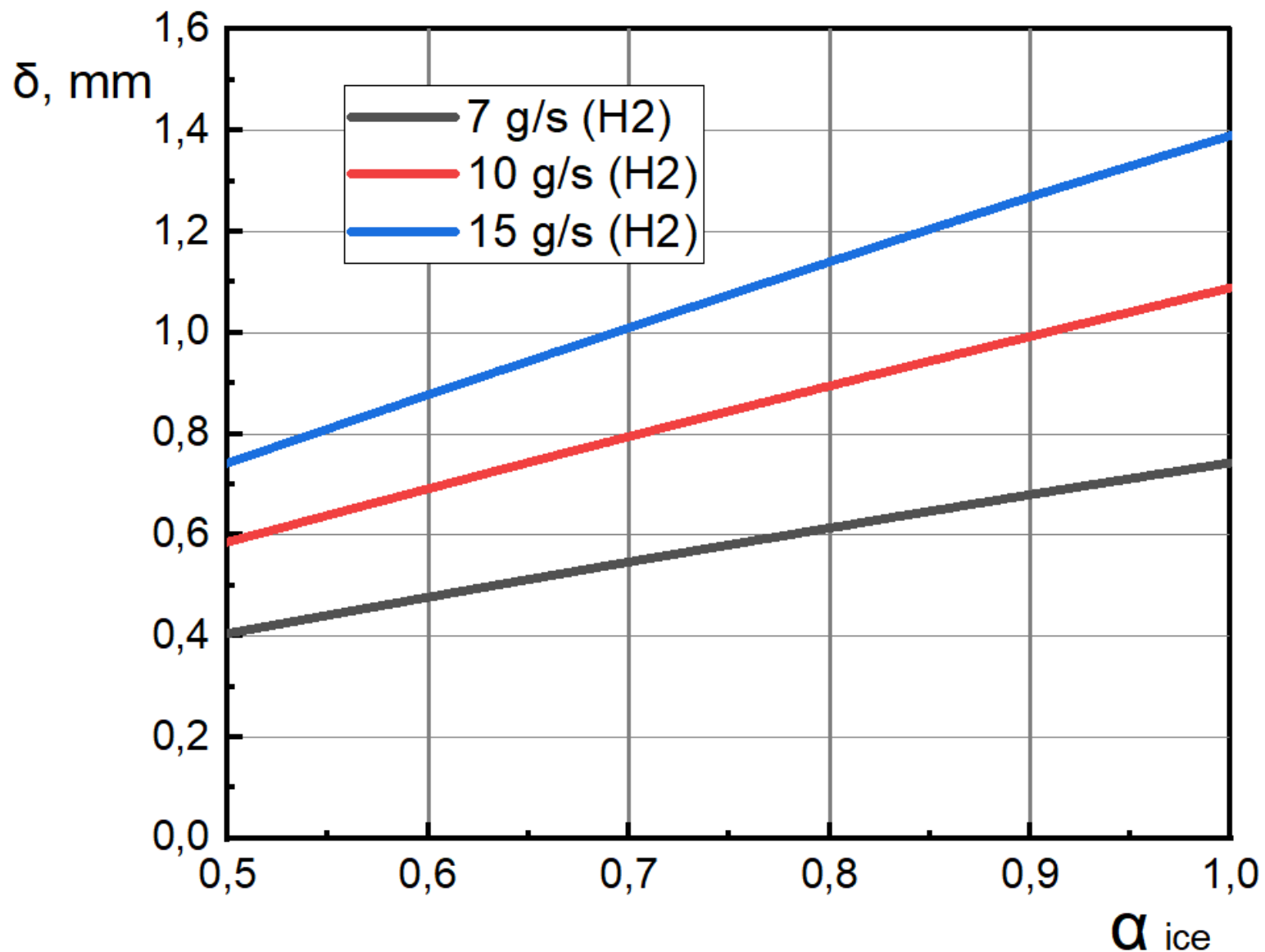
Особливості моделювання стаціонарного процесу

- В стаціонарному процесі структура конденсованого шару та його температурне поле визначаються параметрами гарячого та холодного теплоносіїв.
- Для більшості умов та режимів роботи кріогенних теплообмінників можна розглядати утворення тільки водяного льоду, оскільки решта компонентів мають дуже низьку температуру потрійної точки.
- За умови високої швидкості потоку парогазової суміші рідка плівка здувається з поверхні. Для таких умов температура міжфазної поверхні відповідає температурі танення водяного льоду.
- Тепловий потік з боку гарячого теплоносія визначається сумою конвективного і дифузійного потоків.
- З урахуванням відомих різниць температур і концентрацій дифузних компонентів розраховується термічний опір багат шарової стінки і товщина льоду.

Особливості моделювання нестационарного процесу

- В нестационарному процесі структура конденсованого шару та його температурне поле визначаються параметрами гарячого та холодного теплоносіїв.
- В нестационарному процесі збільшення товщини шару конденсованої фази супроводжується зміною температури міжфазної поверхні.
- При досягненні стаціонарного режиму ця температура дорівнює температурі танення водяного льоду.
- Розраховується тепловий потік з боку парогазової суміші, термічний опір багатошарової стінки і максимальна товщина льоду на стінці.

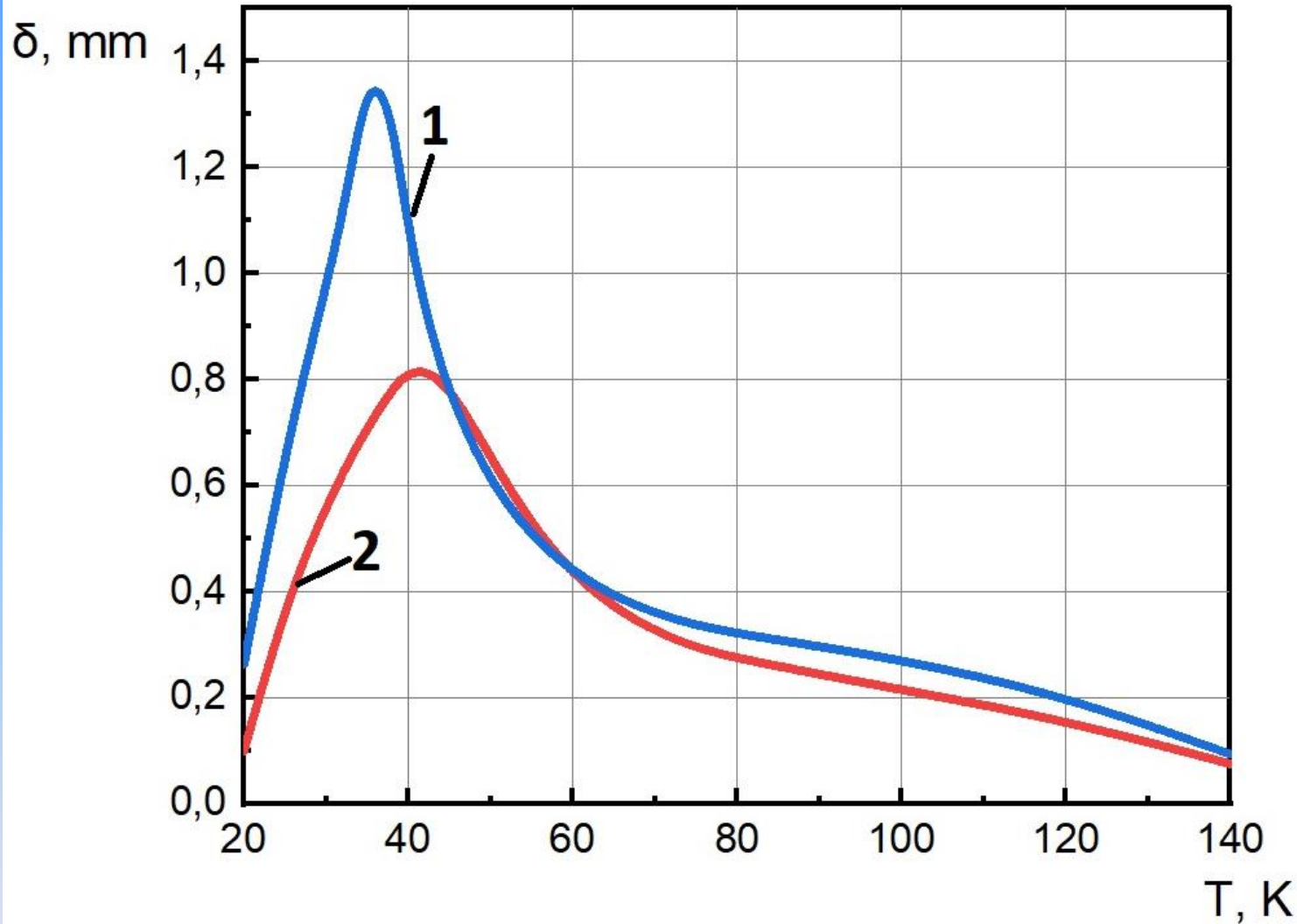
Залежність товщини льоду від пористості його структури



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

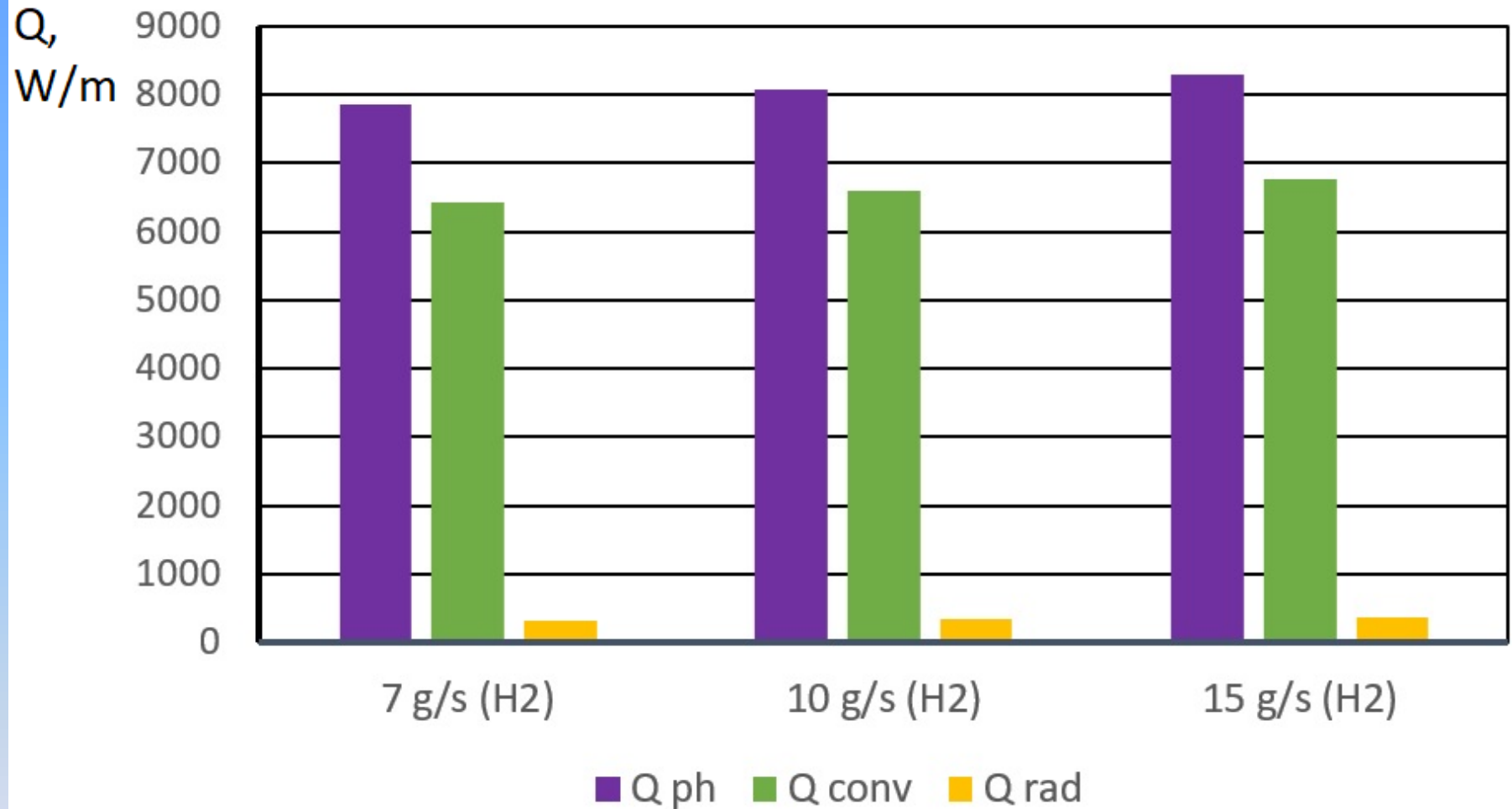


Трубка з нержавіючої сталі внутрішнім діаметром 10 мм і товщиною стінки 1 мм;

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

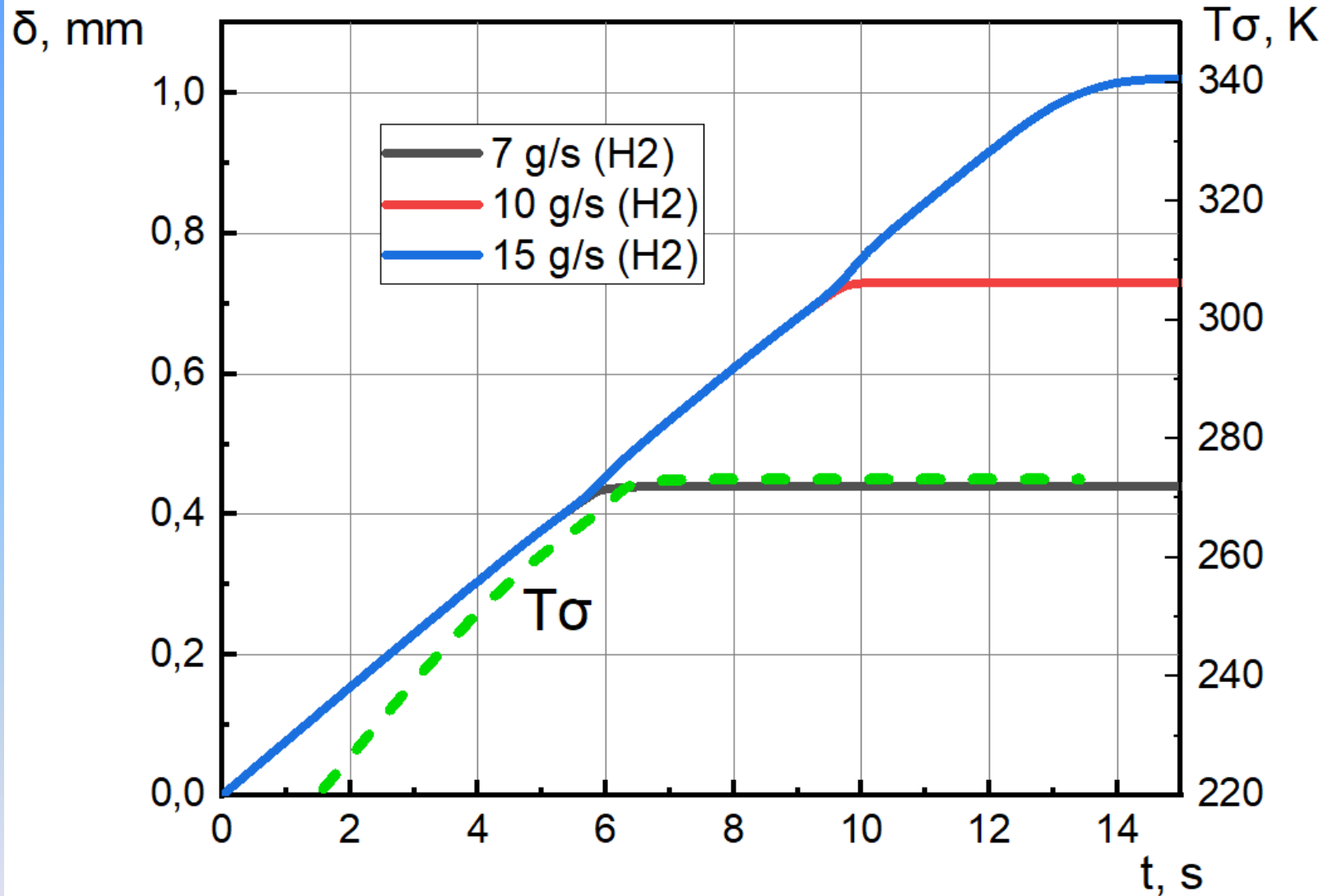


Q_{ph} – тепловий потік за рахунок масообміну; Q_{conv} – конвективний; Q_{rad} – радіаційний;

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 розрахувати параметри теплообміну в стаціонарній і нестаціонарній постановках з урахуванням утворення багатоконпонентної конденсованої фази на стінках кріогенних теплообмінників. Модель враховує усі значущі фактори процесу, дозволяє визначити коефіцієнти теплопередачі в умовах випадіння конденсованої фази на стінках, тривалість перехідних процесів та максимальну товщину шару льоду. Це дозволить більш надійно проектувати кріогенні теплообмінні апарати, точніше визначити їх характеристики та режими роботи теплоенергетичних систем.

Дякую за увагу!