

А. П. Полив'янчук

**ПІДВИЩЕННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ
ВИКИДІВ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК
З ВІДПРАЦЬОВАНИМИ ГАЗАМИ ДИЗЕЛІВ**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Полив'янчук А.П.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ВИКИДІВ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК
З ВІДПРАЦЬОВАНИМИ ГАЗАМИ ДИЗЕЛІВ

Монографія

Харків
ХНАДУ
2015

ББК 35.79
УДК 621.43.068
П 32

Рецензенти:

Канило П.М., д.т.н., проф., Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України;
Парсаданов І.В., д.т.н., проф., головний науковий співробітник кафедри
двигунів внутрішнього згоряння НТУ «ХП»

Автор

Полив'янчук Андрій Павлович, д.т.н., доцент

Полив'янчук А.П.

ПЗ2 Підвищення ефективності систем контролю викидів твердих частинок з відпрацьованими газами дизелів / А.П. Полив'янчук. – Х.: ХНАДУ, 2015. – 220 с.

ISSN 978-966-303-594-9

Монографію присвячено науковій проблемі забезпечення потрібної точності та доступної вартості систем контролю викидів твердих частинок з відпрацьованими газами дизелів – розбавляючих тунелів. Проаналізовані вимоги Правил ЄЕК ООН до процедури і обладнання для вимірювання викидів твердих частинок, міжнародний досвід проведення таких вимірювань. Зроблені рекомендації щодо зменшення результуючої похибки тунелів та зниження їх вартості. Обґрунтовано доцільність використання в тунелях менш вартісного, ніж відомі аналоги, компенсаційного способу вимірювань масової витрати відпрацьованих газів. Розроблені та відпрацьовані в ході екологічних випробувань дизелів 1Ч12/14 і 4ЧН12/14 макетні зразки автоматизованих систем: мінітунелю з ізокінетичним пробовідбірником МТ-1 та мікротунелю МКТ-2. Досліджено результуючу похибку розбавляючого тунелю, значимість її інструментальної та методичних складових.

ББК 35.79
УДК 621.43.068

ISSN 978-966-303-594-9

© Полив'янчук А.П., 2015
© НТУ «ХП», 2015

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ	5
ВСТУП	8
ГЛАВА 1 АНАЛІЗ ГРАВІМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАНЬ ВИКИДІВ ТЧ З ВГ ДИЗЕЛІВ ТА МОЖЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ	9
1.1 Характеристика ТЧ, як токсичного компоненту ВГ дизеля.....	9
1.2 Системи розбавлення ВГ дизеля повітрям – тунелі.....	15
1.3 Методика гравіметричних вимірювань викидів ТЧ.....	31
1.4 Аналіз можливостей підвищення ефективності гравіметричних вимірювань викидів ТЧ та розробка відповідних рекомендацій.....	41
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ВИКИДІВ ТЧ З ВГ ДИЗЕЛІВ	46
2.1 Математичний опис процесу тепловіддачі в тунелі	47
2.2 Математична модель процесу утворення температур- них полів в кінцевих перетинах трубопроводів розбавлення ВГ та лінії відбору проб ТЧ	53
2.3 Математична модель утворення результуючої похибки вимірювань середньоексплуатаційного викиду ТЧ з ВГ дизеля – δPT	65
2.4 Обґрунтування ефективності використання в частковопоточних системах компенсаційного способу вимірювань масової витрати ВГ	66
ГЛАВА 3 МЕТОДИКИ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ УСТАНОВКИ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕФЕКТИВНОСТІ ГРАВІМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАНЬ ВИКИДІВ ТЧ	91
3.1 Методики та експериментальна установка для встановлення критеріального рівняння тепловіддачі в тунелі	91
3.2 Макетні зразки автоматизованих частковопоточних систем контролю викидів ТЧ з ВГ дизелів	98
3.3 Випробувальний стенд для досліджень ізокінетичного режиму відбору ВГ з вихлопної труби дизеля	137

3.4	Експериментальна установка та методики для досліджень методичних складових результуючої похибки δPT	139
3.5	Методика оцінки величини результуючої похибки δPT та ефективності рекомендацій щодо її зменшення	144
ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ТА РОЗРАХУНКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА PT.....		147
4.1	Визначення та аналіз критеріального рівняння тепловіддачі в тунелі	147
4.2	Встановлення умов, що забезпечують ізокінетичний режим відбору ВГ з вихлопної труби дизеля.....	151
4.3	Встановлення залежностей для визначення інструментальної та методичних складових результуючої похибки δPT	159
4.4	Аналіз необхідності регулювання температури розбавлених ВГ в міні- та мікротунелях.....	165
4.5	Оцінка похибки δPT , значимості її складових та ефективності зроблених рекомендацій	166
ГЛАВА 5 НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРОВЕДЕНІ НА МОТОРНОМУ СТЕНДІ ДИЗЕЛЯ 4ЧН12/14 З МІКРОТУНЕЛЕМ МКТ-2		172
5.1	Експериментальне відпрацювання рекомендацій щодо підвищення точності гравіметричних вимірювань викидів ТЧ.....	172
5.2	Визначення регресійних залежностей для оцінки вмісту ТЧ у ВГ дизеля на сталих режимах випробувань.....	174
5.3	Встановлення залежності для непрямого визначення викидів ТЧ з ВГ на несталих режимах роботи дизеля	179
5.4	Оцінка ефективності заходів з екологізації ДВЗ.....	187
5.5	Методика визначення викидів ТЧ з ВГ дизелів з мінімальними витратами часу	198
ВИСНОВКИ.....		200
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		203
ДОДАТОК.....		211

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

Умовні позначення:

ESC – європейський стаціонарний цикл (European Stationary Cycle), сертифікаційна процедура випробувань дизелів вантажних автомобілів та автобусів, повна маса яких перевищує 3,5 т, в ході якої двигун випробовується на встановлених сталих режимах;

PT – середньоексплуатаційний викид ТЧ з ВГ дизеля, г/кВт·год;

PT_{massi} – масовий викид ТЧ з ВГ дизеля на i -му режимі випробувань, г/год;

PT_{mass} – середній за випробувальний цикл масовий викид ТЧ з ВГ дизеля, г/год;

P_i – ефективна потужність дизеля на i -му режимі випробувань, кВт;

\bar{P} – середня за випробувальний цикл ефективна потужність дизеля, кВт;

m_{fi} – маса ТЧ, зібрана на фільтрі на i -му режимі випробувань, мг;

m_f – маса ТЧ, зібрана на фільтрі за випробувальний цикл, мг;

n – абсолютне значення числа обертів вала двигуна, xv^{-1} ;

\bar{n} – відносне значення числа обертів колінчастого вала двигуна у частках одиниці;

L – навантаження дизеля – відношення крутного моменту до максимального значення при даному n , %;

\bar{L} – відносне значення навантаження дизеля у частках одиниці;

WF_i – регламентований ваговий фактор, який враховує відносний час роботи дизеля на i -му режимі в процесі експлуатації;

WF_{ei} – ефективний ваговий фактор, який визначається за результатами випробувань;

t_{dil} – температура розбавляючого повітря;

t_{fi} – температура розбавлених ВГ перед фільтром для відбору ТЧ на i -му режимі;

$t_{f(max)}$ – максимальна температура проби перед фільтром протягом випробувального циклу;

$\Delta t_{f(52)}$ – величина зменшення максимальної температури проби перед фільтром до значення 52 °С в результаті повітряного охолодження тунелю;

τ_{st} – тривалість періоду стабілізації робочого фільтру;
 t_{st} – температура повітря, при якій стабілізуються фільтри для збору ТЧ;
 δPT – результуюча похибка вимірювань показника PT ;
 δPT_{in} – інструментальна похибка вимірювань показника PT (складова похибки δPT);
 δPT_{tf} – методична похибка вимірювань показника PT (складова похибки δPT), яка виникає на етапі підготовки проби до аналізу та залежить від величин t_{dil} , t_{fi} і $\Delta t_{f(52)}$;
 δPT_{st} – методична похибка вимірювань показника PT (складова похибки δPT), яка виникає на етапі стабілізації робочого фільтру та залежить від величин τ_{st} і t_{st} ;
 $DM1 - DM4$ – режими розбавлення ВГ у розбавляючому тунелі;
 G_{exh} – масова витрата нерозбавлених ВГ дизеля;
 G_{exh}^t – масова витрата ВГ, що відбираються з вихлопної труби дизеля до частковопоточної системи: міні- або мікротунеля.
 r_{exh} – коефіцієнт відбору ВГ – частка ВГ, що відбирається з вихлопної труби дизеля і подається до тунелю у частках одиниці;
 q – коефіцієнт розбавлення ВГ повітрям;
 G_{edfi} – масова витрата розбавлених ВГ у еталонному (повнопоточному) тунелі на i -му режимі; кг/год;
 $\overline{G_{edf}}$ – середня масова витрата розбавлених ВГ у еталонному тунелі за цикл; кг/год.

Скорочення:

ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння;
 ВГ – відпрацьовані гази;
 ТЧ – тверді частинки;
 РОФ – розчинна органічна фракція ТЧ;
 ВТ – вихлопна труба дизеля;
 ІКП – ізокінетичний пробовідбірник;
 ТП – трубопровід переносу частки проби ВГ з ВТ до тунелю, або розбавлених ВГ з первинного до вторинного тунелю (при 2-кратному розбавленні ВГ);
 РТ – розбавляючий тунель;
 ЛВ – лінія відбору проб ТЧ;
 ЕМК – електронний модуль керування;

СКВ – середньоквадратичні відхилення;
МЕРО – метіловий ефір рапсової олії.

Терміни:

тверді частинки – увесь матеріал, що збирається на спеціальних фільтрах на скловолоконній основі з фторопластовим покриттям в результаті пропускання через них ВГ дизеля, розбавлених чистим повітрям до температури, що не перевищує 52 °С та є більшою, ніж 42 °С;

розбавляючий тунель – трубопровід, в якому ВГ дизеля змішуються з чистим повітрям з метою імітації природного процесу їх розсіювання в атмосфері;

дослідницькі екологічні випробування – випробування, в ході яких вимірюються масові (г/год) та питомі (г/кВт·год) викиди забруднюючих речовин з ВГ ДВЗ на окремих режимах роботи двигуна;

сертифікаційні екологічні випробування – випробування, в ході яких вимірюються середньоексплуатаційні викиди забруднюючих речовин з ВГ ДВЗ, що нормуються відповідно до вимог міжнародних стандартів.

ВСТУП

З початком дії норм EURO (1993 р.) до нормованих екологічних показників дизеля введено середньоексплуатаційний масовий викид твердих частинок (ТЧ) з відпрацьованими газами (ВГ). Цей показник, згідно нормативних документів, має позначення *PT* від «particles» (або *PM* від «particulate matter») і визначається гравіметричним методом з використанням спеціального обладнання – тунеля в ході виконання встановлених випробувальних циклів [1–3].

Серед забруднюючих речовин, що містяться у ВГ дизелів, ТЧ займають друге місце після оксидів азоту за рівнем негативного впливу на навколишнє середовище та характеризуються найбільшим показником відносної агресивності (у порівнянні з оксидом вуглецю), який дорівнює 200. З причини високої токсичності ТЧ протягом останніх 20-ти років відбувається розширення області нормування викидів цієї речовини на дизелі різних призначень. Сьогодні норми на викиди ТЧ встановлені для дизелів автомобілів, позашляхової техніки, тепловозів, морських та річкових суден. В цих умовах підвищується значимість доступності за вартістю обладнання для вимірювань показника *PT*.

З 2005 р. допустимий рівень викидів ТЧ з ВГ автомобільних дизелів за випробувальним циклом ESC становить 0,02 г/(кВт·год), що у 18 разів менше, ніж при введенні норм EURO. При такому рівні викидів результуюча похибка вимірювань показника *PT* при випробуваннях – δPT є значною і досягає 25...35%. В перспективі (з введенням норм EURO-VI) планується подальше зниження норм на викиди ТЧ автомобільних дизелів до 0,005 г/(кВт·год). Передбачається підвищення вимог щодо масової кількості ТЧ у ВГ дизелів позашляхової техніки, тепловозів, морських та річкових суден. Оскільки δPT є основним показником, який визначає придатність гравіметричного методу для контролю малих рівнів викидів ТЧ з ВГ дизелів, важливо розробити наукові основи і реалізувати практичні заходи щодо його зменшення.

Таким чином в умовах збільшення області нормування викидів ТЧ від дизелів різного призначення і зменшення допустимих рівнів цих викидів потребує розв'язання актуальна науково-практична проблема забезпечення потрібної точності та доступної вартості систем контролю масових викидів ТЧ з ВГ дизелів – тунелів.

ГЛАВА 1

АНАЛІЗ ГРАВИМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАНЬ ВИКИДІВ ТЧ З ВГ ДИЗЕЛІВ ТА МОЖЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ

1.1 Характеристика ТЧ, як токсичного компоненту ВГ дизеля

Термін ТЧ або забруднюючі зважені частинки означає весь матеріал, зібраний на спеціальному фільтруючому засобі з фторопластового матеріалу після пропускання крізь нього ВГ дизеля, розбавлених атмосферним повітрям до температури, яка не перевищує 52 °С та є більшою, ніж 42 °С [1].

ТЧ представляють собою полікомпонентне утворення, до складу якого входять такі елементи: дизельна сажа (продукт піролізу палива), розчинна органічна фракція – РОФ (вуглеводні палива та мастила, які не згоріли та сконденсувалися і адсорбувалися на поверхні сажових частинок), сульфати (солі сірчаної кислоти) та інші включення (продукти зносу, зола від присадок, тощо). Відносні частки цих елементів у складі ТЧ залежать від режиму роботи дизеля та змінюються в широких діапазонах [25] (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Компоненти, що входять до складу ТЧ, та їх відносні частки

Негативний вплив ТЧ на довкілля і людину проявляється за трьома напрямками:

– частинки при вдиханні викликають роздратування дихальних шляхів, а при хронічному впливі – легеневі захворювання; у загальному випадку ТЧ мають розміри 0,1...0,54 мкм в діаметрі і можуть досягати альвеол легенів або відкладатися в носових пазухах, трахеях або бронхах;

– частинки є переносником канцерогенних речовин, які адсорбуються на їхній поверхні (1 г сажі має площу поверхні приблизно 75 м²);

– наявність зважених частинок у повітрі погіршує видимість на шляхах (видимим автомобільний вихлоп стає при концентраціях частинок у ВГ 130 мг/м³ і більше); при цьому частинки розміром до 0,15 мкм можуть перебувати в повітрі у зваженому стані близько 8 діб.

Найбільш токсична фракція у складі ТЧ – РОФ. Вона містить сполуки з дратівливою, мутагенною та канцерогенною діями, такі як поліциклічні ароматичні вуглеводні (зокрема бенз- α -пірен), алкілпроізводні бензолу, неароматичні сполуки (алкаїн, нафтеїн, альдегіди), тощо.

Серед забруднюючих речовин, викиди яких нормуються міжнародними стандартами, ТЧ займають друге місце після оксидів азоту за індивідуальним внеском у сумарну токсичність ВГ дизеля – R (що розраховується у відповідності до методики [24]):

$$R_i = \frac{E_i}{E_{\Sigma}} = \frac{A_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n A_i \cdot m_i} \cdot 100\%,$$

де i – забруднююча речовина;

E_i – приведений питомий викид i -ї речовини, ум. г/кВт·год;

E_{Σ} – сумарний приведений питомий викид основних забруднюючих речовин, що містяться у ВГ дизеля ум. г/кВт·год;

A_i – показник відносної агресивності i -ї речовини по відношенню до монооксиду вуглецю ($A_{CO} = 1$, $A_{NOx} = 41,1$, $A_{CH} = 3,16$, $A_{ТЧ} = 200$), ум. г/г;

m_i – масовий (г/год) або питомий (г/кВт·год) викид i -ї речовини;

n – кількість забруднюючих речовин, що розглядаються.

На рис. 1.2 представлені результати оцінювання величин R_i , зробленого на основі аналізу Європейських норм EURO (табл. 1.1), які обмежують викиди забруднюючих речовин від автомобільних дизелів.

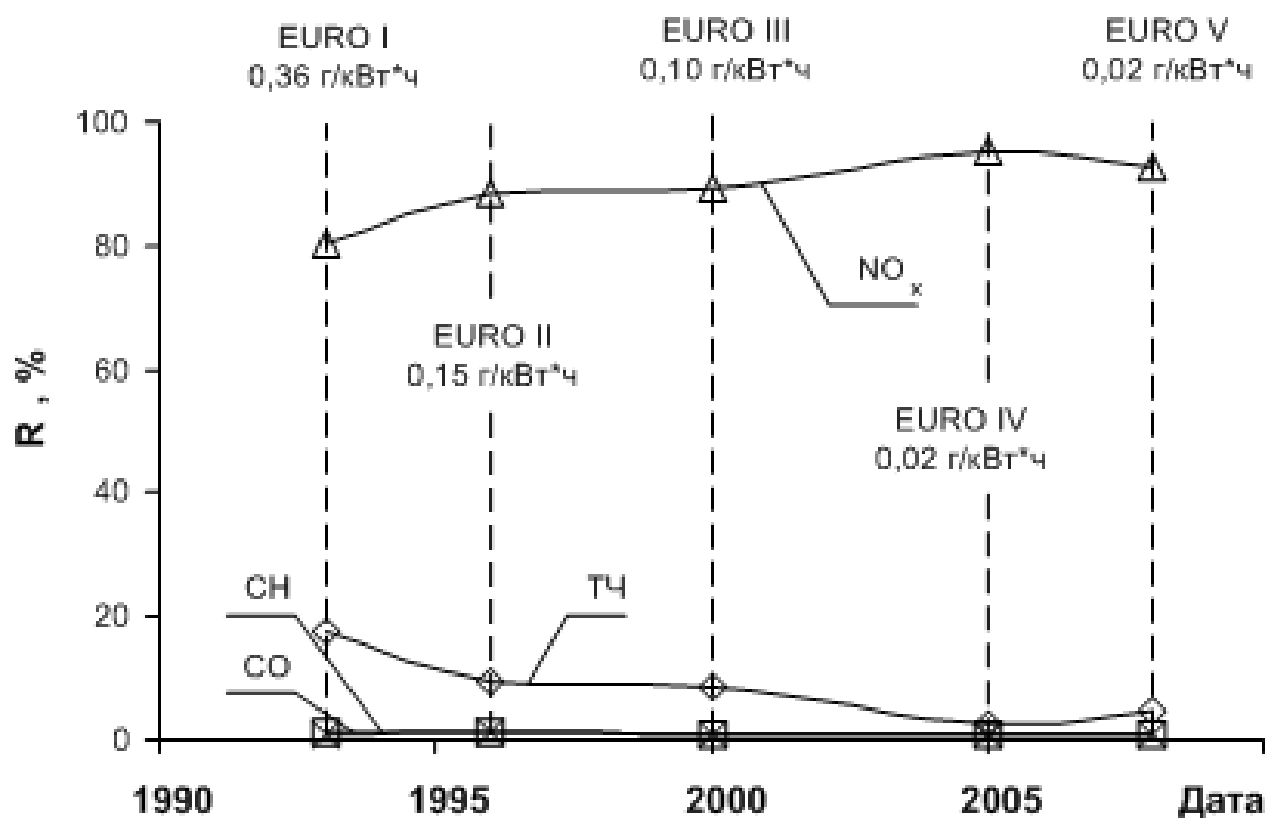


Рис. 1.2. Динаміка змінювання величин R_i в результаті зменшення норм токсичності ВГ дизелів EURO

Таблиця 1. 1

**Європейські норми викидів забруднюючих речовин
грузовими автомобілями і автобусами**

Норматив	Рік введення	Питомі викиди m , г/кВт·год			
		CO	CH	NO _x	ТЧ*
EURO-I	1993	4,5	1,1	8,0	0,36
EURO-II	1996	4,0	1,1	7,0	0,15
EURO-III	2000	2,1	0,66	5,0	0,10
EURO-IV	2005	1,5	0,46	3,5	0,02
EURO-V	2008	1,5	0,25	2,0	0,02

Примітка. * приведені норми викидів ТЧ, які визначаються в ході випробувань дизеля за циклом ESC.

Рисунок 1.2 показує, що при переході від норм EURO-I до EURO-V і зменшені допустимих рівнів викидів ТЧ у 18 разів (що є найбільшим зменшенням серед усіх нормованих викидів (рис. 1.3)), індивідуальний внесок ТЧ у сумарну токсичність ВГ дизеля залишається суттєвим.

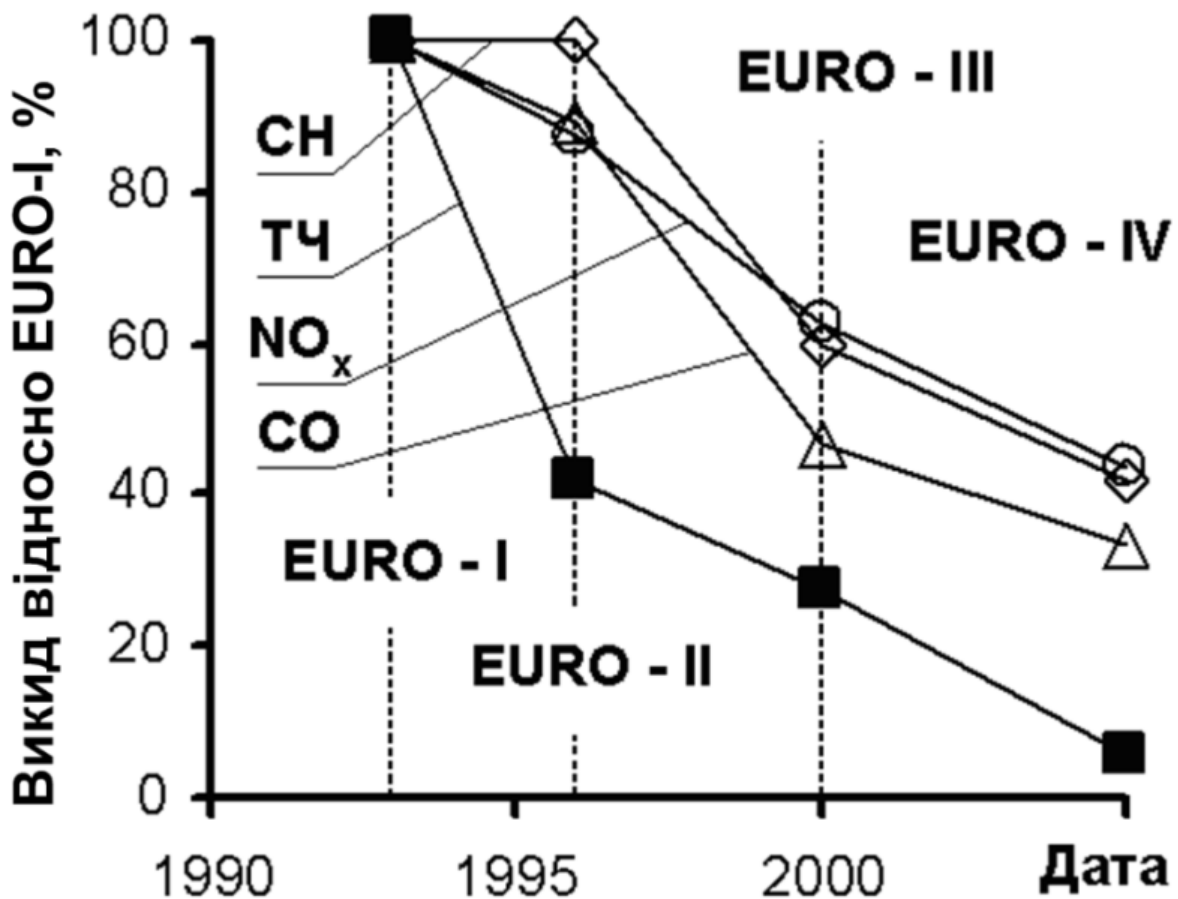
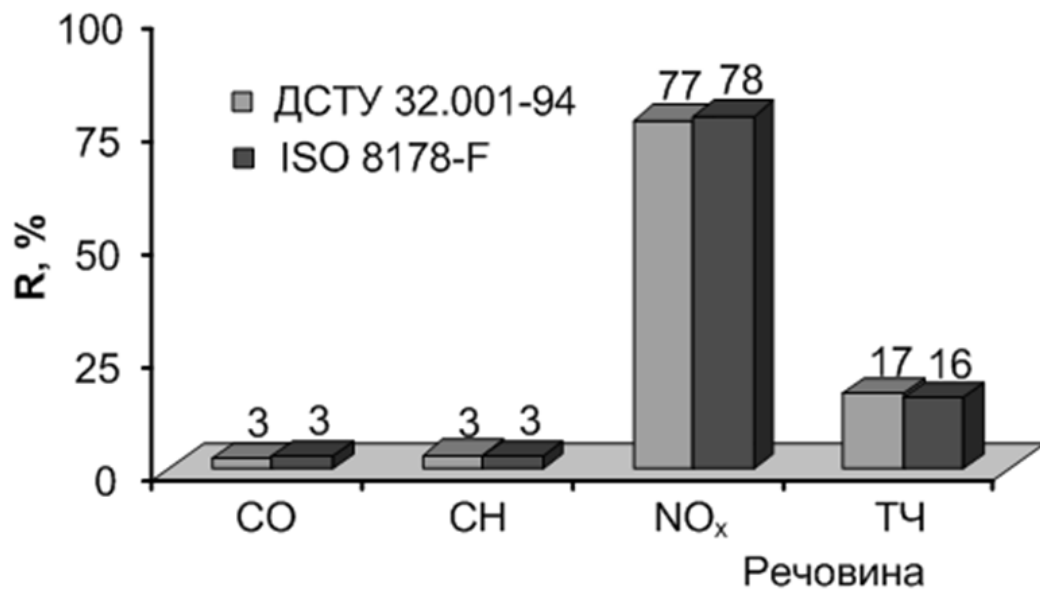


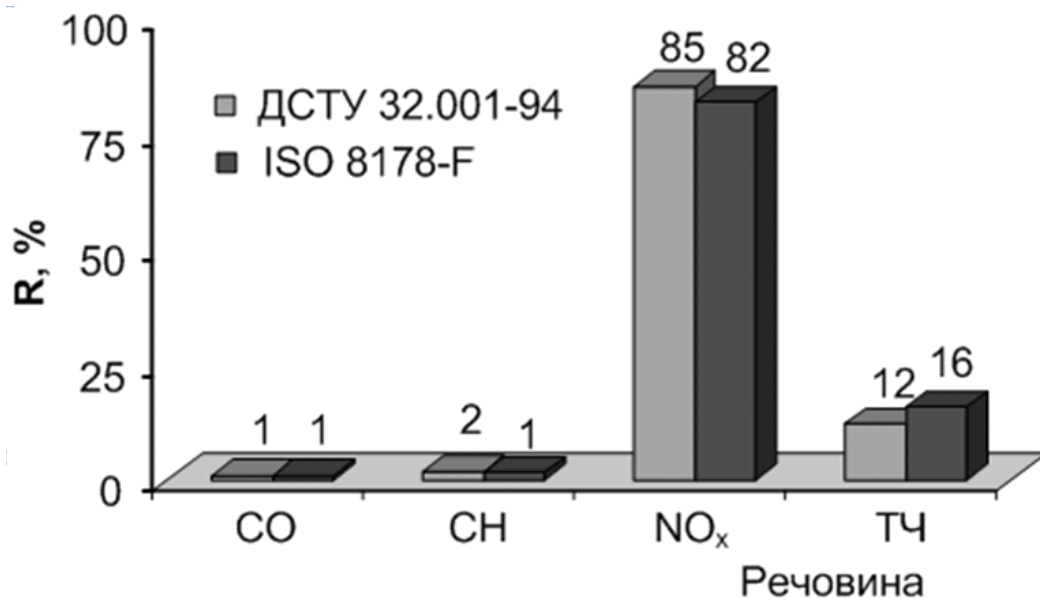
Рис. 1.3. Динаміка зменшення європейських норм викидів забруднюючих речовин з ВГ автомобільних дизелів

На рис. 1.4 представлені значення величин R_i , які отримані на основі результатів випробувань магістрального – 2ТЭ116 та маневрового – ТЕМ-2 тепловозів за екологічними циклами ДСТУ 32.001-94 і ISO 8178-F [5,16]. Представлені данні свідчать про те, що внесок ТЧ у сумарну токсичність ВГ дизелів вітчизняних тепловозів складає 12...17%.

Таким чином, разом з оксидами азоту ТЧ на 95...97% визначають токсичну дію ВГ дизелів та є речовиною, якій приділяється основна увага при розробці заходів з екологічної безпеки дизеля та забезпеченню ефективного контролю її кількісних показників.



а



б

Рис. 1.4. Відносний внесок основних забруднюючих речовин у сумарну токсичність ВГ тепловозів: а – магістрального 2ТЭ116; б – маневрового ТЕМ-2

Токсикологічна характеристика дизельних частинок. У 90-х роках двадцятого сторіччя проведені масштабні дослідження з токсикології дизельних ВГ у цілому й токсикології дизельних частинок, зокрема. Всесвітньою організацією охорони здоров'я World Health Organization (*WHO*), Міжнародним агентством онкологічних досліджень International Agency for Research on Cancer (*IARC*) [30], Інститутом охорони здоров'я США USA Health Effect Institute (*HEI*) [31], Агентством по охороні навколишнього середовища США USA

Environmental Protection Agency (*EPA*) [32, 33] зроблений висновок про те, що дизельні ВГ й у тому числі ТЧ є причиною підвищення загальної захворюваності і смертності населення. Особливу небезпеку дизельні ТЧ представляють для осіб, що працюють у безпосередній близькості від джерел викидів дизельних частинок, осіб із хронічними захворюваннями органів подиху, серцево-судинної системи, порушеннями імунної системи, дітей.

Симптоми ефектів від короткочасного впливу невисоких рівнів ВГ дизелів визначені за допомогою медичних досліджень професійних груп, що періодично зазнають впливу ВГ, таких як шахтарі, робітники автобусних парків, судноверфей, локомотивних депо. Перелік виникаючих відхилень включає: запалення слизуватих оболонок очей, головний біль, запаморочення, нудоту, слабкість, дзвін у вухах, гноблення діяльності легенів, кашель, задишку і т.п. Після покидання зони роботи дизельної установки ці симптоми в основному швидко зникають, не залишаючи після себе яких-небудь помітних відхилень.

Встановлено, що ТЧ і їх екстракти є мутагенами для бактерій і для клітинних культур, таких як, наприклад, людські лімфоцити, клітки репродуктивних органів [31–35]. Канцерогенна активність ТЧ у цей час знаходить усе більше підтвердження. Дизельні частинки віднесені Міжнародним агентством онкологічних досліджень (*IARC*) до групи сильно підозрюваних канцерогенів для людини [36], а Агентством по охороні навколишнього середовища США визначені як речовини, які можуть бути канцерогенами з високим ступенем імовірності [30]. У результаті більш ніж 30 дослідницьких робіт, виконаних Інститутом охорони здоров'я США (*Health Effect Institute*) у різних регіонах, для різних професійних груп, для курців і некурців, встановлене, що довгочасний професійний вплив дизельних ВГ, на людину веде до збільшення відносного ризику виникнення рака легенів на 40% [37]. Багато в чому саме завдяки частинкам дизельні ВГ, отримали таку характеристику. Це пов'язане із властивостями ТЧ, зокрема з їхньою високою дисперсністю та хімічним складом.

Порівняння картини осідання частинок у різних відділах дихальної системи з дисперсним складом дизельного аерозолу доводить, що ТЧ є потенційно небезпечним агентом забруднення легенів у силу своїх дрібних розмірів. Причому, загрозу для здоров'я

нарівні із частинками діаметром $0,1 \dots 1$ мкм, масова концентрація яких досягає 80%, а коефіцієнт осідання у легенях – 40%, представляють частинки діаметром меншим $0,1$ мкм, чия рахункова концентрація може досягати декількох десятків мільйонів штук на 1 м^3 при коефіцієнті осідання в легенях близько 70%.

В цілому в легенях дорослої людини при подиху в спокійному стані осідає від 12 до 20% маси дизельних частинок, що знаходяться у вдихуваному повітрі. У дитячому віці частка ТЧ, що осідають у легенях вище, ніж у дорослої людини, причому пік цієї залежності припадає на 5-річний вік [57]. Таким чином, можна припустити, що діти є другою групою ризику, після працюючих у безпосередній близькості від джерел викидів ТЧ.

1.2 Системи розбавлення ВГ дизеля повітрям – тунелі

Для вимірювання викидів ТЧ з ВГ дизелів використовується тунель – трубопровід, в якому ВГ дизеля розбавляються чистим повітрям з метою імітації природного процесу розсіювання забруднюючих речовин, що містяться у ВГ, в атмосфері. Еталонною системою контролю викидів ТЧ є повнопоточний тунель, в якому розбавляються повітрям всі ВГ дизеля (рис. 1.5): якщо їх масова витрата не перевищує $750 \dots 900$ кг/год, то виконується 1-кратне розбавлення ВГ (у трубопроводі з діаметром $D \geq 46$ см і довжиною $L = 10 \cdot D$), в іншому випадку – виконується 2-кратне розбавлення ВГ (у трубопроводах: первинному – $D_1 = 20 \dots 46$ см, $L_1 = 10 \cdot D_1$; вторинному – $D_2 = 2,5 \dots 10$ см, $L_2 = 2,5 \dots 10 \cdot D_2$). Результати визначення величини PT будь-якою іншою вимірювальною системою повинні співпадати з результатами еталонного тунелю з коефіцієнтом кореляції не меншим, ніж 0,95.

Альтернативою для громіздких та вартісних (з ціною, більшою 1 млн. дол. США) еталонних тунелів є компактні, мобільні та більш доступні за ціною частковопоточні системи розбавлення ВГ (рис. 1.6): мінітунелі ($D_{\text{МТ}} = 7,5 \dots 12$ см, $L_{\text{МТ}} = 10 \cdot D_{\text{МТ}}$) та мікротунелі ($D_{\text{МКТ}} = 2,5 \dots 4$ см, $L_{\text{МКТ}} = 10 \cdot D_{\text{МКТ}}$).

Перехід до частковопоточних систем дозволив суттєво (у 8–12 разів) знизити вартість обладнання для визначення показника PT , але вона залишається достатньо високою. Одним з шляхів подальшого зниження вартості тунелів є розробка нових способів визначення масової витрати ВГ в тунелі, які потребують менш вартісного обладнання.

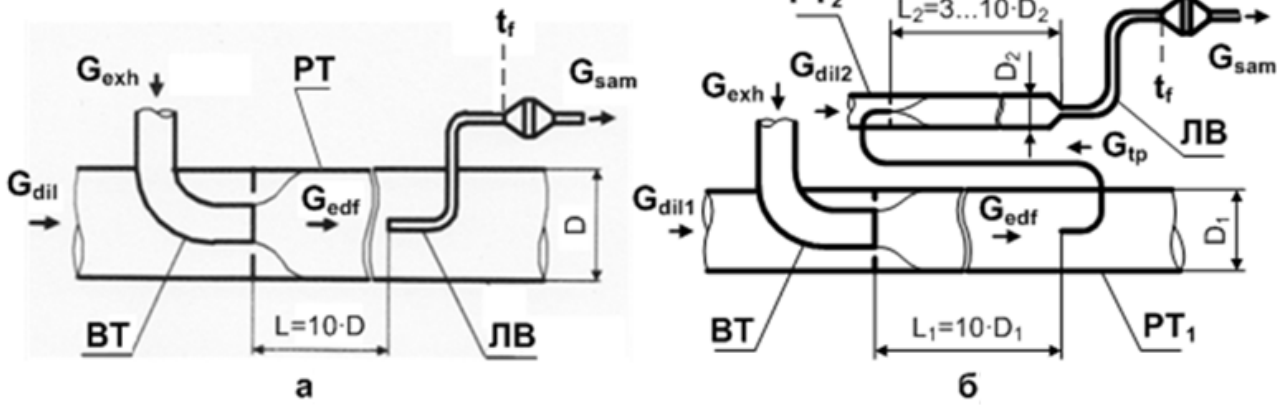


Рис. 1.5. Еталонні тунелі з 1-кратним (а) та 2-кратним (б) розбавленням ВГ

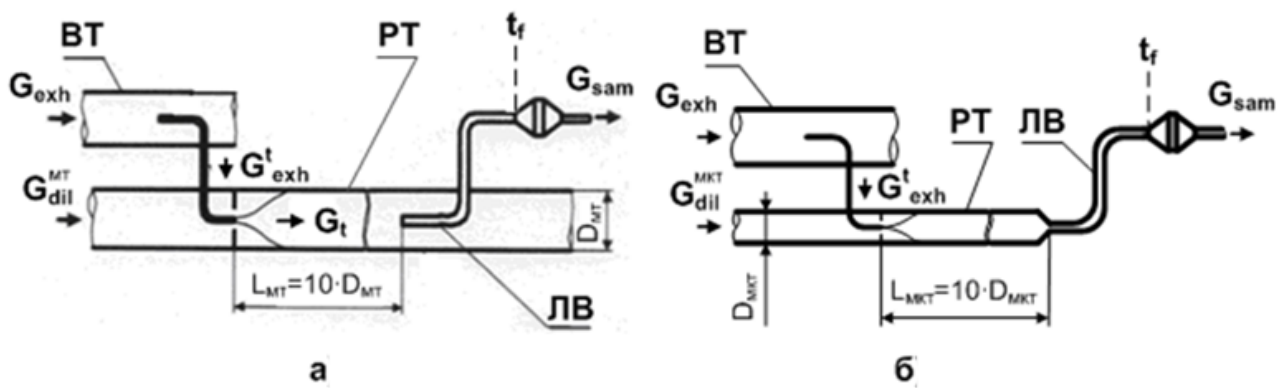


Рис. 1.6. Частковопоточні системи розбавлення ВГ:
а – мінітунель; б – мікротунель

Серед частковопоточних систем найбільш затребуваними є: мінітунелі з ізокінетичним пробовідбірником – зменшені геометричні та газодинамічні копії еталонної системи (відомі аналоги: мінітунелі багатотрубного типу фірми Mitsubishi [42, 43] та MT 474 фірми AVL); мікротунелі з диференційним способом визначення масової витрати ВГ (AVL SPC 472, Pirburg PTP 2000 [51, 46]) та ін.

1.2.1 Регламентовані принципові схеми повнопоточних та частковопоточних тунелів. В повнопоточних системах розбавлення ВГ (рис. 1.7) реалізована концепція CVS або відбору проб при постійному об'ємі. При цьому масова витрата розбавлених ВГ в тунелі створюється компресором об'ємного типу PDP або трубою Вентурі з критичною витратою CFV та підтримується постійною. В цих системах відсутня необхідність розраховувати коефіцієнт розбавлення ВГ, що є суттєвою перевагою повнопоточних тунелів перед частковопоточними системами.

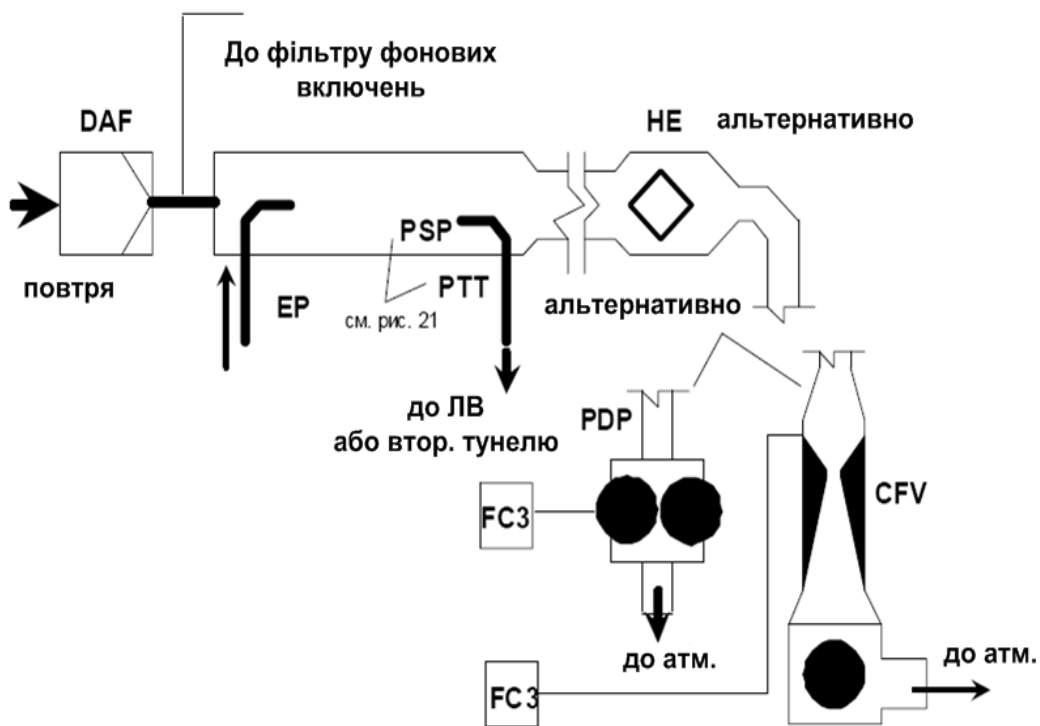


Рис. 1.7. Принципова схема повнопоточного (еталонного) тунелю

Зі змішувального каналу DT проба розбавлених ВГ по трубопроводу PTT подається в лінію відбору проб ТЧ (рис. 1.8), де вона пропускається через робочий фільтр або вторинний розбавляючий тунель (рис. 1.9).

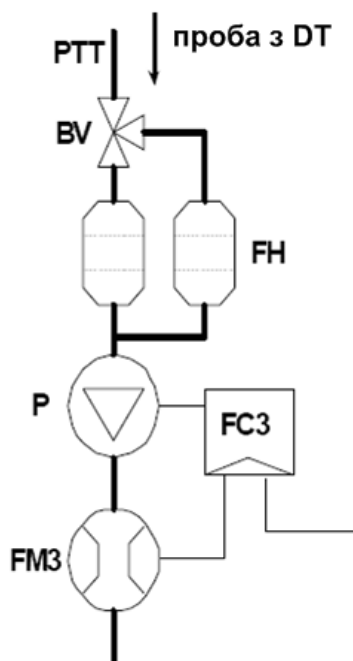


Рис. 1.8. Принципова схема лінії відбору проб ТЧ

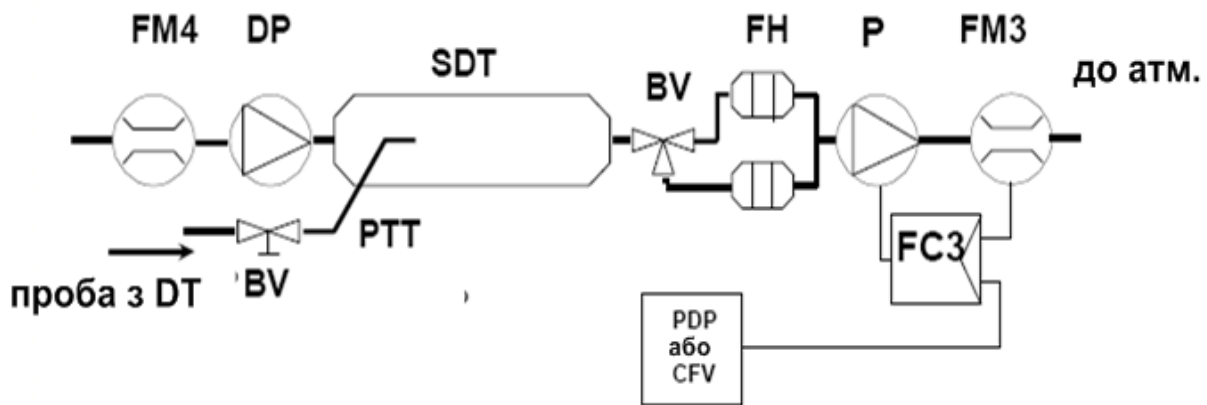


Рис. 1.9. Принципова схема вторинного розбавляючого тунелю

У порівнянні з еталонними системами *частковопоточні тунелі* є більш складними вимірювальними системами, оскільки в них необхідно регулювати та вимірювати коефіцієнт розбавлення ВГ повітрям – q . В залежності від способу визначення даної величини частковопоточні системи розбавлення ВГ поділяються на три типи:

– мінітунелі з ізокінетичним пробовідбірником; в цих системах коефіцієнт q визначається за відомими значеннями масової витрати розбавляючого повітря – G_{dil} та коефіцієнту відбору ВГ – r_{exh} :

$$q = \frac{G_{dil} + (r_{exh} \cdot G_{exh})}{r_{exh} \cdot G_{exh}};$$

– міні- та мікротунелі з вимірюванням концентрацій індикаторних газів (CO_2 або NO_x); в цих системах величина q визначається за концентраціями CO_2 або NO_x , які вимірюються у повітрі, розбавлених та первинних ВГ (можливо визначення концентрацій CO_2 у первинних ВГ за допомогою методу вуглецевого балансу):

$$q = \frac{c_{wE} - c_{wA}}{c_{wD} - c_{wA}},$$

де c_{wE} – концентрація індикаторного газу у первинних ВГ (на вологій основі);

c_{wD} – концентрація індикаторного газу в розбавлених ВГ (на вологій основі);

c_{wA} – концентрація індикаторного газу в повітрі (на вологій основі);

якщо використовується методу вуглецевого балансу:

$$q = \frac{206 \cdot G_{fuel}}{G_{exh} \cdot (c_{(CO_2)D} - c_{(CO_2)A})},$$

де G_{fuel} – масова витрата палива;

$c_{(CO_2)D}$ – концентрація CO_2 в розбавлених ВГ (на вологій основі);

$c_{(CO_2)A}$ – концентрація CO_2 в повітрі (на вологій основі);

– міні- та мікротунелі з керуванням потоками розбавлених ВГ – G_t та повітря – G_{dil} ; в цих системах величина q визначається диференціальним методом за різницею масових витрат вказаних потоків:

$$q = \frac{G_t}{G_t - G_{dil}}.$$

Нижче наведені принципові схеми найбільш відомих частковопоточних систем розбавлення ВГ.

Мінітунель з ізокінетичним пробовідбірником (керований витяжним насосом SB) (рис. 1.10).

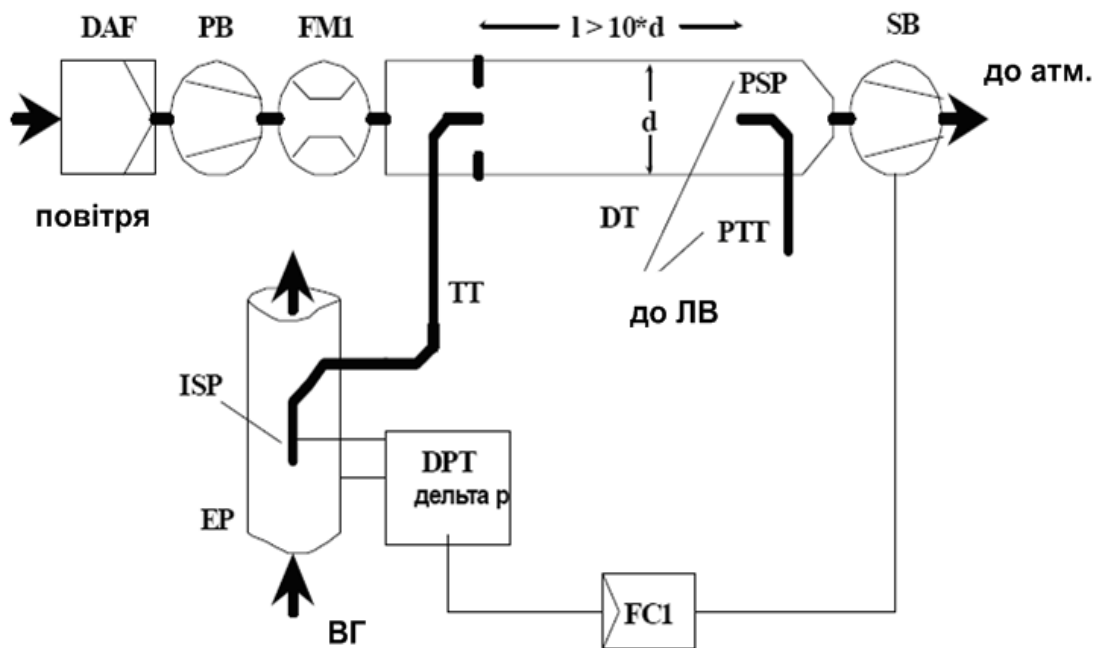


Рис. 1.10. Принципова схема мінітунелю з ізокінетичним пробовідбірником (керованого витяжним насосом SB)

Різниця тисків ВГ у вихлопній трубі і на вході в пробовідбірник вимірюється за допомогою датчика тиску *DPT*. Сигнал від датчика передається на регулятор витрати *FC1*, який управляє роботою витяжного насоса *SB*, який забезпечує потрібний перепад тиску на наконечнику пробовідбірника. При дотриманні цих умов швидкості потоків ВГ у *EP* і *ISP* однакові, а потік, що проходить через *ISP* і *TT*, являє собою постійну частину від повного потоку ВГ. Коефіцієнт відбору ВГ визначають по відношенню поперечних перерізів *EP* і *ISP*. Масову витрату повітря вимірюють за допомогою витратоміра *FM1*. Коефіцієнт розбавлення розраховують на основі масової витрати повітря та коефіцієнту відбору ВГ.

Мінітунель з вимірюванням концентрацій CO_2 або NO_x (рис. 1.11).

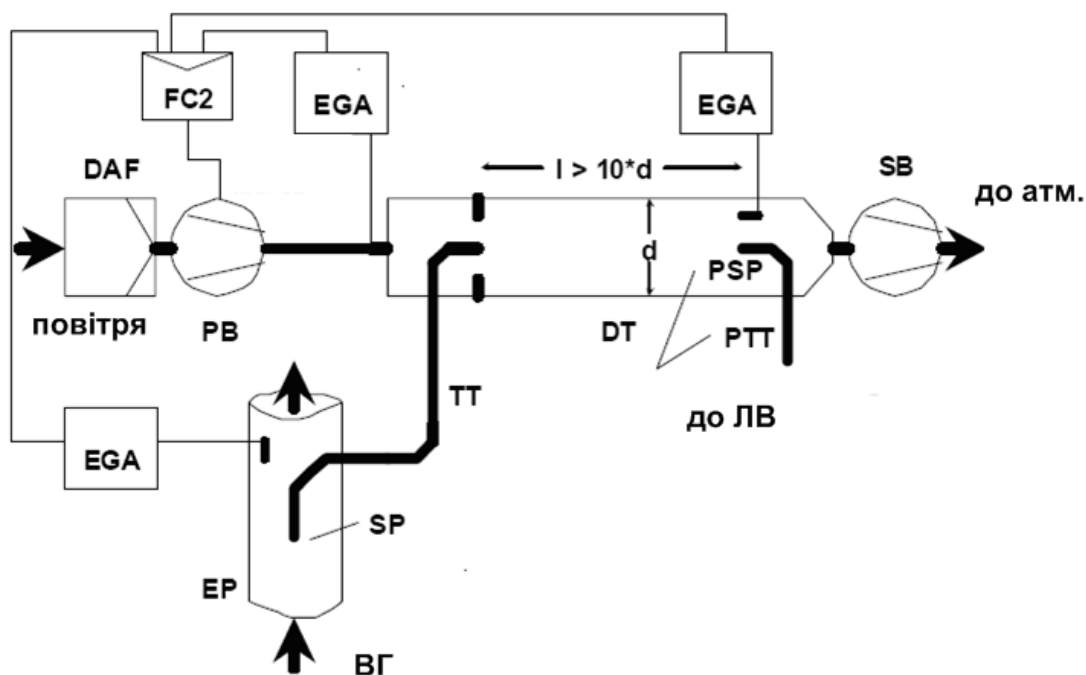


Рис. 1.11. Принципова схема мінітунелю з вимірюванням концентрацій CO_2 або NO_x

Первинні ВГ направляються з вихлопної труби *EP* в змішувальний канал *DT* через пробовідбірник *SP* і відповідний патрубок *TT*. Концентрації індикаторного газу (CO_2 або NO_x) вимірюють у первинних і розбавлених ВГ, а також у повітрі за допомогою аналізатора (аналізаторів) ВГ *EGA*. Ці сигнали передаються на регулятор витрати *FC2*, який регулює роботу

нагнітаючого насоса *PB* або витяжного насоса *SB* з метою забезпечення належного змішування потоку ВГ з повітрям і відповідного коефіцієнту розбавлення у *DT*.

Коефіцієнт розбавлення розраховується за концентраціями індикаторних газів у первинних ВГ, розбавлених ВГ і повітрі.

1.2.2 Елементи конструкцій розбавляючих тунелів.

Елементи конструкцій повнопоточних систем (див. рис. 1.7–1.9).

EP – вихлопна труба. Довжина вихлопної труби від випускного колектора двигуна, виходу з турбонагнітача або пристрою подальшої обробки до змішувального каналу повинна бути не більше 10 м. Якщо довжина вихлопної труби вниз від випускного колектора двигуна, виходу з турбонагнітача або пристрою наступної обробки перевищує 4 м, в цьому випадку всі трубопроводи, що виходять за межі 4 м, повинні бути ізольовані, за винятком вбудованого димоміра, якщо такий використовується. Радіальна товщина ізоляції повинна становити не менше 25 мм. Теплопровідність ізоляційного матеріалу, виміряна при температурі 673 К, не повинна перевищувати 0,1 Вт / м·К. Для зменшення теплової інерції вихлопної труби рекомендоване відношення товщини до діаметру має становити 0,015 і менше. Використання гнучких секцій обмежується ділянками з відношенням довжини до діаметру не більше 12.

PDP – насос з об'ємним регулюванням. Насосом *PDP* вимірюють загальну витрату розбавлених ВГ за кількістю обертів вала насоса і його робочого об'єму. Штучне пониження протитиску вихлопної системи за допомогою *PDP* або системи подачі повітря не допускається. Статичний протитиск ВГ, що вимірюється з підключеною системою *PDP*, має залишатися в межах $\pm 1,5$ кПа відносно статичного тиску, виміряного без підключення до *PDP*, при однаковій частоті обертання двигуна і однаковому навантаженні. Температура газової суміші безпосередньо перед *PDP* повинна знаходитися в межах ± 6 К від середньої робочої температури, що спостерігається в ході випробування, коли система компенсації витрати не використовується. Компенсатор витрати допускається застосовувати тільки в тому випадку, якщо температура на вході в *PDP* не перевищує 323 К (50 °С).

CFV – трубка Вентурі з критичною витратою. Трубною *CFV* вимірюють загальну витрату розбавлених ВГ, встановлюючи витрату в умовах дроселювання (критична витрата). Статичний протитиск

ВГ, що вимірюється з підключеною системою *CFV*, має залишатися в межах $\pm 1,5$ кПа відносно статичного тиску, виміряного без підключення до *CFV*, при однаковій частоті обертання двигуна та однаковому навантаженні. Температура газової суміші безпосередньо перед *CFV* повинна знаходитися в межах ± 11 К від середньої робочої температури, що спостерігається в ході випробування, коли система компенсації витрати не використовується.

HE – теплообмінник (альтернативно, якщо використовується *EFC*). Теплообмінник повинен володіти достатньою ємністю для підтримки температури в зазначених вище межах.

EFC – електронний компенсатор витрати (альтернативно, якщо використовується *HE*). Якщо температура на вході в *PDP* або *CFV* не підтримується у зазначених вище межах, то для безперервного вимірювання витрати і управління пропорційним відбором проби у системі відбору проб ТЧ потрібна система компенсації витрати. З цією метою використовуються сигнали безперервного вимірювання витрати, які потрібні для коригування витрати потоку проб, що протікає через фільтр для осадження ТЧ.

DT – змішувальний канал:

а) повинен мати достатньо малий діаметр для створення турбулентного потоку (число Рейнольдса більше 4 000) і достатню довжину для забезпечення повного перемішування ВГ і повітря. Допускається використання перемішуючих насадок;

б) повинен мати діаметр не менше 460 мм при використанні системи однократного розбавлення;

в) повинен мати діаметр не менше 210 мм при використанні системи подвійного розбавлення;

г) може мати ізоляцію.

ВГ двигуна направляються по потоку в точку, де вони вводяться в змішувальний канал, і ретельно перемішуються. При одноразовому розбавленні проба зі змішувального каналу подається в систему відбору проб ТЧ. Пропускна здатність *PDP* або *CFV* повинна бути достатньою для підтримки температури розбавлених ВГ на рівні не більше 325 К (52 °С) безпосередньо перед фільтром для осадження ТЧ. При подвійному розбавленні проба з змішувального каналу подається у вторинний змішувальний канал, де вона додатково розбавляється, а потім пропускається через фільтр для відбору проб. Пропускна здатність *PDP* або *CFV* повинна бути достатньою для підтримки

температури потоку розбавлених ВГ, що проходять через *DT*, в зоні відбору проб на рівні не більше 464 К (191 °С). Система вторинного розбавлення повинна забезпечувати подачу достатньої кількості повітря для вторинного розбавлення в цілях підтримки температури двічі розбавленого потоку ВГ на рівні не більше 325 К (52 °С) безпосередньо перед фільтром для осадження ТЧ.

DAF – повітряний фільтр. Розріджувач рекомендується фільтрувати і очищати деревинним вугіллям для видалення фонових вуглеводнів. На прохання виробників двигунів та відповідно до перевіреної інженерної практики проводиться відбір проби повітря для визначення фонових концентрацій ТЧ, які потім можуть відніматися із значень, отриманих при вимірюванні у розбавлених ВГ.

PSP – пробовідбірник для ТЧ. Пробовідбірник являє собою основну ділянку *PTT* та:

а) встановлюється назустріч потоку в точці, де забезпечується добре перемішування повітря та ВГ, тобто на осьовій лінії змішувального каналу *DT* на відстані, приблизно рівній 10 діаметрам каналу нижче точки, де ВГ входять в змішувальний канал;

б) повинен мати внутрішній діаметр не менше 12 мм;

в) може підігріватися до температури стінок не більше 325 К (52 °С) шляхом прямого нагрівання або за допомогою попередньо нагрітого повітря за умови, що температура повітря не перевищує 325 К (52 °С) до подачі ВГ в змішувальний канал;

г) може мати ізоляцію.

Елементи конструкції лінії відбору проб ТЧ та вторинного тунелю (див. рис. 1.7, 1.8).

PTT – патрубок відводу ТЧ. Довжина патрубку відводу ТЧ не повинна перевищувати 1020 мм і у всіх випадках, коли це можливо, повинна бути мінімальною. Як зазначено нижче (наприклад, для міні- та мікротунелів), довжина пробовідбірників (*SP*, *ISP*, *PSP*, відповідно) включається в загальну довжину патрубку *PTT*.

Ці розміри дійсні для:

а) мінітунелів та повнопоточних тунелів з однократним розбавленням ВГ на ділянці від наконечника пробовідбірника (*SP*, *ISP*, *PSP*, відповідно) до фільтротримачу;

б) мікротунелів на ділянці від кінця змішувального каналу до фільтротримачу;

в) системи подвійного розбавлення потоку ВГ на ділянці від наконечника пробовідбірника (*PSP*) до вторинного змішувального каналу.

Відвідний патрубок:

а) може підігріватися до температури стінок не більш ніж 325 К (52 °С) шляхом прямого нагрівання або за допомогою попередньо нагрітого повітря за умови, що температура повітря не перевищує 325 К (52 °С) до подачі ВГ в змішувальний канал;

б) може мати ізоляцію.

SDT – вторинний змішувальний канал. Вторинний змішувальний канал повинен мати діаметр не менше 75 мм і достатню довжину, щоб час перебування у ньому двічі розведеної проби становив принаймні 0,25 с. Первинний фільтротримач *FH* повинен росташовуватися на відстані не більше 300 мм від виходу з *SDT*.

Вторинний змішувальний канал:

а) може підігріватися до температури стінок не більш ніж 325 К (52 °С) шляхом прямого нагрівання або за допомогою попередньо нагрітого повітря за умови, що температура повітря не перевищує 325 К (52 °С) до подачі ВГ в змішувальний канал;

б) може мати ізоляцію.

FH – фільтротримач:

а) може підігріватися до температури стінок не більш ніж 325 К (52 °С) шляхом прямого нагрівання або за допомогою попередньо нагрітого повітря за умови, що температура повітря не перевищує 325 К (52 °С) до подачі ВГ в змішувальний канал;

б) може мати ізоляцію.

P – насос для перекачування проб ТЧ розміщують на достатньому видаленні від змішувального каналу таким чином, щоб температура вхідного газу підтримувалася на постійному рівні (± 3 К), якщо не передбачене корегування витрати за допомогою регулятора *FC3*.

DP – насос для подачі повітря розміщують таким чином, щоб вторинне повітря мало температуру $298 \text{ К} \pm 5 \text{ К}$ ($25 \text{ °С} \pm 5 \text{ °С}$), якщо повітря попередньо не підігрівається.

FC3 – регулятор витрати застосовується для компенсації впливу на витрату проби ТЧ змін температури і протитиску в пробоотборній магістралі у разі відсутності інших засобів. Регулятор витрати не обхідний при використанні електронного компенсатора витрати *EFC*.

FM3 – витратомір. Газометр або прилад для вимірювання витрати проби ТЧ розташовують на достатньому видаленні від насоса для перекачування проб *P* таким чином, щоб температура вхідного газу залишалася постійною (± 3 К), якщо не передбачена корекція витрати за допомогою регулятора *FC3*.

FM4 – витратомір. Газометр або прилад для вимірювання витрати розріджувача розміщують таким чином, щоб температура вхідного газу становила $298\text{ K} \pm 5\text{ K}$ ($25\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$).

BV – шаровий затвор. Внутрішній діаметр шарового затвору повинен бути не менше внутрішнього діаметра патрубку відводу ТЧ – *PTT*, а час перемикання має становити менше 0,5 с.

Примітка: Якщо температура навколишнього повітря в безпосередній близькості від *PSP*, *PTT*, *SDT* і *FH* становить менше 293 K ($20\text{ }^\circ\text{C}$), слід передбачити відповідні заходи для уникнення осадження ТЧ на холодних стінках цих пристроїв. Тому рекомендується підігрівати та / або ізолювати дані пристрої з урахуванням меж, зазначених у відповідних описах. Також рекомендується, щоб температура на поверхні фільтра в процесі відбору проб була не нижче 293 K ($20\text{ }^\circ\text{C}$). При високих навантаженнях на двигун вищезгадані пристрої можуть охолоджуватися неагресивними засобами, наприклад за допомогою вентилятора, що забезпечує циркуляцію повітря, до тих пір поки температура охолоджуючої субстанції не опуститься нижче 293 K ($20\text{ }^\circ\text{C}$).

Елементи конструкцій частковопоточних систем (див. рис. 1.10 – 1.11, 2.7–2.13).

EP – вихлопна труба може ізолюватися. Для зниження теплової інерції вихлопної труби рекомендоване відношення товщини стінки до діаметра повинно становити 0,015 та менше. Використання гнучких секцій повинно обмежуватися ділянками з відношенням довжини до діаметра не більше 12. Для зменшення інерційних відкладень кількість вигинів зводиться до мінімуму. Якщо в систему входить глушник випробувального стенду, то його також можна ізолювати. Для ізокінетичної системи вихлопна труба не повинна мати колін, вигинів і різких змін діаметра на ділянці довжиною не менше шести діаметрів труби до наконечника пробовідбірника і трьох діаметрів труби за ним. Швидкість газів в зоні відбору проб повинна складати більше 10 м/с за винятком їх швидкості на режимі холостого ходу. Коливання тиску ВГ не повинні перевищувати $\pm 500\text{ Па}$ від середнього значення. Будь-які заходи щодо зниження амплітуди коливань тиску, що виходять за рамки використання вихлопної системи, яка встановлюється на шасі даного типу (включаючи глушник і пристрої наступної обробки ВГ), не повинні змінювати характеристик роботи двигуна або викликати осадження ТЧ. Для систем без ізокінетичного

пробовідбірника рекомендується використовувати пряму трубу на ділянці довжиною, яка дорівнює шести діаметрам труби до наконечника пробовідбірника і трьом діаметрам труби за ним.

SP – пробовідбірник. Мінімальний внутрішній діаметр повинен становити 4 мм. Мінімальне відношення діаметра вихлопної труби до діаметра пробовідбірника повинно дорівнювати 4. Пробовідбірник повинен являти собою патрубок з відкритим торцем, зверненим назустріч потоку і розташованим на осьовій лінії вихлопної труби, або ж патрубок з декількома отворами.

ISP – ізокинетичний пробовідбірник повинен встановлюватися назустріч потоку по осі вихлопної труби на ділянці, де задовольняються умови щодо параметрів потоку для компонента *EP*; він повинен бути сконструйований таким чином, щоб забезпечувати пропорційний відбір проб первинних ВГ. Мінімальний внутрішній діаметр повинен становити 12 мм.

Для ізокинетического відбору потоку ВГ необхідна система регулювання, що забезпечує нульову різницю тисків між *EP* і *ISP*. У цих умовах швидкості потоків ВГ у *EP* і *ISP* є однаковими, а масова витрата через *ISP* являє собою постійну частку сумарної витрати ВГ. *ISP* повинен бути приєднаний до датчика різниці тисків *DTP*. Нульова різниця тисків між *EP* і *ISP* забезпечується за допомогою регулятора витрати *FC1*.

FD1, *FD2* – розділювачі потоку. У вихлопну трубу *EP* і відповідний патрубок *TT*, відповідно, встановлюється комплект трубок Вентурі або сопел для забезпечення відбору пропорційних проб первинних ВГ. Для пропорційного відбору потоку необхідна система регулювання, що складається з двох дросельних клапанів *PCV1* і *PCV2*, регулюючих тиск у *EP* і *DT*.

FD3 – розділювач потоку. Для забезпечення відбору пропорційних проб первинних ВГ у вихлопну трубу *EP* встановлюють комплект трубок (блок з кількома трубками). Одна з трубок подає ВГ в змішувальний канал *DT*, а через інші трубки вони проходять в демпферну камеру *DC*. Трубки повинні мати однакові розміри (однакові діаметр, довжину, радіус вигину), щоб значення коефіцієнта відбору потоку ВГ залежало тільки від загального числа трубок. Для пропорційного відбору потоку необхідна система регулювання, що підтримує нульову різницю тисків між виходом блоку з кількома трубками в *DC* і виходом з *TT*. У цих умовах швидкості ВГ у *EP* і *FD3* відповідають одна одній, а витрата в *TT* являє собою незмінну

частину повного потоку ВГ. Ці дві точки повинні бути приєднані до датчика різниці тисків *DTP*. Підтримання нульовій різниці тисків забезпечується за допомогою регулятора витрати *FC1*.

EGA – аналізатор ВГ. Можуть використовуватися аналізатори CO_2 або NO_x (метод вуглецевого балансу застосовується тільки для аналізу CO_2). Ці аналізатори калібруються так само, як і аналізатори для вимірювання викидів газоподібних речовин. Для визначення відмінностей у концентраціях допускається використання одного або декількох аналізаторів. Точність вимірювальних систем повинна бути такою, щоб забезпечувати похибку вимірювань G_{EDF} в межах $\pm 4\%$.

TT – відвідний патрубок повинен:

- а) мати можливо меншу довжину, що не перевищує 5 м;
- б) мати діаметр не менше діаметра пробовідбірника, але не більше 25 мм;
- в) досягати своєю кінцевою частиною осьової лінії змішувального каналу в напрямку по руху потоку.

Якщо довжина патрубку не перевищує 1 м, його слід ізолювати за допомогою матеріалу з максимальною теплопровідністю 0,05 Вт/м·К і товщиною по радіусу, рівною діаметру пробовідбірника. Якщо ж патрубок має довжину більшу ніж 1 м, його слід ізолювати і нагрівати до мінімальної температури стінки 523 К (250 °С).

DPT – датчик різниці тисків повинен мати діапазон вимірювань не більше ± 500 Па.

FC1 – регулятор витрати. У ізокинетичних системах для підтримки нульовій різниці тисків між *EP* і *ISP* необхідний регулятор витрати. Регулювання може проводитися шляхом:

а) керування швидкістю або витратою потоку, який проходить через витяжний насос *SB*, і підтримання на постійному рівні швидкості або витрати потоку, який протікає через нагнітаючий насос *PB*, у всіх випробувальних режимах; або

б) регулювання витяжного насосу *SB* на постійну масову витрату разбавлених ВГ та управління потоком, який проходить через нагнітаючий насос *PB*, а, отже, і потоком проби ВГ на ділянці в кінці відвідного патрубку *TT*. У системі з регулюванням тиску остаточно похибка в контурі регулювання не повинна перевищувати ± 3 Па. Перепади тиску в змішувальному каналі не повинні перевищувати ± 250 Па від середнього значення. У системі з декількома трубками регулятор витрати забезпечує пропорційне розділення потоку

ВГ, створюючи нульову різницю тиску на виході з блоку з кількома трубками і на виході з *ТТ*. Регулювання полягає в управлінні витратою повітря, що нагнітається в *DT*, на виході з *ТТ*.

PVC1, *PVC2* – клапани регулювання тиску. Для системи з двома трубками Вентурі або двома соплами необхідні два клапани регулювання тиску для пропорційного відбору потоку шляхом управління протитиском в *EP* і тиском в *DT*. Один клапан повинен розташовуватися в *EP* за наконечником *SP* (у напрямку потоку), а інший – між *PB* і *DT*.

DC – демпферна камера встановлюється на виході з блоку з кількома трубками для зведення до мінімуму перепадів тиску у вихлопній трубі *EP*.

VN – трубка Вентурі встановлюється в змішувальному каналі *DT* для створення негативного тиску близько вихідного отвору відповідного патрубку *ТТ*. Витрата газу через *ТТ*, яка визначається обміном енергії в зоні розташування трубки Вентурі, в основному пропорційна витраті в нагнітальному насосі *PB*, що забезпечує незмінний коефіцієнт розбавлення. Оскільки обмін енергією залежить від температури на виході з *ТТ* і перепаду тиску між *EP* і *DT*, реальний коефіцієнт розбавлення при малому навантаженні трохи нижче, ніж при високому навантаженні.

FC2 – регулятор витрати може використовуватися для управління витратою в нагнітаючому насосі *PB* і/або витяжному насосі *SB*. На нього можуть подаватися сигнали, що вказують на витрату ВГ, повітря або палива, та/або окремі сигнали з датчиків CO_2 або NO_x . При подачі повітря під тиском *FC2* безпосередньо управляє потоком повітря.

FM1 – витратомір. Газовий лічильник або інший пристрій для вимірювання витрати повітря. *FM1* є альтернативним приладом, якщо нагнітальний насос *PB* відкалібрований для вимірювання витрати.

FM2 – витратомір. Газометр або інший пристрій для вимірювання витрати розбавлених ВГ. *FM2* є альтернативним приладом, якщо витяжний насос *SB* відкалібрований для вимірювання витрати.

PB – нагнітаючий насос. З метою регулювання витрати повітря *PB* може бути з'єднаний з регулятором витрати *FC1* або *FC2*. При використанні поворотної заслінки *PB* не потрібен. *PB*, якщо він відповідним чином відкалібрований, може використовуватися для вимірювання витрати повітря.

SB – витяжний насос використовується тільки в системах часткового відбору проб. *SB*, якщо він відповідним чином відкалібрований, може використовуватися для вимірювання витрати потоку розбавлених ВГ.

DAF – повітряний фільтр. Повітря рекомендується фільтрувати і очищати деревинним вугіллям для видалення фонових вуглеводнів. На прохання виробників двигунів і у відповідності з перевіреною інженерної практикою проводиться відбір проби повітря для визначення фонових концентрацій ТЧ, які потім можуть відніматися від значень, отриманих при вимірюванні в розбавлених ВГ.

DT – змішувальний канал:

а) повинен мати достатню довжину для забезпечення повного перемішування ВГ і повітря в умовах турбулентного потоку;

б) повинен бути виготовлений з нержавіючої сталі, причому:

– для змішувальних каналів з внутрішнім діаметром більшим ніж 75 мм відношення товщини до діаметру має становити 0,025 або менше;

– для змішувальних каналів, внутрішній діаметр яких не перевищує 75 мм, номінальна товщина стінок повинна становити не менше 1,5 мм;

в) для мінітунелів він повинен мати діаметр не менше 75 мм;

г) для мікротунелів його рекомендований діаметр повинен становити не менше 25 мм;

д) може підігріватися таким чином, щоб температура стінок не перевищувала 325 К (52 °С) шляхом прямого нагрівання або за допомогою попередньо нагрітого повітря температура якого не перевищує 325 К (52 °С) до подачі ВГ в змішувальний канал;

е) може мати ізоляцію.

ВГ двигуна повинні бути ретельно перемішані з повітрям. Для мінітунелів якість перемішування в каналі перевіряється шляхом вимірювання концентрації CO₂ при працюючому двигуні (принаймні в чотирьох рівномірно рознесених точках). При необхідності допускається використання змішувальних сопел.

Примітка: Якщо температура навколишнього повітря в безпосередній близькості від змішувального каналу (*DT*) становить менше 293 К (20 °С), слід передбачити заходи для уникнення осадження частинок на холодних стінках змішувального каналу. Тому рекомендується підігрівати і / або ізолювати канал у встанов-

лених вище межах. При високих навантаженнях на двигун канал можна охолоджувати неагресивними засобами, наприклад за допомогою вентилятора, що забезпечує циркуляцію повітря, до тих пір поки температура охолоджуючої субстанції не опуститься нижче 293 К (20 °С).

HE – теплообмінник повинен мати достатню ємність для підтримки температури на вході в витяжний насос *SB* в межах ± 11 К від середньої робочої температури, що спостерігається в ході випробування.

1.2.3 Режими розбавлення ВГ у тунелях. При проведенні вимірювань викидів ТЧ в тунелі можуть підтримуватись різні режими розбавлення (dilution mode) ВГ.

DM1 – режим *CVS* (від «Constant Volume Sampling»), при якому масова витрата розбавлених ВГ в тунелі підтримується постійною:

$$G_{edfi} = const; q_i = q_a \cdot \frac{G_{exha}}{G_{exhi}},$$

де *a* – індекс режиму випробувань, на якому викидається найбільша кількість ВГ; q_a – найменше значення коефіцієнта розбавлення ВГ.

Даний режим до 2000 р. (введення норм EURO-III) був основним і використовувався в еталонних тунелях, з введенням в дію 3-ї серії поправок до Правил R-49 (у 2000 р.) спектр можливих режимів розбавлення ВГ було розширено. При використанні режиму *DM1* величина маси ТЧ, зібраних на фільтрі, приблизно дорівнює своєму мінімально допустимому значенню – 0,25 мг. З метою збільшення маси навішування ТЧ допускається проведення повторних випробувань дизеля по циклу ESC з використанням одного фільтра з врахуванням цього при обчисленні результатів.

DM2 – режим *CVS* з повітряним охолодженням тунелю. Застосовувані сьогодні системи охолодження тунелів дозволяють знизити до допустимого рівня – 52 °С температуру проби перед фільтром, яка перевищує цей рівень на величину $\Delta t_{f(52)} = 0... 20$ °С; за рахунок цього вдається зменшити нижню межу коефіцієнтів розбавлення ВГ, підвищити концентрації ТЧ в розбавлених ВГ та збільшити m_f на 34%.

DM3 – режим розбавлення ВГ з постійним коефіцієнтом *q*:

$$q_i = q = const.$$

В результаті використання цього режиму концентрації ТЧ в розбавлених ВГ на режимах випробувального циклу зростають у порівнянні з CVS-режимом у (G_{exha} / G_{exhi}) разів, що дозволяє на 18% збільшити m_f .

DM4 – режим розбавлення ВГ з постійним коефіцієнтом q і повітряним охолодженням тунелю. При використанні даного режиму точність вимірювань показника PT зростає за рахунок збільшення величини m_f на 58% в порівнянні з режимом DM1; такий результат досягається зниженням нижньої межі коефіцієнтів розбавлення ВГ (при якій температура t_f не перевищує 52 °С); повітряне охолодження дозволяє знизити дану температуру на величину $\Delta t_{f(52)} = 0...20$ °С.

1.3 Методика гравіметричних вимірювань викидів ТЧ

У відповідності до вимог нормативних документів [1–3] вимірювання викидів ТЧ проводиться на гальмівному випробувальному стенді дизеля з приєднаною системою розбавлення ВГ з використанням спеціальних технічних засобів для визначення маси ТЧ.

1.3.1 Технічні засоби для визначення маси ТЧ. Для відбору проб ТЧ використовуються **фільтри** на скловолоконній основі з фторвуглецевим покриттям з коефіцієнтом уловлювання частинок *DOP* (діоктилфтолату) діаметром 0,3 мм більшим, ніж 99%. Рекомендовані діаметри фільтрів складають 47 мм та 70 мм; допускається використання фільтрів більшого діаметру – 90 мм і 110 мм (при цьому мінімальна маса навішування на фільтр складає 0,065 мг / 1000 мм² площі плями частинок, що збираються); використання фільтрів з діаметром, меншим за 47 мм не дозволяється. Швидкість проходження газу через фільтр повинна знаходитись у діапазоні 35...100 см/с. Падіння тиску на фільтрі в завершальній фазі випробувань не повинно перевищувати 25 кПа у порівнянні з тиском на початку випробувань. Рекомендовані мінімальні маси навішувань на фільтри з діаметрами 47, 70, 90 та 110 мм складають 0,11, 0,25, 0,41 та 0,62 мг, відповідно.

Камера для стабілізації та зважування фільтрів. Температура – t_{st} , абсолютна вологість – A_{st} (визначається за температурою точки роси) та відносна вологість – ϕ_{st} у камері (або приміщенні), де відбувається кондиціонування та зважування фільтрів повинні підтримуватись у діапазонах: 295 К ± 3 К (22 °С ± 3 °С), 282,5 К ± 3 К

($9,5 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$) та $45\% \pm 8\%$, відповідно. Повітря камери (або приміщення) не повинно містити ніяких забруднюючих речовин (наприклад, пил), які могли б осідати на фільтрі для збору частинок під час їхньої стабілізації. Відхилення від вимог щодо значення параметрів t_{st} , A_{st} та φ_{st} допускаються в тому випадку, якщо їх тривалість не перевищує 30 хв.

Процедура зважування фільтрів. Для зважування фільтрів використовуються аналітичні ваги, які повинні мати похибку (середньоквадратичне відхилення) не більшу за 2 мкг та роздільну здатність не менш ніж 1 мкг (1 поділ = 1 мкг), які зазначені виготівителем приладу.

Перед початком випробувань, не менш ніж за годину до цього, кожний фільтр поміщають в закрити, но не запечатану чашку Петрі, яка захищається від попадання пилу, і встановлюється з метою стабілізації у камеру для зважування. По закінченню періоду стабілізації робочий фільтр зважують та реєструють його суху масу. Після цього фільтр зберігають у закритій чашці Петрі або в запечатаному фільтротримачі до моменту, поки він не знадобиться для випробувань. Фільтр необхідно використати протягом восьми годин після його витягання з камери для стабілізації.

Після проведення випробувань фільтри знову поміщають в камеру для зважування та витримують там протягом періоду стабілізації τ_{st} , який дорівнює 1...80 год. Після витримки фільтри зважують, реєструють їх загальну масу, з якої віднімають масу сухих фільтрів, що в результаті складає масу ТЧ, які зібрані протягом циклу – m_f або режиму – m_{fi} випробувань.

Одночасно з робочими фільтрами зважуються не менш ніж 2 чистих еталонних фільтри, які мають той самий розмір та виготовлені з того самого матеріалу, що і фільтри для відбору ТЧ. Якщо за час випробувань середня маса еталонних фільтрів змінюється більш ніж на 10мкг, то всі фільтри для відбору проб вибраковуються та випробування повторюються.

1.3.2 Випробувальні цикли для встановлення середньоексплуатаційних викидів ТЧ. Середньоексплуатаційний викид ТЧ (показник PT) визначається в ході випробувань дизеля за циклом, який складається з певної кількості режимів з встановленими значення числа обертів колінчастого валу – n , навантаження – L , вагового фактору – WF (враховує відносний час роботи дизеля на режимі в процесі експлуатації) та тривалості випробувань – τ .

Для випробувань автомобільних дизелів використовується Європейський стаціонарний цикл ESC (від «European Stationary Cycle»), встановлений Правилами ЄЕК ООН R-49 [1] (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

Режими випробувального циклу ESC (R-49)

№ _{реж}	<i>n</i>	<i>L</i> , %	<i>WF</i>	<i>τ</i> , хв
1	хол. хід	-	0,15	4
2	<i>A</i>	100	0,08	2
3	<i>B</i>	50	0,10	2
4	<i>B</i>	75	0,10	2
5	<i>A</i>	50	0,05	2
6	<i>A</i>	75	0,05	2
7	<i>A</i>	25	0,05	2
8	<i>B</i>	100	0,09	2
9	<i>B</i>	25	0,10	2
10	<i>C</i>	100	0,08	2
11	<i>C</i>	25	0,05	2
12	<i>C</i>	75	0,05	2
13	<i>C</i>	50	0,05	2

Значення чисел обертів *A*, *B* та *C*, які є визначальними для циклу ESC (рис. 1.12), встановлюються за допомогою виражень:

$$A = n_{lo} + 0,25 \cdot (n_{hi} - n_{lo});$$

$$B = n_{lo} + 0,50 \cdot (n_{hi} - n_{lo});$$

$$C = n_{lo} + 0,75 \cdot (n_{hi} - n_{lo});$$

де n_{lo} – найменше число обертів, при якому досягається 50% заявленої ефективної потужності двигуна – *P*;

n_{hi} – найбільше число обертів, при якому досягається 75% від *P*.

Випробувальні цикли тепловозних дизелів

Цикл		ISO 8178-F			ДСТУ 32.001-94				
№ _{реж}		1	2	3	1	2	3	4	5
% від $P_{(ном)}$		100	35	хол.хід	100	75	50	25	хол.хід
WF	Магіст.	0,25	0,15	0,60	0,06	0,13	0,11	0,10	0,60
	Вивозн.				0,25	0,03	0,03	0,02	0,67
	Маневр.				0,005	0,015	0,12	0,40	0,46

Примітка. Скорочення означають: Магіст., Вивозн., Маневр. – робота тепловозу: магістральна, вивозна та маневрова, відповідно.

Випробувальний цикл дизелів сільськогосподарського призначення

№ _{реж}	n	$L, \%$	WF
1	НОМ.	100	0,15
2		75	0,15
3		50	0,15
4		10	0,1
5	пром.	100	0,1
6		75	0,1
7		50	0,1
8	хол.хід	-	0,15

Після підготовки системи розбавлення ВГ розпочинають послідовне виконання випробувального циклу. На кожному режимі дизель працює протягом встановленого періоду часу. При цьому потрібні число обертів вала двигуна та навантаження повинні досягатися протягом перших 20 с. Допустимі відхилення цих парамет-

рів від встановлених значень не повинні перевищувати $\pm 50 \text{ хв}^{-1}$ і $\pm 2\%$ (при заданому числу обертів), відповідно. Допускається проведення повторних випробувань дизеля за циклом достатню кількість разів для накопичення на фільтрі більшої кількості ТЧ.

На кожному режимі випробувань проводиться відбір проб ТЧ на робочий фільтр (при випробуванні автомобільних дизелів за циклом ESC використовується один фільтр протягом циклу). Кількість відібраної проби на режимі випробувань повинна бути пропорційною відповідному ваговому коефіцієнту. Це досягається шляхом регулювання масової витрати потоку проби, часу відбору проб або коефіцієнта розбавлення ВГ. Час відбору проб на кожному режимі повинен складати не менш, ніж 4 с на 0,01 вагового коефіцієнту. Відбір проб ТЧ рекомендується здійснювати як можна пізніше, при цьому закінчити його потрібно не раніше, ніж за 5 с до завершення часу роботи дизеля на режимі.

Після завершення випробування визначають масу ТЧ, зібрану на фільтрі, за описаною вище процедурою.

1.3.3 Розрахунок масових та середньоексплуатаційних викидів ТЧ.

Масові викиди ТЧ з ВГ дизеля на окремих режимах випробувань – PT_{massi} визначаються за формулою:

$$PT_{massi} = \frac{m_{fi}}{m_{sami}} \cdot \frac{G_{edfi}}{1000}, \text{ г/год};$$

де m_{fi} – маса ТЧ на фільтрі, яка зібрана на i -му режимі, мг;
 m_{sami} – маса проби розбавлених ВГ, яка пройшла крізь фільтр за режим, кг;

G_{edfi} – еквівалентна масова витрата розбавлених ВГ на i -му режимі (дорівнює масовій витраті потоку розбавлених ВГ у еталонній системі), кг/год:

$$G_{edfi} = G_{exhi} \cdot q_i,$$

де q_i – коефіцієнт розбавлення ВГ на i -му режимі;
 G_{exhi} – масова витрата ВГ дизеля на i -му режимі, кг/год.

Середньоексплуатаційний пикид ТЧ з ВГ дизеля – PT визначається, як відношення середніх за цикл масового викиду ТЧ – PT_{mass} та ефективної потужності дизеля – \bar{P} :

$$PT = \frac{PT_{mass}}{P}, \text{ г/кВт}\cdot\text{год}, \quad (1.1)$$

Величина PT_{mass} розраховується за формулою

$$PT_{mass} = \frac{m_f}{m_{sam}} \cdot \frac{\overline{G_{edf}}}{1000}, \text{ г/год}, \quad (1.2)$$

де m_f – маса ТЧ, зібрана на фільтрі за цикл, мг;

m_{sam} – маса проби розбавлених ВГ, яка пройшла через фільтр за цикл при умові, що величини m_{sami} є пропорційними відповідним ваговим факторам – WF_i (при 2-кратному розбавленні ВГ $m_{sam} = m_{sam2} - m_{dil2}$, де m_{sam2} , m_{dil2} – маси розбавлених ВГ і повітря, які пройшли через фільтр за цикл), кг;

$\overline{G_{edf}}$ – середня еквівалентна масова витрата розбавлених ВГ у тунелі, кг/год.

Величини, які входять до формули (1.2), визначаються наступним чином:

$$m_{sam} = \sum_{i=1}^n m_{sami}, \quad (1.3)$$

де n – кількість режимів у циклі;

$$\overline{G_{edf}} = \sum_{i=1}^n WF_i \cdot G_{edfi}, \text{ кг/год}. \quad (1.4)$$

Для розрахунку \overline{P} використовують формули:

$$\overline{P} = \sum_{i=1}^N (P_i \cdot WF_i), \text{ кВт}, \quad (1.5)$$

де P_i – ефективна потужність дизеля на i -му режим, кВт;

$$P_i = \frac{n_i \cdot M_{ki}}{9550} - P_{auxi}, \text{ кВт}, \quad (1.6)$$

де n_i – число обертів вала двигуна на i -му режимі, хв⁻¹;

M_{ki} – крутний момент на i -му режимі, Н·м;

P_{auxi} – потужність допоміжного обладнання на i -му режимі, кВт.

Відповідність проведеної процедури вимірювань встановленим вимогам оцінюють за ефективними ваговими коефіцієнтами WF_i :

$$WF_i = \frac{m_{sami} \cdot \overline{G_{edfi}}}{m_{sam} \cdot G_{edfi}}$$

Розходження регламентованих та ефективних вагових коефіцієнтів повинні знаходитись в межах $\pm 0,003$ (для холостого ходу – $\pm 0,005$). При виконанні цієї умови результати випробувань признаються дійсними.

Таким чином показник PT – це величина, яка визначається непрямым шляхом в результаті проведення розрахунків за даними прямих вимірювань величин: m_f , m_{sam} , q_i , G_{exhi} , n_i та M_{ki} (рис. 1.13).

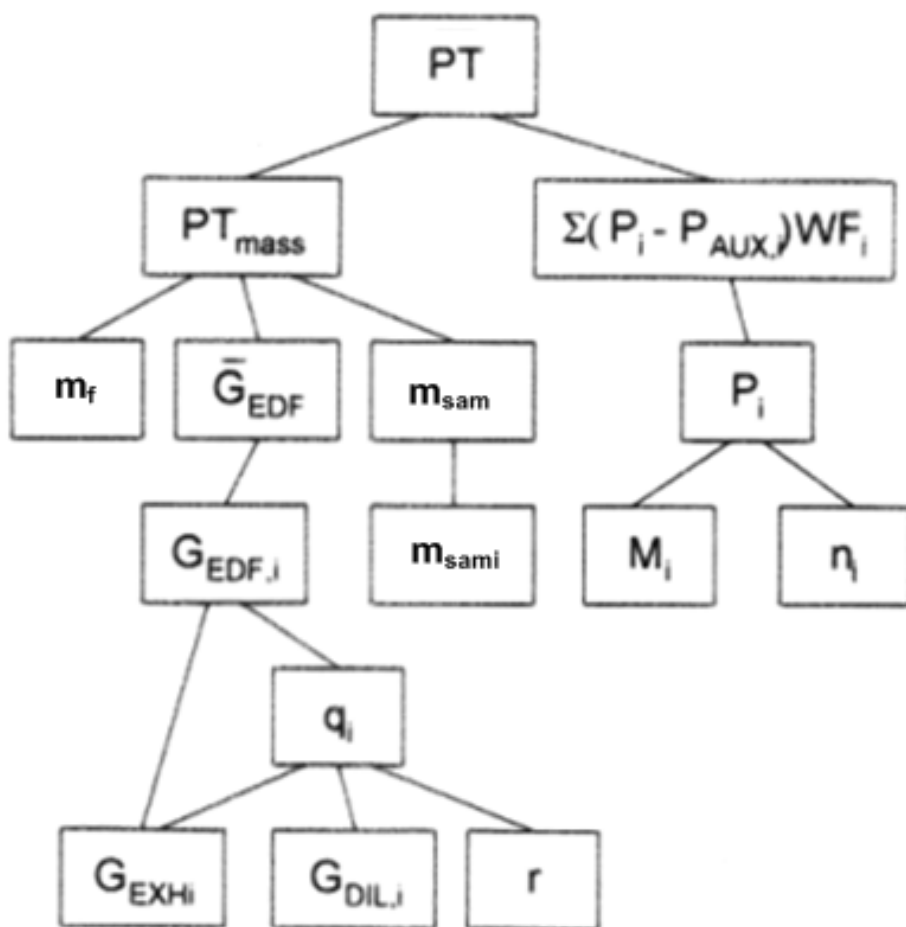


Рис. 1.13. Алгоритм визначення середньоексплуатаційного викиду ТЧ дизеля при використанні мінітунелю з ізокінетичним пробовідбірником

1.3.4 Фактори, що впливають на точність гравіметричних вимірювань викидів ТЧ. При виконанні стандартної процедури вимірювань величини PT слід враховувати таку її особливість, як вплив температурного режиму відбору проб ТЧ (характеризується

температурами t_{fi} , які залежать від величин t_{dil} , $t_{f(max)}$ та $\Delta t_{f(52)}$) та умов стабілізації фільтру (характеризуються величинами τ_{st} і t_{st}) на масу РОФ, а через це і масу ТЧ в цілому – m_f . Зміни t_{dil} , $t_{f(max)}$, $\Delta t_{f(52)}$ та τ_{st} , t_{st} зміщують рівновагу процесів конденсації-випаровування РОФ в той чи інший бік.

Варіювання даних величин в допустимих межах призводить до виникнення методичних похибок вимірювання показника PT , які утворюються на етапах пробопідготовки – δPT_{tf} та стабілізації фільтру – δPT_{st} внаслідок розходження результатів визначення m_f . Результати досліджень закордонних та вітчизняних авторів (рис. 1.14) свідчать про наступне [42, 50, 51, 53]:

– при збільшенні температури t_f маса навішування ТЧ – m_f знижується; при цьому для опису впливу вказаної температури на величину m_f можна використовувати лінійну залежність у вигляді:

$$\delta m_f^{tf} = \frac{m_f^{tf} - m_f^{tf0}}{m_f^{tf0}} \cdot 100\% = k_{tf} \cdot (t_f - t_{f0}),$$

де δm_f^{tf} – відносне відхилення маси навішування ТЧ при температурі проби t_f – m_f^{tf} від базового значення m_f^{tf0} , яке відповідає температурі проби t_{f0} , прийнятій за базову (у даних, представлених на рис. 1.14, а – $t_{f0} = 45$ °С);

k_{tf} – коефіцієнт пропорційності, який залежить від режиму роботи двигуна: при збільшенні потужності дизеля його величина зменшується (за рахунок зменшення частки РОФ у складі ТЧ);

– при збільшенні періоду стабілізації фільтру τ_{st} маса навішування ТЧ знижується за рахунок зменшення кількості вуглеводневої фракції, частина якої випаровується з поверхні фільтру; при цьому для опису впливу величини τ_{st} на вагову характеристику ТЧ можна використовувати логарифмічну залежність:

$$\delta m_f^{\tau st} = \frac{m_f^{\tau st} - m_f^{\tau st0}}{m_f^{\tau st0}} \cdot 100\% = k_{\tau st} \cdot \lg \left(\frac{\tau_{st}}{\tau_{st0}} \right),$$

де $\delta m_f^{\tau st}$ – відносне відхилення маси навішування ТЧ при тривалості стабілізації τ_{st} – $m_f^{\tau st}$ від базового значення $m_f^{\tau st0}$, яке відповідає часу витримки фільтру τ_{st0} , який прийнято за базовий (у даних, що представлені на рис. 1.14, б – $\tau_{st0} = 2$ год);

$k_{\tau_{st}}$ – коефіцієнт пропорційності, величина якого залежить від температури t_{st} .

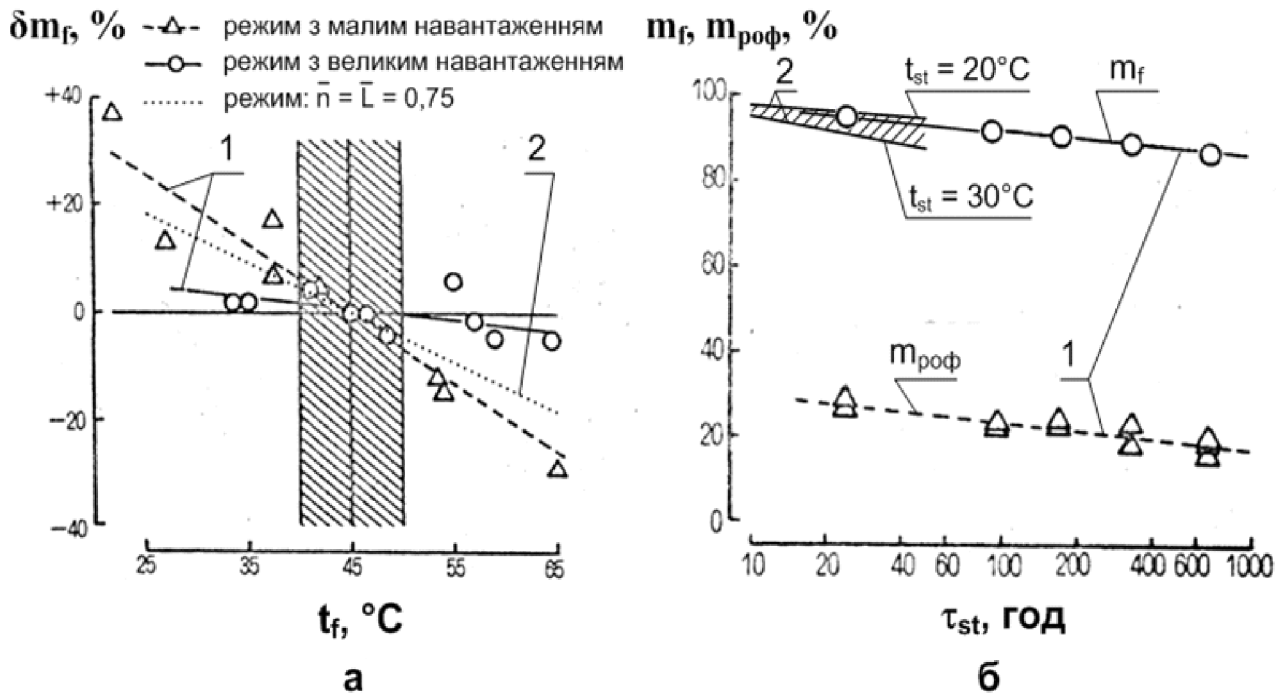


Рис. 1.14. Експериментальні дані про вплив температури проби t_f (а) та умов стабілізації фільтру t_{st} , τ_{st} (б) на масу навішення ТЧ m_f : 1 – результати досліджень фірми Mitsubishi; 2 – результати досліджень вітчизняних авторів.

Слід відзначити, що для врахування спільного впливу величин τ_{st} і t_{st} на масу навішування ТЧ слід використовувати функцію 2-х змінних, яка японськими фахівцями не досліджувалася.

$$\delta m_f^{st} = \frac{m_f^{st} - m_f^{st0}}{m_f^{st0}} \cdot 100\% = f(\tau_{st}, t_{st}),$$

де δm_f^{st} – відносне відхилення маси навішування ТЧ при стабілізації фільтру з тривалістю τ_{st} і температурою t_{st} – m_f^{st} від базового значення m_f^{st0} , яке відповідає періоду стабілізації τ_{st0} і температурі t_{st0} , які прийняті за базові значення.

Таким чином при оцінюванні методичних похибок вимірювання показника $PT - \delta PT_{t_f}$ та $\delta PT_{t_{st}}$ слід враховувати наступне:

1) вплив температури t_f на m_f може приблизно оцінюватись лінійною залежністю, коефіцієнт пропорційності якої зменшується з ростом навантаження (оскільки при цьому зменшується доля РОФ у ТЧ);

2) величина m_f зменшується пропорційно зростанню температури t_{st} та десяткового логарифму від τ_{st} за рахунок втрати маси РОФ в наслідок її випаровування.

1.4 Аналіз можливостей підвищення ефективності гравіметричних вимірювань викидів ТЧ та розробка відповідних рекомендацій

Поступове зменшення допустимих рівнів викидів ТЧ від дизелів приводить до зростання результуючої похибки вимірювань середньоексплуатаційного викиду ТЧ (рис. 1.15).

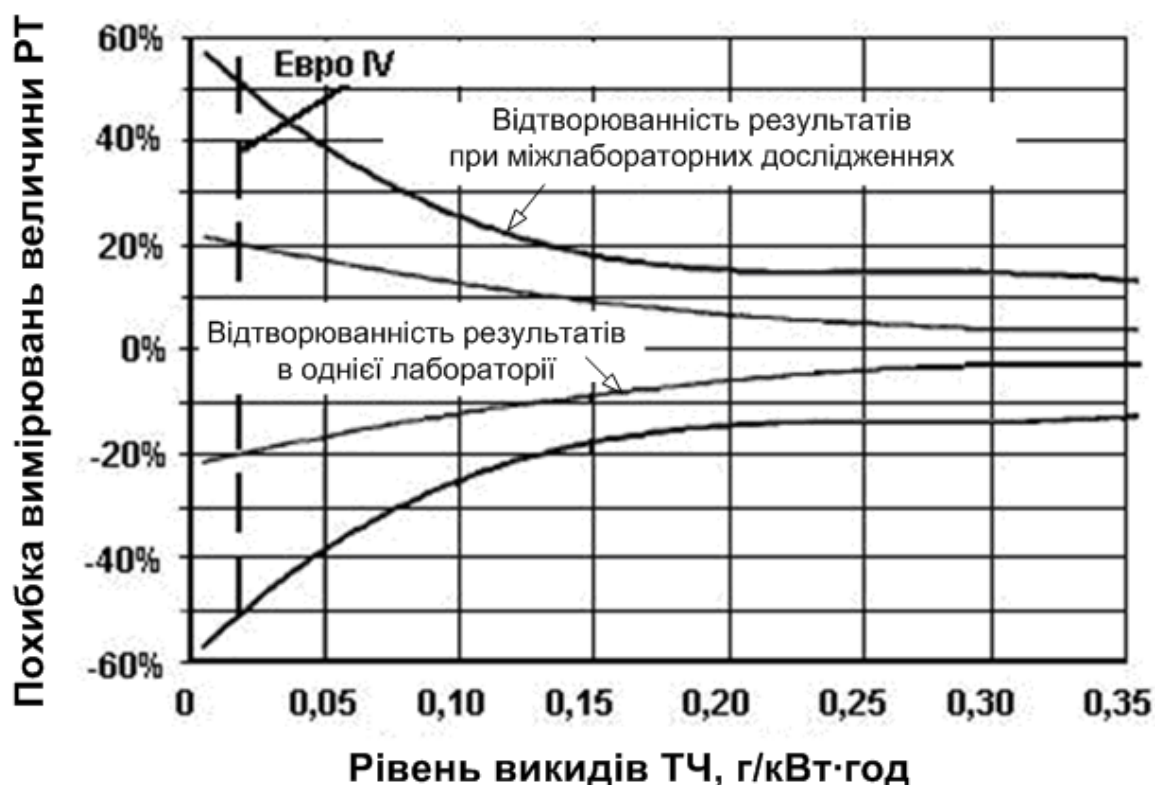


Рис. 1.15. Збільшення похибки визначення показника PT в умовах зниження нормна викиди ТЧ з ВГ дизелів

З метою підвищення точності визначення показника PT до нормативних документів – Правил ЄЕК ООН $R-49$, $R-96$ та ін. внесені поправки з удосконаленнями гравіметричного методу вимірювань викидів ТЧ від дизелів (табл. 1.5).

Аналіз можливостей подальшого підвищення ефективності даного методу дозволяє зробити наступні рекомендації:

Заходи з удосконалення гравіметричного методу визначення показника PT

КЕ	Назва заходу	Результат заходу	Вплив на КЕ
1	Перехід від повнопоточних тунелів до мінітунелів	Зменшення ГТ у 4,5...6 разів, ПГ – у 20...35 разів	Зниження вартості тунелю у 4...5 разів
	Перехід від мінітунелів до мікротунелів	Зменшення ГТ у 3...4 разів, ПГ – у 10...15 разів	Зниження вартості тунелю у 2...2,5 рази
2	Зменшення максимальної тепломісткості потоку ВГ при переході від 13-Mode Cycle до циклу ESC	Збільшення m_f	Зменшення інструментальної похибки δPT_{in}
	Впровадження режимів розбавлення ВГ – DM2, DM3, DM4		
	Підвищення допустимої швидкості фільтрації ТЧ (при переході з 2-х на 1-х фільтрову схему) з 0,8 до 1,0 м/с		
	Введення нижньої межі допустимого діапазону варіювання $t_{f(max)} - 42$ °С	Зменшення НР m_f на етапі ПП	Зменшення δPT_{if}
	Зменшення допустимого діапазону варіювання t_{st} з 20-30 °С до 19-25 °С	Зменшення НР m_f на етапі СФ	Зменшення δPT_{st}

Примітка. В таблиці позначені: КЕ – критерії ефективності: 1 – вартість обладнання, 2 – точність вимірювань викидів ЗЧ; ГТ – габарити тунелю; ПГ – продуктивність газодувки; НР – невизначеність результату вимірювань; ПП – пробопідготовка; СФ – стабілізація фільтру.

1) використання в частковопоточних тунелях компенсаційного способу вимірювань масової витрати ВГ – G_{exh}^t , для виконання якого потрібні невагтісні витратоміри з низьким класом точності (рис. 1.16); це дозволяє зменшити вартість вимірювача коефіцієнту розбавлення ВГ і, за рахунок цього, вартість тунелю;

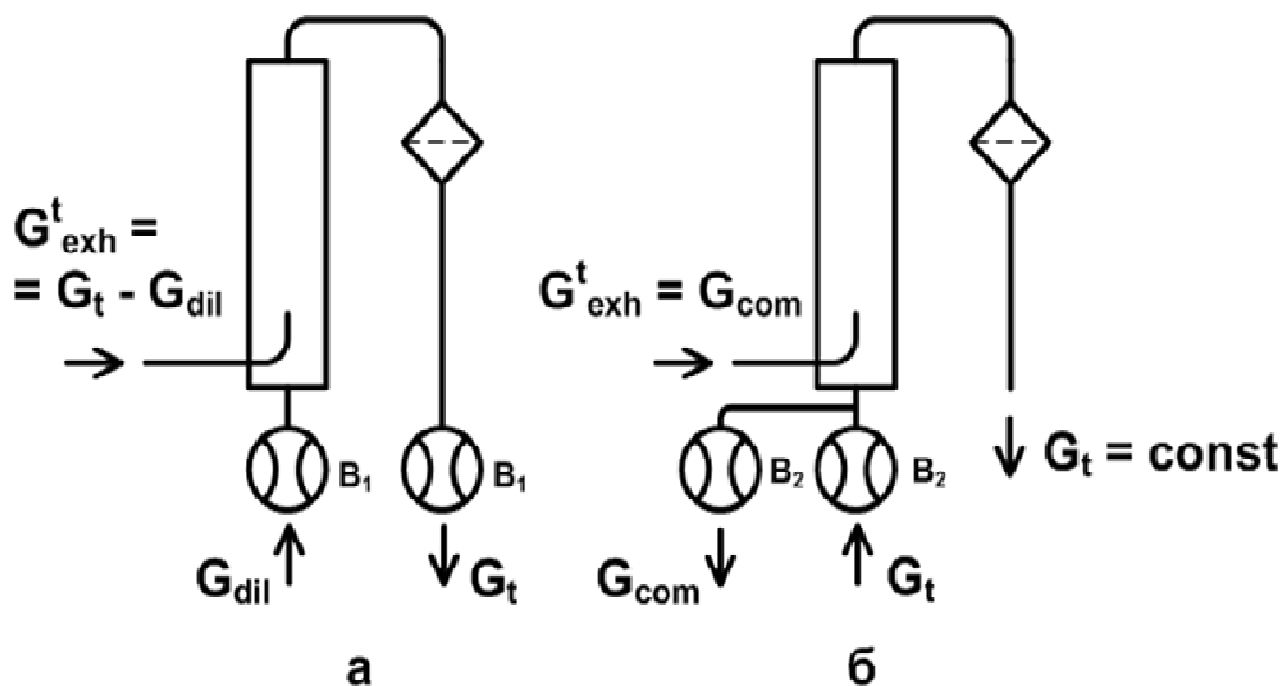


Рис. 1.16. Принципові схеми різних способів визначення G_{exh}^t :
а – диференційного, який використовується у мікротунелі *AVL SPC 472*;
б – компенсаційного, який пропонується.

2) використання в тунелі режиму розбавлення ВГ з постійним коефіцієнтом q , повітряним охолодженням тунелю і температурним регулюванням, при якому температури t_{fi} підтримуються такими ж, як при режимі *CVS* в еталонному тунелі; разом з цим допустимі діапазони варіювання температур t_{dil} та $t_{f(max)}$ скорочуються в 5 разів – до інтервалів: $t_{dil} = 20..22$ °С, $t_{f(max)} = 50...52$ °С; це дозволяє зібрати на фільтрі найбільш можливу масу ТЧ та зменшити область можливих значень температур t_{fi} і, за рахунок цього, методичну похибку δPT_{if} ;

3) скорочення діапазонів варіювання параметрів процесу стабілізації робочого фільтра до інтервалів: $t_{st} = 20...22$ °С (скорочений в 3 рази), $\tau_{st} = 6...8$ год (скорочений на 77 год); це дозволяє зменшити методичну похибку δPT_{st} (при таких t_{st} і τ_{st} вона не перевищує $\pm 0,5\%$).

Висновки глави

Результати аналізу структури та токсикологічних властивостей ТЧ, вимог нормативних документів щодо обладнання, процедур вимірювань та методики визначення викидів ТЧ з ВГ дизелів показали наступне.

1. ТЧ (друга за значимістю після оксидів азоту забруднююча речовина, що міститься у ВГ дизеля) являє собою полікомпонентне утворення з трьома основними компонентами: дизельною сажою, розчинною органічною фракцією – РОФ та сульфатами, відносні частки яких залежать від режиму роботи дизеля і складають 33...90%, 7...49% та 1...4%, відповідно. Висока токсичність ТЧ обумовлена входженням до складу РОФ речовин з дратівливою, мутагенною та канцерогенною діями.

2. Для визначення викидів ТЧ використовуються еталонні повнопоточні (вартісні та громіздкі) та частковопоточні (економічні та компактні) тунелі – системи розбавлення ВГ дизеля атмосферним повітрям. Найбільш затребуваними сьогодні є мінітунелі з ізокінетичним пробовідбірником фірм Mitsubishi і AVL та мікро-тунелі з диференційним способом визначення масової витрати ВГ фірм AVL, Pirburg та ін.

3. В сучасних тунелях можуть реалізовуватись чотири режими розбавлення ВГ: *DM1*) *CVS*-режим з постійною масовою витратою розбавлених ВГ, який забезпечує відбір на фільтрі мінімально допустимої кількості ТЧ; *DM2*) *CVS*-режим з повітряним охолодженням тунелю; *DM3*) режим з постійним коефіцієнтом розбавлення ВГ – q ; *DM4*) режим з постійним коефіцієнтом q і повітряним охолодженням тунелю. При використанні режимів розбавлення *DM2*, *DM3* і *DM4* маса ТЧ на фільтрі зростає на 34%, 18% і 58%, відповідно.

4. Процедури вимірювань нормованих середньоексплуатаційних викидів ТЧ – показників *PT* являють собою випробувальні цикли, які складаються з певної кількості сталих режимів роботи дизеля з встановленими значеннями числа обертів вала двигуна і навантаження. При випробуваннях автомобільних дизелів використовують 13-ступінчастий цикл ESC, встановлений Правилами ЄЕК ООН R-49, дизелів сільськогосподарського призначення – 8-ступінчастий цикл, встановлений Правилами ЄЕК ООН R-96, тепловозних дизелів – 3- ступінчастий цикл, встановлений міжнародним стандар-

том ISO 8178-F (вітчизняний аналог – цикл ДСТУ 32.001-94) та ін. Значимість окремого режиму випробувань враховується відповідним ваговим фактором WF . Показник PT розраховується непрямим шляхом на основі результатів прямих вимірювань величин, що визначають середні за цикл масовий викид ТЧ та ефективну потужність дизеля.

5. При виконанні стандартної процедури вимірювань показника PT слід враховувати таку її особливість, як вплив температурного режиму відбору проб ТЧ (характеризується температурами повітря – t_{dil} і проби перед фільтром – t_f та величиною зниження t_f внаслідок охолодження тунелю – $\Delta t_{f(52)}$) та умов стабілізації робочого фільтру перед зваженням (характеризуються температурою – t_{st} та тривалістю – τ_{st} стабілізації) на масу ТЧ, що визначається – m_f . Варіювання величин t_{dil} , t_f , $\Delta t_{f(52)}$ та t_{st} , τ_{st} в допустимих нормативними документами діапазонах приводить до виникнення методичних похибок вимірювань показника PT , які утворюються на етапах пробопідготовки – δPT_{tf} та стабілізації фільтру – δPT_{st} внаслідок розходження результатів визначення величини m_f . Величини δPT_{tf} та δPT_{st} разом з інструментальною похибкою δPT_{in} утворюють результуючу похибку вимірювань показника PT – δPT .

6. Аналіз можливостей підвищення точності гравіметричних вимірювань викидів ТЧ дозволив зробити такі рекомендації щодо зменшення похибки δPT :

– використання в тунелі режиму розбавлення ВГ $DM4$ з регулюванням температури проби перед фільтром t_f (підтримується такою, як в еталонному тунелі при CVS -режимі розбавлення ВГ) та скорочення допустимих діапазонів варіювання температур t_{dil} і t_f у 5 разів – до інтервалів $t_{dil} = 20...22$ °C, $t_{f(max)} = 50...52$ °C; це дозволяє зменшити похибки δPT_{in} (за рахунок збільшення m_f) та δPT_{tf} (за рахунок зменшення діапазонів варіювання температури t_f);

– скорочення діапазонів варіювання параметрів t_{st} і τ_{st} до інтервалів $t_{st} = 20...22$ °C (зменшується у 3 рази), $\tau_{st} = 6 \dots 8$ год (зменшується на 77 год); це дозволяє зменшити похибку δPT_{st} до величини $\pm 0,05\%$.

7. Аналіз можливостей зниження вартості тунелів дозволив рекомендувати використання в них компенсаційного способу визначення масової витрати ВГ дизеля, для застосування якого потрібні доступні за ціною витратоміри з класом точності 1,5...3,0.

ГЛАВА 2

СТВОРЕННЯ ТЕОРЕТИЧНОЇ БАЗИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА PT

2.1 Математичний опис процесу тепловіддачі в тунелі

Математичний опис розроблено з метою отримання критеріального рівняння тепловіддачі в тунелі, яке дозволяє обчислювати середній коефіцієнт тепловіддачі α_t для будь-якої системи розбавлення ВГ – від мікро- до повнопоточних тунелів (первинних і вторинних). Для досягнення даної мети математичні залежності, що описують процес тепловіддачі, приведено до безрозмірною форми.

Розглянемо тунель в декартовій системі координат, початок якої розташовано в центрі вхідного перерізу трубопроводу розбавлення, а вісь x збігається з віссю тунелю (рис. 2.1).

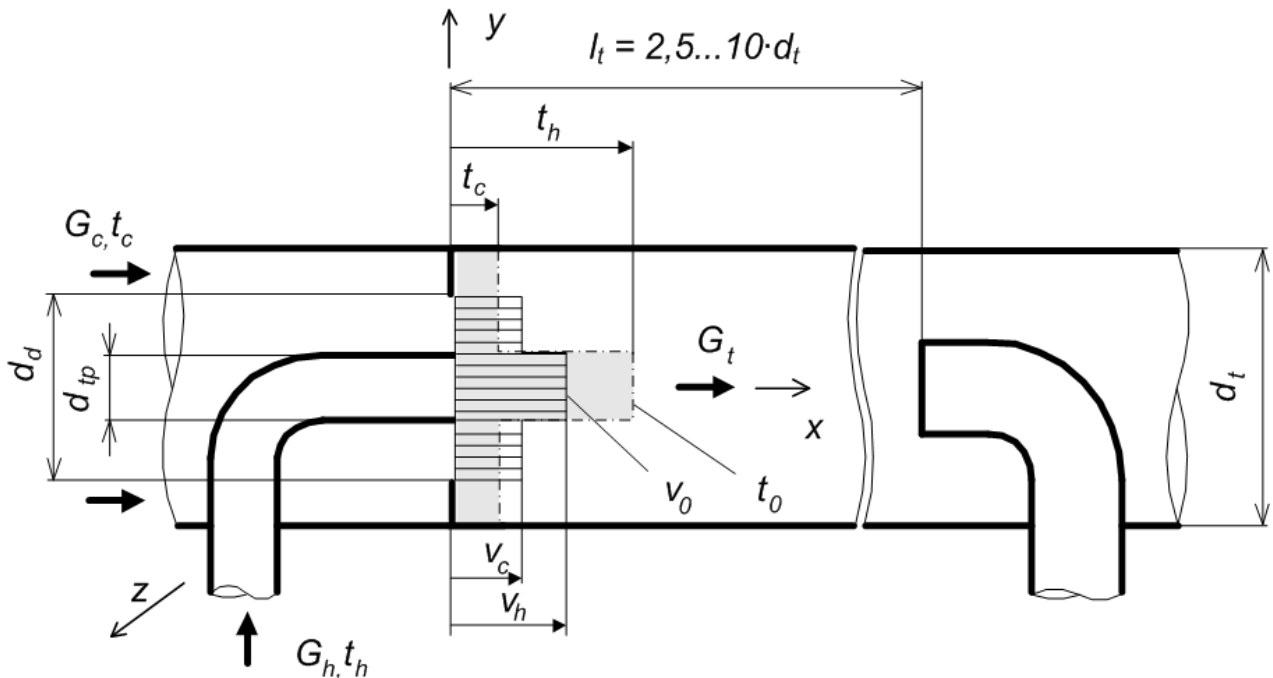


Рис. 2.1. Принципова схема тунелю в декартових координатах

Прийmemo наступні допущення:

- 1) всі тунелі геометрично подібні;

- 2) робочим тілом є нагріте повітря;
- 3) процеси теплообміну, що розглядаються, є стаціонарними;
- 4) вплив гравітаційних сил і вихрових потоків на тепловіддачу незначний;
- 5) ізобарна теплоємність робочого тіла – c_p постійна;
- 6) на вході в тунель швидкості і температури розподілені рівномірно по перетинах потоків робочого тіла і розбавляючого повітря;
- 7) температура стінки тунелю постійна.

Введемо позначення:

- геометричні розміри тунелю: діаметр – d_t , довжина – l_t ;
- площі поперечних перетинів: трубопроводу підведення робочого тіла (ТП) – F_{tp} , отвору діафрагми – F_d , тунелю – F_t ;
- масові витрати потоків: нагрітого повітря – G_h , холодного повітря – G_c , розбавленого робочого тіла в тунелі – G_t ;
- щільності потоків: нагрітого повітря – ρ_h , холодного повітря – ρ_c , поточне значення – ρ ;
- температури: стінки тунелю – t_w , потоків: нагрітого повітря – t_h , холодного повітря – t_c ; поточне значення – t ;
- температурні напори потоків: нагрітого повітря – $\vartheta_h = t_h - t_w$, холодного повітря – $\vartheta_c = t_c - t_w$, поточне значення – $\vartheta = t - t_w$;
- швидкості потоків: нагрітого повітря – v_h , холодного повітря – v_c , поточне значення – v ;
- коефіцієнт розбавлення робочого тіла – $q = G_t / G_h$;
- відносна довжина тунелю – $k_l = l_t / (10 \cdot d_t)$;
- коефіцієнт нерівномірності розподілу температур потоків в початковому перетині тунелю – $k_t = T_h / T_c$ (T_h , T_c – абсолютні температури нагрітого і холодного потоків);
- коефіцієнти співвідношень площ перетинів трубопроводів: ТП і тунелю – $\varepsilon_1 = F_{tp} / F_t$, ТП і діафрагми – $\varepsilon_2 = F_{tp} / F_d$;
- початкова середньомасова температура потоку:

$$\bar{t}_0 = \frac{\int_0^{F_t} \rho v t df}{\int_0^{F_t} \rho v df} = \frac{G_h t_h + (G_t - G_h) t_c}{G_t} = \frac{1}{q} (t_h - t_c) + t_c;$$

- кінцева середнемасова температура потоку – \bar{t}_{end} ;
- початковий та кінцевий середнемасовий температурні напори потоку – $\bar{\vartheta}_0 = \bar{t}_0 - t_w$ та $\bar{\vartheta}_{end} = \bar{t}_{end} - t_w$;
- початкова середнемасова швидкість потоку:

$$\bar{v}_0 = \frac{\int_0^{F_t} \rho v df}{\int_0^{F_t} \rho df} = \frac{G_t}{\rho_h F_{tp} + \rho_c (F_t - F_{tp})}; \quad (2.1)$$

- значення швидкостей потоків нагрітого і холодного повітря в початковому перетині тунелю:

$$v_h = \frac{G_h}{\rho_h F_{tp}};$$

$$v_c = \frac{G_c}{\rho_c (F_d - F_{tp})}.$$

Для опису процесу тепловіддачі в тунелі з врахуванням прийнятих допущень та позначень розроблено систему рівнянь, до якої входять 4 диференційні рівняння.

1. Рівняння енергії:

$$c_p (\rho \vec{v}, \text{grad} \vartheta) = -\text{div} \vec{q}, \quad (2.2)$$

де \vec{v} – вектор швидкості потоку,
 \vec{q} – вектор щільності теплового потоку.

Оскільки перенесення тепла теплопровідністю в радіальному напрямку набагато більше, ніж в осьовому, а радіальні складові вектору швидкості потоку набагато менше осьових, вираження (2.2) приймає вигляд:

$$c_p \rho v_x \frac{\partial \vartheta}{\partial x} = \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (2.3)$$

де v_x – проекція вектора \vec{v} на вісь x ;
 q_y, q_z – проекції вектора \vec{q} на осі y та z .

Оскільки режим течії сумарного потоку в тунелі турбулентний, то для знаходження проєкцій q_y і q_z слід використовувати вираження:

$$q_y = -(\lambda + \varepsilon_q c_p \rho) \frac{\partial \vartheta}{\partial y};$$

$$q_z = -(\lambda + \varepsilon_q c_p \rho) \frac{\partial \vartheta}{\partial z},$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності потоку,

ε_q – кінематичний коефіцієнт турбулентного переносу тепла.

Після підстановки даних виражень до формули (2.3) та проведення необхідних перетворень отримаємо:

$$v_x \frac{\partial \vartheta}{\partial x} = a \left(\frac{\partial}{\partial y} \left(\left(1 + \frac{\varepsilon_q}{a} \right) \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(1 + \frac{\varepsilon_q}{a} \right) \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) \right) \quad (2.4)$$

де $a = \lambda / (c_p \cdot \rho)$ – коефіцієнт температуропровідності потоку, м²/с.

2. Рівняння руху:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -div(\overset{=}{p})$$

де Dv/Dt – субстанціальна похідна швидкості потоку за часом;

$\overset{=}{p}$ – тензор напруги.

Для випадку тепловіддачі, який розглядається, дане рівняння приводиться до вигляду:

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} = v \left(\frac{\partial}{\partial y} \left(\left(1 + \frac{\varepsilon_s}{v} \right) \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(1 + \frac{\varepsilon_s}{v} \right) \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \right) \right) \quad (2.5)$$

де v_x, v_y, v_z – проєкції вектора \vec{v} на відповідні осі координат;

v – кінематична в'язкість потоку;

ε_s – кінематичний коефіцієнт переносу кількості руху.

При виведенні виразу (2.4) враховувалося, що радіальні складові вектора швидкості потоку v_y, v_z набагато менше осьової складової – v_x , а перенесення кількості руху, яке обумовлене в'язкістю потоку, в радіальному напрямку є набагато більшим, ніж в осьовому напрямку.

Кінематичні коефіцієнти, що входять у вирази (2.3) і (2.4), визначаються за формулою:

$$\varepsilon_q = \varepsilon_s = (\chi(r_m - r))^2 \frac{\partial v_x}{\partial r},$$

де χ – безрозмірна величина, яку в першому наближенні приймаємо рівною 0,4 [70],

r – поточний радіус,

r_t – радіус тунелю.

Дане вираження за допомогою формули похідної в заданому напрямку приводиться до наступного вигляду:

$$\varepsilon_q = \varepsilon_s = (\chi(r_m - r))^2 \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \frac{y}{r} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \frac{z}{r} \right) = \frac{(\chi(r_m - r))^2}{\sqrt{y^2 + z^2}} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} y + \frac{\partial v_x}{\partial z} z \right).$$

3. Рівняння суцільності:

$$\operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0. \quad (2.6)$$

4) рівняння тепловіддачі:

$$\alpha_t = -\frac{\lambda}{\vartheta} \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right)_{r=r_t}. \quad (2.7)$$

де α_t – коефіцієнт тепловіддачі від розбавлених ВГ до стінки тунелю.

Вираження (2.4) – (2.7) утворюють систему диференціальних рівнянь, що описують процес тепловіддачі в тунелі. Щоб замкнути дану систему і описати конкретний тунель, до вказаних рівнянь додаються наступні умови однозначності.

Геометричні умови. Тунель – гладка кругла труба з внутрішнім діаметром d_t і довжиною $l_t = (10 \cdot d_t) \cdot k_b$, у початковій ділянці якої концентрично розташовані: вихідний патрубок ТП з внутрішнім діаметром d_{tp} та діафрагма з діаметром отвору d_d (див. рис. 2.1).

Фізичні умови. Робочим тілом є повітря, фізичні властивості якого визначаються за допомогою наступних виражень [62]:

$$\rho = \rho_0 T_0 / T, \text{ кг/м}^3,$$

де $\rho_0 = 1,2096 \text{ кг/м}^3$, $T_0 = 293 \text{ }^\circ\text{C}$ – щільність та абсолютна температура повітря при нормальних умовах;

$$\lambda = 24 \cdot 10^{-3} (T / T_0)^{0,82}, \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)};$$

$$\nu = 13,2 \cdot 10^{-6} (T / T_0)^{1,683}, \text{ м}^2/\text{с};$$

$$c_p = 1,009 \text{ кДж / кг.}$$

Граничні умови.

А) при $x = 0$ (початковий перетин тунелю):

– якщо $r \leq d_{tp} / 2$: $v_x = v_h, v_y = v_z = 0$;

– якщо $d_{tp} / 2 \leq r \leq d_d / 2$: $v_x = v_c, v_y = v_z = 0$;

– якщо $d_d / 2 \leq r \leq d_t / 2$: $v_x = v_y = v_z = 0$; $\vartheta = \vartheta_c$;

Б) при $0 \leq x \leq l_t$ і $r = d_t / 2$ (поверхня стінки тунелю):

$v_x = v_y = v_z = 0$; $\vartheta = 0$.

Приведемо математичний опис процесу тепловіддачі в тунелі до безрозмірного вигляду (рис. 2.2). Для цього виберемо в якості масштабів приведення для лінійних розмірів і координат – діаметр тунелю d_t , для швидкостей – початкову середньомасову швидкість – v_0 , для температурних напорів – початковий середньомасової температурний напір – ϑ_0 .

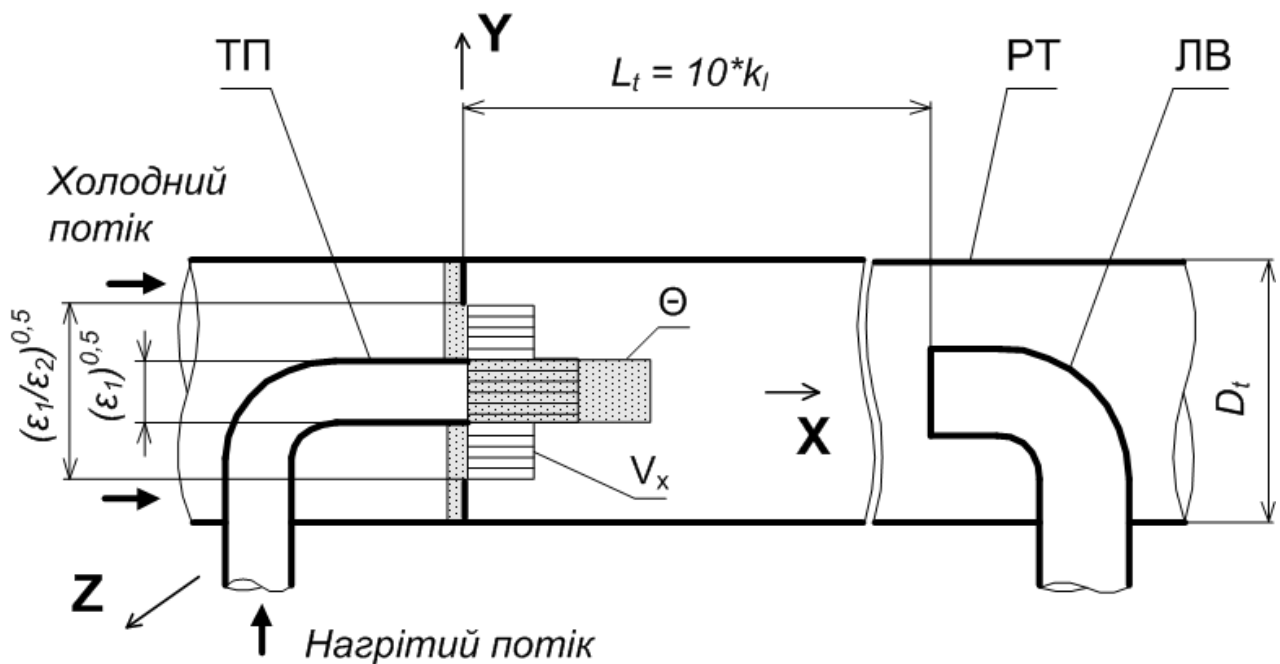


Рис. 2.2. Принципова схема тунелю в безрозмірних координатах

Введемо позначення:

$X = x / d_t, Y = y / d_t, Z = z / d_t$, – безрозмірні координати;

$R = r / d_t = (X^2 + Y^2)^{1/2}$ – приведений безрозмірний радіус тунелю;
 $V_X = v_x / \bar{v}_0$, $V_Y = v_y / \bar{v}_0$, $V_Z = v_z / \bar{v}_0$ – безрозмірні швидкості потоку;

$\Theta = \vartheta / \bar{\vartheta}_0$ – приведений температурний напір.

Підставимо в рівняння (2.3) – (2.6) замість величин x , y , z , v_x , v_y , v_z і ϑ відповідні їм добутки $X \cdot d_t$, $Y \cdot d_t$, $Z \cdot d_t$, $V_X \bar{v}_0$, $V_Y \bar{v}_0$, $V_Z \bar{v}_0$. Після проведення необхідних перетворень отримаємо:

рівняння енергії у безрозмірному вигляді:

$$\text{RePr} V_X \frac{\partial \Theta}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial Y} \left(\left(1 + \frac{\varepsilon_q}{a} \right) \frac{\partial \Theta}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\left(1 + \frac{\varepsilon_q}{a} \right) \frac{\partial \Theta}{\partial Z} \right), \quad (2.8)$$

рівняння руху у безрозмірному вигляді:

$$\begin{aligned} \text{Re} V_X \frac{\partial V_X}{\partial X} &= \frac{\partial}{\partial Y} \left(\left(1 + \frac{\varepsilon_s}{\nu} \right) \left(\frac{\partial V_X}{\partial Y} + \frac{\partial V_Y}{\partial X} \right) \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial Z} \left(\left(1 + \frac{\varepsilon_s}{\nu} \right) \left(\frac{\partial V_Z}{\partial X} + \frac{\partial V_X}{\partial Z} \right) \right) \end{aligned}, \quad (2.9)$$

рівняння суцільності у безрозмірному вигляді:

$$\text{div}(\rho \vec{V}) = 0, \quad (2.10)$$

рівняння тепловіддачі у безрозмірному вигляді:

$$\text{Nu} = - \frac{1}{\Theta} \left(\frac{\partial \Theta}{\partial R} \right)_{R=1/2}, \quad (2.11)$$

де $\text{Re} = \bar{v}_0 d_m / \nu$ – число Рейнольда (ν – кінематична в'язкість, m^2/c);

$\text{Pr} = \nu / a$ – число Прандтля;

$\text{Nu} = \alpha_t d_m / \lambda$ – критерій Нуссельта.

В якості визначальної температури для обчислення ρ , λ і ν обрано початкову середньомасову температуру сумарного потоку в тунелі – \bar{t}_0 .

Вираження для визначення кінематичних коефіцієнтів набуває вигляду:

$$\varepsilon_q = \varepsilon_s = \frac{\text{Re}(\chi(0,5 - R))^2}{\nu \sqrt{Y^2 + Z^2}} \left(\frac{\partial V_X}{\partial Y} Y + \frac{\partial V_X}{\partial Z} Z \right).$$

Умови однозначності в безрозмірному вигляді:

геометричні умови: тунель – гладка кругла труба з безрозмірними діаметром $D_t = 1$ і довжиною $L_t = 10 \cdot k_l$, в середині якої концентрично розташовані: патрубок ТП (внутрішній діаметр $D_{tp} = (\varepsilon_1)^{1/2}$) та діафрагма (діаметр отвору $D_d = (\varepsilon_1 / \varepsilon_2)^{1/2}$);

граничні умови:

А) при $X = 0$ (початковий перетин тунелю):

– якщо $R \leq (\varepsilon_1)^{1/2}/2$: $V_X = (\varepsilon_1 + k_t \cdot (1 - \varepsilon_1)) / (\varepsilon_1 \cdot q)$, $V_Y = V_Z = 0$;

$\Theta = \mathfrak{G}_h / \bar{\mathfrak{G}}_0$;

– якщо $(\varepsilon_1)^{1/2}/2 \leq R \leq (\varepsilon_1/\varepsilon_2)^{1/2}/2$: $V_X = (q - 1) (\varepsilon_1 + k_t \cdot (1 - \varepsilon_1)) / (q \cdot k_t \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1))$,

$V_Y = V_Z = 0$; $\Theta = \mathfrak{G}_c / \bar{\mathfrak{G}}_0$;

– якщо $(\varepsilon_1/\varepsilon_2)^{1/2}/2 \leq R \leq 1/2$: $V_X = V_Y = V_Z = 0$; $\Theta = \mathfrak{G}_c / \bar{\mathfrak{G}}_0$.

Б) при $0 \leq X \leq 10 \cdot k_l$ і $R = 1/2$ (поверхня стінки тунелю): $V_X = V_Y = V_Z = 0$;

$\Theta = 0$.

Система диференціальних рівнянь (2.8) – (2.11) та умови однозначності в безрозмірному вигляді є загальними для всіх тунелів. Вони описують процес тепловіддачі в тунелі, умови розбавлення робочого тіла в якому характеризуються безрозмірними величинами Re , q , k_t і k_l (число Прандтля для даного випадку є постійною величиною). Таким чином, число Nu , що характеризує тепловіддачу в тунелі, може розглядатися як функція 4-х змінних:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, q, k_t, k_l).$$

2.2 Математична модель процесу утворення температурних умов відбору проб ТЧ

Математична модель призначена для визначення основної характеристики температурного режиму відбору ТЧ в тунелі – температури проби перед фільтром – t_f .

В моделі використовуються наступні вихідні данні.

Геометричні характеристики системи розбавлення ВГ:

d_t – діаметр тунелю (або d_{t1} і d_{t2} – діаметри первинного та вторинного тунелів при 2-кратному розбавленні ВГ), м;

l_t – довжина тунелю (або l_{t1} і l_{t2} – довжини первинного та вторинного тунелів), м;

d_{tp} – діаметр трубопроводу транспортування проби від первинного до вторинного тунелю при 2-кратному розбавленні ВГ (ТП), м;

d_{sam} – діаметр трубопроводу лінії відбору проб ТЧ (ЛВ), м;

l_{sam} – довжина трубопроводу ЛВ від пробовідбірника до патрону з фільтром, м.

Газодинамічні характеристики характеристики системи розбавлення ВГ:

G_t – масова витрата потоку в тунелі (або G_{t1} і G_{t2} – масові витрати потоків у первинному та вторинному тунелях), кг/с;

G_{exh} – масова витрата повного потоку ВГ, що потрапляють у еталонний тунель (або G_{exh}^t – масова витрата частки ВГ, що потрапляють у частковопоточний тунель), кг/с;

G_{sam} – масова витрата потоку у ЛВ, кг/с;

t_{exh} – температура ВГ на вході в тунель, °С;

t_{dil} – температура розбавляючого повітря, °С.

Залежності від температури фізичних властивостей робочого тіла, в якості якого розглядається повітря [62]:

а) щільності, кг/м³:

$$\rho = \frac{\rho_0 \cdot T_0}{T} = \frac{353,2}{T},$$

де $\rho_0 = 1,293$ кг/м³, $T_0 = 273,15$ К – щільність та абсолютна температура робочого тіла при н.у.;

T – фактична температура робочого тіла, К;

б) теплопровідності, Вт/(м·К):

$$\lambda = 24,1 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0,82},$$

в) кінематичної в'язкості, м²/с:

$$\nu = 1,33 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,683},$$

г) температурного коефіцієнту об'ємного розширення:

$$\beta = \frac{1}{T}.$$

В основі математичної моделі лежить рівняння теплового балансу процесу теплообміну нагрітого газу в циліндричному трубопроводі з навколишнім повітрям (рис. 2.3) [62]:

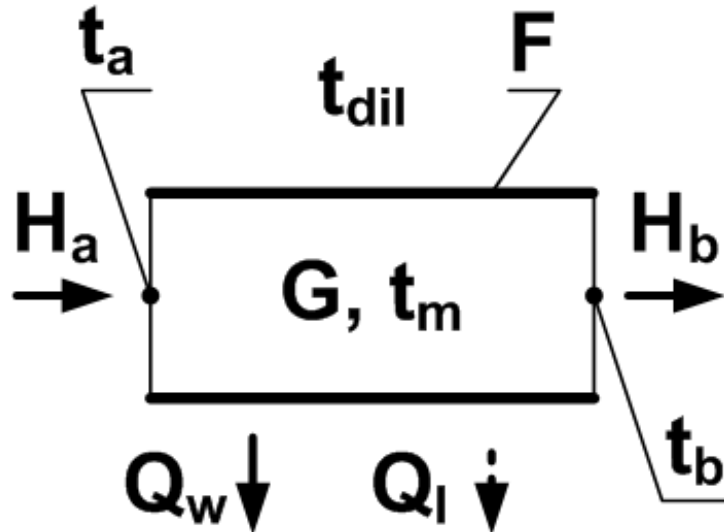


Рис. 2.3. Розрахункова схема процесу обміна теплом між нагрітими газами в трубопроводі та навколишнім середовищем

$$H_a = H_b + Q_w + Q_l \quad (2.12)$$

де H_a , H_b – ентальпії газового потоку на вході та виході трубопроводу;

Q_w – тепловий потік, що передається через стінку трубопроводу внаслідок теплопередачі;

$Q_l = r \cdot H_a$ – теплові втрати на елементах конструкції лінії відбору проб в місцях установки фланцевих з'єднань та шарових кранів (коефіцієнт пропорційності r визначається експериментально за формулою $r = 1 - (H_b - Q_w)/H_a$);

$$H_a = c_p \cdot G \cdot (T_a - T_{dil}); \quad H_b = c_p \cdot G \cdot (T_b - T_{dil}),$$

де $c_p = 1005$ Дж/(кг·К) – середня ізобарна теплоємність у робочому діапазоні варіювання температур робочого тіла у тунелі;

G – масова витрата потоку в трубопроводі протікання робочого тіла, кг/с;

T_a , T_b та T_{dil} – відповідно: абсолютні початкова і кінцева середньомасові температури потоку та температура повітря навколо трубопроводу, К;

$$Q_w = (T_m - T_{dil}) \cdot F \cdot k,$$

де T_m – середня абсолютна температура газового потоку в тунелі (визначається, як середньоарифметичне з T_a і T_b), К;

F – площа поверхні трубопроводу, через яку передається теплота, м²;

k – коефіцієнт теплопередачі:

$$k = \frac{1}{(\alpha_t)^{-1} + (\alpha_{wc} + \alpha_{wr})^{-1}} = \frac{\alpha_t \cdot (\alpha_{wc} + \alpha_{wr})}{\alpha_t + \alpha_{wc} + \alpha_{wr}}, \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}, \quad (2.13)$$

де α_t – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої стінки трубопроводу, Вт/(м²·К);

α_{wc} , α_{wr} – коефіцієнти тепловіддачі зовнішньої стінки трубопроводу при конвективному та променистому теплообміні (визначаються за відомими формулами, які наведені нижче), Вт/(м²·К).

Для розбавляючих тунелів коефіцієнт α_t визначається за критеріальним рівнянням тепловіддачі у безрозмірному вигляді, яке являє собою функцію 4-х змінних:

$$Nu = f(\text{Re}, q, k_t, k_l), \quad (2.14)$$

де $Nu = \alpha_t d_t / \lambda$ – критерій Нуссельта;

$\text{Re} = \bar{v}_0 d_t / \nu$ – число Рейнольда (\bar{v}_0 – початкова середньомасова швидкість потоку, яка визначається за формулою (2.1), м/с);

q – коефіцієнт розбавлення ВГ;

$k_t = T_h / T_c$ – температурний коефіцієнт (T_h , T_c – абсолютні температури нагрітого та холодного потоків, К);

$k_l = l_t / (10 \cdot d_t)$ – відносна довжина тунелю.

Рівняння тепловіддачі (2.14) отримане експериментально і наведено у 4-ій главі (див формулу (4.1)). В результаті його перетворення отримано залежність для розрахунку коефіцієнта α_t для будь-якого тунелю:

$$\alpha_t = 0,037 \cdot \frac{\lambda}{d_t^{0,22}} \cdot \left(\frac{v_0}{v}\right)^{0,78} \cdot \left(\frac{q}{q_0}\right)^{-0,28} \cdot \left(\frac{k_t}{k_{t0}}\right)^{0,48} \cdot \frac{f(k_l)}{f(k_{l0})},$$

де $q_0 = 5$, $k_{t0} = 1,27$, $k_{l0} = 1,0$, $f(k_l)$ – функція (див. рис. 4.2):

$$f(k_l) = -33,0 + 341 \cdot k_l - 421 \cdot k_l^2 + 163 \cdot k_l^3.$$

Для лінійних ділянок трубопроводів ТП і ЛВ коефіцієнт α_t визначається за відомим рівнянням тепловіддачі внутрішньої стінки гладких циліндричних труб при турбулентному режимі протікання газового потоку [65]:

$$Nu = 0,018 \cdot \varepsilon_l \cdot Re^{0,8}, \quad (2.15)$$

де ε_l – коефіцієнт, що враховує вплив довжини трубопроводу на величину Nu: при $l_t/d_t \geq 50$ – $\varepsilon_l = 1$, при $l_t/d_t < 50$ – ε_l визначається за експериментальними даними [65] (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Значення коефіцієнту ε_l при $l_t/d_t < 50$

Re·10 ⁻³	l_t/d_t								
	1	2	5	10	15	20	30	40	50
2	1,90	1,70	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1
20	1,51	1,40	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1
100	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02	1

Наслідком вираження (2.15) є наступна формула:

$$\alpha_t = 0,018 \cdot \varepsilon_l \cdot \frac{\lambda}{d^{0,2}} \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right)^{0,8}, \quad (2.16)$$

де d – діаметр трубопроводу (ТП або ЛВ), м;

v – швидкість газового потоку в трубопроводі, м/с.

Для трубопроводів, які складаються з прямолінійних та вигнутих ділянок (рис. 2.4), коефіцієнт α_t розраховується за формулою:

$$\alpha_t = \frac{\sum_{i=1}^n l_i \cdot \alpha_{ti}}{\sum_{i=1}^n l_i},$$

де n – загальна кількість ділянок,

l_i – довжина i -ї ділянки,

α_{ti} – коефіцієнт тепловіддачі на i -й ділянці, який визначається: для прямолінійних ділянок – за формулою (2.16), для вигнутих ділянок – як множення значення, розрахованого за формулою (2.16), на поправочний коефіцієнт:

$$\varepsilon_R = 1 + \frac{d}{R},$$

де R – радіус вигину трубопроводу.

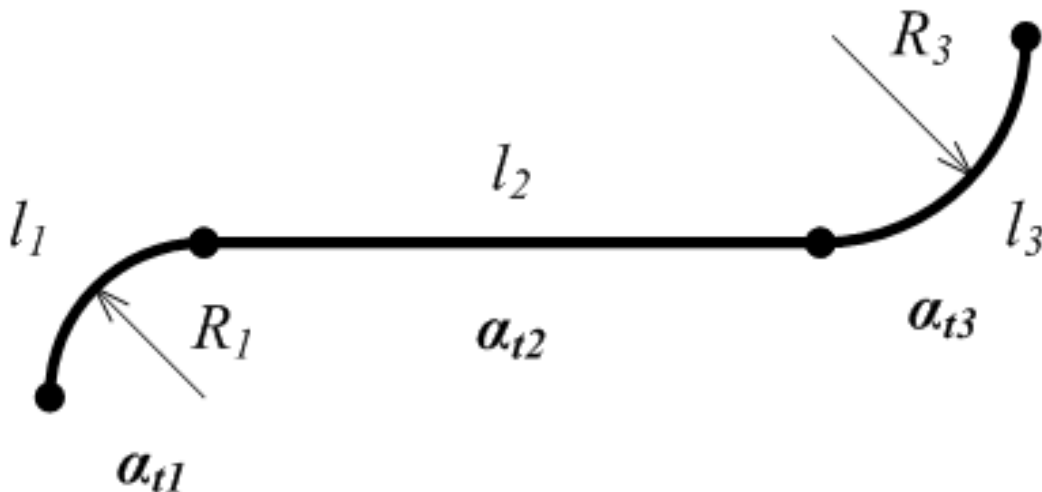


Рис. 2.4. Схема трубопроводу з прямолінійними та вигнутими ділянками

Коефіцієнт α_{wc} , що входить до виразу (2.13), визначається для кожного трубопроводу системи розбавлення ВГ з урахуванням його просторового розташування.

Якщо трубопровід з діаметром d розташований горизонтально, то величина α_{wc} розраховується за допомогою критеріального рівняння конвективної тепловіддачі горизонтальних труб [66]:

$$Nu = 0,46 \cdot Gr^{0,25}, \quad (2.17)$$

де Gr – критерій Грасгофа:

$$Gr = \frac{\beta \cdot d^3 \cdot g}{\nu^2} \cdot (t_m - t_{dil}), \quad (2.18)$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння;

t_m – середня температура газового потоку в трубопроводі, °С;

Наслідком вираження (2.17) є формула:

$$\alpha_{wc} = 0,46 \cdot \lambda \cdot (d)^{-0,25} \cdot \left(\frac{\beta \cdot g \cdot (t_m - t_{dil})}{\nu^2} \right)^{0,25}. \quad (2.19)$$

Визначальною температурою при розрахунках величин λ , ν та β , що входять до залежностей (2.18) та (2.19) є температура t_{dil} .

Якщо трубопровід довжиною l розташований вертикально, то коефіцієнт α_{wc} визначається за допомогою критеріального рівняння конвективної тепловіддачі вертикальних труб [66]:

$$Nu_l = 0,695 \cdot Gr_l^{0,25}, \quad (2.20)$$

де Nu_l та Gr_l – критерії Нуссельта та Грасгофа, для яких визначальним розміром є довжина трубопроводу l , а визначальною температурою – t_{dil} .

$$Nu_l = \frac{\alpha_{wc} \cdot l}{\lambda},$$

$$Gr = \frac{\beta \cdot l^3 \cdot g}{\nu^2} \cdot (t_m - t_{dil}).$$

Наслідком вираження (2.20) є формула:

$$\alpha_{wc} = 0,695 \cdot \lambda \cdot (l)^{-0,25} \cdot \left(\frac{\beta \cdot g \cdot (t_m - t_{dil})}{\nu^2} \right)^{0,25}.$$

Коефіцієнт α_{wr} , що входить до вираження (2.13), визначається за допомогою рівняння тепловіддачі при променистому теплообміні [66]:

$$\alpha_{wr} = \varepsilon_t \cdot C_0 \cdot \theta,$$

де ε_t – ступінь чорноти стінки трубопроводу (для нержавіючої сталі $\varepsilon_t = 0,45$ [65]);

$C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постійна Стефана-Больцмана [67];

$\theta = (T_{dil})^3 + (T_{dil})^2 \cdot T_t + T_{dil} \cdot (T_t)^2 + (T_t)^3$ – температурний коефіцієнт (T_{dil} , T_t – абсолютні температури повітря та стінки трубопроводу, К).

В результаті перетворення рівняння теплового балансу (2.12) отримано основну розрахункову формулу, для визначення температури газового потоку в кінці трубопроводу протікання розбавлених ВГ – t_b :

$$t_b = (1 - r) \cdot (t_a - t_{dil}) - \frac{(t_m - t_{dil}) \cdot F \cdot k}{c_p \cdot G} + t_{dil}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.21)$$

де t_a – початкова середньомасова температура потоку, $^\circ\text{C}$.

Оскільки величина t_m на початку обчислень невідома, то визначення температури t_b здійснюється методом послідовних наближень. При цьому визначається приблизне значення величини t_b за умови $t_m = t_a$, яке уточнюється в результаті використання формули (2.21) до тих пір, поки різниця між уточненим та попереднім значеннями t_b не буде меншою за $\pm 0,05$ $^\circ\text{C}$ (для цього достатньо 3-4 уточнюючих обчислень).

Послідовне обчислення кінцевих температур газових потоків у всіх трубопроводах системи розбавлення ВГ за встановленим алгоритмом (рис. 2.5) дозволяє визначити температуру проби перед фільтром – t_f .

На рис. 2.5 нижні індекси у величин G , t_a , t_b і F , заключені у дужки, позначають трубопровід, через який протікає потік розбавлених ВГ: $t1$ – первинний тунель, tp – ТП, $t2$ – вторинний тунель, sam – ЛВ.

Перевірка адекватності математичної моделі проводилась за критерієм Фішера F (рис. 2.6) в ході випробувань дизелів 1Ч12/14 та 4ЧН12/14 за циклом ESC (табл. 2.2, 2.3) з використанням тунелів МТ-1 та МКТ-2, описаних у 3-ій главі.

На рис. 2.6 позначені: Δt_f – абсолютні відхилення розрахункових даних від експериментальних; СКВ – середньоквадратичні відхилення; \bar{n}_i , \bar{L}_i – відносні значення числа обертів вала двигуна та навантаження, які визначаються за формулами (2.29, 2.30).

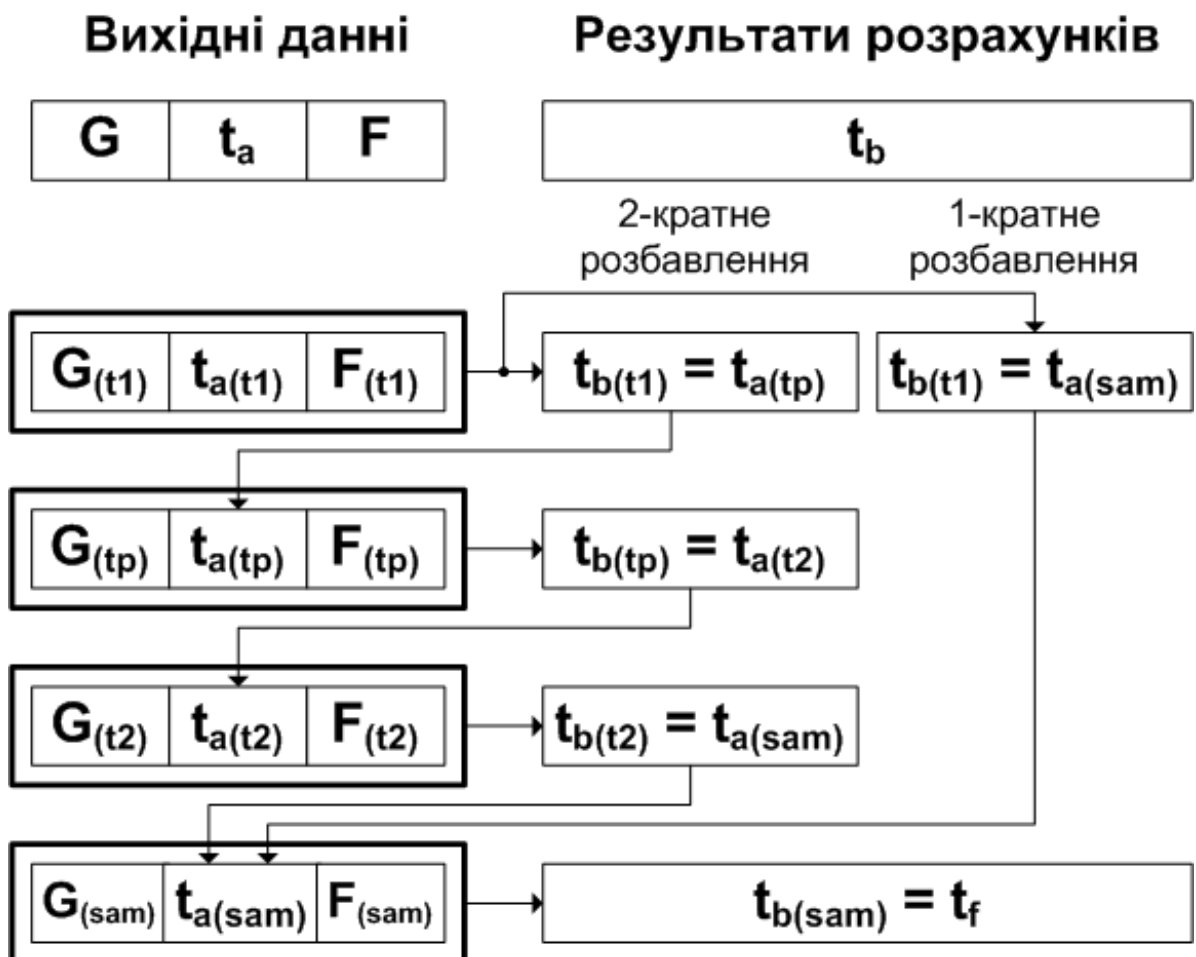
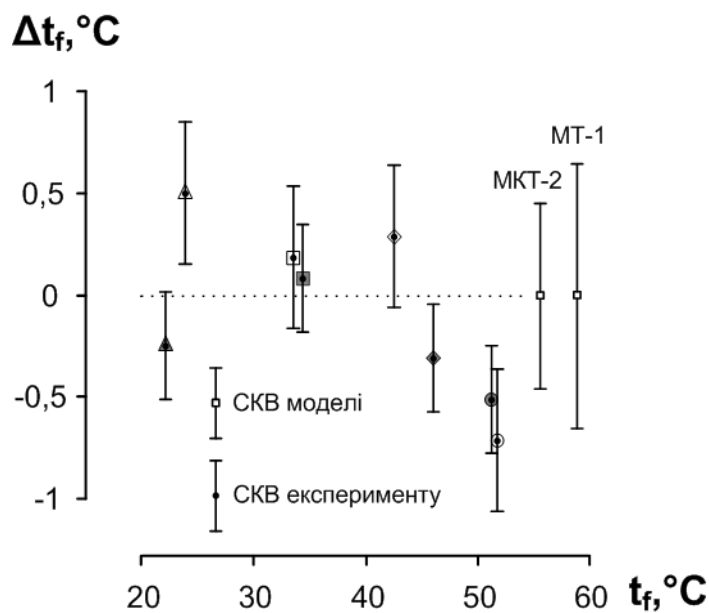


Рис. 2.5. Алгоритм визначення температури t_f



Характеристика контрольних точок

Режим циклу ESC	\bar{n}^*	\bar{L}	Тунель	
			МТ-1	МКТ-2
1	хол. хід	---	△	▲
3	$\frac{0,3}{0,47}$	0,5	◇	◆
7	$\frac{0,55}{0,66}$	0,25	□	■
10	$\frac{0,8}{0,85}$	1,0	○	●

* чисельник - 1Ч12/14; знаменник - 4ЧН12/14

Рис. 2.6. Результати перевірки адекватності математичної моделі для визначення температури проби розбавлених ВГ перед фільтром – t_f

Таблиця 2.2

Результати досліджень величини t_f в ході випробувань дизеля 1Ч12/14 з МТ-1

Серія дослідів (режим циклу ESC)	Номер досліду в серії	t_f , °C	\bar{t}_f °C	t_{af} , °C	$t_{af} - t_f$, °C	$t_f - \bar{t}_f$, °C
1 (1)	1	23,8	23,95	24,38	0,43	-0,15
	2	24,1				0,15
2 (3)	1	42,9	42,55	42,72	0,17	0,35
	2	42,2				-0,35
3 (7)	1	34,0	33,65	33,91	0,26	0,35
	2	33,3				-0,35
4 (10)	1	51,3	51,7	51,09	-0,61	-0,4
	2	52,1				0,4

Таблиця 2.3

Результати досліджень величини t_f в ході випробувань
дизеля 4ЧН12/14 з МКТ-2

Серія дослідів (режим циклу ESC)	Номер досліду в серії	t_f , °C	\bar{t}_f °C	t_{af} , °C	$t_{af} - t_f$, °C	$t_f - \bar{t}_f$, °C
1 (1)	1	22,2	22,1	21,88	-0,22	0,1
	2	22,0				-0,1
2 (3)	1	47,1	46,85	46,94	0,09	0,25
	2	46,6				-0,25
3 (7)	1	34,3	34,55	34,29	-0,26	-0,25
	2	34,8				0,25
4 (10)	1	50,0	50,4	49,97	-0,43	-0,4
	2	50,8				0,4

Критерій F визначався за формулою:

$$F = \frac{s_a^2}{s_y^2}, \quad (2.22)$$

де s_a^2 – дисперсія адекватності моделі;
 s_y^2 – дисперсія відтворюваності експерименту.

Для визначення величини s_a^2 використано формулу, яка застосовується при рівномірному дублюванні дослідів:

$$s_a^2 = \frac{S_a}{f_a} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^N (t_{afi} - \bar{t}_{fi})^2}{N - p},$$

де S_a – сума квадратів відхилень розрахункових та експериментальних даних;

$f_a = N - p$ – кількість ступенів свободи дисперсії адекватності моделі;

$n = 2$ – кількість дубльованих дослідів у кожній серії;

$N = 4$ – кількість серій дубльованих дослідів згідно експериментального плану (серії дослідів проводились на 1, 3, 7 та 10 режимах циклу ESC);

$i = 1 \dots N$ – номер серії дослідів;

t_{afi} – розрахункове значення температури t_f для i -ої серії;

\bar{t}_{fi} – середнє значення температури t_f для i -ої серії;

$p = 1$ – кількість коефіцієнтів математичної моделі, які визначаються за даними експерименту.

Дисперсія відтворюваності експерименту визначалась за результатами 4-х дубльованих дослідів, як середньоарифметичне з дисперсій цих дослідів:

$$s_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^m s_i^2}{m},$$

де $m = 4$ – кількість серій дубльованих дослідів;

s_i^2 – дисперсія відтворюваності експерименту i -ї серії дослідів:

$$s_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - \bar{t}_i)^2}{n - 1},$$

де $n = 2$ – кількість дубльованих дослідів;

t_{ij} – j -те значення температури t_f i -ї серії дослідів.

Число ступенів свободи дисперсії s_y^2 для даного способу її визначення складає $f_y = m \cdot (n - 1) = 4$.

Розрахунки величин s_a^2 , s_y^2 і F за наведеними формулами показали наступне.

При дослідженні температури t_f у мінітунелі МТ-1:

$$s_a^2 = \frac{2 \cdot (0,43^2 + 0,17^2 + 0,26^2 + 0,61^2)}{4 - 1} = 0,4350,$$

$$s_y^2 = \frac{(0,15^2 + 2 \cdot 0,35^2 + 0,4^2)}{4} = 0,1169,$$

$$F_{MT-1} = \frac{0,4350}{0,1169} = 3,72.$$

При дослідженні температури t_f у мікротунелі МКТ-2:

$$s_a^2 = \frac{2 \cdot (0,22^2 + 0,09^2 + 0,26^2 + 0,43^2)}{4 - 1} = 0,2063,$$

$$s_y^2 = \frac{(0,1^2 + 2 \cdot 0,25^2 + 0,4^2)}{4} = 0,0738,$$

$$F_{MKT-2} = \frac{0,2063}{0,0738} = 2,85.$$

Отримані значення F_{MT-1} та F_{MKT-2} не перевищують критичного рівня – $F_{0,95} = 5,91$, який відповідає довірчій вірогідності 0,95 та числам ступенів свободи $f_a = 3$, $f_y = 4$ і визначається за справочними даними [69]. Це підтверджує адекватність розробленої математичної моделі.

2.3 Математична модель утворення результуючої похибки вимірювань середньозваженого викиду ТЧ з ВГ дизеля – δPT

Математична модель дозволяє визначати величину δPT з врахуванням її інструментальної – δPT_{in} та методичних – δPT_{tf} , δPT_{st} складових:

$$\delta PT = \delta PT_{in} + \delta PT_{tf} + \delta PT_{st} \quad (2.23)$$

Величина δPT_{in} визначається за допомогою залежності для обчислення похибки результату непрямих вимірювань:

$$\delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y} \cdot \delta x_i \right)^2}, \quad (2.24)$$

де y – величина, яка вимірюється непрямим шляхом по відомій залежності – $y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$;

x_i – величини, за допомогою яких визначається y , m – їх кількість.

Похибка δPT_{tf} чисельно дорівнює величині δm_f^{tf} – відносному відхиленню маси навішування ТЧ – m_f^{tf} , визначеної при фактичних значеннях температур t_{fi} , від маси навішування ТЧ – m_f^{tf0} , визначеної при значеннях температур t_{f0i} , прийнятих за базові і відповідних CVS-розбавленню ВГ при $t_{dil} = 20$ °C, $t_{f(max)} = 52$ °C:

$$\begin{aligned} \delta PT_{tf} &= \delta m_f^{tf} = \frac{m_f^{tf} - m_f^{tf0}}{m_f^{tf0}} \cdot 100\% = \\ &= \sum_{i=1}^{13} \frac{m_{fi}^{tf} - m_{fi}^{tf0}}{m_{fi}^{tf0}} \cdot r_{mfi} = \sum_{i=1}^{13} \delta m_{fi}^{tf} \cdot r_{mfi} \end{aligned}, \quad (2.25)$$

де δm_{fi}^{tf} – відносні відхилення маси ТЧ на i -му режимі – m_{fi}^{tf} від базових значень – m_{fi}^{tf0} ;

$r_{mfi} = (m_{fi}^{tf0}/m_f^{tf0}) \cdot 100\%$ – відносні долі m_{fi}^{tf} у загальній масі m_f^{tf0} .

Похибка δPT_{st} чисельно дорівнює величині δm_f^{st} – відносному відхиленню маси навішування ТЧ – m_f^{st} , визначеної при фактичних значеннях величин t_{st} і τ_{st} , від маси навішування ТЧ – m_f^{st0} , визначеної при значеннях $t_{st0} = 20$ °C і $\tau_{st0} = 6$ год, прийнятих за базові:

$$\delta PT_{st} = \delta m_f^{st} = \frac{m_f^{st} - m_f^{st0}}{m_f^{st0}} \cdot 100\%. \quad (2.26)$$

Для визначення величин δm_{fi}^{tf} та δm_f^{st} використовуються експериментальні залежності (наведені у 4-ій главі), вигляд яких обрано з врахуванням результатів попередніх досліджень (див. рис. 1.20):

$$\delta m_{fi}^{tf} = k_{t_{fi}}(\bar{n}_i, \bar{L}_i) \cdot (t_{fi} - t_{f0i}), \quad (2.27)$$

де $k_{t_{fi}}(\bar{n}_i, \bar{L}_i)$ – коефіцієнт пропорційності, який є функцією відносних числа обертів – \bar{n}_i та навантаження – \bar{L}_i ;

$$\delta m_f^{st} = k_{\tau_{st}}(t_{st}) \cdot \lg\left(\frac{\tau_{st}}{\tau_{st0}}\right), \quad (2.28)$$

де $k_{\tau_{st}}(t_{st})$ – коефіцієнт пропорційності, який залежить від температури t_{st} .

Величини \bar{n}_i та \bar{L}_i характеризують режим роботи двигуна і визначаються наступним:

$$\bar{n}_i = \frac{n_i - n_{idle}}{n_{nom} - n_{idle}}, \quad (2.29)$$

де n_{idle} і n_{nom} – число обертів вала двигуна на холостому ході і режимі номінальної потужності;

$$\bar{L}_i = \frac{M_{ki}}{M_{k(max)i}}, \quad (2.30)$$

$M_{k(max)i}$ – максимальний крутний момент на валу двигуна при n_i .

2.4 Обґрунтування ефективності використання компенсаційного способу вимірювань масової витрати ВГ

Одним з найбільш вартісних вузлів сучасних частковопоточних систем є вимірювач масової витрати ВГ, які надходять до тунелю – параметра G_{exh}^t . Особливість даного вузла полягає в тому, що величина G_{exh}^t визначається непрямим шляхом (пряме вимірювання не може бути виконано з причин високої температури, забрудненості та хімічної агресивності потоку ВГ). Пропонується використання компенсаційного способу вимірювання величини G_{exh}^t , вартість якого суттєво нижче, ніж у відомих аналогів.

Огляд відомих способів визначення масової витрати ВГ, які відбираються до частковопоточних систем. Нижче наведено огляд розповсюджених принципів схем частковопоточних тунелів, в яких реалізовані різні способи визначення величини G_{exh}^t .

Мінітунель з ізокінетичним пробовідбірником (керований нагнітаючим компресором *PВ*) (рис. 2.7).

Первинні ВГ направляються з вихлопної труби *EP* до змішувальної каналу *DT* по відводному патрубку *TT* через ізокінетичний пробовідбірник *ISP*. Різниця тисків ВГ у вихлопній трубі і на вході в пробовідбірник вимірюється за допомогою датчика тиску *DPT*. Сигнал від датчика передається на регулятор витрати *FC1*, який управляє роботою нагнітаючого насоса *PВ*, потрібного для забезпечення потрібного перепаду тиску на наконечнику пробовідбірника. Це досягається відбором невеликої частини потоку повітря, витрату якого вже було визначено витратоміром *FM1*, і спрямуванням його у *TT* через сопло.

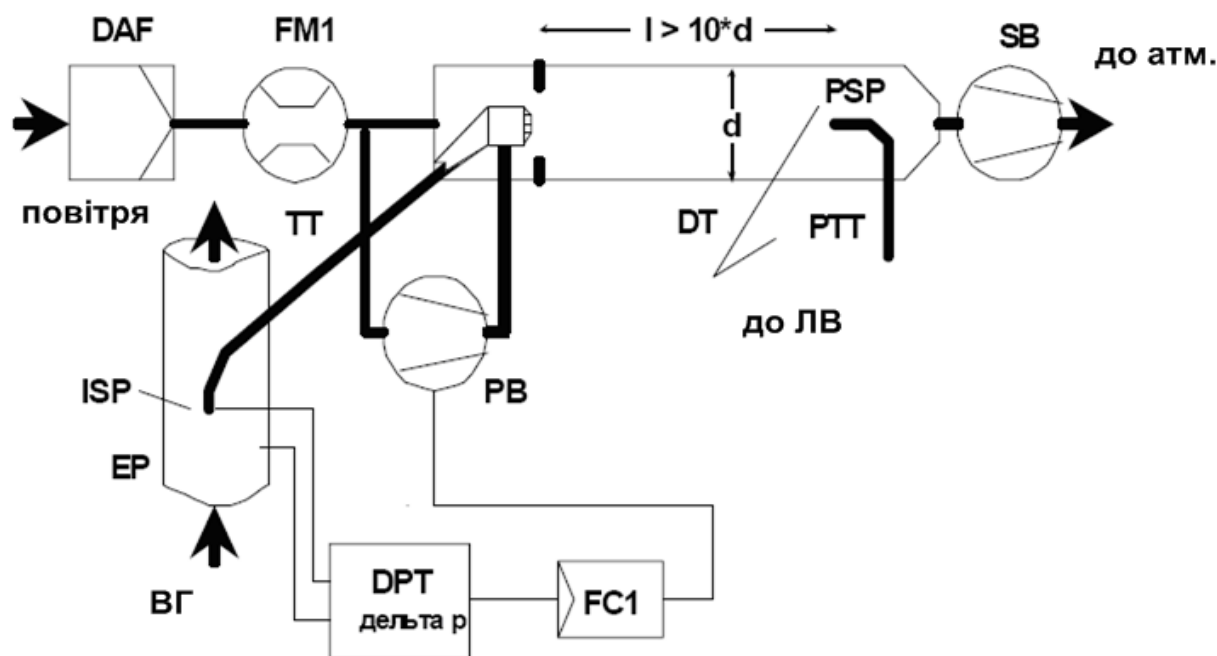


Рис. 2.7. Принципова схема мінітунелю з ізокінетичним пробовідбірником (керованого нагнітаючим компресором *PВ*)

При дотриманні цих умов швидкості потоків ВГ у *EP* і *ISP* однакові, а потік, що проходить через *ISP* і *TT*, являє собою постійну частину від повного потоку ВГ. Коефіцієнт відбору ВГ визначається по відношенню поперечних перерізів *EP* і *ISP*. Повітря подається у *DT* за допомогою витяжного насоса *SB*, а масова витрата потоку повітря визначається витратоміром *FM1* на вході у *DT*. Коефіцієнт розбавлення розраховують на основі масової витрати повітря та коефіцієнта відбору ВГ.

Мікротунель з вимірюванням концентрації CO_2 та використанням рівняння вуглецевого балансу (рис. 2.8).

Первинні ВГ направляються з вихлопної труби EP в змішувальний канал DT через пробовідбірник SP і відповідний патрубок TT . Концентрації CO_2 вимірюються у розбавлених ВГ і у повітрі за допомогою аналізатора (аналізаторів) ВГ EGA . Сигнали, що інформують про концентрацію CO_2 і витрату палива $GFUEL$, передаються на регулятор витрати $FC2$ або на регулятор витрати $FC3$ системи відбору проб ТЧ. Регулятор $FC2$ управляє роботою нагнітаючого насоса PB , а регулятор $FC3$ – роботою насоса P для подачі проби в систему, тим самим регулюючи витрати потоків на вході в систему і вихід з неї з метою забезпечення належного розділення потоків ВГ і відповідного значення коефіцієнту розбавлення ВГ у DT . Коефіцієнт розбавлення розраховується на основі концентрації CO_2 і витрати палива $GFUEL$ в припущенні про наявність вуглецевого балансу.

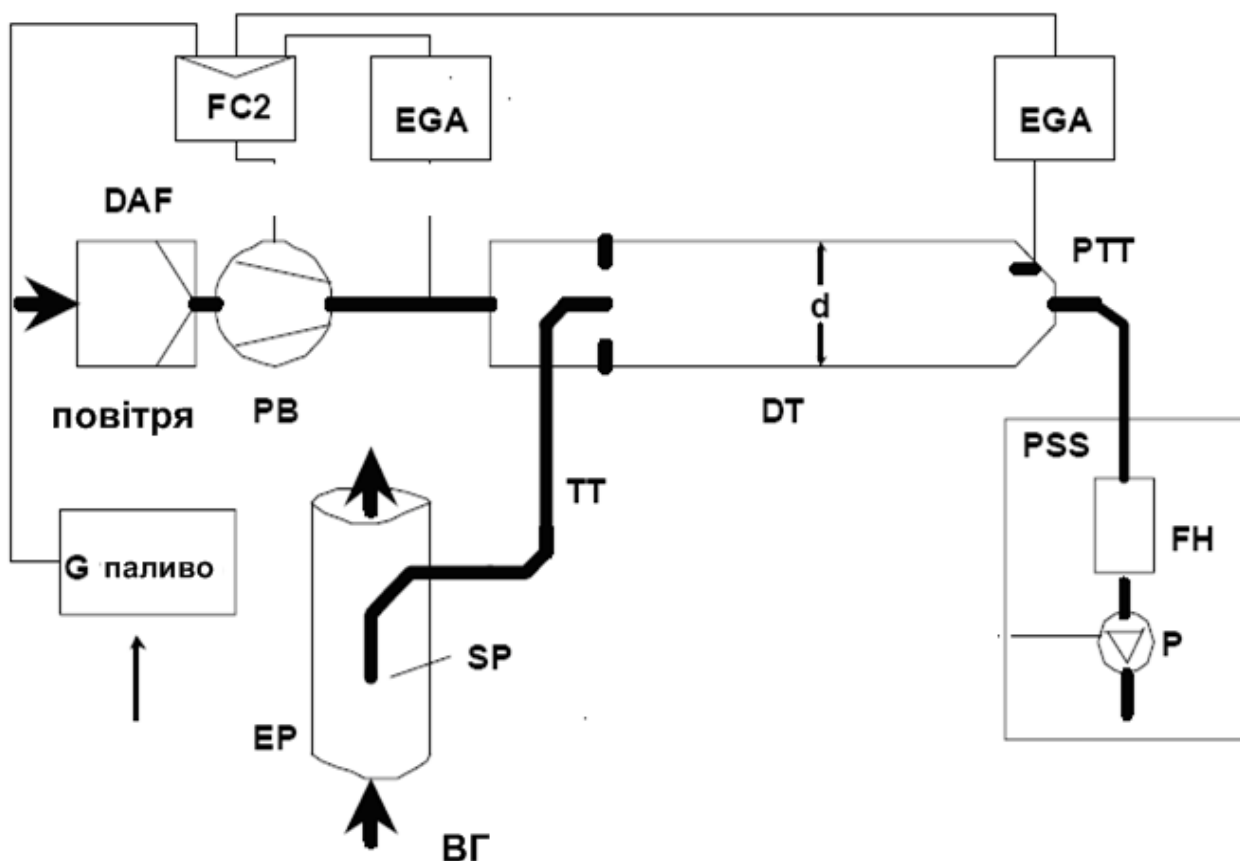


Рис. 2.8. Принципова схема мікротунелю з вимірюванням концентрації CO_2 та використанням рівняння вуглецевого балансу

Мінітунель з одинарною трубкою Вентурі та вимірюванням концентрацій CO_2 або NO_x (рис. 2.9).

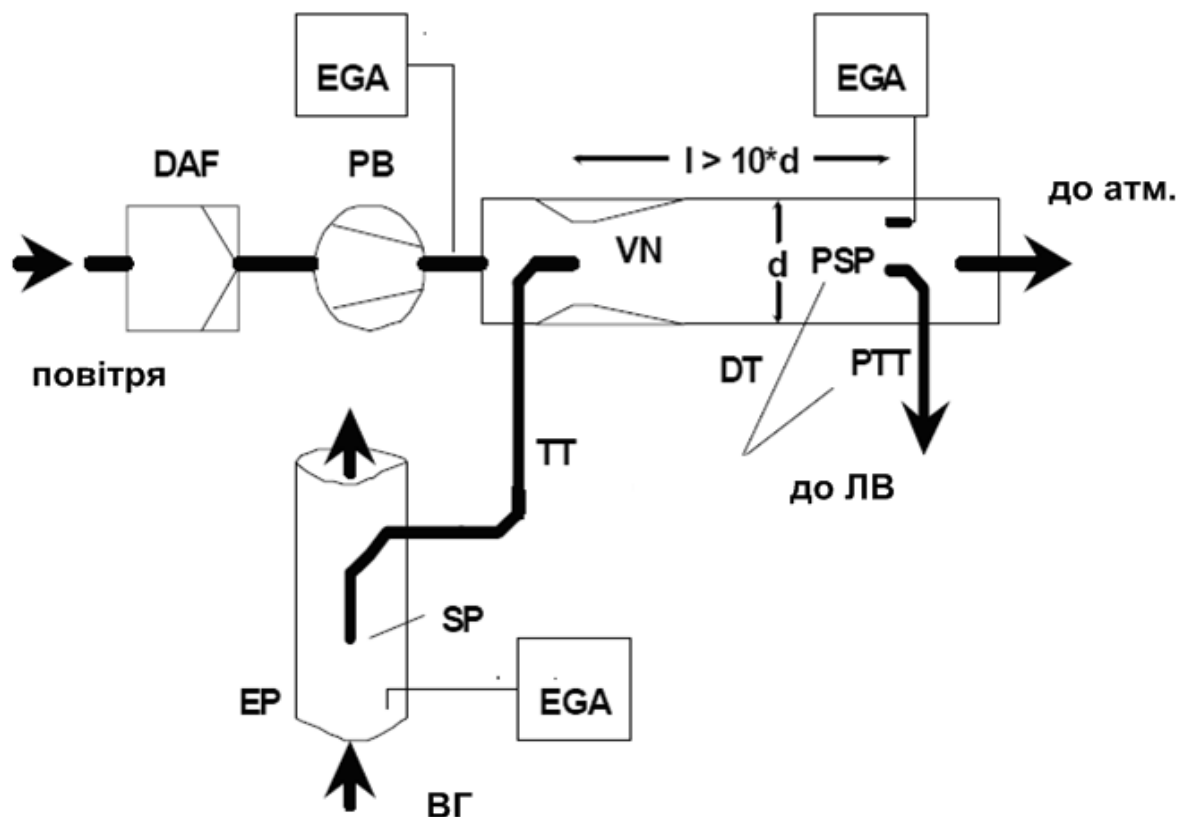


Рис. 2.9. Принципова схема мінітунелю з одинарною трубкою Вентурі та вимірюванням концентрацій CO_2 або NO_x

Первинні ВГ направляються з вихлопної труби EP в змішувальний канал DT через пробовідбірник SP і відповідний патрубок TT під впливом негативного тиску, створюваного трубкою Вентурі VN у DT . Витрата газу через TT залежить від обміну енергією в зоні розташування трубки Вентурі і тому на нього впливає абсолютна температура газу на виході з TT . Отже, коефіцієнт відбору потоку ВГ для даної витрати в каналі не є постійною величиною, і коефіцієнт розбавлення при малому навантаженні трохи нижче, ніж при високому навантаженні. Концентрації індикаторних газів (CO_2 або NO_x) вимірюють у первинних ВГ, розбавлених ВГ і у повітрі за допомогою аналізатора (аналізаторів) ВГ EGA , а коефіцієнт розбавлення розраховується на основі отриманих таким чином значень.

Мінітунель з двома трубками Вентурі або двома соплами та вимірюванням концентрацій CO_2 або NO_x (рис. 2.10).

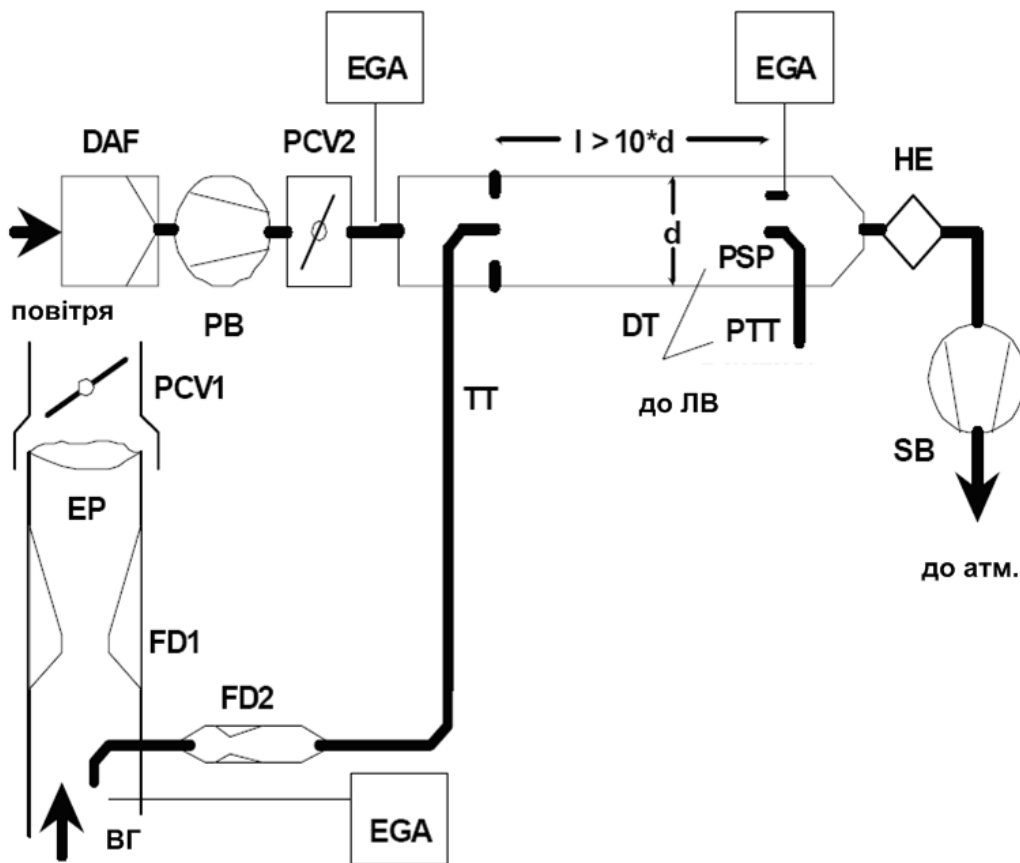


Рис. 2.10. Принципова схема мінітунелю з двома трубками Вентурі або двома соплами та вимірюванням концентрацій CO_2 або NO_x

Первинні ВГ направляються з вихлопної труби EP в змішувальний канал DT через пробовідбірник SP і відповідний патрубок TT за допомогою роздільника потоку, що включає в себе комплект сопел або трубок Вентурі. Перша трубка ($FD1$) знаходиться в EP , а друга ($FD2$) – в TT . Крім того, необхідні два клапани регулювання тиску ($PCV1$ і $PCV2$) для забезпечення незмінності коефіцієнту відбору ВГ за рахунок регулювання протитиску в EP і тиску в DT . $PCV1$ розташований за SP (за напрямом потоку) в EP , а $PCV2$ – між нагнітаючим насосом PB і DT . Концентрації індикаторних газів (CO_2 або NO_x) вимірюють у первинних ВГ, розбавлених ВГ і у повітрі за допомогою аналізатора (аналізаторів) ВГ EGA . Вони необхідні для перевірки коефіцієнту відбору ВГ і можуть використовуватися для регулювання $PCV1$ і $PCV2$ з метою більш чіткого управління відбором потоків. Коефіцієнт розбавлення розраховується на основі концентрацій індикаторних газів.

Мінітунель багатотрубного типу та вимірюванням концентрацій CO_2 або NO_x (рис. 2.11).

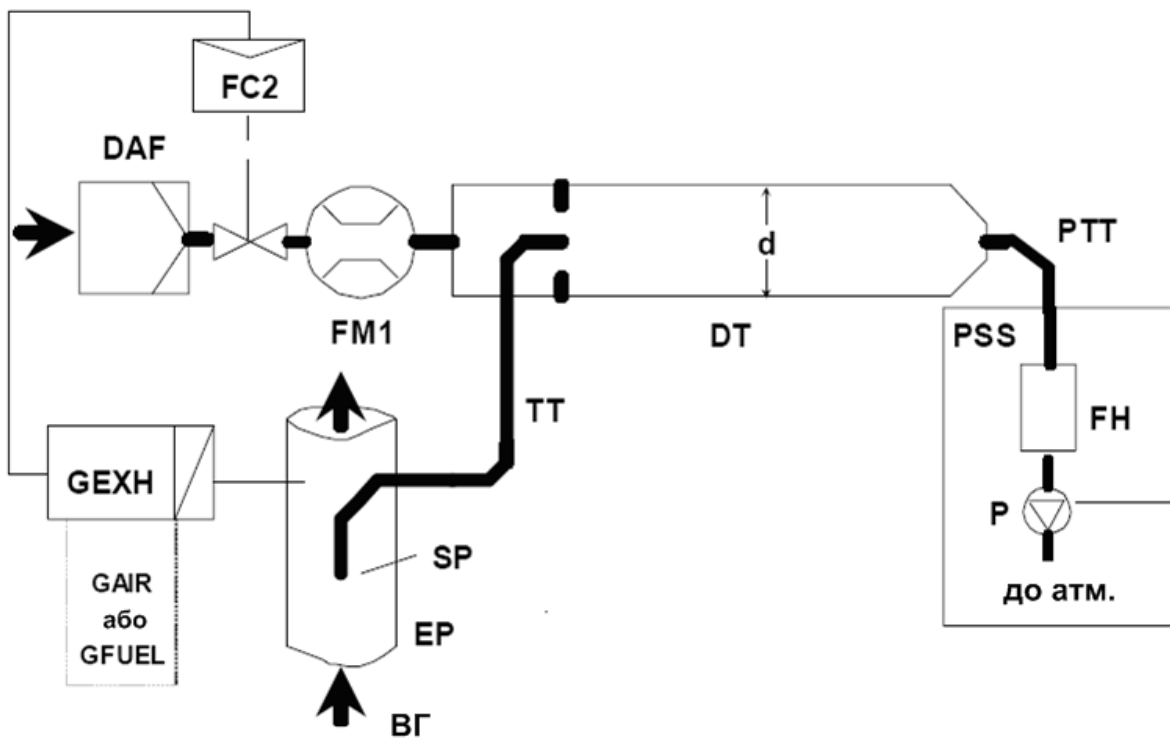


Рис. 2.12. Принципова схема мікротунелю з керуванням потоками розбавлених ВГ та повітря

Первинні ВГ направляються з вихлопної труби *EP* в змішувальний канал *DT* через пробовідбірник *SP* і відвідний патрубок *TT*. Повний потік через канал контролюється за допомогою регулятора витрати *FC3* і насоса *P* для подачі проб системи відбору проб ТЧ. Потік повітря контролюється регулятором витрати *FC2*, який може використовувати *GEXHW*, *GAIRW* або *GFUEL* в якості сигналів подачі команд для відбору необхідної відькості ВГ. Витрата проби в *DT* являє собою різницю витрати сумарного потоку і витрати повітря. Витрата повітря вимірюється за допомогою витратоміра *FM1*, а витрата сумарного потоку – за допомогою витратоміра *FM3* системи відбору проб ТЧ. Коефіцієнт розбавлення розраховується за цими двома показниками масових витрат.

Мінітунель з керуванням потоками розбавлених ВГ та повітря (рис. 2.13). Первинні ВГ направляються з вихлопної труби *EP* в змішувальний канал *DT* через пробовідбірник *SP* і відвідний патрубок *TT*. Коефіцієнт відбору ВГ та масова витрата ВГ у *DT* контролюється регулятором *FC2*, який регулює величину витрати (або швидкості), що забезпечується нагнітаючим насосом *PB* і витяжним насосом *SB*, відповідно.

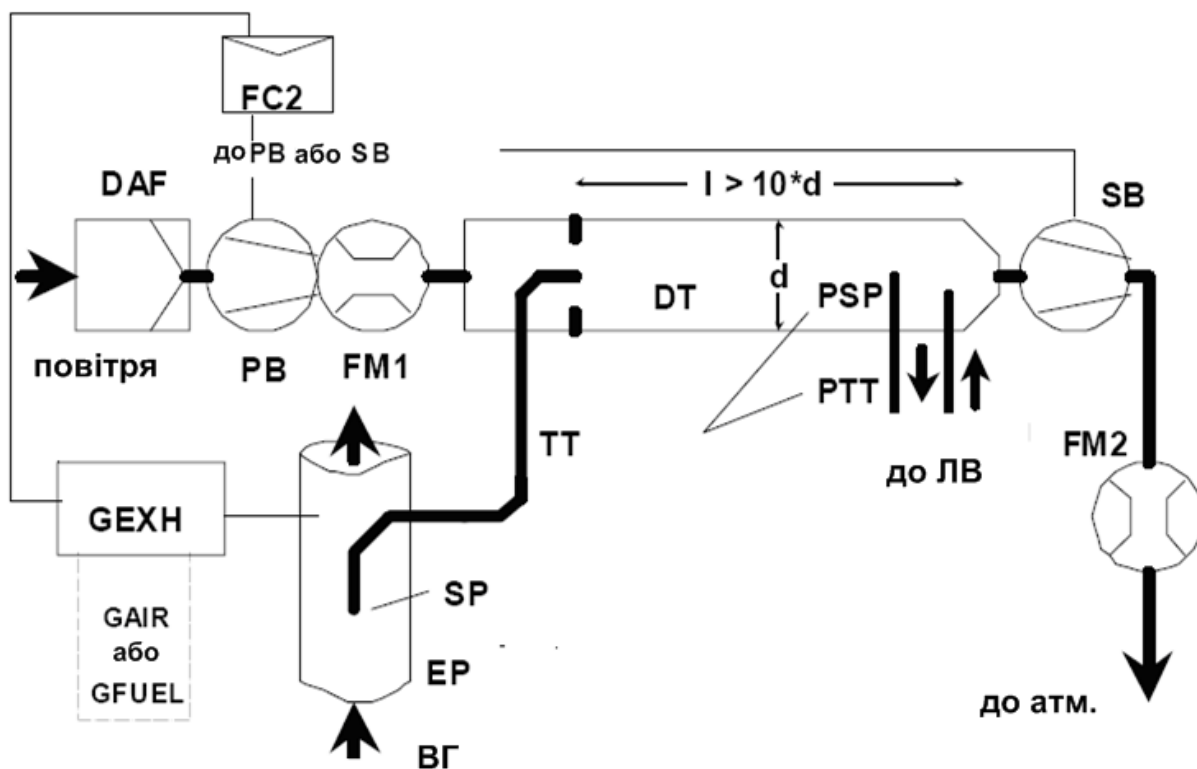


Рис. 2.13. Принципова схема мінітунелю з керуванням потоками розбавлених ВГ та повітря

Це можливо, оскільки проба, яка потрапляє до системи відбору проб ТЧ, повертається в DT . $GEXHW$, $G AIRW$ або $GFUEL$ можуть використовуватися в якості сигналів подачі команд для $FC2$. Масові витрати потоків повітря та розбавлених ВГ вимірюються за допомогою витратомірів $FM1$ та $FM2$, відповідно. Коефіцієнт розбавлення розраховується за цими двома показниками витрати.

Ефективність компенсаційного способу визначення масової витрати ВГ – G_{exh}^t , оцінювалася в ході досліджень, метою яких було порівняння його з поширеним диференціальним способом (застосовується в мікротунелі *AVL SPC 472* [25]) за критерієм точності використовуваного вимірювального обладнання, яка визначає вартість вимірювача G_{exh}^t . Для досягнення даної мети вирішені наступні завдання: 1) вивчення умов вимірювання масової витрати G_{exh}^t в частковопоточному тунелі; 2) аналіз диференційного та компенсаційного способів вимірювання G_{exh}^t ; 3) розробка методики визначення допустимих похибок витратомірів в вимірювачах G_{exh}^t ; 4) порівняння обох способів вимірювання G_{exh}^t за критерієм точності обладнання, що застосовується, і аналіз отриманих результатів.

2.4.1 Порівняння компенсаційного та диференційного способів вимірювання величини G_{exh}^t за критеріями точності та вартості вимірювань. Вимірювання величини G_{exh}^t в міні- та мікротуннелі є одним з етапів процесу визначення масового викиду ТЧ з ВГ дизеля – PT_{mass} (рис. 2.14):

$$PT_{mass} = 10^{-3} \cdot \left(\left(\left(\frac{m_f}{(G_{sam} \cdot \tau_{sam})_a} \right)_b \cdot q \right)_c \right) \cdot G_{exh}, \text{ г/ГОД}, \quad (2.31)$$

де m_f – маса ТЧ, яка зібрана на фільтрах, мг;

$G_t = G_{sam}$ – масова витрата проби розбавлених ВГ, яка пройшла через патрон з фільтром, кг/год;

τ_{sam} – тривалість періоду відбору проб, год;

q – коефіцієнт розбавлення ВГ;

G_{exh} – масова витрата ВГ у вихлопній трубі дизеля, кг/год.

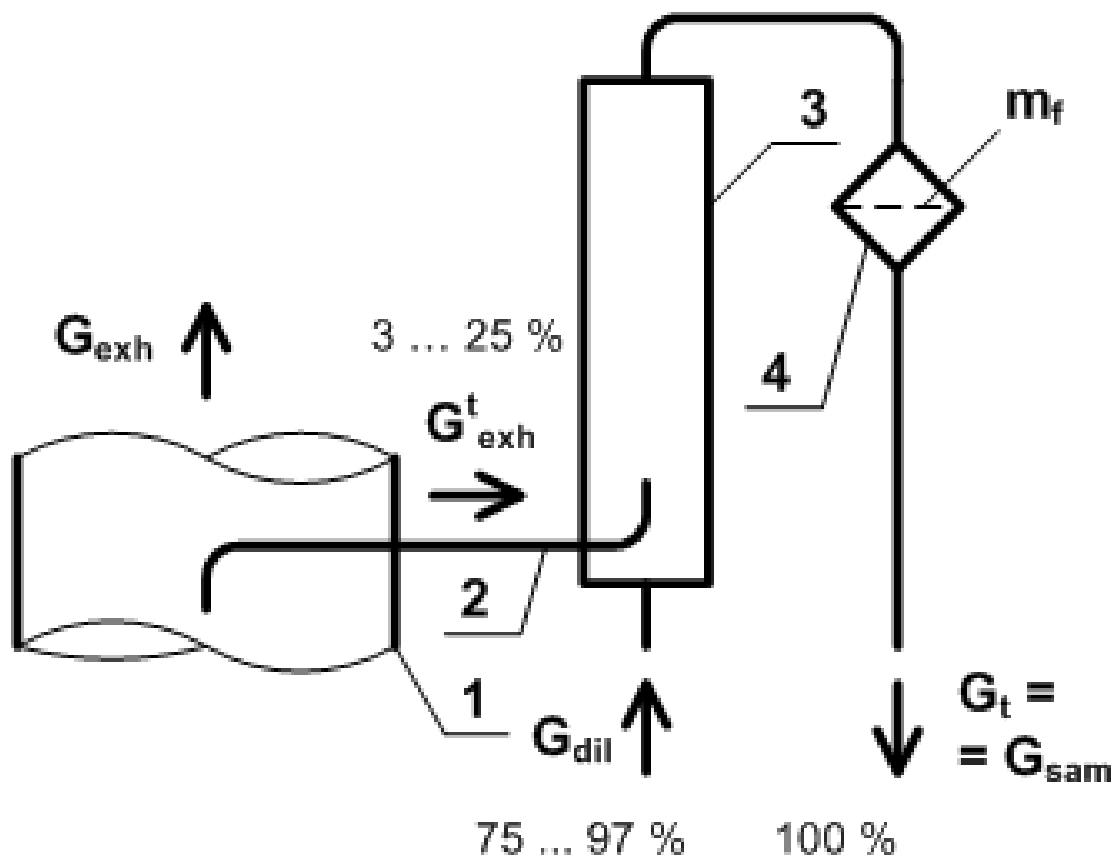


Рис. 2.14. Принципова схема процесу визначення масового викиду ТЧ з ВГ дизеля при використанні мікротунеля:

1 – вихлопна труба дизеля; 2 – трубопровід переносу ВГ; 3 – трубопровід розбавлення ВГ (тунель); 4 – патрон з фільтром для відбору ТЧ.

- У формулі (2.31) величини, які заключні в круглі дужки, це:
- а) маса проби розбавлених ВГ, що пройшла через фільтр, кг;
 - б) масова концентрація ТЧ в розбавлених ВГ, мг/кг;
 - в) масова концентрація ТЧ в нерозбавлених ВГ, мг/кг.

Коефіцієнт розбавлення ВГ – q визначається, як відношення масових витрат G_t і G_{exh}^t , причому остання величина визначається непрямым шляхом з причин, вказаних вище:

$$q = \frac{G_t}{G_{exh}^t}. \quad (2.32)$$

При використанні диференційного способу величина q визначається за формулою:

$$q = \frac{G_t}{G_t - G_{dil}}, \quad (2.33)$$

де G_{dil} – масова витрата розбавляючого повітря, кг/год.

При використанні компенсаційного способу використовується наступна формула для обчислення q :

$$q = \frac{G_k + G_{dil}}{G_k},$$

де $G_k = G_{exh}^t$ – масова витрата повітря, компенсуючого кількість ВГ, що надходять до тунелю, кг/год.

Основною вимогою до вузлів визначення масової витрати G_{exh}^t є забезпечення необхідної точності вимірювань; при цьому відносна похибка вимірювання коефіцієнта q не повинна перевищувати свого допустимого значення – $\delta q_{\text{доп}} = 4\%$.

Принципові схеми обох способів вимірювання G_{exh}^t , які розглядаються, наведено на рис. 1.16.

При диференційному способі вимірювань величина G_{exh}^t визначається, як різниця двох масових витрат: розбавлених ВГ (G_t) та повітря (G_{dil}), які вимірюються витратомірами $B1$ і $B2$. При цьому мала величина G_{exh}^t (3...25% від сумарного потоку G_t) обчислюється, як різниця 2-х великих величин – G_t (100%) і G_{dil} (75...97%), для вимірювання яких необхідні вартісні витратоміри підвищеної точності.

При компенсаційному способі вимірювань величина $G^{t_{exh}}$ дорівнює масовій витраті компенсаційного повітря G_k (вимірюється витратоміром B_3) за умови постійності масової витрати повітря G_{dil} (вимірюється витратоміром B_4), що забезпечується відповідними регулюючими пристроями. При реалізації даного способу не потрібно витратомірів з високою точністю вимірювань.

Методика визначення допустимих похибок витратомірів диференційного та компенсаційного способів вимірювань величини $G^{t_{exh}}$ дозволяє оцінити допустимі похибки витратомірів, які використовуються при диференційному і компенсаційному способах виміру $G^{t_{exh}}$ та забезпечують визначення коефіцієнту q з необхідною точністю. При цьому зроблено допущення про те, що в кожному способі застосовуються витратоміри одного класу точності, тобто:

$$\delta G_{dil} = \delta G_t = \delta B_1, \quad \delta G_{dil} = \delta G_k = \delta B_2.$$

де δG_{dil} , δG_t – похибки витратомірів, які використовуються при диференційному способі і дорівнюють величині δB_1 ;

δG_{dil} , δG_k – похибки витратомірів, які використовуються при компенсаційному способі і дорівнюють величині δB_2 .

В основі методики лежить формула розрахунку відносної похибки вимірювань величини, що визначається непрямым шляхом – (2.24). При цьому нормальність законів розподілу величин δG_{dil} , δG_t і δG_k , що дозволяє використовувати цю залежність, підтверджується дослідженнями на ймовірностному папері. Застосування формули (2.24) до виражень (2.32) та (2.33) з врахуванням зробленого допущення дозволяє встановити допустимі похибки витратомірів для обох способів – B_1 та B_2 :

$$\delta B_{1\partial on} = \frac{0,707}{q-1} \cdot \delta q_{\partial on}, \quad (2.34)$$

$$\delta B_{2\partial on} = \frac{0,707 \cdot q}{q-1} \cdot \delta q_{\partial on}. \quad (2.35)$$

Таким чином має місце співвідношення: $\delta B_{2\partial on} = q \cdot \delta B_{1\partial on}$.

Отримані залежності дозволяють оцінити точність витратомірів, які застосовуються при використанні способів вимірювання величини $G^{t_{exh}}$, що розглядаються.

Результати порівняння диференційного і компенсаційного способів вимірювання масової витрати ВГ у тунелі. Коефіцієнт q при використанні CVS-режиму розбавлення ВГ у тунелі може варіюватись в діапазоні 4...30. З врахуванням цього аналіз залежностей (2.34) і (2.35) показує наступне:

а) для забезпечення потрібної точності вимірювань коефіцієнта q потрібні витратоміри з допустимими похибками $\delta V_{1\text{доп}} = 0,1 \dots 0,2\%$ і $\delta V_{2\text{доп}} = 3\%$ (рис. 2.15);

б) при використанні недорогих витратомірів з класом точності 1,5 для компенсаційного способу коефіцієнт q визначається з похибкою у 2...2,5 разів меншою $q_{\text{доп}}$ (рис. 2.16).

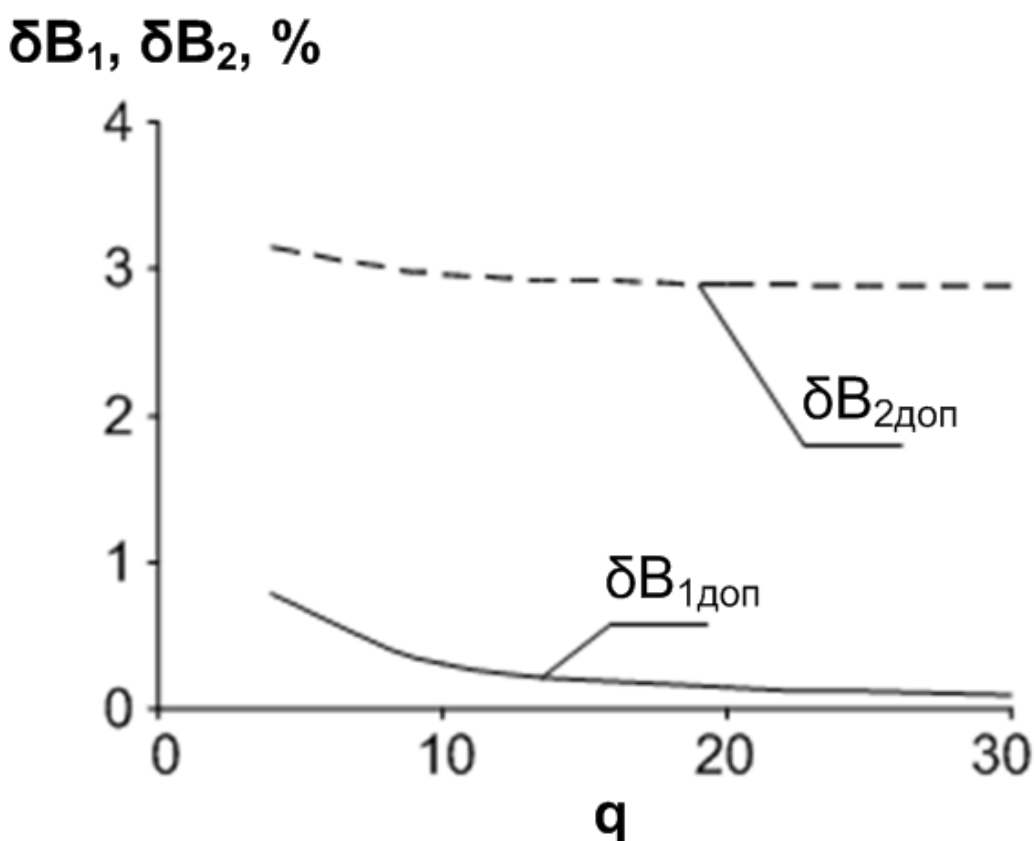


Рис. 2.15. Результати порівняння допустимих похибок витратомірів диференційного та компенсаційного способів визначення G_{exh}^t

Таким чином перехід від диференційного до компенсаційного способу визначення величини G_{exh}^t дозволяє зменшити більш ніж у 15 разів вимоги до точності витратомірів і, за рахунок цього, у 5...8 разів знизити вартість вимірювача коефіцієнта розбавлення ВГ (складає до 20% вартості мікротунелю).

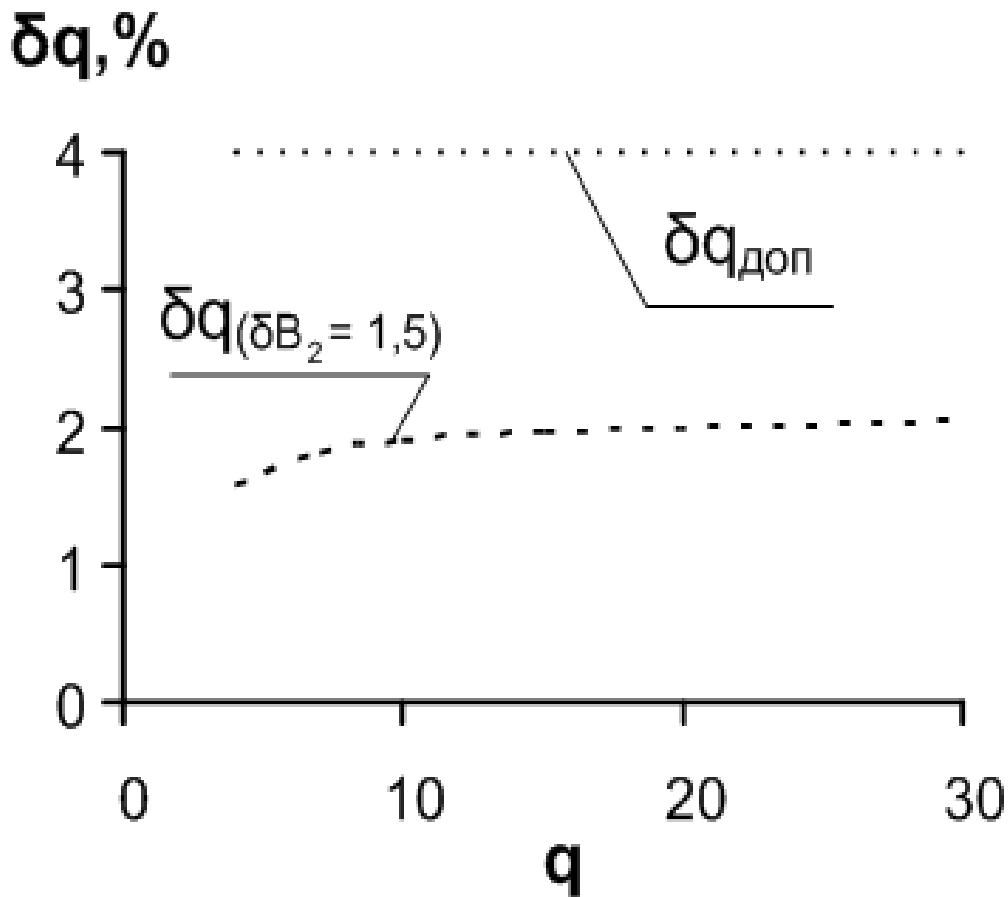


Рис. 2.16. Точність визначення величини q при похибках витратомірів $B_2 - 1,5\%$

2.4.2 Експериментальне відпрацювання компенсаційного способу визначення величини G_{exh}^t . Компенсаційний спосіб визначення масової витрати ВГ (див. рис. 1.16) був застосований у мінітунелі з ізокінетичним пробовідбірником МТ-1 (який, описаний у п. 3.2.1) та експериментально відпрацьований на безмоторному та моторному випробувальних стендах (див. рис. 3.7 та 3.46).

Процедура експериментального відпрацювання цього способу складалася з 4-х етапів:

а) калібрування витратомірів компенсаційного способу:

– колектора (спроектованого у відповідності з рекомендаціями [76]), який використовується для визначення масової витрати газового потоку в тунелі – G_i ;

– діафрагми (спроектованої у відповідності до вимог нормативного документу [77]), за допомогою якої визначається масова витрата компенсаційного потоку G_{com} ;

б) розробка методики визначення величини G_{exh}^t за допомогою витратомірів компенсаційного способу;

в) експериментальне оцінювання точності компенсаційного способу вимірювань величини G_{exh}^t ;

г) практичне використання розробленого способу визначення масової витрати ВГ в ході моторних випробувань МТ-1.

Калібрування витратомірів компенсаційного способу проводилась з метою встановлення експериментальних залежностей коефіцієнтів витрат колектора – α_k та діафрагми – α_d від чисел Рейнольдса у відповідних робочих діапазонах варіювання цих величин:

- для колектору – $Re_k \cdot 10^{-3} = 45 \dots 67$ (відповідає $G_t = 18 \dots 26$ г/с);
- для діафрагми – $Re_d \cdot 10^{-3} = 1,9 \dots 9,5$ (відповідає $G_{com} = 1 \dots 5$ г/с).

Процедура калібрування проводилась за наступним алгоритмом.

1. Приєднання до кожного витратоміру, що калібрується, еталонного витратоміру та штатної газодувки, яка забезпечує варіювання масової витрати газового потоку (повітря) у відповідному робочому діапазоні. В якості еталонних витратомірів використовувались газові лічильники об'ємного типу – РГ-100 (для калібрування колектору) та РГ-40 (для калібрування діафрагми), які були оснащені датчиками числа обертів роторів, температури та тиску; відносні похибки вимірювань масових витрат при цьому не перевищували $\pm 1\%$.

2. Визначення контрольних точок для проведення вимірювань шляхом розподілу робочих діапазонів варіювання регуляторів масових витрат на елементарні інтервали.

3. Експериментальне визначення у контрольних точках параметрів:

– бараметричного тиску – P_a , температури – t_a та відносної вологості – φ_a навколишнього середовища;

– розрідження на колекторі – ΔP_k та еталонної масової витрати – G_{t0} ;

– температури – t_d , статичного тиску – P_d , перепаду тиску – ΔP_d в діафрагмі та еталонної масової витрати – G_{com0} .

4. Розрахунок для кожної контрольної точки параметрів:

– тиску – P_{wp} та щільності – ρ_{wp} насиченого водяного пару у повітрі:

$$P_{wp} = 566 + 57,54 \cdot t_a + 0,27 \cdot t_a^2 + 0,063 \cdot t_a^3, \text{ Па}, \quad (2.36)$$

$$\rho_{wp} = (6,3 + 0,02 \cdot t_a + 0,0264 \cdot t_a^2) \cdot 10^{-3}, \text{ кг/м}^3; \quad (2.37)$$

– кінематичних в'язкостей повітря в колекторі та діафрагмі – ν_k і ν_d (див. формулу на стор. 54), до якої підставляються значення абсолютних температур повітря T_a і T_d : $T_a = t_a + 273,15$, $T_d = t_d + 273,15$);

– щільності повітря у навколишньому середовищі – ρ_a та у діафрагмі – ρ_d :

$$\rho_a = A \cdot \frac{P_a - \frac{\varphi a}{100} \cdot P_{wp}}{T_a} + \frac{\varphi a}{100} \cdot \rho_{wp}, \quad (2.38)$$

$$\rho_d = A \cdot \frac{(P_a + P_d) - \frac{\varphi a}{100} \cdot P_{wp}}{T_d} + \frac{\varphi a}{100} \cdot \rho_{wp}, \quad (2.39)$$

де $A = (\rho_0 \cdot T_0) / (P_0 \cdot K) = 3,487 \cdot 10^{-3}$ – константа ($K = 0,9996$ – коефіцієнт стискуваності повітря);

– коефіцієнтів, які враховують зменшення щільності повітря при проходженні через колектор – ε_k та діафрагму – ε_d :

$$\varepsilon_k = \left(\frac{\frac{k}{k-1} \cdot \Psi^{\frac{2}{k}} \cdot \left(1 - \Psi^{\frac{k-1}{k}} \right)}{\frac{\Delta P_k}{P_a}} \right), \quad (2.40)$$

$$\varepsilon_d = 1 - 0,424 \cdot \frac{\Delta P_d}{(P_a + P_d) \cdot K}. \quad (2.41)$$

5. Визначення для кожної контрольної точки відповідних значень числа Рейнольдса та коефіцієнта витрати:

– для колектора:

$$\text{Re}_k = \frac{4 \cdot G_{t0}}{\pi \cdot \nu_k \cdot \rho_k \cdot D_k}, \quad (2.42)$$

де $D_k = 26,21 \cdot 10^{-3}$ м – діаметр отвору колектора;

$$\alpha_k = \frac{G_{t0}}{\varepsilon_k \cdot \frac{\pi \cdot D_k}{4} \cdot (2 \cdot \Delta P_k \cdot \rho_a)^{0,5}}, \quad (2.43)$$

– для діафрагми:

$$\text{Re}_d = \frac{4 \cdot G_{com0}}{\pi \cdot v_d \cdot \rho_d \cdot D_d}, \quad (2.44)$$

де $D_d = 18,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – діаметр трубопроводу, в якому встановлено діафрагму;

$$\alpha_d = \frac{G_{com0}}{\varepsilon_d \cdot \frac{\pi \cdot d_d}{4} \cdot (2 \cdot \Delta P_d \cdot \rho_d)^{0,5}}, \quad (2.45)$$

де $d_d = 3,04 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – діаметр отвору діафрагми.

6. Встановлення за допомогою методу найменших квадратів залежностей коефіцієнтів витрат α_k та α_d від відповідних значень Re_k та Re_d .

7. Оцінювання точності калібрування витратомірів за такими показниками, як довірчі інтервали – $\Delta\alpha_k$ і $\Delta\alpha_d$ та відносні похибки – $\delta\alpha_k$ і $\delta\alpha_d$:

$$\Delta\alpha_i = \pm t_{0,95, f_i} \cdot S_{\alpha_i},$$

де i – індекс, що вказує на тип витратоміру – k або d ;

$t_{0,95, f_i}$ – коефіцієнт Стьюдента при довірчій вірогідності 0,95 та кількості ступенів свободи – $f_i = n - 1$ (n – кількість контрольних точок);

S_{α_i} – середньоквадратичне відхилення коефіцієнту витрати α_i :

$$S_{\alpha_i} = \left(\frac{\sum_{j=1}^n (\alpha_{ij}^a - \alpha_{ij})^2}{n - 2} \right)^{0,5},$$

де j – індекс контрольної точки;

α_{ij}^a – розрахункове значення коефіцієнту α_i в j -й точці;

α_{ij} – експериментальне значення коефіцієнту α_i в j -й точці;

$$\delta\alpha_i = \frac{\overline{\Delta\alpha_i}}{\alpha_i} \cdot 100\%, \quad (2.46)$$

де $\overline{\alpha_i}$ – середнє значення коефіцієнту α_i у відповідному робочому діапазоні.

Результати калібрування витратомірів компенсаційного способу за приведеним алгоритмом показали наступне (табл. 2.4, 2.5, рис. 2.17, 2.18):

Таблиця 2.4

Результати калібрування колектора, який вимірює величину G_t

$N_{к.т.}$	ΔP_k , Па	ρ_a , кг/м ³	G_{t0} , кг/с	Re_k	α_k
1	1052	1,132	25,73	66773	0,9824
2	1004	1,132	25,05	65018	0,9789
3	962	1,132	24,56	63746	0,9803
4	938	1,132	24,24	62908	0,9795
5	905	1,132	23,77	61695	0,9778
6	866	1,132	23,35	60605	0,9818
7	837	1,132	22,76	59063	0,9730
8	765	1,132	21,80	56577	0,9746
9	712	1,132	20,94	54347	0,9701
10	667	1,132	20,21	52455	0,9679
11	615	1,132	19,41	50353	0,9670
12	596	1,132	19,14	49671	0,9689
13	564	1,132	18,59	48238	0,9671
14	550	1,132	18,38	47697	0,9682
15	536	1,132	18,12	47007	0,9665
16	523	1,132	17,88	46386	0,9655
17	555	1,132	18,44	47847	0,9669
18	577	1,132	18,86	48936	0,9700
19	639	1,132	19,88	51595	0,9722
20	704	1,132	20,88	54173	0,9728
21	784	1,132	22,08	57295	0,9754
22	825	1,132	22,58	58603	0,9728
23	890	1,132	23,60	61248	0,9792
24	960	1,132	24,22	62841	0,9777
25	972	1,132	24,75	64232	0,9831
26	1011	1,132	25,3	65648	0,9853
27	1045	1,132	25,77	66858	0,9873

Результати калібрування діафрагми, яка вимірює величину G_{com}

$N_{к.т.}$	ΔP_d , Па	$- P_d$, Па	ρ_d , кг/м ³	G_{com0} , кг/с	Re_d	α_d
1	3769	1375	1,117	4,865	18226	0,6716
2	3274	1324	1,117	4,525	16955	0,6702
3	2933	1281	1,118	4,28	16037	0,6697
4	2724	1263	1,118	4,12	15436	0,6690
5	2428	1219	1,119	3,885	14557	0,6682
6	2159	1183	1,119	3,675	13770	0,6702
7	1850	1151	1,119	3,38	12662	0,6659
8	1356	1075	1,120	2,9	10865	0,6674
9	989	1013	1,121	2,47	9254	0,6655
10	719	959	1,122	2,105	7887	0,6651
11	473	897	1,122	1,705	6385	0,6643
12	401	876	1,122	1,57	5882	0,6641
13	275	836	1,123	1,295	4851	0,6620
14	231	818	1,123	1,19	4458	0,6640
15	183	800	1,123	1,06	3970	0,6633
16	144	789	1,123	0,94	3520	0,6629
17	244	825	1,123	1,22	4570	0,6621
18	332	854	1,122	1,43	5356	0,6646
19	610	930	1,122	1,94	7268	0,6658
20	965	1006	1,121	2,44	9139	0,6656
21	1487	1093	1,120	3,04	11388	0,6682
22	1757	1143	1,119	3,29	12327	0,6652
23	2317	1209	1,118	3,8	14237	0,6690
24	2711	1252	1,118	4,11	15394	0,6690
25	3060	1295	1,117	4,375	16391	0,6702
26	3451	1335	1,117	4,65	17417	0,6708
27	3801	1379	1,117	4,885	18296	0,6715

– залежності коефіцієнтів витрат колектора і діафрагми від відповідних значень числа Re мають вигляд поліномів 1-го порядку:

$$\alpha_k = 0,9247 \cdot Re_k + 8,28 \cdot 10^{-7}, \quad (2.47)$$

$$\alpha_d = 0,6612 \cdot Re_d + 7,05 \cdot 10^{-7}; \quad (2.48)$$

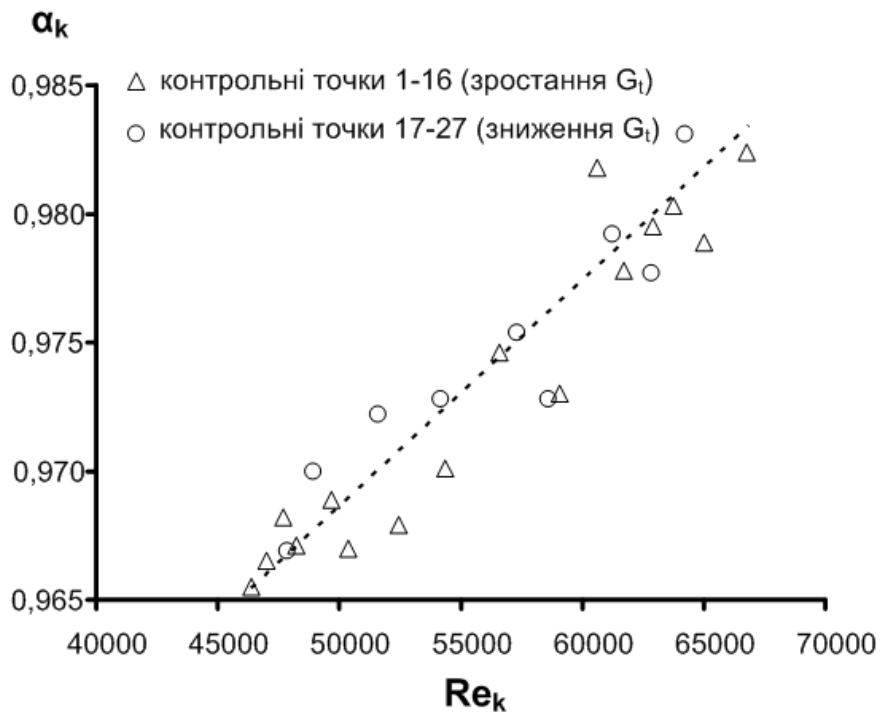


Рис. 2.17. Калібрувальна характеристика колектора

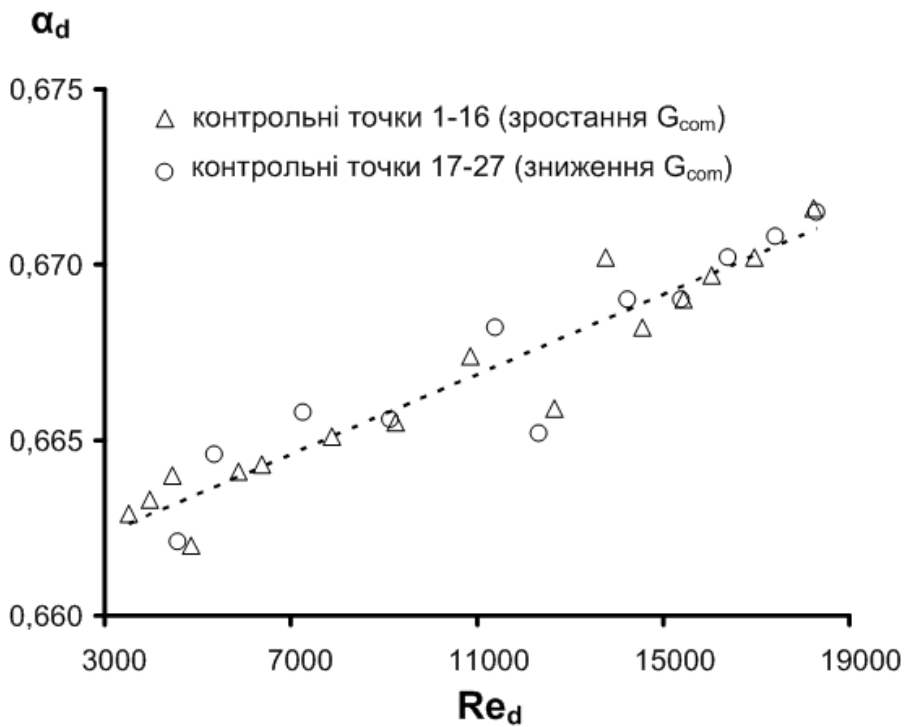


Рис. 2.18. Калібрувальна характеристика діафрагми

– довірчі інтервали визначених коефіцієнтів витрат складають:

$$\alpha_k = \pm 0,0065 (S_{\alpha_k} = 0,0038, t_{0,95;25} = 1,708, n = 27);$$

$$\alpha_d = \pm 0,0028 (S_{\alpha_d} = 0,0016, t_{0,95;25} = 1,708, n = 27);$$

– середні значення коефіцієнтів α_k і α_d у робочих діапазонах варіювання відповідних чисел Re складають:

$$\bar{\alpha}_k = 0,9745; \quad \bar{\alpha}_d = 0,6672;$$

– відносні похибки визначення величин α_k , α_d , встановлені за допомогою формули (2.46), мають значення: $\delta\alpha_k = \pm 0,67\%$; $\delta\alpha_d = \pm 0,41\%$.

Методика визначення величини G_{exh}^t за допомогою витратомірів компенсаційного способу передбачає вимірювання та регулювання величин G_t та G_{com} .

Процедура вимірювання масових витрат потоку у тунелі та компенсаційного потоку складається з послідовного виконання наступних операцій.

1. Пряме вимірювання за допомогою відповідних датчиків величин:

– параметрів навколишнього середовища – P_a , t_a та φ_a ;

– розрідження на колекторі – ΔP_k ;

– параметрів газового потоку, що протікає в діафрагмі – t_d , P_d , ΔP_d ;

– тиску – P_{wp} та щільності – ρ_{wp} насиченого пару;

2. Обчислення величин:

– P_{wp} та ρ_{wp} (за допомогою формул ((2.36) і (2.37)));

– v_k та v_d (за допомогою формули на стор. 54);

– ρ_a та ρ_d (за допомогою формул ((2.38) і (2.39)));

– ε_k та ε_d (за допомогою формул ((2.40) і (2.41)));

3. Визначення початкових значень масових витрат потоку у тунелі – G_t^1 та компенсаційного потоку – G_{com}^1 :

$$G_t^1 = \bar{\alpha}_k \cdot \varepsilon_k \cdot \frac{\pi \cdot D_k}{4} \cdot (2 \cdot \Delta P_k \cdot \rho_a)^{0,5},$$

$$G_{com}^1 = \bar{\alpha}_d \cdot \varepsilon_d \cdot \frac{\pi \cdot d_d}{4} \cdot (2 \cdot \Delta P_d \cdot \rho_d)^{0,5}.$$

4. Розрахунок величин Re_k та Re_d за допомогою формул (2.42) та (2.44), в які замість G_{t0} та G_{com0} підставляються значення G_t^1 та G_{com}^1 .

5. Визначення уточнених значень коефіцієнтів α_k та α_d за допомогою калібрувальних залежностей (2.47) та (2.48).

6. Встановлення уточнених значень масових витрат потоку у тунелі та компенсаційного потоку:

$$G_t = G_k^1 \cdot \frac{\alpha_k}{\alpha_d}, \quad G_{com} = G_{com}^1 \cdot \frac{\alpha_d}{\alpha_d}.$$

Регулювання масових витрат G_t та G_{com} здійснюється за наступним алгоритмом (рис. 2.19):

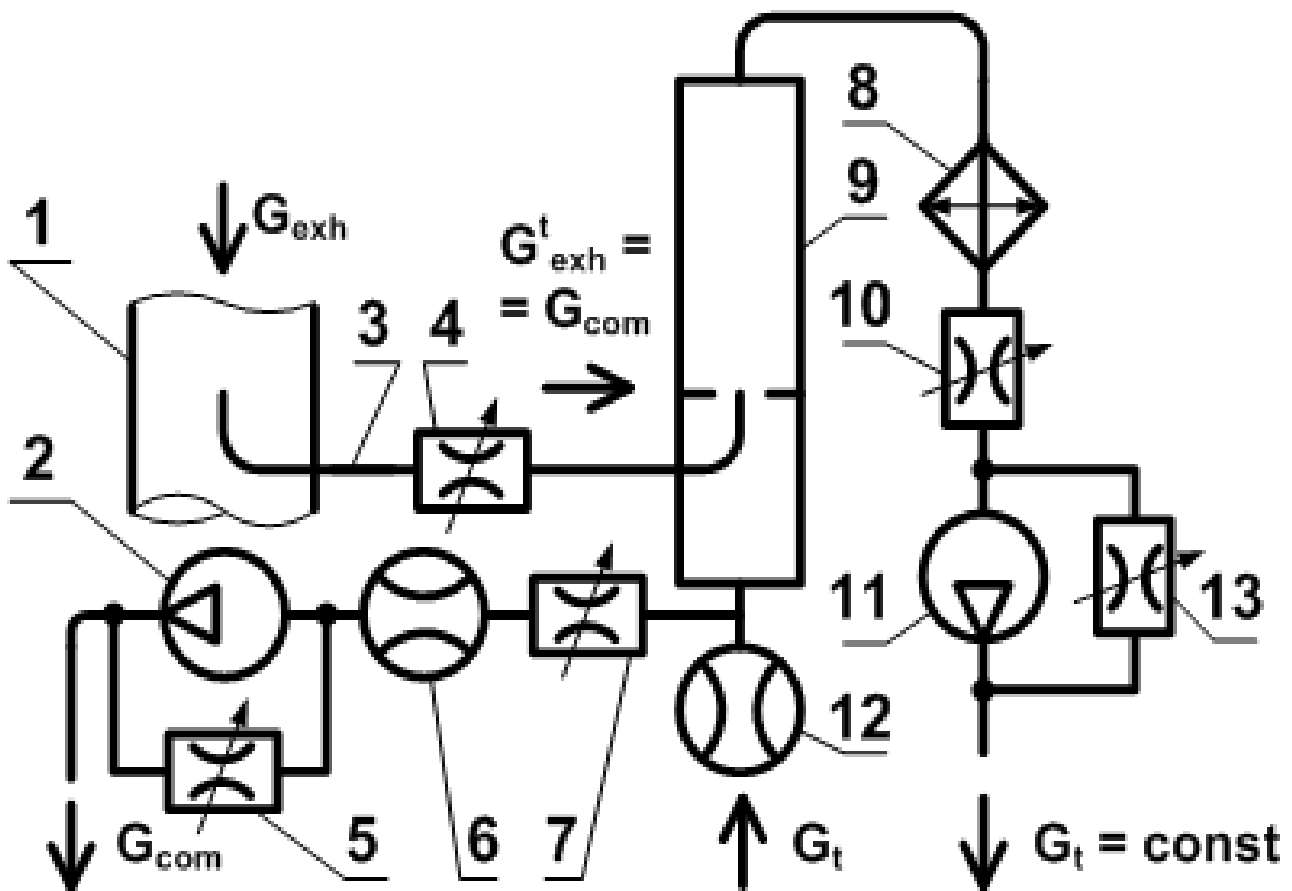


Рис. 2.19. Принципова схема компенсаційного способу вимірювань G_{exh}^t :

1 – вихлопна труба лизеля; 2 – штатні газодувки; 3 – трубопровід транспортування ВГ; 4, 5, 7, 10 і 13 – регулюючі клапани; 6, 12 – витратоміри; 8 – теплообмінник; 9 – розбавляючий тунель.

– при закритих клапанах 4 і 7 газодувкою об’ємного типу 11 створюється масова витрата G_t та підтримується постійною протягом всього циклу (при використанні режимів розбавлення ВГ *DM1* і *DM3*) або режиму випробувань (при використанні режимів розбав-

лення ВГ *DM2* і *DM4*); контроль даної величини здійснюється витратоміром 12, а її регулювання (методом перепустки частки потоку) – клапаном 13; постійність масової витрати G_t забезпечується типом газодувки та підтримкою на заданих рівнях температури (регулюється теплообмінником 8 з точністю ± 1 °С) та статичного тиску (регулюється клапаном 10 з точністю $\pm 0,1$ кПа) газового потоку, який вона створює;

– відкривається клапан 7 та та газодувкою 2 створюється потрібна масова витрата компенсаційного потоку G_{com} ; контроль цієї величини здійснюється витратоміром 6, а її регулювання (методом перепустки частини потоку) – клапаном 5;

– відкривається клапан 4 і за рахунок перепаду статичних тисків між вихлопною трубою та трубопроводом розбавлення ВГ у тунель потрапляє частка ВГ з масовою витратою G_{exh}^t ; при цьому клапан 4 переводиться у таке положення, при якому масова витрата потоку через витратомір 12 складає G_t ; це забезпечує рівність масових витрат G_{com} та G_{exh}^t , що підтверджується рівнянням матеріального балансу потоків, які протікають у тунелі:

$$G_t^{(газодувка)} + G_{com} = G_t^{(колектор)} + G_{exh}^t.$$

Ліва частина цього рівняння відображає суму потоків, які втікають у тунель, права частина – які витікають з нього.

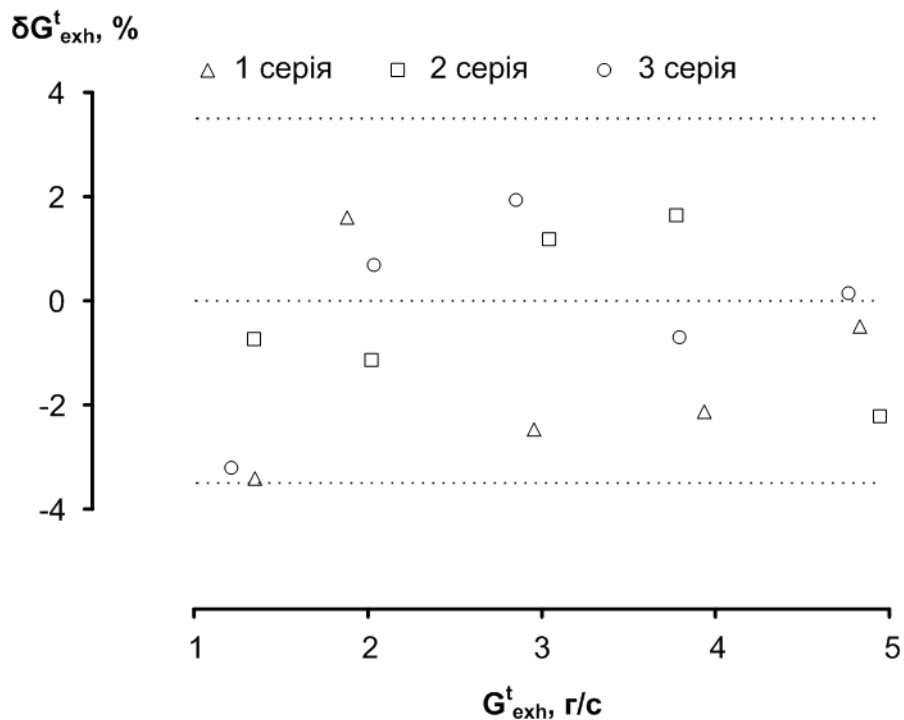
Експериментальне оцінювання точності компенсаційного способу вимірювань величини G_{exh}^t . В трубопроводі транспортування проби 3 між пробовідбірником та регулюючим клапаном 4 було встановлено контрольний витратомір – газовий лічильник РГ-40, який контролював масову витрату проби, що відбиралася, – G_{exh}^t з відносною похибкою, що не перевищувала $\pm 1\%$.

Проведено 3 серії випробувань, в ході яких масова витрата G_t (що створювалась газодувкою 11, регулювалась клапаном 13 та вимірювалась колектором 12) підпримувалась постійною на заданому рівні – 24 г/с, а масова витрата G_{com} (що створювалась газодувкою 2, регулювалась клапаном 2 та вимірювалась діафрагмою 6) варіювалась в рандомізованому порядку на 5 рівнях: 1,4, 2, 3, 4 та 5 г/с (відповідні об'ємні витрати склали: 70, 100, 150, 200 та 250 лн/хв). За результатами випробувань визначено відносні відхилення масової витрати потоку в тунелі від заданого рівня – δG_t та відносну похибку вимірювань масової витрати проби, що відбирається – δG_{exh}^t (табл. 2.6, рис. 2.20).

Таблиця 2.6

Результати оцінювання точності компенсаційного способу вимірювань G_{exh}^t

Серія	G_t , г/с	δG_t , %	G_{com} , г/с	G_{exh}^t , г/с	$G_{com} - G_{exh}^t$, г/с	δG_{exh}^t , %
1	24,018	0,08	1,909	1,879	0,03	1,6
	24,011	0,05	3,852	3,936	-0,084	-2,1
	24,078	0,32	4,807	4,831	-0,024	-0,5
	24,023	0,10	2,884	2,957	-0,073	-2,5
	24,061	0,25	1,304	1,35	-0,046	-3,4
2	24,104	0,43	3,081	3,045	0,036	1,2
	24,063	0,26	4,837	4,947	-0,11	-2,2
	23,926	-0,31	1,998	2,021	-0,023	-1,1
	23,937	-0,26	3,84	3,778	0,062	1,6
	24,009	0,04	1,338	1,348	-0,01	-0,7
3	23,989	-0,05	1,175	1,214	-0,039	-3,2
	23,881	-0,50	2,907	2,852	0,055	1,9
	24	0,00	3,767	3,794	-0,027	-0,7
	24,036	0,15	2,051	2,037	0,014	0,7
	23,974	-0,11	4,773	4,766	0,007	0,1
	24,018	0,08	1,909	1,879	0,03	1,6

Рис. 2.20. Відносна похибка вимірювань масової витрати G_{exh}^t

Отримані результати довели ефективність запропонованого способу вимірювань величини G_{exh}^t – у всьому діапазоні варіювання масової витрати G_{com} відносна похибка δG_{exh}^t не перевищує допустимого значення – 3,5% (при цьому відхилення масової витрати G_t від заданого рівня не перевищують $\pm 0,5\%$).

Практичне використання розробленого способу визначення масової витрати ВГ в ході моторних випробувань МТ-1 дозволило:

– встановити експериментальну залежність перепаду статичних тисків між пробовідбірником мінітунелю та вихлопною трубою від параметрів, що характеризують режим роботи дизеля – \bar{n} та \bar{L} , при ізокінетичному режимі відбору ВГ;

– забезпечити потрібну точність визначення коефіцієнтів відбору та розбавлення ВГ при використанні компенсаційного способу в якості основного способу вимірювання величини G_{exh}^t .

Таким чином експериментальне відпрацювання компенсаційного способу вимірювань масової витрати ВГ продемонструвало його практичну придатність та ефективність.

Висновки глави

1. Створено загальний для всіх систем розбавлення ВГ математичний опис процесу тепловіддачі в тунелі у вигляді системи диференціальних рівнянь енергії, руху, суцільності та тепловіддачі з умовами однозначності у безрозмірній формі. Це дозволило встановити 4 фактори, що впливають на тепловіддачу в тунелі (яка характеризується критерієм Нуссельта Nu): число Рейнольдса – Re, коефіцієнт розбавлення ВГ – q , температурний коефіцієнт k_t та відносна довжина тунелю – k_l .

2. Розроблено математичну модель утворення температурних полів в кінцевих перетинах трубопроводів розбавлення ВГ та лінії відбору проб ТЧ, яка дозволяє визначати та порівнювати між собою значення температур проби перед фільтром – t_f на різних режимах роботи двигуна (характеризуються відносними числом обертів вала двигуна – \bar{n} та навантаженням – \bar{L}), в різних тунелях (характеризуються геометричними та газодинамічними параметрами трубопроводу розбавлення ВГ та лінії відбору проб), при різних умовах розбавлення ВГ (характеризуються режимом розбавлення, темпера-

турами повітря – t_{dil} і проби перед фільтром – t_f та величиною зниження t_f внаслідок охолодження тунелю – $\Delta t_{f(52)}$).

3. Створено математичну модель утворення результуючої похибки вимірювань середньоексплуатаційного викиду ТЧ – δPT , яка дозволяє оцінювати точність визначення цього показника з урахуванням похибок вимірювального обладнання (утворюють інструментальну похибку δPT_{in}) та факторів, що впливають на масу зібраних на фільтрі ТЧ – m_f на етапах пробопідготовки та стабілізації фільтру (утворюють методичні похибки δPT_{tf} і δPT_{st}).

4. На основі аналізу результатів експериментальних досліджень причин виникнення методичних похибок вимірювань викидів ТЧ зроблені висновки:

– на етапі пробопідготовки величина m_f змінюється пропорційно відхиленню температури t_f від значення t_{f0} , яке приймається за базове і відповідає *CVS*-розбавленню ВГ у еталонному тунелі, при цьому коефіцієнт пропорційності є функцією від параметрів, що характеризують режим роботи дизеля – \bar{n} та \bar{L} і визначається експериментально;

– на етапі стабілізації фільтру величина m_f змінюється пропорційно відношенню десятичних логарифмів періодів витримки фільтру τ_{st} та $\tau_{st0} = 6$ год (τ_{st0} – базове значення), при цьому коефіцієнт пропорційності є функцією температури t_{st} та визначається експериментально.

5. Теоретично обґрунтовано доцільність використання у частковопоточних тунелях компенсаційного способу визначення масової витрати ВГ, які поступають в тунель – G_{exh}^t , замість найбільш розповсюдженого диференційного способу (використовується у мікротунелі *AVL SPC 472*), що дозволяє більш ніж у 15 разів збільшити допустимі похибки витратомірів вимірювача коефіцієнту розбавлення ВГ та у 5...8 разів зменшити його вартість.

6. Експериментально підтверджено ефективність компенсаційного способу визначення масової витрати G_{exh}^t в ході випробувань мінітунелю з ізокінетичним пробовідбірником МТ-1 (в якому був застосований цей спосіб) на безмоторному стенді. Похибка відтворюваності вимірювань величини G_{exh}^t , яка визначалась за допомогою стандартних звужуючих пристроїв – колектора і діафрагми з класом точності 1,5, не перевищила свого допустимого значення – $\pm 3\%$.

ГЛАВА 3

МЕТОДИКИ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ УСТАНОВКИ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕФЕКТИВНОСТІ ГРАВІМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАНЬ ВИКИДІВ ТЧ

3.1 Методика та експериментальна установка для визначення критеріального рівняння тепловіддачі в тунелі

У відповідності до методики критеріальне рівняння тепловіддачі в тунелі – $Nu = f(Re, q, r_t, r_l)$ визначається за результатами експерименту з планом «Греко-Латинський квадрат» 5×5 з 5-ма рівнями варіювання змінних (табл. 3.1, 3.2).

Таблиця 3.1

План збалансованого експерименту «Греко-Латинський квадрат» 5×5

№	Значення параметрів		№	Значення параметрів		№	Значення параметрів		№	Значення параметрів		№	Значення параметрів	
	Re	k		Re	k		Re	k		Re	k		Re	k
1*	Re ₁	k _{t3}	6	Re ₂	k _{t4}	11	Re ₃	k _{t5}	1	Re ₄	k _{t1}	21	Re ₅	k _{t2}
	q ₁	k _{l4}		q ₁	k _{l3}		q ₁	k _{l2}		q ₁	k _{l1}		q ₁	k _{l5}
2	Re ₁	k _{t4}	7	Re ₂	k _{t5}	12*	Re ₃	k _{t1}	1	Re ₄	k _{t2}	22	Re ₅	k _{t3}
	q ₂	k _{l5}		q ₂	k _{l4}		q ₂	k _{l3}		q ₂	k _{l2}		q ₂	k _{l1}
3	Re ₁	k _{t5}	8	Re ₂	k _{t1}	13	Re ₃	k _{t2}	1	Re ₄	k _{t3}	23	Re ₅	k _{t4}
	q ₃	k _{l1}		q ₃	k _{l5}		q ₃	k _{l4}		q ₃	k _{l3}		q ₃	k _{l2}
4	Re ₁	k _{t1}	9	Re ₂	k _{t2}	14	Re ₃	k _{t3}	1	Re ₄	k _{t4}	24	Re ₅	k _{t5}
	q ₄	k _{l2}		q ₄	k _{l1}		q ₄	k _{l5}		q ₄	k _{l4}		q ₄	k _{l3}
5	Re ₁	k _{t2}	10	Re ₂	k _{t3}	15	Re ₃	k _{t4}	2	Re ₄	k _{t5}	25*	Re ₅	k _{t1}
	q ₅	k _{l3}		q ₅	k _{l2}		q ₅	k _{l1}		q ₅	k _{l5}		q ₅	k _{l4}

Примітка. * дослід, в яких проводились повторні вимірювання.

Загальний вигляд рівняння тепловіддачі є наступним:

$$Nu = K \cdot \prod_{i=1}^4 Nu_m(P_i), \quad (3.1)$$

де K – коефіцієнт;

i – індекс параметру, що впливає на тепловіддачу: 1 – Re, 2 – q , 3 – k_t , 4 – k_l ;

$Nu_m(P_i)$ – регресійні залежності усереднених значень критерія Нусельта – Nu_m від параметрів P_i , кожна з яких визначається по п'яти розрахунковим точкам з координатами – $Nu_m(P_{ij})$; P_{ij} , ($j = 1 \dots 5$ – рівні варіювання параметра P_i).

Таблиця 3.2

Рівні варіювання параметрів, які впливають на Nu

Параметр	Рівні варіювання параметра				
	1	2	3	4	5
$Re \cdot 10^{-3}$	4	6	10	18	35
q	5	7,5	10	12,5	15
k_t (t в °C)	1,27 (100)	1,44 (150)	1,61 (200)	1,78 (250)	1,96 (300)
k_l	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0

Величини $Nu_m(P_{ij})$ розраховуються, як середньгеометричні значення з результатів вимірювання критерія Nu в тих дослідах, в яких параметр P_i знаходився на j -му рівні (ці досліди утворюють окрему вибірку у кількості 5 елементів з поточним індексом r):

$$Nu_m(P_{ij}) = \left(\prod_{r=1}^5 Nu(P_{ijr}) \right)^{0,2} \quad (3.2)$$

Коефіцієнт K визначається, як середньоарифметичне з величин K_{exp} , розрахованих за результатами кожного дослідження:

$$K_{exp} = \frac{Nu_{exp}}{Nu_m(Re_{exp}) \cdot Nu_m(q_{exp}) \cdot Nu_m(k_{t_{exp}}) \cdot Nu_m(k_{l_{exp}})}, \quad (3.3)$$

де Nu_{exp} – критерій Nu, який був виміряний при значеннях параметрів Re_{exp} , q_{exp} , $r_{t_{exp}}$ та $r_{l_{exp}}$;

$Nu_m(Re_{exp})$, $Nu_m(q_{exp})$, $Nu_m(r_{t_{exp}})$, $Nu_m(r_{l_{exp}})$ – значення функцій $Nu_m(P_i)$, які відповідають цим параметрам.

Адекватність рівняння (3.1) оцінюється за критерієм Фішера – F , який дорівнює відношенню дисперсії адекватності до дисперсії

відтворюваності експерименту (розраховується за результатами повторних вимірювань у 4-х дослідах).

Значення Nu_{exp} в кожному досліді визначається за формулою $Nu_{exp} = (\alpha_t \cdot d)/\lambda$; при цьому коефіцієнт тепловіддачі α_t вимірюється за допомогою спеціально розроблених методики та експериментальної установки, в якій імітуються умови розбавлення ВГ повітрям у тунелі при значеннях числа Рейнольдса від 4000 (мікротуннелі) до 35000 (повнопоточні тунелі).

3.1.1 Методика визначення коефіцієнта тепловіддачі на внутрішній стінці тунелю α_t . Середній коефіцієнт тепловіддачі α_t визначається методом ентальпії [66], як відношення середніх за довжиною трубопроводу розбавлення робочого тіла (повітря) щільності теплового потоку крізь стінку – q_m та температурного напору – $\bar{\vartheta}_m$:

$$\alpha_t = \frac{q_m}{\bar{\vartheta}_m} = \frac{\frac{1}{L} \int_0^L q \cdot dl}{\frac{1}{L} \int_0^L \bar{\vartheta} \cdot dl}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}),$$

де $L = 10 \cdot d_t$ – довжина трубопроводу розбавлення – тунелю з діаметром d_t , м;

$\bar{\vartheta}$ – поточний температурний напір, °C.

Середня щільність теплового потоку через стінку тунелю визначається як середнєарифметичне з щільностей теплових потоків, вимірюваних на п'яти рівних ділянках:

$$q_{cp} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^5 q_i \cdot \Delta L = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 q_i, \text{ Вт}/\text{м}^2,$$

де $i = 1 \dots 5$ – індекс елементарної ділянки;

q_i – щільність теплового потоку на i -й ділянці, Вт/м²;

$\Delta L = 2 \cdot d_t$ – довжина i -ої ділянки, м.

Щільності теплових потоків q_i визначаються за допомогою вираження:

$$q_i = \frac{Q_i}{f_i} = \frac{Q_i}{2\pi d_t^2}, \text{ Вт}/\text{м}^2,$$

де Q_i – кількість тепла, що передано крізь стінку на i -й ділянці, Вт;
 f_i – площа поверхні i -ї ділянки, м².

Величина Q_i визначається за допомогою рівняння теплового балансу по зміні температури зовнішнього охолоджувача стінки – води на i -ій ділянці:

$$Q_i = (t_{cwi} - t_{cw(i-1)}) \cdot G_{cw} \cdot c_p, \text{ Вт},$$

де $t_{cwi}, t_{cw(i-1)}$ – температура охолоджувача в кінці та на початку i -ої ділянки, відповідно, °С;

$c_p = 4,19$ кДж/(кг·°С) – ізобарна теплоємність охолоджувача;

G_{cw} – масова витрата охолоджувача, кг/с.

Середній по довжині тунелю температурний напір обчислюється за виміряними значеннями температурних напорів на межах окремих ділянок з використанням формули трапецій:

$$\bar{\vartheta}_{cp} = \frac{1}{5} \left(\frac{\bar{\vartheta}_0 + \bar{\vartheta}_5}{2} + \sum_{i=1}^4 \bar{\vartheta}_i \right), \text{ °С},$$

де $\bar{\vartheta}_0, \bar{\vartheta}_5$ – температурні напори в початковому і кінцевому перетинах тунелю, °С.

$\bar{\vartheta}_i$ – температурний напір в кінці i -ої ділянки, °С.

Температурні напори в кінці кожної ділянки розраховуються за допомогою залежності:

$$\bar{\vartheta}_i = \bar{t}_i - t_{wi} = \left(\bar{t}_0 - \frac{\sum_{j=0}^i Q_j}{G_t \cdot c_p} \right), \text{ °С},$$

де \bar{t}_i – середньомасова температура потоку розбавленого робочого тіла в кінці i -ї ділянки, °С;

t_{wi} – температура стінки тунелю кінці i -ї ділянки, °С;

\bar{t}_0 – початкова середньомасова температура потоку розбавленого робочого тіла, °С;

$j = 0 \dots i$ – поточний індекс ділянки;

G_t – масова витрата потоку розбавленого робочого тіла, кг/с.

Температура \bar{t}_0 визначається за формулою:

$$\bar{t}_0 = \frac{\int_0^{F_t} \rho \cdot w \cdot t \cdot df}{\int_0^{F_t} \rho \cdot w \cdot df} = \frac{G_h \cdot t_h - G_c \cdot t_c}{G_t}, \text{ } ^\circ\text{C},$$

де ρ , w , t – щільність (кг/м³), швидкість (м/с) і температура потоку (°C) на вході в тунель;

F_t – площа поперечного перетину тунелю, м²;

G_h , t_h – масова витрата (кг/с) і температура (°C) нагрітого потоку робочого тіла;

G_c , t_c – масова витрата (кг/с) і температура (°C) потоку розбавляючого повітря.

3.1.2 Експериментальна установка для вимірювання коефіцієнта тепловіддачі стінки тунелю α_t . Основними елементами установки (рис. 3.1–3.5) є:

а) система розбавлення робочого тіла (нагрітого повітря, що імітує ВГ) – зменшена у 15,5 разів копія еталонного тунелю, в яку входять:

– розбавляючий тунель (РТ) – трубопровід з нержавіючої сталі з внутрішнім діаметром $d_t = 30$ мм, товщиною стінки 1,5 мм і довжиною ділянки змішування 300 мм; трубопровід підведення (ТП) нагрітого повітря – трубка з нержавіючої сталі з внутрішнім діаметром 6 мм, товщиною стінки 1 мм;

– газодувки ГД1 і ГД2, що створюють масові витрати потоків у тунелі і ТП – G_t і G_h ; регулятори потоків – РР1 і РР2; нагрівач Н (потужністю 3 кВт) з регулятором напруги РН;

– вимірювачі витрат потоків нагрітого і холодного повітря – Р1 і Р2 з класом точності 1,5; датчики температури холодного і нагрітого повітря – t_c і t_h ;

б) система охолодження тунелю, що включає:

– герметичний корпус – трубу з нержавіючої сталі, теплоізовльовану зовні шаром асбесту товщиною 25 мм; між зовнішнім діаметром тунелю і внутрішнім діаметром корпусу утворений зазор товщиною 1,2 мм, по якому рухається охолоджувач; фторопластові перегородки, що розділяють корпус на 5 рівних ділянок довжиною $2 \cdot d_t$ (всередині перегородок встановлені датчики t_w і t_{cw});

– побудник витрати охолоджувача, який забезпечує постійність його масової витрати на рівні $G_{cw} = 0,08$ г/с;

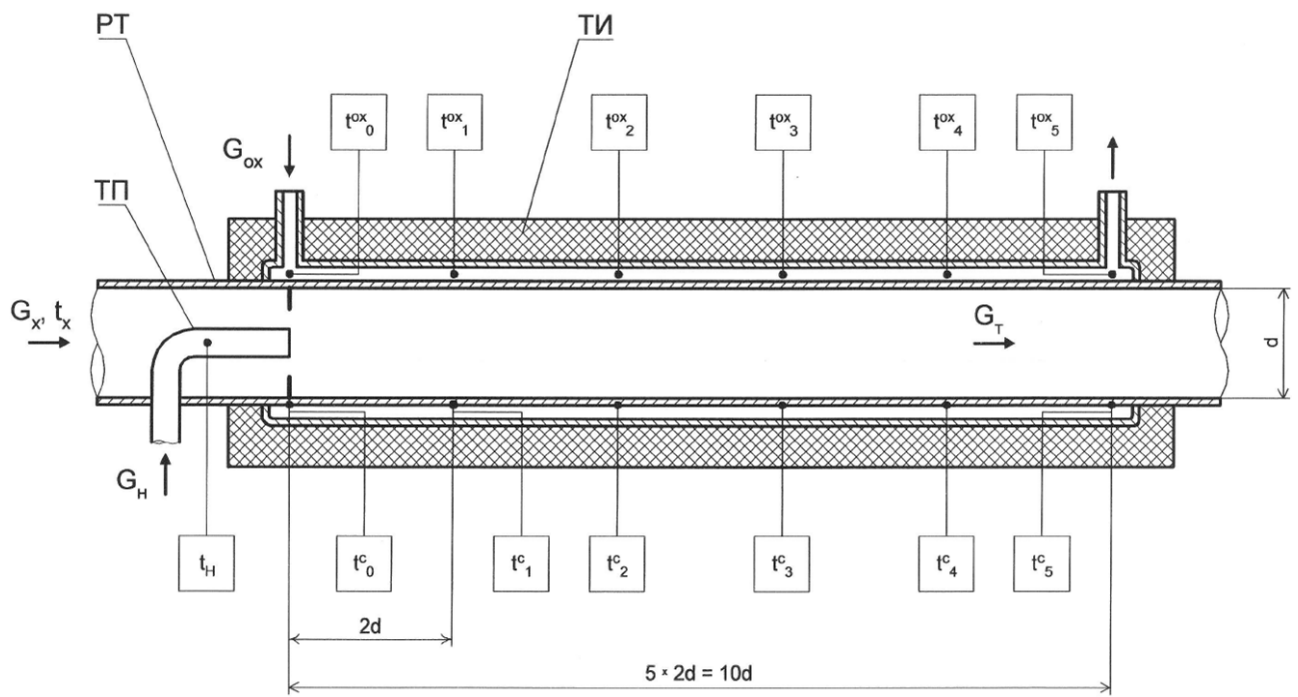


Рис. 3.3. Схема установки датчиків температури та підводу охолоджувача

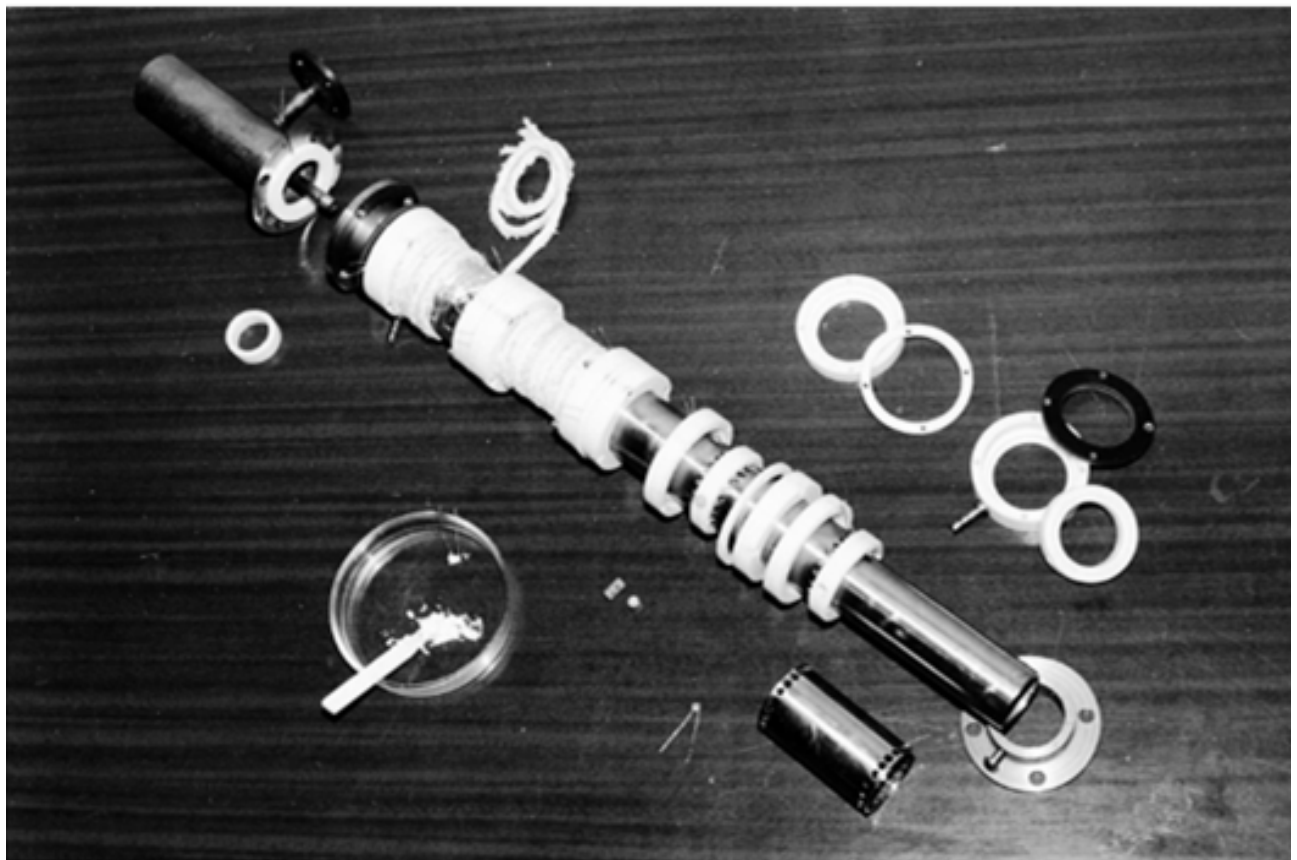


Рис. 3.4. Монтаж експериментальної установки для визначення коефіцієнту α_i

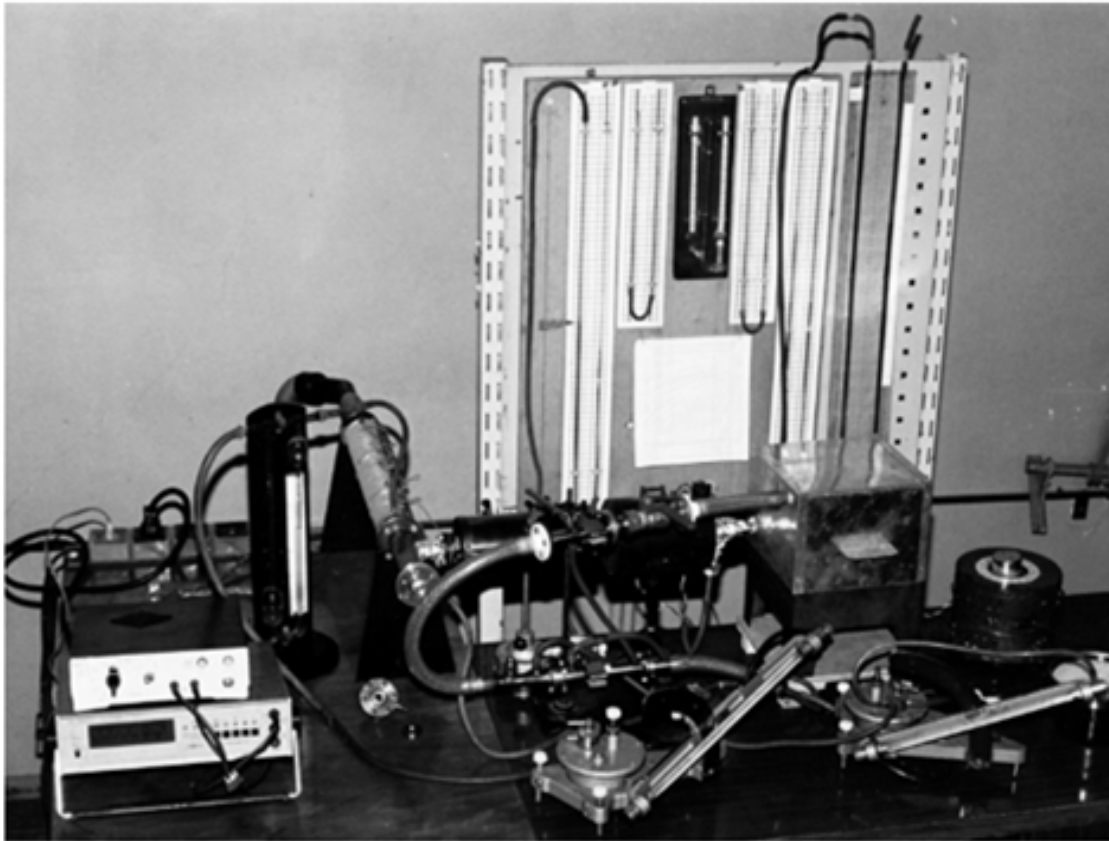


Рис. 3.5. Загальний вигляд установки для досліджень тепловіддачі в тунелі

Експериментальна установка дозволяє:

- створювати масові витрати в тунелі і ТП в діапазонах: $G_t = 1,4 \dots 25$ г/с і $G_h = 0,1 \dots 4$ г/с та забезпечувати розбавлення робочого тіла повітрям з коефіцієнтом $q = 5 \dots 15$ при $Re \cdot 10^{-3} = 4 \dots 35$;
- нагрівати робоче тіло до температури $t_h = 100 \dots 300$ °С;
- забезпечувати вимірювання коефіцієнта тепловіддачі α_t з відносною похибкою – 3...8%, яка обумовлена похибками витратомірів P1 та P2 і датчиків температури t_{cw} , t_w і t_h .

На рис. 3.6 представлені результати вимірювання величини α_t при умовах розбавлення робочого тіла: $G_t = 2,5$ г/с; $G_h = 0,25$ г/с; $t_h = 300$ °С: $q_m = 72,4$ Вт/м²; $\bar{\vartheta}_m = 6,8$ °С; $\alpha_t = 10,6$ Вт/(м²·°С).

3.2 Макетні зразки автоматизованих частковопоточних систем контролю викидів ТЧ з ВГ дизелів

Макетні зразки розроблені у відповідності до вимог Правил R-49 з врахуванням зроблених рекомендацій щодо підвищення ефективності визначення показника PT , наведених у 1-й главі.

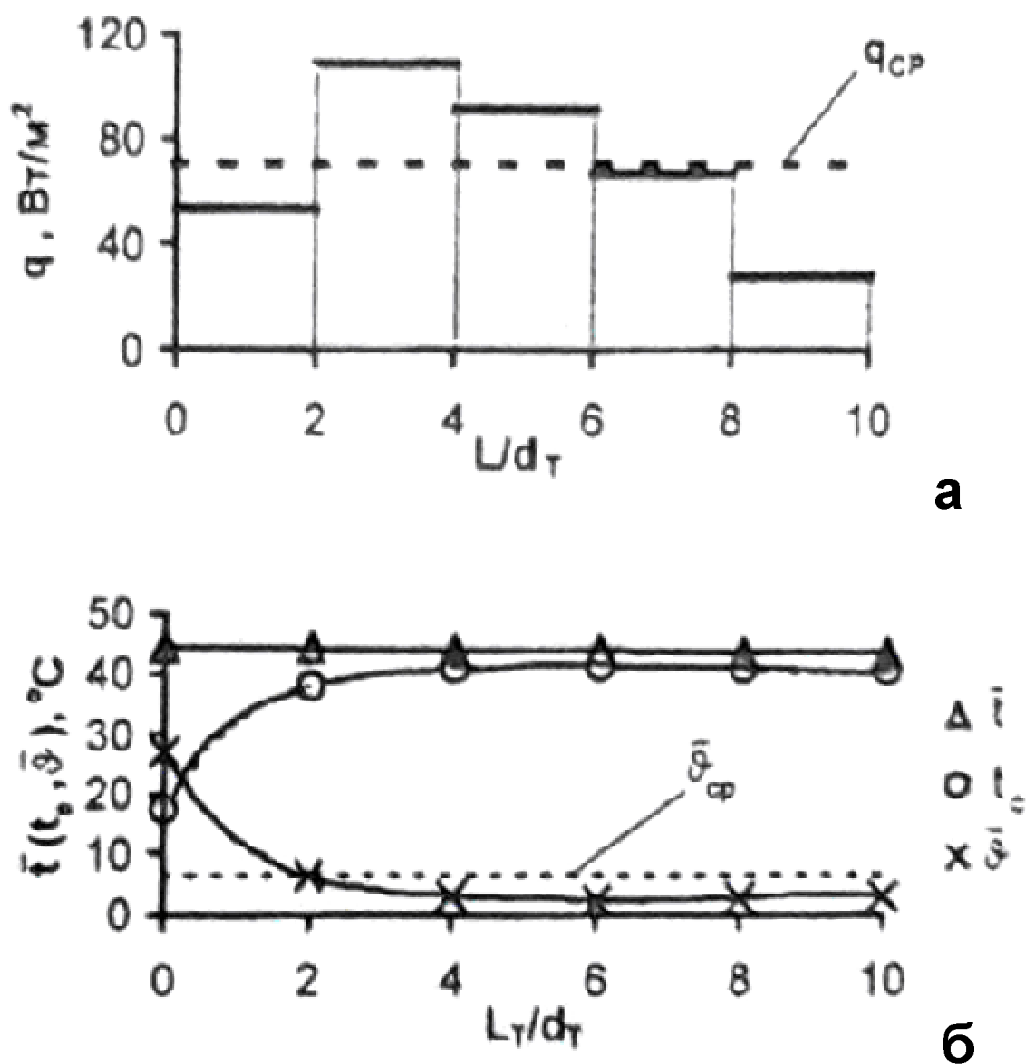


Рис. 3.6. Результати визначення середнього коефіцієнта тепловіддачі α_t :
 а – визначення середньої щільності теплового потоку крізь стінку тунеля – q_m ;
 б – визначення середнього температурного напору $\bar{\vartheta}_m$.

3.2.1 Мінітунель з ізокінетичним пробовідбірником (ІКП) МТ-1 (рис. 3.7) призначений для вимірювань викидів ТЧ від дизелів, масова витрата ВГ яких становить 70...650 кг/год; точність вимірювань: показника PT – $\pm 4,5\%$; викидів ТЧ на окремих режимах – $\pm 5...12\%$ (зі збільшенням навантаження точність зростає).

3.2.1.1 Принцип дії, основні елементи та технічні характеристики МТ-1. Принцип дії мінітунелю МТ-1 полягає у наступному (рис. 3.8). З вихлопної труби дизеля – ВГ відбирається частка ВГ, яка через ІКП та трубопровід транспортування проби – ТП потрапляє у розбавляючий тунель – РТ, де відбувається розбавлення ВГ чистим атмосферним повітрям.

Під час відбору ВГ швидкості потоків у ІКП та ВТ є рівними, що забезпечується підтримкою перепадів статичних тисків між цими трубопроводами – ΔP_{ik} на заданому рівні (залежить від режиму роботи дизеля та визначається за експериментальною залежністю (4.2)). Контроль величини ΔP_{ik} здійснюється чуттєвим датчиком різниці тисків (з похибкою ± 2 Па) [73–74].

Частка ВГ, що відбирається з ВТ являє собою коефіцієнт відбору ВГ – r_{exh} , який визначається для даного режиму відбору проб, як відношення площ поперечних перетинів ІКП та ВТ. При цьому масова витрата ВГ, що потрапляють у тунель – G_{exh}^t , визначається за формулою:

$$G_{exh}^t = r_{exh} \cdot G_{exh},$$

де G_{exh} – масова витрата повного потоку ВГ у ВТ.

Регулювання потоку, що протікає у ТП, та величини ΔP_{ik} здійснюється регулюючим клапаном РК2. Температура ВГ у ТП підтримується такою самою, як у ВТ, за рахунок теплової ізоляції зовнішньої поверхні ТП.

Газовий потік у тунелі створюється газодувкою об'ємного ГД1 та регулюється методом перепустку за допомогою регулюючого клапану РК1. Масова витрата повітря на вході в тунель – G_{dil} контролюється витратоміром V_1 (колектором). Повітря, яким розбавляються ВГ, очищується від газоподібних вуглеводнів та механічних домішок у двохкаскадному фільтрі Ф1, в якому реалізовані адсорбційний (з використанням активованого вугілля) та механічний (з використанням бумажного фільтруючого елемента) методи очищення газового потоку.

Для визначення коефіцієнту розбавлення ВГ – q використовується формула:

$$q = \frac{G_{dil} + r_{exh} \cdot G_{exh}}{r_{exh} \cdot G_{exh}}.$$

Розбавлення ВГ повітрям відбувається на прямолінійній ділянці, довжина якої складає 10 діаметрів тунелю; в початковому перетині цієї ділянці для покращення перемішування ВГ з повітрям встановлено діафрагму, площа отвору якої дорівнює 50% від площі поперечного перетину тунелю; в кінці ділянці на осьовій лінії тунелю встановлено пробовідбірник лінії відбору проб ТЧ – ЛВ.

Масова витрата проби у ЛВ створюється газодувкою ГД2 та контролюється витратоміром В₂. Для захисту ГД2 від забруднення ТЧ перед нею встановлено фільтр Ф₂ з механічним фільтруючим елементом.

ЛВ має два канали, один з яких в залежності від етапу випробувань є відкритим, інший закритим. Це – байпасний (відкритий на етапі підготовки проби до аналізу) та робочий, в якому встановлено патрон з фільтром – ПФ (відкритий на етапі відбору проб ТЧ) канали. Відкриття-закриття каналів здійснюється шаровими кранами ШК1 та ШК2, час спрацювання яких становить 0,5 с. В байпасному каналі встановлено регулятор тиску – дросель Д, який забезпечує відсутність гідравлічного удару у ЛВ при перемиканні шарових кранів.

Для відбору ТЧ використовується спеціальний фільтр на скловолоконній основі з фторопластовим покриттям діаметром 70 мм. Маса ТЧ визначається як приріст маси робочого фільтру за час випробувань за допомогою спеціального обладнання (описане нижче).

Мінітунель МТ-1 являє собою вимірювальний комплекс, до складу якого входять 3 основні елементи:

1) *система розбавлення повітрям частки потоку ВГ – 1,8% або 5,5% (в залежності від діаметру трубопроводу з ІКП);* характеристики системи:

а) геометричні – діаметр (D) × довжина (L): ТП – 1,2×95 см, РТ – 9×90 см, ЛВ – 1,6×100 см;

б) газодинамічні – масові витрати потоків: у ТП – 4...12 кг/год, у РТ – 60...120 кг/год, у ЛВ – 1,4...4,5 кг/год; діапазон варіювання коефіцієнту q – 4...30;

2) *електронний модуль керування (ЕМК), який виконує функції регулювання та контролю процесів відбору частки ВГ, розбавлення її повітрям та відбору проб ТЧ; інформація та функції керування з цього модулю надаються до персонального комп'ютера (ПК), для якого розроблено відповідне програмне забезпечення;*

3) *камера для стабілізації та зважування фільтрів (рис. 3.9).*

Це обладнання забезпечує потрібні умови для визначення маси ТЧ, які відповідають вимогам нормативних документів [1-3]. Камера може використовуватись у герметичному режимі; для цього вона має теплоізолюваний корпус (ізолятор – шар пінопласту товщиною 30 мм), закритий прозорою кришкою з органічного скла. Для доступу персонала до аналітичних ваг та фільтрів у процесі їх зважування у кришці камери герметично закріплені гумові рукавички.

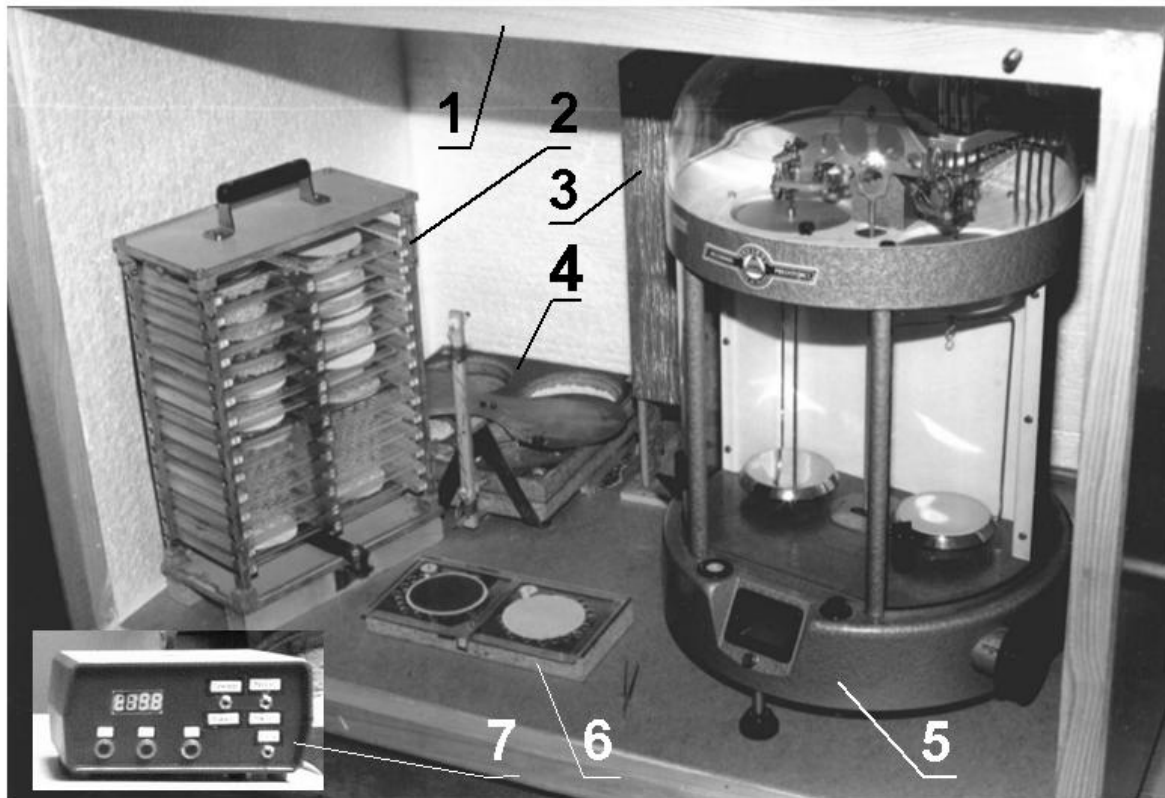


Рис. 3.9. Основні елементи камери для для стабілізації та зважування фільтрів:
 1 – корпус; 2 – касета з фільтрами; 3 – газохід з вентилятором та нагрівачем; 4 – регулятор поглинання-виділення вологи; 5 – аналітичні ваги; 6 – підставка для фільтрів; 7 – електронний модуль керування температурним режимом.

Всередині камери знаходяться:

- система кондиціонування з вентилятором, який забезпечує рівномірне перемішування повітря в камері та відсутність градієнту температур у будь-якій її точці;

- система регулювання температури з нагрівачем потужністю 100 Вт, яка забезпечує підтримку температури стабілізації фільтрів всередині камери – t_{st} на заданому рівні (у діапазоні 18...40 °С) з точністю ± 1 °С;

- система регулювання відносної вологості повітря з регулятором поглинання-виділення вологи (поглинач вологи – селікагель, генератор вологи – дисцильована вода); данна система забезпечує підтримку відносної вологості в камері – φ_{st} на заданому рівні (у діапазоні 40...90%) з точністю ± 3 %;

- аналітичні ваги з похибкой зважування $\pm 0,1$ мг;

- касета для зберігання робочих фільтрів (ємністю 30 пар спеціальних фільтрів);

- підставка для фіксації панелі з фільтрами;
- пінцет.

Камера має габарити: $L, B, H - 800 \times 600 \times 600$ мм; маса камери (з аналітичними вагами) – 40 кг. Тривалість безперервного періоду стабілізації фільтрів може складати до 36 годин. Для зручності транспортування камери на її верхній стінці встановлені дві ручки.

Для контролю і управління температурним режимом камери використовується електронний модуль – мікропроцесорний блок.

МТ-1 був змонтований та випробувався на двох стендах: безмоторному (з імітацією роботи дизеля) та моторному стенді дизеля 1Ч12/14 (характеристики стенду: $n_{idle} = 800 \text{ хв}^{-1}$; $n_{nom} = 1500 \text{ хв}^{-1}$; $M_{k(max)} = 50 \text{ Н}\cdot\text{м}$).

3.2.1.2 Програмне забезпечення мінітунелю МТ-1.

Керування МТ-1 здійснюється у відповідності до алгоритму його роботи (рис. 3.10) за допомогою ПК та програмного забезпечення (рис. 3.11), яке має зовнішній вигляд вікон-екранів та дозволяє виконувати такі операції:

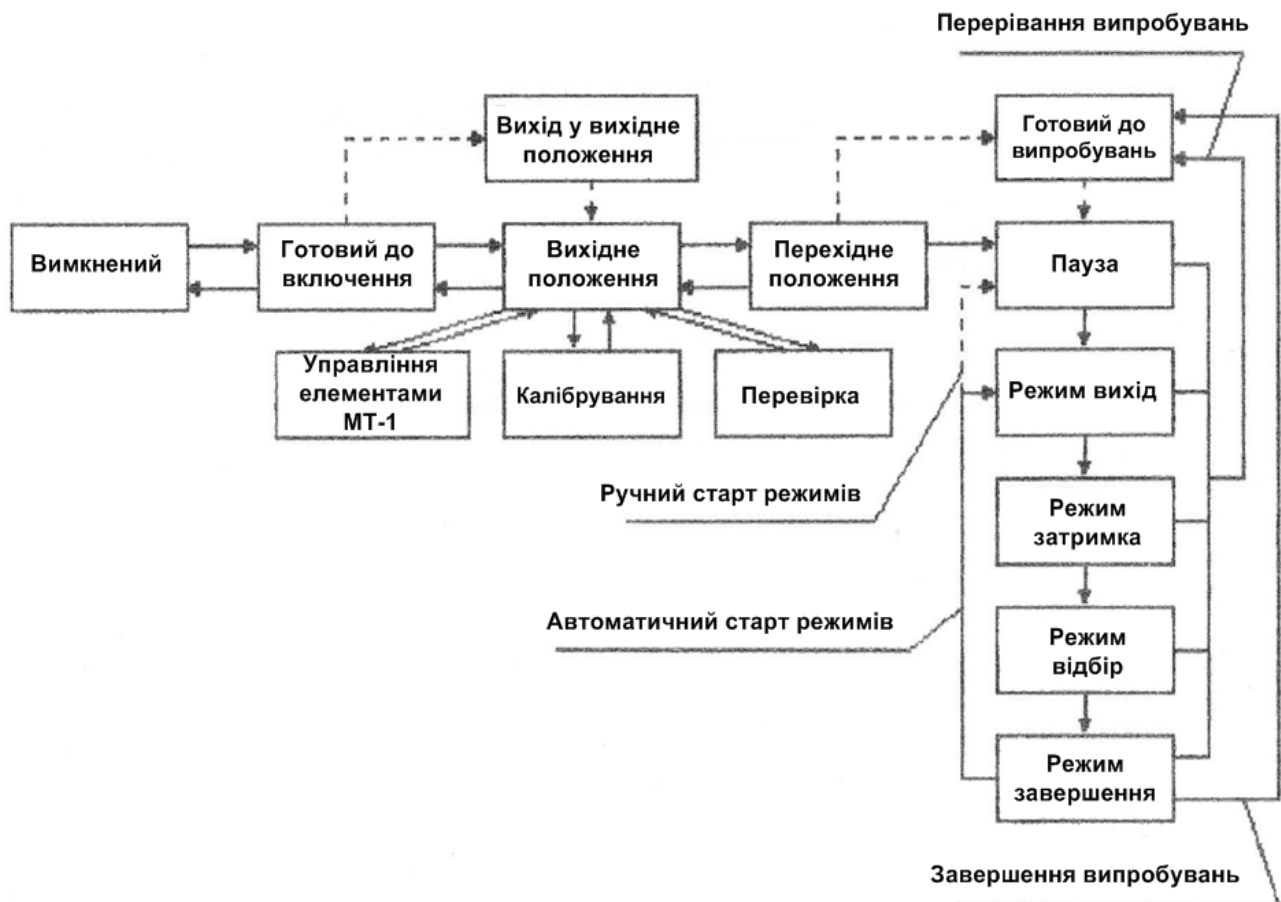


Рис. 3.10. Алгоритм роботи мінітунелю МТ-1

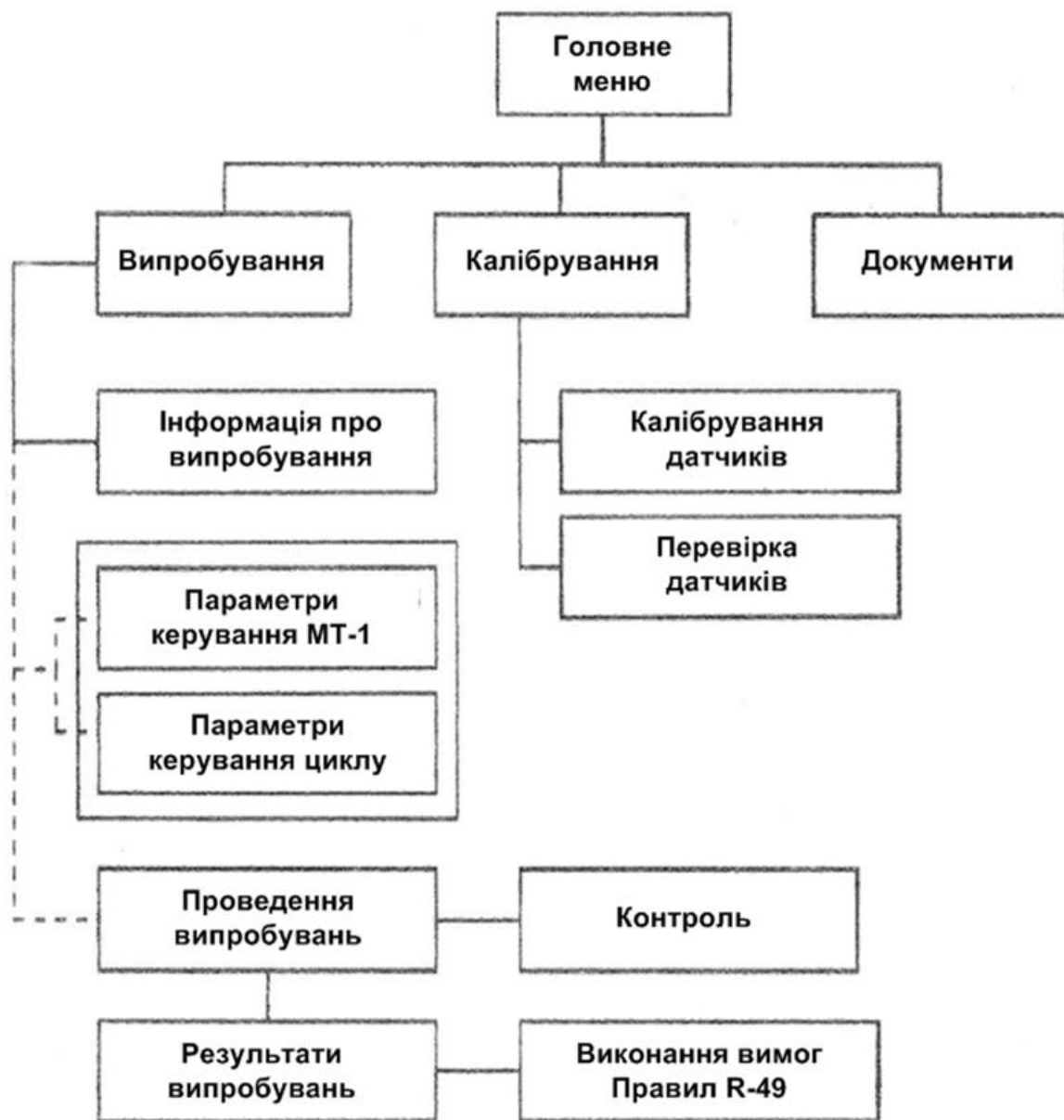


Рис. 3.11. Структура програмного забезпечення мінітунеля МТ-1

- 1) введення інформації про випробування та параметри керування мінітунелем (рис. 3.12, 3.13);
- 2) формування структури випробувального циклу (рис. 3.14);
- 3) поточний контроль за станом виконавчих механізмів та датчиків (рис. 3.15, 3.16);
- 4) калібрування та перевірка датчиків температури та тиску з можливістю формування графіків (рис. 3.17, 18);
- 5) реєстрація контрольованих значень параметрів МТ-1 та дизеля протягом кожного режиму випробувань;
- 6) розрахунок викидів ТЧ на окремих режимах випробувань та середньоексплуатаційного викиду ТЧ за цикл випробувань;

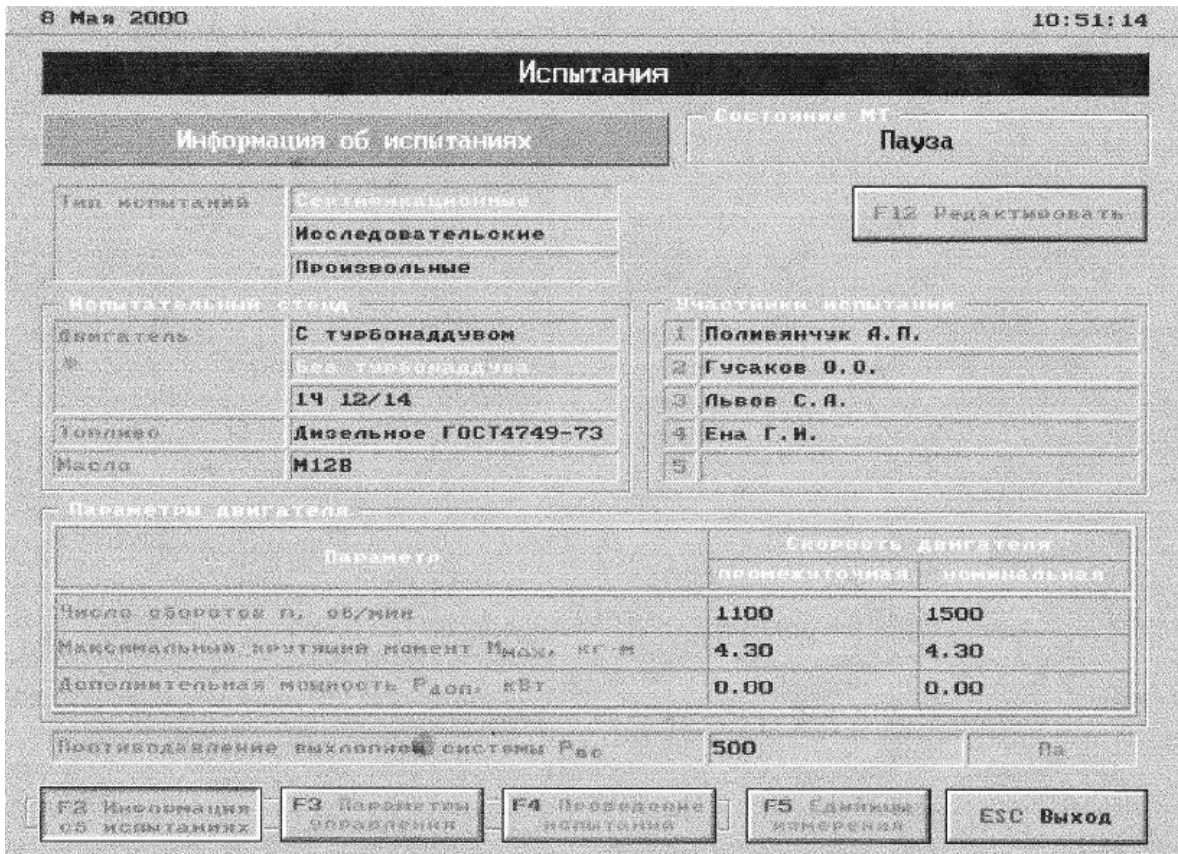


Рис. 3.12. Экран «Информация про випробування»

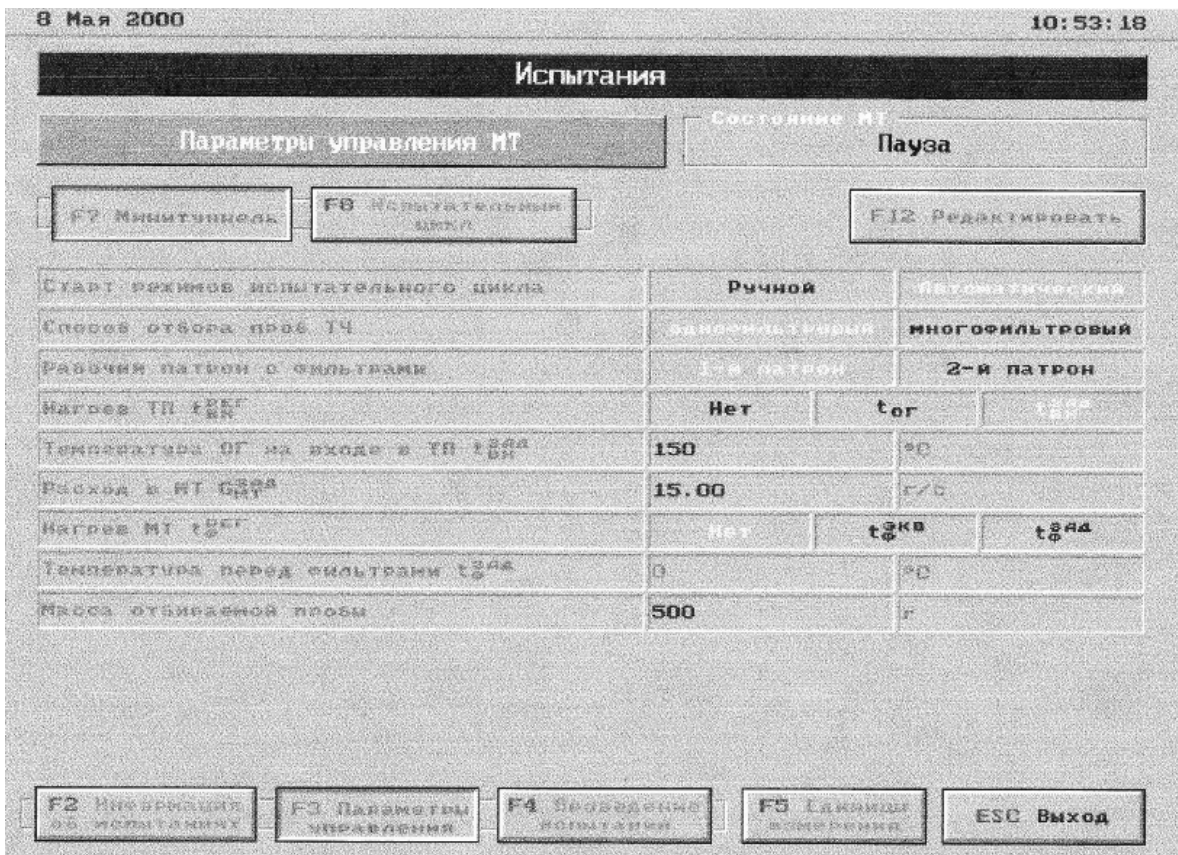


Рис. 3.13. Экран «Параметри управління ИТ»

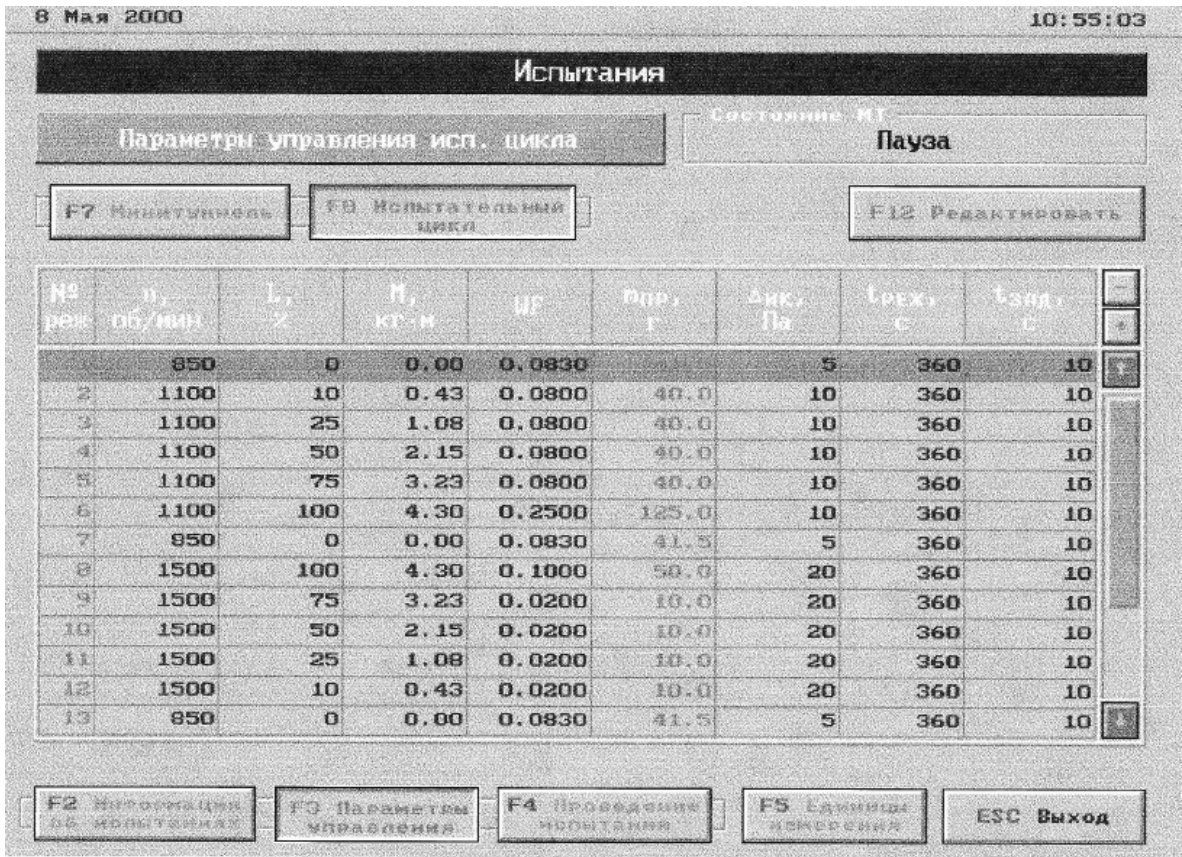


Рис. 3.14. Экран «Параметры управления испытательным циклом»

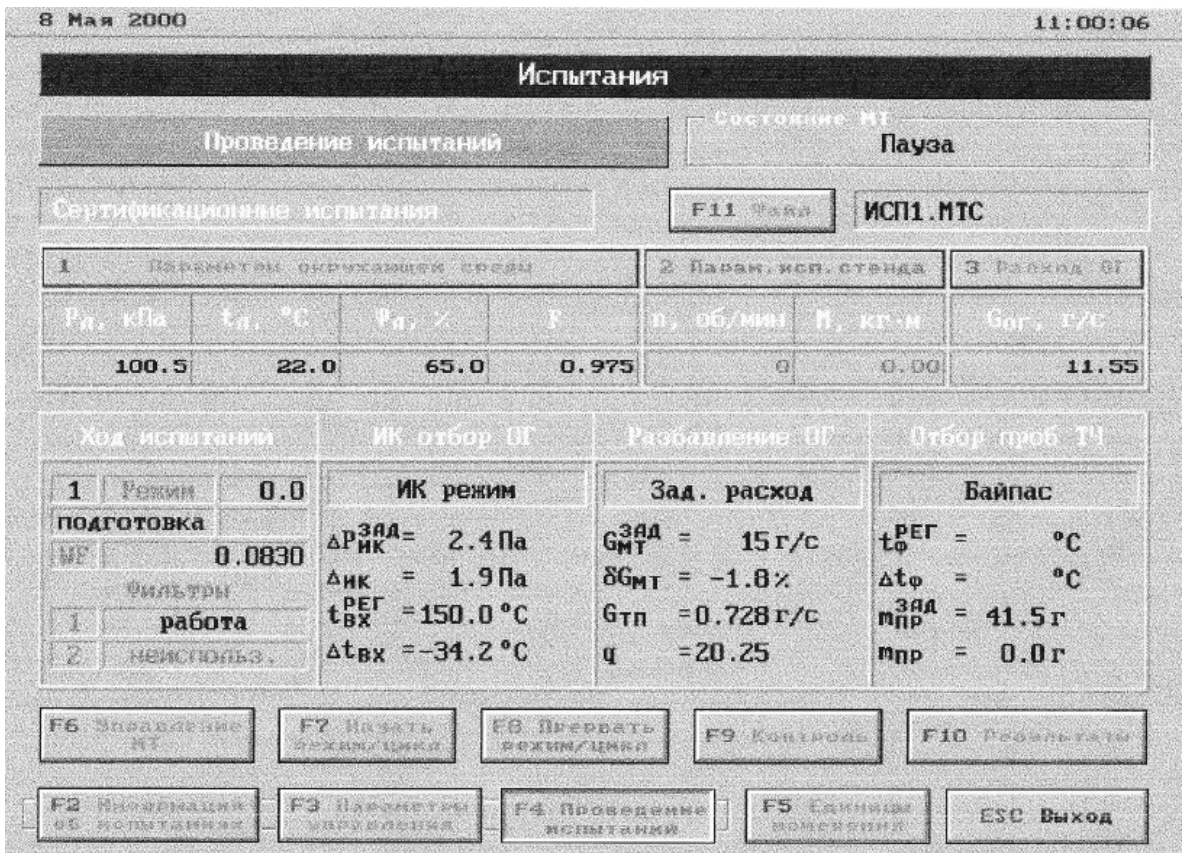


Рис. 3.15. Экран «Проведения испытаний»

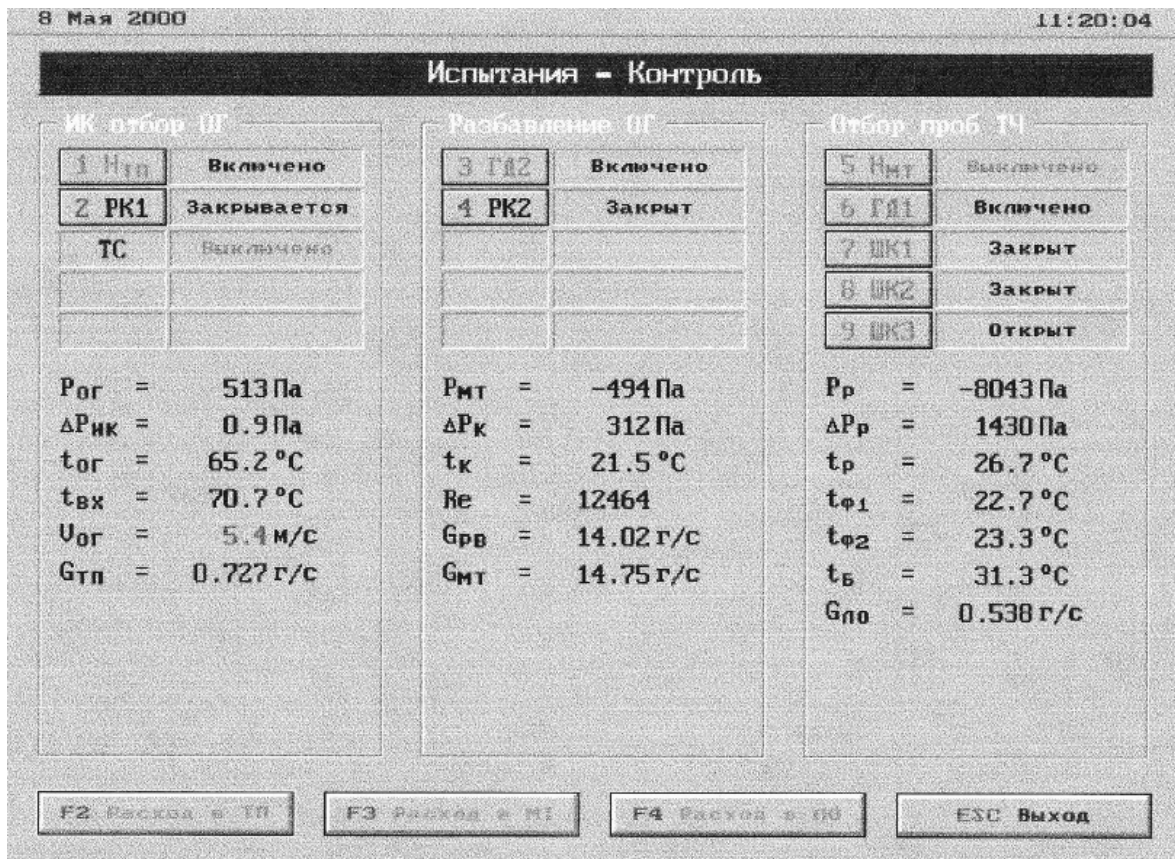


Рис. 3.16. Экран «Контроль»



Рис. 3.17. Экран «Калибрування датчика тиску»

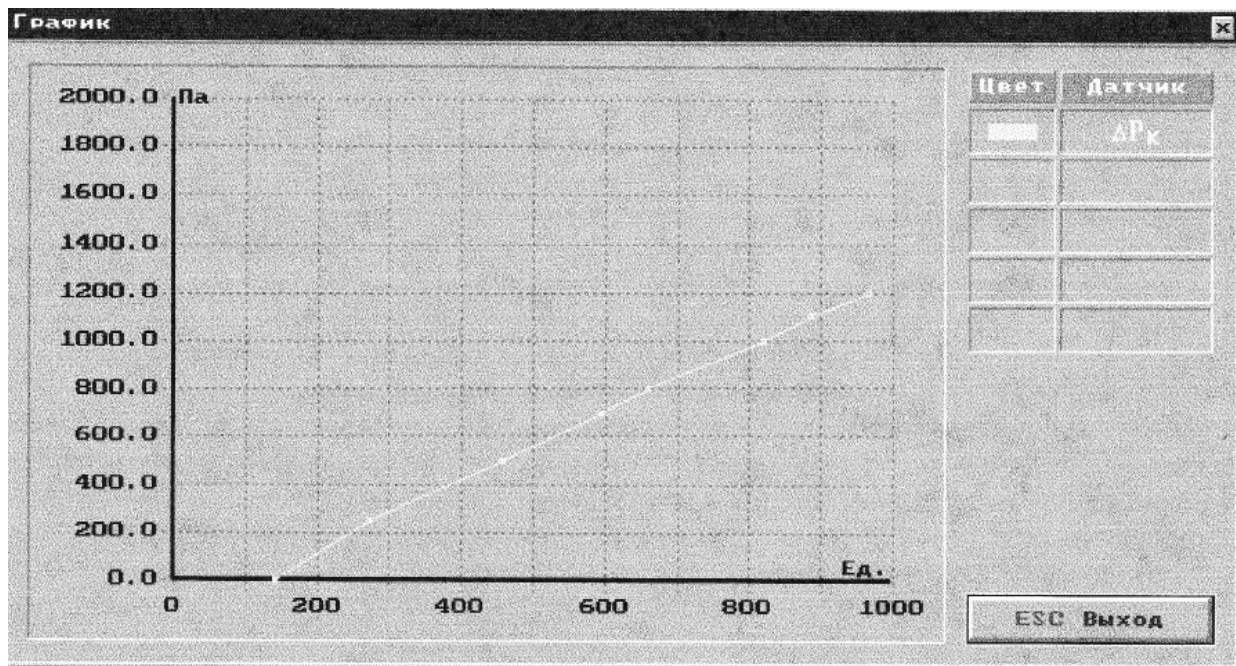


Рис. 3.18. Экран «Калибровальная характеристика датчика тиску»

7) контроль виконання вимог Правил ЄЕК ООН R-49 в ході виконання циклу 13-Mode Cycle;

8) протоколювання результатів випробувань з можливістю їх роздрукування.

Для зручності використання програмного забезпечення МТ-1 розроблено відповідну інструкцію по роботі з ним, в якій детально описані всі можливості програми та порядок виконання операцій.

3.2.1.3 Експериментальне відпрацювання МТ-1 на гальмівному стенді дизеля 1Ч12/14 (див. рис. 3.7) дозволило оцінити точність цієї вимірювальної системи та дослідити вплив режиму роботи дизеля на масові викиди та концентрації ТЧ.

Оцінювання точності МТ-1 при вимірюванні викидів ТЧ на окремих режимах роботи дизеля. Для 3-х контрольних режимів випробувань – холостого ходу, з середньою потужністю ($\bar{n} = 0,5$, $\bar{L} = 0,5$) та номінальною потужністю проведено серії з 4-х вимірювань викидів ТЧ – PT_{massi} (i – індекс режиму) та розраховано відповідні похибки відтворюваності – δPT_{massi}^{exh} . В ході випробувань застосовувався режим розбавлення ВГ – DM1; фільтри з ТЧ стабілізувались та зважувались в однакових умовах – при $t_{st} = 20,5 \pm 0,5$ °C, $\tau_{st} = 2$ год.

Результати досліджень (табл. 3.3) показали, що похибки δPT_{massi}^{exh} знаходяться в діапазоні – 4...20%. При цьому найменш

точними є вимірювання викиду ТЧ на режимі холостого ходу (з причини значної кількості РОФ у складі ТЧ).

Таблиця 3.3

Результати досліджень похибок відтворюваності експерименту при використанні МТ-1

Режим	№ _д	PT_{massi} , г/год	\overline{PT}_{massi} , г/год	$S_{PT_{massi}}$, г/год	ΔPT_{massi} , г/год	δPT_{massi} , %
$\bar{n} = 0,$ $\bar{L} = 0$	1	4,41	4,61	0,29	0,65	14,2
	2	4,94				
	3	4,83				
	4	4,58				
$\bar{n} = 0,5,$ $\bar{L} = 0,5$	1	9,28	9,69	0,28	0,66	6,8
	2	9,84				
	3	9,61				
	4	10,02				
$\bar{n} = 1,$ $\bar{L} = 1$	1	17,73	17,75	0,33	0,78	4,4
	2	17,21				
	3	17,94				
	4	18,11				

Примітка. В таблиці позначені: PT_{massi} , $S_{PT_{massi}}$, ΔPT_{massi} та δPT_{massi} – середнє значення, СКВ, ширина довірчого інтервалу та похибка визначення викиду ТЧ на i -му режимі, відповідно.

Оцінювання точності МТ-1 при вимірюванні середньоексплуатаційного викиду ТЧ з ВГ дизеля. Проведено серію з 3-х випробувань дизеля за циклом 13-Mode Cycle, який використовувався при сертифікації автомобільних дизелів до введення в дію норм EURO-III (з 2000 р. замінений циклом ESC). При цьому в двох випробуваннях застосовано багатофільтровий метод відбору ТЧ (з використанням окремого фільтру на кожному режимі циклу), а в третьому випробуванні – однофільтровий метод відбору ТЧ (з використанням одного фільтру за весь цикл) (рис.3.19, 3.20).

PT_{massi} , г/год

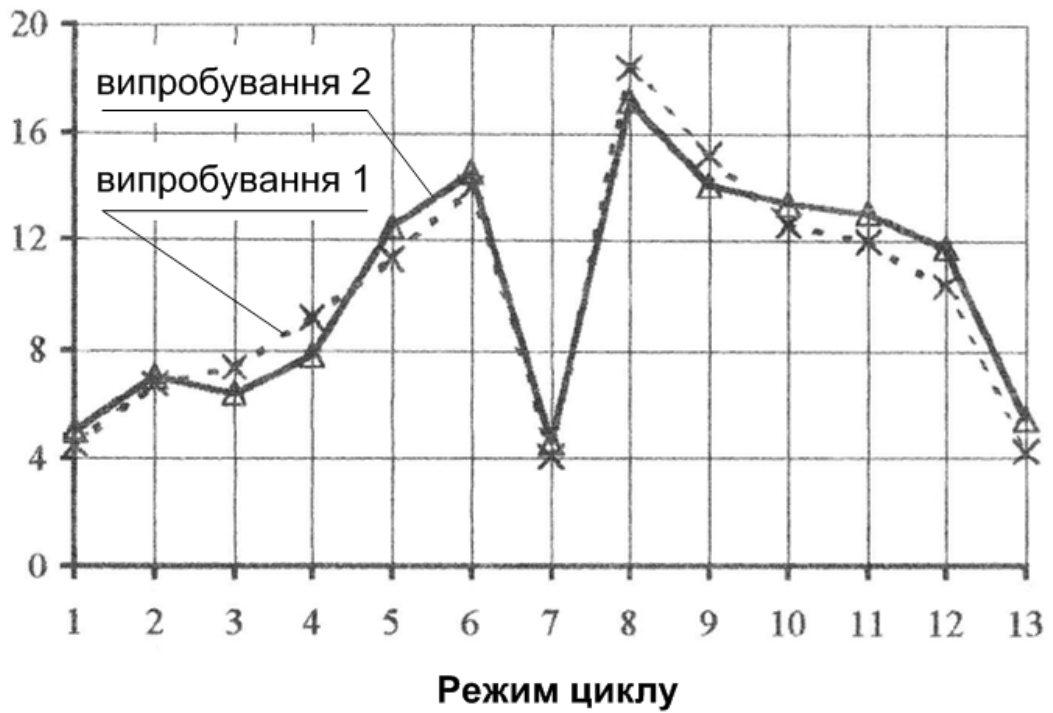


Рис. 3.19. Викиди ТЧ на режимах циклу 13-Mode Cycle, визначені МТ-1

$C_{рт}$, г/м³

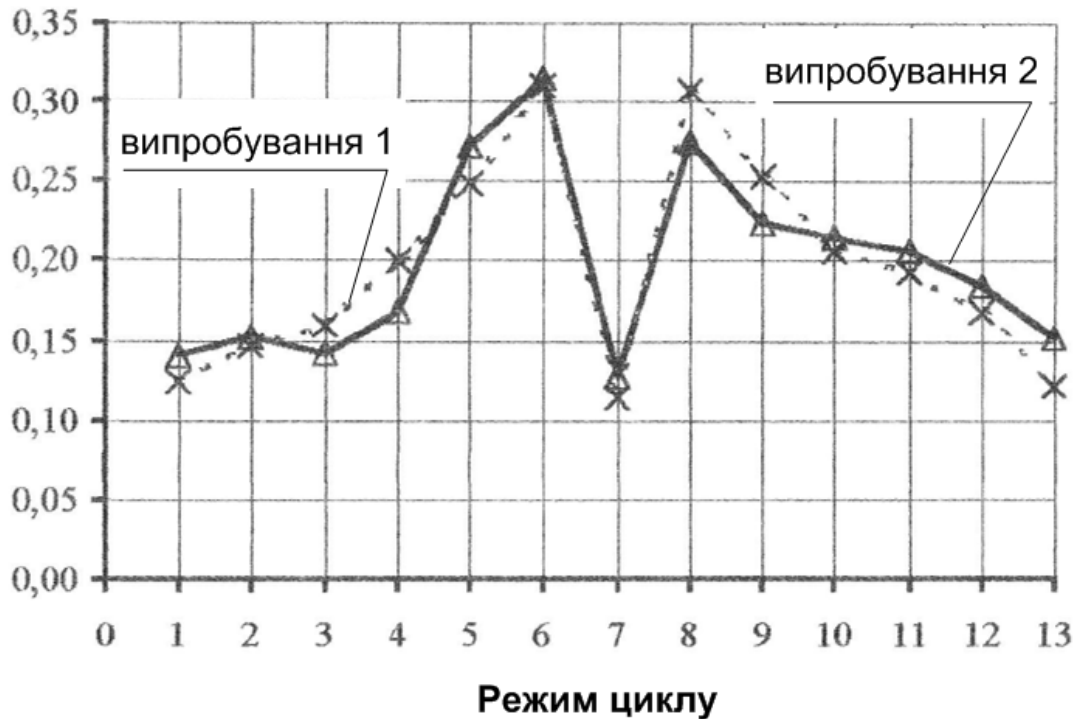


Рис. 3.20. Концентрації ТЧ на режимах циклу 13-Mode Cycle, визначені МТ-1

Багатофільтровий метод відбору ТЧ дозволяє визначати викиди ТЧ на окремих режимах випробувального циклу (див. формулу (1.2)); при цьому середній за цикл викид ТЧ дизеля розраховується наступним чином:

$$PT_{mass} = \sum_{i=1}^n WF_i \cdot PT_{massi},$$

де i – індекс режиму випробувань,
 n – кількість режимів у циклі.

В результаті випробувань визначено викиди та концентрації ТЧ дизеля 1Ч12/14 на режимах циклу та встановлено середньоексплуатаційний викид ТЧ – PT :

3,77 і 3,84 г/кВт·год (при багатофільтровому методі відбору ТЧ) та
 3,67 г/кВт·год (при однофільтровому методі відбору ТЧ).

За результатами вимірювань встановлено похибку відтворюваності експерименту при визначенні показника PT міні-тунелем МТ-1:

$$\delta PT = \frac{\Delta PT}{\overline{PT}} \cdot 100\% = \frac{t_{0,95} \cdot S_{PT}}{\frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 PT_j} \cdot 100\% = \frac{2,92 \cdot 8,55 \cdot 10^{-2}}{3,77} \cdot 100\% = 6,7\%,$$

де ΔPT – ширина довірчого інтервалу при визначенні показника PT ;
 $\overline{PT} = 3,77$ г/кВт·год – середнє значення величини PT в серії вимірювань;

$t_{0,95} = 2,92$ – величина коефіцієнта Стюдента при довірчій вірогідності 0,95 та 2-х ступенях свободи;

j – індекс вимірювання в серії;

$S_{PT} = 8,55 \cdot 10^{-2}$ – СКВ величини PT в окремому випробуванні:

$$S_{PT} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (PT_j - \overline{PT})^2}{n - 1}},$$

де $n = 3$ – кількість випробувань.

Дослідження впливу режиму роботи дизеля ІЧ12/14 на масовий викид ТЧ з ВГ. Експериментально оцінено вплив параметрів, які характеризують режим роботи дизеля – \bar{n} і \bar{L} та відносного відхилення масової витрати розбавлених ВГ у тунелі – G_t від потрібного значення (при якому $t_{f(max)} = 50$ °С) – δG_t на масові викид ТЧ – PT_{masssi} при режимі розбавлення ВГ – $DM1$.

Параметри, що впливають на викид ТЧ варіювались в діапазонах: $\bar{n} = 0...1$; $\bar{L} = 0...1$; $\delta G_t = G_t / G_{t0} = -0,2...0,2$ (G_t і G_{t0} – відповідно, фактичне та потрібне значення масової витрати потоку в тунелі).

В результаті виконання плану 3-факторного експерименту, який проводився у відповідності до методики [76] (табл. 3.4) встановлено регресійну залежність, яка дозволяє оцінювати рівні ТЧ на різних режимах випробувань (рис. 3.21–3.26):

$$PT_{masssi} = 14,86 + 4,082 \cdot X_1 + 2,418 \cdot X_2 - 1,975 \cdot X_3 + 0,378 \cdot X_1^2 - 1,262 \cdot X_2^2 + 0,807 \cdot X_3^2 - 0,730 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,208 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,433 \cdot X_2 \cdot X_3,$$

де X_1 , X_2 і X_3 – норморовані величини:

$$X_1 = \frac{n - 1175}{325} \quad X_2 = \frac{L - 50}{50} \quad X_3 = \frac{\delta G_t}{0,2}.$$

Як видно з табл. 3.4, відхилення розрахункових значень викидів ТЧ від експериментальних даних складають 0,03...0,84 г/год, що має один порядок з похибками відтворюваності експерименту та свідчить про адекватність отриманої залежності.

Аналіз результатів досліджень показує:

– величина PT_{masssi} має максимальне значення на режимі номінальної потужності – 18 г/год, мінімальне – на режимі холостого ходу – 4,9 г/год (що складає 27% від максимального значення);

– збільшення навантаження від 0 до 100% при $n = 1175$ хв⁻¹ приводить до зростання викиду ТЧ від 54 до 81 % відносно максимального значення;

– збільшення навантаження від 0 до 100% при $n = 1500$ хв⁻¹ приводить до зростання викиду ТЧ від 78 до 100 % відносно максимального значення;

– для того, щоб похибка δPT_{masssi} , яка пов'язана з відхиленнями масової витрати розбавлених ВГ у тунелі від потрібного значення, не перевищувала $\pm 5\%$ при режимі розбавлення $DM1$ необхідно, щоб

величина δG_t знаходилась в межах: на режимі холостого ходу – $\pm 8\%$, середньої потужності ($n = 1175 \text{ хв}^{-1}$, $L = 50\%$) – $\pm 5\%$, номінальної потужності – $\pm 3\%$.

Таблиця 3.4

Результати експерименту з встановлення залежності $PT_{masssi} = f(X1, X2, X3)$

№ _д	X1	X2	X3	PT_{masssi}^a , г/ГОД	PT_{masssi} , г/ГОД	ΔPT_{masssi} , г/ГОД
1	-1	-1	-1	6,83	7,37	-0,54
2	-1	-1	1	4,27	3,85	0,42
3	-1	0	0	7,24	6,86	0,38
4	-1	1	-1	14,59	14,44	0,15
5	-1	1	1	8,95	9,26	-0,31
6	-0,5	0	0	8,70	8,97	-0,27
7	0	-1	0	9,28	9,82	-0,54
8	0	-0,5	0	10,98	10,14	0,84
9	0	0	-1	13,66	13,69	-0,03
10	0	0	-0,5	12,78	12,19	0,59
11	0	0	0	11,18	11,04	0,14
12	0	0	0,5	9,77	10,24	-0,47
13	0	0	1	9,29	9,79	-0,5
14	0	0,5	0	13,03	12,54	0,49
15	0	1	0	14,32	14,62	-0,3
16	0,5	0	0	13,06	13,09	-0,03
17	1	-1	-1	17,05	16,61	0,44
18	1	-1	1	13,96	13,99	-0,03
19	1	0	0	14,31	15,12	-0,81
20	1	1	-1	20,52	20,81	-0,29
21	1	1	1	17,20	16,53	0,67

Примітка. PT_{masssi}^a – розрахункове значення викиду ТЧ.

PT_{massi} , г/год

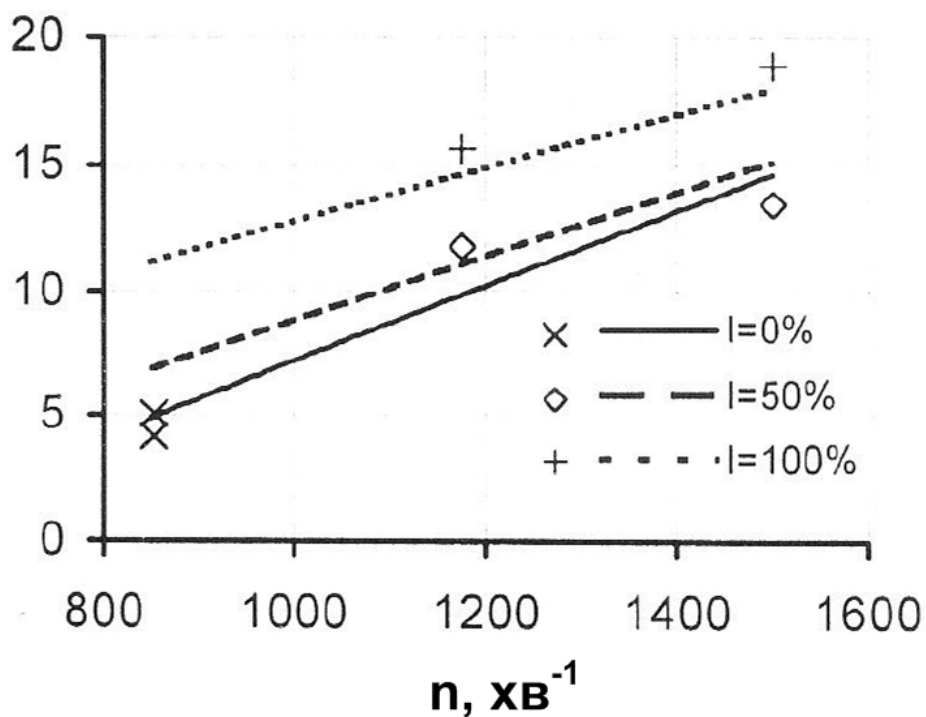


Рис. 3.21. Вплив числа обертів вала дизеля на абсолютний викид ТЧ

\overline{PT}_{massi}

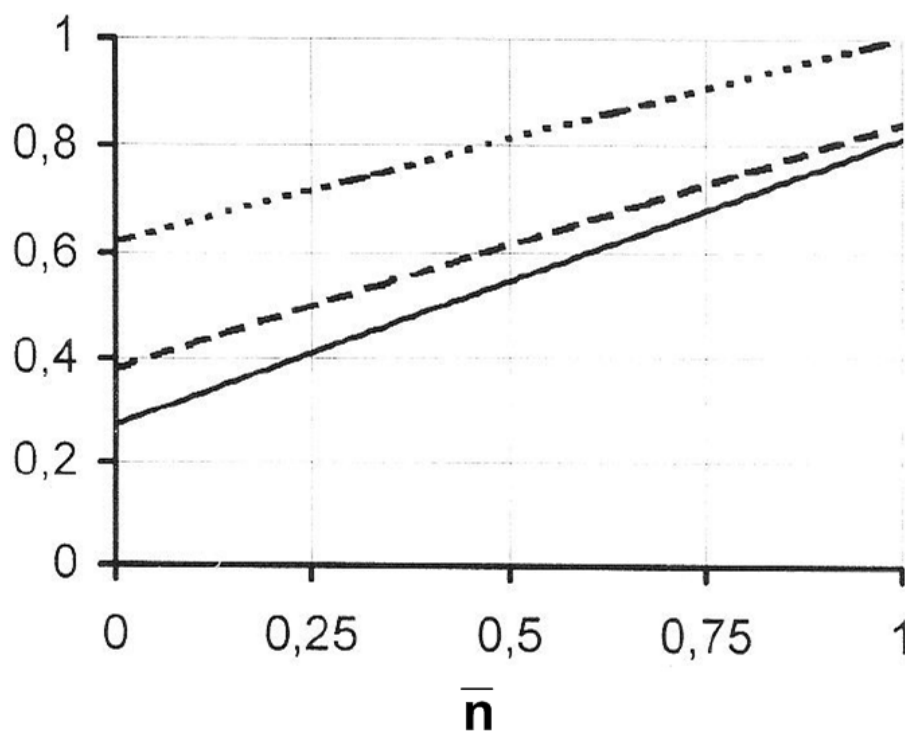


Рис. 3.22. Вплив числа обертів вала дизеля на відносний викид ТЧ

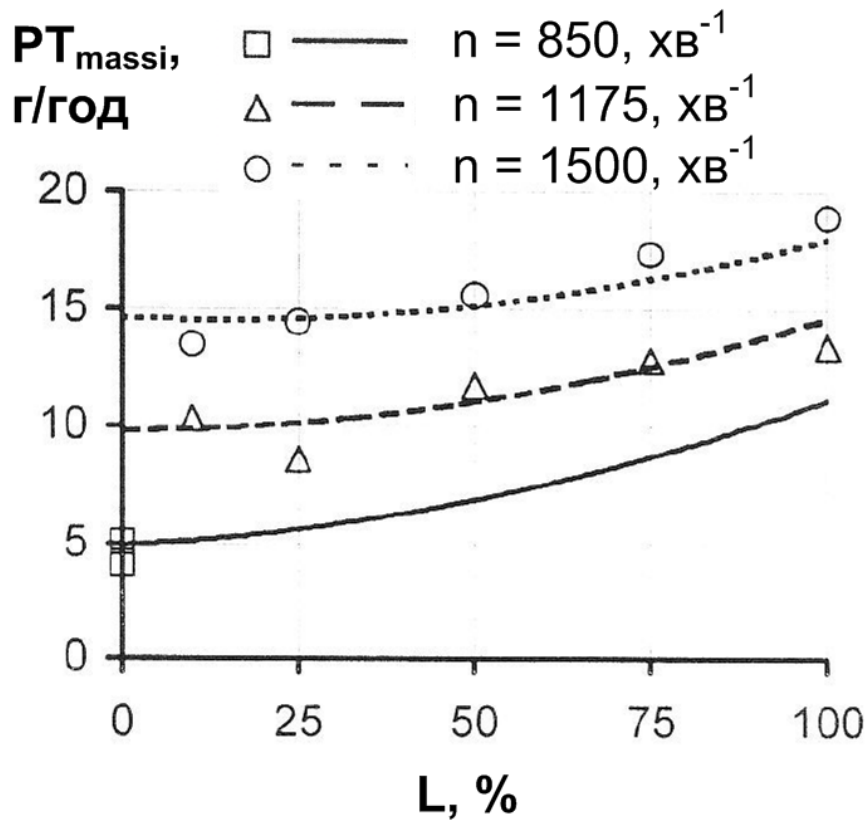


Рис. 3.23. Вплив навантаження на абсолютний викид ТЧ

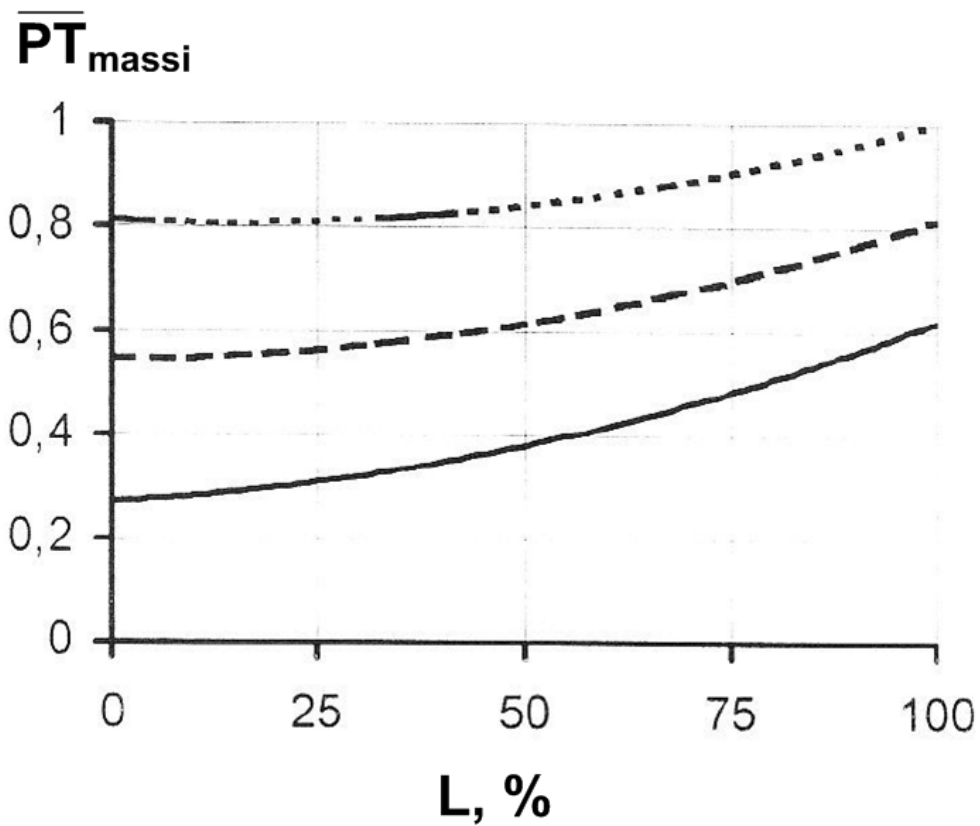


Рис. 3.24. Вплив навантаження на відносний викид ТЧ

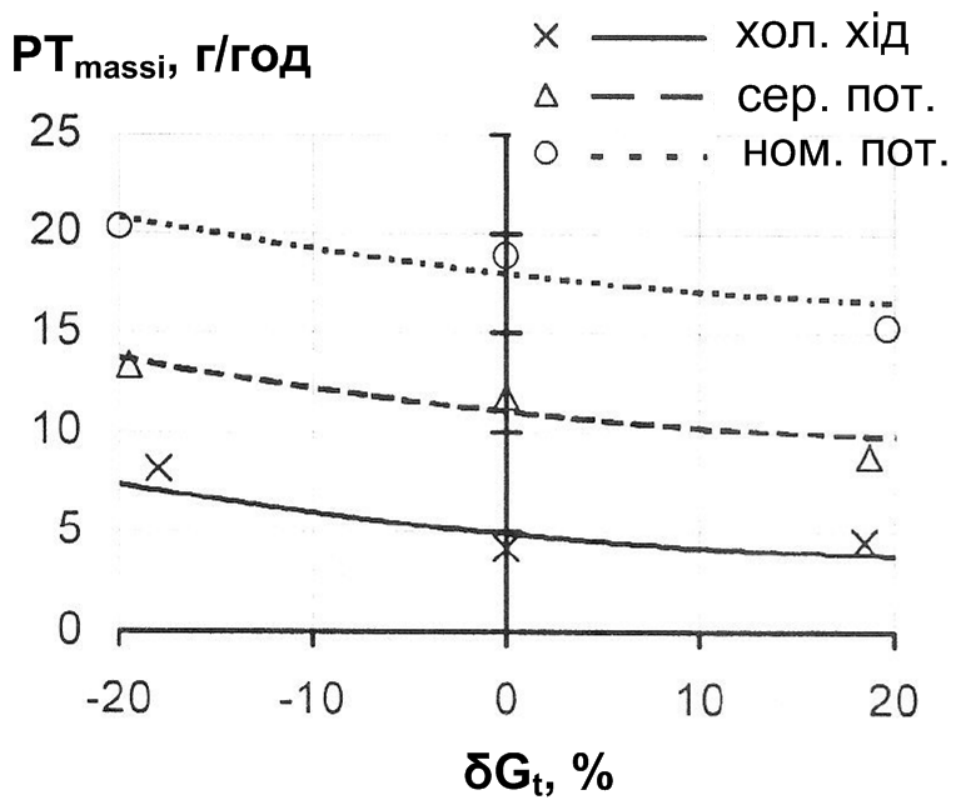


Рис. 3.25. Вплив величини δG_t на абсолютний викид ТЧ

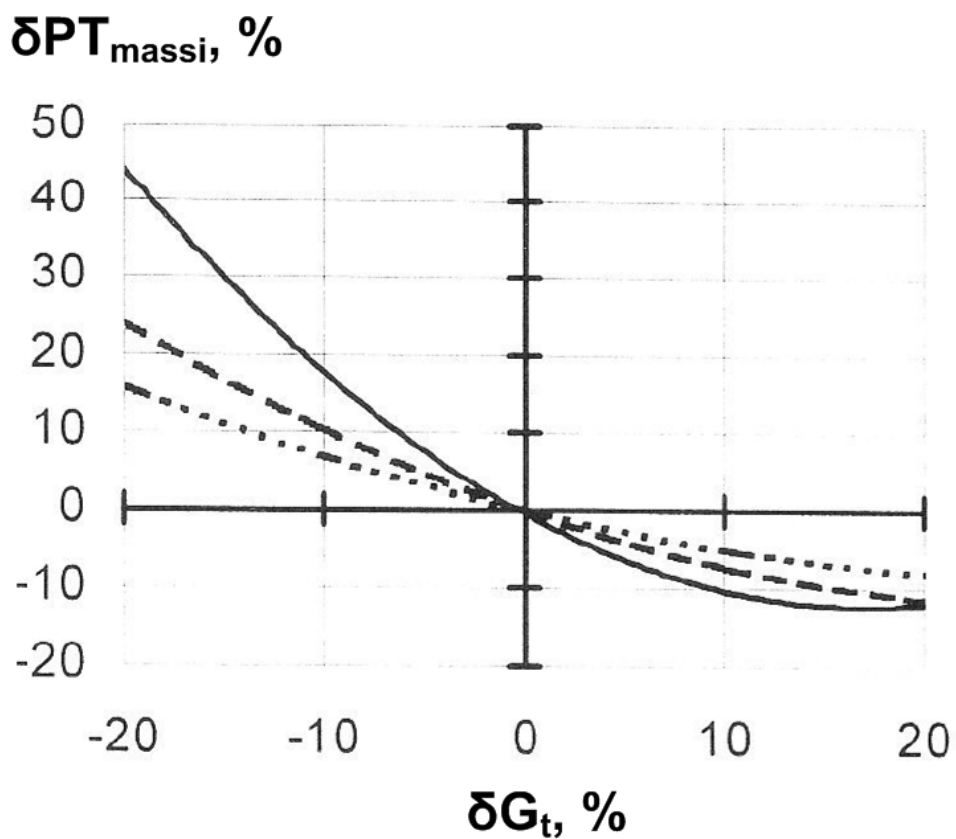


Рис. 3.26. Вплив величини δG_t на відносний викид ТЧ

бавляючий тунель – РТ, де відбувається її змішування з атмосферним повітрям.

З тунелю потік розбавлених ВГ з масовою витратою G_t через один з шарових кранів надходить або в байпасну магістраль, або в робочий канал, в якому встановлений патрон із двома фільтрами для відбору ТЧ. Масова витрата G_t створюється штатною газодувкою ГД1 та підтримується постійною на заданому рівні у відповідності до обраного режиму розбавлення ВГ – $DM1$ або $DM2$. При цьому температура проби перед фільтром t_f не перевищує $52\text{ }^\circ\text{C}$.

Величина G_t вимірюється витратоміром V_1 – колектором з внутрішнім діаметром 8 мм; для визначення масової витрати потоку компенсованого повітря G_{com} , яка дорівнює величині G_{exh}^t , використовується витратомір V_2 – нормальне сопло [77] з внутрішнім діаметром 3 мм.

Шарові крани $K1$ і $K2$, які визначають напрямок руху потоку проби у лінії відбору проб – ЛВ, завжди перебувають у протилежних станах: коли один відкритий – інший закритий і навпаки. При підготовці проби до аналізу відкритий кран $K1$ і розбавлені ВГ протікають через байпасную магістраль. За допомогою дроселя D забезпечується регулювання тиску в даній магістралі таким чином, щоб у момент перемикання кранів не виникало гідравлічного удару. При виконанні процедури відбору проб ТЧ відкритий кран $K2$ і весь потік розбавлених ВГ протікає через фільтр. При цьому фіксується тривалість даної процедури – τ_{sam} . Коефіцієнт розбавлення ВГ у тунелі – q визначається за формулою

$$q = \frac{G_t}{G_{com}}.$$

Після завершення випробувань вимірюється маса ТЧ – m_f , як приріст маси робочого фільтру за час випробувань. Для контролю параметрів G_t , G_{com} , τ_{sam} , t_f і керування шаровими кранами $K1$ і $K2$ використовується мікропроцесорний блок. У ході виконання випробувань усі зазначені величини протоколюються й використовуються при визначенні масових (г/год), питомих (г/кВт·год) викидів ТЧ на окремих режимах роботи дизеля та середньоексплуатаційного викиду ТЧ з ВГ – показника PT (г/кВт·год).

Мікротунель МКТ-2 являє собою вимірювальний комплекс до складу якого входять наступні **основні елементи** (рис. 3.28–3.30).

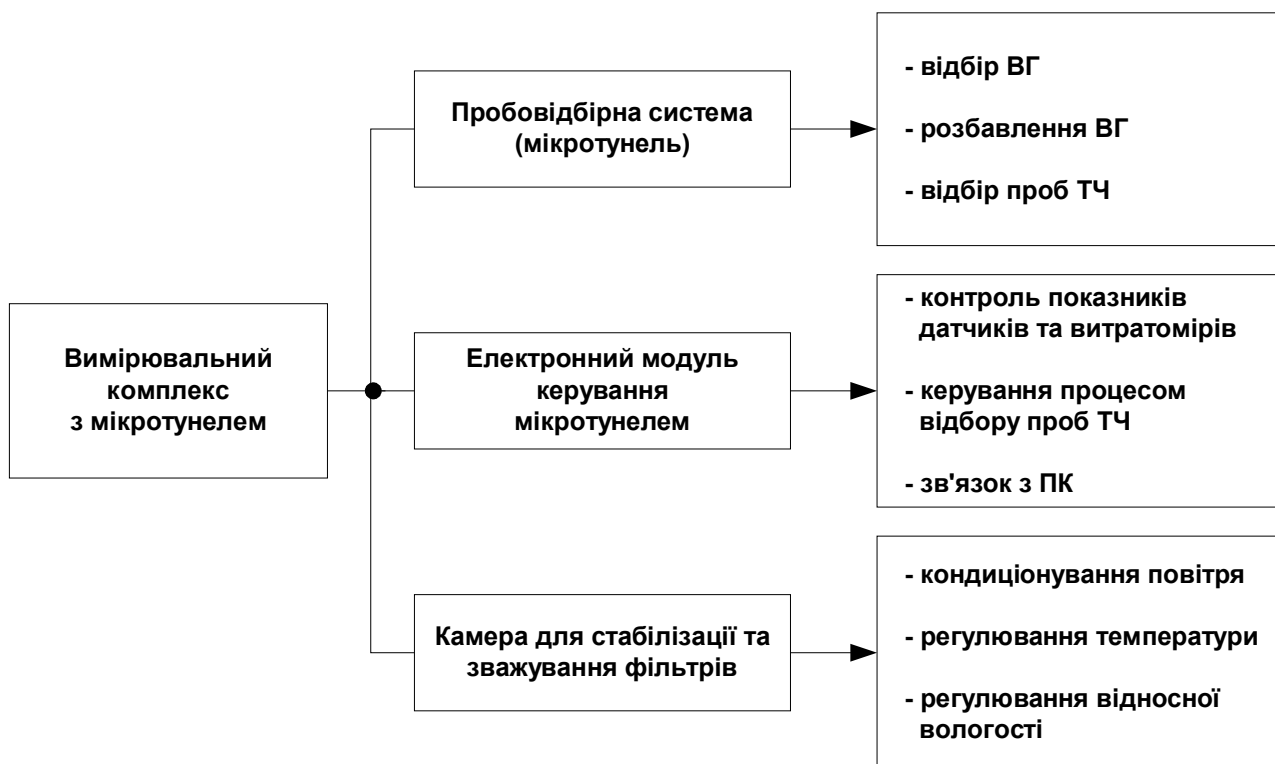


Рис. 3.28. Елементи МКТ-2 та функції, які вони виконують



Рис. 3.29. Загальний вигляд елементів вимірювального комплексу МКТ-2

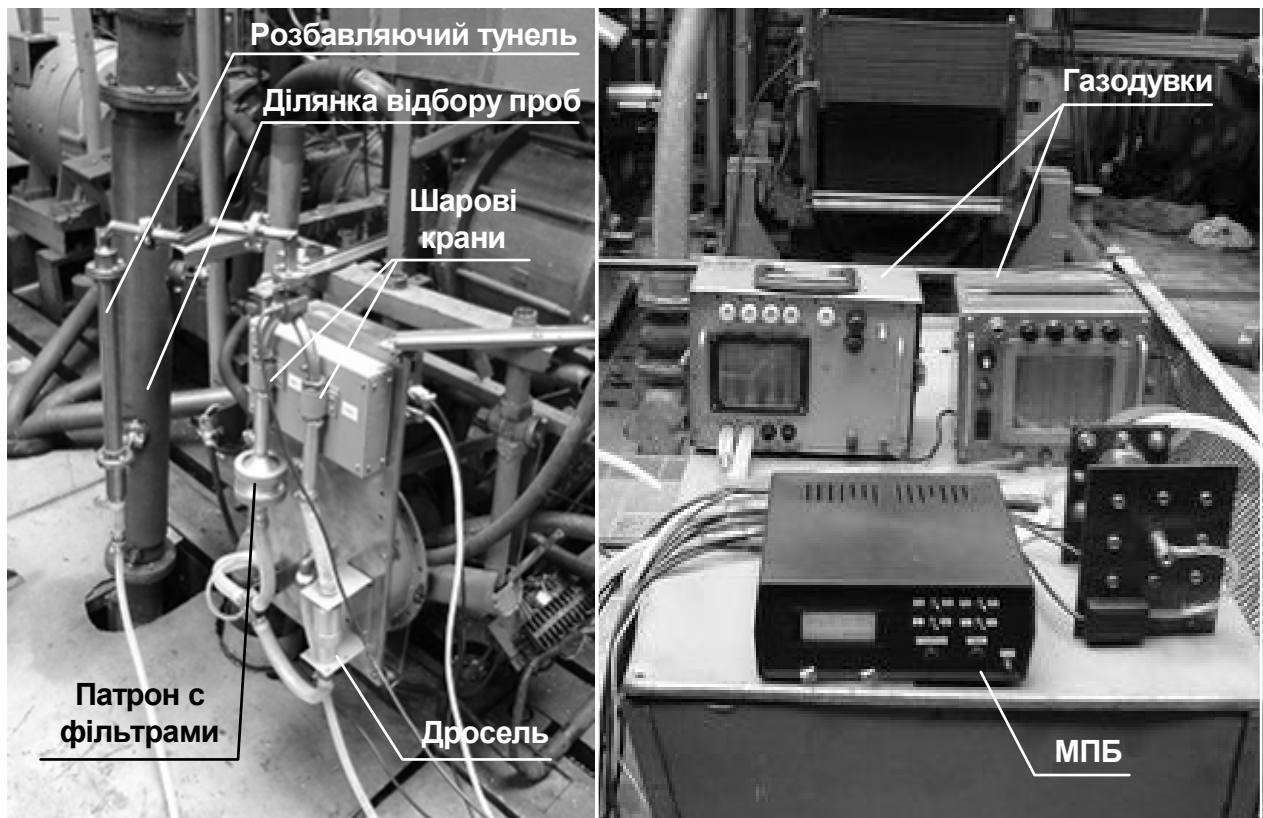


Рис. 3.30. Загальний вигляд МКТ-2 на стенді автотракторного дизеля 4ЧН12/14

1) Система розбавлення частки ВГ (0,02...1,2 %) повітрям, яка поєднує у собі три підсистеми:

а) систему відбору частки потоку ВГ, до якої входять:

- пробовідбірник – трубопровід з нержавіючої сталі з внутрішнім діаметром 6 мм і довжиною 80 мм, виготовлений у двох виконаннях, які передбачають установку пробовідбірника паралельно (виконання 1) та перпендикулярно (виконання 2) потоку ВГ;

- трубопровід транспортування проби – ТП з внутрішнім діаметром 6 мм та малою довжиною (для зменшення теплових втрат і осадження ТЧ) – 80 мм;

- регулятор витрати ВГ, який плавно перекриває перетин ТП від повністю закритого до повністю відкритого стану;

б) систему розбавлення ВГ, має такі складові:

- розбавляючий тунель – РТ – трубопровід з нержавіючої сталі з внутрішнім діаметром 30 мм і довжиною 300 мм;

- діафрагму, яка встановлюється на вході в тунель з метою покращення процесу змішування ВГ з повітрям;

- газодувку з продуктивністю 20...120 л/хв, яка є одночасно й пробовідбірним насосом;

– витратоміри газового потоку розбавлених ВГ у тунелі – G_t (колектор, профільований по дузі окружності з внутрішнім діаметром 8 мм) та потоку компенсованого повітря – G_{com} (нормальне сопло діаметром 3 мм);

– гнучкий полівініловий шланг довжиною 2 м, який пов'язує тунель з колектором.

в) систему відбору проб ТЧ, елементами якої є:

– лінія відбору проб – ЛВ – трубопровід з нержавіючої сталі з внутрішнім діаметром 16 мм і довжиною 950 мм;

– регулятори режимів відбір-байпас – два шарових крани, які знаходяться у протилежних станах;

– байпасна магістраль, в якій встановлено дросель, що вирівнює тиск у байпасній та робочій магістралях;

– робоча магістраль, в якій встановлено патрон з фільтром (або двома фільтрами) для відбору ТЧ (діаметром 70 мм);

– захистний фільтр з паперовим фільтруючим елементом, який застерігає пробовідбірний насос від забруднення ТЧ;

– гнучкий полівініловий шланг довжиною 2 м, який пов'язує захисний фільтр з пробовідбірним насосом.

Система розбавлення частки ВГ повітрям має такі газодинамічні параметри:

– масові витрати потоків: у ТП – 0,15...2,0 кг/год, у РТ і ЛВ (один потік) – 4,3...9,0 кг/год;

– діапазон варіювання коефіцієнту q – 4...50;

– спосіб визначення масової витрати G_{exh}^t – компенсаційний.

2) *Електронний модуль керування (ЕМК)* – являє собою пов'язаний з персональним комп'ютером (ПК) мікропроцесорний блок, до якого приєднані усі датчики та органи керування мікротунелю. За допомогою ЕМК виконуються наступні операції:

– контроль поточних показів датчиків та витратомірів пробовідбірної системи;

– керування процесом відбору проб ТЧ (перемикання режимів байпас- відбір проб ТЧ за допомогою шарових кранів);

– передача функцій контролю та керування мікротунелем на ПК (за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення), що дозволяє реєструвати, обробляти та протоколювати результати вимірювань масових викидів дизельних ТЧ.

3) *Обладнання для вимірювання маси ТЧ – камера для стабілізації та зважування фільтрів* (те саме обладнання, що і для МТ-1).

Технічні характеристики мікротунелю МКТ-2:

– *показники точності вимірювань*: інструментальні похибки вимірювань масових (г/год) та середньоексплуатаційних викидів ТЧ (г/кВт·год) складають 3...10% та 3,5%, відповідно (табл. 3.5) (при допустимих значеннях вказаних похибок: 3...8,5%, та 3,6...5,1%, відповідно);

– *показники швидкодії*: тривалість підготовки мікротунелю до проведення вимірювання не перевищує 1 хв; тривалості процедур відбору проб ТЧ становлять: на режимах холостого ходу та малої потужності – 5...7 хв, на режимах середньої потужності – 2...3 хв, на режимі номінальної потужності – до 1 хв;

– *масогабаритні показники*: розміри тунелю (L, B, H) – 500×300×1200 – мм, маса (з газодувкою) – 40 кг;

Таблиця 3.5

Характеристика точності вимірювального комплексу з МКТ-2 при визначенні показника PT

Параметр	Відносна похибка вимірювання параметру		
	забезпечується МКТ-2	Вимоги Правил R-49-02 та стандарту ISO 8178 [3, 4]	
		Вимірювання на стенді	Вимірювання на об'єкті
M_f	2,7% ($M_f=3,75$ мг)	2,7% ($M_f=0,75$ мг)	
τ_{sam}^{pt}	0,25%	---	
G_{exh}	1,7%	4%	5%
G_{sam}	0,8%	2%	
G_{dil}	0,8%	2%	
P	2% от P_{nom}	2% от P_{nom}	5% от P_{nom}
PT_{mass}	5,1%	6,0%	8,5%
PT	3,5%	3,6%	5,1%

3.2.2.2 Електронне забезпечення МКТ-2. Розроблені два мікропроцесорних блоки (МПБ), один з яких використовувався для керування мікротунелем, другий – камерою для стабілізації та зважування фільтрів (рис. 3.31, 3.32).

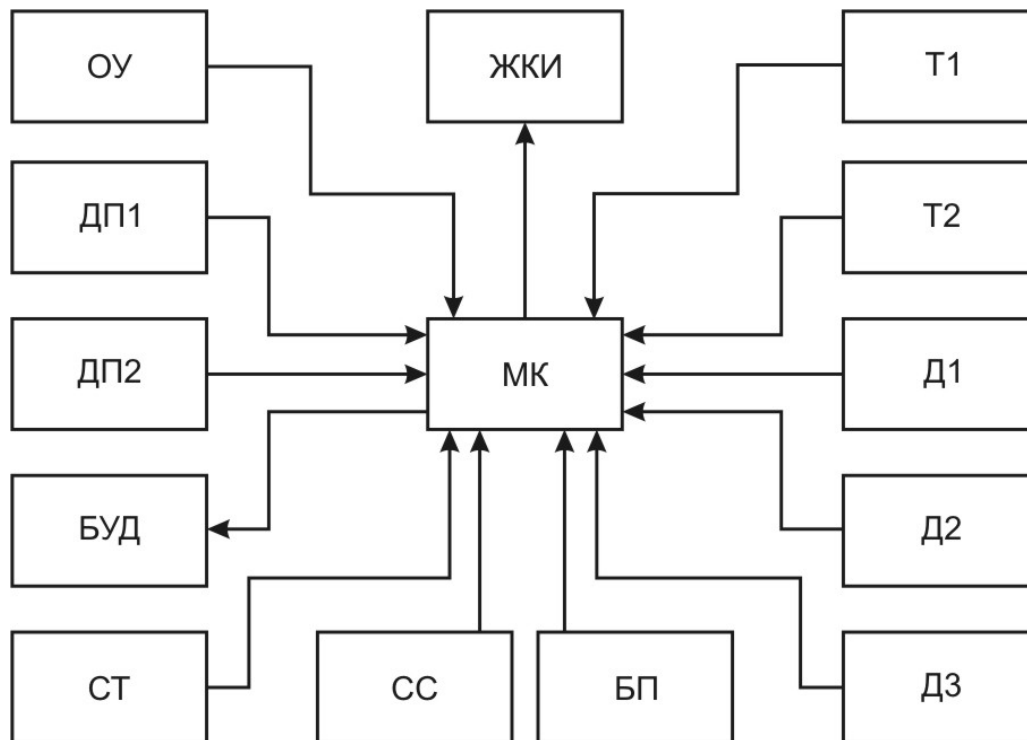


Рис. 3.31. Структурна схема МПБ керування мікротунелем:

ОУ – органи управління; ДП1, ДП2 – датчики положення 1-го та 2-го шарових кранів; БУД – блок управління двигунами; СТ – схема тактування мікроконтролера; ЖКИ – рідиннокристалічний індикатор; МК – мікроконтролер; СС – схема сбросу мікроконтролера; БП – блок живлення; Т1, Т2 – датчики температури; Д1, Д2, Д3 – датчики тиску.

Вибір елементної бази для обох мікропроцесорних блоків здійснювався за такими критеріями: надійність, високі показники точності вимірювань (при виборі датчиків), низьке енергоспоживання, не висока вартість, доступність.

Вибір мікроконтролера полягав у підборі такого представника, який відповідає наступним вимогам: наявність АЦП, розмір пам'яті програм не менш, ніж 8 кБ, наявність схеми роботи з кварцовим резонатором на 32768 Гц для реалізації модуля точного вимірювання часу, достатня кількість портів вводу – виводу, висока швидкість роботи, низька вартість. Усім вищенаведеним вимогам відповідає мікро-контролер фірми ATMELAT mega 8535.

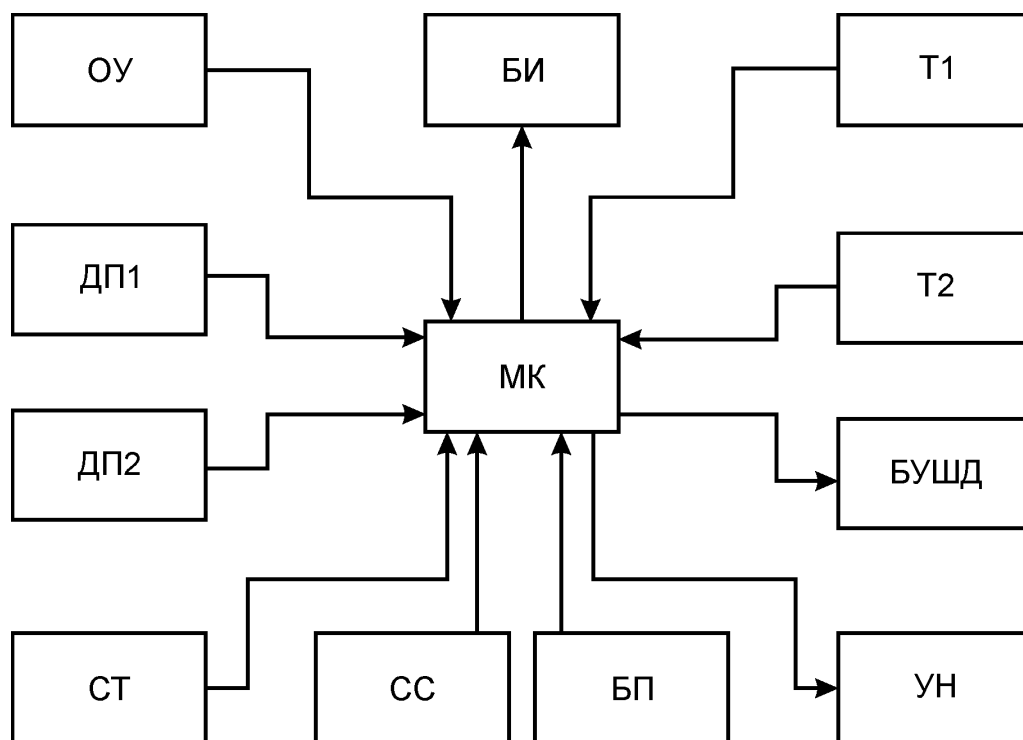


Рис. 3.32. Структурна схема МПБ управління камерою:

ОУ – органи управління; ДП1, ДП2 – датчики 1-го і 2-го положення заслонки, що закриває-відкриває посуд з селікагелем; СТ – схема тактування мікроконтролера; БИ – блок індикації; МК – мікроконтролер; БП – блок живлення; Т1, Т2 – датчики температури; БУД – блок управління шаговим двигуном; УН – управління нагрівачем.

Аналіз ринка датчиків тиску показав, що найбільш широкий та повний асортимент пропонує фірма Motorola.

Полупровідникова технологія дозволила створити гнучкий елемент датчика тиску у вигляді діафрагми з кремнію, на яку методом іонній імплантації наносять тензорезистивну структуру. З'єднання тензорезистора та мембрани з кремнію на молекулярному рівні дозволяє виключити похибки, що пов'язані з передачею деформації від гнучкого елемента до тензорезистору.

Монолітний вимірювач тиску з кремнію, що виготовляється таким чином, запатентований фірмою Motorola, отримав назву X-ducer із-за хрестообразного розташування чотирьох виводів. Одна пара виводів елементів тиску служить для подачі напруги живлення, а на другій парі датчик розвиває різницю потенціалів, яка лінійно залежить від напруги, що була прикладена, та механічного тиску.

Основною ознакою розподілу датчиків фірми Motorola на групи являється ступінь інтеграції. Розрізняють наступні групи датчиків:

- некомпенсовані датчики (Uncompensated);
- термокомпенсовані та калібровані датчики (Compensated);
- інтегровані датчики (Integrated);
- медичні датчики (Medical).

Некомпенсовані датчики містять на кристалі лише один елемент *X-duser*.

Більш складні термокомпенсовані та калібровані датчики містять *X-duser*, термістори для корекції температурної похибки нуля та чутливості датчика, а також додаткові підгоночні резистори, опір яких в процесі виробництва корегується лазером для мінімізації розбалансування нуля та чутливості датчиків від зразка до зразка.

До схеми датчиків, які називаються інтегрованими або датчиками з стандартним вихідним сигналом, введено додатковий підсилювач, який приводить вихідну напругу датчика до стандартного вихідного діапазону інтегральних АЦП.

Медичні датчики по ступеню інтеграції відносяться до термокомпенсованих датчиків, але їх виділяють у окрему групу, оскільки їх тип корпусу, робочий та температурний діапазони відповідають спеціальним медичним вимогам.

Для отримання високої точності вимірювань, спрощення схемотехніки пристрою та зменшення його вартості звернуто увагу на датчики тиску серії *MPX5000* фірми Motorola – серія датчиків тиску з нормалізованим вихідним сигналом.

Основні особливості датчиків серії *MPX5000*:

- базовий елемент – тензодатчик (*X-duser*);
- вбудована схема нормалізації сигналу – вихідна напруга від 0,2В до 4,7В;
- вбудоване калібрування;
- термокомпенсація в діапазоні температур від 0 до 85 °С;
- ідеально підходить для мікропроцесорних систем;
- міцний епоксидний корпус;
- напруга живлення – 5В;
- мале енергоспоживання – 7мА (типове);
- зміщення вихідного сигналу – не більш 0,2В (типове);
- не великий час відклику – 1,0 мсек;
- висока точність;
- малі габарити та вага датчика разом з вихідними портами;
- широкий діапазон робочих температур та температур зберігання.

Для використання в витратомірах G_{dil} та G_{sam} обрано датчики тиску типу $MPXV5004GVP$, які дозволяють вимірювати тиск в діапазоні 0..3,92 кПа, забезпечують точність $\pm 1,5\%$, мають нормований вихідний сигнал, термокомпенсовані в діапазоні від 10 °С до 60 °С та упаковані в мініатюрний корпус. Для визначення перепаду тиску на фільтрах для відбору ТЧ обрано диференційний датчик $MPXV5050G$, який дозволяє вимірювати тиск в діапазоні $\pm 0..50$ кПа, забезпечує точність вимірювань $\pm 2,5\%$, є термокомпенсованим в діапазоні від -40 °С до +125 °С та облаштований нормованим виходом.

Сучасна промисловість пропонує багато різноманітних датчиків для вимірювання температури. Задача вибору потрібного датчика температури полягає у підборі найбільш оптимального представника по точності, діапазону температур, що вимірюються, способу зчитування інформації, відмовостійкості, вартості та простоті використання. Найкращому прояву перерахованих якостей відповідають температурні датчики фірми Dallas Semiconductor. Вони дозволяють суттєво спростити виконання температурних вимірювань завдяки прямому трансформуванню температури у цифровий код на кристалі без використання додаткових АЦП. Переформування аналогового значення напруги, яке залежить від температури, у цифровий код відбувається безпосередньо на кристалі, що дозволяє запобігти похибок, пов'язаних з передачею аналогового сигналу до виходів АЦП, а також з самим АЦП. Вимірювачі температури фірми Dallas Semiconductor розробляються з різними характеристиками: з різною точністю вимірювань, різним часом відклику, різними інтерфейсами управління (3-х провідним, 2-х провідним, з підтримкою). Для вирішення поставленої задачі прийняте за доцільне використовувати датчик температури $DS18B20$, який забезпечує точність вимірювань $\pm 0,5^\circ\text{C}$, має час відклику 750мсек та однопровідний інтерфейс MicroLAN.

Принципова схема *МПБ керування мікротунелем* (рис. 3.33) розділена на логічні блоки $A1-A8$.

Блок $A1$ представляє собою модуль вимірювання температури, яке виконується за допомогою цифрових датчиків $XT2$. Знімання показів з датчиків та обробка результатів виконується мікроконтролером $DD1$. Результати вимірювань передаються центральному процесору $DD2$ (блок $A6$) по трьохпровідному інтерфейсу. Блок $A2$ включає чотири датчика тиску $XT5$, $XT6$, $XT10$,

ХТ11. Індикація показів, а також інформація для взаємодії користувача з МПБ виконується за допомогою блоку А3, який складається з рідиннокристалічного індикатора Н1 та регульовочного резистора контрасту R3.

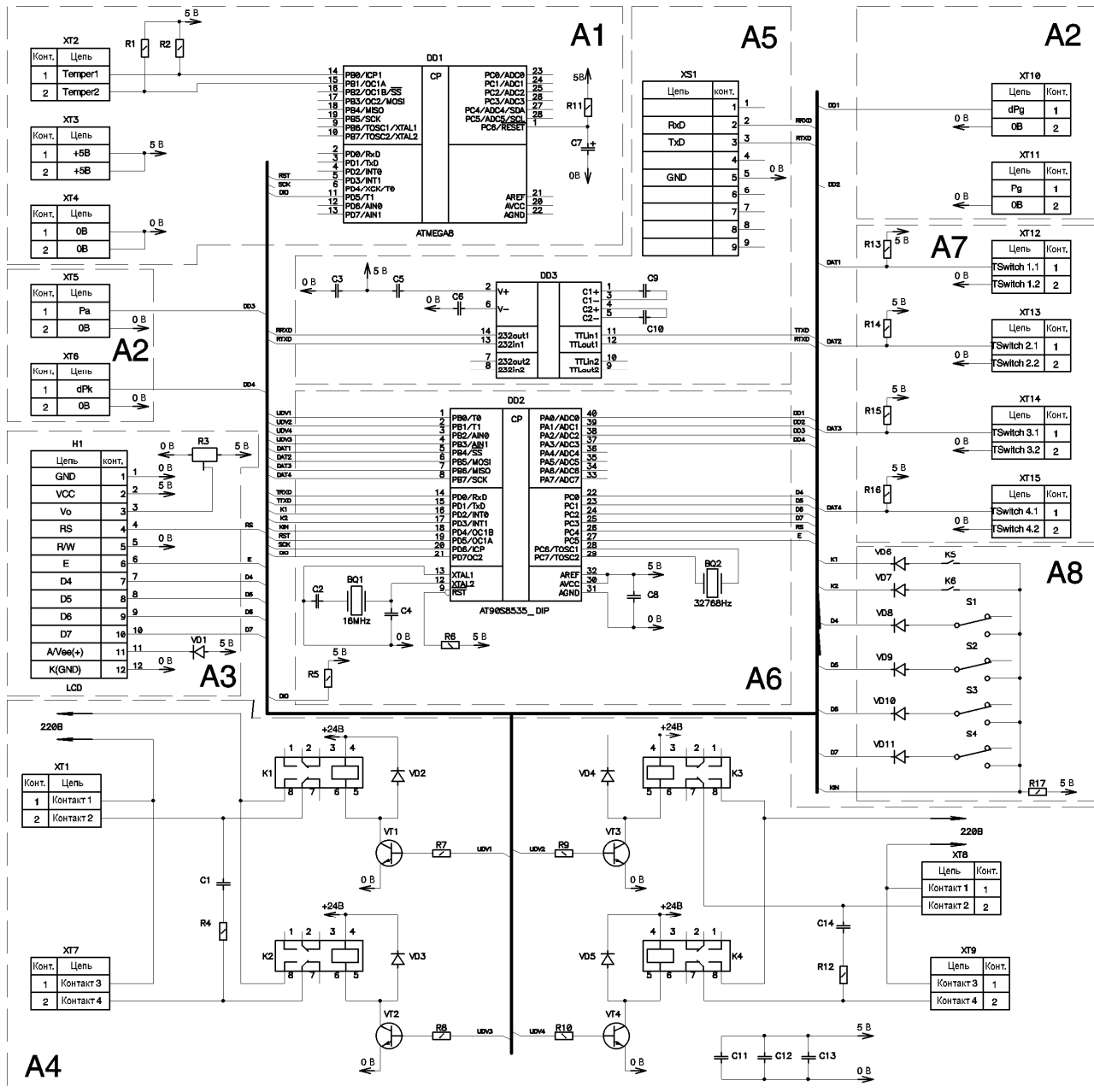


Рис. 3.33. Принципова схема МПБ керування мікротунелем

Для роботи шарових кранів використовуються двигуни РД-9, управління якими здійснюється за допомогою блоку А4, який складається з чотирьох електромагнітних реле К1-К4 та відповідних транзисторних ключів VT1-VT4. Контроль положення шарових кранів проводиться в блоці А7, що представляє собою датчики положення

ХТ12-ХТ15. За допомогою блоку А8 користувач може виконувати керування МПБ, використовуючи для цього кнопки К5, К6 і перемикачі S1-S4. Зв'язок з ПК здійснюється через посередництво блоку А5, що містить у собі роз'єм підключення до ПК ХS1 та мікросхему переформування рівнів DD3.

Конструкція МПБ (рис. 3.34) розроблена з врахуванням масогабаритного показника. Вона відрізняється компактністю, простотою транспортування, врахуванням взаємного впливу електронних компонентів один на одного, що дозволило виключити можливі взаємні перешкоди.

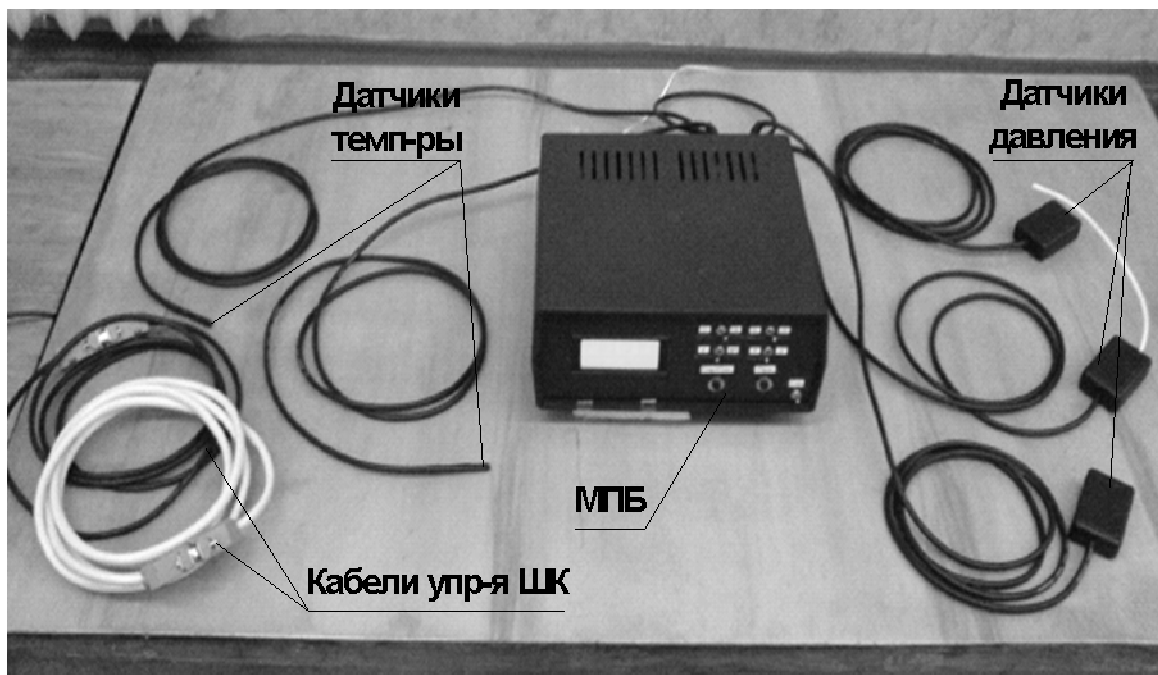


Рис. 3.34. Зовнішній вигляд МПБ керування мікротунелем

МПБ керування камерою для стабілізації та зважування фільтрів. Пристрій керування камерою виконує регулювання температури і відносної вологості за допомогою датчиків температури ХР1 та ХР2, які розміщені в блоці А1 (рис. 3.35).

Обробка значень температури та керування виконавчими механізмами здійснюється мікроконтролером DD1 блока А6.

Для управління вологістю використовується блок А2, який складається з шагового двигуна ХР3 та транзисторних ключів керування обмотками двигуна VT6-VT9. Положення заслонки, яка приводиться до руху шаговим двигуном, визначається за допомогою датчиків положення ХР5 блока А3.

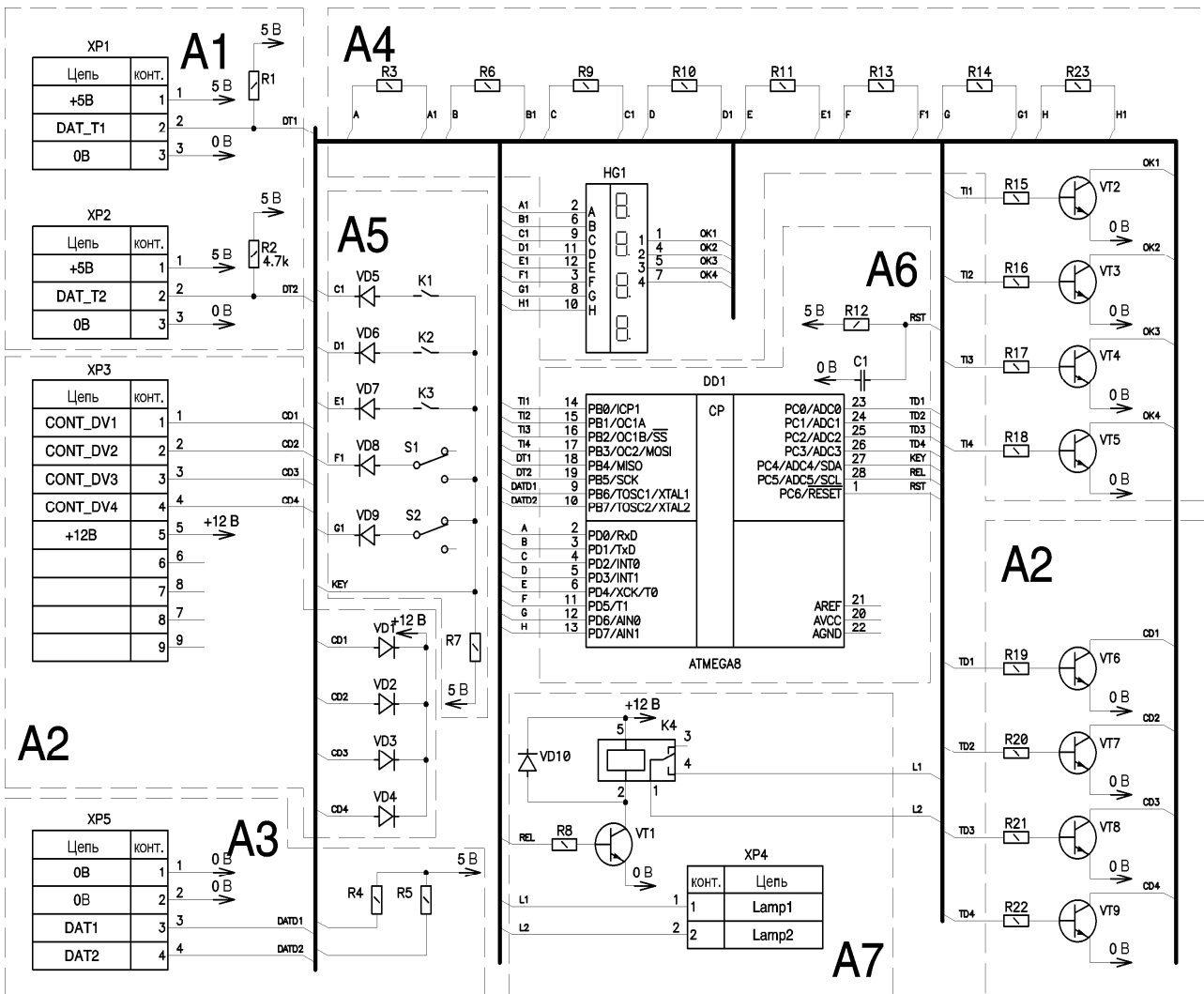


Рис. 3.35. Принципова схема МПБ камери для стабілізації та зважування фільтрів

Регулювання температури виконує блок *A7*, який містить електромагнітне реле *K4* та транзисторний ключ *VT1*. Для погашення ЕРС самоіндукції використовується діод *VD10*.

Відображення необхідної інформації виконується блоком *A4*. Цей блок представляє собою динамічну індикацію: транзисторні ключі *VT2-VT5*, обмежуючі резистори, *R6, R9-R11, R13, R14, R23* та семисегментний індикатор *HG1*. Для керування пристроєм призначений блок *A5*, який включає до себе кнопки *K1-K3* та перемикачі *S1, S2*.

3.2.2.3 Програмне забезпечення мікротунелю розроблено у вигляді вікон Windows, сформованих за функціональною ознакою (рис. 3.36). Основних робочих вікон три – «Синхронізація», «Випробування» та «Результати».



Рис. 3.36. Головной экран программы користувача MKT-2

Перемикання між екранами здійснюється шляхом вибору відповідних кнопок або закладок, розташованих в верхній частині екрану.

Екран «Синхронізація» (рис. 3.37) призначений для проведення процедури калібрування основних витратомірів мікротунелю, які визначають масові витрати G_t та G_{com} , потрібні для використання компенсаційного способу визначення проби ВГ (див. рис. 2.19). Калібрування може проводитись на п'яти рівнях масової витрати як з використанням еталонного витратоміру (з показаннями $G_э$), так і без нього (функцію еталонного пристрою здійснює витратомір G_t (на екрані G_T)).

Екран «Випробування» (рис. 3.38) використовується безпосередньо при проведенні випробувань. Він дозволяє здійснювати безперервний контроль основних параметрів навколишнього середовища, мікротунелю та режиму, що виконується. В цьому екрані розташовані кнопки початку-завершення процедури відбору проб ТЧ, а також переходу до додаткового екрану «Графіки» (рис. 3.39).

Цей екран містить наочні данні об основних параметрах мікротунелю, представлені в графічній формі.

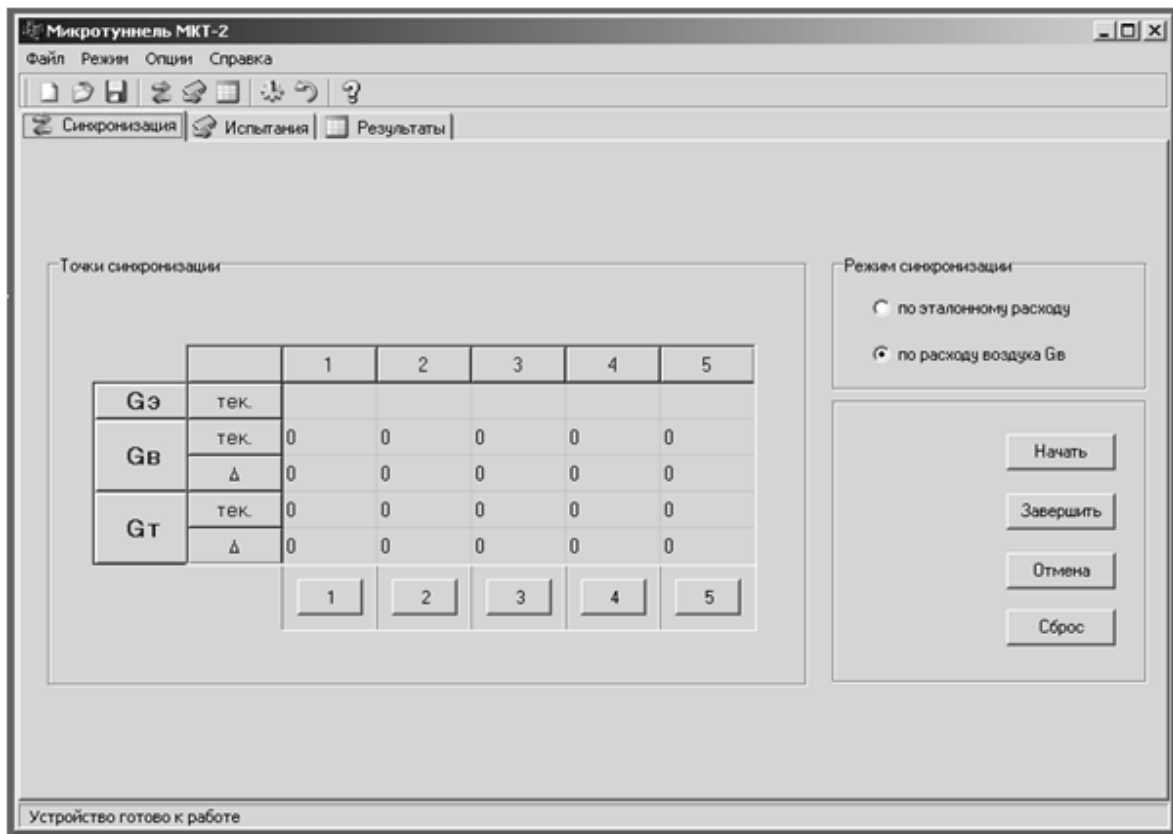


Рис. 3.37. Экран «Синхронизация»

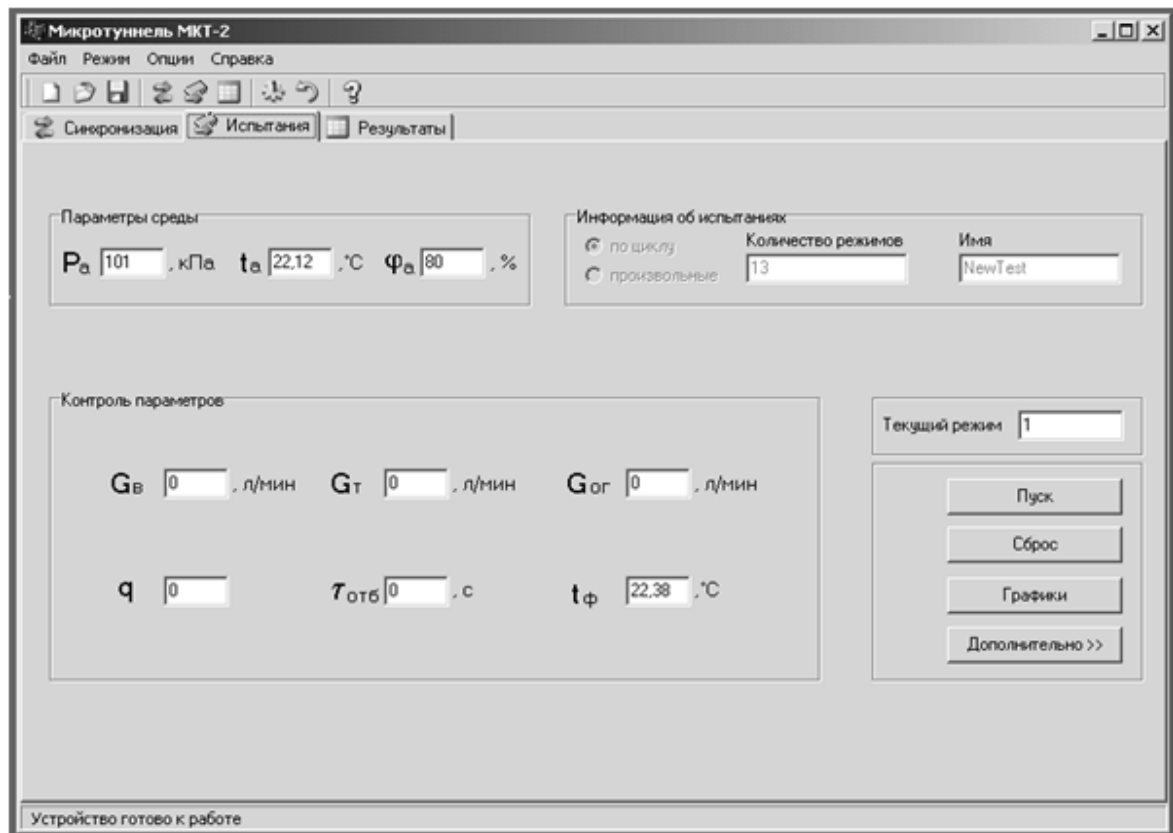


Рис. 3.38. Экран «Випробування»

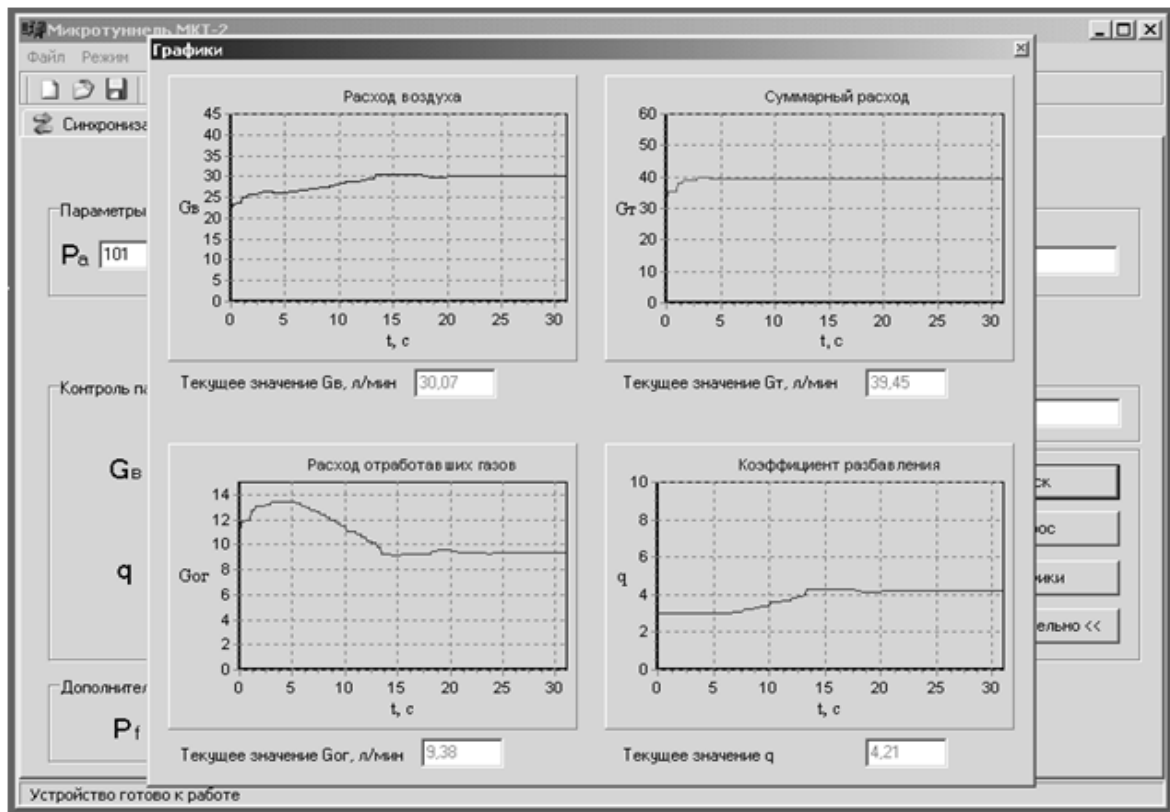


Рис. 3.39. Додатковий екран «Графіки»

Повна інформація про проведені випробування заноситься до пам'яті ПК і відображається у екрані «Результати» (рис. 3.40). Після введення даних про усі параметри мікротунелю, двигуна, що випробовується, та масу ТЧ, зібрану на фільтрах, програма автоматично розраховує концентрацію ТЧ, масовий та питомий викиди ТЧ з ВГ дизеля.

Для зручності використання програмного забезпечення МКТ-2 розроблено відповідну інструкцію по роботі з ним, в якій детально описані всі можливості програми та порядок виконання різних функцій.

3.2.2.4 Експериментальне відпрацювання МКТ-2 на гальмівному стенді дизеля 4ЧН12/14.

Підготовка гальмівного стенду до випробувань. Випробування, в ході яких визначались масові викиди ТЧ, проводились на базі гальмівного стенду автотракторного дизеля 4ЧН12/14 (СМД-23), встановленого у машинному залі кафедри ДВЗ Національного технічного університету «ХПІ».

Згідно вимог нормативних документів [1–3] при відборі проб ТЧ пробовідбірник мікротунелю необхідно встановлювати у прямолінійній ділянці вихлопної труби таким чином, щоб він розташовувався на осевій лінії трубопроводу назустріч потоку ВГ.

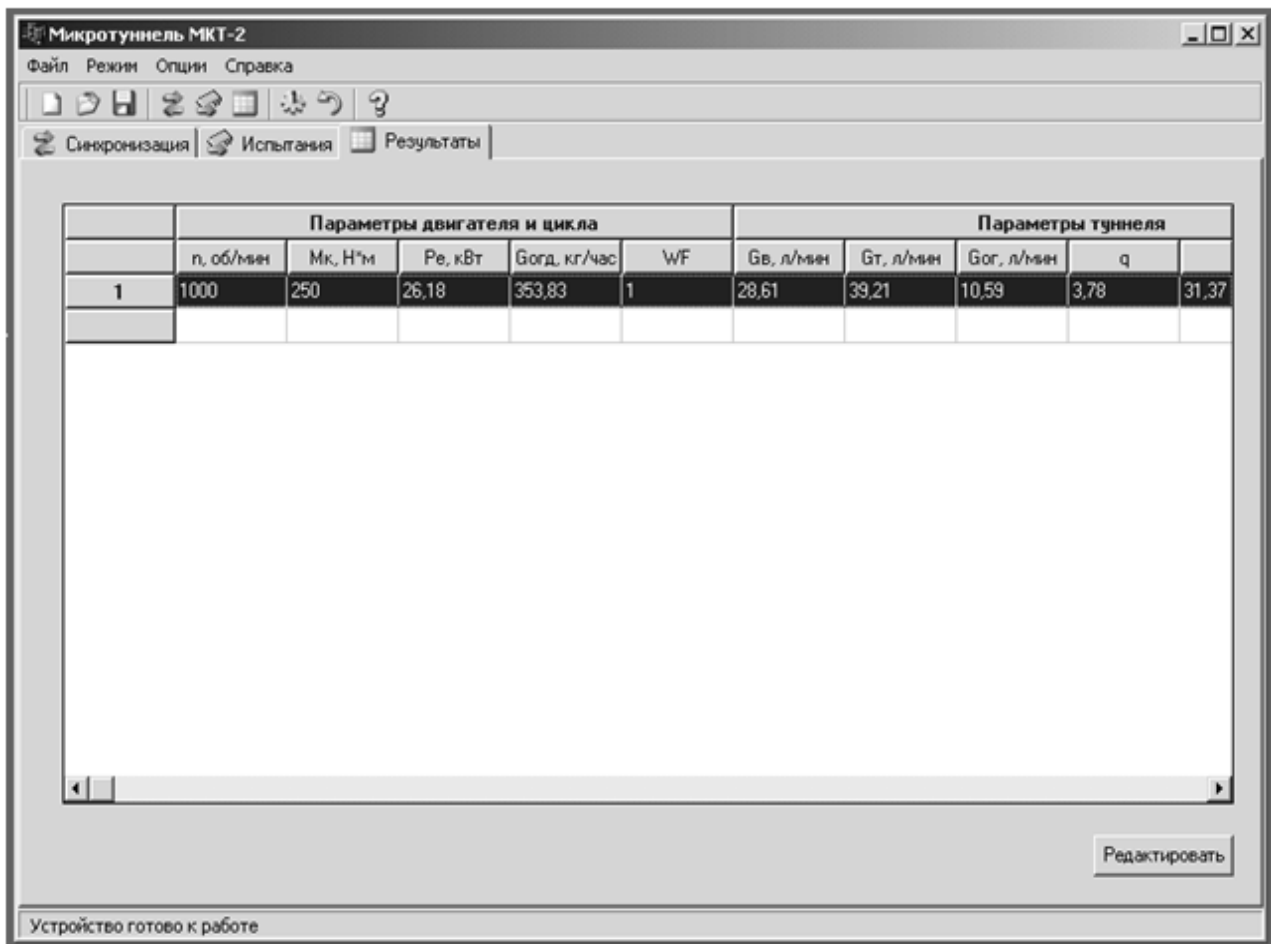


Рис. 3.40. Экран «Результаты»

При цьому прямолінійні ділянки трубопроводу перед пробовідбірником та після нього повинні складати не менш ніж $6D$ та $3D$, відповідно (D – внутрішній діаметр вихлопної труби). З метою виконання даної вимоги було виготовлено та встановлено на стенді необхідну прямолінійну ділянку, з якої здійснювався відбір проб ТЧ до МКТ-2 (рис. 3.41).

Всі елементи вимірювального комплексу з МКТ- 2 (мікротунель, ЕМК з ПК та камера для стабілізації і зважування фільтрів) були змонтовані на стенді дизеля 4ЧН12/14. При цьому було забезпечено: зручні умови керування мікротунелем та контролю за показами при-ладів, можливість за короткий термін здійснювати монтаж-демонтаж та консервування даного обладнання (рис. 3.42).

Результати використання МКТ-2. За допомогою вимірювальної системи МКТ-2 проведені такі дослідження (рис. 3.43, 3.44):

а) визначення масових та питомих викидів ТЧ з ВГ – PT_{massi} (г/год) і PT_i (г/кВт·год) на різних режимах роботи дизеля;

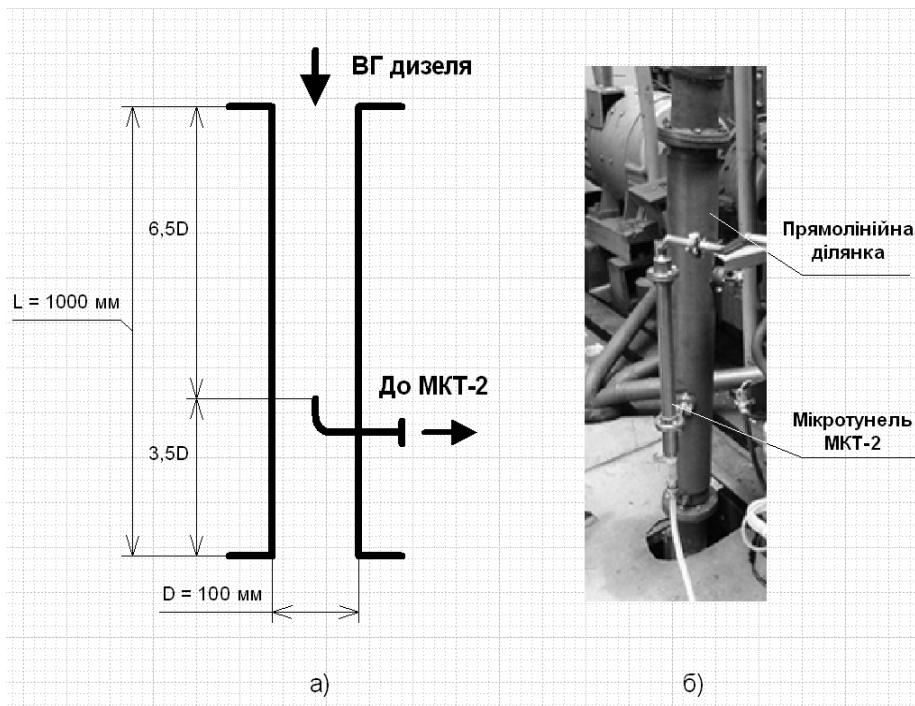


Рис. 3.41. Монтаж МКТ-2 з випускною системою дизеля 4ЧН12/14: а – схема встановлення пробовідбірника ВГ; б – загальний вигляд ВТ.

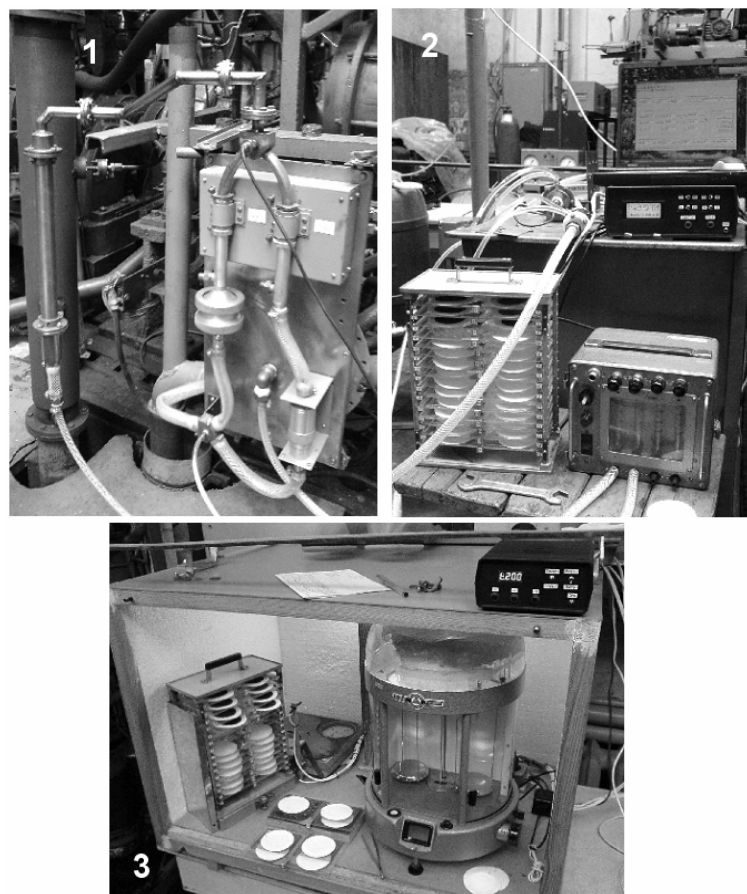


Рис. 3.42. Монтаж вимірювального комплексу з МКТ-2: 1 – мікротунель; 2 – ЕМК з ПК; 3 – камера для стабілізації та зважування фільтрів.

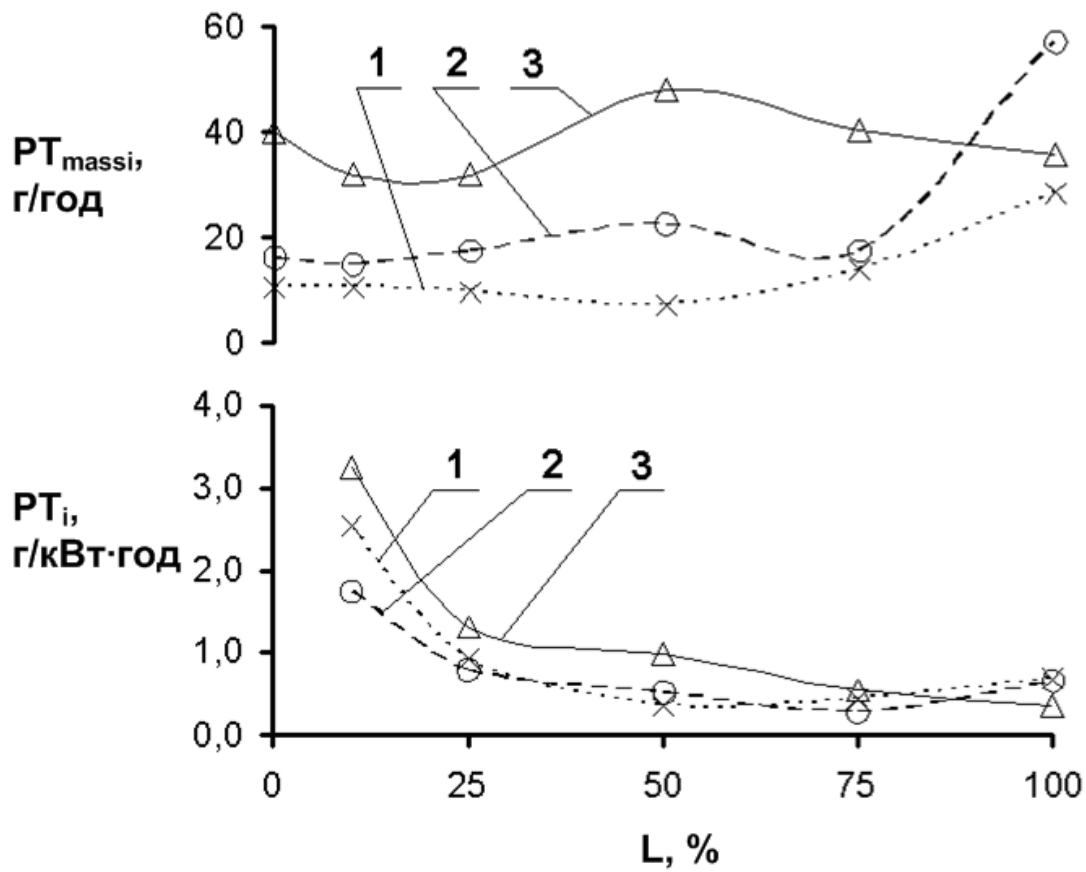


Рис. 3.43. Результати вимірювань викидів ТЧ на окремих режимах роботи дизеля

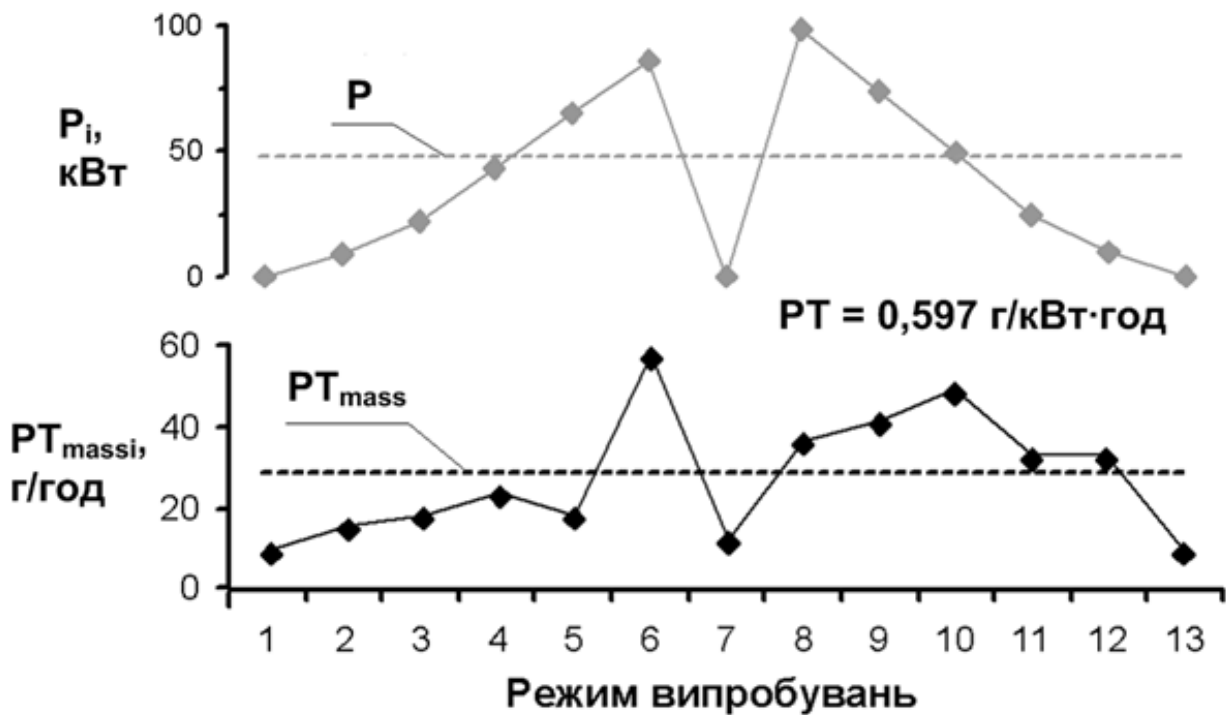


Рис. 3.44. Результати випробувань дизеля 4ЧН12/14 за циклом 13-Mode Cycle

б) відпрацювання процедури вимірювань середньоексплуатаційного викиду ГЧ в ході випробувань дизеля за циклами 13-Mode Cycle і ESC (рис. 3.44). Випробування підтвердили практичну придатність і ефективність МКТ-2 при проведенні екологічних випробувань ДВЗ.

3.3 Випробувальний стенд для досліджень ізокінетичного режиму відбору частки ВГ з вихлопної труби дизеля

Випробувальний стенд (рис. 3.45, 3.46) дозволяє визначати перепад статичних тисків ΔP_{ik} при рівних швидкостях потоків робочого тіла (повітря) у ІКП та ВТ в умовах імітації роботи дизеля.

Стенд оснащений: газодувкою з масовою витратою 60...170 кг/год; нагрівачем робочого тіла до температури 180 °С; генератором пульсацій тиску у ВТ з амплітудою до ± 500 Па та частотою до 25 Гц (рис. 3.47); спеціально розробленим датчиком різниці тисків з діапазоном вимірювань ± 500 Па та похибкою ± 2 Па; регулятором надлишкового тиску у ВТ в діапазоні 0...2,5 кПа.

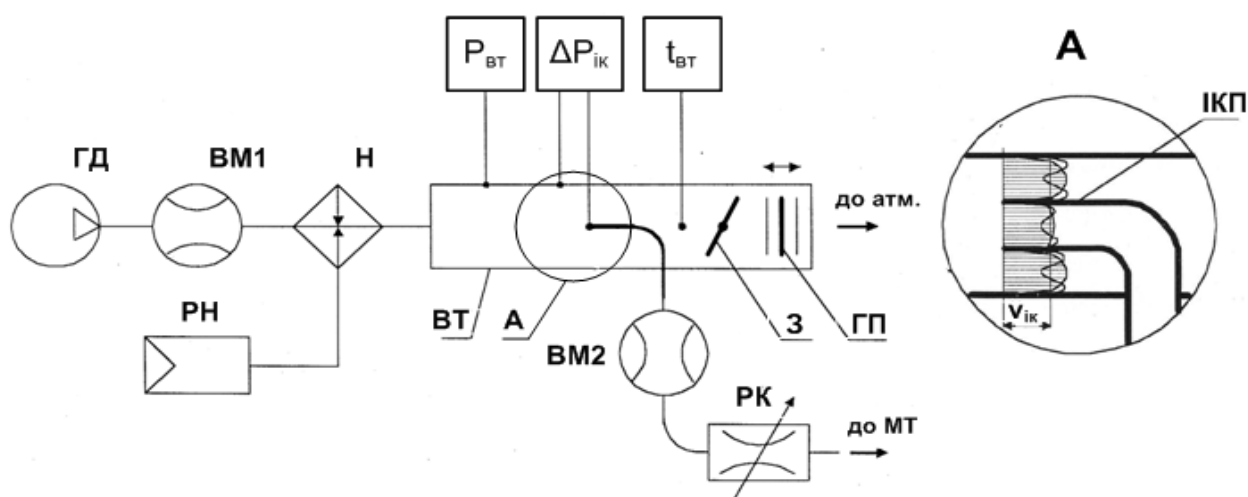


Рис. 3.45. Схема стенду для досліджень ізокінетичного режиму відбору ВГ

Як показали попередні дослідження, величина ΔP_{ik} відрізняється від нульового значення і залежить від швидкісного напору потоку у ВТ.

Це пояснюється наступним. Повні напори газових потоків, що протікають у ІКП – P_1^{sum} та ВТ – P_2^{sum} , визначаються за допомогою рівняння Бернуллі наступним чином:

$$P_1^{sum} = P_1 + \alpha_1 \cdot \frac{\rho v_1^2}{2} \text{ – для ІКП, } P_2^{sum} = P_2 + \alpha_2 \cdot \frac{\rho v_2^2}{2} \text{ – для ВТ,}$$

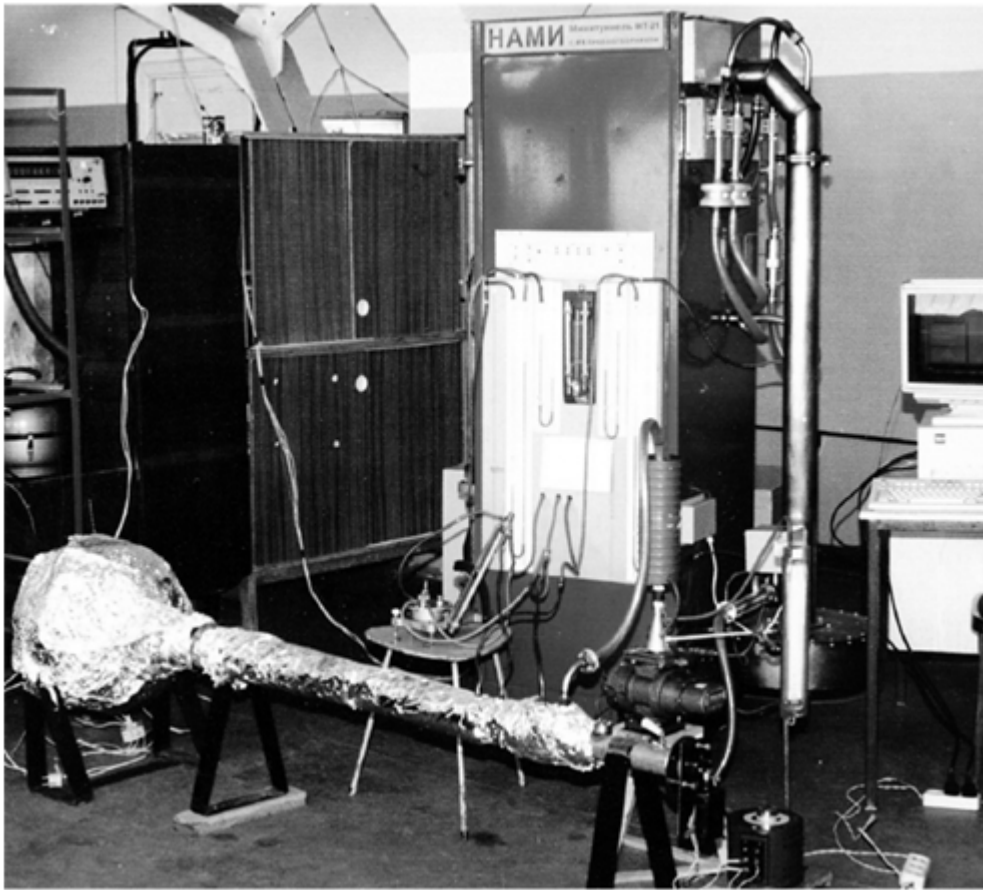


Рис. 3.46. Загальний вигляд стану з ІКП

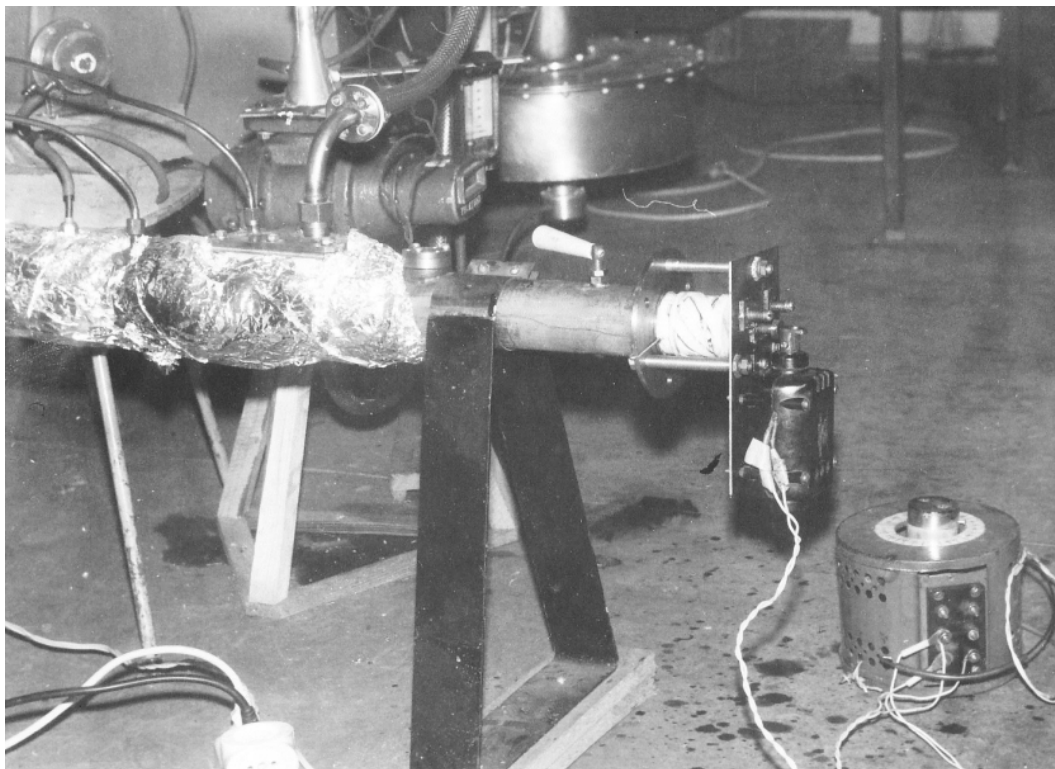


Рис. 3.47. Генератор коливаний тиску у ВТ

де P_1 і P_2 – статичні тиски газових потоків у ІКП та ВТ, Па;
 α_1 і α_2 – безрозмірні коефіцієнти;
 $(\rho \cdot v_1^2)/2$ і $(\rho \cdot v_2^2)/2$ – швидкісні напори потоків у ІКП та ВТ, Па (v_1 , v_2 – середні швидкості цих потоків, м/с, ρ – щільність газу, кг/м³).

Коефіцієнти α_1 і α_2 враховують нерівномірність розподілу швидкостей у поперечних перетинах ІКП, ВТ і визначаються за формулою:

$$\alpha_i = \frac{\int v_{ri}^3 \cdot dS_i}{v_i^3 \cdot S_i},$$

де i – індекс трубопроводу: 1 – ІКП, 2 – ВТ;
 S_i – площа поперечного перетину відповідного трубопроводу,
 v_{ri} – швидкість потоку у елементарній площадці dS_i поперечного перетину відповідного трубопроводу.

Якщо вважати, що при ізокінетичному режимі відбору ВГ повні напори P_1^{sum} та P_2^{sum} є однаковими:

$$P_1 + \alpha_1 \cdot \frac{\rho v^2}{2} = P_2 + \alpha_2 \cdot \frac{\rho v^2}{2}, \quad (v_1 = v_2 = v),$$

то величину ΔP_{ik} можна визначати наступним чином:

$$\Delta P_{ik} = P_1 - P_2 = (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot \frac{\rho v^2}{2} = \Delta\alpha \cdot \frac{\rho v^2}{2}. \quad (3.4)$$

Таким чином, якщо розподіли швидкостей потоків за перетинами ІКП та ВТ не є рівними, то величина ΔP_{ik} відрізняється від нуля та пропорційна швидкісному напору потоку у ВТ.

З врахуванням даної обставини на стенді визначалась експериментальна залежність $\Delta P_{ik} = f((\rho v^2)/2)$ для стаціонарного газового потоку та досліджувався вплив на неї таких факторів, як варіювання температурного режиму, надлишкового тиску та пульсацій потоку у ВТ.

3.4 Експериментальна установка та методики для досліджень методичних складових результуючої похибки δPT

Для визначення коефіцієнтів k_{tfi} та $k_{\tau st}$, які використовуються при розрахунках методичних похибок δPT_{tf} та δPT_{st} , розроблено експериментальну установку та відповідні методики.

3.4.1 Принципова схема експериментальної установки, її технічні характеристики. Експериментальну установку було зібрано на базі мінітунелю МТ-1, встановленого на гальмівному стенді дизеля 1Ч12/14 (рис. 3.48).

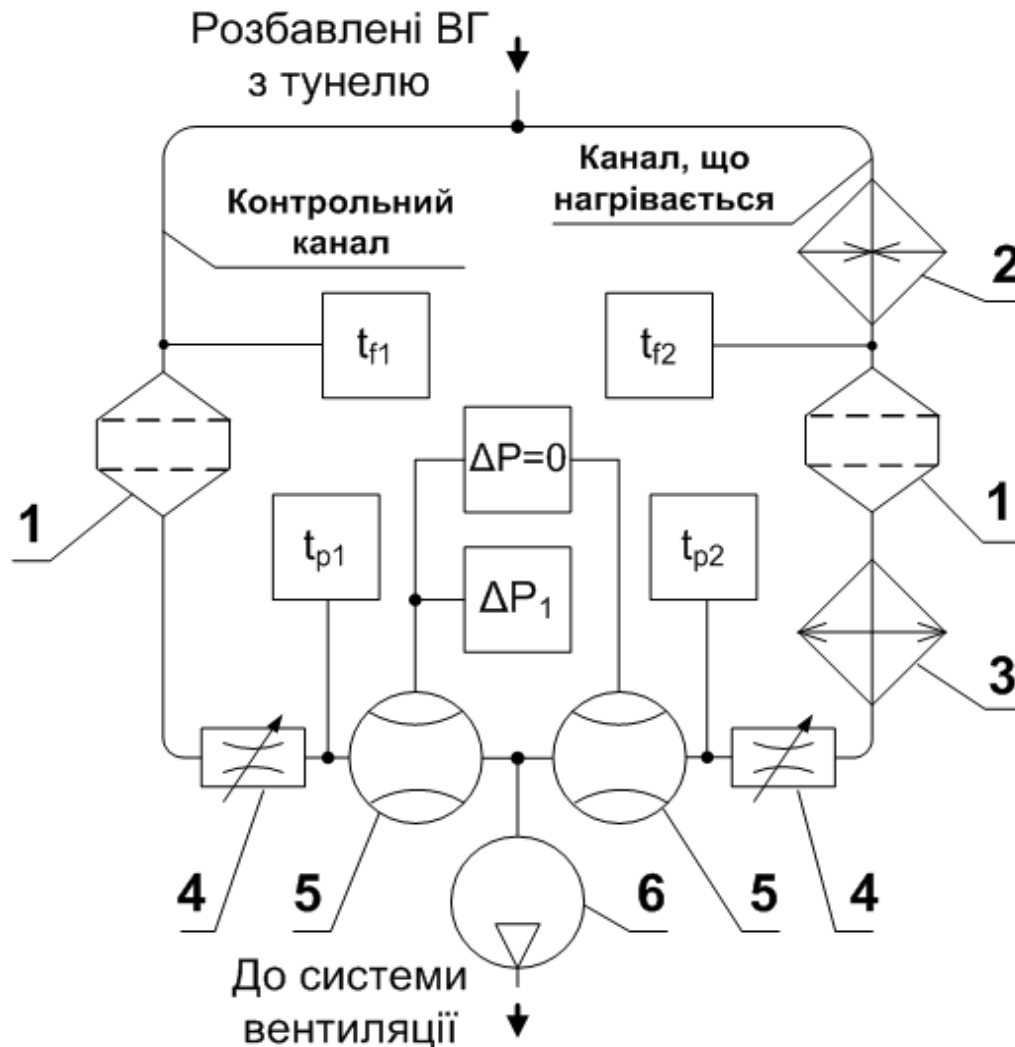


Рис. 3.48. Експериментальна установка для вимірювання коефіцієнтів k_{tfi} :

1 – патрони з фільтром; 2 – нагрівач; 3 – охолоджувач; 4 – регулятори масових витрат потоків; 5 – масові витратоміри; 6 – газодувка.

До складу установки входять два основні елементи:

1) двохканальна лінія відбору проб ТЧ, до якої входять контрольний канал (в ньому збирається маса ТЧ – m_1) та канал, що нагрівається (в ньому збирається маса ТЧ – m_2 , при температурі t_f , більшою, ніж в контрольному каналі, на фіксовану величину Δt_f); це обладнання призначено для вимірювання коефіцієнта k_{tf} на будь-якому режимі роботи двигуна;

2) камера для стабілізації та зважування фільтрів, яка призначена для визначення мас навішування m_1 і m_2 , а також для спостереження за зміною маси ТЧ при варіюванні величин τ_{st} і t_{st} .

При визначенні коефіцієнта k_{tf} в лінії відбору проб ТЧ за безпечується виконання двох умов:

а) температура проби t_{f1} в каналі, що нагрівається, перевищує відповідну температуру проби t_{f2} в контрольному каналі на величину $\Delta t_f = 20 \pm 0,5$ °С (забезпечується нагрівачем 2),

б) масові витрати проб розбавлених ВГ в обох каналах, створювані газодувкою 6, підтримуються постійними з похибкою $\pm 2\%$ (за рахунок підтримки рівності температур t_{p1} і t_{p2} і нульового перепаду тисків між витратомірами 5 – нормальними соплами).

Для визначення коефіцієнта k_{tf} використовується залежність:

$$k_{tf} = \frac{m_2 - m_1}{m_1 \cdot \Delta t_f} \cdot 100\% = \frac{\delta m_f}{20}, \%, (\text{°C})^{-1},$$

де δm_f – відносне відхилення маси ТЧ, обумовлене підвищенням температури t_f .

Відносна похибка визначення коефіцієнтів k_{tf} складає $\pm 7...12\%$, при цьому більше значення похибки відповідає режимам з малим навантаженням двигуна.

3.4.2 Методика досліджень впливу температурного режиму відбору проб ТЧ на масу навішування ТЧ дозволяє встановити експериментальним шляхом залежність від режиму роботи дизеля коефіцієнтів пропорційності k_{tfi} , які враховують вплив температури t_f на масу навішення ТЧ (див. формулу (2.27)) і використовуються при визначенні методичної похибки δPT_{tf} (див. формулу (2.25)). Залежність, що визначається, має вигляд – $k_{tfi}(\bar{n}_i, \bar{L}_i)$, де \bar{n}_i та \bar{L}_i – параметри, які характеризують режим випробувань (див. формули (2.29), (2.30)).

Перед початком експерименту проводиться нормування змінних \bar{n} та \bar{L} :

$$X_1 = \frac{\bar{n} - \bar{n}_{mid}}{\Delta \bar{n}}; \quad (3.5)$$

$$X_2 = \frac{\bar{L} - \bar{L}_{mid}}{\Delta \bar{L}}, \quad (3.6)$$

де $\bar{n}_{mid} = \bar{L}_{mid} = 0,5$ – середні значення діапазонів варіювання \bar{n} , \bar{L} ;

$\Delta \bar{n} = (n_{nom} - n_{idle}) / 4$; $\Delta \bar{L} = M_{k(max)} / 4$ – кроки змювання параметрів \bar{n} та \bar{L} .

Передбачається, що залежність коефіцієнта k_{tf} від змінних X_1 і X_2 має вигляд полінома 1-го ступеня:

$$k_{tf} = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 \quad (3.7)$$

де a_0 , a_1 і a_2 – постійні коефіцієнти.

Для визначення коефіцієнтів полінома і оцінки його достовірності проводиться 2-факторний експеримент, що складається з 4-х основних та 3-х контрольних дослідів (рис. 3.49).

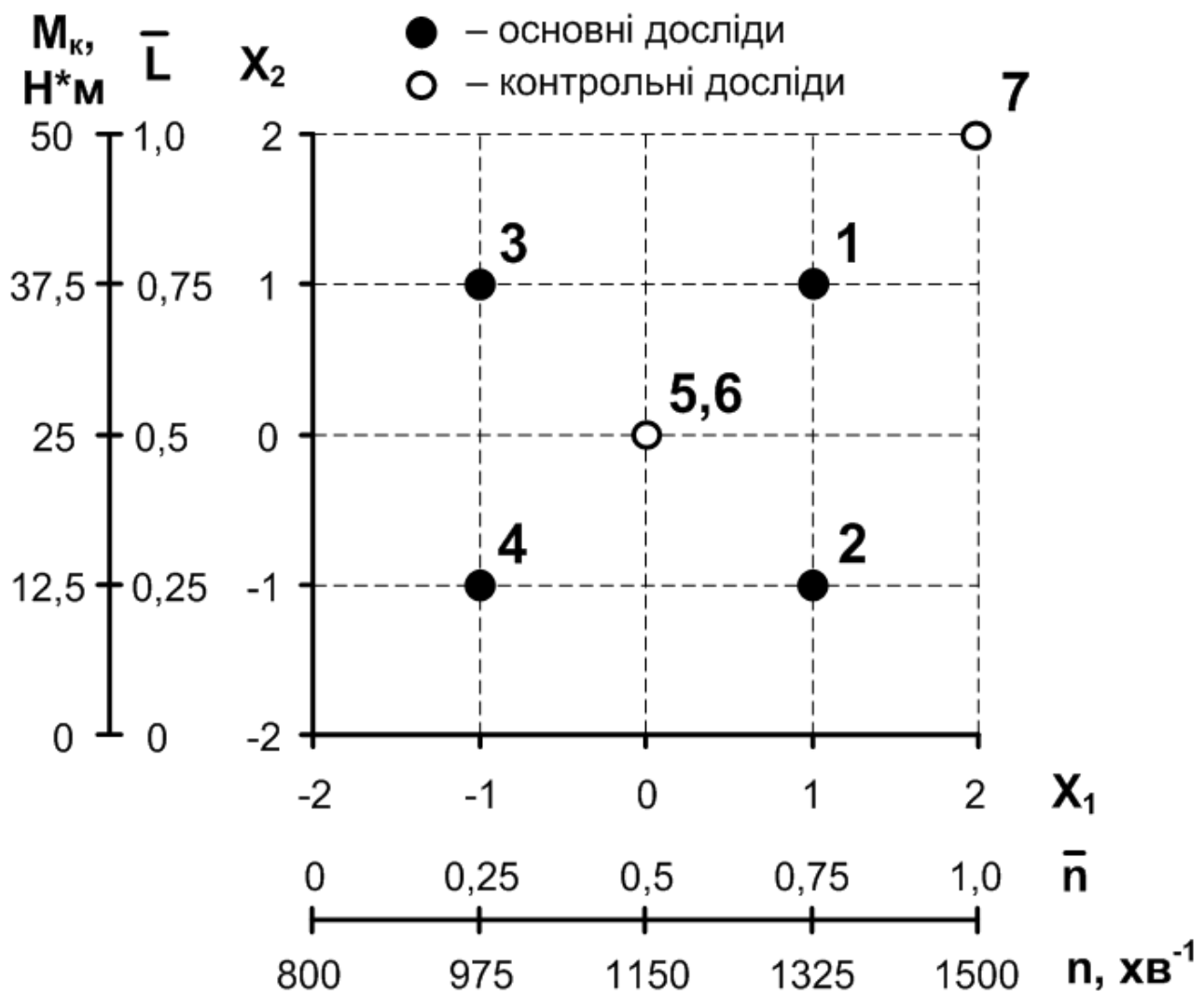


Рис. 3. 49. План 2-х факторного експерименту для визначення полінома (3.7)

Коефіцієнти регресійної залежності (3.7) визначаються за допомогою виражень [78]:

$$a_0 = \frac{k_{tf1} + k_{tf2} + k_{tf3} + k_{tf4}}{4}$$

$$a_1 = \frac{k_{tf1} + k_{tf2} - k_{tf3} - k_{tf4}}{4};$$

$$a_2 = \frac{k_{tf1} - k_{tf2} + k_{tf3} - k_{tf4}}{4},$$

де k_{tfi} – значення коефіцієнта k_{tf} , які визначаються у i -му досліді. Адекватність цієї залежності оцінюється за критерієм Фішера – F .

3.4.3 Методика досліджень впливу умов стабілізації фільтру на масу навішування ТЧ. На основі результатів попередніх досліджень (див. рис. 1.14) передбачається, що вплив температури t_{st} на величину коефіцієнта $k_{\tau st}$ описується лінійною залежністю, яка має вигляд:

$$k_{\tau st} = k_{\tau st}^{t_0} \cdot (1 + k_{tst} \cdot (t_{st} - t_{st0})), \quad (3.8)$$

де $k_{\tau st}^{t_0}$ – значення коефіцієнта $k_{\tau st}$ – при базовій температурі t_{st0} ;
 k_{tst} – коефіцієнт, що враховує вплив на величину $k_{\tau st}$ відхилень температури t_{st} від значення t_{st0} .

Коефіцієнти залежності (3.8) визначаються за наступним алгоритмом.

1. Тричі проводяться випробування дизеля за циклом ESC з використанням мінітуннеля МТ-1 для відбору проб ТЧ. Після завершення кожного випробування фільтр з ТЧ поміщається в камеру для стабілізації та зважування фільтрів (рис. 3.9), в якій він витримується протягом 2...50 год при 3-х різних температурах t_{st} : 18, 25 та 32 °С.

2. Для кожного значення t_{st} після закінчення 4-х періодів стабілізації: $\tau_{stj} = 4, 8, 20$ та 50 год визначаються відповідні відносні відхилення маси навішування ТЧ – $\delta m_{ff}^{\tau_{stj}}$ (у %-ках; $j = 1...4$ – індекс періоду стабілізації τ_{st}) від початкового значення, виміряного при $\tau_{st0} = 2$ год і обчислюються значення коефіцієнтів $k_{\tau sti}$ ($i = 1...3$ – індекс температури t_{st}):

$$k_{\tau sti} = \frac{1}{4} \cdot \sum_{j=1}^4 \frac{\delta m_{ff}^{\tau_{stj}}}{\lg\left(\frac{\tau_{stj}}{\tau_{st0}}\right)}.$$

3. За трьома парами експериментальних точок ($t_{sti}; k_{\tau sti}$) за допомогою методу найменших квадратів [83] визначаються коефіцієнти b_0 і b_1 лінійної апроксимуючої залежності:

$$k_{\tau st} = b_0 + b_1 \cdot t_{st}. \quad (3.9)$$

4. Обчислюються коефіцієнти рівняння (3.8):

– $k_{\tau st}^{t0}$ визначається за допомогою вираження (3.9) шляхом підстановки в нього $t_{st0} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$;

– $k_{\tau st}$ розраховується за формулою:

$$k_{\tau st} = \frac{b_1}{k_{\tau st}^{t0}}.$$

5. Виконується перевірка адекватності регресійної залежності (3.8) за критерієм Фішера.

3.5 Методика оцінки величини результуючої похибки δPT та ефективності рекомендацій щодо її зменшення

Результуюча похибка вимірювань середньозваженого викиду ТЧ з ВГ дизеля та ефективність рекомендацій щодо її зменшення (наведені у п. 1.4) оцінюються за наступним алгоритмом.

1. Виконується вибір вихідних даних для проведення досліджень – результатів випробувань дизеля за циклом ESC із зазначенням всіх параметрів, які впливають на точність вимірювань показника PT (похибку δPT).

2. Для кожного режиму розбавлення ВГ визначаються інструментальні похибки вимірювань середньозваженого викиду ТЧ – δPT_{in} шляхом послідовного обчислення за допомогою вираження (2.24) похибок величин, які розраховуються за формулами (1.1) – (1.6).

3. Встановлюються (з врахуванням режиму розбавлення ВГ) діапазони варіювання методичної похибки δPT_{tf} ; для цього за допомогою вираження (2.25) і методу планування 2-х факторного експерименту [81] визначаються:

а) для режимів розбавлення $DM1$ і $DM3$ – залежності

$$\delta PT_{tf} = f(t_{dil}, t_{f(\max)}) \quad (3.10)$$

з областю завдання функції: $t_{dil} = 20...30 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{f(\max)} = 42...52 \text{ }^\circ\text{C}$;

б) для режимів розбавлення $DM2$ і $DM4$ – залежності

$$\delta PT_{tf} = f(t_{dil}, \Delta t_{f(52)}) \quad (3.11)$$

з областю завдання функції: $t_{dil} = 20...30$ °C, $\Delta t_{f(52)} = 0...20$ °C.

Абсолютні відхилення величини δPT_{tf} , розрахованої за допомогою залежностей (3.10) та (3.11), від значень, розрахованих за формулою (2.25), не повинні перевищувати $\pm 0,05\%$.

4. Визначається за допомогою залежності (2.26) діапазон варіювання методичної похибки δPT_{st} в області допустимих значень величин t_{st} і τ_{st} .

5. Встановлюються: діапазон варіювання результуючої похибки δPT (за допомогою вираження (2.23)), а також значення ширини діапазону варіювання даної похибки – δPT^{sum} та її складових – δPT_j^{sum} :

$$\delta PT^{sum} = \delta PT^+ - \delta PT^-; \quad \delta PT_j^{sum} = \delta PT_j^+ - \delta PT_j^-,$$

де індекси «+» і «-» відповідають граничним значенням діапазонів варіювання відповідних похибок в області позитивних і негативних значень;

j – індекс складової результуючої похибки (in , tf або st).

6. Визначається відносний внесок (у %) в результуючу похибку δPT кожної її складової – R_j :

$$R_j = \frac{\delta PT_j^{sum}}{\delta PT^{sum}} \cdot 100\%.$$

7. Проводяться розрахунки похибки δPT та її складових за умови виконання запропонованих рекомендацій щодо підвищення ефективності визначення показника PT ; порівняння отриманих результатів.

Висновки глави

1. Створено методику та експериментальну установку для визначення критеріального рівняння тепловіддачі у вигляді функції 4-х змінних $Nu = f(Re, q, k_t, k_l)$ з діапазонами варіювання параметрів, що впливають на тепловіддачу (відповідають розбавленню ВГ у повнопоточних та частковопоточних тунелях): $Re \cdot 10^{-3} = 4...35$, $q = 5...15$, $k_t = 1,27...1,96$, $k_l = 0,2...1$.

2. Спроектовані (у відповідності до вимог міжнародних стандартів – Правил ЄЕК ООН R-49, R-96), виготовлені та експериментально відпрацьовані макетні зразки автоматизованих частково-поточних систем: мінітунелю з ізокінетичним пробовідбірником МТ-1 та мікротунелю МКТ-2. Ці системи дозволяють визначати викиди ТЧ – на окремих режимах роботи дизеля та середньоексплуатаційні значення з похибками: МТ-1 – $\pm 5...12\%$ та $\pm 4,5\%$; МКТ-2 – $\pm 3...10\%$ та $\pm 3,5\%$, відповідно. Випробування на мотонних стендах підтвердили практичну придатність і ефективність МТ-1 та МКТ-2 при проведенні екологічних випробувань ДВЗ.

3. Розроблені програмні забезпечення мінітунелю МТ-1 та мікротунелю МКТ-2, які забезпечують ефективне керування цими системами, контроль за процесом вимірювань викидів ТЧ та рекомендовані для використання при розробці промислових зразків вітчизняних розбавляючих тунелів.

4. Створено випробувальний стенд для досліджень ізокінетичного режиму відбору частки ВГ до мінітунелю, який дозволяє оцінювати вплив режиму відбору ВГ на перепад статичних тисків між пробовідбірником МТ-1 та вихлопною трубою при параметрах газового потоку: швидкості – $8...23$ м/с, температурі – $20...180$ °С, надлишковому тиску – $0...2,5$ кПа, коливанні тиску з амплітудою – $\pm 0...500$ Па та частотою – $0...25$ Гц.

5. Розроблено експериментальну установку та методики досліджень методичних похибок вимірювань викидів ТЧ, які дозволяють встановити:

– залежність $k_{t_{fi}}(\bar{n}_i, \bar{L}_i)$, яка визначає для будь-якого режиму роботи дизеля величину коефіцієнта пропорційності, що враховує вплив температур t_{fi} на масу ТЧ – m_f ; ця залежність використовується при визначенні методичної похибки δPT_{fi} ;

– залежність $k_{t_{st}}(t_{st})$, яка визначає величину коефіцієнта пропорційності, що враховує вплив температур t_{st} на m_f ; ця залежність використовується при визначенні методичної похибки δPT_{st} .

6. Запропоновано методику визначення діапазона варіювання результуючої похибки вимірювань середньоексплуатаційного викиду ТЧ – δPT та значимості її складових, яка дозволяє оцінити ефективність зроблених рекомендацій щодо підвищення точності розбавляючих тунелів.

ГЛАВА 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ТА РОЗРАХУНКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА RT

4.1 Визначення та аналіз критеріального рівняння тепловіддачі в тунелі

Виконання плану експерименту та методики обробки даних, наведених у п. 3.1, дозволили встановити усереднені залежності критерія Nu від Re , q , k_t та k_l (табл. 4.1, рис. 4.1) та величину коефіцієнта K залежності (3.1).

Таблиця 4.1

Результати досліджень процесу тепловіддачі в тунелі

№ _д	Результат		№ _{оп}	Результат		№ _д	Результат		№ _д	Результат		№ _д	Результат	
	Nu	$K \cdot 10^{-6}$ $\delta K, \%$		Nu	$K \cdot 10^{-6}$ $\delta K, \%$		Nu	$K \cdot 10^{-6}$ $\delta K, \%$		Nu	$K \cdot 10^{-6}$ $\delta K, \%$		Nu	$K \cdot 10^{-6}$ $\delta K, \%$
1	24,4	12,8	6	52,4	14,1	11	66,0	14,5	16	30,8	12,8	21	130,5	12,7
		-4,3			5,4			8,4			-4,3			-5,1
2	23,6	14,5	7	34,8	11,7	12	56,2	13,5	17	66,8	12,5	22	55,1	14,7
		8,4			-12,6			0,9			-6,6			9,9
3	8,3	13,3	8	27,3	13,1	13	56,8	14,8	18	87,3	13,3	23	94,8	12,5
		-0,6			-2,1			10,6			-0,6			-6,6
4	14,5	13,6	9	13,5	14,1	14	46,0	12,2	19	79,2	13,8	24	133,4	13,1
		1,6			5,4			-8,8			3,1			-2,1
5	19,5	12,7	10	28,6	13,9	15	17,5	12,0	20	79,2	14,4	25	93,6	13,9
		-5,1			3,9			-10,3			7,6			3,9

Середньоквадратичні відхилення коефіцієнтів K , визначених в окремих дослідах, від середнього значення $K = 13,38 \cdot 10^{-6}$ склали: для окремого дослідження – $\pm 10,7\%$, для всього експерименту – $\pm 2,3\%$, що при похибці експериментальної установки $\pm 3 \dots 8\%$ свідчить про правильний вибір виду регресійної залежності та задовільну точність апроксимації експериментальних даних.

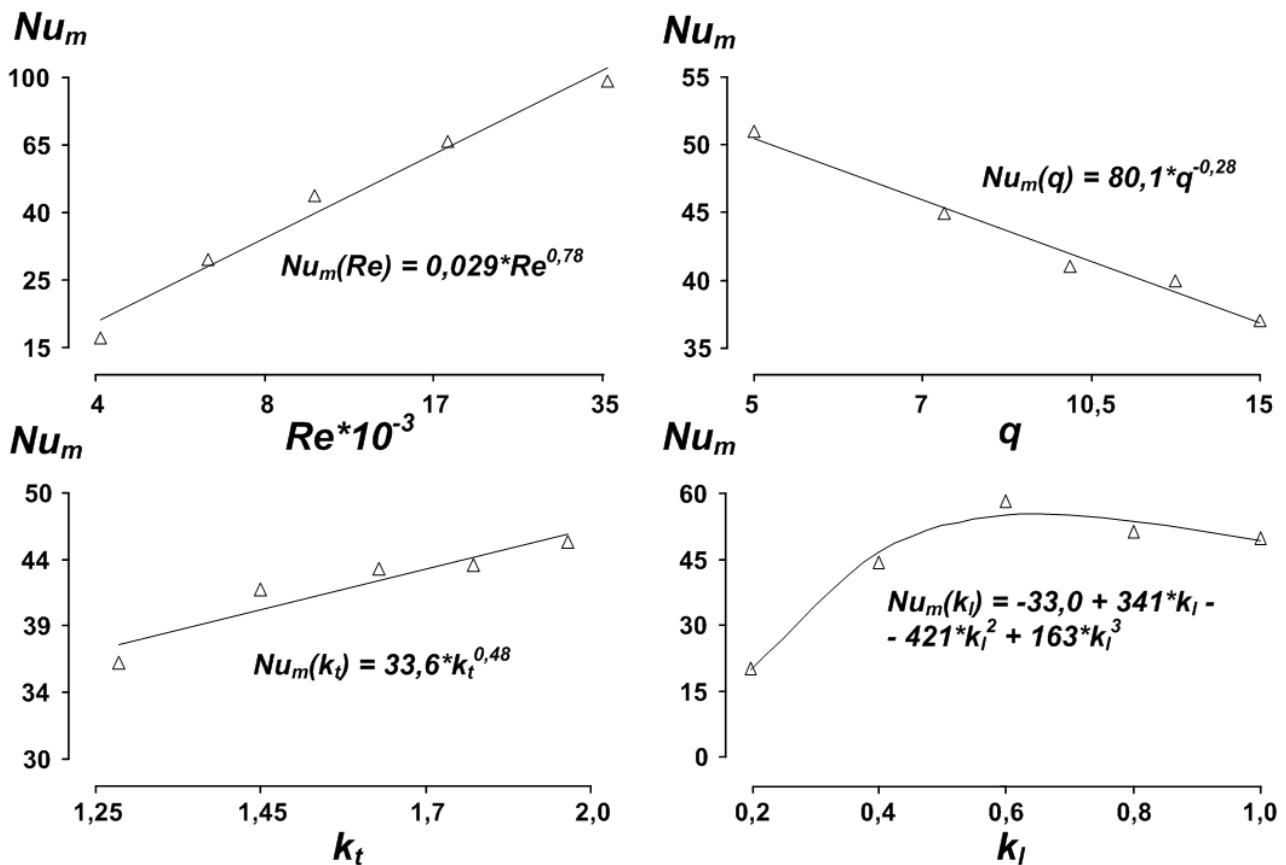


Рис.4.1. Усереднені залежності критерія Nu від параметрів Re, q, k_t та k_l

Рівняння (3.1) можна представити у вигляді:

$$Nu = 0,037 \cdot Re^{0,78} \left(\frac{q}{q_0} \right)^{-0,28} \left(\frac{k_t}{k_{t0}} \right)^{0,48} \frac{f(k_l)}{f(k_{l0})}, \quad (4.1)$$

де $q_0 = 5$, $k_{t0} = 1,27$ (відповідає $t = 100$ °C), $k_{l0} = 1,0$ (відповідає $l_t = 10 \cdot d_t$) – значення коефіцієнтів q , k_t і k_l , прийняті в якості базових.

Адекватність цієї залежності перевірено за критерієм F , який визначався за формулою (2.22) на основі результатів порівняння розрахункових та експериментальних даних (табл. 4.2). При цьому дисперсії адекватності s_a^2 та відтворюваності експерименту s_y^2 розраховувались наступним чином:

$$s_a^2 = \frac{S_a}{f_a} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \cdot (Nu_{ai} - \overline{Nu}_i)^2}{N - p},$$

де S_a – сума квадратів відхилень розрахункових та експериментальних даних;

Таблиця 4.2

Вихідні дані для розрахунку дисперсій s_a^2 та s_y^2

N_d	Nu_a	Nu	\bar{Nu}	$Nu_a - \bar{Nu}$	$Nu - \bar{Nu}$
1	26,8	26,1	24,4	2,4 (9,8%)	1,7 (7,0%)
		22,7			-1,7 (-7,0%)
2	25,1	23,6	23,6	1,5 (6,2%)	-
3	9,5	8,3	8,3	1,2 (14,7%)	-
4	16,2	14,5	14,5	1,7 (11,5%)	-
5	20,6	19,5	19,5	1,1 (5,6%)	-
6	47,5	52,4	52,4	-4,9 (-9,3%)	-
7	38,7	34,8	34,8	3,9 (11,3%)	-
8	27,0	27,3	27,3	-0,3 (-1,2%)	-
9	11,6	13,5	13,5	-1,9 (-14,2%)	-
10	25,1	28,6	28,6	-3,5 (-12,3%)	-
11	60,8	66	66	-5,2 (-7,8%)	-
12	51,1	54,4	56,2	-5,1 (-9,1%)	-1,8 (-3,2%)
		58,0			1,8 (3,2%)
13	51,9	56,8	56,8	-4,9 (-8,6%)	-
14	42,3	46,0	46,0	-3,7 (-8,1%)	-
15	16,6	17,5	17,5	-0,9 (-5,2%)	-
16	30,3	30,8	30,8	-0,5 (-1,5%)	-
17	68,0	66,8	66,8	1,2 (1,8%)	-
18	83,7	88,5	87,3	-3,6 (-4,2%)	1,2 (1,4%)
		86,1			-1,2 (-1,4%)
19	75,5	79,2	79,2	-3,7 (-4,6%)	-
20	74,9	79,2	79,2	-4,3 (-5,5%)	-
21	137,6	130,5	130,5	7,1 (5,5%)	-
22	51,0	55,1	55,1	-4,1 (-7,5%)	-
23	99,7	94,8	94,8	4,9 (5,1%)	-
24	136,4	133,4	133,4	3,0 (2,%)	-
25	98,5	95,6	93,6	4,9 (5,3%)	2,0 (2,1%)
		91,6			-2,0 (-2,1%)

$f_a = N - p$ – кількість ступенів свободи дисперсії адекватності моделі;

$i = 1 \dots N$ – номер контрольної точки;

$N = 25$ – кількість контрольних точок згідно експериментального плану;

n_i – кількість дубльованих дослідів у i -й контрольній точці: для 4-х контрольних точок, в яких проводилось дублювання дослідів – $n_i =$

$= n_{12} = n_{18} = n_{25} = 2$, для інших контрольних точок $n_i = 1$ (досліди не дублювались);

Nu_{ai} – розрахункове значення критерія Нуссельта для i -ої контрольної точки;

\overline{Nu}_i – середнє значення критерія Нуссельта для i -ої контрольної точки;

$p = 11$ – число коефіцієнтів в регресійній залежності (4.1), які визначаються за даними експерименту.

Дисперсія відтворюваності експерименту визначалась за результатами 4-х дубльованих дослідів, як середньоарифметичне з дисперсій цих дослідів:

$$s_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^m s_i^2}{m},$$

де $m = 4$ – кількість серій дубльованих дослідів;

s_i^2 – дисперсія відтворюваності експерименту у i -й серії дослідів:

$$s_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (Nu_{ij} - \overline{Nu}_i)^2}{n - 1},$$

де $n = 2$ – кількість дубльованих дослідів;

Nu_{ij} – j -те значення критерія Нуссельта у i -й серії дослідів.

Число ступенів свободи дисперсії s_y^2 для даного способу її визначення складає $f_y = m \cdot (n - 1) = 4$.

Визначені за вказаними формулами дисперсії s_a^2 та s_y^2 і величина F складають: 28,65, 11,24 і 2,55, відповідно. Розраховане значення критерія F є меншим, ніж критичне значення $F_{0,95} = 5,87$ (відповідає довірчій вірогідності – 0,95 та ступеням свободи – $f_a = 14$ і $f_y = 4$), що підтверджує адекватність встановленого рівняння тепловіддачі.

Аналіз залежності (4.1) показує наступне (рис. 4.2):

а) в тунелі при базових значеннях величин q , k_t і k_l критерій Nu в 1,4...2,0 рази вище, ніж в гладких циліндричних трубах;

б) при збільшенні коефіцієнта q від 5 до 15 критерій Nu знижується на 26%;

в) при зростанні температури ВГ на вході в тунель з 100 °С ($k_t = 1,27$) до 300 °С ($k_t = 1,96$) число Nu пропорційно збільшується на 23%;

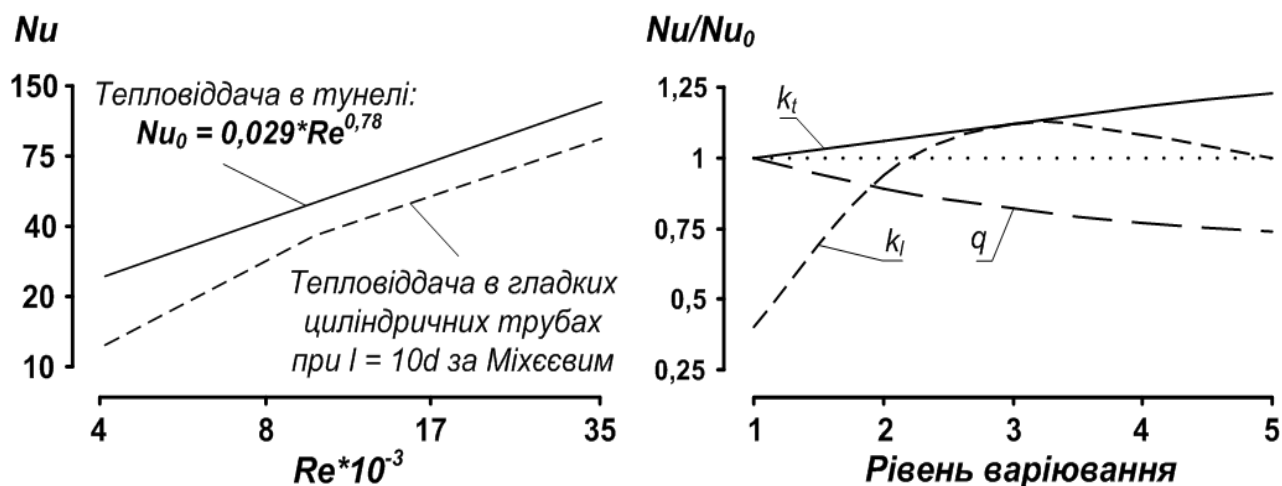


Рис. 4.2. Вплив параметрів Re , q , k_t і k_l на критерій Nu

г) при зменшенні довжини тунелю з $10 \cdot d_t$ ($k_l = k_{l0}$) до $6 \cdot d_t$ ($k_l = 0,6$) число Nu зростає на 12%, при подальшому зменшенні довжини до $2 \cdot d_t$ ($k_l = 0,2$) – Nu знижується до 40% від базового рівня.

4.2 Встановлення умов, що забезпечують ізокінетичний режим відбору ВГ з вихлопної труби дизеля

Дослідження процесу відбору ВГ в мінітунелі з ІКП проводилось на двох випробувальних стандах:

- стенді для досліджень ізокінетичного режиму відбору проб (описаний у п. 3.3), який входив до складу безмоторного випробувального станду з МТ-1;
- гальмівному стенді дизеля 1Ч12/14.

Метою досліджень було встановлення впливу параметрів газового потоку у ВТ (швидкості, температури, тиску, коливань тиску тощо) на перепад статичних тисків між ІКП та ВТ – ΔP_{ik} . При цьому враховувався висновок про те, що величина ΔP_{ik} є пропорційною швидкісному напору потоку у ВТ.

4.2.1 Дослідження ізокінетичного режиму відбору проб на безмоторному випробувальному стенді дозволили вирішити три задачі, назви яких та отримані результати наведені нижче.

Визначення залежності величини ΔP_{ik} від швидкісного напору газового потоку у ВТ та можливостей її використання в умовах пульсацій тиску.

В результаті проведення 3-х серій дослідів (на стенді, зображеному на рис. 3.45) при варіюванні швидкості, температури та

надлишкового тиску у ВТ в діапазонах 8,2...23,0 м/с, 20...155 °С та 0,4...2,2 кПа встановлено експериментальну залежність величини ΔP_{ik} від швидкісного напору (досліджувався в діапазоні 40...300 Па) стаціонарного потоку робочого тіла – повітря (табл. 4.3, рис. 4.3):

$$\Delta P_{ik} = 0,161 \cdot \frac{\rho v^2}{2} - 4,7. \quad (4.2)$$

Таблиця 4.3

Результати досліджень впливу параметрів потоку у ВТ на величину ΔP_{ik}

Серія випробувань	N_d	Параметри потоку у ВТ			$\frac{\rho v^2}{2}$, Па	ΔP_{ik} , Па
		G , г/с	t , °С	P , Па		
1	1	20,2	50	500	44,1	3,9
	2	20,1	50	1450	43,3	1,0
	3	35,1	50	1000	132,5	13,7
	4	35,3	70	1000	142,3	16,7
	5	27,6	95	1000	93,3	7,8
	6	35,1	102	1000	153,8	20,6
	7	35,2	100	500	154,6	23,5
	8	35,1	125	1000	163,2	17,6
	9	20,4	150	500	58,9	3,9
	10	20,2	155	1450	57,9	2,9
2	1	20,0	20	400	40,7	3,9
	2	20,2	20	1600	41,0	2,0
	3	35,1	20	1000	124,6	17,6
	4	46,6	25	400	224,7	33,3
	5	21,7	70	1000	55,7	5,9
	6	35,3	70	400	148,4	16,7
	7	34,9	70	700	144,6	22,5
3	1	25,5	24	1000	64,4	5,3
	2	35,0	29	1600	122,6	15,2
	3	54,2	32	2200	295,1	44,5

Використання цієї формули в умовах пульсацій тиску у ВТ неможливе із-за суттєвих відхилень режиму відбору від ізокінетичного. Так, при коливаннях тиску у ВТ з амплітудами $\pm 0,25 \dots 0,5$ кПа і частотою 16...24 Гц відхилення швидкостей потоків в ІКП і ВТ складають 7...13% (рис. 4.4).

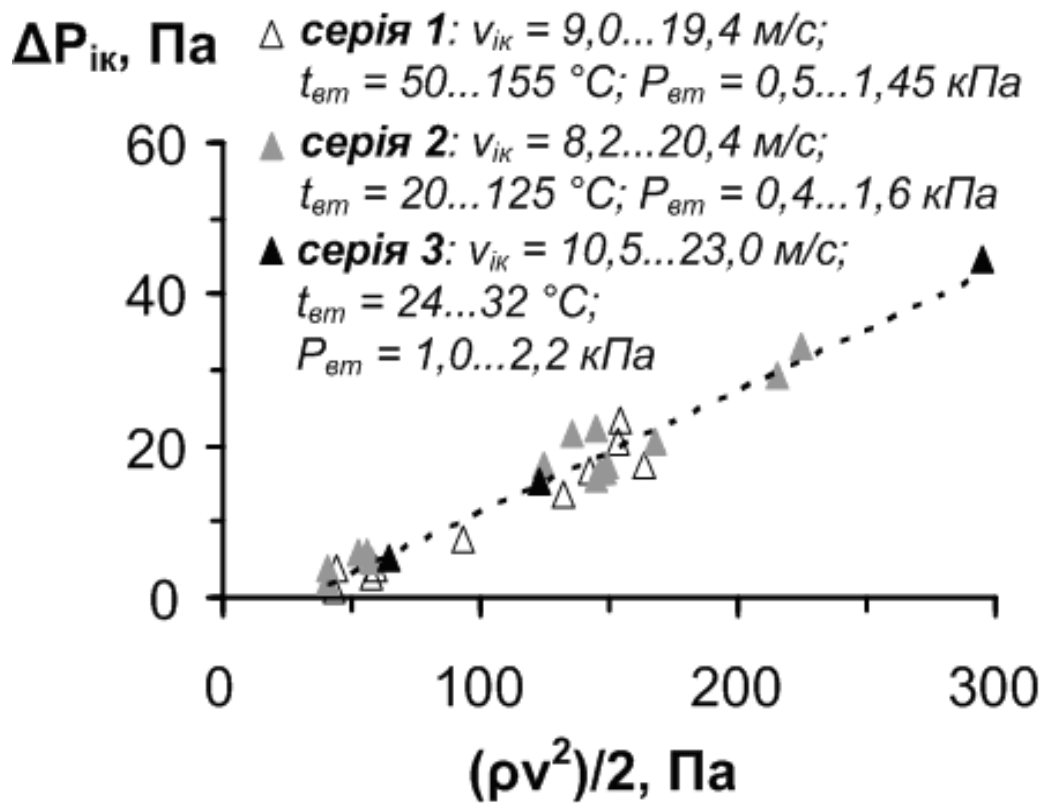


Рис. 4.3. Залежність $\Delta P_{ik} = f((\rho v^2)/2)$ для стаціонарного газового потоку

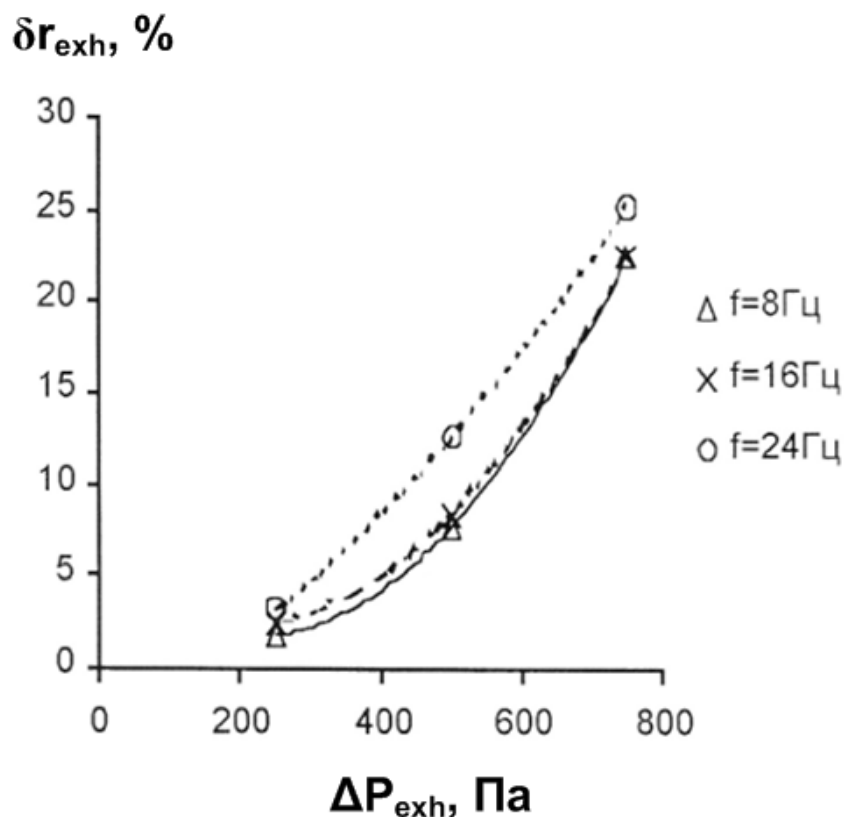


Рис. 4.4. Вплив пульсацій тиску у ВТ з амплітудою ΔP_{exh} на коефіцієнт відбору ВГ

Аналіз залежності (4.2) показує:

– при варіюванні параметрів газового потоку у діапазонах, що розглядались, величина ΔP_{ik} лінійно залежить від швидкісного напору газового потоку у ВТ;

– коефіцієнт $\Delta\alpha$ у формулі (3.4) має позитивне значення; це свідчить про те, що $\alpha_1 > \alpha_2$ і у перетині ІКП нерівномірність розподілу швидкостей більш суттєва, ніж у перетині ВТ;

– СКВ розрахункових значень ΔP_{ik} від експериментальних даних складає $\pm 2,2$ Па, що має один порядок з похибкою дослідів – ± 2 Па (похибка мікроманометру) і свідчить про адекватність регресійної залежності (4.2);

– використання отриманої залежності можливо при швидкостях газового потоку у ВТ більших, ніж 8 м/с (швидкісний напор при цьому перевищує 40 Па).

Оцінювання впливу відхилень перепаду статичного тиску між ІКП та ВТ від ΔP_{ik} на коефіцієнт відбору проби r_{exh} .

При ізокінетичному режимі відбору проб коефіцієнт r_{exh} , який визначає частку відібраної проби, дорівнює відношенню площ внутрішніх перетинів ІКП та ВТ.

Відхилення фактичного перепаду статичних тисків між цими трубопроводами від $\Delta P_{ik} - \Delta P_r$ приводить до виникнення похибки визначення коефіцієнту $r_{exh} - \delta r_{exh}$, яка не повинна перевищувати допустимого значення – $\delta r_{exh(доп)} = 3\%$.

В результаті проведення 3-х серій дослідів з варіюванням швидкості потоку у ВТ та відхилень ΔP_r у діапазонах 10,5...22,5 м/с та - 20...20 Па (діапазон варіювання швидкісного напору – 64...295 Па) (табл. 4.4) визначено експериментальні залежності $\delta r_{exh} = f(\Delta P_r)$ та $\Delta P_r = f(\delta r_{exh})$ для стаціонарного газового потоку (рис. 4.5– 4.7):

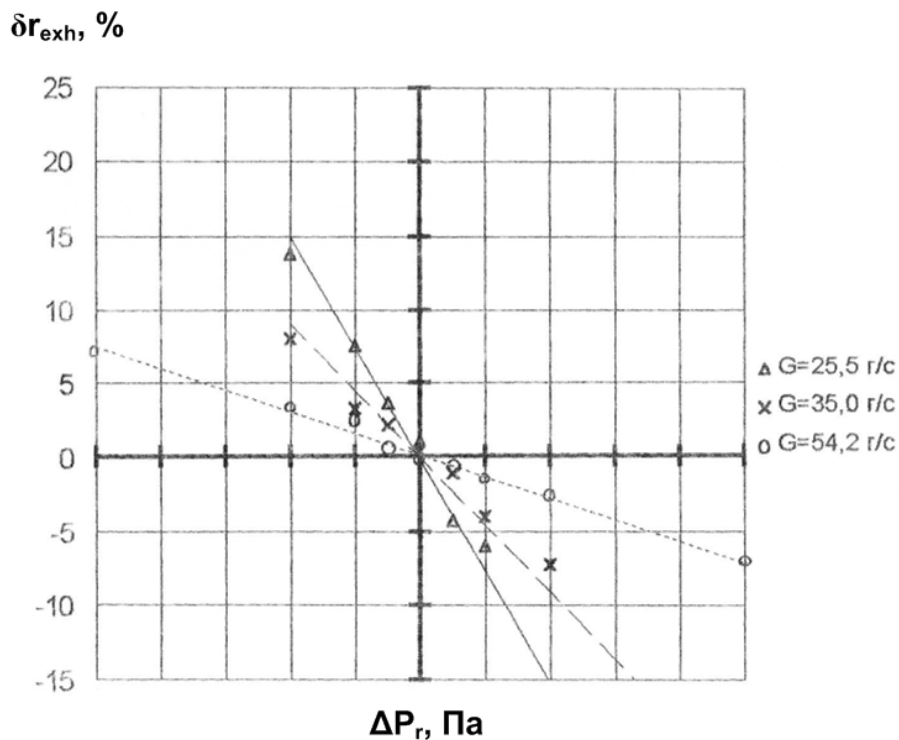
$$\delta r_{exh} = -0,473 \cdot \frac{\Delta P_r}{\left(\frac{\rho v^2}{2}\right)},$$
$$\Delta P_r = -2,11 \cdot \left(\frac{\rho v^2}{2}\right) \cdot \delta r_{exh}. \quad (4.3)$$

Аналіз отриманих залежностей показує:

– величина δr_{exh} пропорційна відхиленню ΔP_r з коефіцієнтом пропорційності - 0,473;

Результати досліджень впливу відхилень ΔP_r на коефіцієнт відбору r_{exh}

Серія випробувань	N_d	ΔP_r , Па	δr_{exh} , %	$-\frac{\rho v^2}{2} \cdot (2\delta r_{exh})$
Серія 1: $G = 25,5$ г/с, $t = 28$ °С, $P = 1000$ Па, $\frac{\rho v^2}{2} = 64,4$ Па, $\Delta P_{ik} = 5,3$ Па	1	-20	13,69	-19,07
	2	-10	7,44	-10,06
	3	-5	3,69	-4,90
	4	0	1,02	-1,34
	5	5	-4,27	5,45
	6	10	-6,04	7,64
	7	20	-17,05	20,34
Серія 2: $G = 35,0$ г/с, $t = 30$ °С, $P = 1600$ Па, $\frac{\rho v^2}{2} = 122,6$ Па, $\Delta P_{ik} = 15,2$ Па	1	-20	7,94	-20,42
	2	-10	3,27	-8,22
	3	-5	2,12	-5,30
	4	0	0,46	-1,14
	5	5	-1,08	2,66
Серія 3: $G = 54,2$ г/с, $t = 32$ °С, $P = 2200$ Па, $\frac{\rho v^2}{2} = 295,1$ Па, $\Delta P_{ik} = 44,5$ Па	1	-50	7,17	-44,35
	2	-20	3,21	-19,47
	3	-10	2,48	-14,99
	4	-5	0,7	-4,19
	5	0	-0,23	1,37
	6	5	-0,61	3,63
	7	10	-1,58	9,36

Рис. 4.5. Результати досліджень впливу відхилень ΔP_r на коефіцієнт відбору r_{exh}

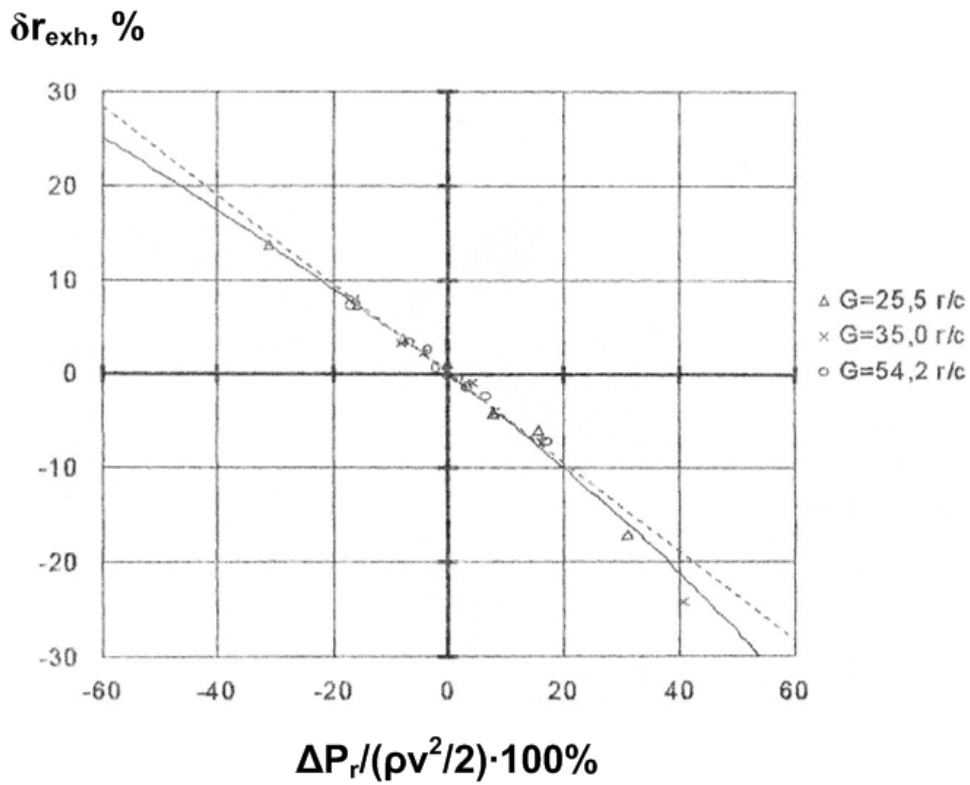


Рис. 4.6. Залежність коефіцієнту відбору r_{exh} від $\Delta P_r / (\rho v^2 / 2)$

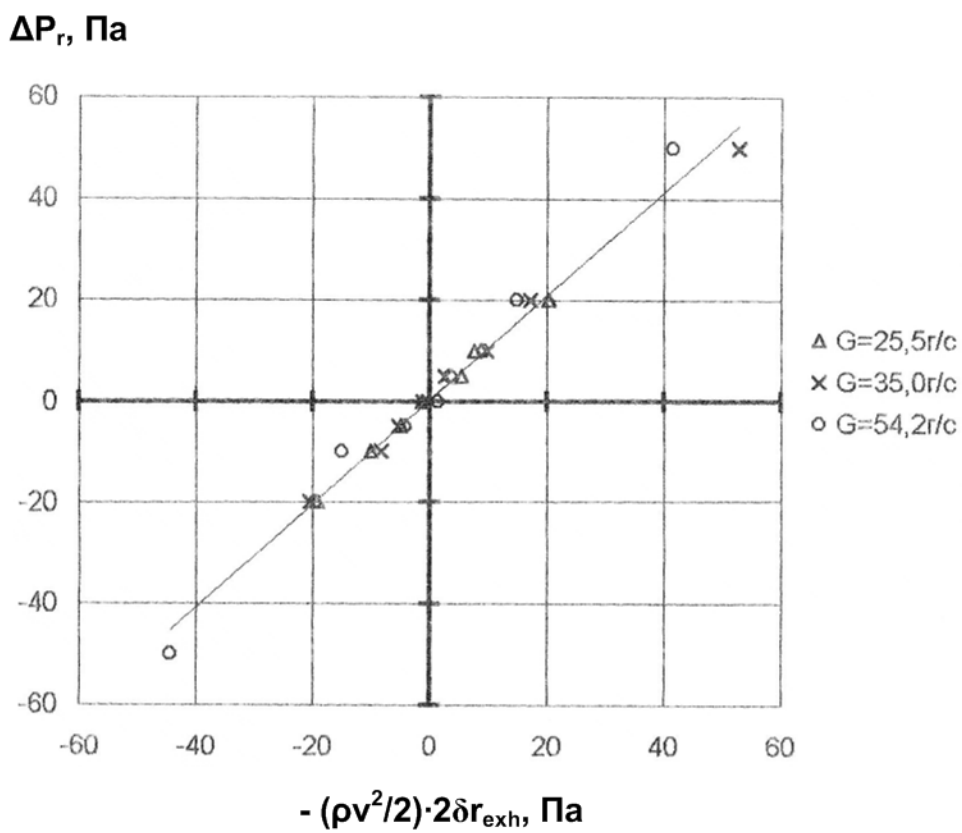


Рис. 4.7. Залежність величини ΔP_r від δr_{exh}

– при постійному δr_{exh} зі зростанням швидкісного напору у ВТ відповідне значення ΔP_r пропорційно збільшується;

– існує режим відбору ВГ (не ізокінетичний), при якому перепад статичних тисків між ІКП та ВТ може підтримуватись на постійному рівні $\Delta P_{ik} = -4,7$ Па; при цьому $\delta r_{exh} = 0,161 / 2,11 = 0,076$ та $r_{exh} = 5,9\% = \text{const}$; це підтверджено експериментально (рис. 4.8).

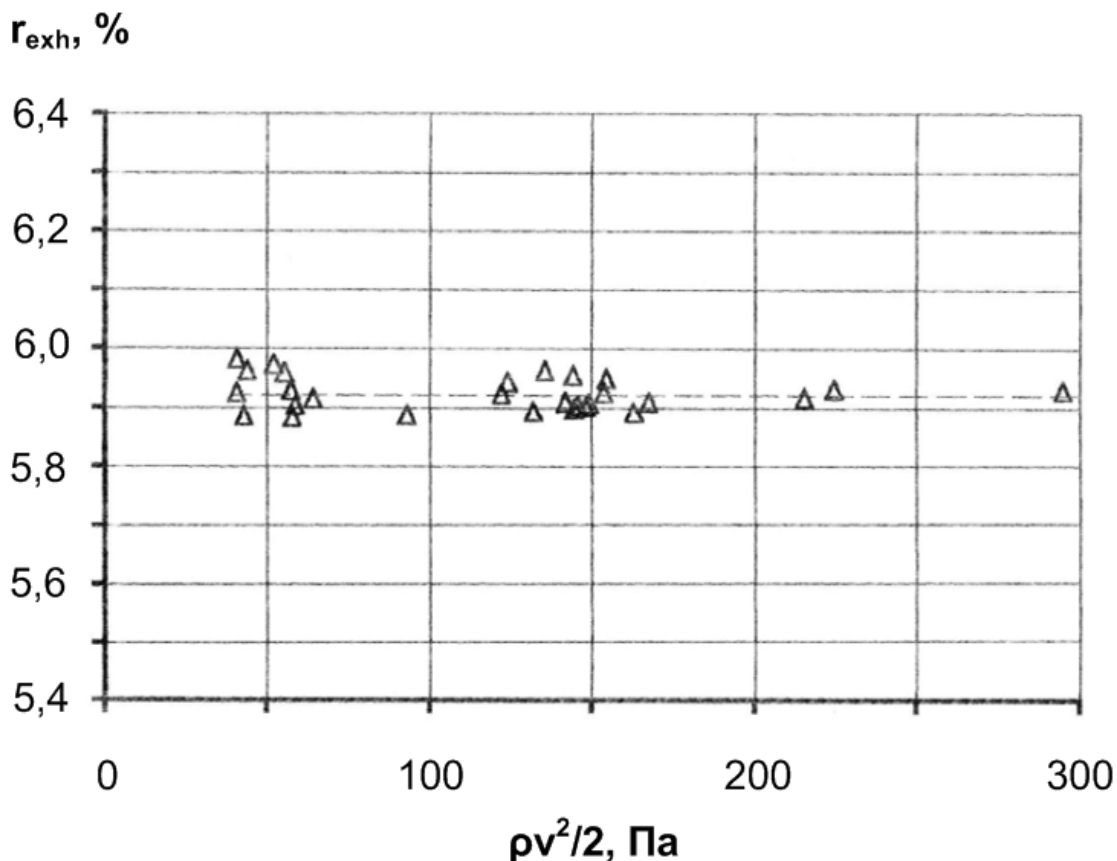


Рис. 4.8. Дослідження коефіцієнту r_{exh} при значенні $\Delta P_{ik} = -4,7$ Па

Встановлення допустимих відхилень перепаду статичних тисків між ІКП та ВТ від $\Delta P_{ik} - \Delta P_{r(\text{доп})}$, при яких забезпечується потрібна точність визначення коефіцієнту r_{exh} .

В результаті підстановки $\delta r_{exh(\text{доп})}$ до формули (4.3) отримано залежність для визначення величини $\Delta P_{r(\text{доп})}$:

$$\Delta P_{r(\text{доп})} = -2,11 \cdot \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) \cdot (\pm 0,03) = \pm 0,063 \cdot \left(\frac{\rho v^2}{2} \right). \quad (4.4)$$

За допомогою цієї залежності встановлено значення $\Delta P_{r(\text{доп})}$ для стаціонарних газових потоків, які імітують потоки ВГ на режимах

роботи дизеля 1Ч12/14. Ці значення варіюються в діапазоні від 2 Па (на режимі холостого ходу при $(\rho v^2)/2 = 30$ Па) до 6 Па (на режимі номінальної потужності при $(\rho v^2)/2 = 150$ Па). Збільшення коефіцієнту r_{exh} у n разів (наприклад, за рахунок зменшення діаметру ВТ) дозволяє підвищити $\Delta P_{r(\text{доп})}$ у n^2 разів.

4.2.2 Дослідження ізокінетичного режиму відбору ВГ на гальмівному стенді дизеля 1Ч12/14 з мінітунелем МТ-1 дозволили встановити експериментальну залежність для визначення перепаду тисків між ІКП та ВТ при ізокінетичному режимі відбору ВГ – ΔP_{ik}^{real} . Ця залежність враховує реальні умови роботи дизеля:

$$\Delta P_{ik}^{real} = \Delta P_{ik} + \Delta_{ik}(\bar{n}, \bar{L}),$$

де $\Delta_{ik}(\bar{n}, \bar{L}) = 3,0 + 0,5 \cdot \bar{n} - 2,3 \cdot \bar{n} \cdot \bar{L}$ – поправка, яка враховує режим роботи двигуна.

Для практичного використання цієї формули додатково визначені допустимі відхилення – $\Delta P_{\text{доп}}$ фактичного перепаду статичних тисків між ІКП та ВТ від ΔP_{ik}^{real} (рис. 4.9; показані залежності $\Delta P_{\text{доп}}$ від параметрів \bar{n} , \bar{L} при $r_{exh} = 5,5\%$: 1, 2 – при $(\rho v^2)/2 = 35\text{--}240$ Па; 3, 4 – при збільшенні $(\rho v^2)/2$ у 4 рази).

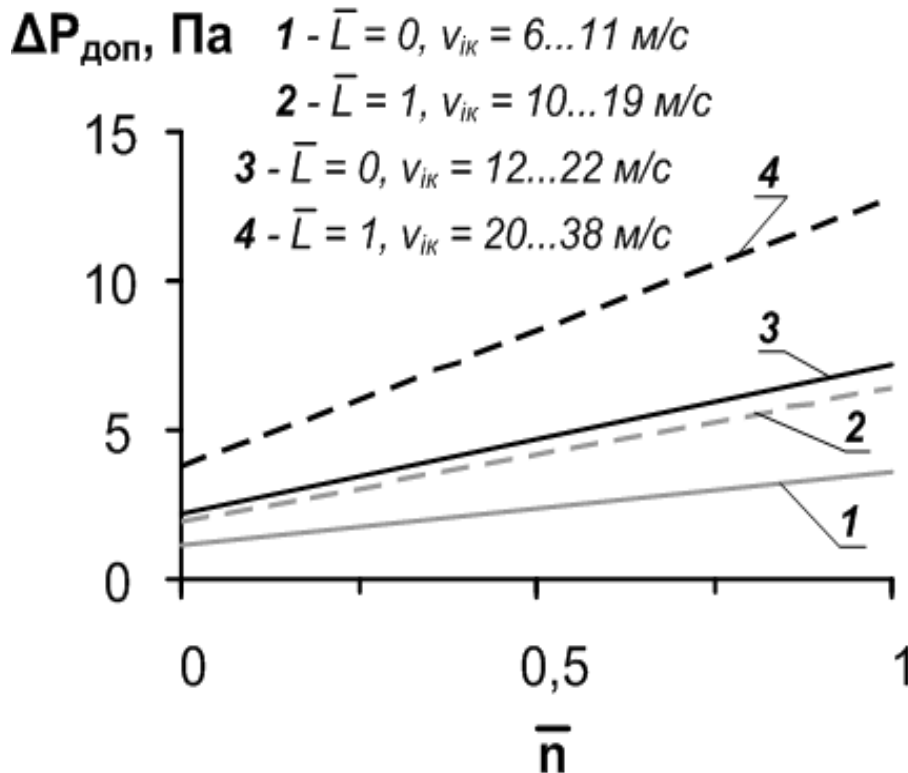


Рис. 4.9. Залежність допустимих відхилень $\Delta P_{\text{доп}}$ від ΔP_{ik}^{real}

4.3 Встановлення залежностей для визначення інструментальної та методичних складових результуючої похибки δPT

4.3.1 Визначення інструментальної похибки вимірювань показника PT . В результаті застосування залежності (2.3) до величин, що вимірюються непрямим шляхом, визначено формули для обчислення похибки δPT_{in} та її максимальні значення для різних режимів розбавлення ВГ (табл. 4.5).

Таблиця 4.5

Результати визначення інструментальної похибки δPT_{in}

Похибка	Вираження для розрахунку похибки	Значення похибки, %				
		$DM1$ 2 цикли	$DM1$	$DM2$	$DM3$	$DM4$
δM_f	$(\Delta M_f / M_f) \cdot 100\%$	2,1	4,1	2,8	3,4	2,4
δM_{sam}	$\delta M_{sami} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{13} WF_i^2}$	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6
δq_i	$\sqrt{2} \cdot \delta G^a \cdot (q_i - 1)$	3,8 ^{б)}	3,8 ^{б)}	2,3 ^{б)}	2,2	1,2
δG_{edfi}	$\sqrt{\delta q_i^2 + \delta G_{exhi}^2}$	4,6 ^{б)}	4,6 ^{б)}	3,6 ^{б)}	3,3	2,8
$\overline{\delta G_{edf}}$	$\sqrt{\sum_{i=1}^{13} (WF_i \cdot k_{Gedfi}^e) \cdot \delta G_{edfi}^2}$	1,0	1,4	1,1	1,3	1,1
δPT_{mass}	$\sqrt{\delta M_f^2 + \delta M_{sam}^2 + (\overline{\delta G_{edf}})^2}$	2,4	4,4	3,1	3,7	2,7
δP_i	$\sqrt{\delta n^2 + \delta M_k^2}$	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
$\overline{\delta P}$	$\delta P_i \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{13} (WF_i \cdot k_{Pi}^e)^2}$	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
δPT	$\sqrt{\delta PT_{mass}^2 + (\overline{\delta P})^2}$	2,6	4,5	3,3	3,9	3,0

Примітки: а – δG – похибки витратомірів, які визначають масові витрати розбавлених ВГ та повітря в тунелі при диференційному способі визначення G_{exh}^t (приймаються рівними 0,2%); б – приведені максимальні значення похибок δq_i ; в – $k_{Gedfi} = G_{edfi} / \overline{G_{edf}}$ – коефіцієнти; г – $k_{Pi} = P_i / \overline{P_i}$ – коефіцієнти.

4.3.2 Встановлення та оцінювання методичної похибки вимірювань показника PT , що враховує вплив температурного режиму відбору проб ТЧ. В результаті виконання методики досліджень впливу температурного режиму відбору ТЧ на масу навішування ТЧ, представленої у п. 3.4.2, проведено 2-факторний експеримент (див. рис. 3.49) та визначено залежність коефіцієнту k_{tf} від параметрів режиму роботи двигуна (табл. 4.6, 4.7):

– при використанні нормованих змінних:

$$k_{tf} = -0,996 - 0,037 \cdot X_1 + 0,138 \cdot X_2;$$

– при переході від нормованих до вихідних змінних з використанням виражень (3.5) та (3.6) (рис. 4.10):

$$k_{tf} = -1,20 - 0,148 \cdot \bar{n} + 0,552 \cdot \bar{L}. \quad (4.5)$$

Таблиця 4.6

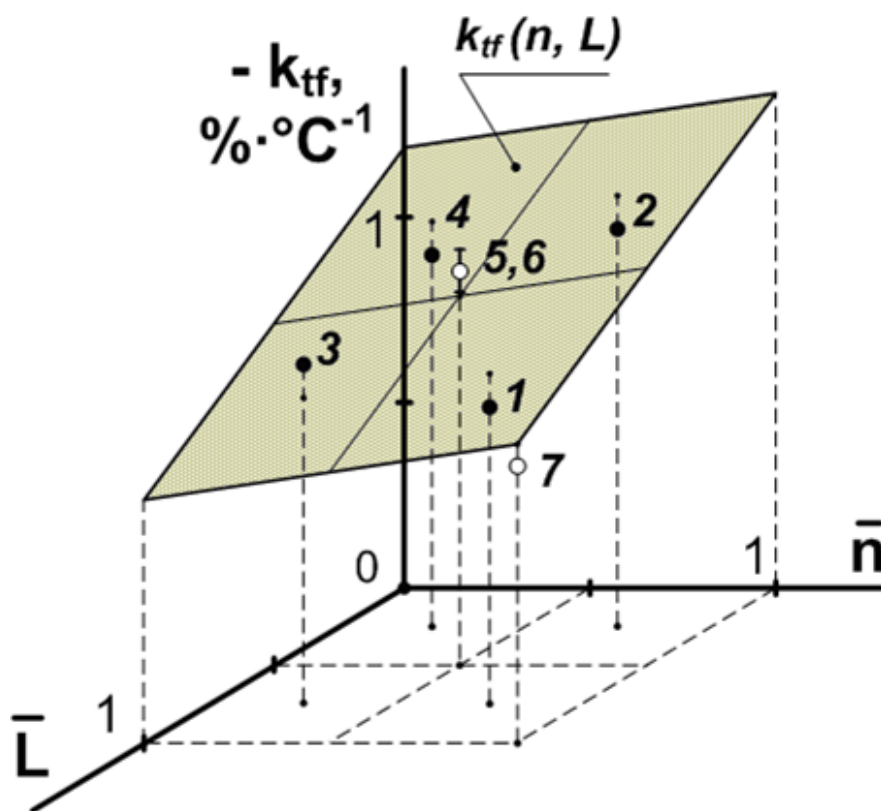
Результати експерименту з встановлення залежності $k_{tfi}(\bar{n}_i, \bar{L}_i)$

№ _д	Параметри тунелю			Параметри відбору ТЧ (у контрольному каналі)			Результати випробувань	
	G_{exh} , г/с	t_{exh} , °C	q	t_f , °C	m_f , мг	PT_{mass} , г/ч	Δt_f , °C	$-\delta m_f$, %
1	18,6	310	5,12	45,2	4,4	15,2	19,7	19,5
2	18,6	277	5,11	38,7	4,7	12,0	20,5	22,1
3	13,7	231	6,93	34,0	3,9	10,3	20,2	14,7
4	13,7	184	6,90	29,2	5,2	7,7	19,4	23,0
5	16,1	252	5,92	35,5	4,3	11,5	20,0	19,2
6	16,0	263	5,95	36,0	4,8	11,2	20,3	17,9
7	20,9	347	4,54	51,9	5,8	17,2	20,2	15,2

Результати порівняння експериментальних – k_{tf} та розрахункових – k_{tfp} даних

№ _д	$X_1 (\bar{n})$	$X_2 (\bar{L})$	$-k_{tf} \cdot 10^{-2},$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$-k_{tfp} \cdot 10^{-2},$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$\delta k_t,$ %
1	1 (0,75)	1 (0,75)	0,99	0,90	9,3
2	1 (0,75)	-1 (0,25)	1,08	1,17	-8,6
3	-1 (0,25)	1 (0,75)	0,73	0,82	-12,7
4	-1 (0,25)	-1 (0,25)	1,19	1,10	7,8
5, 6*	0 (0,5)	0 (0,5)	0,92	1,00	-8,1
7	2 (1,0)	2 (1,0)	0,86	0,75	12,4

Примітка: * – усереднений результат 2-х вимірювань.

Рис. 4.10. Результати експериментального визначення залежності $k_{tfi}(\bar{n}_i, \bar{L}_i)$

Достовірність вираження (4.5) підтверджується тим, що відносні відхилення розрахункових значень k_{tf} від експериментальних даних складають $\pm 7,8 \dots 12,7\%$ (СКВ, розраховане за результатами 2-х дубльованих дослідів – 5-го і 6-го, дорівнює $\pm 0,056$ або $4,7 \dots 6,5\%$) і є величинами одного порядку з похибками експерименту – $\pm 3 \dots 8\%$.

Аналіз залежності (4.5) показує:

– коефіцієнт k_{tf} має негативний знак у всій області варіювання параметрів \bar{n} та \bar{L} ;

– величина k_{tf} (без урахування знаку) зростає при зростанні \bar{n} і знижується при зростанні \bar{L} та змінюється в діапазоні від $0,65 \text{ \%} \cdot (\text{°C})^{-1}$ (при $\bar{n} = 0, \bar{L} = 1$) до $1,35 \text{ \%} \cdot (\text{°C})^{-1}$ (при $\bar{n} = 1, \bar{L} = 0$);

– змінювання навантаження має більш суттєвий вплив на величину k_{tf} ніж зміна числа обертів вала двигуна (у 3,7 рази).

Таким чином методична похибка δPT_{tf} може оцінюватись за наступною формулою (див. вираження (2.25) і (2.27)):

$$\delta PT_{tf} = \sum_{i=1}^{13} (-1,20 - 0,148 \cdot \bar{n}_i + 0,552 \cdot \bar{L}_i) \cdot (t_{fi} - t_{f0i}) \cdot r_{mfi}.$$

Оцінювання величини δPT_{tf} , проведене за результатами випробувань дизеля 1Ч12/14 за циклом ESC, показує, що діапазони варіювання цієї похибки становлять: $-8,3 \dots 6,3\%$ (розходження результатів – $14,6\%$) (рис. 4.11).

4.3.3 Встановлення та оцінювання методичної похибки вимірювань показника PT , що враховує вплив умов проведення стабілізації фільтру з ТЧ. В результаті проведення експериментальних досліджень у відповідності до методики, представлені у п. 3.4.3, отримано залежність коефіцієнту $k_{\tau st}$ від параметрів процесу стабілізації фільтру (рис. 4.12):

$$k_{\tau st} = -5,72 \cdot (1 + 0,071 \cdot (t_{st} - t_{st0})), \quad (4.6)$$

де $-5,72$ – величина коефіцієнту $k_{\tau st}^0$ (див. вираження (3.8));

$0,071$ – значення коефіцієнту $k_{\tau st}$, встановлене за формулою (3.9).

Достовірність залежності (4.6) підтверджується тим, що відхилення розрахункових значень δm_f^{st} від експериментальних даних не перевищують $\pm 2\%$, це відповідає відхиленню маси навішування ТЧ – $\pm 0,14$ мг, яке є величиною одного порядку з похибкою аналітичних ваг – $\pm 0,1$ мг.

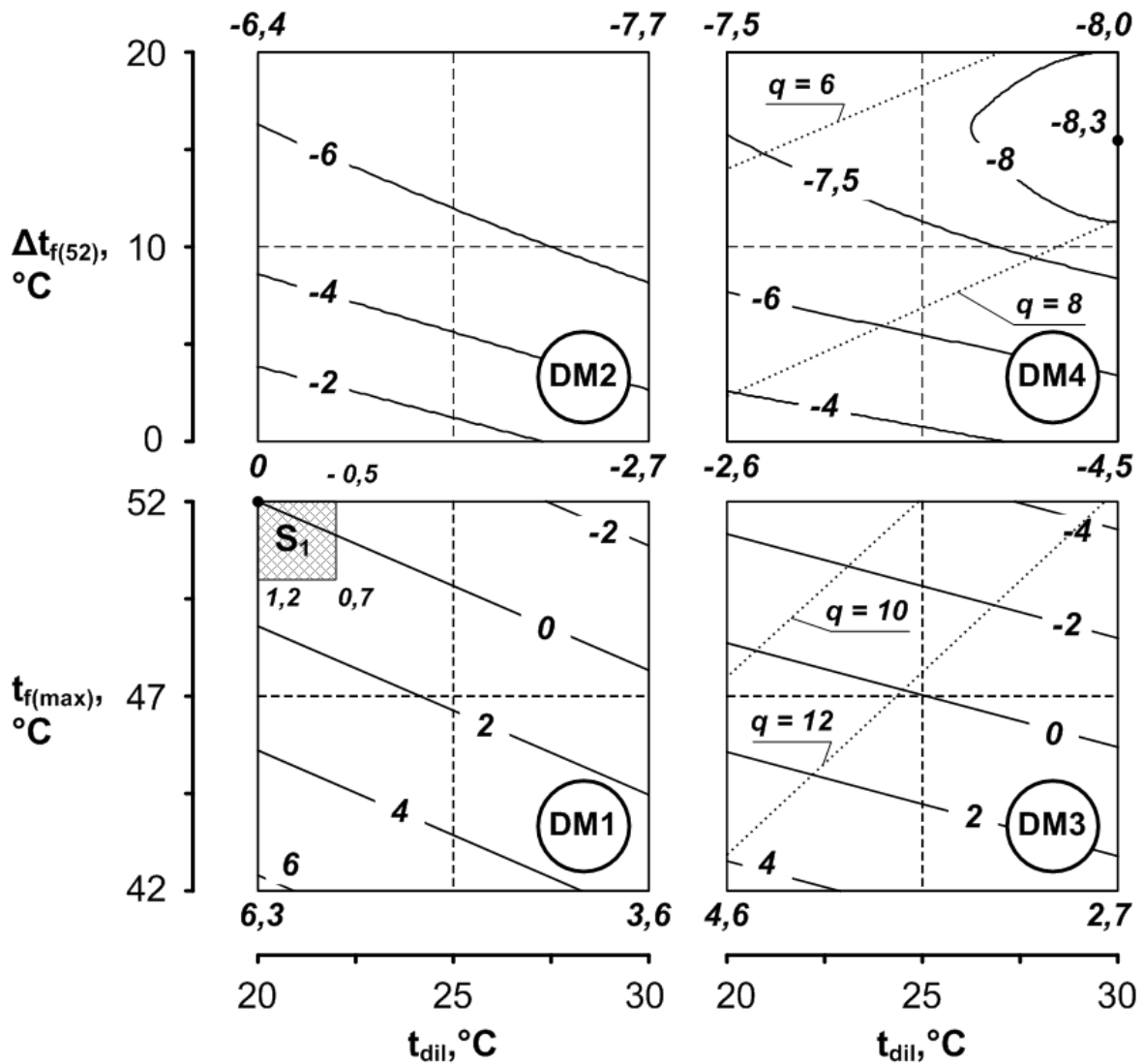


Рис. 4.11. Діапазонваріювання методичної похибки δPT_{tf}
 S_1 – область рекомендованих значень параметрів t_{dil} і $t_{f(max)}$

Виконано оцінку адекватності залежності (4.6) за критерієм F (див. формулу (2.22)). При цьому дисперсія адекватності s_a^2 (сладає $6,89 \cdot 10^{-3}$) визначалась за формулою:

$$s_a^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (m_{afi} - m_{fi})^2}{N - p},$$

де $N = 12$ – кількість експериментальних точок;
 m_{afi} – розрахункове значення маси ТЧ у i -й точці;
 m_{fi} – експериментальне значення маси ТЧ у i -й точці;
 $p = 5$ – кількість ступенів свободи, які було витрачено на визначення коефіцієнтів регресійної залежності (4.6).

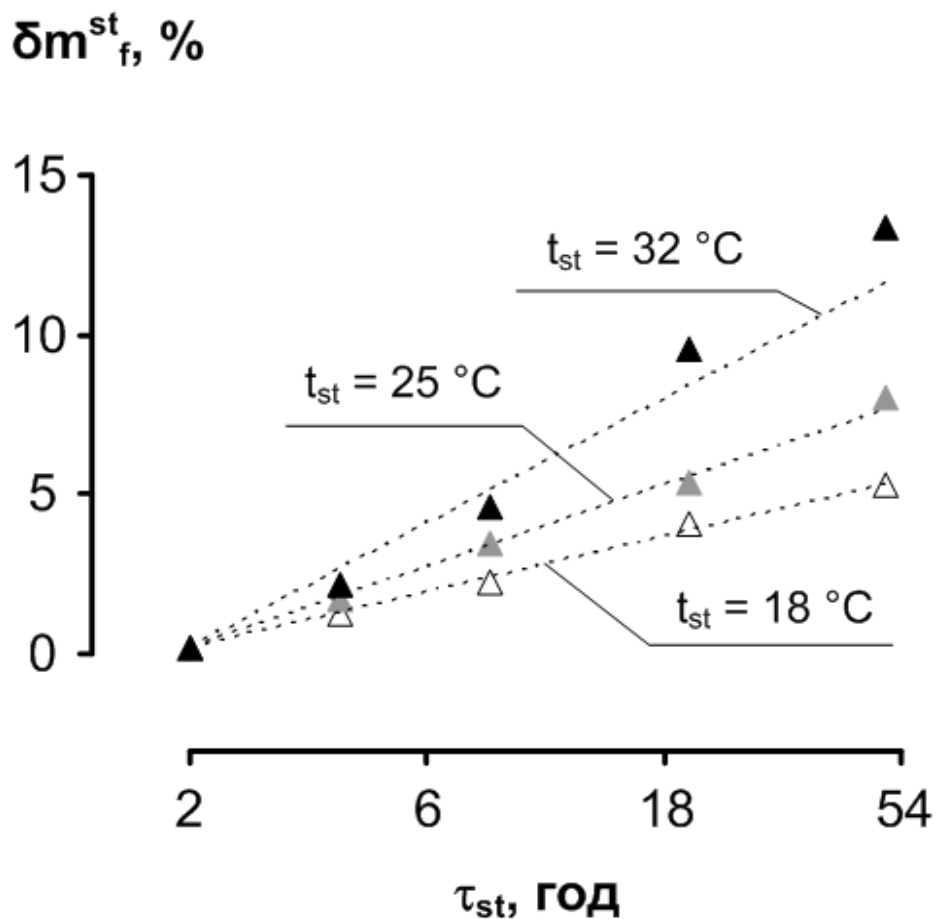


Рис. 4.12. Результати експериментальних досліджень залежності $k_{\tau st}$ (τ_{st} , t_{st})

Число ступенів свободи f_a дисперсії s_a^2 дорівнює $N - p = 7$.

Дисперсія відтворюваності експерименту s_y^2 (складає $3,25 \cdot 10^{-3}$) визначалась за результатами проведення серії з 5-ти послідовних вимірів маси ТЧ – m_f , зібраних на фільтрі під час виконання циклу ESC при параметрах стабілізації фільтру: $\tau_{st} = 2$ год, $t_{st} = 18,5$ °C; тривалість інтервалів між вимірюваннями складала 3 хв. Результати цієї серії вимірювань величини m_f : 6,75 мг, 6,80 мг, 6,75 мг, 6,65 мг, 6,70 мг.

Для розрахунку s_y^2 використовувалась формула:

$$s_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (m_{fj} - \bar{m}_f)^2}{n - 1},$$

де $n = 5$ – кількість вимірювань в серії;

m_j – маса ТЧ, яку було визначено у j -му вимірюванні;

\bar{m}_f – середньоарифметичне значення маси ТЧ в серії вимірювань.

Число ступенів свободи f_y дисперсії s_y^2 дорівнює $n - 1 = 4$.

В результаті розрахунку встановлено, що критерій $F = 2,12$ є меншим, ніж критичне значення $F_{0,95} = 5,91$ (відповідає довірчий вірогідності – 0,95 та числам ступенів свободи – $f_a = 12$ і $f_y = 4$); це доводить адекватність залежності (4.6).

Аналіз цієї залежності показує, що із зростанням температури t_{st} від 20 до 30 °С коефіцієнт $k_{\tau_{st}}$ збільшується з 3,69 до 7,75, тобто при незмінному τ_{st} величина відносного зниження маси навішування ТЧ – δm_f^{st} зростає у 2,1 рази.

В результаті підстановки вираження для визначення коефіцієнтів $k_{\tau_{st}}$ до формул (2.26) і (2.28) та проведення необхідних перетворень з урахуванням базових величин t_0 та τ_{st0} отримано залежність для визначення похибки δPT_{st} :

$$\delta PT_{st} = \frac{-5,72 \cdot (1 + 0,071 \cdot (t_{st} - t_{st0}))}{1,508 - 0,003 \cdot (t_{st} - t_{st0})} \cdot \lg \left(\frac{\tau_{st}}{\tau_{st0}} \right).$$

Отримана залежність дозволяє оцінити діапазон варіювання похибки δPT_{st} , який становить -6,7...4,5 %, при цьому максимальне розходження результатів вимірювань показника PT складає 11,2% (рис. 4.13).

4.4 Аналіз необхідності використання температурного регулювання в міні- та мікротунелях

На основі результатів випробувань дизеля 4ЧН12/14 за циклом ESC виконано розрахунки:

а) абсолютних відхилень температур проби перед фільтром в повнопоточній системі (з діаметром $D_{пт} = 46$ см) від аналогічних температур в міні- ($D_{мт} = 10$ см) та мікротунелі ($D_{мкт} = 3$ см):

$$\Delta t_{fi}^{MT} = t_{fi}^{пт} - t_{fi}^{MT},$$

$$\Delta t_{fi}^{MKT} = t_{fi}^{пт} - t_{fi}^{MKT} \text{ (верхній індекс вказує на тип тунелю);}$$

б) методичних похибок δm_{tfi}^{MT} та δm_{tfi}^{MKT} , які виникають внаслідок наявності відхилень Δt_{fi}^{MT} та Δt_{fi}^{MKT} ;

в) методичних похибок середньозваженого викиду ТЧ – δPT_{tf}^{MT} та δPT_{tf}^{MKT} .

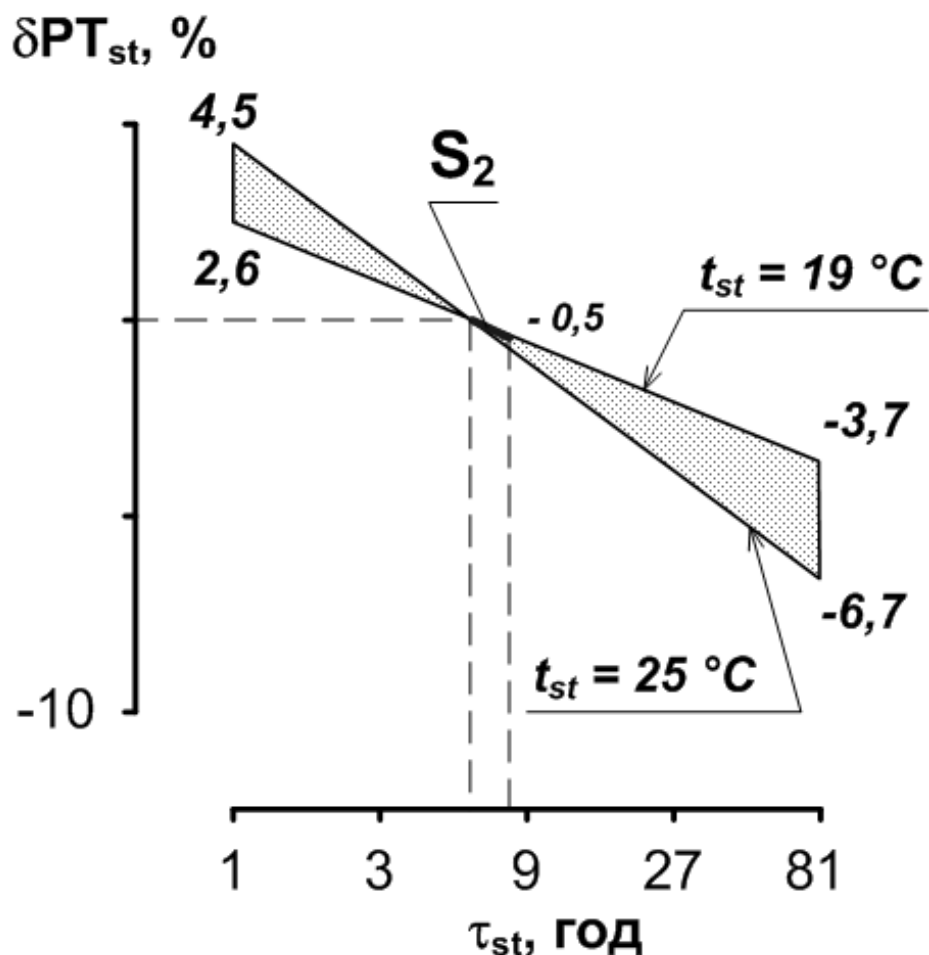


Рис. 4.13. Діапазон варіювання методичної похибки δPT_{st}
 S_2 – область рекомендованих значень параметрів τ_{st} та t_{st}

Результати досліджень (рис. 4.14, 4.15) свідчать про таке:

– в мінітунелі і еталонному тунелі значення температур t_{fi} приблизно рівні (відхилення $\Delta t_{fi}^{MT} \leq 0,7^\circ\text{C}$ та похибки $\delta m_{t_{fi}}^{MT} \leq 0,6\%$, $\delta PT_{t_{fi}}^{MT} \leq 0,4\%$ є несуттєвими);

– в мікротунелі величини Δt_{fi}^{MKT} , $\delta m_{t_{fi}}^{MKT}$ та $\delta PT_{t_{fi}}^{MKT}$ більш значущі і досягають, відповідно: $2,5^\circ\text{C}$, $-2,4\%$ та $-1,7\%$, тому вони повинні усуватися за рахунок температурного регулювання.

4.5 Оцінка похибки δPT , значимості її складових та ефективності зроблених рекомендацій

У відповідності до методики, наведеної у п.3.5, проведені розрахункові дослідження, в ході яких були встановлені діапазони варіювання інструментальної δPT_{in} , методичних $\delta PT_{t_{fi}}$ і δPT_{st} , а також результуючої δPT похибок вимірювань показника PT .

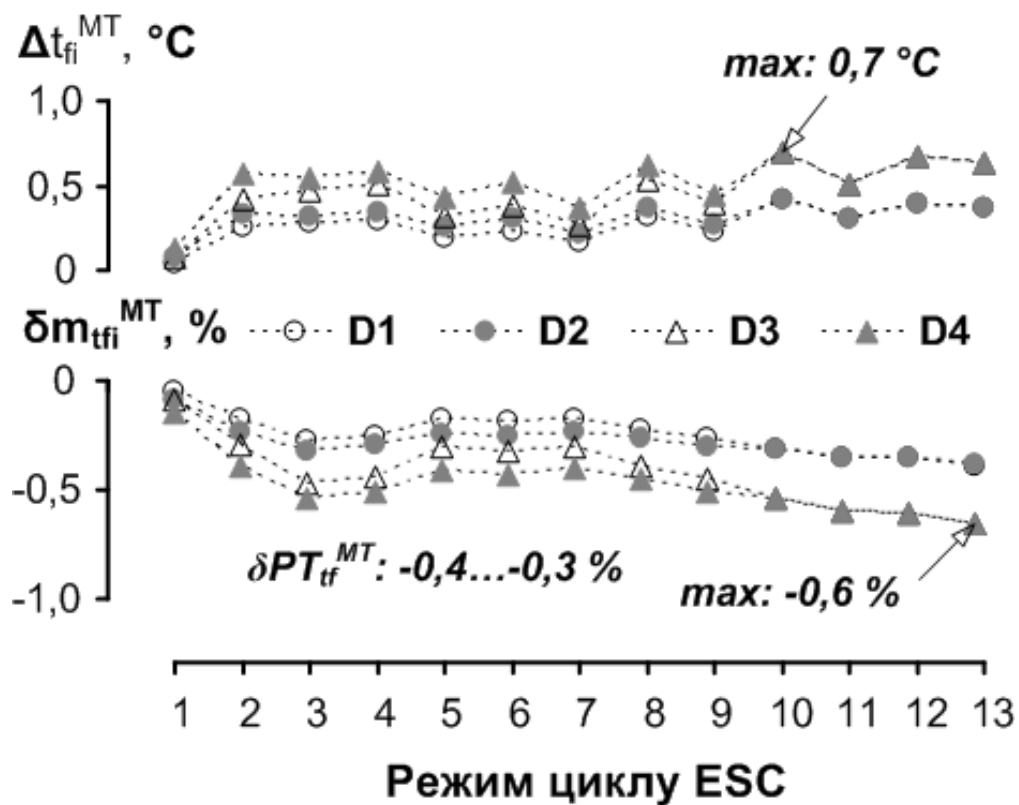


Рис. 4.14. Результати оцінювання величин Δt_{fi}^{MT} , $\delta m_{t_{fi}}^{MT}$ та $\delta PT_{t_{fi}}^{MT}$

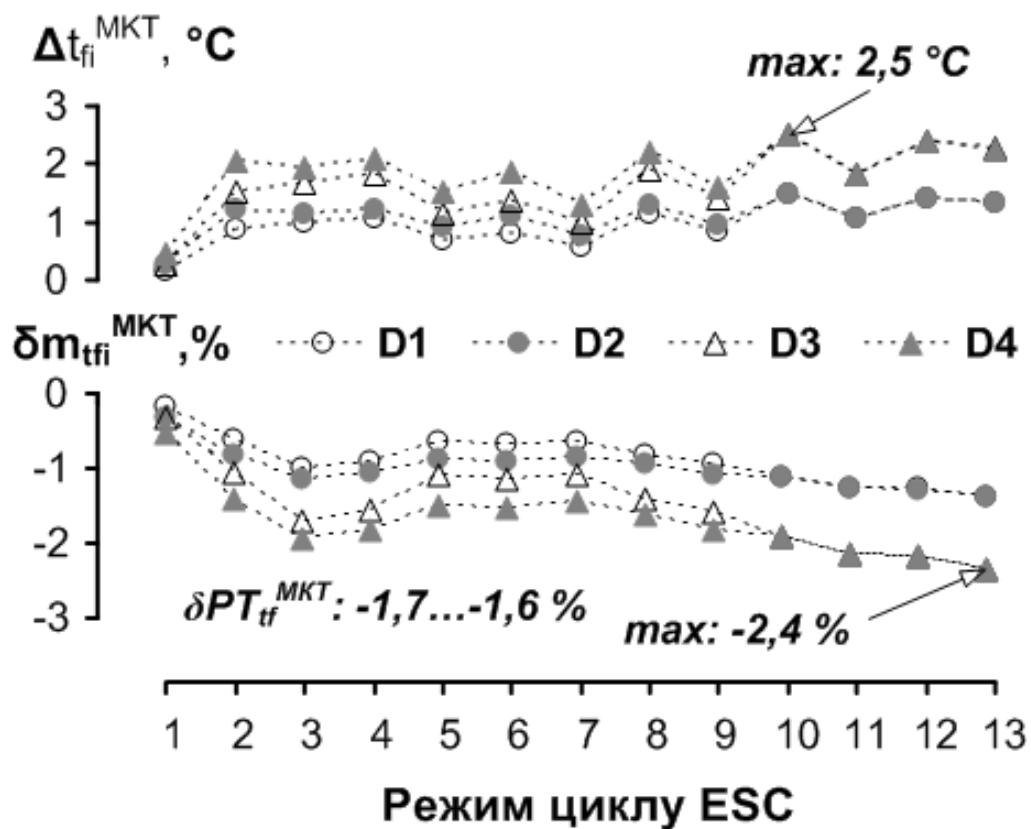


Рис. 4.15. Результати оцінювання величин Δt_{fi}^{MKT} , $\delta m_{t_{fi}}^{MKT}$ та $\delta PT_{t_{fi}}^{MKT}$

В ході досліджень оцінено відносні внески у похибку δPT кожної її складової R_j , визначено, як змінюється величина δPT та її складові при виконання зроблених рекомендацій щодо підвищення ефективності вимірювань величини PT . При цьому в якості вихідних даних для проведення досліджень використані результати випробувань дизеля 1Ч12/14 (табл. 4.8).

Таблиця 4.8

**Результати випробувань дизеля 1Ч12/14 за циклом ESC
при $t_{dil} = 19,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{f(max)} = 52 \text{ }^\circ\text{C}$**

№ _{реж}	Параметри дизеля					Параметри розбавлення ВГ			
	n , хв ⁻¹	M_k , Н·м	G_{exh} , кг/год	t_{exh} , °C	PT _{mass} , г/год	q		t_f , °C	
						DM1	DM3	DM1	DM3
1	800	0	40,3	85	4,6	14,6	8,6	23,9	26,6
2	1010	50	50,8	317	12,8	11,6	8,6	40,0	47,0
3	1185	25	59,8	302	11,3	9,8	8,6	42,5	45,8
4	1185	37,5	59,0	325	13,1	9,9	8,6	43,8	47,6
5	1010	25	50,4	244	9,0	11,6	8,6	35,6	41,1
6	1010	37,5	50,8	291	10,9	11,6	8,6	38,5	44,9
7	1010	12,5	51,1	210	8,1	11,5	8,6	33,6	38,2
8	1185	50	59,4	342	14,9	9,9	8,6	45,0	48,8
9	1185	12,5	59,8	254	10,5	9,8	8,6	39,2	42,0
10	1360	50	68,4	386	16,7	8,6	8,6	52,0	52,0
11	1360	12,5	68,4	285	13,1	8,6	8,6	44,5	44,5
12	1360	37,5	68,0	371	15,2	8,6	8,6	50,8	50,9
13	1360	25	68,2	349	13,7	8,6	8,6	49,5	49,4

Результати досліджень свідчать про наступне (рис. 4.16):

– складові результуючої похибки вимірювань показника PT варіюються в діапазонах:

а) при допустимих Правилами R-49 умовах проведення випробувань:

$$\delta PT_{in} = \pm 2,6... \pm 4,5\%, \quad \delta PT_{tf} = - 8,3...12,6\%, \quad \delta PT_{st} = - 6,7...4,5\%;$$

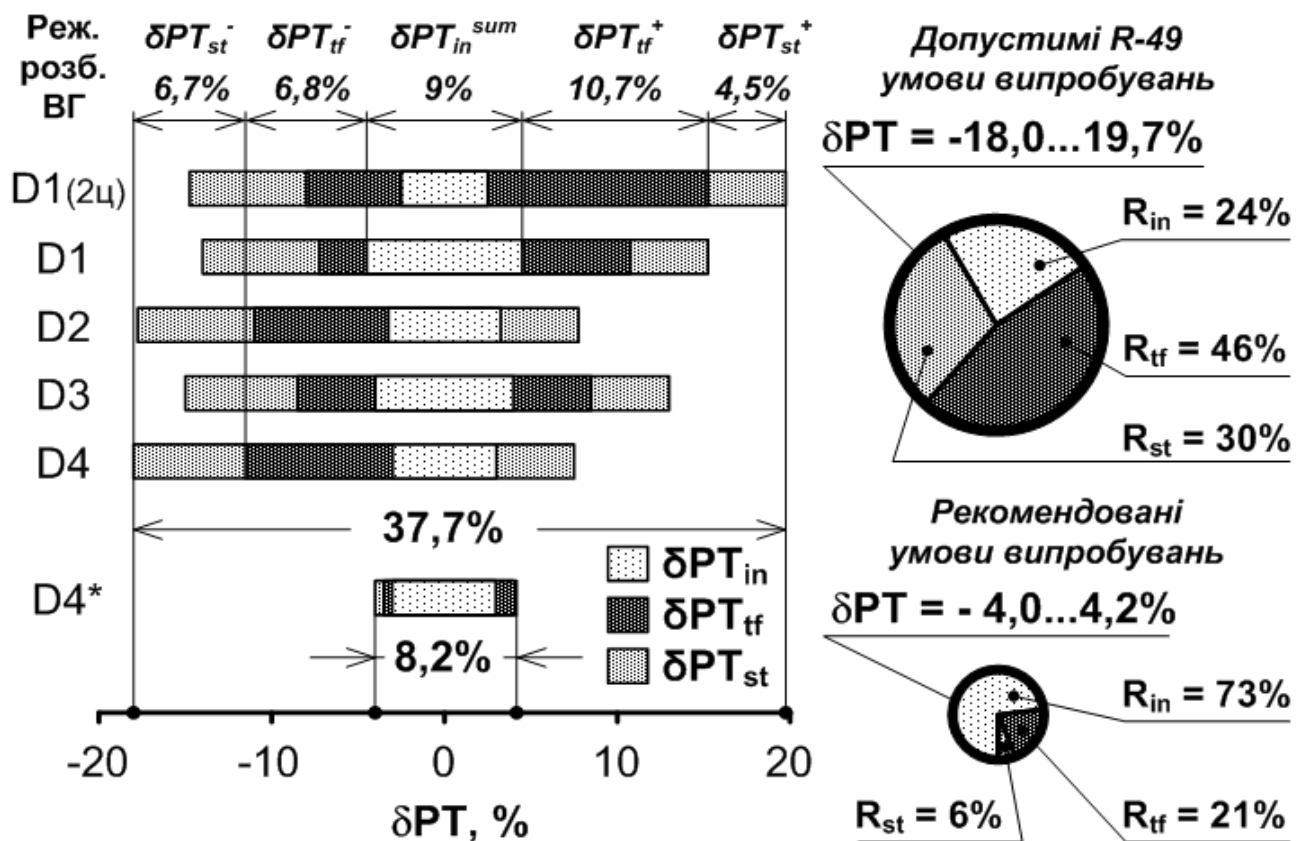


Рис. 4.16. Результати досліджень похибки δPT та значимості її складових

б) при проведенні випробувань з урахуванням зроблених рекомендацій щодо підвищення ефективності визначення показника PT :

$$\delta PT_{in} = \pm 3\%, \quad \delta PT_{tf} = -0,5...1,2\%, \quad \delta PT_{st} = -0,5...0\%;$$

– при використанні режимів розбавлення ВГ, які допускаються, результуюча похибка δPT варіюється в діапазоні $-18,0...19,7\%$ (розходження результатів $37,7\%$); при цьому найбільший внесок у δPT вносять методичні складові – сумарно 76% ; внесок інструментальної складової – 24% ;

– повторне виконання додаткового циклу ESC при CVS-розбавленні ВГ у тунелі не дозволяє підвищити точність вимірювань показника PT , не дивлячись на те, що інструментальна похибка при цьому знижується з $4,5\%$ до $2,6\%$, результуюча похибка зростає з $-13,9...15,3\%$ (розходження $29,2\%$) до $-14,7...19,7\%$ (розходження $34,7\%$) за рахунок збільшення методичної похибки δPT_{tf} ;

– в результаті виконання запропонованих рекомендацій результуюча похибка δPT знижується до $-4,0...4,2\%$, розходження результатів ($8,2\%$) зменшується в $4,6$ разів; при цьому внесок інструмен-

тальної складової в δPT зростає до 73%, а сумарний внесок методичних складових знижується до 27%.

Висновки глави

1. Встановлено критеріальне рівняння процесу тепловіддачі в тунелі – $Nu = f(Re, q, k_t, k_l)$, яке дозволяє визначати коефіцієнт тепловіддачі в будь-якому тунелі при різних умовах розбавлення ВГ повітрям. Аналіз отриманого рівняння тепловіддачі показує, що при $Re \cdot 10^{-3} = 4 \dots 35$ у тунелі критерій Nu :

- порівняно з гладкими циліндричними трубами є більшим у 1,4...2 рази (при $q = 5, k_t = 1,27, k_l = 1,0$);
- зменшується на 26% при збільшенні q від 5 до 15;
- зростає на 23% при збільшенні k_t від 1,27 до 1,96;
- зростає на 12% при зменшенні k_l від 1,0 до 0,6 та знижується на 40% (порівняно з $k_l = 1,0$) при подальшому зменшенні k_l до 0,2.

2. Дослідження перепадів статичних тисків між пробовідбірником та вихлопною трубою дизеля при ізокінетичному режимі відбору частки стаціонарного газового потоку (відбиралась на безмоторному стенді з мінітунелем МТ-1) – ΔP_{ik} та частки потоку ВГ (відбиралась на гальмівному стенді дизеля 1Ч12/14 з МТ-1) – ΔP_{ik}^{real} показали наступне:

– величина ΔP_{ik} є пропорційною швидкісному напору газового потоку у вихлопній трубі (при швидкостях потоку, більших за 8 м/с) незалежно від його масової витрати, температури та надлишкового тиску;

– величина ΔP_{ik}^{real} може визначатися, як сума ΔP_{ik} та поправки на коливання тиску у вихлопній трубі – Δ^{real} , яка залежить від режиму роботи дизеля (параметрів \bar{n} та \bar{L}) та визначається експериментально;

– для забезпечення потрібної точності визначення коефіцієнту відбору ВГ при швидкості потоку 8..20 м/с допустимі відхилення фактичних перепадів статичних тисків між пробовідбірником та вихлопною трубою – $\Delta P_{доп}$ становлять: на режимі холостого ходу – ± 2 Па, на режимі номінальної потужності – ± 6 Па; величину $\Delta P_{доп}$ може бути збільшено за рахунок зменшення діаметру вихлопної труби – при цьому $\Delta P_{доп}$ зростає пропорційно зростанню швидкісного напору газового потоку.

3. Встановлені залежності для розрахунку інструментальної похибки вимірювань середньоексплуатаційного викиду ТЧ, за допомогою яких оцінено діапазон варіювання цієї величини – $\pm 2,6 \dots \pm 4,5\%$; більша точність забезпечується при виконанні 2-х циклів випробувань дизеля при режимі розбавлення ВГ – *DM1*, менша точність – при виконанні одного циклу випробувань при тому самому режимі розбавлення ВГ.

4. Проведені експериментальні дослідження впливу температурного режиму відбору проб ТЧ та умов стабілізації робочого фільтру на масу ТЧ, що визначається. В результаті досліджень встановлені залежності для визначення методичних похибок вимірювань показника *PT*, які виникають на етапах пробопідготовки – δPT_{tf} та стабілізації фільтру – δPT_{st} , та оцінені діапазони варіювання цих величин (при випробуванні дизеля за циклом ESC): $\delta PT_{tf} = -8,3 \dots 6,3\%$ (розходження результатів – 14,6%), $\delta PT_{st} = -6,7 \dots 4,5\%$ (розходження результатів – 11,2%).

5. Проведено розрахункові дослідження розбіжностей температур t_{fi} в повнопоточному (еталонному) та частковопоточних тунелях – Δt_{fi}^{MT} та Δt_{fi}^{MKT} , а також виникаючих при цьому відхилень результатів вимірювань показника *PT* – δPT^{MT} та δPT^{MKT} . Дослідження показали, що в міні- та еталонному тунелі значення температур t_{fi} приблизно рівні ($\Delta t_{fi}^{MT} \leq 0,7$ °C, $\delta PT^{MT} \leq -0,4\%$ – несуттєві), а в мікротунелі відхилення Δt_{fi}^{MKT} (досягають 2,5 °C) та $\delta PT^{MKT} = -1,7 \dots -1,6\%$ більш значущі й повинні усуватися за рахунок регулювання температури проби розбавлених ВГ.

6. Оцінено результуючу похибку δPT та значимість її складових при виконанні стандартної процедури вимірювань середньоексплуатаційного викиду ТЧ від автомобільного дизеля: $\delta PT = -18,0 \dots 19,7\%$ (розходження результатів – 37,7%), при цьому відносний внесок у δPT інструментальної похибки складає 24%, методичних похибок (сумарно) – 76%.

7. Доведено ефективність запропонованих заходів щодо підвищення точності гравіметричних вимірювань викидів ТЧ: в результаті їх використання результуюча похибка δPT зменшується у 4,6 разів і складає $-4,0 \dots 4,2\%$ (розходження результатів – 8,2%), при цьому відносний внесок в цю величину інструментальної складової збільшується у 3 рази – до 73%, а методичних складових (сумарно) зменшується у 2,8 рази – до 27%.

ГЛАВА 5

НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРОВЕДЕНІ НА МОТОРНОМУ СТЕНДІ ДИЗЕЛЯ 4ЧН12/14 З МІКРОТУНЕЛЕМ МКТ-2

У період 2006-2015 рр. на базі гальмівного стенду автотракторного дизеля 4ЧН12/14, оснащеного мікротунелем МКТ-2, проведено комплекс наукових досліджень за такими напрямками:

- експериментальне відпрацювання рекомендацій щодо підвищення точності гравіметричних вимірювань викидів ТЧ;
- визначення регресійних залежностей для оцінки вмісту ТЧ у ВГ дизеля на сталих режимах випробувань;
- встановлення залежності для непрямого визначення викидів ТЧ з ВГ на несталих режимах роботи дизеля;
- оцінка ефективності заходів з екологізації ДВЗ: нанесення гальваноплазмових покриттів на поршні і камеру згоряння; використання альтернативного палива на основі метилового ефіру ріпакової олії;
- розробка методики визначення викидів ТЧ з ВГ дизелів з мінімальними витратами часу.

Нижче наведено результати цих досліджень.

5.1 Експериментальне відпрацювання рекомендацій щодо підвищення точності гравіметричних вимірювань викидів ТЧ

В ході досліджень проведено дві серії дослідів (по 4 дослідів в серії), при цьому в кожному досліді визначався показник PT для дизеля 4ЧН12/14 при заданих планом експерименту умовах пробопідготовки та стабілізації робочого фільтру:

- в першій серії дослідів в рандомізованому порядку варіювались: режим розбавлення ВГ, температури t_{dil} , $t_{f(max)}$ і t_{st} та тривалість періоду стабілізації фільтрів τ_{st} ;
- в другій серії всі дослідів проводились при режимі розбавлення $DM1$ та рекомендованих для підвищення точності вимірювань (на-ведених у п. 1.4) значеннях параметрів t_{dil} , $t_{f(max)}$, t_{st} та τ_{st} (табл. 5.1).

За результатами випробувань для кожної серії дослідів визначено похибку відтворюваності експерименту δPT_{exp} у відповідності до методики, наведеної в роботі [83] (рис. 5.1).

Умови проведення вимірювань показника PT

Серія дослідів	№ _д	Режим розбавлення	$t_{f(max)},$ °C	$t_{dil} = t_{st},$ °C	$\tau_{st},$ ГОД
1	1	DM1	46	19,5	6
	2	DM3	50	19,5	18
	3	DM1	52	24,0	2
	4	DM3	48	24,0	54
2	1-4	DM1	52	21,0	6

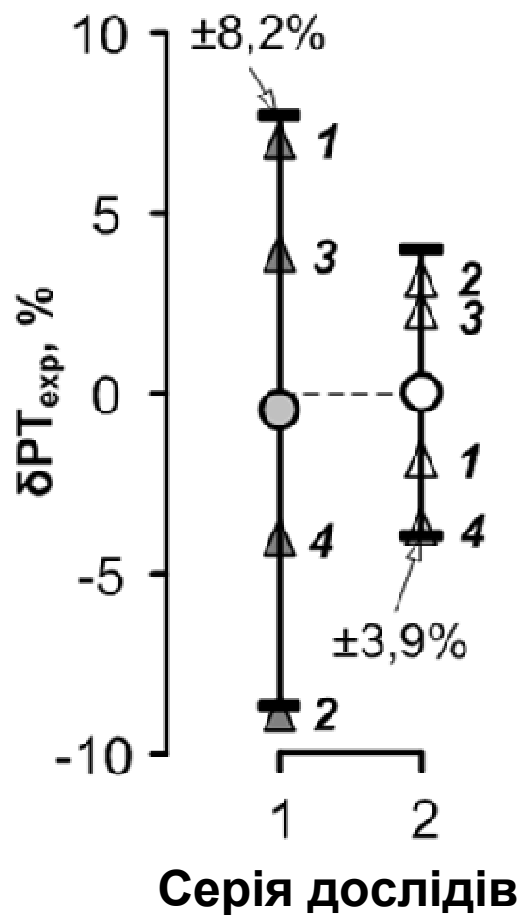


Рис. 5.1. Результати визначення похибок відтворюваності експерименту при вимірюванні показника PT

Як показує рис. 5.1, дослідження підтвердили ефективність рекомендацій щодо підвищення точності гравіметричних вимірювань викидів ТЧ – в результаті їх виконання похибка δPT_{exp} зменшилась з $\pm 8,2\%$ до $\pm 3,9\%$, тобто у 2,1 рази.

5.2 Визначення регресійних залежностей для оцінки вмісту ТЧ у ВГ дизеля на сталих режимах випробувань

Дослідження проводились з метою експериментального встановлення та аналізу регресійних залежностей, що описують вплив числа обертів колінчастого валу n (хв⁻¹) і навантаження L (% від максимального крутного моменту при поточному n) на масовий викид – PT_{mass} (г/год), питомий викид – PT (г/кВт·год) та концентрацію ТЧ – C_{pt} (г/мн³). Для цього були вирішені наступні завдання:

– вибір контрольних режимів для проведення досліджень та вимірювання масових, питомих викидів і концентрацій ТЧ при роботі дизеля на цих режимах;

– встановлення рівнянь регресії, що відображають вплив параметрів n і L на величини PT_{mass} , PT та C_{pt} ;

– аналіз отриманих результатів.

5.2.1. Вибір контрольних режимів випробувань та вимірювання викидів і концентрацій ТЧ. Для досліджень обрано 2-х факторний план експерименту 3×4, в якому максимально відображені експлуатаційні діапазони варіювання параметрів n і L при рівномірному характері їх зміни. Цей план включає 12 сталих режимів роботи дизеля 4ЧН12/14 з 3-ма рівнями варіювання параметра n – 1000, 1500 і 2000 хв⁻¹ та 4-ма рівнями варіювання параметра L – 25, 50, 75 і 100%.

На кожному контрольному режимі були визначені величини PT_{mass} , PT та C_{pt} (табл. 5.2). Похибки вимірювань цих величин склали від 4 ... 7% – при значному вмісті ТЧ у ВГ (на режимах з навантаженням 50–100%) до 14 ... 17% – при малому вмісті ТЧ у ВГ (на режимах з навантаженням 0–25%). Середні значення похибок вимірювань PT_{mass} , PT та C_{pt} склали 8 ... 10% або $\pm 1,78$ г/год, $\pm 0,04$ г/кВт·год та $\pm 0,005$ г/мн³, відповідно.

5.2.2 Встановлення залежностей величин PT_{mass} , PT та C_{pt} від параметрів режиму роботи дизеля. Експериментальні дані про викиди і концентрації ТЧ на контрольних режимах випробувань використовувалися для визначення регресійних залежностей:

$$Y = f(n, L),$$

де Y – узагальнене позначення величини, що контролюється – PT_{mass} , PT та C_{pt} ;

$f(n, L)$ – рівняння регресії, функція 2-х змінних – n та L .

Результати вимірювань величин PT_{mass} , PT та C_{pt} на контрольних режимах випробувань дизеля 4ЧН12/14

Контрольні режимивипробувань					Результативимірювань		
№ _{реж.}	n , хв ⁻¹	M_k , Н·м	P_e , кВт	L , %	PT_{mass} , г/год	PT , г/кВт·год	C_{pt} , г/мН ³
1	2000	478,0	100,1	100	37,82	0,378	0,063
2	2000	351,4	73,6	73,5	20,82	0,283	0,038
3	2000	239,0	50,05	50	20,06	0,401	0,042
4	2000	119,5	25,02	25	25,32	1,012	0,062
5	1500	541,2	85,01	100	30,10	0,354	0,074
6	1500	407,7	64,03	75,3	15,61	0,244	0,044
7	1500	274,8	42,95	50,5	11,07	0,258	0,034
8	1500	140,6	22,08	26,0	6,88	0,311	0,023
9	1000	379,6	39,74	100	24,42	0,614	0,125
10	1000	281,2	29,44	74,1	13,06	0,444	0,071
11	1000	189,1	19,8	49,8	5,50	0,278	0,030
12	1000	92,1	9,642	24,3	3,48	0,361	0,019

Оскільки вид рівняння регресії, що корелюється з експериментальними даними, не був відомий заздалегідь, то розглядалися 3 залежності, з яких було обрано найбільш достовірну:

– залежність 1:

$$Y = K_1 \cdot f_n(Y) \cdot f_L(Y), \quad (5.1)$$

де K_1 – постійний коефіцієнт;

$f_n(Y)$ та $f_L(Y)$ – функції однієї змінної, що характеризують вплив кожного з параметрів – n та L на величину Y ;

– залежність 2:

$$Y = K_2 + f_n(Y) + f_L(Y), \quad (5.2)$$

де K_2 – постійний коефіцієнт;

– залежність 3:

$$Y = A_0 + A_1 \cdot n + A_2 \cdot L + A_{11} \cdot n^2 + A_{22} \cdot L^2 + A_{12} \cdot n \cdot L, \quad (5.3)$$

де $A_0, A_1, A_2, A_{11}, A_{22}, A_{12}$ – постійні коефіцієнти.

Вибір наведених залежностей обумовлений широким спектром їх використання, простотою визначення та зручністю при аналізі і розрахункових дослідженнях. В роботі [83] показано, що залежність 1 може успішно використовуватися при дослідженнях паливно-економічних показників ДВЗ та визначатися шляхом проведення багатофакторного експерименту.

В якості критеріїв точності кожної залежності розглядалися середньоквадратичні відхилення (СКВ) розрахункових даних від відповідних експериментальних значень, виражені в абсолютних одиницях (з розмірністю величини Y) – S_Y та у відносних одиницях (%-х) – s_Y .

$$S_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (Y_{pi} - Y_i)^2}{m(m-1)}}, \quad (5.4)$$

де Y_{pi} – значення величини Y , яке визначалися за рівнянням регресії на i -му режимі;

Y_i – експериментальне значення величини Y на i -му режимі;

$m = 12$ – кількість контрольних режимів випробувань;

$$s_Y = \frac{S_Y}{Y_{cp}} \cdot 100\%, \quad (5.5)$$

де Y_{cp} – середні значення досліджуваної величини Y , які визначалися як середньоарифметичні з 12-ти результатів вимірювань Y_i та дорівнюють для PT_{mass} , PT та C_{pt} 17,85 г/год, 0,411 г/кВт·год та 0,052 г/мн³, відповідно.

Коефіцієнти K_1, K_2 і функції $f_n(Y), f_L(Y)$, що входять у вираження (5.1) та (5.2), були визначені за методикою, викладеною у роботі [83], а для обчислення коефіцієнтів A_i залежності (5.3) використана методика, що представлена у роботі [78] (табл. 5.3, рис. 5.2, 5.3).

Для кожної залежності за допомогою виражень (5.4) і (5.5) встановлені значення СКВ – S_Y та s_Y (табл. 5.4).

Результати обчислень коефіцієнтів залежностей (5.1)-(5.3)

Величина	Залежність	Значення коефіцієнтів							
		K_1	K_2	A_0	A_1	A_2	A_{11}	A_{22}	A_{12}
PT_{mass}	1	0,072	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-17,9	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	2,032	-5,4E-3	-1,1E-1	9,3E-6	4,2E-3	-1,1E-4
PT	1	2,752	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-0,41	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	0,947	-1,1E-3	3,2E-3	6,6E-7	1,1E-4	-1,2E-5
C_{pt}	1	23,05	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-0,05	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	0,0215	-8,8E-5	1,5E-3	4,5E-8	1,0E-5	1,4E-6

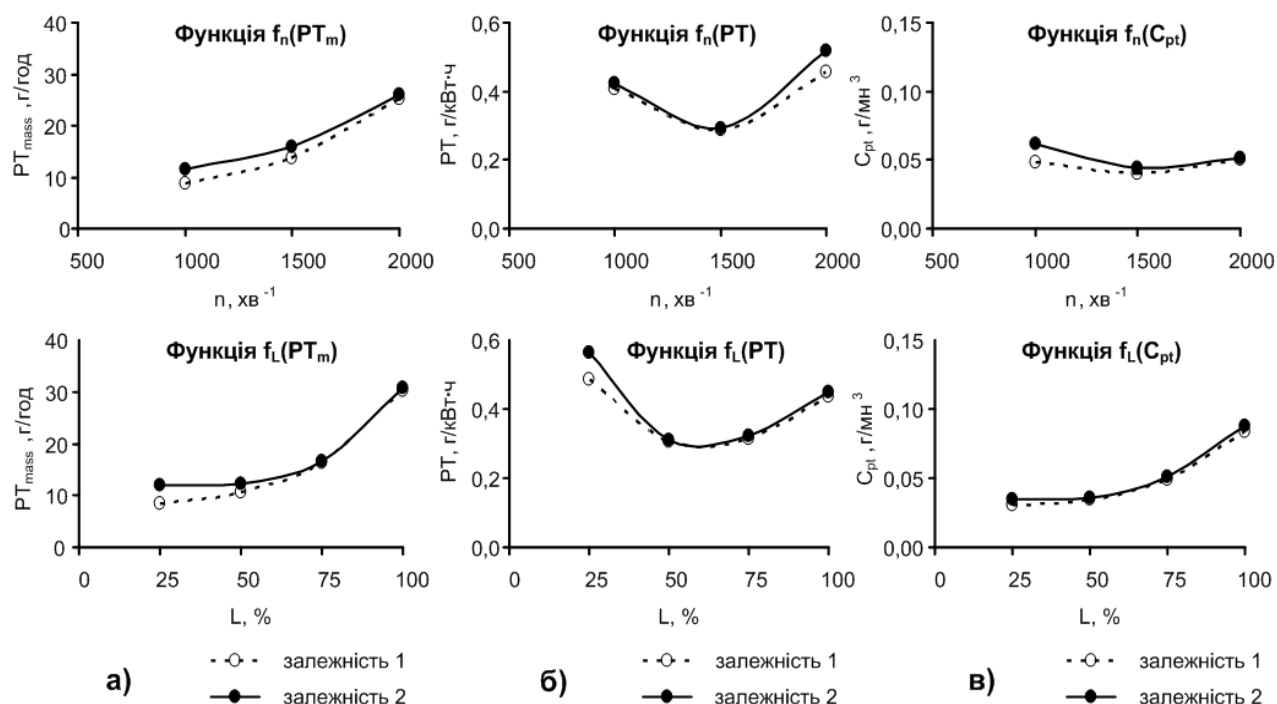


Рис. 5.2. Усереднені залежності $f_n(Y)$ і $f_L(Y)$, які характеризують вплив n та L на: а – масовий викид – PT_{mass} ; б – питомий викид – PT ; в – концентрацію – C_{pt} .

Як видно з табл. 5.4, залежності (5.1) і (5.2) не мають достатньої точності, оскільки значення s_Y для них складають 29,3 ... 38,6% (за винятком значення $s_{PT_{mass}} = 14,1\%$ для залежності (5.2)).

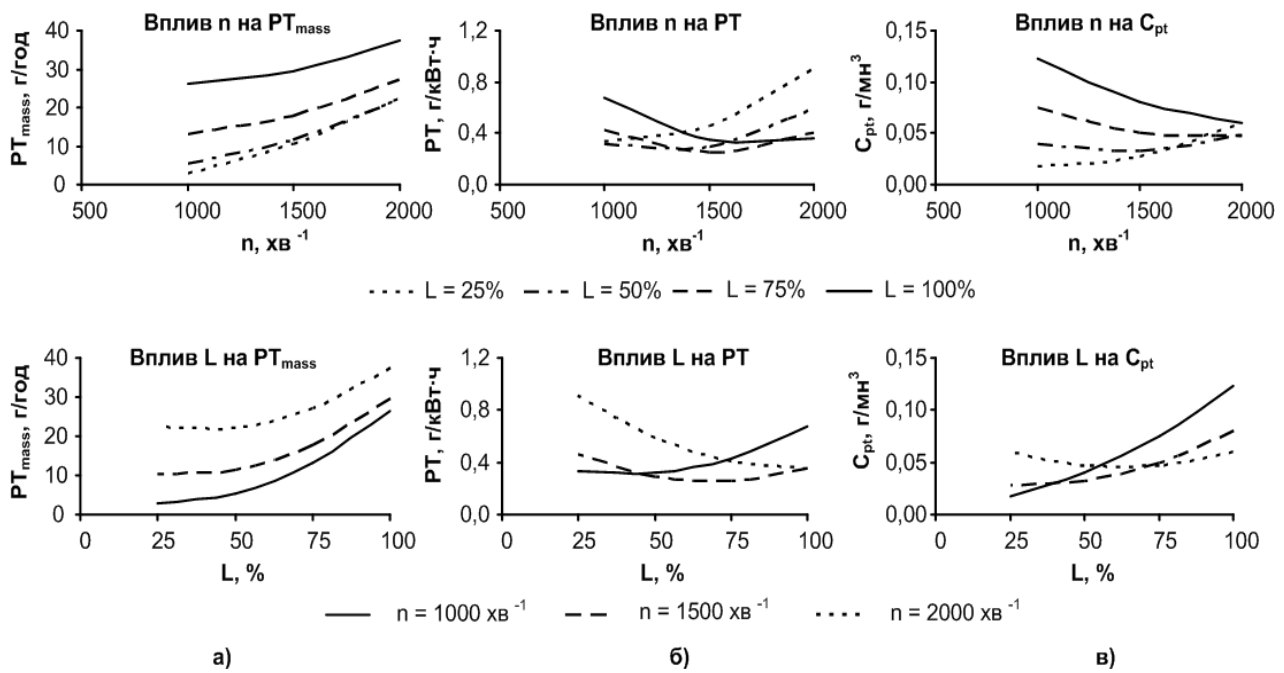


Рис 5.3. Рівняння регресії у вигляді поліномів 2-го порядку для оцінки:
 а – масового викиду – PT_{mass} ; б – питомого викиду – PT ; в – концентрації – C_{pt} .

Таблиця 5.4

Абсолютні та відносні значення СКВ залежностей (5.1) – (5.3)

Залеж- ність	S_Y			$s_Y, \%$		
	$S_{PT_{mass}},$ г/ГОД	$S_{PT},$ г/кВт·ГОД	$S_{C_{pt}},$ г/м ³	$S_{PT_{mass}}$	S_{PT}	$S_{C_{pt}}$
1	5,27	0,121	0,0181	29,5	29,3	34,7
2	2,52	0,159	0,0176	14,1	38,6	33,7
3	2,02	0,077	0,0042	11,3	18,8	8,1

Для поліноміальної функції (5.3) значення $s_{PT_{mass}}$ і $s_{C_{pt}}$ співставні з середньою похибкою експерименту, а значення s_{PT} перевищує її в 1,9 рази. Таким чином, з 3-х розглянутих залежностей найбільш достовірною є поліном 2-го порядку (5.3), який дозволяє достатньо точно оцінювати вплив параметрів n та L на величини PT_{mass} і C_{pt} та може використовуватися для наближеної оцінки значень величини PT .

5.2.3 Аналіз впливу величин n та L на викиди і концентрації ТЧ у ВГ дизеля (див. рис. 5.3) показує наступне:

а) вплив режиму роботи дизеля на масовий викид ТЧ:

– величина PT_{mass} із збільшенням n з 1000 до 2000 $хв^{-1}$ при фіксованому значенні крутного моменту зростає за близькою до лінійної залежністю з кутовим коефіцієнтом $0,015$ (г/год)/ $хв^{-1}$;

– збільшення L з 25 до 60 % мало позначається на зростанні PT_{mass} , але зростання навантаження в діапазоні 60...100% призводить до суттєвого збільшення викиду ТЧ – у 1,7...3,5 рази;

– мінімальне значення PT_{mass} – 3,0 г/год спостерігається на режимі з $n = 1000$ $хв^{-1}$, $L = 25\%$, максимальне значення – 37,4 г/год – на режимі з $n = 2000$ $хв^{-1}$, $L = 100\%$;

б) вплив режиму роботи дизеля на питомий викид ТЧ:

– величина PT при зростанні n з 1000 до 2000 $хв^{-1}$ змінюється у залежності від величини навантаження: при $L = 25\%$ – зростає від 0,34 до 0,91 г/кВт·год, при $L = 100\%$ – знижується від 0,67 до 0,36 г/кВт·год; при цьому із зростанням L від 25 до 100% зростаюча залежність PT від n поступово переходить в убуючу залежність;

– мінімальне значення PT – 0,25 г/кВт·год спостерігається при $n = 1500$ $хв^{-1}$, $L = 75\%$, максимальне значення – 0,91 г/кВт·год – при $n = 2000$ $хв^{-1}$, $L = 25\%$;

в) вплив режиму роботи дизеля на концентрацію ТЧ:

– величина C_{pt} при збільшенні n з 1000 до 2000 $хв^{-1}$ змінюється в залежності від значення навантаження: при $L = 25\%$ – зростає від 0,02 г/мн³ (мінімальне значення) до 0,06 г/мн³, при $L = 100\%$ – убыває від 0,12 г/мн³ (максимальне значення) до 0,06 г/мн³; при цьому із зростанням L від 25 до 100% зростаюча залежність C_{pt} від n поступово переходить в убуючу залежність.

Результати зробленого аналізу дозволяють підвищити точність вимірювань викидів ТЧ шляхом коригування тривалості відбору проб ТЧ з урахуванням їхнього вмісту у ВГ дизеля: при незначному вмісті ТЧ ця тривалість повинна збільшуватися, при суттєвому вмісті ТЧ – скорочуватися.

5.3. Встановлення залежності для непрямого визначення викидів ТЧ з ВГ на несталих режимах роботи дизеля

З причини високої вартості та трудомісткості обслуговування обладнання для визначення масових викидів ТЧ з ВГ дизелів були розроблені непрямі розрахункові методи контролю вмісту ТЧ у ВГ: за показником димності (оптичної непрозорості) ВГ [7], показниками

димності та концентрації газоподібних вуглеводнів [8], показниками димності, вмісту сірки у паливі та концентраціями важких вуглеводнів [9] та ін. Ці методи ефективно використовуються при оцінюванні викидів ТЧ дизелями, як на окремих сталих режимах, так і середньоексплуатаційних викидів ТЧ, які визначаються за результатами виконання випробувальних циклів, що складаються зі сталих режимів, зокрема, циклів ESC [1], 8-ступінчастого циклу R-96 [2] та ін. З початком використання при проведенні сертифікаційних випробувань дизелів транзйентних циклів – ETC (European Transient Cycle) [1], WTVС (Worldwide Transient Vehicle Cycle) [10], WHTC (Worldwide heavy-duty transient cycle) [11] та ін., які передбачають роботу дизелів на несталих (перехідних) режимах, виникла необхідність у корегуванні розрахункових методів контролю викидів ТЧ. Сутність цього корегування полягає у врахуванні при непряму визначенні вмісту ТЧ у ВГ на несталому режимі випробувань поправ-ки ΔC_{pt} – відхилень концентрацій ТЧ, визначених на несталому та відповідному сталому режимах роботи дизеля:

$$C_{pt}^d = C_{pt}^{st} + \Delta C_{pt}, \text{ г/кг}, \quad (5.6)$$

де C_{pt}^d, C_{pt}^{st} – концентрації ТЧ, що визначаються на несталому та сталому режимах, відповідно, при однакових значеннях числа обертів колінчастого валу двигуна – n (хв^{-1}) та навантаження – L (%).

В ході випробувань дизеля 4СН12/14 було встановлено регресійну залежність для визначення величини ΔC_{pt} при варіюванні параметрів n і L в діапазонах: 1250...2000 хв^{-1} ($\bar{n} = 0,4...0,8$) і 30...100 % ($\bar{L} = 0,3...1,0$) та тривалості несталих режимів $\Delta t = 10...30$ с. На основі результатів попередніх досліджень [80] обрано тип цієї залежності – поліном 1-го порядку:

$$\Delta C_{pt} = K_n \left(\frac{\Delta \bar{n}}{\Delta t} \right) + K_L \left(\frac{\Delta \bar{L}}{\Delta t} \right), \quad (5.7)$$

де K_n та K_L – коефіцієнти, які визначались в ході експерименту; $\Delta \bar{n}, \Delta \bar{L}$ – відносні прирости величин \bar{n} і \bar{L} в ході несталого режиму.

Процедура визначення коефіцієнтів K_n і K_L представляла 3 цикли випробувань, які виконувались послідовно один за одним (рис. 5.4):

A – цикл з 5-ти сталих режимів роботи дизеля;

B – цикл з 10-ти несталих режимів роботи дизеля з тривалістю $\Delta t = 20$ с кожний (цикл складався з 4-х пар основних режимів з однаковими значеннями в кожній парі однієї з величин $\Delta \bar{n}$ або $\Delta \bar{L}$ при нульовому значенні другої величини та 2-х контрольних режимів з різними значеннями величин $\Delta \bar{n}$ і $\Delta \bar{L}$);

C – цикл з 3-х повторів перехідного режиму з $\Delta \bar{n} = 0$, $\Delta \bar{L} = 0,35$ з різною тривалістю Δt : 10, 20 та 30 с.

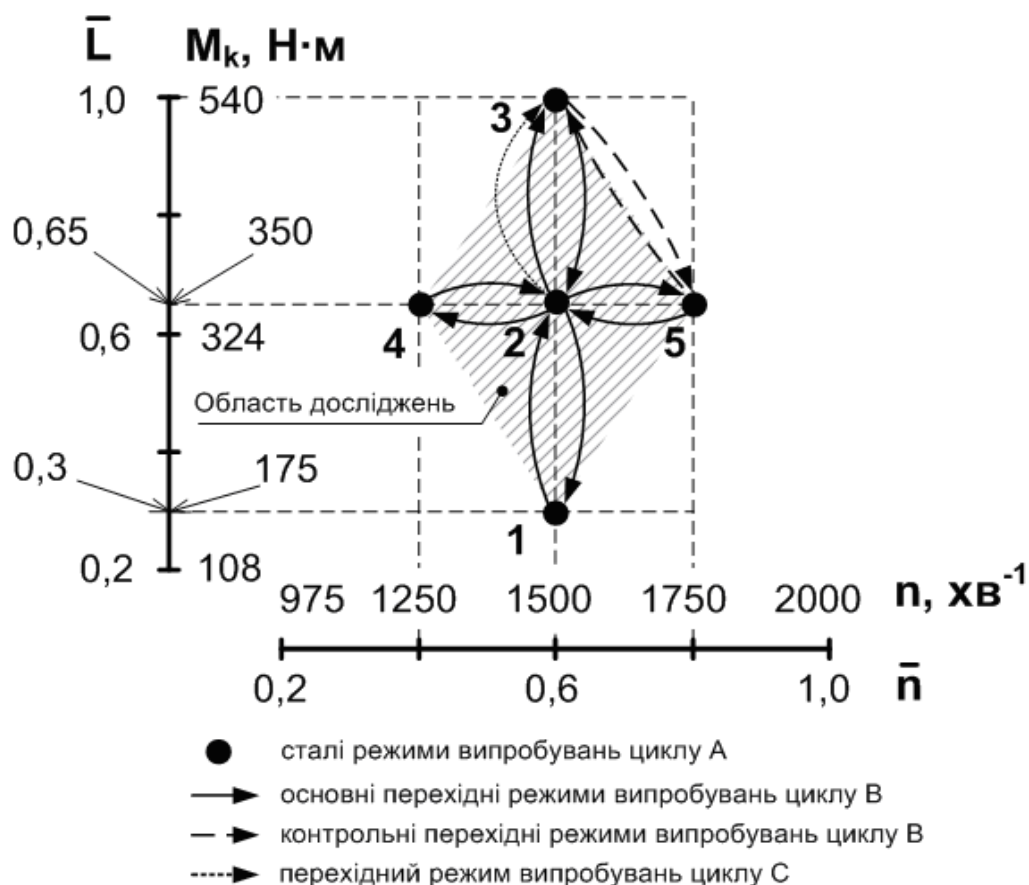


Рис. 5.4. Сталі та перехідні режими випробувань, які використовувались для визначення коефіцієнтів K_n і K_L

В результаті виконання циклу **A** вимірювались значення концентрацій ГЧ – C_{pt}^{st} , які відповідали початковим і кінцевим значенням параметрів \bar{n} та \bar{L} несталих режимів випробувань циклів **B** і **C** у діапазонах варіювання: $\bar{n} = 0,4 \dots 0,8$ і $\bar{L} = 0,3 \dots 1,0$.

В результаті виконання циклу **B** на основних режимах випробувань визначались коефіцієнти:

– K_L при зростанні L на 35% ($\Delta \bar{L} = 0,35$) при різних початкових значеннях величини n (режими 1→2 та 2→3);

– K_L при зменшенні L на 35% ($\Delta\bar{L} = -0,35$) при різних початкових значеннях величини n (режими 3→2 та 2→1);
 – K_n при зростанні n на 250 хв⁻¹ ($\Delta\bar{n} = 0,2$) при різних початкових значеннях величини L (режими 4→2 та 2→5);
 – K_n при зменшенні n на 250 хв⁻¹ ($\Delta\bar{n} = -0,2$) при різних початкових значеннях величини L (режими 5→2 та 2→4);
 а також (на контрольних режимах випробувань) оцінювалась точність визначення величини ΔC_{pt} за допомогою залежності (5.7) при одночасних змінах параметрів $\Delta\bar{n}$ і $\Delta\bar{L}$.

В ході обробки результатів випробувань для кожної з вказаних пар основних режимів роботи дизеля розраховувались: середнє значення відповідного коефіцієнту, а також його абсолютне та віднос-не відхилення.

Для визначення величин K_n або K_L на кожному перехідному режимі випробувань використовувались формули:

$$K_n = \frac{\Delta C_{pt0}}{(\Delta\bar{n} / \Delta t)}, (\Gamma \cdot c) / \text{кг}, \quad (5.8)$$

$$K_L = \frac{\Delta C_{pt0}}{(\Delta\bar{L} / \Delta t)}, (\Gamma \cdot c) / (\text{кг}), \quad (5.9)$$

де ΔC_{pt0} – відхилення концентрацій ТЧ, визначених на перехідному та сталому режимах роботи дизеля.

В результаті виконання циклу C визначались середнє значення коефіцієнту K_L та його середнє квадратичне відхилення (S_{KL}) при зростанні L на 35% при $n = 1500$ хв⁻¹ (режим 2→3: $\Delta\bar{n} = 0$, $\Delta\bar{L} = 0,35$) у діапазоні варіювання тривалості перехідного режиму $\Delta t = 10 \dots 30$ с:

$$K_L = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 K_{Li}, \quad (5.10)$$

де i – індекс режиму випробувань;
 $n = 3$ – кількість режимів у випробувальному циклі;

$$S_{KL} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (K_L - K_{Li})^2}{n \cdot (n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (K_L - K_{Li})^2}{6}}. \quad (5.11)$$

Результати досліджень та їх аналіз. У відповідності до встановленої процедури випробувань в ході виконання циклів *A*, *B* і *C* за допомогою МКТ-2 були визначені концентрації ТЧ у ВГ на сталих – C_{pt0}^{st} та несталих – C_{pt0}^d режимах роботи дизеля (рис. 5.5–5.7, табл. 5.5, 5.6) [84, 85]. При цьому значення C_{pt0}^{st} на несталих режимах випробувань визначалось як середнє арифметичне з початкової та кінцевої концентрацій ТЧ у ВГ, визначених на відповідних сталих режимах.

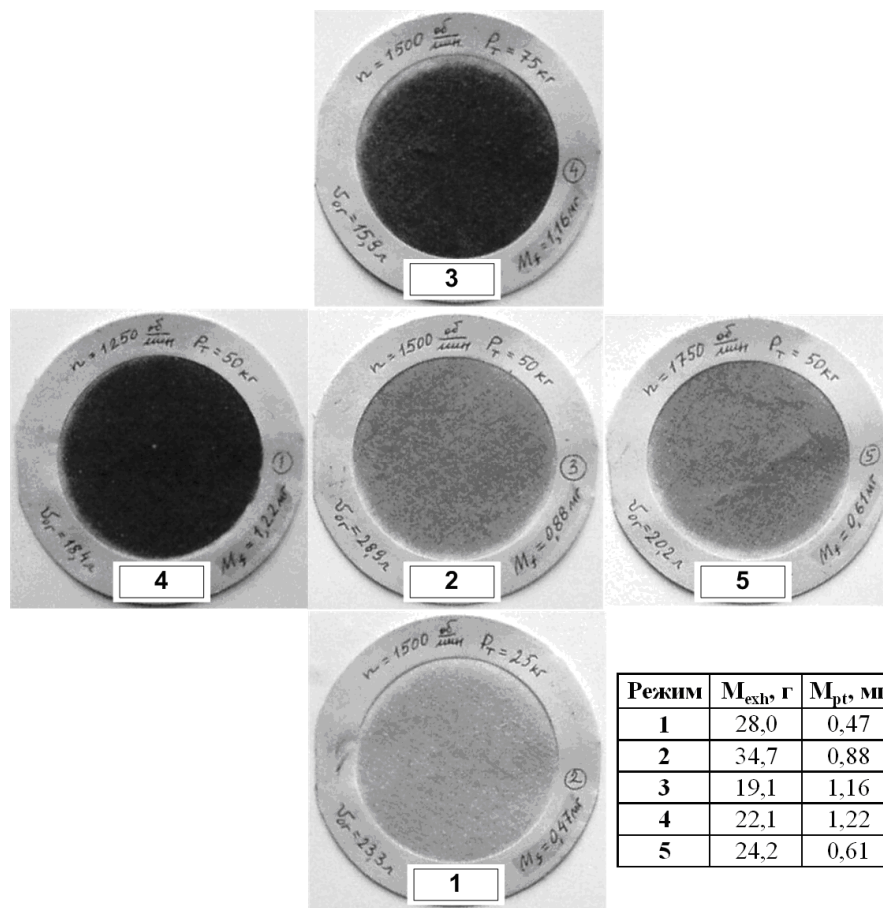


Рис. 5.5. Фільтри з ТЧ, зібрані на сталих режимах випробувань циклу *A*

Аналіз результатів виконання циклу *B* показує (див. табл. 5.6):

– при зростанні однієї з величин $\Delta \bar{n}$ або $\Delta \bar{L}$ при постійному значенні другої величини середні значення коефіцієнтів K_n та K_L складають 0,96 та 1,79, відповідно; при цьому абсолютні та відносні відхилення величин K_n та K_L від середніх значень складають: $\pm 0,08$ (г·с)/кг, або 8,3% та $\pm 0,06$ (г·с)/кг, або 3,4%, відповідно; таким чином навантаження L має у 1,9 рази більш суттєвий вплив на величину ΔC_{pt} ніж число обертів колінчастого валу двигуна n ;

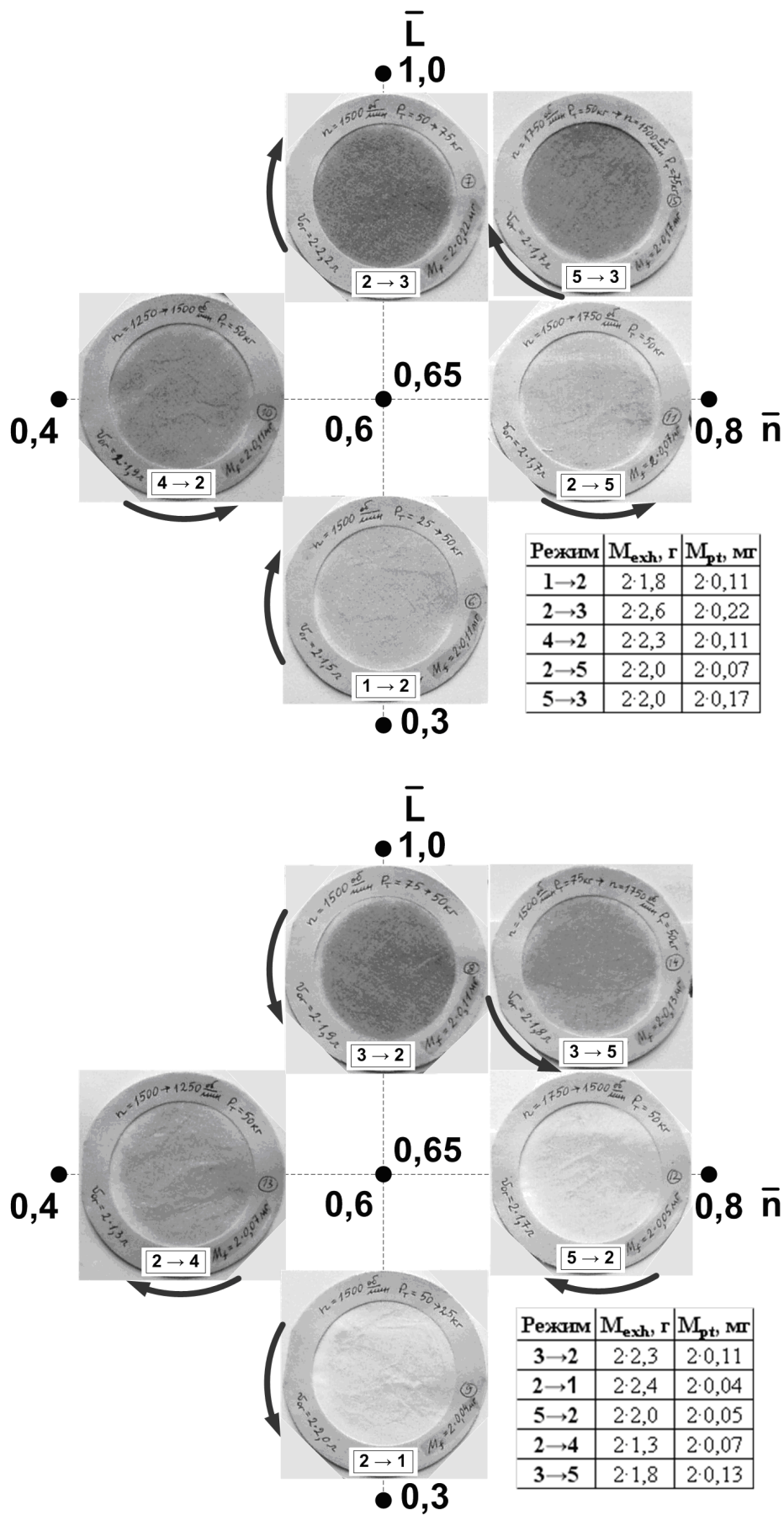


Рис. 5.6. Фільтри з ТЧ, зібрані на несталіх режимах циклу B

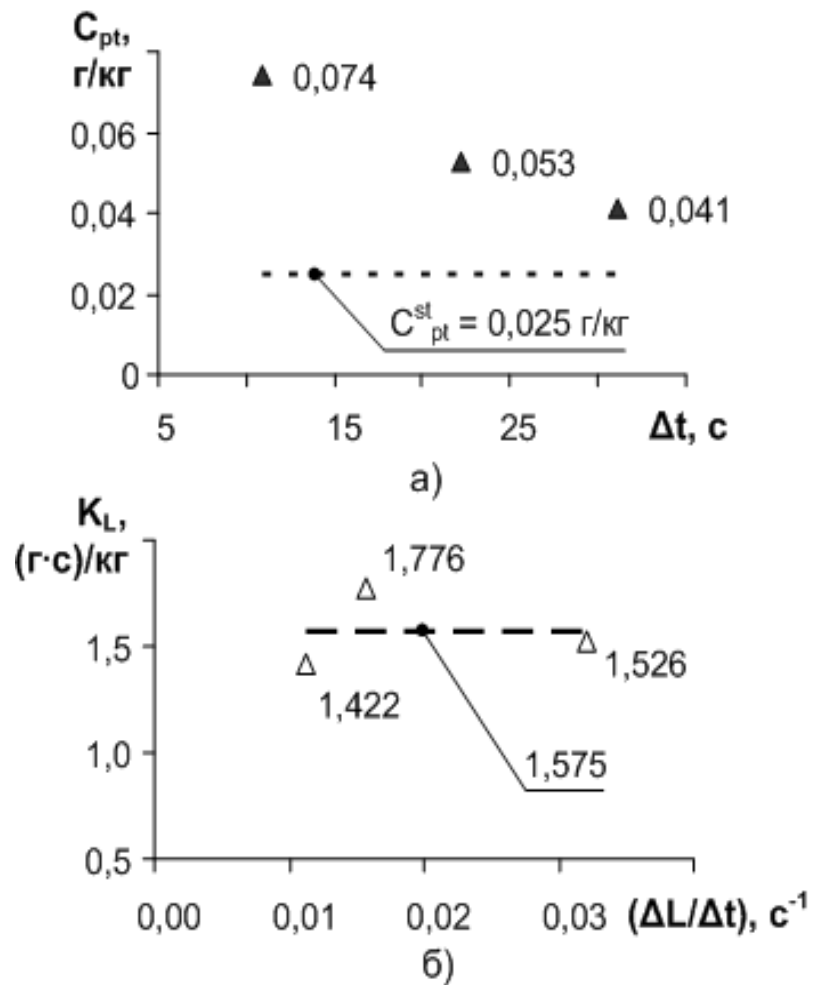


Рис. 5.7. Результати досліджень впливу тривалості перехідного режиму Δt на величини ΔC_{pt} (а) та K_L (б) в ході виконання циклу C

Таблиця 5.5

Результати вимірювань концентрацій ТЧ на сталих режимах циклу A

Режим	Параметри режиму			Результати вимірювань та розрахунків					
	$n, \text{хв}^{-1}$ (\bar{n})	$M_k, \text{Н}\cdot\text{м}$ (\bar{L})	$P_e, \text{кВт}$	$G_{exh}, \text{кг/год}$	q	$\tau_{sam}, \text{с}$	$G_{sam}, \text{г/с}$ ($M_{sam}, \text{г}$)	$M_{pt}, \text{мг}$	$C_{pt0}^{st}, \text{г/кг}$
1	1500 (0,6)	175,7 (0,3)	27,6	403,6	7,13	271,1	0,73 (199,2)	0,47	0,020
2	1500 (0,6)	351,4 (0,65)	55,2	423,3	6,35	301,1	0,74 (220,5)	0,88	0,030
3	1500 (0,6)	527,2 (1,0)	82,8	473,5	6,90	180,9	0,73 (131,9)	1,16	0,073
4	1250 (0,4)	351,4 (0,65)	46,0	332,8	7,01	211,8	0,73 (155,1)	1,22	0,066
5	1750 (0,8)	351,4 (0,65)	64,4	523,8	6,38	211,3	0,73 (154,5)	0,61	0,030

Таблиця 5.6

Результати експериментальних досліджень коефіцієнтів K_n та K_L

Режим	Параметри перехідних режимів випробувань				Результати вимірювань та розрахунків					
	$\bar{\Delta n}$	$\bar{\Delta L}$	$\Delta t = \tau_{sam}, c$	$P_e, кВт$	$G_{exh}, кг/год$	q	$C_{pt0}^d, (C_{pt0}^{st})$ г/кг	$\Delta C_{pt0}, г/кг$	$K_n^{**}, \frac{г \cdot c}{кг}$	$K_L^{**}, \frac{г \cdot c}{кг}$
1→2	0	0,35	21,09	41,4	413,5	8,43	0,055 (0,025)	0,030	-	1,79
2→3			22,21	69,0	448,4	6,20	0,080 (0,052)	0,028		
3→2	0	-0,35	21,07	69,0	448,4	6,65	0,057 (0,052)	0,005	-	0,00
2→1			21,27	41,4	413,5	6,43	0,020 (0,025)	-0,005		
4→2	0,2	0	21,30	50,6	378,1	6,82	0,058 (0,048)	0,010	0,96	-
2→5			21,33	59,8	473,6	7,81	0,038 (0,030)	0,008		
5→2	-0,2	0	20,83	59,8	473,6	7,47	0,029 (0,030)	-0,001	0,26	-
2→4			21,11	50,6	378,1	9,83	0,054 (0,048)	0,006		
3→5	0,2	-0,35	20,69	73,6	498,7	7,10	0,064 (0,052)	0,012 0,009*	0,96	0,00
5→3	-0,2	0,35	20,11	73,6	498,7	7,48	0,079 (0,052)	0,027 0,031*	0,00	1,79

Примітка.* – значення величини ΔC_{pt0} , розраховані за допомогою залежності (5.7); ** – середньоарифметичні значення результатів 2-х вимірювань відповідного коефіцієнту.

– при зменшенні однієї з величин $\bar{\Delta n}$ або $\bar{\Delta L}$ при постійному значенні другої величини значення коефіцієнтів K_n та K_L є не суттєвими та можуть не враховуватись, оскільки відхилення концентрацій ТЧ, визначених на перехідних та сталих режимах випробувань складають $\Delta C_{pt0} = -0,005...0,006$ г/кг, що є співставним з межею чутливості МКТ-2 – $\pm 0,005$ [61];

– абсолютні відхилення розрахункових значень величини ΔC_{pt} , визначених за допомогою залежності (5.7), від експериментальних

даних, отриманих в ході виконання 2-х контрольних перехідних режимів, складають -0,003 г/кг та 0,004 г/кг, що є співставним з межею чутливості МКТ-2; це підтверджує значимість отриманих значень коефіцієнтів K_n і K_L та практичну придатність залежності (5.7) для визначення величини ΔC_{pt} .

Результати виконання циклу C показали наступне (див рис. 5.7):

– при збільшенні Δt розходження концентрацій ТЧ C_{pt}^d і C_{pt}^{st} зменшується; так, при збільшенні Δt з 10 до 30 с величина ΔC_{pt} зменшується у 1,8 рази;

– у досліджуваному діапазоні варіювання часу несталого режиму $\Delta t = 10 \dots 30$ с коефіцієнт K_L можна вважати постійною величиною, середнє значення якої становить 1,575; при цьому середньоквадратичне відхилення результатів вимірювань K_L складає $\pm 0,105$ (г·с)/кг, що становить 6,7%.

Таким чином з врахуванням обраного типу регресійної залежності $\Delta C_{pt} = f((\Delta n / \Delta t), (\Delta L / \Delta t))$ і результатів експериментальних досліджень коефіцієнтів K_n та K_L формула для визначення величини ΔC_{pt} має вигляд:

$$\Delta C_{pt} = 0,96 \left(\frac{\Delta \bar{n}_+}{\Delta t} \right) + 1,575 \left(\frac{\Delta \bar{L}_+}{\Delta t} \right), \text{ г/кг}, \quad (5.12)$$

де $\Delta \bar{n}_+$ та $\Delta \bar{L}_+$ – позитивні значення величин $\Delta \bar{n}$ і $\Delta \bar{L}$.

5.4 Оцінка ефективності заходів з екологізації ДВЗ

Дослідження впливу на масові викиди ТЧ дизеля гальвано-плазмових покриттів поршнів і камери згоряння. Метою досліджень було порівняння масових і середньоексплуатаційних викидів ТЧ дизеля, які визначалися в ході послідовного виконання серії з трьох випробувальних циклів, встановлених Правилами ЄЕК ООН R-49 та R-96, при різних значеннях товщини гальваноплазмового покриття – Δ_{Π} :

- 1) $\Delta_{\Pi} = 0$ мм (покриття відсутнє);
- 2) $\Delta_{\Pi} = 0,2$ мм;
- 3) $\Delta_{\Pi} = 0,4$ мм.

При нанесенні покриття гальваноплазмовій обробці піддавалася торцева і бокова (до верхнього компресійного кільця) поверхні поршня та стінки камери згоряння.

Методика оцінки впливу гальваноплазмових покриттів на викид ТЧ дизеля передбачала виконання наступного алгоритму дій:

а) вимірювання масових викидів ТЧ з ВГ дизеля – PT_{mass} (г/год) в ході виконання 3-х циклів випробувань з вказаними значеннями товщини гальваноплазмового покриття; при цьому кожен цикл складається з 12-ти контрольних режимів 2-факторного плану 3×4 з 3-ма рівнями варіювання числа обертів колінчастого валу двигуна – n : 1000, 1500 і 2000 $хв^{-1}$ та 4-ма рівнями варіювання навантаження на вал двигуна – L : 25, 50, 75 і 100%; середня похибка вимірювань викидів ТЧ складає $\pm 10\%$;

б) визначення апроксимуючих залежностей, які описують вплив параметрів n і L на величину PT_{mass} , у вигляді полінома 2-го порядку:

$$PT_{mass(j)}(n, L) = A_{0(j)} + A_{1(j)} \cdot n + A_{2(j)} \cdot L + A_{11(j)} \cdot n^2 + A_{22(j)} \cdot L^2 + A_{12(j)} \cdot n \cdot L, \quad (5.13)$$

де j – індекс циклу випробувань;

$A_{0(j)}$, $A_{1(j)}$, $A_{2(j)}$, $A_{11(j)}$, $A_{22(j)}$, $A_{12(j)}$ – коефіцієнти апроксимуючої залежності для j -го циклу (визначаються за методикою [78]);

в) встановлення та аналіз залежностей, які характеризують вплив гальваноплазмових покриттів різної товщини на масовий викид ТЧ на різних режимах роботи дизеля:

$$\Delta PT_{mass(j)}(n, L) = PT_{mass(1)}(n, L) - PT_{mass(j)}(n, L), j \neq 1; \quad (5.14)$$

$$\delta PT_{mass(j)}(n, L) = \frac{\Delta PT_{mass(j)}(n, L)}{PT_{mass(1)}(n, L)} \cdot 100\%, j \neq 1; \quad (5.15)$$

г) обчислення середньоексплуатаційних викидів ТЧ (г/кВт·год) – PT , які враховують внесок окремих режимів роботи дизеля у його сумарну токсичність; оскільки випробовувався автотракторний дизель, то величина PT обчислювалася для різних умов його експлуатації: як автомобільного та тракторного дизеля (PT при цьому визначався за циклами R-49 [1] та R-96 [2], відповідно):

$$PT_{(j)} = \frac{\sum_{i=1}^k PT_{mass(j)i} \cdot WF_i}{\sum_{i=1}^k P_{e(j)i} \cdot WF_i},$$

де i – індекс режиму випробувань;

k – кількість режимів, яка дорівнює 13 – для циклу R-49 та 8 – для циклу R-96;

$PT_{mass(j)}$ та $P_{e(j)i}$ – масовий викид та ефективна потужність дизеля на i -му режимі;

WF_i – ваговий фактор i -го режиму;

д) визначення та аналіз відносних відхилень питомих викидів ТЧ – $PT_{(2)}$ і $PT_{(3)}$ від значення $PT_{(1)}$:

$$\delta PT_{(j)} = \frac{PT_{(1)} - PT_{(j)}}{PT_{(1)}} \cdot 100\%, j \neq 1.$$

Результати досліджень впливу гальваноплазмових покриттів на викид ТЧ дизеля та їх аналіз. Відповідно до наведеної методики були проведені вимірювання масових викидів ТЧ (рис. 5.8 – 5.15), за результатами яких визначено коефіцієнти апроксимуючих залежностей (5.13), а також значення абсолютних і відносних СКВ розрахункових і експериментальних даних (табл. 5.7).

Як показали результати обчислень, значення відносних СКВ (10,3...12,4%) співставні з середньою похибкою експерименту, що свідчить про задовільну точність апроксимуючих залежностей.

На рисунку 5.15 наведені залежності (5.14) та (5.15), аналіз яких показує наступне [75]:

– при застосуванні гальваноплазмових покриттів поршнів масові викиди ТЧ знижуються майже у всій області режимів, що досліджувалися (за винятком режиму $n = 1000 \text{ хв}^{-1}$, $L = 25\%$ при $\Delta_{\pi} = 0,2 \text{ мм}$, на якому PT_{mass} незначно (на 2,8%) збільшився);

– значення PT_{mass} зменшилися в середньому при $n = 1000, 1500$ та 2000 хв^{-1} : відповідно на 25% (0,94 г/год), 12% (1,67 г/год) і 2% (0,52 г/год) при $\Delta_{\pi} = 0,2 \text{ мм}$ та на 28% (1,30 г/год), 21% (2,93 г/год) і 12% (3,21 г/год) при $\Delta_{\pi} = 0,4 \text{ мм}$;

– зі збільшенням навантаження від 25 до 100% значення відносних відхилень $\delta PT_{mass(2)}$ та $\delta PT_{mass(3)}$ зменшуються на всіх рівнях варіювання числа обертів колінчастого валу (за винятком діапазону $L = 25 \dots 50\%$ при $n = 2000 \text{ хв}^{-1}$).

Результати обчислень середньоексплуатаційних викидів ТЧ показують (табл. 5.8, рис. 5.16), що використання гальваноплазмових покриттів поршнів призводить до зменшення показників PT .

Реж	Параметри двигуна та цикла										Параметри тунеля										Результати розрахунків		
	n_i	M_k	P_{e_i}	L	G_p	$G_{дп}$	$G_{вп}$	$G_{гп}$	$G_{гт}$	q		τ_i	$M_{бтб}$	$M_{гч}$	$PT_{мг}$	PT_i	$C_{гч}$						
	$xв^{-1}$	Н*М	кВт	%	кг/год	кг/год	кг/год	л/хв	л/хв	л/хв	с	г	Мг	г/год	г/кВт*г	г/мн ³							
1	2000	478,0	100,1	100,0	750,1	22,06	772,1	27,94	36,51	8,57	201,3	146,9	2,07	46,34	0,463	0,072							
2	2000	350,7	73,5	73,5	653,4	16,37	669,8	27,31	35,51	8,20	179,7	127,6	1,18	26,81	0,365	0,048							
3	2000	238,3	49,9	50,0	584,1	12,30	596,4	27,93	37,94	10,01	180,6	137,0	1,83	20,19	0,405	0,041							
4	2000	120,9	25,3	25,3	510,5	8,10	518,6	Вимірювання не проводились															
5	2000	48,5	10,2	10,1	473,4	5,52	478,9	Вимірювання не проводились															
6	1500	541,9	85,2	100,0	473,1	17,89	491,0	27,68	36,44	8,76	251,3	183,2	4,53	50,52	0,593	0,123							
7	1500	407,7	64,0	75,3	414,7	13,49	428,1	29,14	37,61	8,47	250,8	188,6	3,15	31,74	0,496	0,089							
8	1500	274,1	43,2	50,7	371,7	9,67	381,3	28,61	37,72	9,11	301,0	227,1	4,64	32,26	0,747	0,102							
9	1500	140,6	22,1	26,0	346,3	5,99	352,3	Вимірювання не проводились															
10	1500	70,3	11,0	13,0	338,7	4,21	342,9	Вимірювання не проводились															
11	1000	379,6	39,7	100,0	228,2	8,52	236,8	29,18	35,16	5,98	154,3	108,5	3,64	46,70	1,175	0,237							
12	1000	280,4	29,6	74,1	222,4	6,32	228,7	28,98	36,28	7,3	243,3	176,5	2,86	18,42	0,623	0,097							
13	1000	189,8	19,9	50,0	219,1	4,35	223,5	Вимірювання не проводились															
14	1000	92,1	9,6	24,1	216,4	2,62	219,0	Вимірювання не проводились															
15	1000	49,2	5,2	13,0	210,4	1,97	212,4	Вимірювання не проводились															

Рис. 5.8. Протокол №1 випробувань дизеля 4ЧН12/14 з поршнями без покриття

Реж	Параметри двигуна та цикла										Параметри тунеля										Результати розрахунків			
	n	M_k	P_e	L	G_n	$G_{гд}$	$G_{вг}$	$G_{гт}$	$G_{гт}$	$G_{гт}$	q	τ	$M_{гтб}$	$M_{гч}$	PT_M	PT	$C_{гч}$							
	$xв^{-1}$	H^*M	кВт	%	кг/год	кг/год	кг/год	л/хв	л/хв	л/хв								с	г	л/год	г/кВт*г	г/МН ³		
1	2000	478,0	100,1	100,0	750,6	22,03	772,6	22,15	28,68	6,53	4,4	184,8	106,0	1,55	44,71	0,447	0,069							
2	2000	350,7	73,5	73,4	657,0	16,30	673,3	23,45	30,6	7,15	4,29	163,9	100,3	1,63	24,93	0,339	0,045							
3	2000	238,3	49,9	49,9	584,3	12,27	596,5	23,74	31,31	7,57	4,16	186,3	116,6	2,02	17,98	0,360	0,036							
4	2000	120,9	25,3	25,3	513,6	8,13	521,7	25,06	33,02	7,96	4,16	185,3	122,4	0,55	9,76	0,385	0,022							
5	2000	48,5	10,2	10,1	475,2	5,54	480,7	25,31	33,1	7,79	4,27	183,8	121,7	0,45	7,59	0,747	0,019							
6	1500	541,2	85,0	100,0	475,1	17,69	492,8	22,8	30,09	7,29	4,2	161,7	97,3	2,70	42,42	0,499	0,104							
7	1500	407,7	64,0	75,3	418	13,26	431,3	23,12	30,26	7,14	4,25	182,0	110,2	1,28	21,30	0,333	0,059							
8	1500	274,1	43,2	50,8	375,92	9,55	385,5	22,83	29,68	6,85	4,34	250,9	148,9	1,30	14,60	0,338	0,045							
9	1500	140,6	22,1	26,0	350,25	5,89	356,1	21,95	29,17	7,22	4,05	241,5	140,9	0,61	6,24	0,283	0,021							
10	1500	70,3	11,0	13,0	344,27	4,19	348,5	22,85	30,20	7,35	4,12	241,4	145,8	0,83	8,17	0,740	0,028							
11	1000	379,6	39,7	100,0	228,7	8,41	237,1	26,32	30,83	4,51	6,87	121,1	74,7	1,70	37,09	0,933	0,188							
12	1000	281,2	29,4	74,1	224,2	6,20	230,4	24,49	30,33	5,83	5,21	181,5	110,1	0,91	9,92	0,337	0,052							
13	1000	189,8	19,9	50,0	221,3	4,30	225,6	25,55	32,11	6,56	4,9	181,3	116,5	0,77	7,31	0,368	0,039							
14	1000	91,4	9,6	24,1	214,5	2,58	217,1	26,55	33,38	6,83	4,89	225,3	150,4	0,62	4,38	0,457	0,024							
15	1000	49,2	5,2	13,0	207,7	1,97	209,7	28,30	35,33	7,03	5,02	242,2	171,2	0,50	3,07	0,597	0,018							

Рис. 5.9. Протокол №2 випробувань дизеля 4ЧН12/14 з поршнями, які пройшли гальваноплазмову обробку поверхні

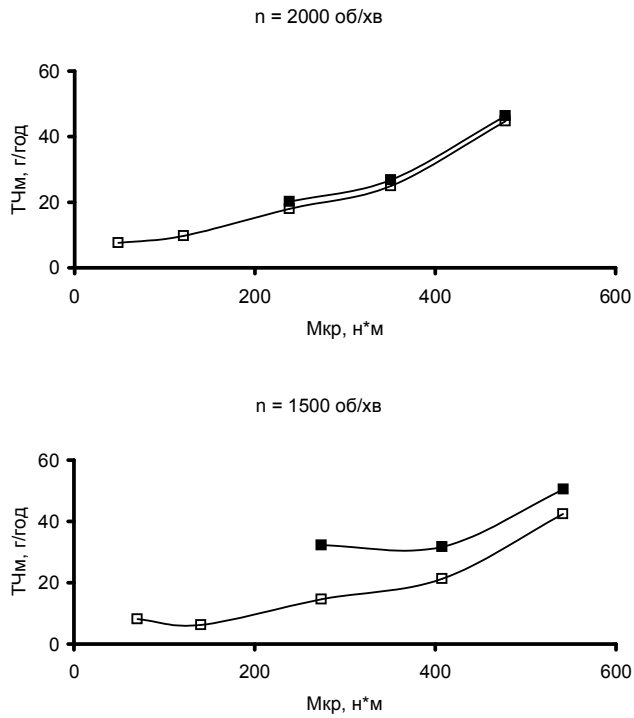


Рис. 5.10. Залежності масового викиду ТЧ від крутного моменту: чорні маркери – звичайні поршні (без покриття); білі маркери – поршні оброблені за гальваноплазменою технологією.

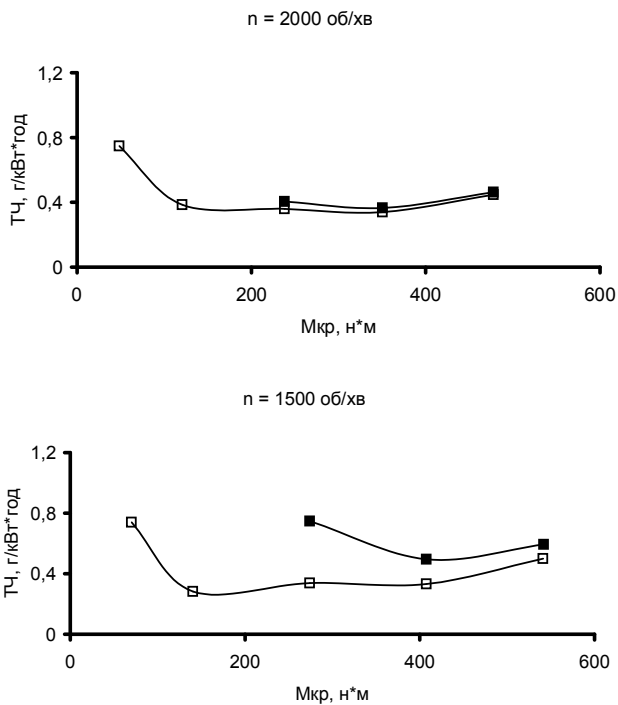


Рис. 5.11. Залежності питомого викиду ТЧ від крутного моменту: чорні маркери – звичайні поршні (без покриття); білі маркери – поршні оброблені за гальваноплазменою технологією.

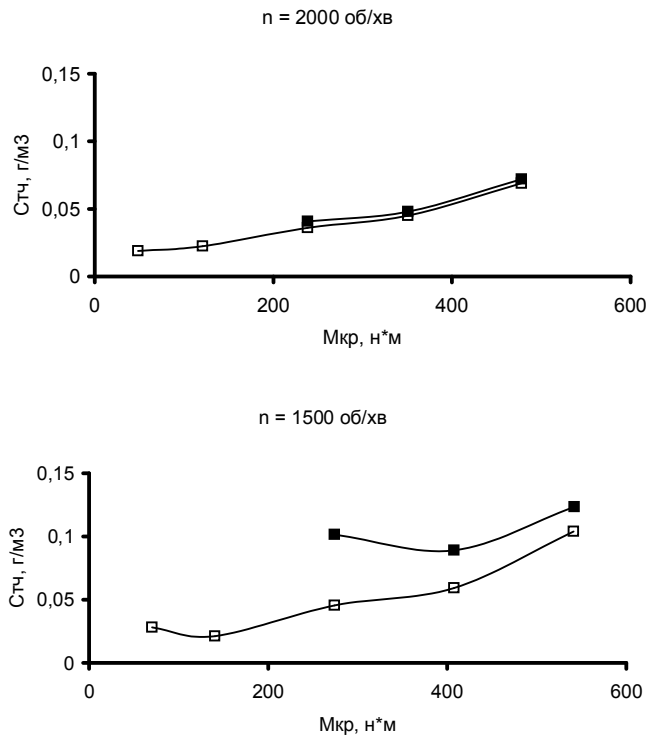


Рис. 5.12. Залежності концентрації ТЧ від крутного моменту: чорні маркери – звичайні поршні (без покриття); білі маркери – поршні оброблені за гальваноплазмовою технологією.

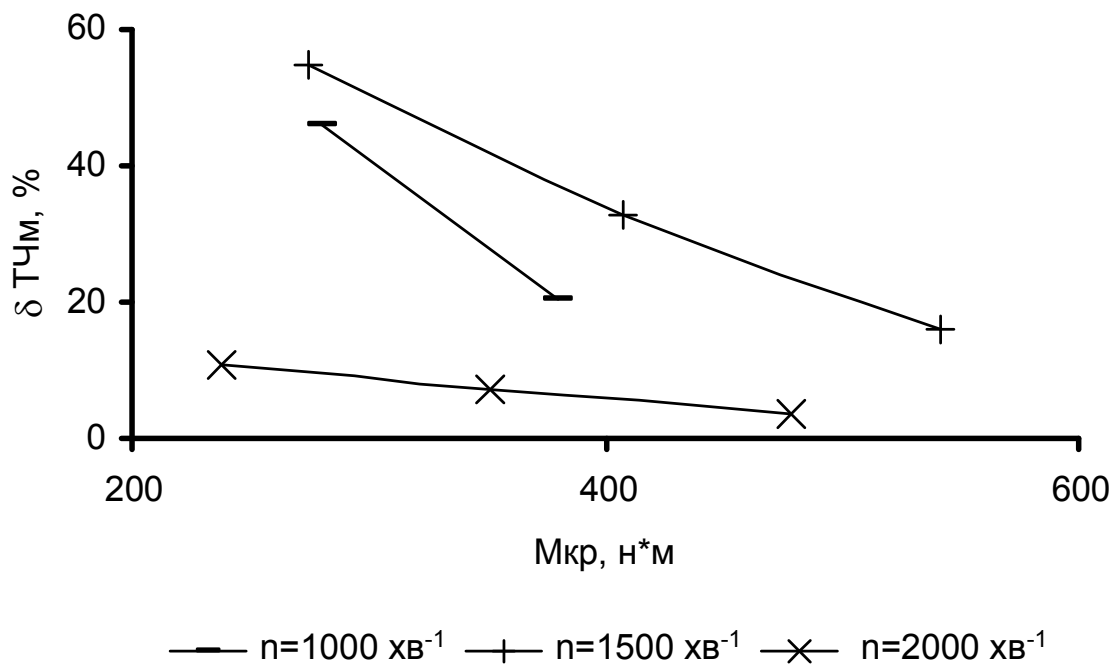


Рис. 5.13. Відносне зменшення масового викиду ТЧ у %-х в результаті використання гальваноплазмової технології обробки поршнів

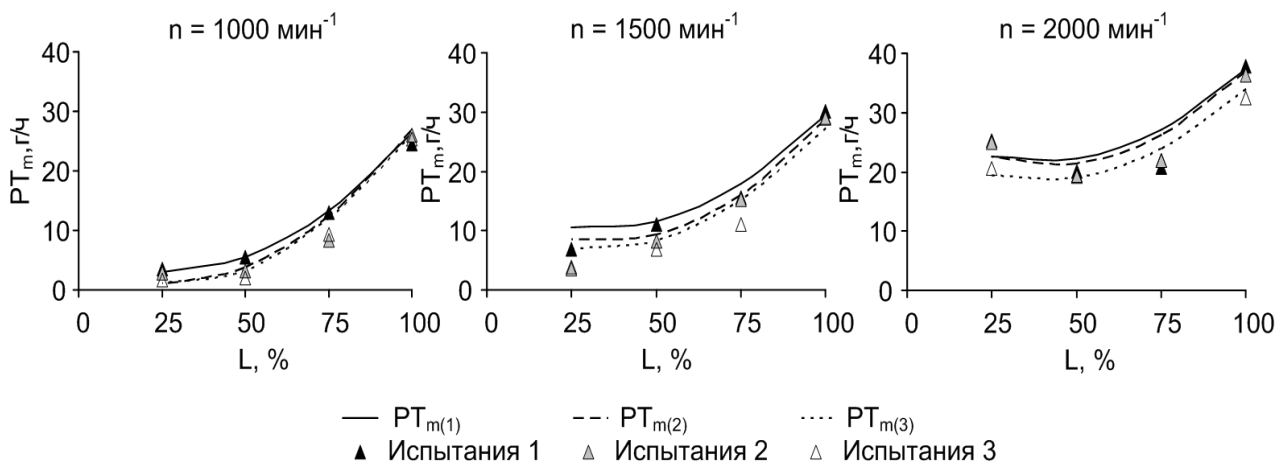


Рис 5.14. Експериментальні дані випробувань дизеля 4ЧН12/14:
 1 – $\Delta_{\text{п}} = 0 \text{ мм}$ (без покриття); 2 – $\Delta_{\text{п}} = 0,2 \text{ мм}$; 3 – $\Delta_{\text{п}} = 0,4 \text{ мм}$.

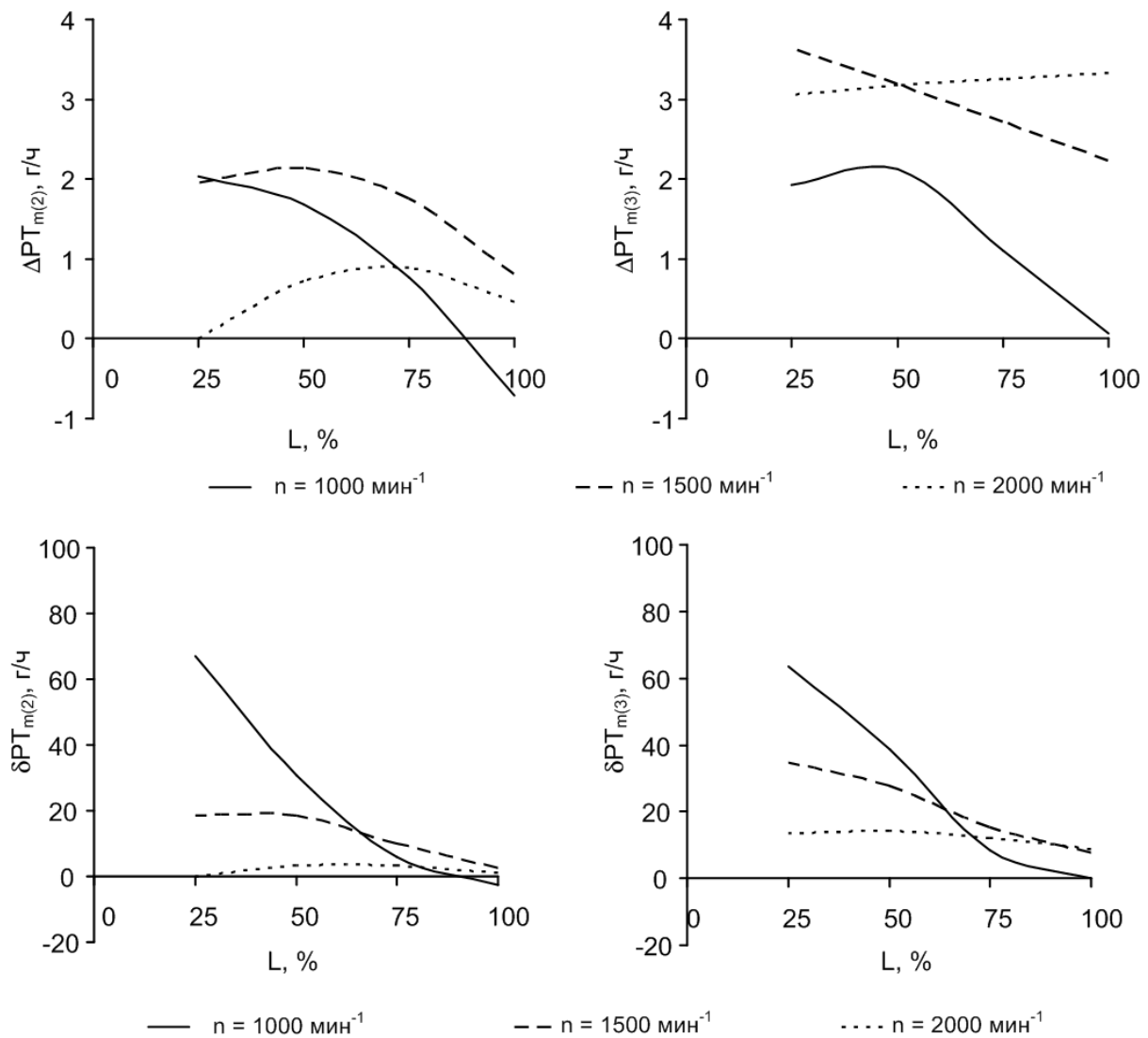


Рис. 5.15. Абсолютні та відносні зміни масових викидів ТЧ
 в результаті використання гальваноплазмових покриттів

Таблиця 5.7

Результати обчислень коефіцієнтів залежностей (5.13) та значень СКВ

Випробування	Коефіцієнти апроксимуючої залежності						СКВ	
	A_0	A_1	A_2	A_{11}	A_{22}	A_{12}	абс., г/ГОД	відн., %
1	2,033	-0,0055	-0,1056	9,27E-6	0,0042	-1,1E-4	2,02	11,3
2	4,645	-0,0136	-0,0829	1,30E-5	0,0047	-1,6E-4	2,22	12,4
3	1,088	-0,0108	-0,022	1,14E-5	0,0042	-1,6E-4	1,84	10,3

Таблиця 5.8

Результати випробувань, які використовувалися для обчислення питомих викидів ТЧ, що визначаються за циклами R-49 та R-96

Випробувальний цикл				Параметри режиму випробувань			Масові викиди ТЧ – PT_{mass} , г/ГОД		
R-49		R-96		n , хв ⁻¹	L , %	P_e , кВт	Випр. 1	Випр. 2	Випр. 3
№ _{реж.}	WF	№ _{реж.}	WF						
1,7,13	0,083	8	0,15	850	-	-	4,09*	2,46*	1,16*
2	0,08	-	-	1500	10	8,50	12,37*	10,80*	8,47*
3	0,08	-	-	1500	25	21,25	6,88	3,85	3,59
4	0,08	7	0,1	1500	50	42,51	11,07	8,14	6,82
5	0,08	6	0,1	1500	75	63,78	15,61	15,26	10,97
6	0,25	5	0,1	1500	100	85,01	30,10	29,20	28,90
8	0,10	1	0,15	2000	100	100,1	37,82	40,39	26,44
9	0,02	2	0,15	2000	75	75,08	20,82	21,97	21,85
10	0,02	3	0,15	2000	50	50,05	20,06	19,28	19,43
11	0,02	-	-	2000	25	25,3	25,32	24,89	20,58
12	0,02	4	0,1	2000	10	10,01	25,30*	25,99*	22,31*

Примітка. * Значення, отримані розрахунковим шляхом з використанням апроксимуючих залежностей (5.13).

При цьому величина зменшення показника PT складає:

– при випробуваннях дизеля за автомобільним циклом R-49 – на 7,8% при $\Delta_{\pi} = 0,2$ мм та на 16,8% при $\Delta_{\pi} = 0,4$ мм;

– при випробуваннях дизеля за тракторним циклом R-96 – на 5,6% при $\Delta_{\pi} = 0,2$ мм та на 12,1% при $\Delta_{\pi} = 0,4$ мм.

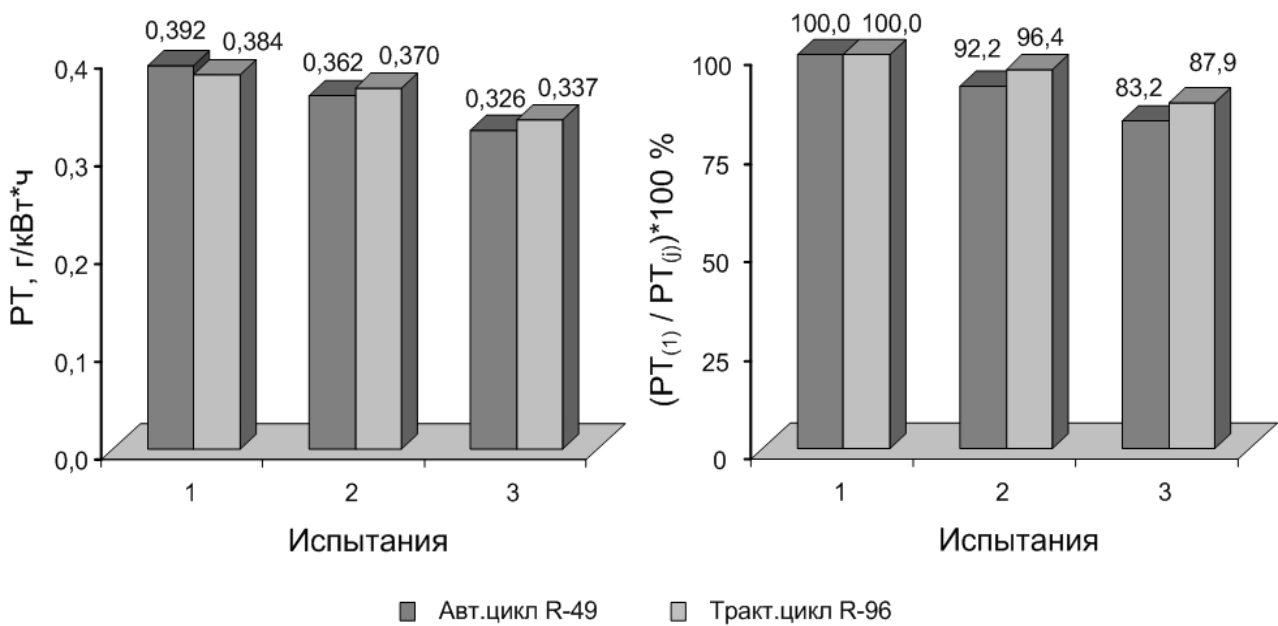


Рис. 5.16. Абсолютні та відносні значення питомих викидів ТЧ дизеля 4ЧН12/14, визначені за циклами R-49 і R-96

Таким чином, зі збільшенням товщини покриття від 0,2 до 0,4 мм величина зменшення показника PT зростає у 2,1 рази.

Оцінка ефективності використання альтернативного палива на основі метилового ефіру ріпакової олії (МЕРО). Проведені вимірювання питомих викидів ТЧ з ВГ дизеля – PT_i (г/кВт*год) на режимах з різними значеннями числа обертів колінчастого вала двигуна – 1000, 1500 та 2000 $хв^{-1}$ при навантаженні 50% із варіюванням відносної частки МЕРО у складі палива – $D_{МЕРО}$ на 2-х рівнях – 25% та 100% [82].

Результати досліджень (рис. 5.17, 5.18) показали наступне:

- використання МЕРО у складі палива дозволяє зменшити викиди ТЧ дизеля та підвищити його екологічну чистоту;

- зростання відносної частки МЕРО у паливі приводить до зменшення питомих викидів ТЧ у всьому діапазоні змінювання числа обертів вала двигуна;

- величина зниження питомого викиду ТЧ дизеля при переході від дизельного палива до палива, яке містить 25% МЕРО, складає: при $n = 1000 \text{ хв}^{-1}$ – 11%, при $n = 1500 \text{ хв}^{-1}$ – 8%, при $n = 2000 \text{ хв}^{-1}$ – 10%;

- величина зниження питомого викиду ТЧ дизеля при переході від дизельного палива до палива, яке на 100% складається з МЕРО, дорівнює: при $n = 1000 \text{ хв}^{-1}$ – 38%, при $n = 1500 \text{ хв}^{-1}$ – 24%, при $n = 2000 \text{ хв}^{-1}$ – 40%.

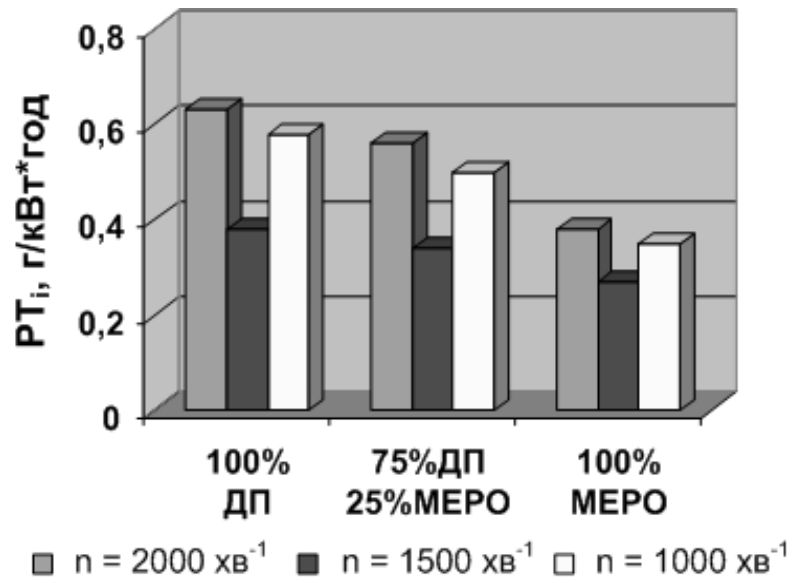


Рис. 5.17. Результати досліджень ефективності використання МЕРО

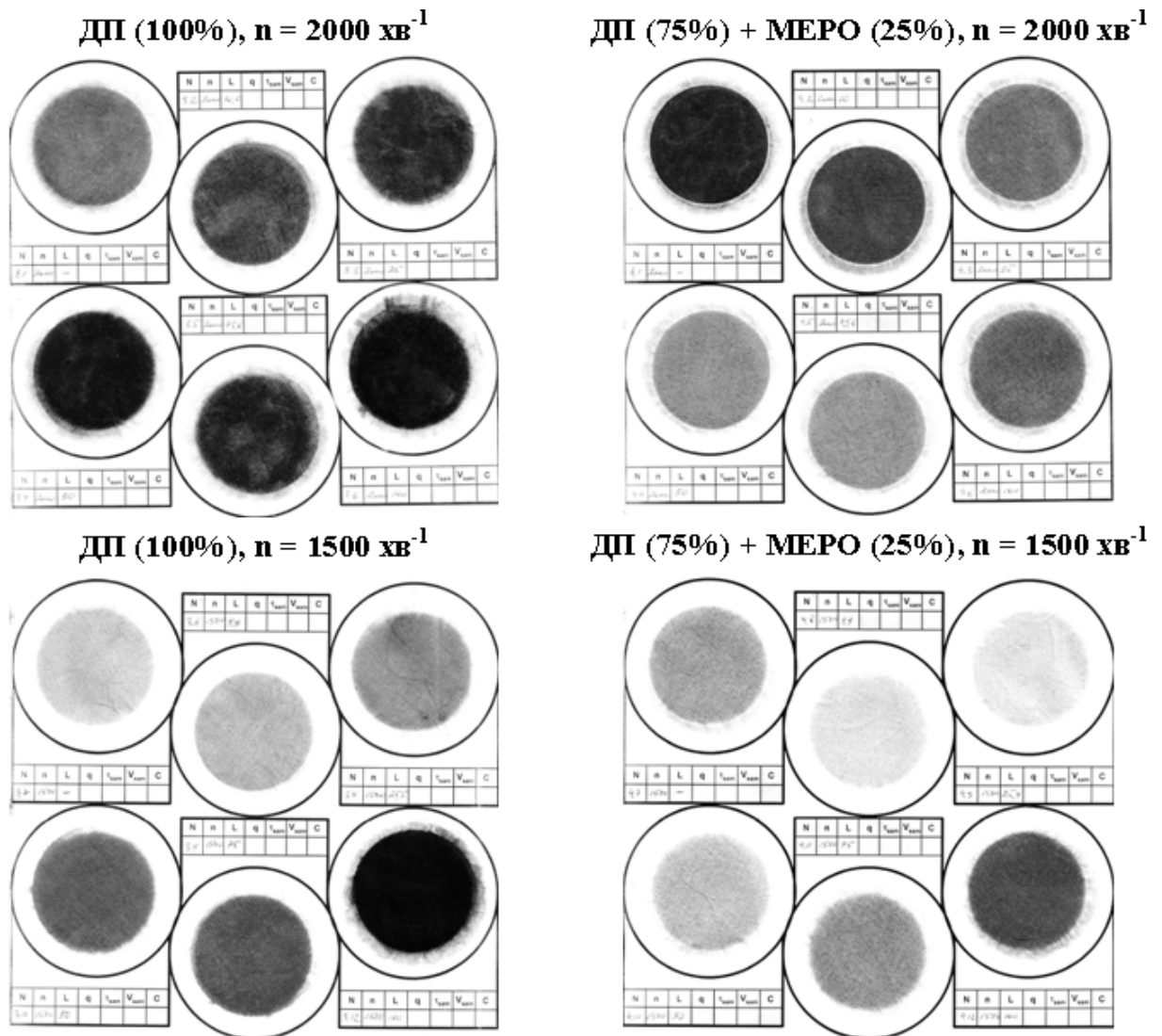


Рис. 5.18. Вигляд фільтрів з ТЧ перед та після використання МЕРО

Таким чином експеримент підтвердив ефективність використання МЕРО у складі палива і показав, що при $D_{\text{МЕРО}} = 25 \dots 100\%$ питомі викиди ТЧ з ВГ дизеля зменшуються на $11 \dots 40\%$ (найбільше значення відповідає режиму з $n = 2000 \text{ хв}^{-1}$ і $D_{\text{МЕРО}} = 100\%$, найменше значення – режиму з $n = 1500 \text{ хв}^{-1}$ і $D_{\text{МЕРО}} = 25\%$).

5.5 Методика визначення викидів ТЧ з ВГ дизелів з мінімальними витратами часу

Методику розроблено з метою підвищення економічної ефективності екологічних випробувань дизелів. Передбачається вимірювання викидів ТЧ на окремих режимах роботи дизеля та середньоексплуатаційного викиду ТЧ з потрібною точністю та мінімальними витратами часу на відбір проб ТЧ – $\tau_{\text{sami}}^{\text{min}}$:

$$\tau_{\text{sami}}^{\text{min}} = 3,6 \cdot 10^6 \cdot m_{\text{fi}}^{\text{min}} \cdot \frac{q_i}{C_{\text{pti}}} \cdot \frac{\rho_{\text{sami0}}}{G_{\text{sami}}} \cdot (1 + \delta\tau_{\text{sami}}^{\text{min}}),$$

де i – індекс режиму випробувань;

$m_{\text{fi}}^{\text{min}}$ – мінімальна маса навішування ТЧ на фільтрі, мг;

$q_i, C_{\text{pti}}, \rho_{\text{sami0}}, G_{\text{sami}}$ – відповідно: коефіцієнт розбавлення ВГ, концентрація ТЧ у ВГ (г/мн^3), щільність проби розбавлених ВГ при н.у. (кг/мн^3) та масова витрата проби (кг/год);

$\delta\tau_{\text{sami}}^{\text{min}} = (\delta q_i^2 + \delta C_{\text{pti}}^2 + \delta G_{\text{sami}}^2)^{0,5}$ – відносна похибка визначення $\tau_{\text{sami}}^{\text{min}}$ ($\delta q_i, \delta C_{\text{pti}}, \delta G_{\text{sami}}$ – відносні похибки вимірювань q_i, C_{pti} і G_{sami}).

Величина $m_{\text{fi}}^{\text{min}}$ визначається за формулою:

– при визначенні викидів ТЧ на окремих режимах:

$$m_{\text{fi}}^{\text{min}} = \frac{\Delta m_f}{\delta m_f^{\text{доп}}} \cdot 100\%;$$

– при визначенні середньозваженого викиду ТЧ:

$$m_{\text{fi}}^{\text{min}} = W F_i \cdot \frac{K_{\text{PTmassi}}}{K_{\text{Gedfi}}} \cdot \frac{\Delta m_f}{\delta m_f^{\text{доп}}} \cdot 100\%,$$

де Δm_f – абсолютна похибка вимірювань величини m_f , мг;

$\delta m_f^{\text{доп}} = 5\%$ – допустима похибка визначення m_f ;

$K_{\text{PTmassi}} = \text{PT}_{\text{massi}} / \text{PT}_{\text{mass}}, K_{\text{Gedfi}} = G_{\text{edfi}} / \bar{G}_{\text{edf}}$ – коефіцієнти, які визначаються за експериментальними даними.

До вказаної методики додаються рекомендації щодо підвищення точності вимірювань викидів ТЧ, зроблені у п. 1.4, та пропонується використання в якості вимірювального обладнання мікротунель МКТ-2 з компенсаційним способом визначення масової витрати ВГ. Використання цієї методики дозволяє зменшити до мінімально можливих значень тривалість та вартість екологічних випробувань дизелів, що є важливим при випробуваннях габаритних дизелів: тепловозних, судових, тощо.

Висновки глави

В результаті виконання комплексу наукових досліджень на базі дизеля 4ЧН12/14 з мікротунелем МКТ-2, отримано такі результати:

1. Експериментально підтверджено ефективність запропонованих рекомендацій щодо зменшення результуючої похибки вимірювань середньоексплуатаційного викиду ТЧ дизеля – δPT ; в результаті їх виконання величина δPT знизилась у 2,1 рази;

2. Встановлено тип регресійної залежності (поліном 2-го порядку), яка забезпечує адекватне оцінювання впливу режиму роботи дизеля, що характеризується параметрами \bar{n} та \bar{L} , на масові і питомі викиди та концентрації ТЧ; при цьому СКВ розрахункових та експериментальних даних дорівнюють 8,1...18,8 %;

3. В результаті досліджень концентрацій ТЧ на несталих режимах роботи дизеля встановлено залежність $\Delta C_{pt} = f((\Delta \bar{n} / \Delta t), (\Delta \bar{L} / \Delta t))$ у діапазонах варіювання параметрів Δt , $\Delta \bar{n}$ та $\Delta \bar{L}$: 10...30 с, 0,4...0,8 та 0,3...1,0, відповідно; розходження розрахункових та експериментальних даних при цьому складають $\pm 0,003...0,004$ г/кг.

4. Доведено ефективність заходів з екологізації дизеля: а) нанесення гальваноплазмових покриттів на поверхні поршнів дозволяє зменшити показник PT : при виконанні дизелем автомобільної роботи – на 7,8...16,8%, тракторної роботи – на 5,6...12,1%; б) застосування альтернативного палива на основі МЕРО дозволяє зменшити питомі викиди ТЧ на 11...40% в залежності від режиму роботи двигуна.

5. Розроблено методику визначення викидів ТЧ з ВГ дизелів з мінімальними витратами часу на відбір проб ТЧ, яка забезпечує потрібну точність і дозволяє скоротити тривалість та вартість екологічних випробувань дизелів (що особливо актуально при випробуваннях габаритних дизелів).

ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень вирішено актуальну прикладну проблему створення науково-практичних основ гравіметричних вимірювань викидів ТЧ з ВГ дизелів, що забезпечують потрібну точність та дозволяють знизити вартість обладнання – розбавляючих тунелів. Результати проведених досліджень та виконаних робіт дозволяють зробити наступні висновки.

1. На основі аналізу причин високої вартості систем контролю показника PT та значної результуючої похибки вимірювань даної величини – δPT дані рекомендації, виконання яких дозволяє зменшити похибку δPT (за рахунок зниження методичних похибок δPT_{tf} й δPT_{st} шляхом скорочення допустимих діапазонів варіювання параметрів t_{dil} , $t_{f(max)}$, t_{st} та τ_{st} та використання в тунелі режиму розбавлення ВГ з постійним коефіцієнтом q , повітряним охолодженням тунелю і регулюванням температури проби) та знизити вартість тунелів (за рахунок використання компенсаційного способу визначення масової витрати ВГ).

2. Розроблено математичну модель утворення температурних полів в кінцевих перетинах трубопроводів розбавлення ВГ та лінії відбору проб ТЧ, яка дозволяє визначати та порівнювати між собою значення температур проби перед фільтром t_f на різних режимах роботи двигуна, в різних тунелях, при різних умовах розбавлення ВГ (характеризуються параметрами t_{dil} , $t_{f(max)}$, $\Delta t_{f(52)}$).

3. Створено математичну модель утворення результуючої похибки δPT , яка дозволяє оцінювати точність визначення показника PT з урахуванням похибок вимірювального обладнання і факторів, що впливають на масу навішування ТЧ на фільтрі на етапах пробопідготовки (t_{dil} , $t_{f(max)}$, $\Delta t_{f(52)}$) та стабілізації фільтру (t_{st} , τ_{st}).

4. Запропоновано для використання компенсаційний спосіб визначення масової витрати ВГ, що поступають в тунель, замість найбільш розповсюдженого диференційного способу (використовується у мікротунелі *AVL SPC 472*). Це дозволяє більш ніж у 15 разів знизити вимоги щодо точності витратомірів вартісного вузла міні- та мікротунелів – вимірювача коефіцієнту розбавлення ВГ та у 5...8 разів зменшити його вартість.

5. Спроектвані (з врахуванням зроблених рекомендацій), виготовлені і апробовані макетні зразки автоматизованих вимі-

рувальних систем: мінітунеля з ізокінетичним пробовідбірником МТ-1 та мікротунеля МКТ-2. Вони дозволяють визначати: показник PT (у відповідності до вимог Правил R-49 і R-96), викиди ТЧ з ВГ на різних режимах роботи дизеля.

6. Створено програмне забезпечення, яке дозволяє виконувати функції контролю і керування частковопоточними системами МТ-1 та МКТ-2, обробки і протоколювання результатів випробувань, та запропоновано його використання при розробці промислових зразків міні- та мікротунелів вітчизняного виробництва.

7. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що при ізокінетичному режимі відбору проби ВГ перепад статичних тисків між пробовідбірником та вихлопною трубою є функцією швидкісного напору потоку ВГ і залежить від режиму роботи двигуна.

8. Підготовлені (шляхом створення випробувального стенду та відповідних методик) та проведені на базі дизеля 1Ч12/14 експериментальні дослідження, в ході яких встановлені залежності для визначення методичних похибок вимірювань показника PT , які виникають на етапах пробопідготовки – δPT_{tf} та стабілізації фільтру – δPT_{st} .

9. Проведено розрахункові дослідження розбіжностей температур t_{fi} в повнопоточному (еталонному) та частковопоточних тунелях – Δt_{fi}^{MT} та Δt_{fi}^{MKT} , а також виникаючих при цьому відхилень результатів вимірювань показника PT – δPT^{MT} та δPT^{MKT} . Дослідження показали, що в міні- та еталонному тунелі значення температур t_{fi} приблизно рівні (відхилення $\Delta t_{fi}^{MT} \leq 0,7$ °С, $\delta PT^{MT} \leq -0,4\%$ – несуттєві), а в мікротунелі відхилення Δt_{fi}^{MKT} (досягають 2,5 °С) та $\delta PT^{MKT} = -1,7...-1,6\%$ більш значущі й повинні усуватися за рахунок регулювання температури проби.

10. Оцінено результуючу похибку вимірювань показника PT :

а) при знаходженні величин t_{dil} , $t_{f(max)}$, t_{st} та τ_{st} в межах допустимих Правилами R-49 діапазонів варіювання – $\delta PT = -18,0...19,7\%$ (розходження результатів – 37,7%), сумарний внесок методичних складових в дану величину – 76%;

б) при виконанні зроблених рекомендацій δPT зменшується в 4,6 рази і складає -4,0...4,2% (розбіг 8,2%), внесок методичних складових знижується в 2,8 рази – до 27%.

11. На базі гальмівного стенду автотракторного дизеля, оснащеного мікротунелем МКТ-2 проведено комплекс наукових досліджень, які дозволили:

а) експериментально підтвердити ефективність рекомендацій щодо підвищення точності розбавляючих тунелів: похибка відтворюваності експерименту при визначенні показника PT в результаті їх виконання знизилась у 2,1 рази;

б) встановити емпіричні залежності для непрямого оцінювання рівнів масових і питомих викидів та концентрацій ТЧ у ВГ на сталих та несталих режимах роботи дизеля з похибками $\pm 8,1 \dots 18,8 \%$;

в) довести ефективність таких заходів з екологізації ДВЗ, як нанесення гальваноплазмових покриттів на поршні двигуна та використання в дизелях альтернативного палива на основі МЕРО.

12. Розроблено методику визначення мінімального часу відбору проб, при якому забезпечується потрібна точність вимірювань викиду ТЧ на окремому режимі роботи дизеля; її використання дозволяє скоротити тривалість і вартість екологічних випробувань, що актуально при випробуваннях габаритних дизелів – тепловозних, судових, тощо.

Слід відзначити вітчизняних вчених та фахівців, які зробили значний внесок у створення та практичне використання макетних зразків мінітунеля МТ-1 і мікротунеля МКТ-2 та експериментальних установок:

Звонов Василь Олексійович – наукове керівництво проектами по створенню МТ-1 і МКТ-2 у період 1996–2008 рр; **Марченко Андрій Петрович, Парсаданов Ігор Володимирович** – організація та проведення комплексних наукових досліджень екологічних показників дизеля 4СН12/14 з використанням МКТ-2; **Смирний Михайло Федорович** – наукове керівництво проектами по удосконаленню та експериментальному відпрацюванню МКТ-2 у період 2009–2015 рр, розробка елементів та вузлів МТ-1; а також: **Львов С.О., Зубов С.В., Єна Г.І., Гусаков О.О.** – розробка електронного та програмного забезпечення МТ-1 і МКТ-2; **Симонова О.О.** – дослідження токсикологічних властивостей твердих частинок, розробка алгоритму роботи, елементів та вузлів МТ-1, **Дядін О.П., Сьомін Д.О.** – розробка елементів та вузлів МТ-1.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Regulation No 49. Revision 5. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) and natural gas (NG) engines as well as positiveignition (P.I.) engines fuelled with liquefied petroleum gas (LPG) and vehicles equipped with C.I. and NG engines and P.I. engines fuelled with LPG, with regard to the emissions of pollutants by the engine. – United Nations Economic and Social Council Economic Commission for Europe Inland Transport Committee Working Party on the Construction of Vehicles. – E/ECE/TRANS/505, 2011. – 194 p.
2. Regulation № 96. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) engines to be installed in agricultural and forestry tractors with regard to the emissions of pollutants by the engine. Geneva, 1995. – 109 p.
3. ISO 8178. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 1: Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emis-sions, 1996. – 94 p.
4. ISO 8178. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 2: Test Measurement of gaseous and particulate exhaust emissions at site, 1996. – 22 p.
5. ISO 8178. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 4: Test cycles for different engine applications, 1996. – 18 p.
6. Environmental Protection Agency. 40 CFR Parts 85, 89 and 92: Emission Standards for Locomotives and Locomotive Engines // Federal Register. Vol. 62, № 28, 1997. – 240 p.
7. Hardenberg H. Grenzen der Rubmassnbestimmung aus optischen Transmessungen / H. Hardenberg, H. Albrecht // MTZ: Motortechn. Z. – 1987. – 48, № 2. – P. 51-54.
8. Парсаданов И.В. Оценка выброса твердых частиц с отработавшими газами дизеля. // Авиационно-космическая техника и технология. Тепловые двигатели и энергоустановки. Сб. науч. тр. / ХАИ. – Х., 2000. – Вып. 19. – С. 176-178.
9. Кульчицкий А.Р. Расчетно-экспериментальное определение выброса дисперсных частиц с отработавшими газами дизелей // Двигателестроение, 2005, №4. – С. 39-44.
10. Steven H. Development of Worldwide Harmonized Heavy-duty Engine Emissions Test Cycle / Final Report ECE-GRPE WHDC Working

Group. – April 2001 // Informal document №2 GRPE 42nd session. – 28 May – 1 Yune 2001. – TRANS /WP 29/GRPE/2001/2. – 58 p.

11. Worldwide Harmonized Heavy Duty Emissions Certification Procedure / Draft Global Technical Regulation (GTR) / UN/ECE-WP 29 – GRPE WHDC Working Group. - Informal Document №GRPE-48-7 (48th GRPE, 01-04 June 2004, agenda item 1.1) – 86 p.

12. Поливянчук А.П. Моделирование процесса охлаждения отработавших газов дизельного двигателя в разбавляющем туннеле / А.П. Поливянчук // Двигатели внутреннего сгорания. – 2005. – № 1. – С. 121–125.

13. Поливянчук А.П. Совершенствование методики экологических испытаний дизелей с целью повышения ее экономической эффективности / А.П. Поливянчук, В.А. Звонов // Наукові праці: Науково-методичний журнал. Т.43. Вип. 30. Техногенна безпека. – 2005. – С. 112-115.

14. Поливянчук А.П. Исследование факторов, влияющих на точность измерения массовых выбросов твердых частиц с отработавшими газами дизелей / А.П. Поливянчук // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2005. – №9/25.-С.202-205.

15. Polivyanchuk A.P. Experimental verification of microtunnel MKT-2 on the brake stand autotractor diesel engine / A.P. Polivyanchuk, I.V. Parsadanov // Industrial technology and engineering. – Republic of Kazakhstan, 2015. – №2 (15). – P. 11-16.

16. ГСТУ 32.001-94. Выбросы загрязняющих веществ с отработавшими газами тепловозных дизелей. Нормы и методы определения. – К.: Изд-во стандартов, 1994. – 14 с.

17. Звонов В.А. Выделение токсичных веществ тепловозными дизелями типа 2Д50 / В.А. Звонов, А.П. Дядин, П.П. Фесенко и др. // Двигатели внутреннего сгорания. Реферативный сборник НИИИнформТяжМаш. – М. 1976, № 4-76-12. – С.10-12.

18. Поливянчук А.П. Оценка неопределенности результатов измерений выбросов твердых частиц в ходе экологических испытаний дизелей / А.П. Поливянчук // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, 2012. – №5 (176), Ч. 2. – С. 121-128.

19. Lach G. Specific problems of sampling and measuring diesel exhaust emissions / G. Lach, J. Wincler // SAE Techn. Pap. Ser. №881763, 1988. – 12 p.

20. Поливянчук А.П. Оценка эффективности компенсационного способа измерения массового расхода отработавших газов дизеля в микротуннеле / А.П. Поливянчук, О.Р. Игнатов // Прикладна екологія. Збірник наукових праць Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля.-2009.-№ 1(5). С 149-154.

21. Поливянчук А.П. Сравнительный анализ дифференциального и компенсационного способов измерения массового расхода отработавших газов дизеля в микротуннеле / А.П. Поливянчук // Двигатели внутреннего сгорания, 2011. – №2. – С. 123-126.

22. Mini Dilution Tunnel. – Perkins Technology Limited. – London, England, 1990. – 16 p.

23. Mini-Verdunnungstunnel MT 474. Technische Beschreibung. – AVL, List GmbH Graz, Austria, 1989. – 20 p.

24. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценка экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды / А.С. Быстров, В.В. Воронкин, М.А. Виленский и др. – М.: Экономика, 1986. – 96 с.

25. Smart Sampler PC SPC 472. Operating Manual. Diesel particulate dilution and sampling equipment. AVL, Austria, 1993. – 69 p.

26. Поливянчук А.П. Экологическая диагностика тепловозов по показателю массовых выбросов в атмосферу дизельных твердых частиц // Вісн. Східноукр. держ. ун-ту. Серія: Транспорт. – Луганськ: СНУ, 2001. – № 7 (41). – С. 131-135.

27. K. Engeljehring, W. Schindler, Sulzer. Meeting ISO 8178 Requirements for the Measurement of Diesel Particulates with Partial-Flow Dilution Systems. SAE Techn. Pap. Ser. №932466, 1993. – 10 p.

28. Heavy Duty Transient Test Facility. – Perkins Technology Limited. – London, England, 1990. – 25 p.

29. PS 2000. Particle Sampling System with Dilution Tunnel. – Pirburg AG, Neuss, Germany, 2001. – 4p.

30. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: diesel and gasoline exhausts and some nitroarenes. Vol. 46, Lyon, France: World Health Organization, International Agency for Research on Cancer, 1989. – 458 p.

31. Mundt D.J., Nauss K.H., Gohen A.J., Greenbaum D.S. Diesel emission and lung cancer: epidemiology and quantitative risk assessment: A special report of the Institute Diesel Epidemiology Expert Panel // Health Effect Institute, 1999. – 74 p.

32. Health assessment document for diesel engine exhaust / EPA/600/8-90/057F. – National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency. – Washington, 2002. – 669 p.

33. Dawson D.S., Alexeeff G.V., Budroe J.D., Campelman S.V. et al. For the proposed identification of diesel exhaust as toxic air contaminant. Part B: Health risk assessment for diesel exhaust. – California EPA, Office of Environmental Health Hazard Assessment, Air Toxicology and Epidemiology Section, 1998. – 442 p.

34. Draper W.M., Phillips J.A., Zeller H.W. Impact of barium fuel additive on the mutagenicity and polycyclic aromatic hydrocarbon content of diesel exhaust particulate emissions // SAE Techn. Pap. Ser. №881651, 1988. – 19 p.

35. Shore P.R., Tesh J.M., Bootman J.C. Application of short-term bioassays to the assessment of engine exhaust emissions // SAE Techn. Pap. Ser. №870627, 1987. – 16 p.

36. Overall evaluations of carcinogenicity to humans / Group 2A: Probably carcinogenic to humans // IARC, 2002. – 4 p.

37. Nauss K. Diesel exhaust: a critical analysis of emission exposure and health effects // Summary of HEI special report, 1997. – 6 p.

38. Звонов В.А. Исследование процессов теплоотдачи в системах (туннелях) для измерения массовых выбросов твердых частиц от дизельных двигателей / В.А. Звонов, А.П. Полив'янчук, Г.И. Ена и др. // Вісн. Східноукр. держ. ун-ту. – Луганськ: СНУ, 2001. – № 6 (40). – С. 183-188.

39. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник – 4-е изд. перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1989. – 701с.

40. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

41. Полив'янчук А.П. Оцінка індивідуального внеску основних забруднюючих речовин у сумарну токсичність відпрацьованих газів тепловозів / А.П. Полив'янчук, С.О. Львов, С.В. Зубов // Международный информационный научно-технический журнал Локомотивинформ, 2010. – №5. – С. 61-62.

42. N. Hirakouchi, I. Fukano, T. Shoji. Measurement of Diesel Exhaust Emissions with Mini-Dilution Tunnel. SAE Techn. Pap. Ser. №890181, 1989. – 11p.

43. H. Nagano. Measurement of Unregulated Exhaust Emissions from Heavy Duty Diesel Engines with Mini-Dilution Tunnel. SAE Techn. Pap. Ser. №900643, 1990. – 10p.

44. Поливянчук А.П. Повышение точности гравиметрического метода измерений удельного выброса твердых частиц с отработавшими газами дизеля / А.П. Поливянчук // Двигатели внутреннего сгорания, 2010. – №2. – С. 110-113.

45. Поливянчук А.П. Измерительный комплекс для определения массовых выбросов твердых частиц дизелей / А.П. Поливянчук, В.А. Звонов // Авиационно-космическая техника и технология. Тепловые двигатели и энергоустановки. Сб. на-уч. тр. ХАИ. – Х., 2000. – Вып. 19. – С.478-481.

46. PTP 2000. Partial-flow particle collector. – Pirburg AG, Neuss, Germany, 2001. – 4p.

47. Поливянчук А.П. Разработка методики и экспериментальной установки для исследования теплоотдачи в разбавляющем туннеле отработавших газов дизеля / А.П. Поливянчук // Двигатели внутреннего сгорания, 2012. – № 1. – С.93-95.

48. Парсаданов И.В. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса теплоотдачи в разбавляющем туннеле / И.В. Парсаданов, А.П. Поливянчук // Двигатели внутреннего сгорания. – 2012. – № 2. – С. 96-101.

49. Поливянчук А.П. Исследование результирующей погрешности измерений среднеэксплуатационного выброса взвешенных частиц с отработавшими газами / А.П. Поливянчук, О.Р. Игнатов // Прикладна екологія. Збірник наукових праць Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, 2012. – №1 (4). – С. 121-130.

50. Russel R. Development of a Miniaturized, Dilution-Based Diesel Engine Particulate Sampling System for Gravimetric Measurement of Particulates / R. Russel // SAE Techn. Pap. Ser. №931190, 1993. – 12 p.

51. Smart Sampler PC SPC 472. PC program for SPC 472 control. – AVL, List GmbH Graz, Austria, 1993. – 76 p.

52. Поливянчук А.П. Микротуннель для измерения массовых выбросов твердых частиц от дизельных двигателей локомотивов. / А.П. Поливянчук // Авиационно-космическая техника и технология. Тепловые двигатели и энергоустановки. Сб. науч. тр. /ХАИ. – Х., 2001. – Вып. 26. – С. 195-198.

53. Поливянчук А.П. Анализ влияния условий стабилизации рабочих фильтров на массу навески дизельных твердых частиц / А.П. Поливянчук // Двигатели внутреннего сгорания, 2010. – №1. – С. 88-91.

54. Требования норм EURO 4 к технике по анализу эмиссии отработавших газов для грузовых автомобилей. / Современные дизельные двигатели и оборудование для их испытаний / Доклад фирмы «AVL List GmbH». Авторы: М. Анкович, К. Энгелерингер, В. Шиндлер, П. Зеленка, М.: АМО «ЗИЛ», 1999. – 15 с.

55. Звонов В.А. Исследование влияния условий разбавления отработавших газов двигателя в минутнунеле на точность определения массовых выбросов твердых частиц. / В.А. Звонов, М.Ф. Смирный, А.П. Поливянчук, А.Е. Петренко, Ю.А. Корчанова // Збірн. наук. праць Луганського державного аграрного ун-ту. Серія: Технічні науки. – Луганськ: ЛНАУ, 2001. – № 10 (22). – С. 115-119.

56. Полив'янчук А. П. Дослідження ефективності використання вимірювального комплексу з мікротунелем МКТ-2 при проведенні екологічного діагностування тепловозів / А.П. Полив'янчук, Т.С. Харитоновна, О.О. Чумак // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля, 2007. – № 8(114). – С.119-124.

57. Polivyanchuk A.P. Improving the efficiency of emission control dispersed particles from diesel exhaust gases / A. P. Polivyanchuk // Вісник Харківського національного ун-ту ім. В.Н. Каразіна. – Харків, 2014. – №1140, вип. 11. – С. 83-88.

58. Поливянчук А.П. Исследование изокINETического режима отбора отработавших газов дизеля в минутнунеле / А.П. Поливянчук, Е.А. Холкина // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – Сєвєродонецьк, 2015. - № 3 (220). – С. 82-86.

60. Звонов В.А. Оценка выбросов твердых частиц с отработавшими газами автотракторного дизеля / В.А. Звонов, А.П. Марченко, И.В. Парсаданов, А.П. Поливянчук // Двигатели внутреннего сгорания.- 2006. – № 2 – С. 64–67.

61. Поливянчук А.П. Совершенствование измерительного комплекса для оценки выброса твердых частиц / А.П. Поливянчук, С.В. Зубов // Двигатели внутреннего сгорания, – 2007. – №1. – С. 133-137.

62. Болгарский А.В. Термодинамика и теплопередача / А.В. Болгарский, Г.А. Мухачев. – М.: Высшая школа, 1964. – 458 с.

63. Поливянчук А.П. Повышение универсальности и точности системы контроля выбросов дизельных твердых частиц – микротуннеля МКТ-2 / А.П. Поливянчук, Т.С. Харитоновна, Т.В. Несмашная // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2007. – №9/45. – С. 67-70.

64. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. / Ю.П.Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М., изд-во «Наука», 1976.– 280с.

65. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева // Изд. 2-е. – М.: «Энергия», 1977. – 344с.

66. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена / В.А. Осипова. – М.: Энергия, 1979. – 392 с.

67. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. 2-е изд. / Х. Кухлинг. – М.: Мир, 1985 –520с.

68. Поливянчук А.П. Исследование степени токсичности вредных веществ, выбросы которых нормируются европейскими экологическими стандартами / А.П. Поливянчук, Е.Ю. Щепак, Е.Ю. Титова // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*, 2007. – №2. – С. 112-115.

69. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1973. – 957 с.

70. Исаченко В.П. Теплопередача: уч. для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

71. Поливянчук А.П. Определение и анализ уровней выбросов твердых частиц с отработавшими газами автомобильного дизеля на установившихся режимах работы / А.П. Поливянчук, И.В. Парсаданов, И.В. Рыкова // *Двигатели внутреннего сгорания*, 2009. – №1. – С. 92-96.

72. Поливянчук А.П. Повышение точности гравиметрического метода измерений выбросов твердых частиц с отработавшими газами дизеля / А.П. Поливянчук, С.А. Львов // *Двигатели внутреннего сгорания*, 2013. – № 1. – С.93–97.

73. Пат. 74279 Україна, МПК (2012.01) G01L 13/00. Датчик різниці тисків / Смирний М.Ф., Полив'янчук А.П.; заявник та патентовласник Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля. – №201203569; заявл. 26.03.12; опубл. 25.10.12, бюл. №20.

74. Пат. 79206 Україна, МПК (2012.01) G01G 9/00. Датчик різниці тисків / Смирний М.Ф., Полив'янчук А.П.; заявник та патентовласник Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля. – №201213005; заявл. 15.11.2012; опубл. 10.04.2013, бюл. №7.

75. Парсаданов И.В. Оценка влияния гальваноплазменного покрытия поршня на выбросы твердых частиц с отработавшими газами дизеля / И.В. Парсаданов, А.П. Поливянчук // Двигатели внутреннего сгорания, 2009. – №2. – С.97-100.

76. Ханженков В.И. Аэродинамические характеристики коллекторов / В.И. Ханженков // «Промышленная аэродинамика», сб. №4. – М.: Изд-во ЦАГИ, 1953. – С.45-62.

77. РД 50-213-80. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 319 с.

78. Рафалес-Ламарка Э.Э. Инструкция по планированию эксперимента / Э.Э. Рафалес-Ламарка. – Луганск, Укр. проектно-констр. и научно-исслед. ин-т «УкрНИИУглеобогащение», 1969. – 126 с.

79. Поливянчук А.П. Определение регрессионных зависимостей для оценки содержания твердых частиц в отработавших газах дизеля / А.П. Поливянчук, С.А. Львов // Вісник СНУ ім. В. Даля. – Луганськ, 2013. – №17 (206), Ч. 1. – С. 99-104.

80. Марченко А.П. Влияние режимов работы автотракторного дизеля на выбросы твердых частиц с отработавшими газами / А.П. Марченко, И.В. Парсаданов, А.П. Поливянчук // Вісник Національного транспортного університету, 2012. – № 25. – С. 151-155.

81. Зажигаев Л.С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л.С. Зажигаев, А.А. Кишьян, Ю.И. Романиков. – М.: Атомиздат, 1978. – 232 с.

82. Марченко А.П. Комплексное исследование параметров автотракторного дизеля при работе на метиловом эфире рапсового масла / А.П. Марченко, И.В. Парсаданов, А.А. Прохоренко, и др. // Сб. научн. трудов МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2007. – С. 389-393.

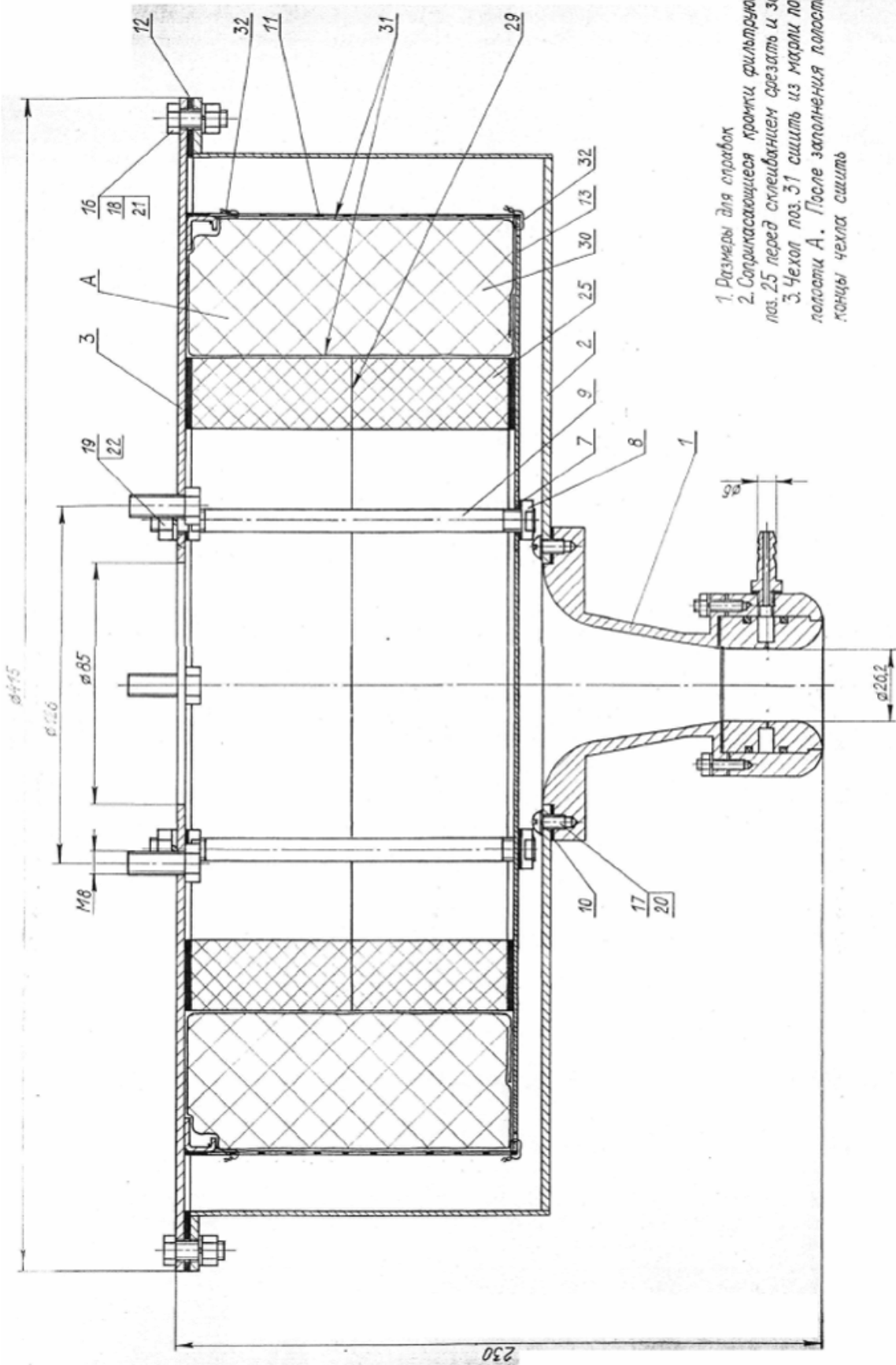
83. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – М.: «Мир», 1972. – 382 с.

84. Поливянчук А.П. Исследование выбросов твердых частиц с отработавшими газами на неустановившихся режимах работы автотракторного дизеля / А.П. Поливянчук, И.В. Парсаданов, Е.А. Холкина // Двигатели внутреннего сгорания, 2015. – № 2. – С. 93–97.

85. Polivyanchuk A.P. Creation and experimental studies of the dynamic measuring concentrations of particulates in the exhaust gases of diesel engines / A.P. Polivyanchuk, I.V. Parsadanov, E.A. Holkina // ТЕКА. – Poland, 2015. – Vol. 15, №2. – P. 15–24.

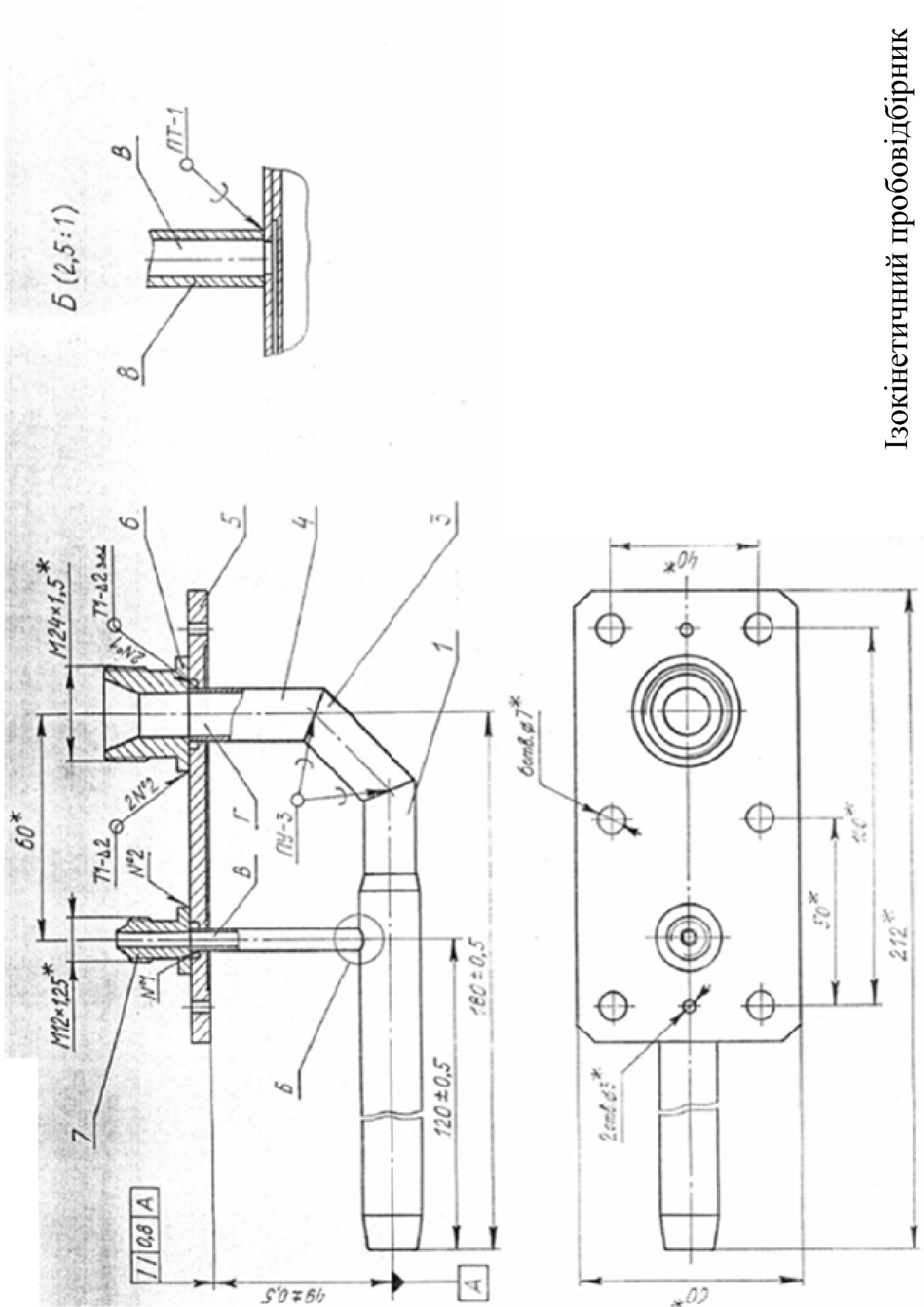
ДОДАТОК

Елементи конструкції мінітунелю МТ-1

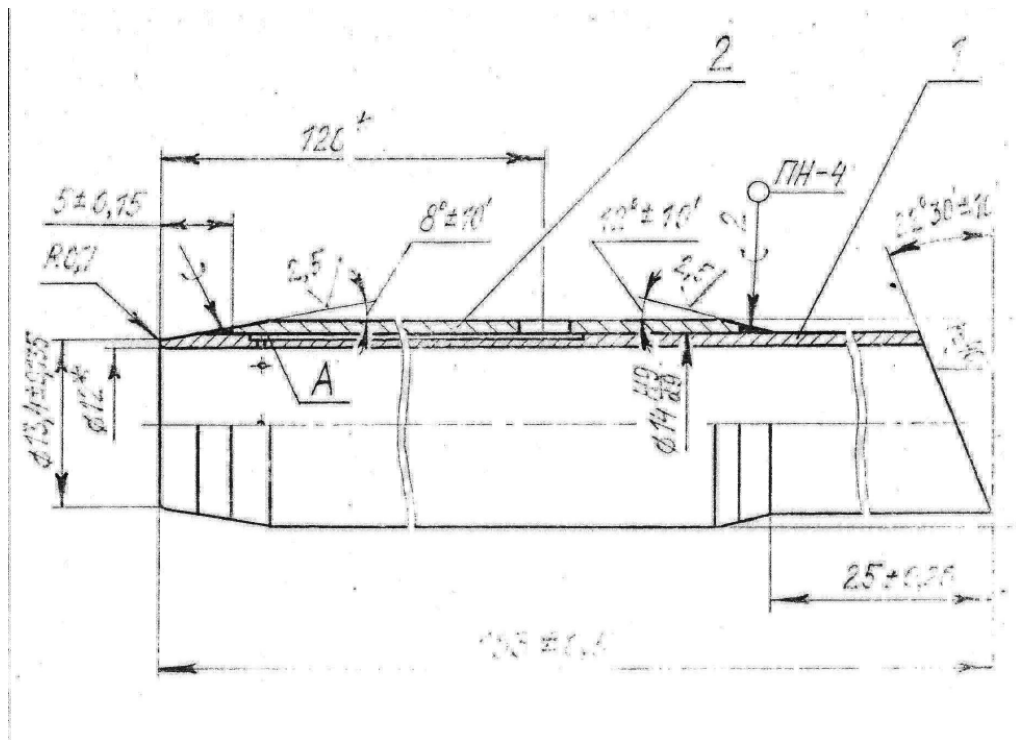


1. Размеры для справок
2. Соприкасающиеся кромки фильтрующих элементов. 2.5 перед склеиванием срезают и зачищают
3. Чехол по 3.1 шить из марки по размерам: лопастей А. После заполнения полости отсортировать концы чехла шить

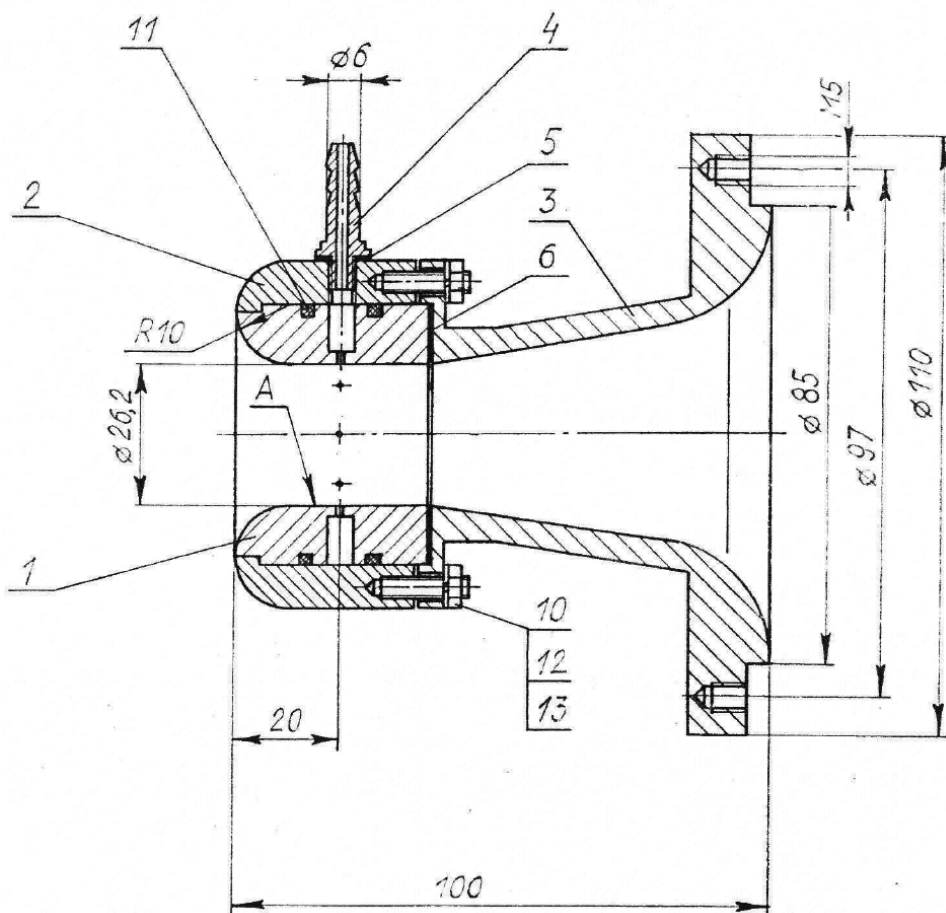
Фільтр розбавляючого повітря



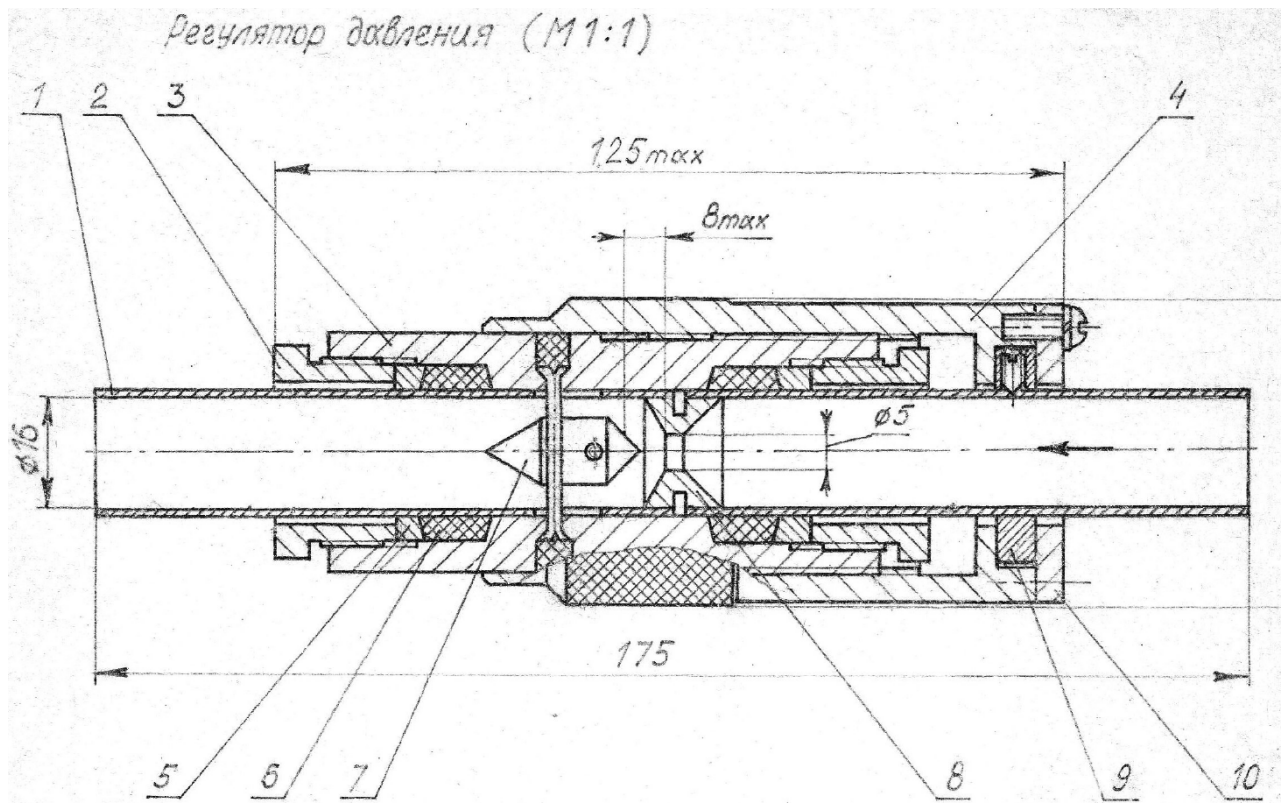
Ізокінетичний пробовідбирник



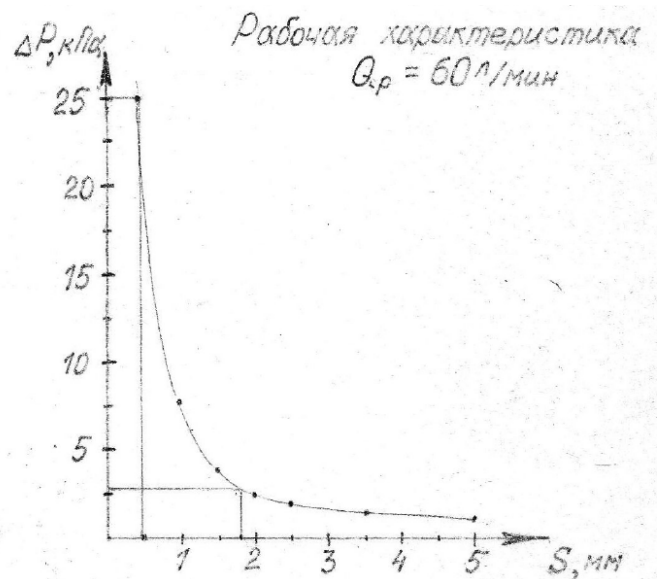
Вхідна частина ізокінетичного пробовідбірника



Вимірювач масової витрати розбавляючого повітря – колектор



1. Трубка
2. Гайка
3. Ползун
4. Оболочка
5. Втулка
6. Сальник
7. Клапан
8. Конфузор
9. Кольцо
10. Крышка



Регулятор тиску в байпасній магістралі лінії відбору проб ТЧ (дросьель) та його регулювальна характеристика

ДЛЯ ПОДАТОК

ДЛЯ НОТАТОК

Навчальне видання

ПОЛИВ'ЯНЧУК Андрій Павлович

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ
КОНТРОЛЮ ВИКИДІВ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК
З ВІДПРАЦЬОВАНИМИ ГАЗАМИ ДИЗЕЛІВ**

Відповідальний за випуск *Осетров О.О.*

В авторській редакції

Комп'ютерна верстка *Журавльової Н.В.*

ВИДАВНИЦТВО

Харківського національного автомобільно-дорожнього університету
Видавництво ХНАДУ, 61002, Харків-МСП, вул. Петровського, 25.
Тел. /факс: (057) 700-38-64; 707-37-03, e-mail: rio@khadi.kharkov.ua

Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики, телебачення
та радіомовлення України про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції, серія № ДК №897 від 17.04 2002 р.

Підписано до друку 22.10.2015 р. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman Суг. Віддруковано на ризографі.
Умовн. друк. арк. 13,75. Обл.-вид арк. 10,0.
Замовлення № 26/01/16. Тираж 300 прим. Ціна договірна.

Віддруковано ПП «Видавничий Будинок «Перлина»
Свідоцтво № 070950 видане Виконавчим Комітетом
Харківської міської Ради 02.03.2006 р.