

**Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія  
Кондратюка»**

**Кафедра теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики**

**Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАТОУТВОРЕННЯ ПРИ  
ВИКОРИСТАННІ МІКРОБУЛЬБАШОК ГАЗУ**

**Виконав: Темченко О.С.**

**Керівник: Кутний Б.А.**

**Полтава 2023**

## ПЛАН

Вступ.....	3
1. Аналіз літературних джерел.....	12
2. Склад газової суміші.....	16
3. Дослідження конструкції насадки для синтезу мікробульбашок газу.....	18
3. Температура газу на виході з насадки.....	28
4. Дослідження синтезу газогідрату пропану.....	31
5. Висновки.....	40
Література.....	41
Додатки.....	47

## Вступ

При контакті з водою газоподібні вуглеводні за певних співвідношень температури та тиску можуть утворювати сполуки, які називають кристалогідратами. Зазвичай це тверді кристалічні речовини білого кольору, які ззовні нагадують сніг або лід. Кристалогідрати це нестійкі молекулярні сполуки. При зниженні тиску чи підвищенні температури вони розкладаються на свої складові: газ та воду.

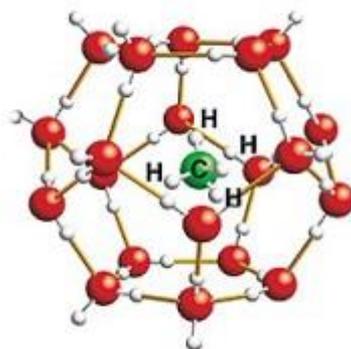


Рис.1. Структура газогідрату метану

В останні десятиліття у світі значно активізувалися дослідження властивостей газових гідратів, і цьому є ряд причин. Газогідрати природного походження, що складаються переважно з гідрату метану почали розглядати як перспективні джерела вуглеводневої сировини. За існуючими оцінками, поклади природного газу, які зосереджено у вигляді газових гідратів, становлять  $2 \cdot 10^{16} \text{ м}^3$  [1], що перевищує усю відому кількість вуглецевого палива на нашій планеті. За даними англійських учених загальні запаси газових гідратів у морських покладах знаходяться в межах 500÷1000 Гт та 400 Гт у зоні вічної мерзлоти в Арктиці [2, 3].

					201 пНТ 9712008 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



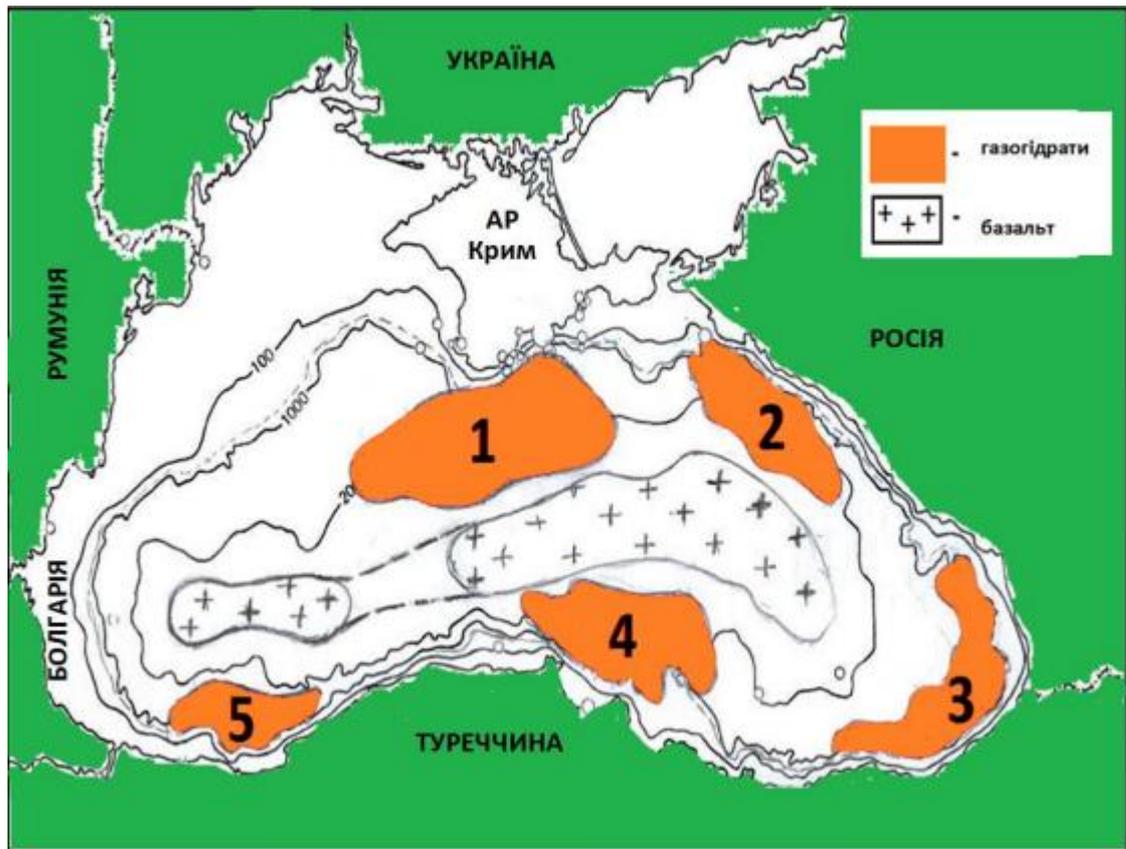


Рис.2. Газогідрати в Чорному морі

Теплота розкладу гідрату метану ( $\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) на газ і рідку воду ( $0^\circ\text{C}$ , 1 атм) становить 54,2 кДж/моль [5] (що характерно переважно для надмолекулярних процесів). Теплота згорання вільного метану приблизно 890 кДж/моль (що є типовим для хімічних реакцій). Таким чином, на розклад гідрату метану необхідно витратити лише близько 6% теплоти, яка виділяється від спалювання його метану.

Таким чином, розвиток газогідратних технологій дозволить:

- спростити транспортування та зберігання природних газів у формі їх клатратних з'єднань за рахунок уникнення необхідності використання балонів та цистерн високого тиску;

- підвищити ефективність транспортування і зберігання природних газів за рахунок зниження тиску дисоціації, збільшення масового вмісту газів в

					201 пНТ 9712008 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

одиниці об'єму утворених газогідратів та за рахунок збільшення їх газовмісту.

Фізико-хімічні властивості газогідратів дозволяють перевозити і зберігати природні гази у звичайних утеплених контейнерах із застосуванням таких транспортних засобів як автомобілі, платформи, вагони, річкові та морські судна. Найбільш перспективними є такі сфери застосування газогідратів як насамперед доставка та зберігання природних газів у віддалені й важкодоступні житлові та промислові райони. Також газові гідрати можна використовувати як генератори горючих газів для двигунів внутрішнього згорання (автомобілі, автономні електростанції тощо). Ще одним важливим способом застосування газогідратів є їх використання для перевезення і зберігання легкі вуглеводнів (метан, етан), які зараз, як правило, спалюються на місцях видобування, що значно погіршує екологічну обстановку в прилеглих районах.

Газогідратна форма також вигідна для транспортування та зберігання природного газу. Важливою для їх зберігання та транспортування є здатність до самоконсервації при температурах, нижчих за 0 °С. Тобто, якщо над сформованим гідратом скинути тиск, він починає дисоціювати і формувати на своїй поверхні тоненьку плівку льоду, а гідрат, охолоджуючись припиняє подальший розклад. Ураховуючи високу газоємність гідрату (до 164 м<sup>3</sup> газу на 1 м<sup>3</sup> гідрату), можна зберігати та перевозити газ в умовах атмосферного тиску, наприклад, використовуючи звичайні рефрижератори. Така технологія активно розробляється в Японії й у Росії для газифікації віддалених населених пунктів, де відсутні газопроводи. В Україні така технологія може бути задіяна для транспортування газогідратів з місць їх видобування в Чорному морі.

У 2017 році Китай заявив про впровадження технології видобутку газу з морського родовища газогідратів, рис. 3. Проте дебіт свердловини через два

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

201 пНТ 9712008 ПЗ





яке, на думку екологів, може стати однією з ключових технологій у боротьбі з глобальним потеплінням [18].

Ця технологія передбачає вловлення вуглекислого газу [20], котрий виділяється в процесі спалювання вуглеводнів, і його захоронення у відповідних геологічних формуваннях (у надрах Землі) на постійне зберігання [18]. Протягом останніх десятиліть окремі компанії активно здійснюють дослідження, розробляють та впроваджують технології, які можуть сприяти широкому розповсюдженню систем уловлення й видалення CO<sub>2</sub> [21, 22].

На сьогоднішній день можна виділити три розроблених способи захоронення CO<sub>2</sub>: в глибинних соленосних покладах, у вироблених нафтогазоносних родовищах та в нерозроблюваних вугільних пластах [23]. Проте застосування технології CCS потребує великих обсягів підземних сховищ для зберігання газу. Також ця технологія має ще один недолік: вона потребує великих капіталовкладень для обладнання вугільних електростанцій засобами для уловлення вуглекислого газу. Через це ряд авторів [24, 20, 25] відмічає, що зараз технологія захоронення CO<sub>2</sub> у 2–3 рази дорожча за використання сонячної та вітрової енергетики.

На думку Г.В. Жука, В.В. Клименка й інших [19], найбільш перспективним методом геологічного зберігання вуглекислого газу є його депонування в придонні шари морів і світового океану у вигляді гідратів. У роботах [5, 19] видобування метану з газогідратних покладів Чорного моря пропонується суміщати з технологією уловлення та зберігання діоксиду вуглецю CCS. Згідно з діаграмою стану термодинамічної системи «CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O» надходження CO<sub>2</sub> в морську воду призведе до утворення гідратів починаючи з глибини 400 метрів при температурах 283 К. Наявність сірководню в концентраціях, характерних для Чорного моря, сприятиме підвищенню температури утворення гідратів CO<sub>2</sub> до 285 К [26].

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

201 пНТ 9712008 ПЗ



якому максимальна кількість  $\text{CO}_2$  може бути захоплено з уведеного димового газу чи суміші  $\text{CO}_2\text{-N}_2$ .

У роботі [28] було виявлено, що більш ніж 92%  $\text{CO}_2$ , наявного в уведеному димовому газі, може бути захоплено за відповідних термобаричних умов, наведено переконливі докази зміни кристалічної структури гідрату при високих тисках. Також було встановлено, що підвищення температури призводить спочатку до вивільнення  $\text{N}_2$  з утриманням  $\text{CO}_2$  у гідратах, що забезпечує вторинний коефіцієнт безпеки для збереженого  $\text{CO}_2$  у разі раптового підвищення температури.

Дослідження [29] процесу заміни між газоподібним  $\text{CO}_2 / (\text{N}_2 + \text{CO}_2)$  та газовим гідратом ( $\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) показали, що молекули  $\text{N}_2$  значно сприяють цьому структурному переходу під час обміну, оскільки молекули  $\text{N}_2$  активізують процес заміщення молекул  $\text{CH}_4$ , розташованих у «малих» порожнинах. Завдяки цьому сприятливому структурному переходу і  $\text{N}_2$ -індукованому гостьовому обміну, більше 92%  $\text{CH}_4$  може бути виділено з метанових гідратних покладів.

У роботі [30] наведено результати експериментів для вивчення впливу насичення гідратів, а також початкової щільності та проникності пісковиків на отримання метану й уловлювання вуглекислого газу. Результати досліджень показують, що ефективність відновлення  $\text{CH}_4$  і кількість захопленого  $\text{CO}_2$  зростають зі збільшенням насичення гідратів при однаковій початковій щільності та проникності пісковіку. Найбільш високе відновлення  $\text{CH}_4$  становить 51,6% і захоплення  $\text{CO}_2$  99,4% при тиску 9,2 МПа й температурі 277,15 К. Насичення гідратів становило 82,5%, а початкова щільність і проникність пісковіку становлять 25,1% та 49 мД відповідно. Зі збільшенням початкової щільності й проникності пісковіку ефективність відновлення  $\text{CH}_4$  і кількість захопленого  $\text{CO}_2$  зростають. Відсутність помітних ендо- або екзотермічних явищ авторами не виявлено, що доводить суто дифузійний характер процесу заміщення.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

201 пНТ 9712008 ПЗ

Відомо, що зменшення розміру бульбашок призводить до значної інтенсифікації тепло- і масообмінних процесів в установках барботажного типу. Результати теоретичних розрахунків для апаратів синтезу газових гідратів показують аналогічну ситуацію. Саме тому нами прийнято рішення про експериментальне дослідження цього явища з метою інтенсифікації гідратоутворення.

## 1. Аналіз літературних джерел

Бульбашки розміром менше 100 мкм відносять до мікробульбашок. Для них характерна відсутність коалесценції, швидкість спливання точно відповідає закону Стокса, критерій Рейнольдса не перевищує 1.

Швидкість спливання бульбашки газу у воді можна розрахувати за формулою

$$V = \frac{d^2 g}{18\nu} \left( 1 - \frac{\rho_g}{\rho_w} \right), \quad (1)$$

де  $d$  – діаметр бульбашки, м;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с;  $\nu$  – кінематична в'язкість, м<sup>2</sup>/с;  $\rho_g$  та  $\rho_w$  – відповідно густина газу та води, кг/м<sup>3</sup>.

Виконаємо розрахунок спливання бульбашок пропан-бутану у воді з температурами 0, 5 та 10 °С. Результати розрахунку наведено на рис.1. Застосовуючи ці графіки можна визначити середній розмір мікробульбашок по швидкості спливання.

Окремим питанням є утворення мікробульбашок. Відомо декілька способів отримання мікробульбашок: шляхом пропускання газорідинної суміші через сітки, за допомогою електролізу, шляхом «розмельювання» газорідинної суміші відцентровим насосом, введення газу в трубу Вентурі, кавітація тощо.

					201 пНТ 9712008 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

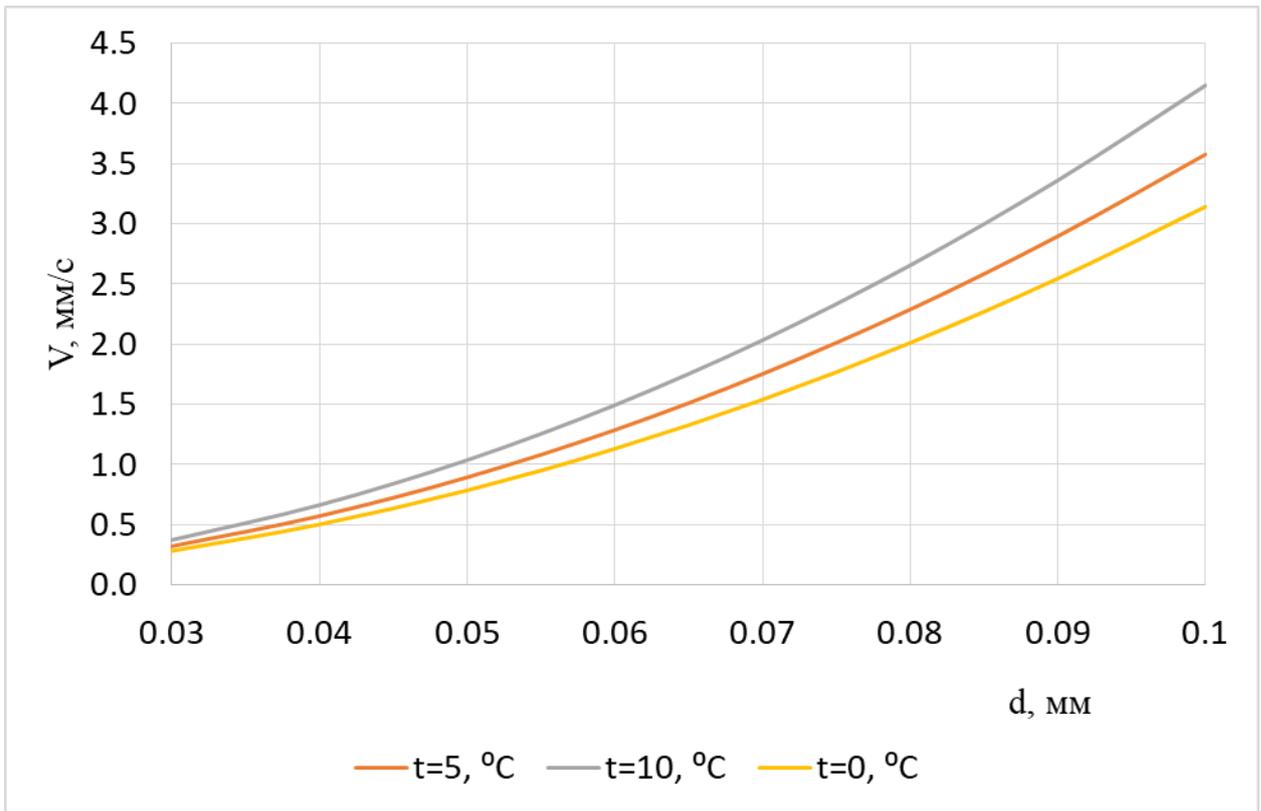


Рис.1. Швидкість спливання мікробульбашок пропан-бутану у воді з температурами 0, +5 та +10°C

Зокрема застосування сіток для змішування рідини з газом відображено в патенті RU2261700C2 «Method for producing therapeutic foamed material containing gas micro-bubbles», рис.2. Шприц частково заповнюють рідиною і газом, а потім за рахунок переміщення поршня отримують мікробульбашки.

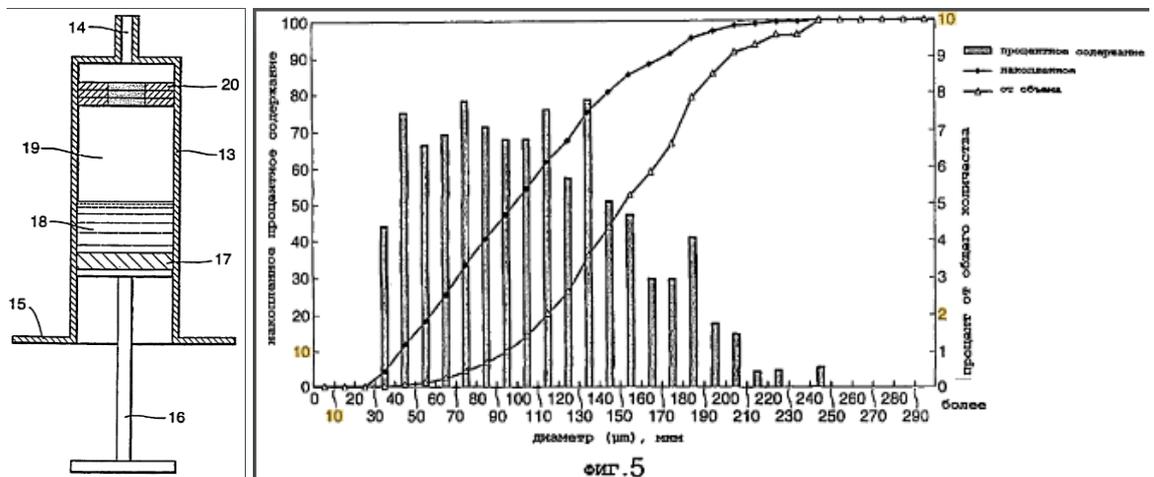


Рис.2. Патент RU2261700C2. дисперсний склад бульбашок

					201 пНТ 9712008 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Інжекцію рідини можна застосувати якщо вдасться створити відповідне розрідження.

Застосування труби Вентурі (рис.5.) дозволяє інжектувати газ за допомогою рідини.

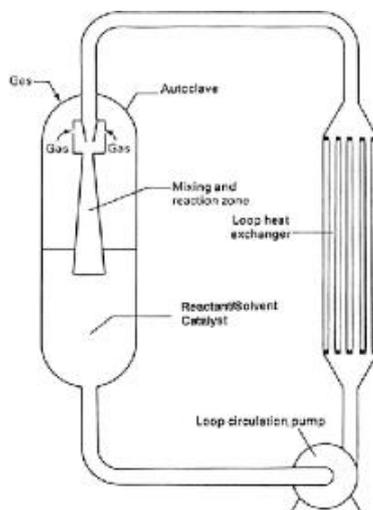


Рис.5. Труба Вентурі

Недоліком є складність конструкції.

Таким чином необхідна розробка простої насадки, за допомогою котрої можна відносно легко отримати мікробульбашки газу у воді, яка знаходиться під надлишковим тиском.

Також важливим є той факт, що газову суміш пропану і бутану для дослідів беремо з балона. Нерівномірне випаровування газів призводить до змін у складі газової суміші.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

## 2. Склад газової суміші

Перш ніж переходити до гідратуутворення необхідно з'ясувати основні засади утворення мікробульбашок газу у воді. Оскільки експеримент буде проводитися з утворенням гідрату пропану то саме для нього і необхідно виконати розрахунки. Для дослідів застосовувалася пропан-бутанова суміш з балона. Тому в розрахунках необхідно враховувати склад суміші газів.

Одразу виникає питання про склад цієї суміші. Для дослідів застосовано пропан-бутанову суміш, яка у початковому складі містить пропан ( $C_3H_8$ ) у кількості до 70% та н-бутан ( $C_4H_{10}$ ) у кількості до 30%. Загальна кількість інших вуглеводнів (етан, етилен, бутилен тощо) не перевищує 7% і в розрахунках не враховувалася. Крім того, в процесі випаровування рідкої суміші пропан-бутану у балоні склад її компонентів постійно змінюється.

Розрахунок складу газової суміші можна виконати вимірявши її тиск при заданій температурі. Загальний тиск є сумою парціальних тисків компонентів

$$P = P_p + P_b. \quad (2)$$

На лінії насичення кожен газ має своє значення тиску як функція температури.

Температура, °C	Тиск пропану, кПа	Тиску н-бутану, кПа
0	465	102
5	543	123
10	629	146
15	725	174

Знаючи частку пропану ( $X_p$ ) загальний тиск газової суміші можна визначити за формулою:

$$P = P_p X_p + P_b (1 - X_p), \quad (2^*)$$

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

201 пНТ 9712008 ПЗ

де  $P$  - загальний тиск суміші,  $P_p$  - тиск чистого пропану при даній температурі,

$P_B$  - тиск чистого бутану при даній температурі. Для визначення частки пропану в суміші зручно користуватися діаграмою, рис.6.

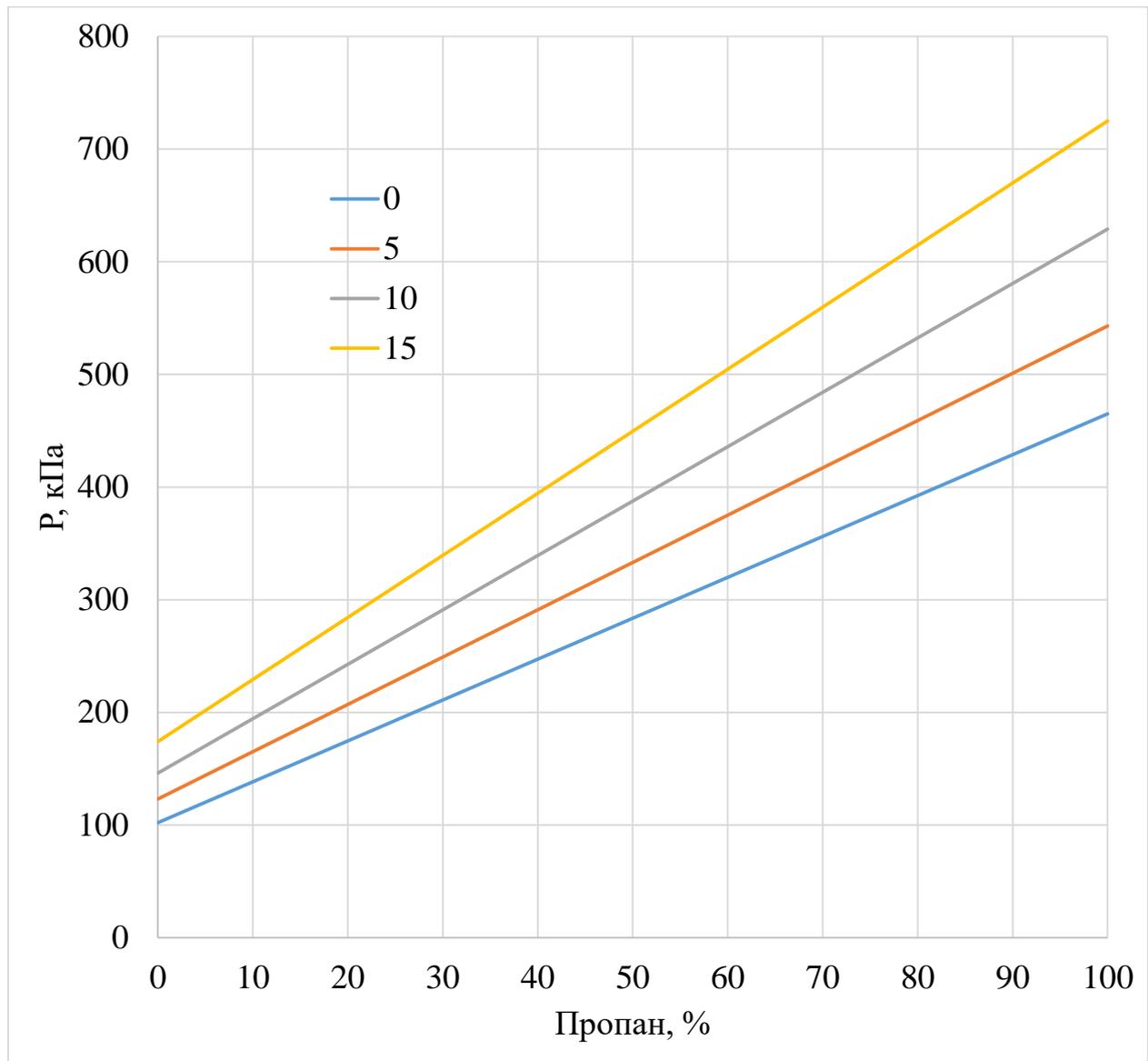


Рис.6. Діаграма визначення % пропану в газовій суміші

Наприклад, якщо при температурі 11,5 °C тиск суміші становить 2,9 бар, то з (2\*) частка пропану у суміші

$$X_p = \frac{P - P_B}{P_p - P_B} = \frac{2,9 - 1,41}{6,12 - 1,41} = 0,32 \quad (3)$$

Таким чином суміш має 32% пропану і 68% бутану.

					201 пНТ 9712008 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3. Дослідження конструкції насадки для синтезу мікробульбашок газу

Розмір і кількість бульбашок газу у воді залежить від ряду факторів: температури рідини, температури газу, тиску газу, різниці тисків до і після форсунки, складу газів газової суміші, виду і концентрації ПАР, конструкції форсунки.

Відомо що:

- \* Низька температура рідини призводить до обмерзання насадки і зменшення витрат газу. Цей фактор впливає на конструкцію насадки. Зокрема досліди показують що краще застосовувати короткі насадки.
- \* Підвищення загального тиску в реакторі призводить до стискання бульбашок і зменшення їх кількості. Можливо вони «схлопуються» або їх просто не видно.
- \* Щодо конструкції насадки. Помічено, що кількість мікробульбашок зростає за умови збільшення швидкості виходу газу з форсунки.

Загалом досліджувалися 2 види насадок: 1- патрубок малого діаметру різної довжини, 2- патрубок різної довжини, який завершується соплом, рис.6\*.

За умови адіабатного витоку ідеального газу з **сопла** швидкість виходу газу розраховуємо за формулою

$$V = \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_1 v_1 \left( 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) + V_1^2}, \quad (4)$$

$k$ - показник адіабати ( $C_p/C_v$ );

$P_1$ - тиск на вході в сопло, Па;

$P_2$ - тиск на виході з сопла, Па;

$V_1$ - швидкість газу перед соплом, м/с;

					201 пНТ 9712008 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



$$\beta_{KP} = \left( \frac{2}{1,12+1} \right)^{\frac{1,12}{1,12-1}} = 0,58 \quad (5^*)$$

Перш ніж надійти в сопло газ проходить раптове звуження, потім рухається по трубопроводу малого діаметру. У деяких насадках відсутнє сопло. Отже там буде раптове розширення. На усіх цих ділянках відбуваються втрати тиску, які необхідно визначити.

Втрати тиску на місцевих опорах знаходимо за формулою

$$\Delta P = \xi \frac{V^2}{2} \rho. \quad (6)$$

Для **раптового звуження** коефіцієнт місцевого опору

$$\xi_1 = 0,5 \left( 1 - \frac{d_1^2}{d_0^2} \right) \quad (7)$$

Втрати тиску на раптовому звуженні знаходимо за формулою

$$\Delta P_1 = \xi_1 \frac{V_1^2}{2} \rho_1 \quad (8)$$

Також в насадці є ділянки руху газу у **прямолінійному відрізку трубопроводу**. Втрати тиску на такій ділянці можна визначити застосовуючи рівняння Дарсі, яке записане в диференційній формі

$$dP = -\lambda \frac{dx}{d} \rho \frac{w^2}{2}, \quad (9)$$

де  $P$  – тиск, Па;  $\lambda$  – коефіцієнт тертя;  $d$  – внутрішній діаметр трубопроводу, м;  $\rho$  – густина газу, кг/м<sup>3</sup>;  $w$  – швидкість газу, м/с.

З урахуванням рівнянь стану газу та нерозривності потоку рівняння (9) набуває вигляду

$$-PdP = \frac{16}{2\pi^2} \lambda \frac{L_0^2}{d^5} \rho_0 P_0 \frac{T \cdot z}{T_0 \cdot z_0} dx, \quad (10)$$

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

де величини з індексом «0» характеризують параметри газу при нормальних умовах ( $T_0=293$  К,  $P_0=101300$  Па), або при умовах вимірювання витрат газу.

Для отримання розв'язку рівняння (10) необхідно проінтегрувати. За умови  $T=\text{const}$  рівняння (1) має розв'язок

$$P_{\Pi}^2 - P_{\text{к}}^2 = 1,62\lambda \frac{L_0^2}{d^5} \rho_0 P_0 \frac{T \cdot z}{T_0 \cdot z_0} l \quad (11)$$

Якщо на насадці дроселюється великий перепад тиску то  $T$  вже не буде постійним. Зважаючи на велику швидкість руху газу в насадці (більше 20 м/с) на температуру газу може мати вплив адіабатне охолодження.

В рівнянні (11) коефіцієнт тертя

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{k_e}{d_B} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (12)$$

де  $k_e/d_B=0.005$  ;  $\text{Re}$  – критерій Рейнольдса.

Критерій Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{V_1 d}{v_g} \quad (13)$$

Кінематична в'язкість:

- пропану  $0,53 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с
- бутану  $0,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с

Для суміші газів середнього складу

$$v_g = v_{gP} X_P + v_{gB} (1 - X_P) = (0,53 \cdot 0,5 + 0,6 \cdot 0,5) \cdot 10^{-6} = 0,565 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

Швидкість газу визначають за формулою

$$V_1 = \frac{4G_g}{\rho_g \pi d^2}, \quad (14)$$

де  $G_g$  – масові витрати газів, кг/с;  $\rho_g$  – густина газу, кг/м<sup>3</sup>;

					201 пНТ 9712008 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



$$b_B = \frac{(\sqrt[3]{2} - 1)8,31441 \cdot (273,15 + 151,94)}{3 \cdot 3,797 \cdot 10^6} = 7,97 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}.$$

Модифікуюча функція залежить від фактора ацентричності  $\omega$  та приведеної температури  $T_r$ . Для систем легких вуглеводнів при визначенні параметрів рівноваги рідина-пар, найточнішою є модифікація Г. Соаве:

$$F_{(w, T_r)} = \frac{1}{T_r} \left[ 1 + (0,48 + 1,574\omega - 0,176\omega^2)(1 - T_r^{0,5}) \right]^2. \quad (19)$$

Запропонований Пітцером фактор ацентричності  $\omega$  застосовується у якості параметра, який характеризує асиметрію молекули. Він визначається за діаграмами тиску відповідних газів за допомогою формули

$$\omega = -\lg P_{vp_r} - 1,000 \quad (20)$$

де  $P_{vp_r}$  – приведений тиск парів, який визначається при приведеній температурі  $T_r = 0,7$ . Для пропану і бутану фактор ацентричності приведено в таблиці, табл.1.3.

Фактор ацентричності для окремих газів Табл.1.3.

Газ	Фактор ацентричності
Пропан	0,152
н-Бутан	0,201

Приведена температура визначається за формулою

$$T_r = \frac{T}{T_k}. \quad (21)$$

					201 пНТ 9712008 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З урахуванням фактора ацентричності для пропану

$$F_{(P)} = \frac{369,8}{T} \left[ 1 + 0,715 \left( 1 - \frac{T^{0,5}}{19,23} \right) \right]^2 . \quad (22)$$

З урахуванням фактора ацентричності для бутану

$$F_{(B)} = \frac{425,1}{T} \left[ 1 + 0,789 \left( 1 - \frac{T^{0,5}}{20,62} \right) \right]^2 . \quad (23)$$

В межах температур 0- +5° модифікуючі функції для пропану та бутану мають значення, показані на рис. 7.

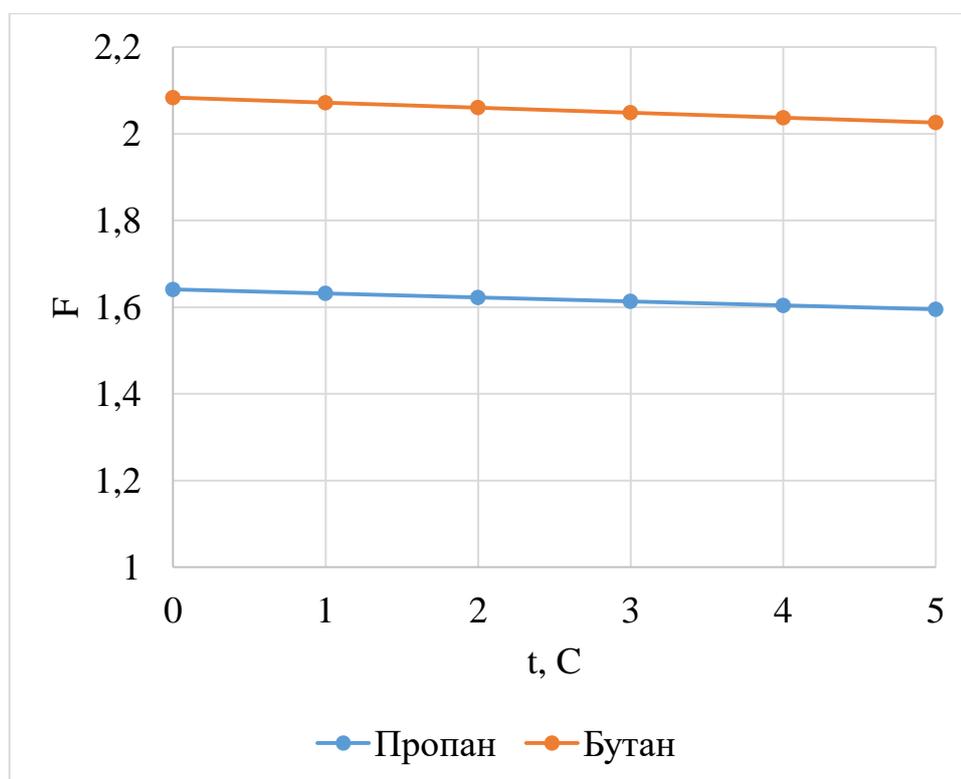


Рис. 7. Значення модифікуючої функції для пропану та бутану в робочому інтервалі температур

Визначення коефіцієнтів стисливості потребує ітераційного підходу до розрахунків. Для цього в програмі Excel були виконані циклічні розрахунки

Пропан									
P, атм	t, C	Xp	P'	T	F	V	Z	V	Густина, кг/м3
3	0	0.7	283710	273.15	1.640	0.0077	0.966568	0.007737	3.9900
Бутан									
P	t	Xв	P'	T	F	V	Z	V	Густина, кг/м3
3	0	0.3	121590	273.15	2.082	0.0178	0.957668	0.017887	0.9745
Разом									4.9644

Рис.8. Розрахунки густини газової суміші в Excel

Тепер, вимірявши витрати газу по лічильнику і знаючи розміри насадки можемо визначити швидкість руху газу в ній. Об'єднавши формули (14) та (15) можемо визначити швидкість газу в трубці насадки

$$V_1 = L_2 \frac{4\rho_2}{\pi d^2 \rho_g} \quad (24)$$

Втрати тиску в трубчастій частині насадки можна визначити за формулою, Па

$$\Delta P_{TP} = P_{II} - \sqrt{P_{II}^2 - 1,62\lambda \frac{L_0^2}{d^5} \rho_0 P_0 \frac{T \cdot z}{T_0 \cdot z_0} l} \quad (25)$$

Розрахунки виконано в програмі Excel і зображено на рис. 9.

Марка	dz, mm	dv, mm	l, mm	Особливо	L2, л/с	Gg, гр/с	P1, ата	P2, ата	Xp	v0, м3/кг	v1, м3/кг	V1, м/с	Re	ke/d	Коеф. Теп	dПтп, Па
G22	0.72	0.41	21.5	сопло	0.00671	0.0092	3.1	1	0.32	0.73	0.225	15.7	1.113E+04	5.0E-03	3.571E-02	1037.241
G23	0.64	0.34	33	сопло	0.00714	0.0098	2.85	1	0.32	0.73	0.246	26.5	1.561E+04	5.0E-03	3.421E-02	4821.727
G23	0.64	0.34	9	круглий о	0.0313	0.0429	2.5	1	0.32	0.73	0.283	133.7	7.871E+04	5.0E-03	3.044E-02	26840.607
G24	0.57	0.31	32	сопло	0.00435	0.0060	2.95	1	0.32	0.73	0.238	18.8	1.009E+04	5.0E-03	3.621E-02	2805.829
G24	0.57	0.31	7	круглий о	0.0222	0.0304	2.5	1	0.32	0.73	0.283	114.1	6.123E+04	5.0E-03	3.075E-02	16483.500
G27	0.41	0.21	18	круглий о	0.0125	0.0171	2.7	1	0.32	0.73	0.261	129.1	4.694E+04	5.0E-03	3.117E-02	106103.783

Рис.9. Результати розрахунку втрат тиску в трубках насадки

					201 пНТ 9712008 ПЗ			Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				

Враховуючи конструкцію насадки без сопла, в ній крім втрат тиску по довжині також є місцеві опори: раптове звуження і раптове розширення. Додавши їх до втрат тиску по довжині, отримаємо

Втрати тиску на місцевих опорах знаходимо за формулою

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_l + 1,5 \frac{V_1^2}{2} \rho_1. \quad (25^*)$$

Трубчаста насадка з соплом

Загальні втрати тиску на насадці такого типу визначаються за формулою

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_l + 0,5 \frac{V_1^2}{2} \rho_1 + \Delta P_c. \quad (25^{**})$$

### Окремі висновки

Результати експерименту показують, що для насадок з соплом значення критерія Рейнольдса знаходяться в межах  $(1 \dots 1,5) \cdot 10^4$ . Швидкість в трубках цих насадок порівняно не велика і становить  $15 \div 27$  м/с. Втрати тиску становлять  $1 \div 5$  кПа, що загалом становить від 0,5 до 2,5% діючого перепаду тиску. Очевидно більша частина втрат тиску буде в соплі насадки. Це прискорює охолодження і зрештою обмерзання насадки. Що і спостерігається в експериментах.

Для насадок без сопла характерні швидкості газу 114-133 м/с, що відповідає критеріям Рейнольдса  $(4,7 \dots 7,9) \cdot 10^4$ . Укорочені трубки (22-26 діаметрів) насадки використовують лише  $11 \div 18\%$  діючого перепаду тиску.

					201 пНТ 9712008 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Практично уся інша частина перепаду тиску передається бульбашкам, які розширюються в рідині а газ в них охолоджується. Це перспективний варіант насадки для отримання газових гідратів.

Для довгої трубки (86 діаметрів) характерні значно більші втрати тиску (61,6%), що з урахуванням ефекту Джоуля-Томпсона призводить до обмерзання такої насадки. На розширення газу в бульбашках залишається менше 40%, що погіршить охолодження газу і негативно позначиться на кількості синтезованого газогідрату.

Висновок: на основі виконаних досліджень можемо стверджувати, що оптимальною конструкцією сопла для подачі газу в реактор для синтезу газових гідратів є коротка трубка (20-30 діаметрів) малого діаметру. Висока швидкість газу на виході з такої трубки дозволяє його легко подрібнювати при ударі об воду. Діаметром трубки можна задавати необхідні витрати газу. Також застосування трубки зменшує імовірність її забивання в процесі роботи твердими частинками, порівняно з соплом, котре в аналогічних умовах буде мати менший діаметр.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

201 пНТ 9712008 ПЗ

### 3. Температура газу на виході з насадки

Від’ємна температура газу на виході з насадки призводить до її обмерзання. Від’ємна температура газу усередині бульбашок сприяє інтенсивному гідратоутворенню. Саме тому важливо визначити температуру газу.

Дуже важливо щоб насадка ефективно працювала при низьких температурах води. Оскільки у результаті дроселювання газу його температура знижується- виникає ефект обмерзання, який призводить до різкого зменшення витрат газу через насадку. Візуально при обмерзанні насадки утворюється льодяна трубка (іноді розгалужена) малого внутрішнього діаметру довжиною 5-6 мм.

Досліди показали, що довгі голки обмерзають. Короткі не розклепані не обмерзають. Голки середньої довжини теж обмерзають.

При малому часі перебування газу в насадці її температурний режим можна вважати адіабатним. Зміна температури в адіабатному процесі описується рівністю

$$\frac{T_{\Pi}}{T_K} = \left( \frac{P_{\Pi}}{P_K} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (26)$$

де  $T_{\Pi}$  – початкова температура, К;  $T_K$  – початкова температура, К;  $P_{\Pi}$  – тиск перед входом в насадку, Па;  $P_K$  – тиск на виході з насадки, Па. З рівняння (26) можна визначити температуру газу на виході з насадки

$$T_K = T_{\Pi} \left( \frac{P_K}{P_{\Pi}} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (27)$$

Охолодження газу в насадці відбувається з температури +11,5 до температури 0 °С. Визначимо можливу область дроселювання газової суміші для запобігання утворення льоду на насадці для вказаних початкових умов, рис.9.

					201 пНТ 9712008 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Нижня лінія діаграми показує мінімальний тиск в реакторі при початковому тиску перед насадкою для газової суміші пропану і бутану в області синтезу газового гідрату пропану. Якщо тиск в реакторі буде знаходитися нижче нижньої лінії (рис.9) – це призведе до небажаного обмерзання насадки. Верхня лінія показує максимальний тиску в реакторі.

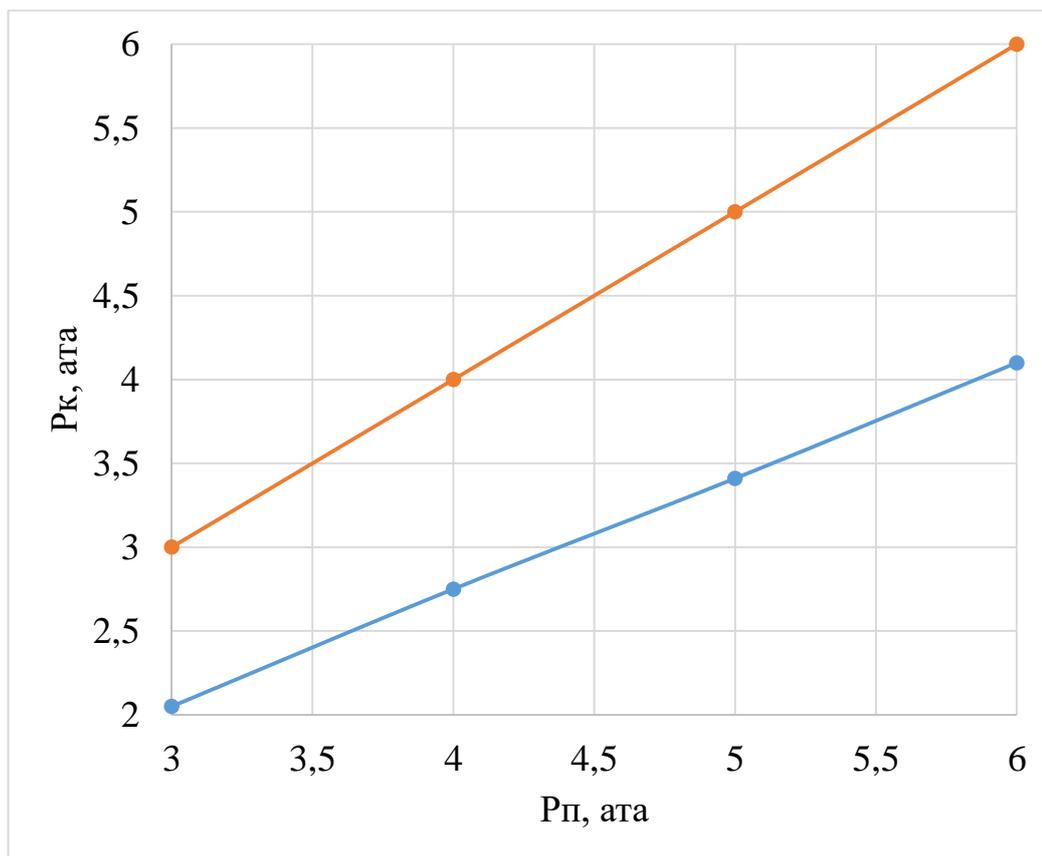


Рис.9. Тиск в газогідратному реакторі для уникнення обмерзання насадки

Отже, для уникнення обмерзання насадки рекомендовані значення тиску в реакторі знаходяться в секторі між двома лініями, рис.9.

Насадки, що закінчуються соплом працюють в області критичних співвідношень тиску, котра для суміші пропану з бутаном становить 0,58. Якщо до рисунка 9 додати лінію тиску на виході з сопла, отримаємо рис.9\*.



#### 4. Дослідження синтезу газогідрату пропану

Термобаричні умови гідратуутворення для пропану

Температура, °C	Тиск (абсолютний), кПа
-1,0	170
1,7	240
2,3	270
3,3	340
4,4	410
5,5	480

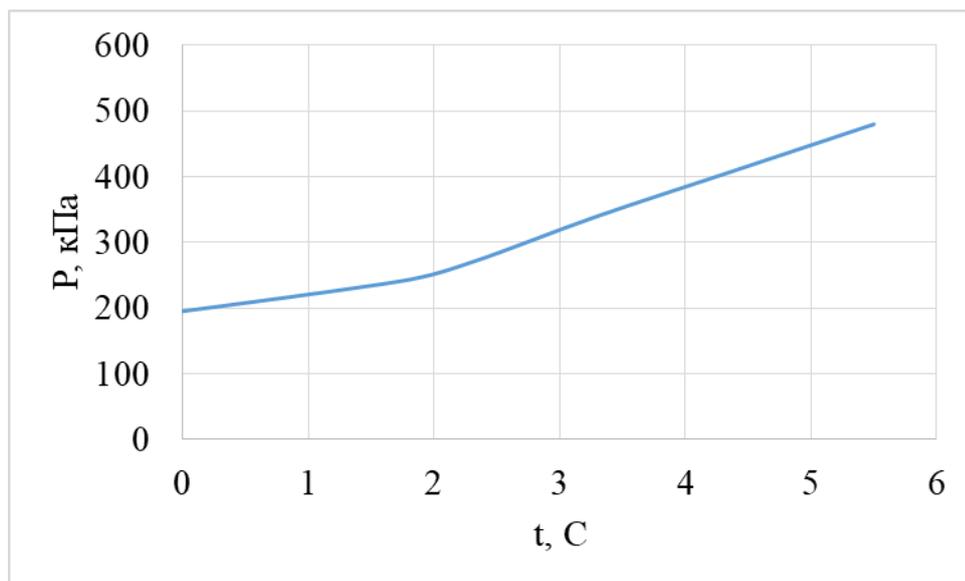


Рис.10. Термобаричні умови існування газогідрату пропану (тиск абсолютний) у воді

Як видно з рис. 10, для синтезу гідрату пропану в діапазоні температур 0-2°C необхідно в реакторі підтримувати манометричний тиск на рівні 1-1,5 бар.

#### 4.1. Дослідна установка

Для проведення експериментальних досліджень синтезу ГГ за допомогою мікробульбашок нами розроблена установка, схему якої представлено на рис.11.

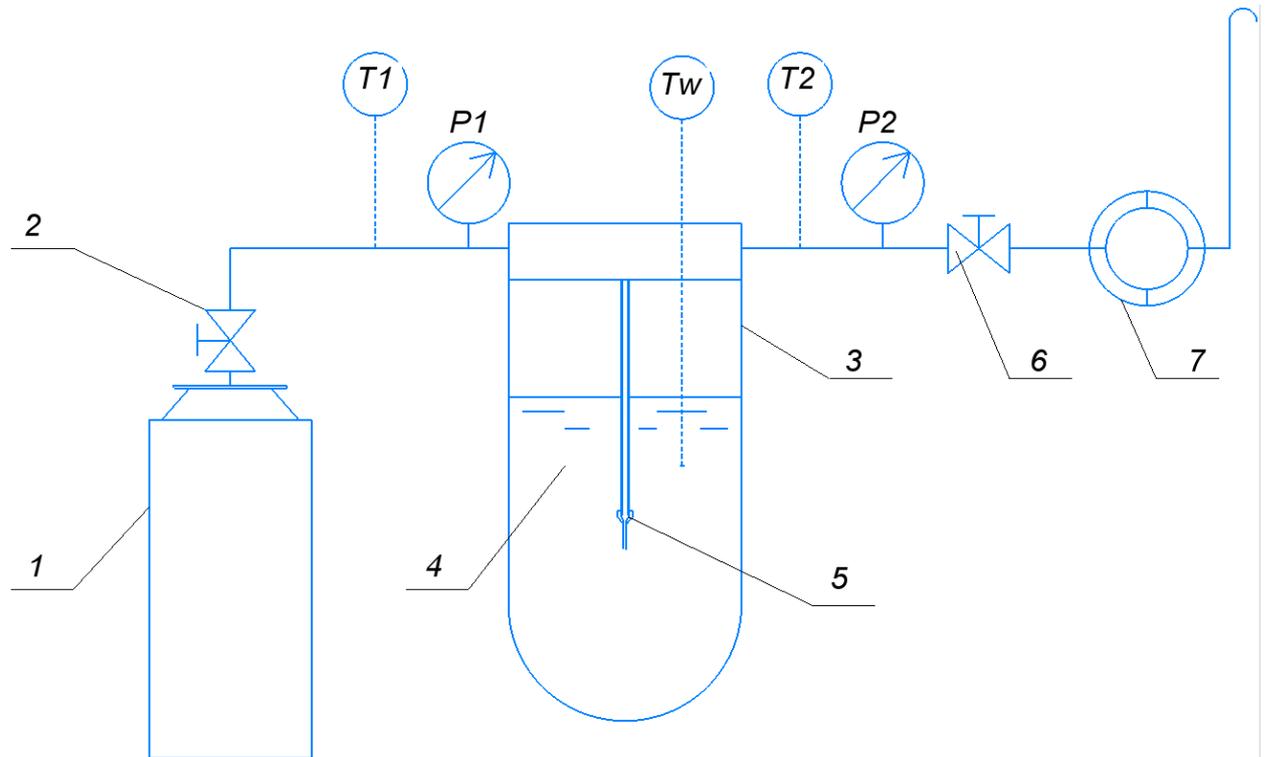


Рис.11. Схема дослідної установки

1 - балон газовий; 2 - вентиль голковий на балоні; 3 - реактор з прозорою колбою; 4 - вода; 5- трубка подачі газу зі змінною насадкою; 6 – вентиль голковий; 7- лічильник витрат газу

Загальний вигляд установки зображено на фото, рис.12.

					201 пНТ 9712008 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



**Розміри змінних сопел**

**Табл.1.**

G	Зовн діам. мм	Внутр. діам. мм	Товщина стінки, мм	Довжина ізолюваної частини, мм	Загальна довжина, мм		
					короткої	середньої	довгої
G21	0,82	0,51	0,15	8,5			44
G22	0,72	0,41	0,15	7,5		21,5	
G23	0,64	0,34	0,15	7,5	9		33
G24	0,57	0,31	0,13	7	7		32
G27	0,41	0,21	0,1	7		18	-

- Діаметр пластмасової частини перед входом в металеву 2 мм.

**Результати вимірювань**

**Табл.2.**

G	Довжина, мм	Витрати, л/с (експ)	Умови					
			P <sub>1</sub> , атм	P <sub>2</sub> , атм	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	U <sub>t</sub>	T <sub>w</sub>
G21	44	-						
G22	21,5	0,00671	2,1	0	11,45	11,5	20,25	11,5
G23	33	0,00714	1,85	0	11,45	11,5	20,25	11,5
G23	9	0,0313	1,5	0	11,45	11,5	20,25	11,5
G24	32	0,00435	1,95	0	11,45	11,5	20,25	11,5
G24	7	0,0222	1,5	0	11,45	11,5	20,25	11,5
G27	18	0,0125	1,7	0	11,45	11,5	20,25	11,5

Склад газу t=+9°C, P=1.9 бар.

$$X_P = \frac{P - P_B}{P_P - P_B} = \frac{2,9 - 1,41}{6,12 - 1,41} = 0,32 \text{ - частка пропану у суміші.}$$

Визначимо питомий об'єм газової суміші при атмосферному тиску

$$v_2 = v_P X_P + v_B (1 - X_P) = 0,52 \cdot 0,32 + 0,39 \cdot 0,68 = 0,43 \text{ м}^3/\text{кг} \quad 430 \text{ л/кг}$$

					201 пНТ 9712008 ПЗ			Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				

Масові витрати:  $G=L/v$

Результати розрахунку

Табл.3.

G	l, мм	Витрати, л/с (експ)	Умови, $t_1=11,5^{\circ}\text{C}$					
			G, г/с	$P_1$ , ата	$v_P$	$v_B$	$v_1$	$V_1$
G21	44	-						
G22	21,5	0,00671	0,0156	3,1	0,16	0,289	0,248	406,3
G23	33	0,00714	0,0166	2,85	0,175	0,289		
G23	9	0,0313	0,0728	2,5	0,2	0,289		
G24	32	0,00435	0,0101	2,95	0,17	0,289		
G24	7	0,0222	0,0516	2,5	0,2	0,289		
G27	18	0,0125	0,0291	2,7	0,19	0,289		

$$v_B = \frac{RT}{P_B \mu} = \frac{8,314(273+11.5)}{1,41 \cdot 10^5 \cdot 0,05812} = 0,289$$

$$v_1 = v_P X_P + v_B (1 - X_P) = 0,16 \cdot 0,32 + 0,289 \cdot 0,68 = 0,248$$

$$V_1 = \frac{4Gv_1}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,0156 \cdot 10^{-3} \cdot 0,248}{3,14 \cdot 0,41^2 \cdot 10^{-6}} = 29,3$$

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,115}{1,115 - 1} 3,1 \cdot 10^5 \cdot 0,248 \left( 1 - \left( \frac{1}{3,1} \right)^{\frac{1,115-1}{1,115}} \right) + 29,3^2} = 406,3$$

Аналогічно розраховуємо для інших випадків.

Також необхідно урахувати втрати тиску в трубі перед соплом [2]

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

201 ПНТ 9712008 ПЗ





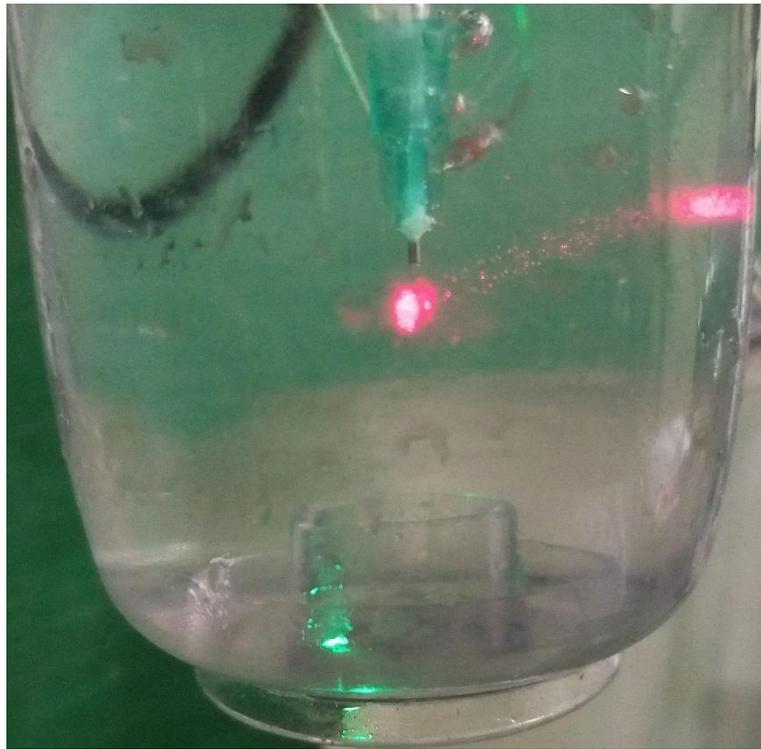


Рис. 14. Лазерний промінь у воді без гідрату.



Рис. 15. Лазерний промінь у воді з газогідратом.

					201 пНТ 9712008 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

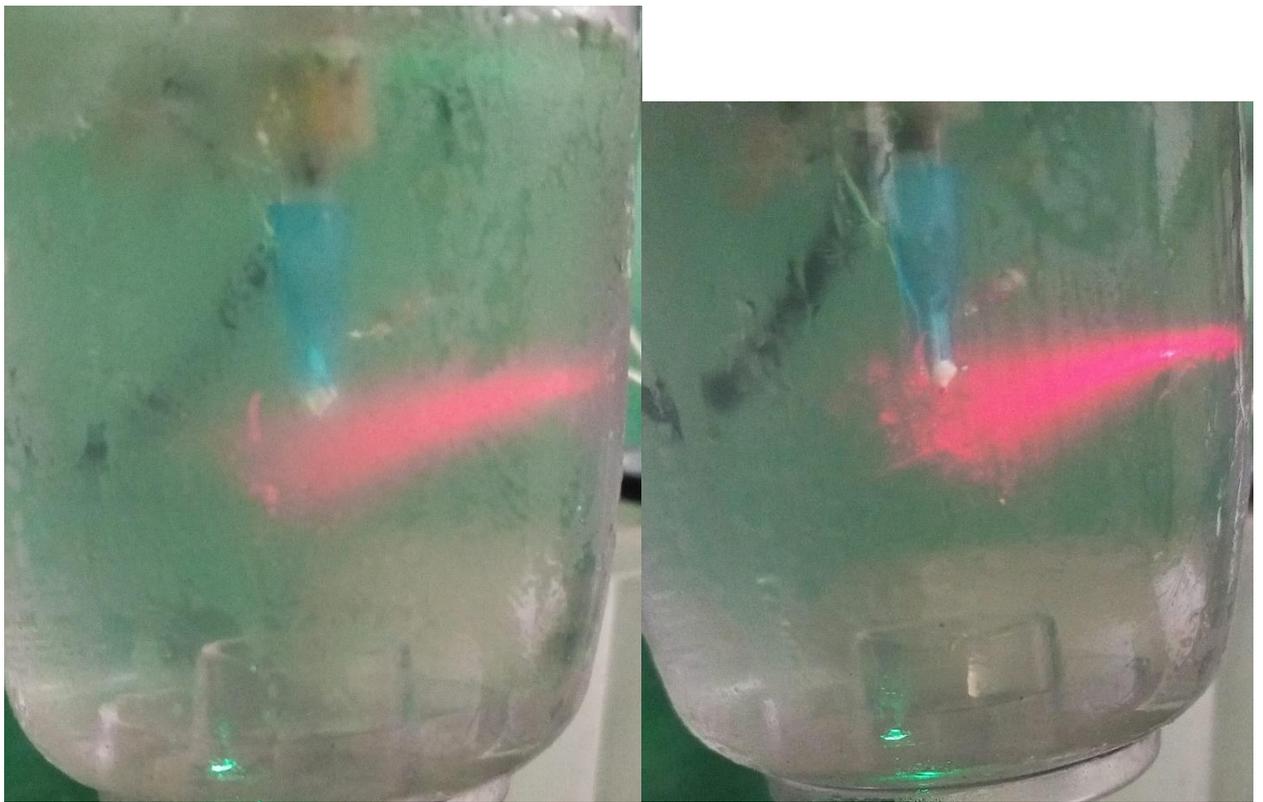


Рис. 16. Розсіювання лазерного променя у воді з газогідратом.

Таким чином, за допомогою розсіювання лазерного випромінення вдалося встановити присутність газогідратів у воді.

					201 пНТ 9712008 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 5. Висновки.

В результаті виконаних досліджень:

1. Запроектовано і зібрано установку для дослідження синтезу газових гідратів, яка дозволяє вносити оперативні зміни в термобаричні умови процесу, виконувати заміну насадок, візуально виявляти утворення газових гідратів та замінювати розчин.
2. Визначено оптимальну форму та розміри насадки для синтезу мікробульбашок газу.
3. Визначену мінімально-необхідну концентрацію ПАР для отримання мікробульбашок.
4. Встановлено, що для отримання мікробульбашок швидкість виходу газу з насадки повинна бути в межах 100-130 м/с. При менших швидкостях утворюються бульбашки з середнім розміром більше 100 мкн, а при більших швидкостях (сопла дозволяють отримати швидкість до 400 м/с) спостерігається обмерзання сопла.
5. Вперше для визначення наявності та кількості синтезованих мікрокристалів газогідрату застосовано лазерний промінь, що дозволило у декілька разів зменшити витрати газової суміші, яка використовується для досліджень.

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

201 пНТ 9712008 ПЗ

## Література

1. Milkov A.V. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there?/ Earth-Science Reviews. – 2004. – Vol. 66, Iss. 3–4. – P. 183–197.
2. Diaconescu C.C. Geophysical evidence for gas hydrates in the deep water of the South Caspian Basin / C.C. Diaconescu, R.M. Kieckhefer, J.H. Knapp // Marine and Petroleum Geology. – 2001. – P. 209 – 221.
3. Gas hydrates: past and future geohazard?/ M. Maslin, M.Owen, R.Betts [et. al.] // Natural resources. – 2010. – № 8. – P. 5 – 9.
4. Клименко В.В. Газогідратні родовища в акваторії Чорного моря та перспективи їх розробки / В.В. Клименко, М.Л. Зоценко, М.М. Педченко// Тези 61-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – Т. 1. – С. 91 – 95.
5. Современное состояние газогидратных технологий / В. С. Якушев, В. Г. Квон, Ю.А. Герасимов, В.А. Истомина. – К.: ИРЦ Газпром, 2008. – 88 с.
6. Клименко В.В. Застосування газогідратних технологій для стискування газу, розділення газових сумішей та транспорту газу / В.В. Клименко, О.Л. Мельников, О.В. Скрипник // Тези 61-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка, 15 – 17 квітня 2009 р. – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – Т. 1– С. 89 – 91.
7. Газотурбінний привід з газогідратним дотискувачем паливного газу [Електронний ресурс] / В.В . Клименко, М.В. Босий, В.П. Парафійник, С.О. Прилипко // Холодильна техніка та технологія. – 2014. – № 4 (150) – С. 10 – 37. – Режим доступу [http://nbuv.gov.ua/UJRN/htit\\_2014\\_4\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/htit_2014_4_8)

					201 пНТ 9712008 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8. Семенов А.П. Газогидратное разделение газовых смесей / А.П. Семенов, В.А. Винокуров // Тезисы докладов, Международная конференция «Перспективы освоения газогидратных месторождений» (17–18 ноября 2009 г.). – К., – 2009. – С. 156 – 159.
9. Клименко В.В. Молекулярно-коагуляционный механизм образования газовых гидратов при аккумуляции холода / В.В. Клименко, С.В. Лопатенко // Тепловые режимы и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры: науч.-техн. сб. – Одесса, 1994. – № 1 – 2. – С. 34 – 39.
10. Клименко В.В. Підвищення ефективності використання природного холоду в плодоовочесховищах / В.В. Клименко, О.В. Скрипник, М.В. Личук // Холодильна техніка та технологія. – 2013. –Т. 49, № 6. – С. 55 – 59.
11. Клименко В.В. Газогидратные аккумуляторы холода / В.В. Клименко, В.Н. Корниенко // Холодильная техника. – 1989. – № 1. – С. 33 – 37.
12. А.с. 1719813, МКИ5 F 25 В15/02. Способ получения холода / В.В. Клименко (СССР). – № 4779423/06; заявл. 09.01.1990; опубл.15.03.92. Бюл. № 10.
13. Скрипник О.В. Виготовлення безпористих деталей з використанням газогідратних технологій / О.В. Скрипник, В.В. Клименко, В.В. Свяцький, А.А. Віхтоденко // Scientific Horizons – 2015: materials of the XI International scientific and practical conference, september 30 – october 7, Sheffield, UK. – Sheffield: Science and education LTD, 2015. – Vol. 11. Technical sciences.Construction and architecture. – P. 27 – 29.
14. Пат. 53196 Україна, F04F 1/00. Спосіб видобування і підготовки природного газу / В.В. Клименко, М.М. Педченко, М.Л. Зоценко, Л.О. Педченко – № u201004096; заявл. 08.04.2010; опубл. 27.09.2010, Бюл. № 18.
15. Пат. 53195 Україна, F04F 1/00. Установа для підготовки природного газу / В.В. Клименко, М.М. Педченко, М.Л. Зоценко, Л.О. Педченко – № u201004095; заявл. 08.04.2010; опубл. 27.09.2010, Бюл. № 18.

					201 пНТ 9712008 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

16. Підвищення ефективності видобування і підготовки газу з виснажених родовищ шляхом застосування газогідратної технології / В.В. Клименко, М.Л. Зоценко, О.В. Бандуріна, Л.О. Педченко // Сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та гірництві: Вісн. КрНУ ім. М. Остроградського. – 2012. – Вип. 2(73). – С. 92 – 95.

17. Скрипник О.В. Перспективні напрямки технологічного застосування гідратів двооксиду вуглецю / О.В. Скрипник, В.В. Свяцький // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон : ХНТУ. – 2017. – № 2(61). – С. 114 – 118.

18. Применение гидратов в технологиях хранения CO<sub>2</sub> / Г.В. Жук, А.И. Пятничко, П.Ф. Гожик, В.В. Клименко // Энергоэффективность – 2010: тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф., 19 – 21 жовт. 2010 р., Київ. – К.: Ін-т газу НАНУ, 2010. – С. 48 – 51.

19. Онищенко В.О. Застосування газогідратних технологій в нафтогазовій промисловості / В.О. Онищенко, В.В. Клименко // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2011. – № 4(41). – С. 5 – 8.

20. П'янило Я.Д. Моделювання процесу заміщення газів у пористих середовищах // Прикл. проблеми мех. і мат. – 2011. – Вип. 9. – С. 181 – 189.

21. Пат. 85444 Україна МПК E21B 43/25 E21B 43/00 C10L 3/00 C07C 9/00 C01B 31/20 Спосіб виділення вуглеводневого газу з газового гідрату та спосіб зв'язування діоксиду вуглецю / Грьоуе А., Квамме Б., Ховард Д. Д., Болдуін Б. А., Стівенс Д. С., Зорнез Д. Р. – №0200704416; заявл. 22.09.2005; опубл. 26.01.2009; Бюл. №2.

22. Оценка возможности захоронения углекислого газа в крио-литозоне Западной Сибири / А.Д. Дучков, Л.С. Соколова, Д.Е. Аюнов, М.Е. Пермяков // Криосфера Земли. – 2009. – Т. XIII, № 4. – С. 62 – 68.

23. Череповицын А.Е. Целесообразность применения технологий секвестрации CO<sub>2</sub> [Электронный ресурс] / А.Е. Череповицын, К.И.

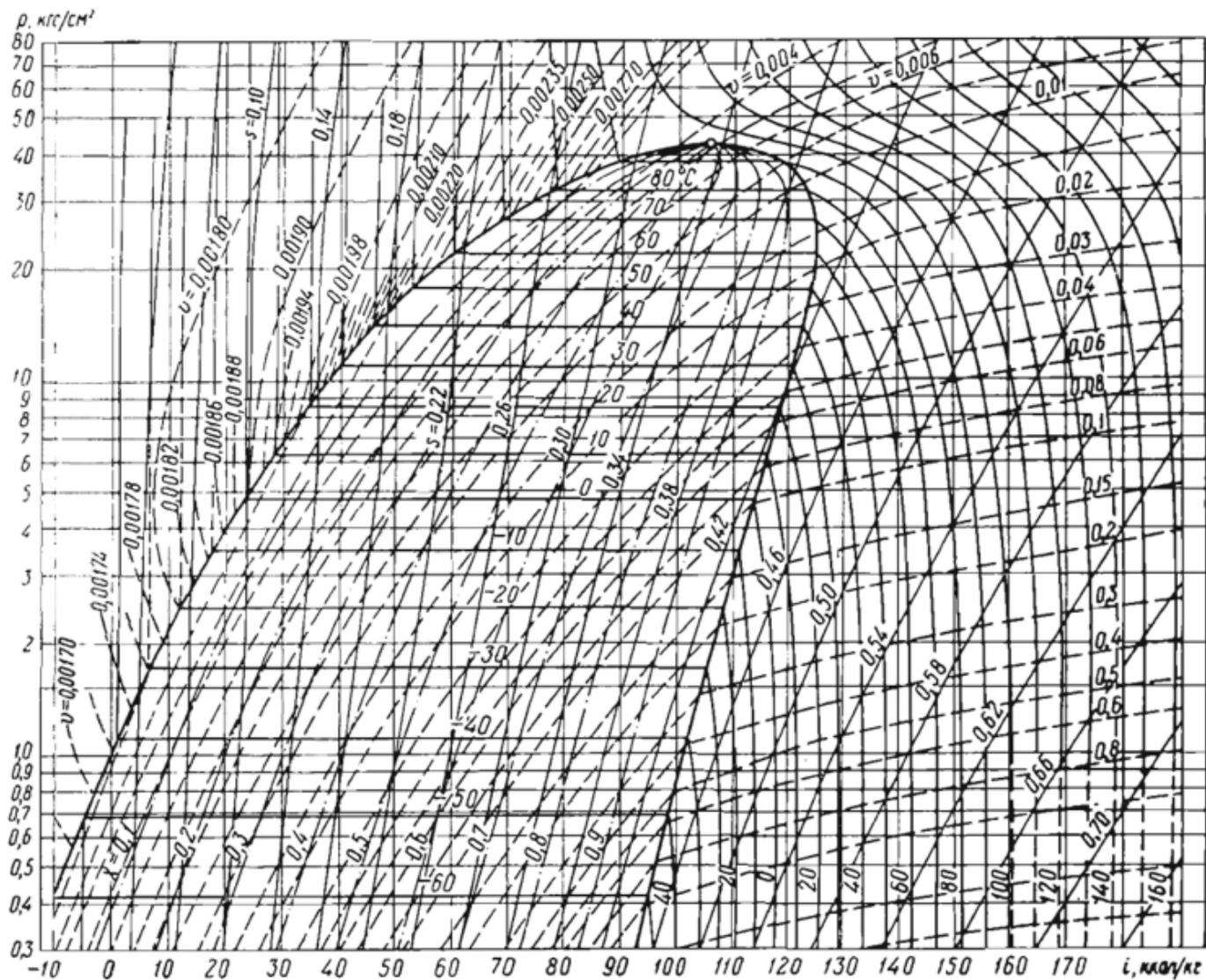
					201 пНТ 9712008 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



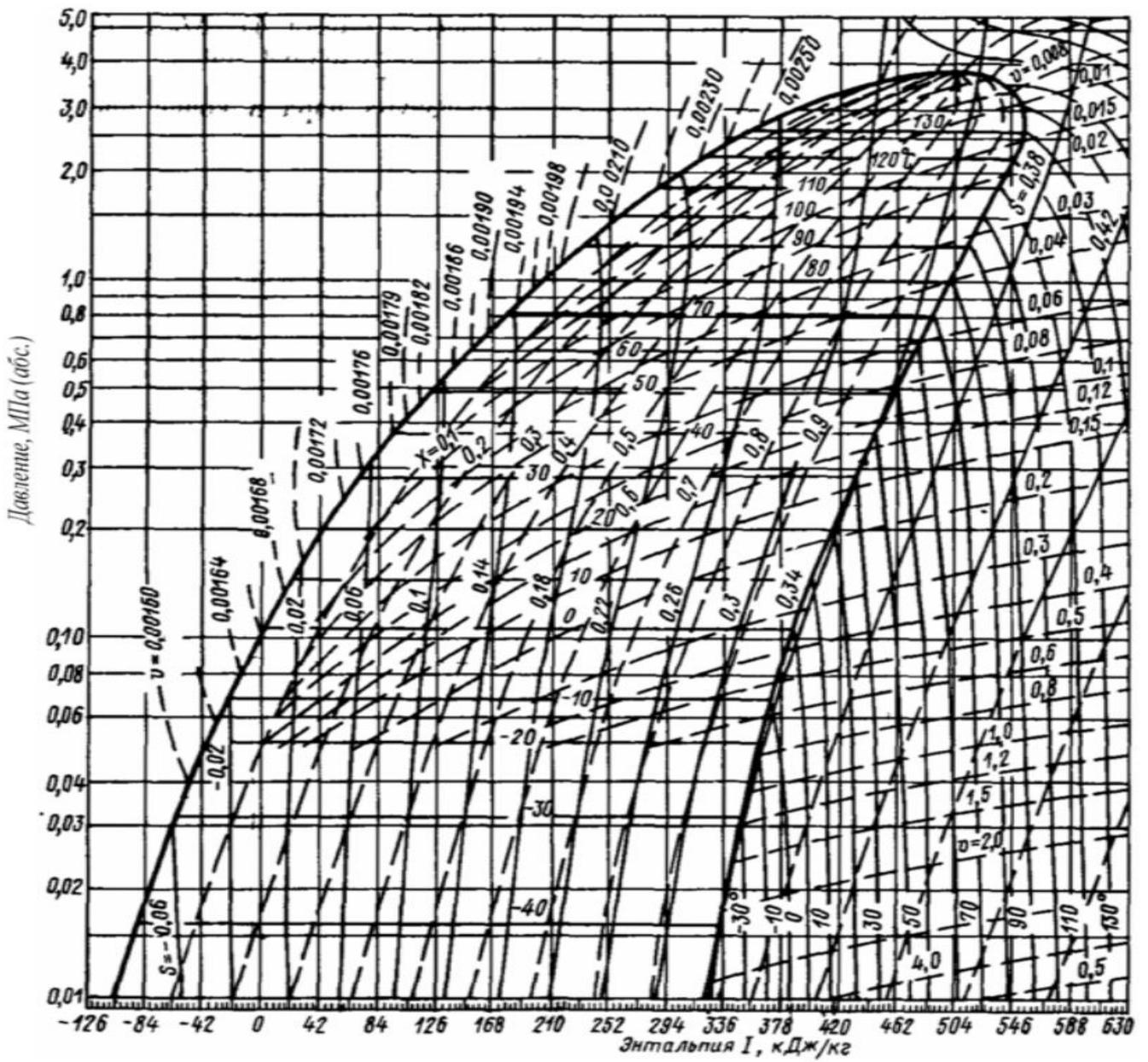
30. Дядин Ю.А. Газовые гидраты / Ю.А. Дядин, А.Л. Гушин // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – №3. – С. 55– 64.

					201 пНТ 9712008 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Пропан



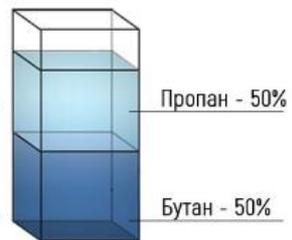
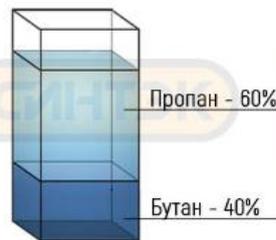
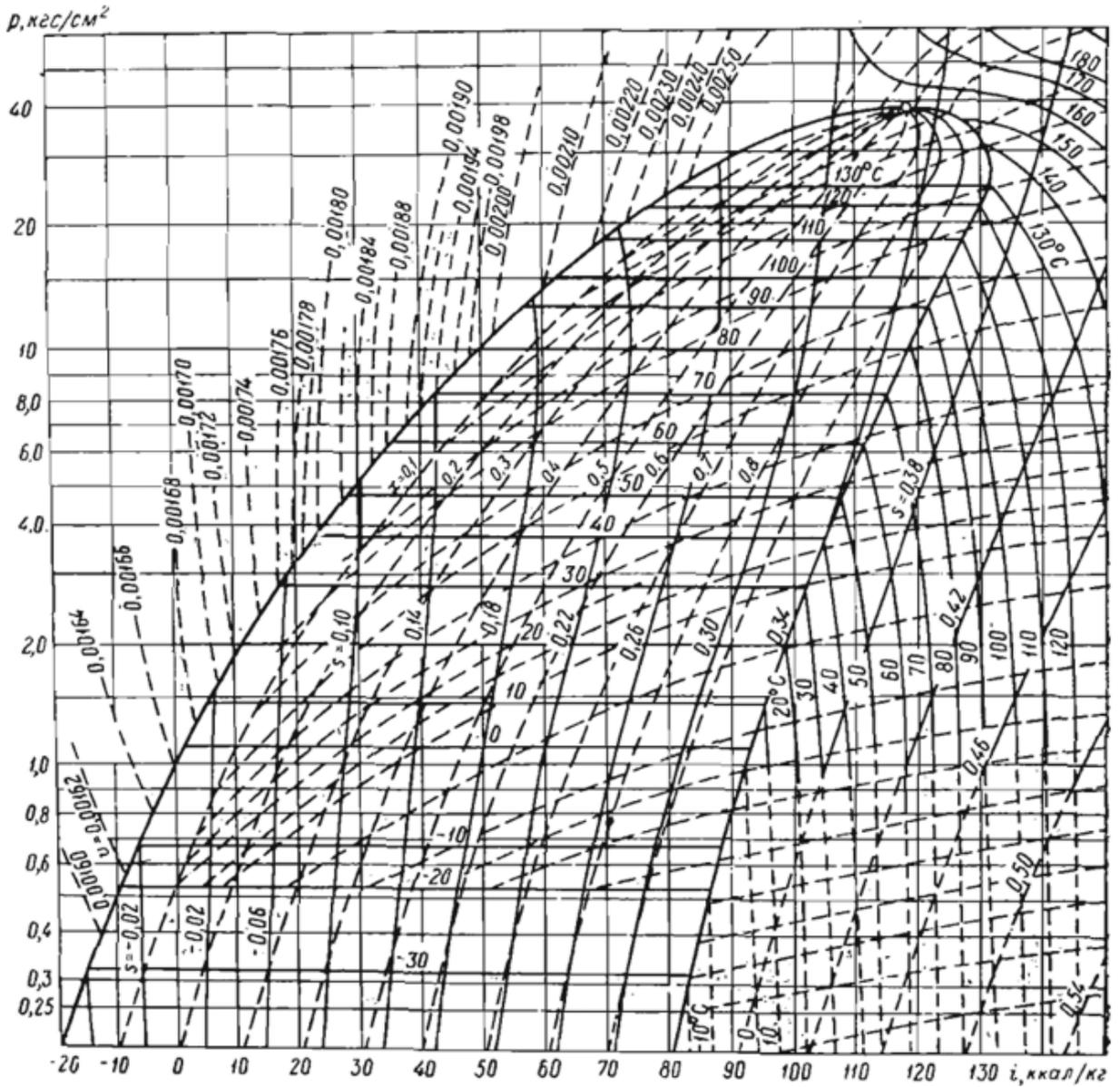
Бутан



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

201 пНТ 9712008 ПЗ

Арк.



Взимку

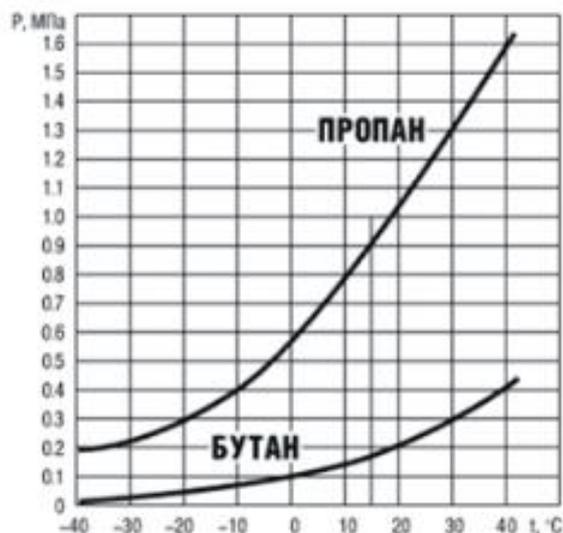
Влітку

Співвідношення пропану до бутану в суміші для різних періодів року

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

201 пНТ 9712008 ПЗ

Арк.



Давление насыщенных паров индивидуальных алканов (в кПа)

Температура, °C	Этан	Пропан	Изобутан	Бутан
-50	553	70		
-45	855	88		
-40	771	109		
-35	902	134		
-30	1050	164		
-25	1215	197		
-20	1400	236		
-15	1604	285	88	58
-10	1831	338	107	68
-5	2081	399	128	84
0	2355	465	153	102
5	2555	543	182	123
10	2982	629	215	146
15	3336	725	252	174
20	3721	833	294	205

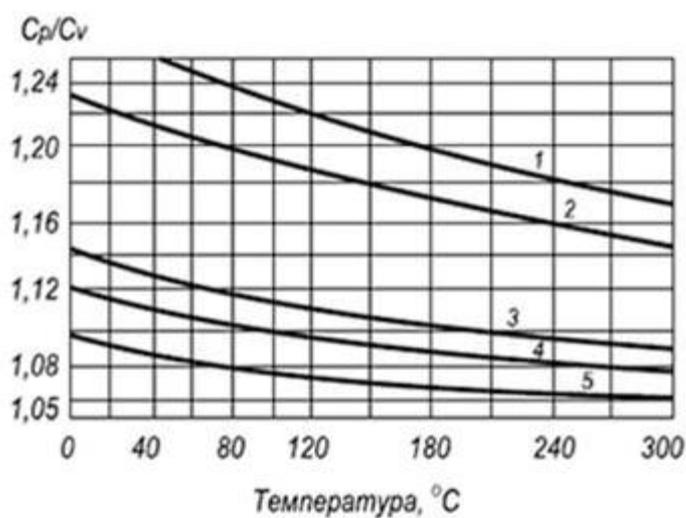
Пропан-бутанова суміш - безбарвний газ з різким запахом - є побічним продуктом переробки нафти і відносяться до групи важких вуглеводнів. Складається з пропану ( $C_3H_8$ ) з домішкою бутану ( $C_4H_{10}$ ) в кількості від 5 до 30%, а сумарна кількість повинна бути не менше 93%. Крім того, до його складу входить не більше 4% етану ( $C_2H_6$ ) і етилену ( $C_2H_4$ ), а також не більше 3% бутану ( $C_4H_{10}$ ) і бутилену ( $C_4H_8$ ). Ці суміші також називають технічним пропаном, а іноді зрідженими нафтовими газами.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

201 пНТ 9712008 ПЗ

## Показники адіабати для різних газів

Газ	K	Температура, °C	Газ	K
Метан	1,31	-115 °C	CH <sub>4</sub>	1.410
Етан	1,2	-74 °C		1.350
Етилен	1,25	20 °C		1.320
Ацетилен	1,25	15 °C	NH <sub>3</sub>	1.310
н-Бутан	1,108	19 °C	Ne	1.640
Ізобутан	1,11	19 °C	Xe	1.660
Пропан	1,13	19 °C	Kr	1.680
Пропилен	1,17	15 °C	SO <sub>2</sub>	1.290
		360 °C	Hg	1.670
		15 °C	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1.220
		16 °C	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1.130



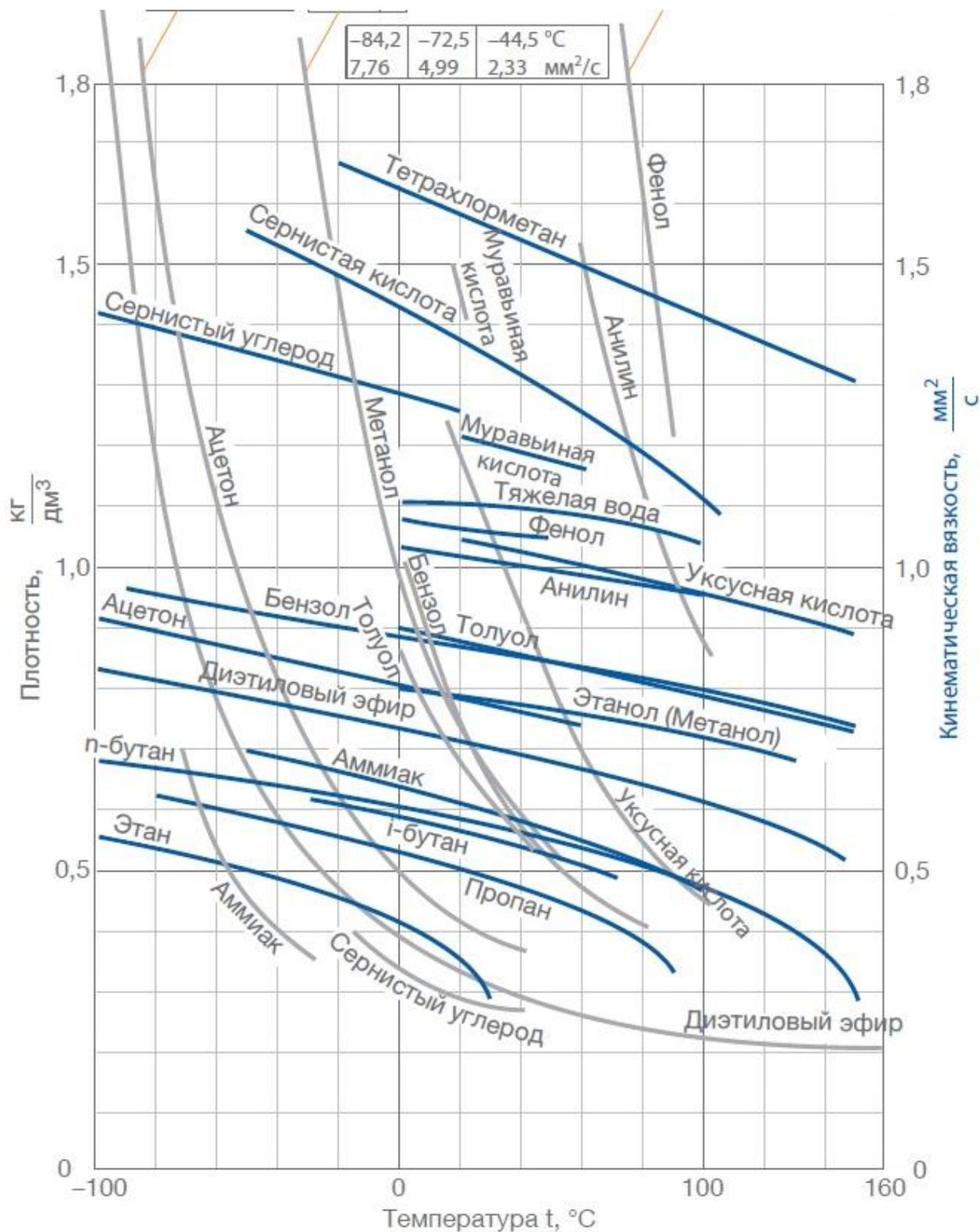
Залежність показника адіабати для різних газів від температури

1- метан, 2- етан, 3- пропан, 4 - бутан, 5 - пентан

Температура, °C	Давление, МПа
-11,9	0,10
-9,0	0,12
-6,3	0,13
-5,6	0,14
-3,3	0,15
-1,0	0,17
1,7	0,24
2,3	0,27
3,3	0,34
4,4	0,41
5,5	0,48

Умови утворення гідратів у пропані

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					



Вязкость: плотность  $\rho$  и кинематическая вязкость  $\nu$  различных жидкостей как функция температуры  $t$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Пузырьки воздуха в воде при 0, 10, 20 и 30 °С

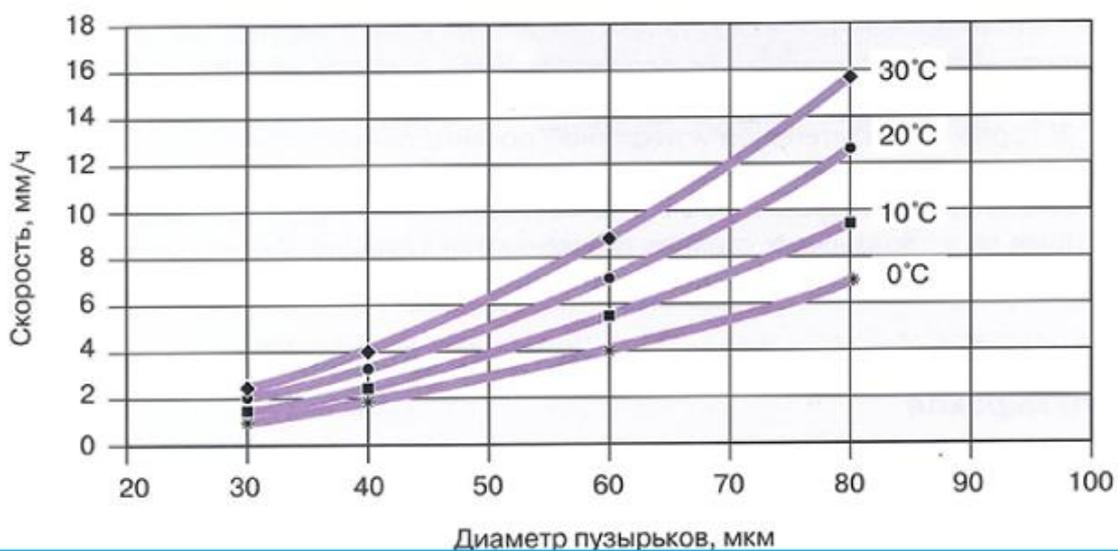
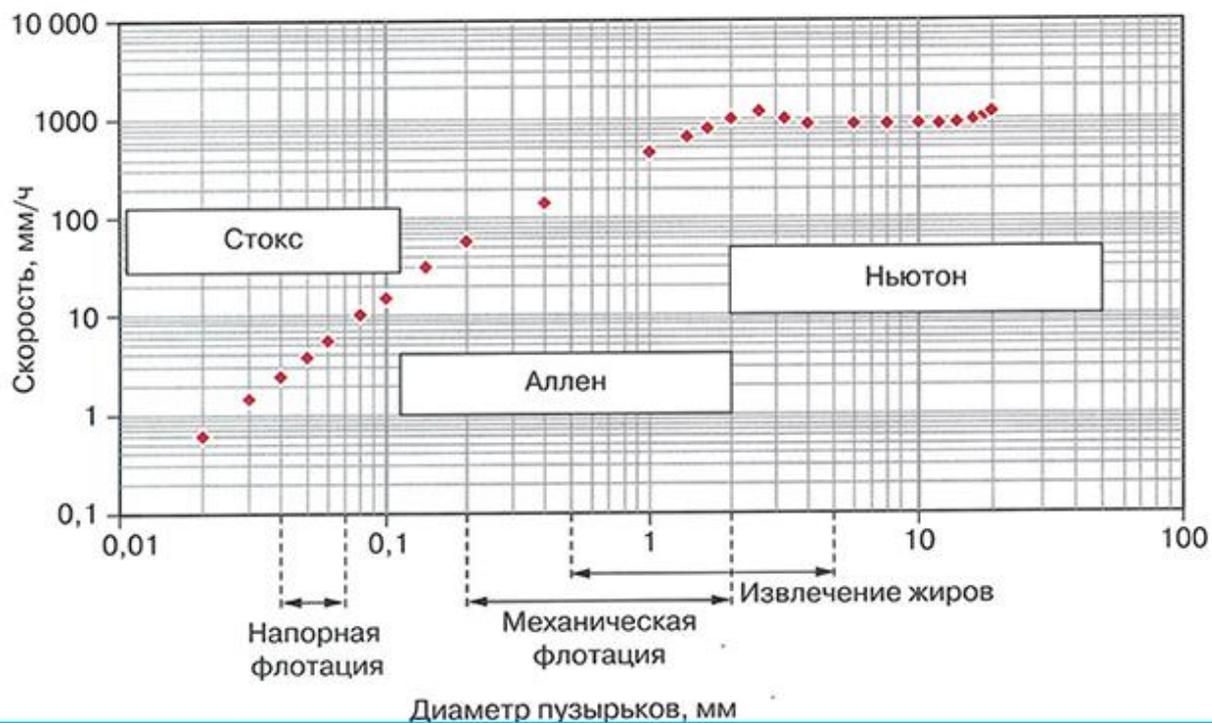


Рисунок 2. Восходящая скорость микропузырьков воздуха в воде

Пузырьки размером 0–20 мм в воде при 10 °С  
(уравнения Стокса, Аллена, Ньютона)



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



# ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАТОУТВОРЕННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ МІКРОБУЛЬБАШОК ГАЗУ

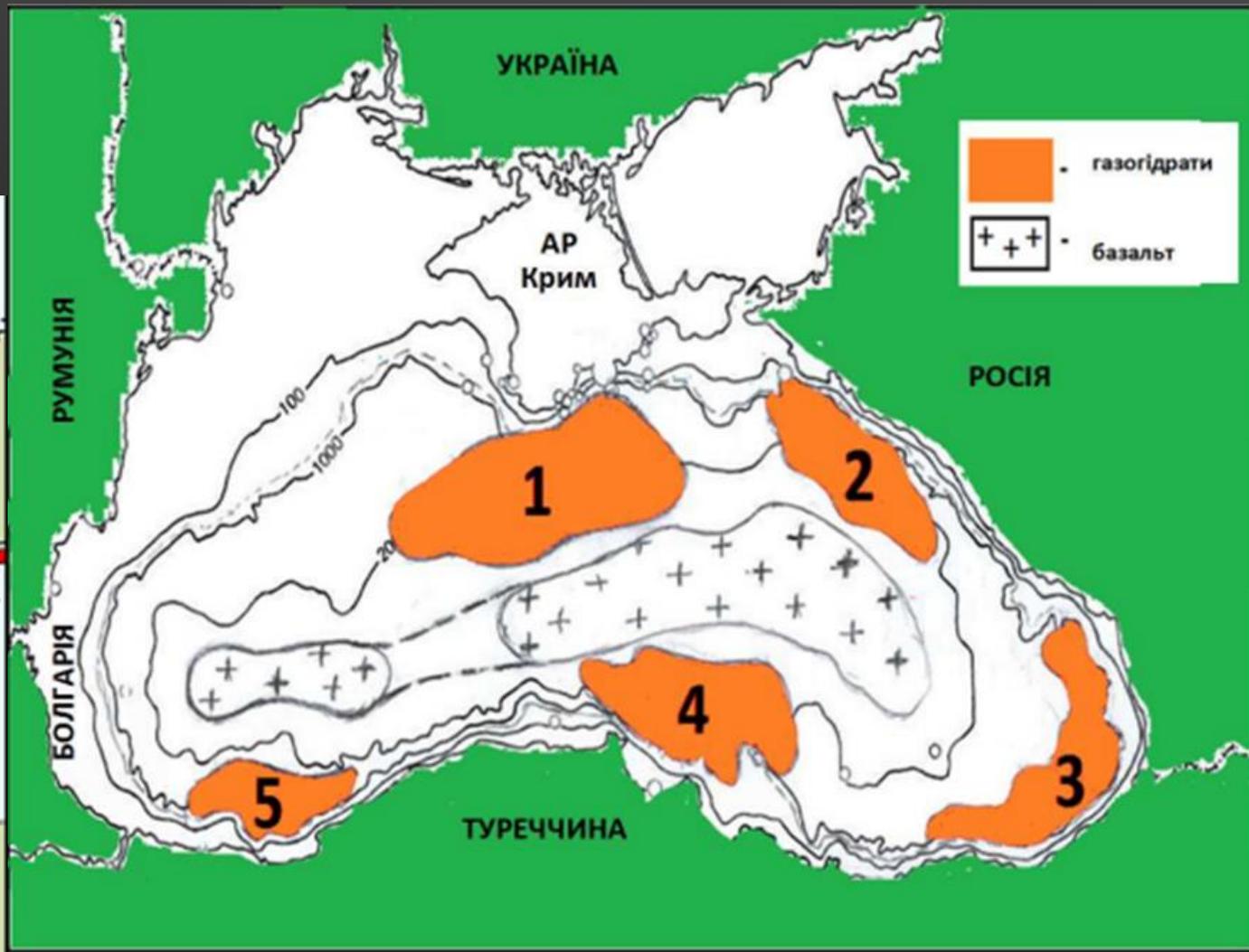
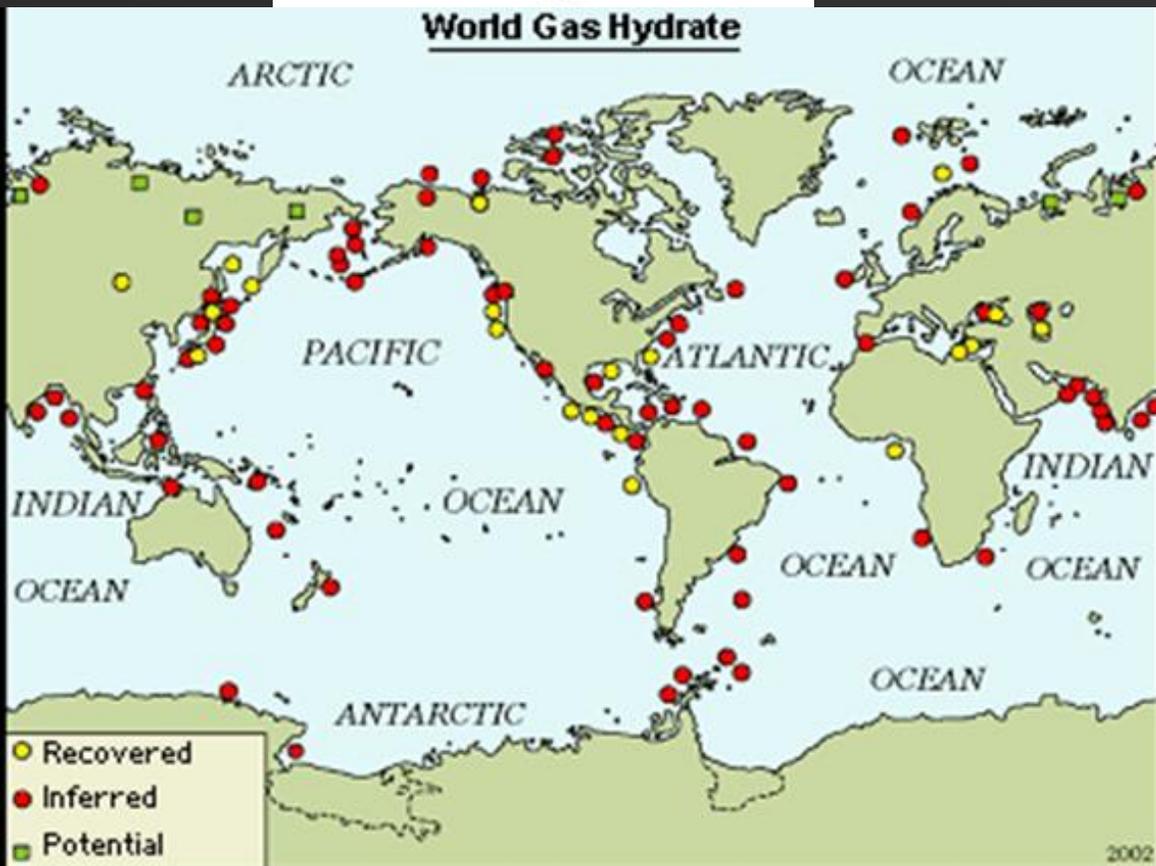
КЕРІВНИК Д.Т.Н., ПРОФ. **Б.А. КУТНИЙ**,

ВИКОНАВ СТУДЕНТ ГР. 201 ПНТ **О.С. ТЕМЧЕНКО**

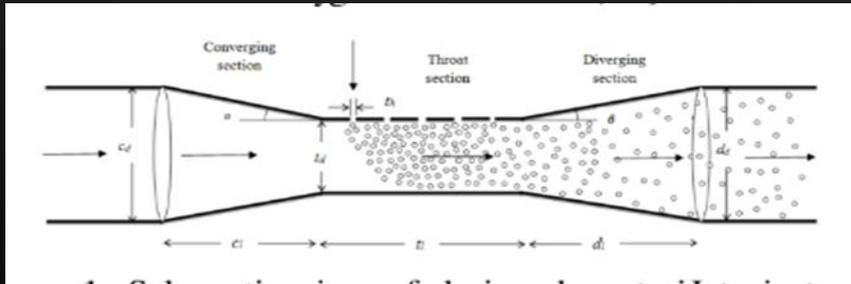
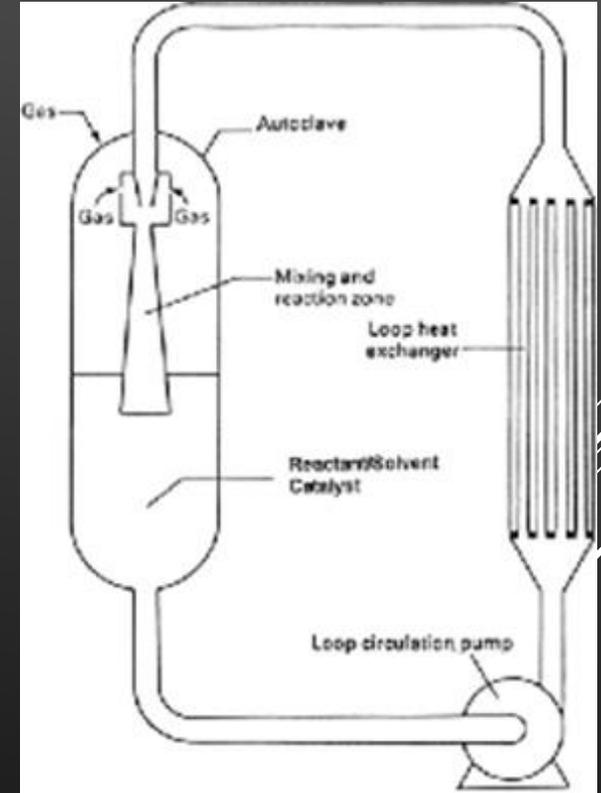
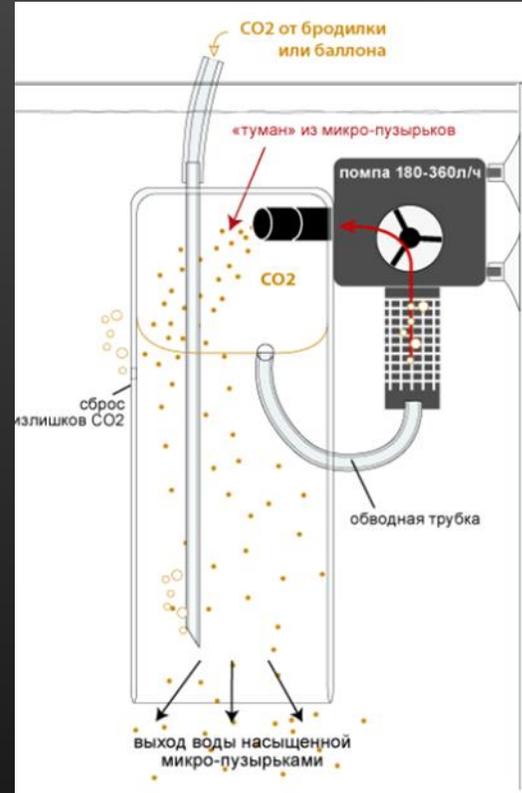
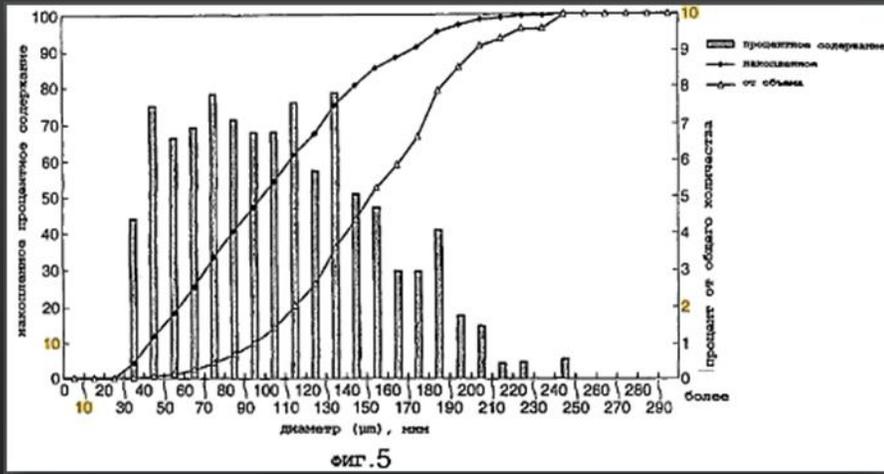
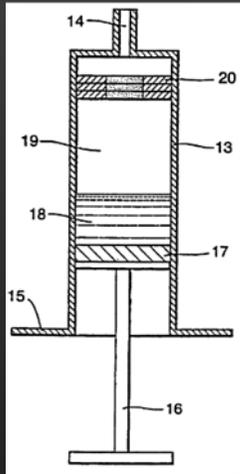
# ГАЗОГІДРАТИ



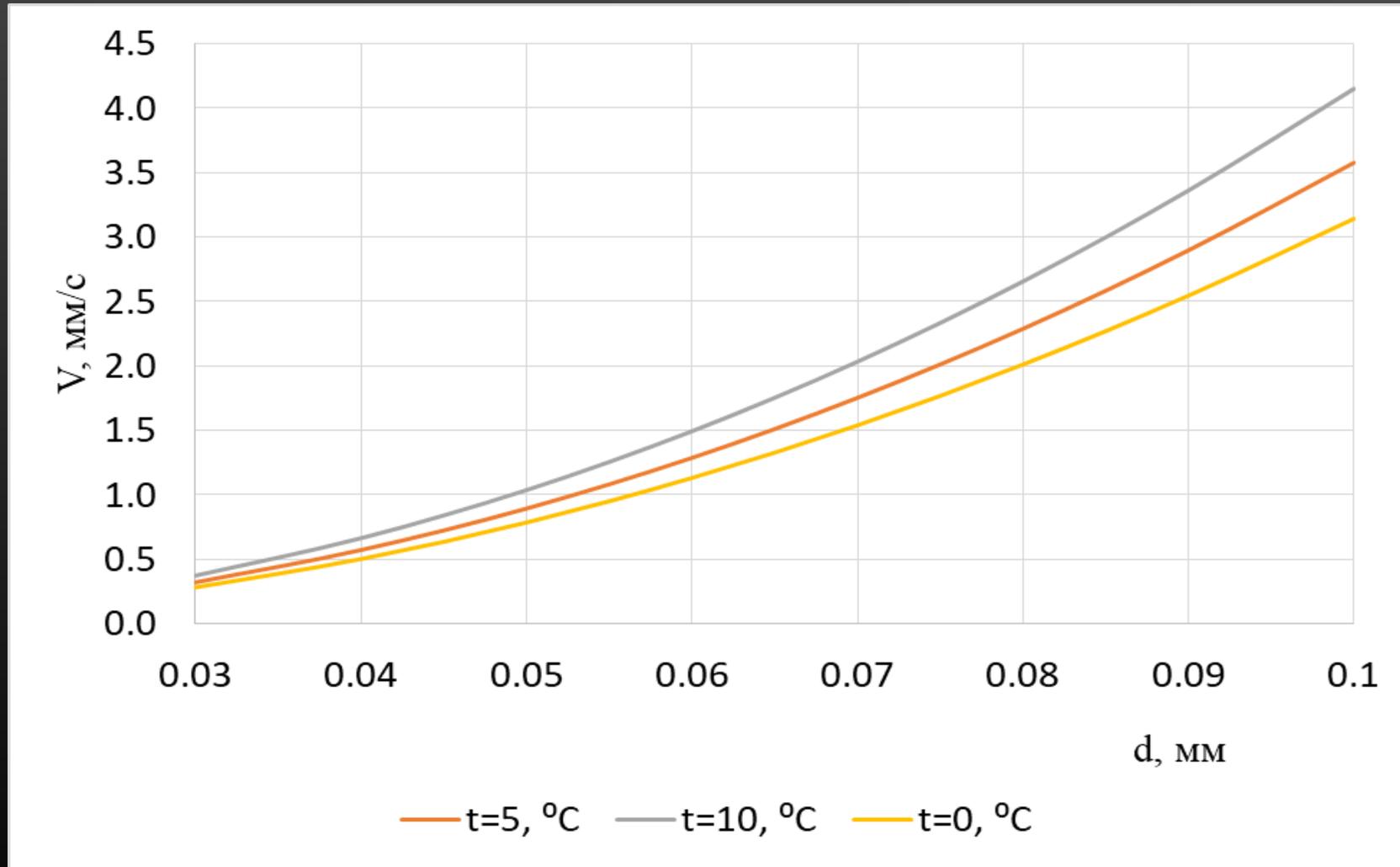
World Gas Hydrate



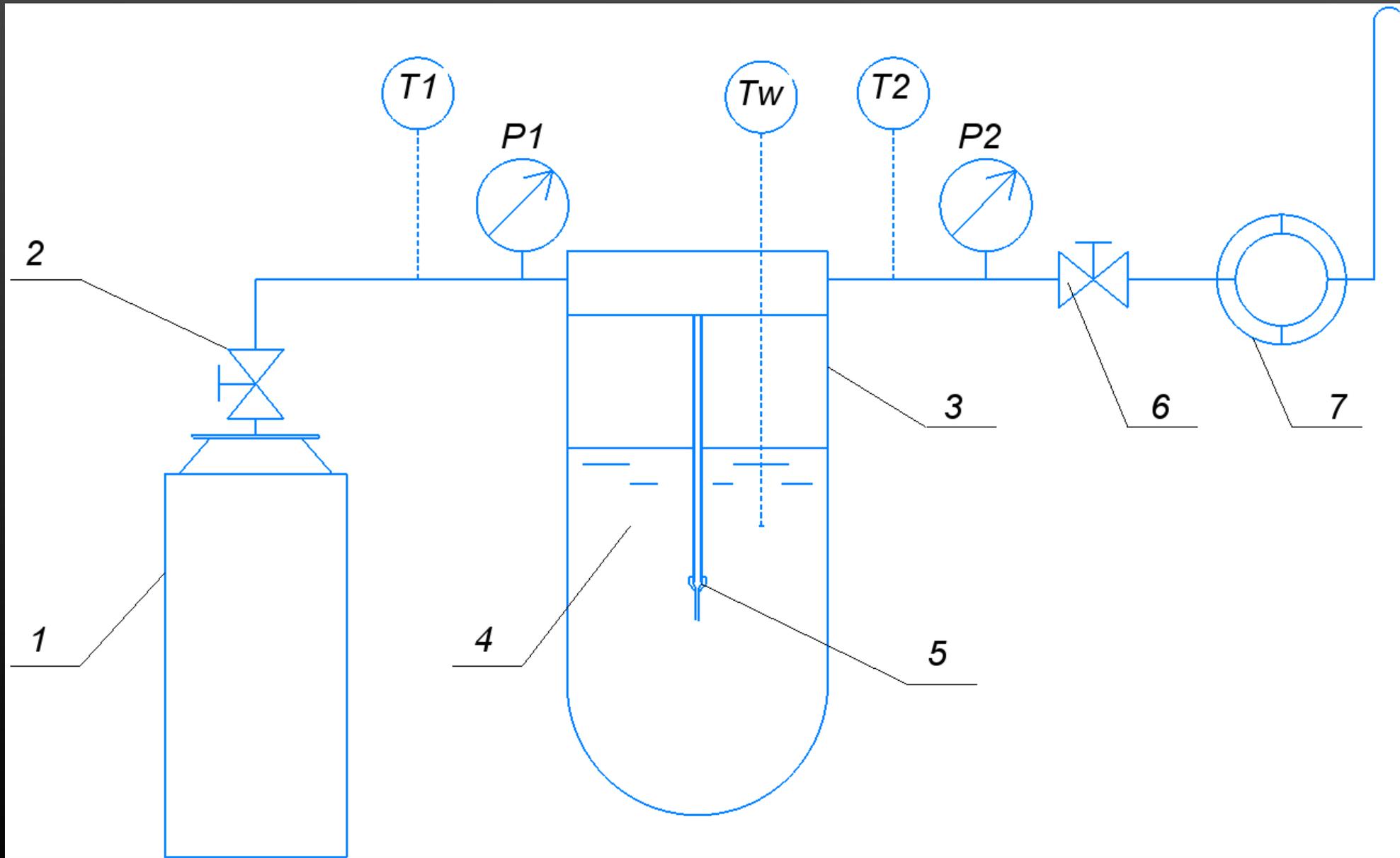
# СПОСОБИ СТВОРЕННЯ МІКРОБУЛЬБАШОК



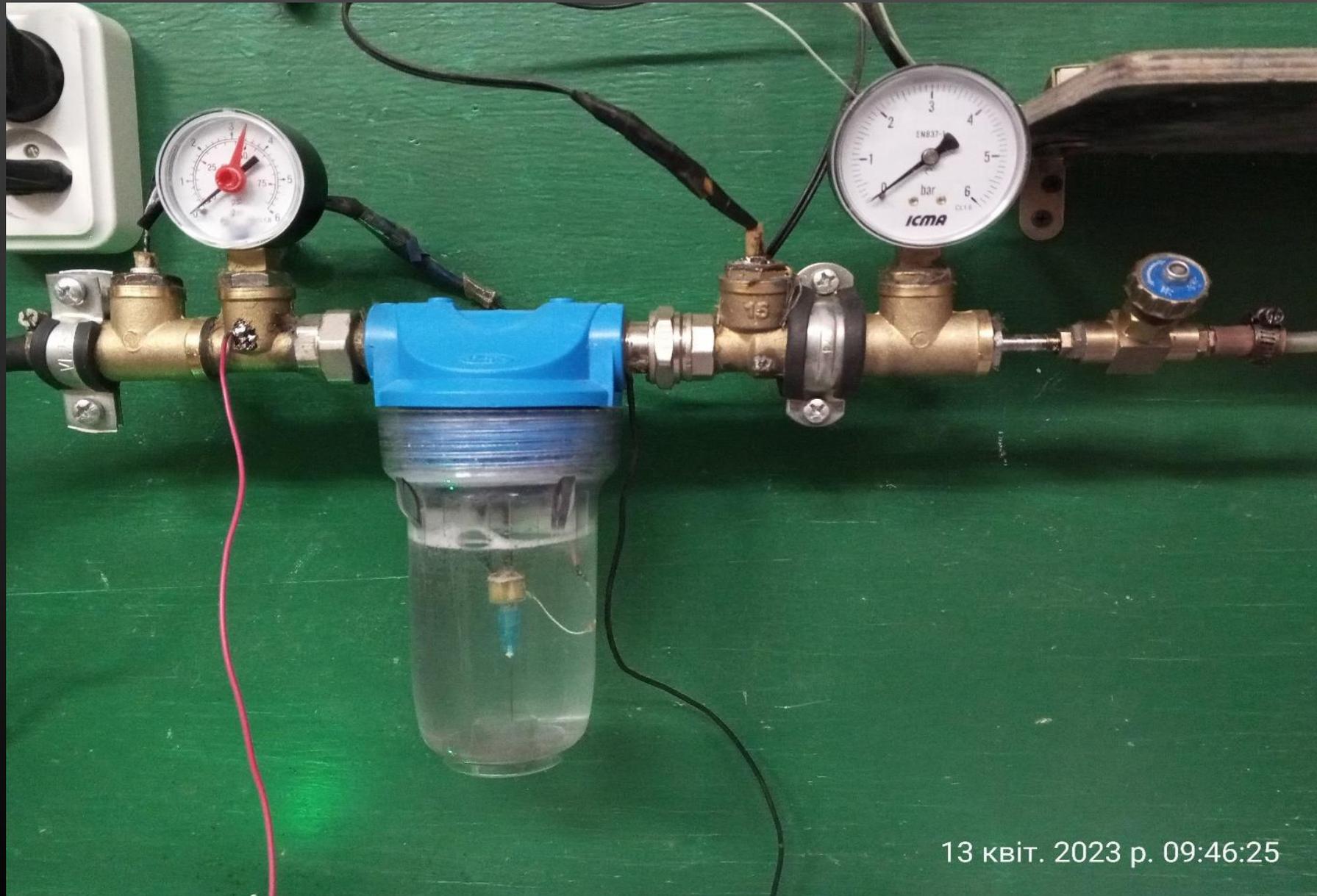
# ШВИДКІСТЬ СПЛИВАННЯ МІКРОБУЛЬБАШОК ПРОПАН-БУТАНУ У ВОДІ З ТЕМПЕРАТУРАМИ 0, +5 ТА +10°C



# СХЕМА УСТАНОВКИ

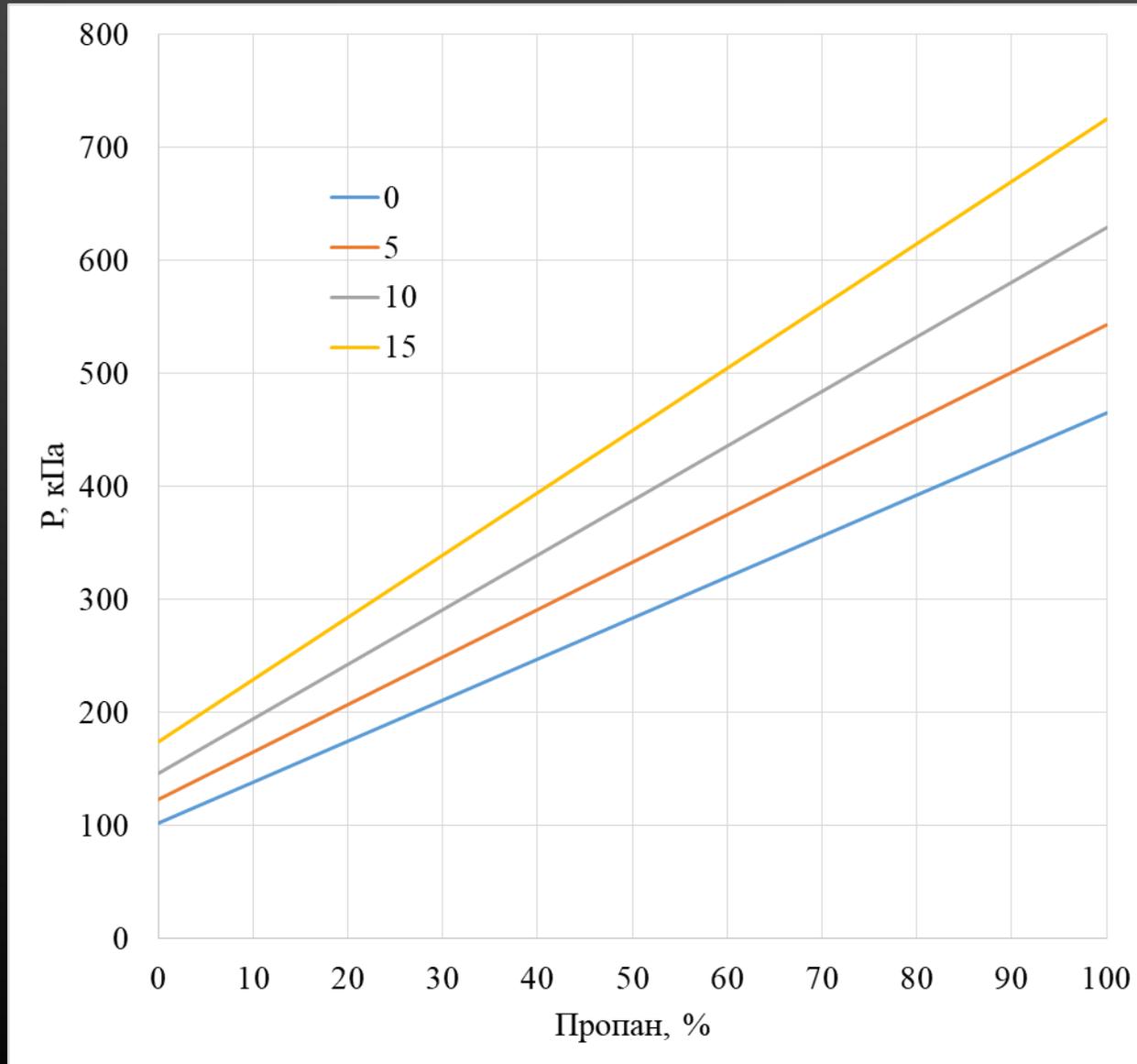


# ФОТО УСТАНОВКИ



13 квіт. 2023 р. 09:46:25

# ДІАГРАМА ВИЗНАЧЕННЯ % ПРОПАНУ В ГАЗОВІЙ СУМІШІ

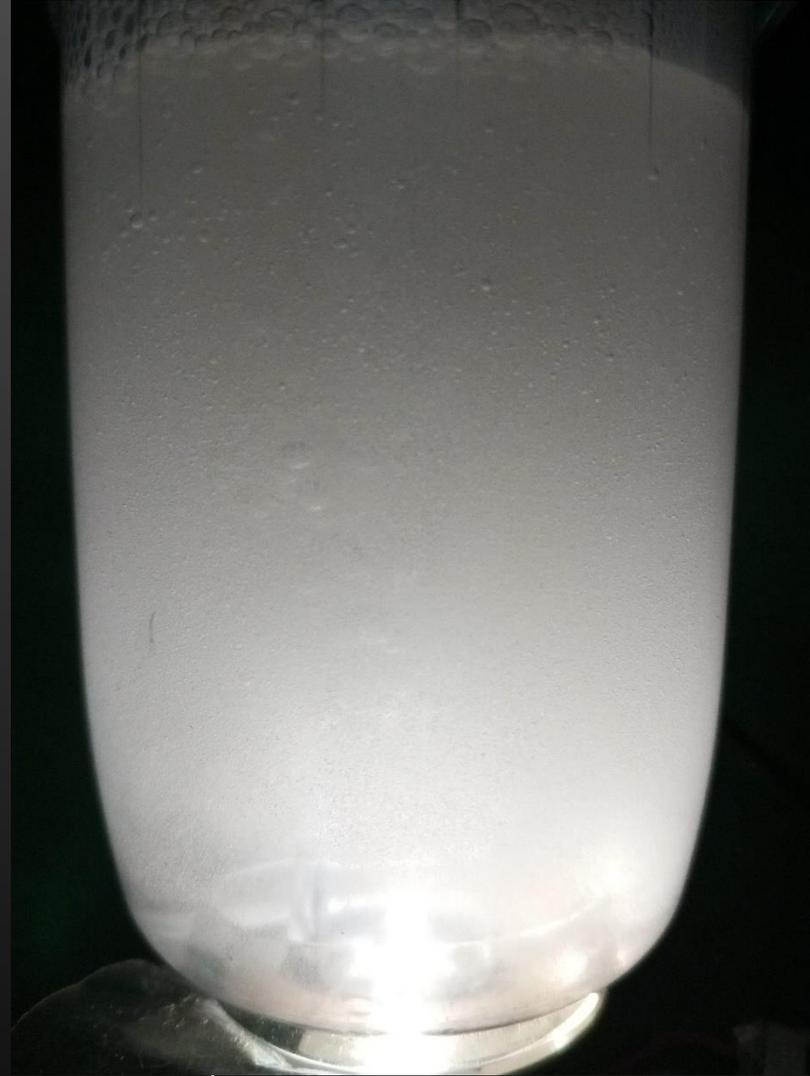
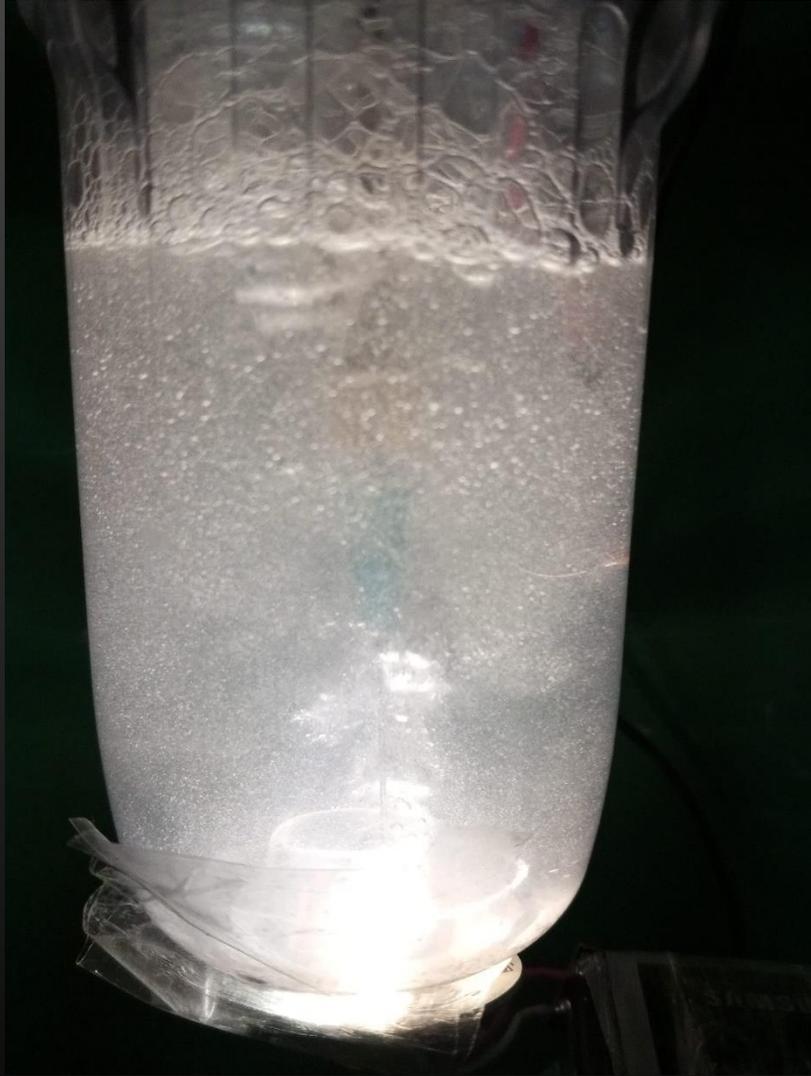
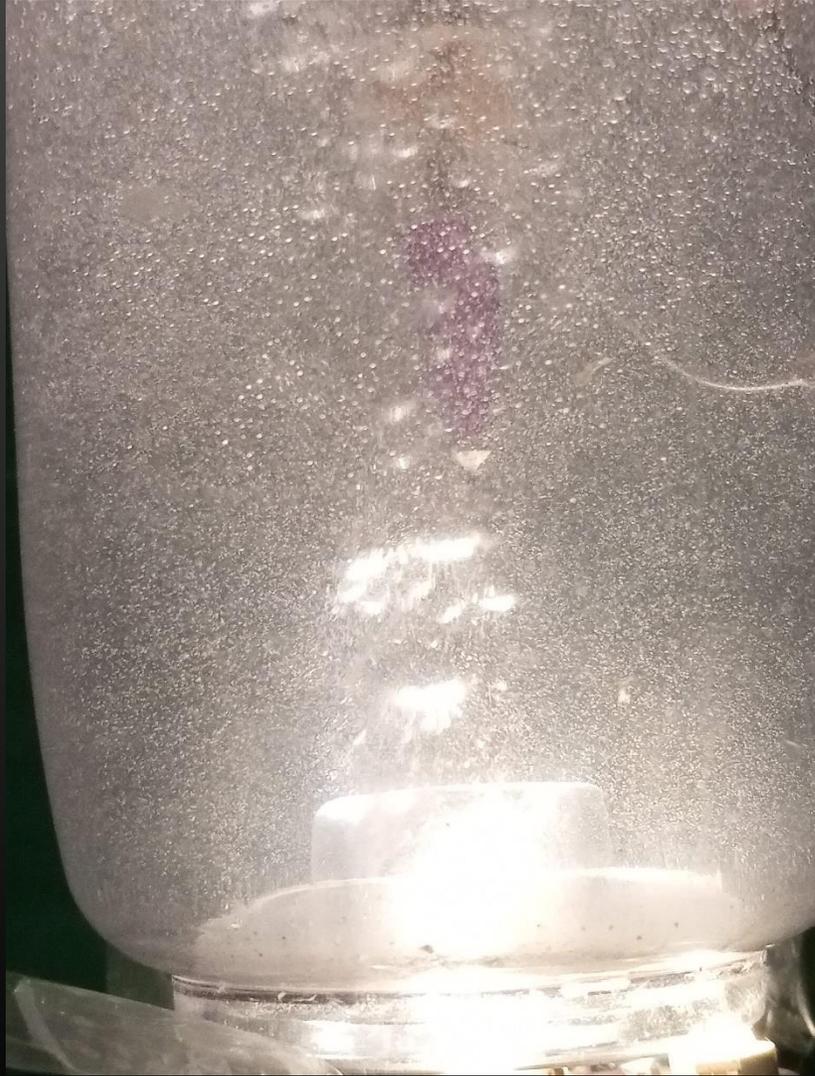


Наприклад, якщо при температурі 11,5 °C тиск суміші становить 2,9 бар, то з (2) частка пропану у суміші

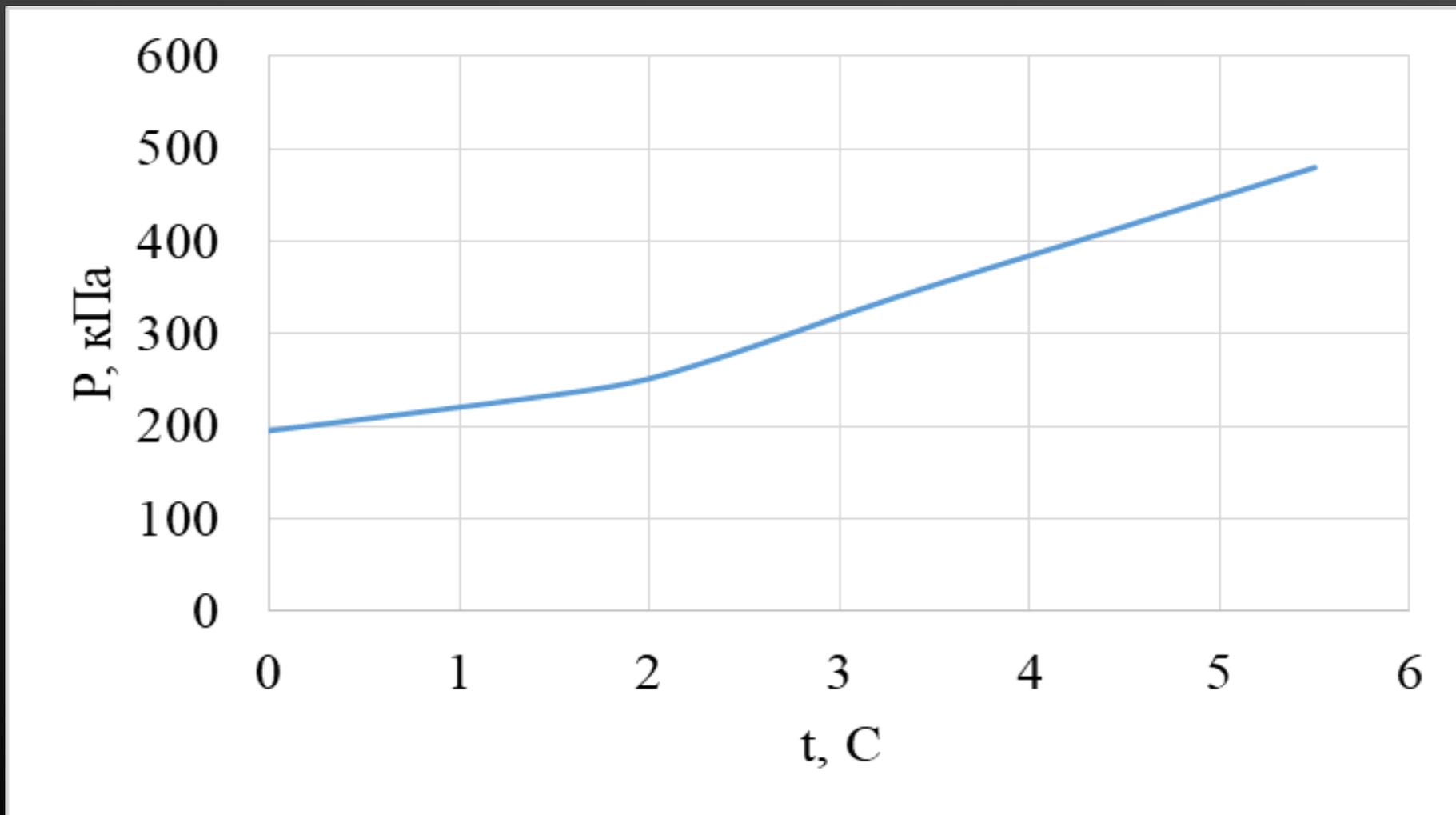
$$X_P = \frac{P - P_B}{P_P - P_B} = \frac{2,9 - 1,41}{6,12 - 1,41} = 0,32$$

Таким чином суміш має 32% пропану і 68% бутану

# БУЛЬБАШКИ ГАЗУ ПРИ РІЗНІЙ КОНЦЕНТРАЦІЇ ПАР

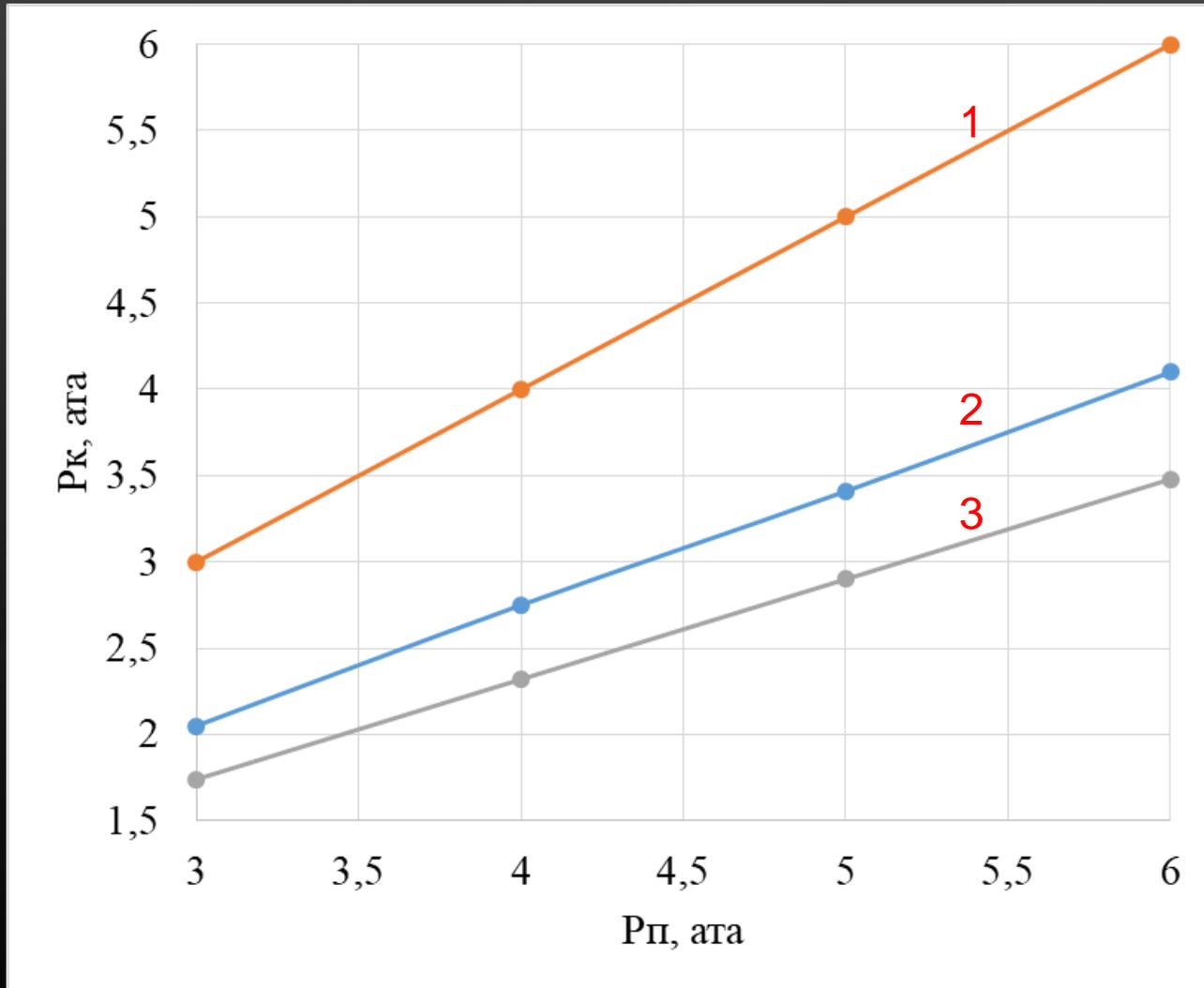


# ТЕРМОБАРИЧНІ УМОВИ ГІДРАТОУТВОРЕННЯ ДЛЯ ПРОПАНАУ



\* Тиск абсолютний

# ПРИЧИНИ ОБМЕРЗАННЯ СОПЛОВОЇ НАСАДКИ



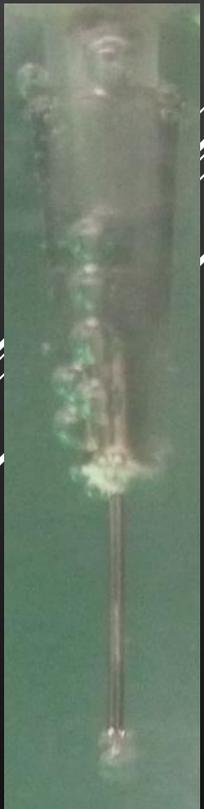
1- лінія «нульових витрат» газу через насадку

2- лінія тиску при якому починається обмерзання насадки

$$T_K = T_{\Pi} \left( \frac{P_K}{P_{\Pi}} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

3- лінія тиску на виході зі звуженого сопла в критичному режимі

$$\frac{P_K}{P_{\Pi}} = \beta_{KP} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

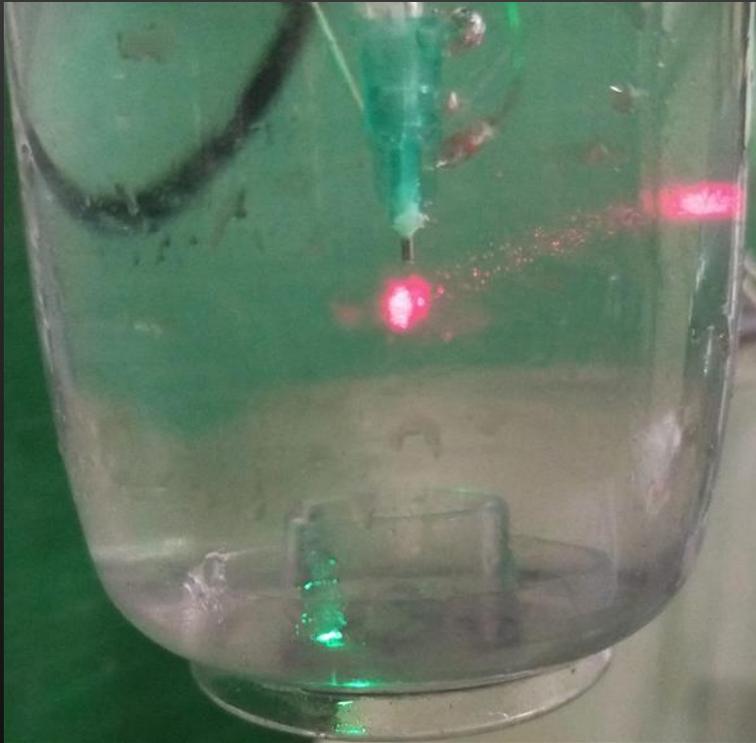




# ОТРИМАННЯ МІКРОБУЛЬБАШОК ГАЗУ



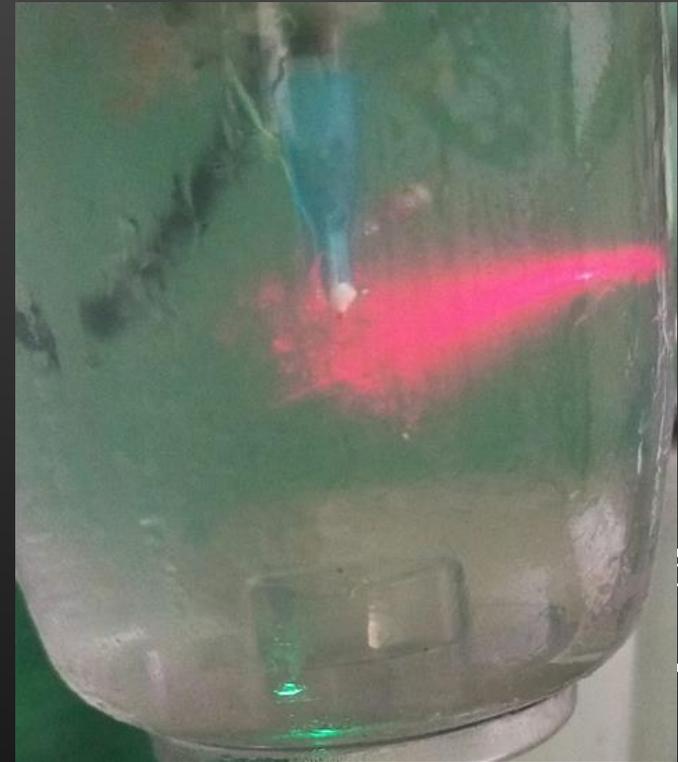
# МІКРОКРИСТАЛИ ГАЗОГІДРАТУ ПРОПАНАУ У ВОДІ



Чистий розчин



Початок гідратування



Багато мікрочастин у воді

# ВИСНОВКИ

- I. Запроектовано і зібрано лабораторну установку для експериментів з синтезом газових гідратів до надлишкового тиску 6 атм.
  - II. Проведено ряд попередніх експериментальних досліджень для отримання максимальної кількості мікробульбашок:
    1. Встановлено оптимальну конструкцію сопла.
    2. Визначено оптимальну концентрацію ПАР.
    3. Встановлено максимальну різницю тиску на соплі при якій не відбувається його обмерзання при температурі води  $t_w=0$  °C.
    4. Розраховано швидкість виходу газової суміші пропану і бутану з сопла.
    5. Підтверджено розсіювання лазерного випромінення на мікрочисталах газогідрату у воді.
- 