

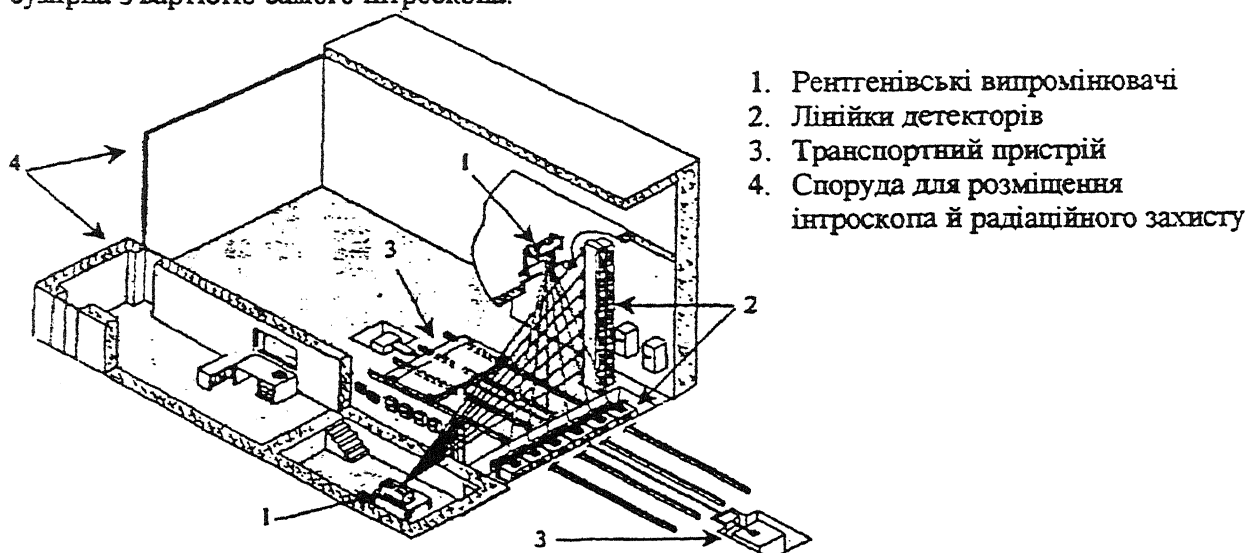
РЕНТГЕНОГРАФІЧНА УСТАНОВКА ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЛЕГКОВОГО І ВАНТАЖНОГО АВТОТРАНСПОРТУ З ПОЛІПШЕНИМИ РАДІАЦІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

У системах митного контролю, заснованих на принципі цифрової радіографії, використовується діапазон енергій 80-140 кеВ (контроль багажу і ручної поклажі) та 6-8 МеВ (контроль автофургонів і контейнерів) [1,14]. Проникна здатність по сталі перших систем становить 20-30 мм, других – 250-300 мм. Щодо захисту персоналу і населення від випромінювання, то в малих апаратах захист є елементом їх конструкції, а для гігантів на прискорювачах треба будувати спорудження, стіни яких у робочій камері досягають 2,5 - 3 м, щоб забезпечити виконання санітарних норм опромінення населення (30 мкР/год) по зовнішньому периметру й у місцях розміщення персоналу.

Інтроскопи для контролю легкових автомобілів і мікроавтобусів займають проміжне положення між двома вище вказаними. Виходячи з того, що 90 % ослаблення потоку рентгенівських променів у сталі для енергій 160 кеВ і 260 кеВ складають відповідно 16 мм і 2,2 мм, а 99 % ослаблення – 32,26 мм і 48,4 мм, відповідно [2], робоча енергія такого “середнього” інтроскопа повинна бути в діапазоні 250 – 400 кеВ, що забезпечить необхідну для малого автотранспорту проникна здатність по сталі 35 – 50 мм [2, 3].

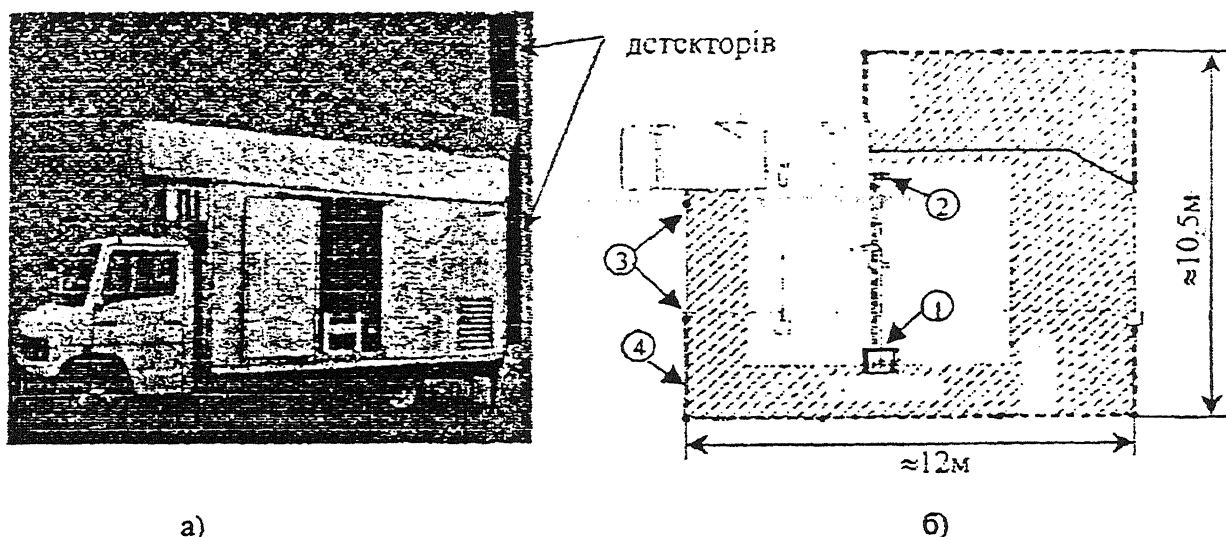
За завданням Державної митної служби України НТЦ РП концерну “Інститут монокристалів” разом із НТ СКБ “Полісвіт” ВО “Комунар” виготовив перший в Україні “середній” інтроскоп “Поліскан-2”. Загальний вигляд його в розрізі поданий на мал.1. Технічні характеристики цього апарата не поступаються закордонним [1,14].

Однією з проблем, що перешкоджають швидкому поширенню апарата є вимога до масивного захисту від радіації. Товщина бетонної стіни (мал.1) у місці падіння прямого пучка рентгенівського випромінювання складає 70 см, а додатковий захист з листового свинцю має вагу близько 20 т. У результаті вартість споруди для розміщення інтроскопа сумірна з вартістю самого інтроскопа.



Мал. 1. Загальний вигляд системи для контролю легкових автомобілів і мікроавтобусів “Поліскан – 2”.

Фірма Heimann – один зі світових лідерів у даній галузі – запропонувала мобільний варіант “середнього” інтроскопа типу Silhouette-Scan (мал.2а) [4,6]. Цей апарат одноракурсний, із горизонтальним ракурсом, і має три принципові особливості, як порівняти зі стаціонарними. Перша - це використання енергії випромінювача до 140 кеВ, тобто не більш ніж в апаратах контролю багажу і ручної поклажі. Друга – лінійка детекторів, стаціонарно встановлена на транспортному засобі – мікроавтобусі, у якому розміщена і вся інша апаратура (мал.2). Третя – немає стаціонарної транспортної системи, а переміщення автомобіля здійснюється спеціальним тягачем (на мал.2 не показаний).



Мал.2. Мобільний інтроскоп для контролю автомобілів Silhouette – Scan
 а) загальний вигляд б) діаграма зони розміщення 1 – рентгенівський випромінювач; 2 – лінійка детекторів; 3 – зона переміщення об'єкта, що інспектується; 4 – межа радіаційної безпеки.

У рекламному проспекті (табл.1) стверджується, що інтроскоп може бути використаний також для контролю важких автофургонів із причепами.

Безсумнівними позитивними якостями апарата є мобільність і брак додаткового захисту населення від радіації. Час розгортання інтроскопа – година. Безпечна відстань від об'єкта опромінення дорівнює 7,5 м (мал.2 б). Проте наші розрахунки показали, що за наведених у табл.1 параметрів випромінювача потужність дози опромінення по периметру в окремих зонах може досягати 1 мбер/год, що більш ніж у 30 разів перевищує припустиму. Для приведення її до санітарних норм достатньо переносної захисної стінки, покритої освинцьованою гумою або спеціальною фарбою (щільність 0,3 г/см², відсотковий вміст: 70-90% PbO, 5-25% Fe₂O₃ і 5-10% CaCO₃), що позначено на кресленні розроблювача (мал.2б) грубими лініями, але не наведено в описі [4,6].

Іншою, більш важливою, хвилю апарата є його низька виявна здатність. Не випадково в технічних параметрах (табл.1) немає проникної здатності по сталі. У загальному описі зазначено, що інтроскоп ефективний для виявлення великогабаритних нелегальних об'єктів (автомобілів) у середині контейнера або автофургону, який задекларовано як порожній.

Надзвичайно актуальним є завдання щодо створення апарата для контролю за автомобілями, який не потребує спеціальних споруджень для захисту від радіації.

Теоретична оцінка можливості створення такого устрою є метою даної роботи. Для її вирішення вихідними обов'язковими вимогами є: 1) рівень радіації по периметру 10м від об'єкта, що інспектується, не повинен перевищувати 0,3мкЗв/год, 2) для досягнення необхідної проникної здатності напруга на випромінювачі має бути до 300 кВ. Параметри, що варіюються: 1) струм рентгенівської трубки; 2) ракурс сканування (горизонтальний, вертикальний); 3) ширина пучка рентгенівського випромінювання; 4) чутливість приймально-перетворювального тракту відповідно до зменшення площі пучка (поз.2, мал.1).

Основним чинником радіаційної небезпеки в процесі роботи є пряме (від рентгенівського випромінювача) і розсіяне (від об'єкта) випромінювання, що визначає товщину радіаційного захисту. Потужність еквівалентної дози (ПЕД) $\dot{H}_T$ гальмового випромінювання відповідно до [7] складає:

$$\dot{H}_T = \frac{\dot{D}_0 \cdot UT \cdot B(x)}{R^2}, \quad (1)$$

де $\dot{D}_0$ -потужність поглиненої дози на відстані 1 м від джерела; $B(x)$ – коефіцієнт ослаблення потужності дози гальмового випромінювання на відстані R від джерела до об'єкта; U, T – коефіцієнти, відповідно до [7] приймаємо рівними 1. ПЕД розсіяного випромінювання $\dot{H}_P$, [7] складає:

$$\dot{H}_P = \frac{\dot{D}_0 \cdot UT \alpha(\theta E_0) \cdot S \cdot \cos(\theta)}{R^2 \cdot R_s}, \quad (2)$$

де $\dot{D}_0 \cdot UT / R^2$ – потужність поглиненої дози випромінювання, яке падає на поверхню, що розсіює, площею S ; R – відстань від джерела до поверхні, що розсіює; R_s – відстань від поверхні, що розсіює, до розрахункової точки на межі радіаційно небезпечної зони; $\alpha(\theta E_0)$ – диференційне дозове альbedo випромінювання, яке падає на поверхню S , що розсіює, під кутом θ до нормалі; E_0 - максимальна енергія прискорених електронів; E_p – нижня межа енергії фотонів розсіяного випромінювання

$$E_p = E_0(1 + 4E_0/mc^2). \quad (3)$$

Розрахунок, проведений відповідно до [5] показує, що при напрузі на трубці 300 кВ і струмі 1 мА, на відстані 1 м від танталової мішені трубки

$$\dot{D}_0 = 389 \text{ бер м}^2/\text{год} \quad (3,89 \text{ Зв/год}) \quad (4)$$

і відповідно до (1) еквівалентна потужність дози гальмового випромінювання на відстані 7м від лінійки в повітряному середовищі

$$\dot{H}_T = 7,94 \text{ бер/год} \quad (0,0794 \text{ Зв/год}), \quad (4a)$$

при цьому нижня межа енергії розсіяного випромінювання відповідно до (3):

$$E_p \approx 9 \text{ ОкеВ} \quad (46)$$

З (4a) випливає, що за горизонтального, відповідно до технічного рішення Silhouette-Scan, розташування лінійки конче потрібний потужний захист від прямого пучка. Тому для технічної реалізації інтроскопа з мінімальним захистом необхідно обрати вертикальний ракурс об'єкта сканування. У цьому випадку природним поглиначем енергії прямого пучка є ґрунт.

Результати розрахунку потужності дози розсіяного випромінювання для параметрів випромінювача 300 кВ, 1 мА, танталова мішень, проведеного відповідно до формули (2), приведені в табл.2, мал.3. Необхідна для безпечної експлуатації приладу відстань R_S , на якій потужність еквівалентної дози від розсіяного випромінювання дорівнює 30 мкбзр/год визначається [2] як:

$$R_S = \sqrt{\frac{\dot{D}_0 \alpha(\theta, E_0) \cos \theta}{\dot{H} R^2}}. \quad (5)$$

Розрахунок показує, що розходження в ПЕД розсіяного випромінювання в напрямку руху об'єкта ($O_1 C_1$) і перпендикулярно до нього ($O_1 B_1$) на відстані 5 м від центру лінійки O_1 не перевищує 10%. На великих відстанях це розходження ще менше, тому в табл.2 приведені тільки відстані до B_1 для різних матеріалів.

Для захисту від прямого випромінювання достатньо використовувати локальний захист на випромінювачі з товщиною свинцевої оболонки до 6 мм.

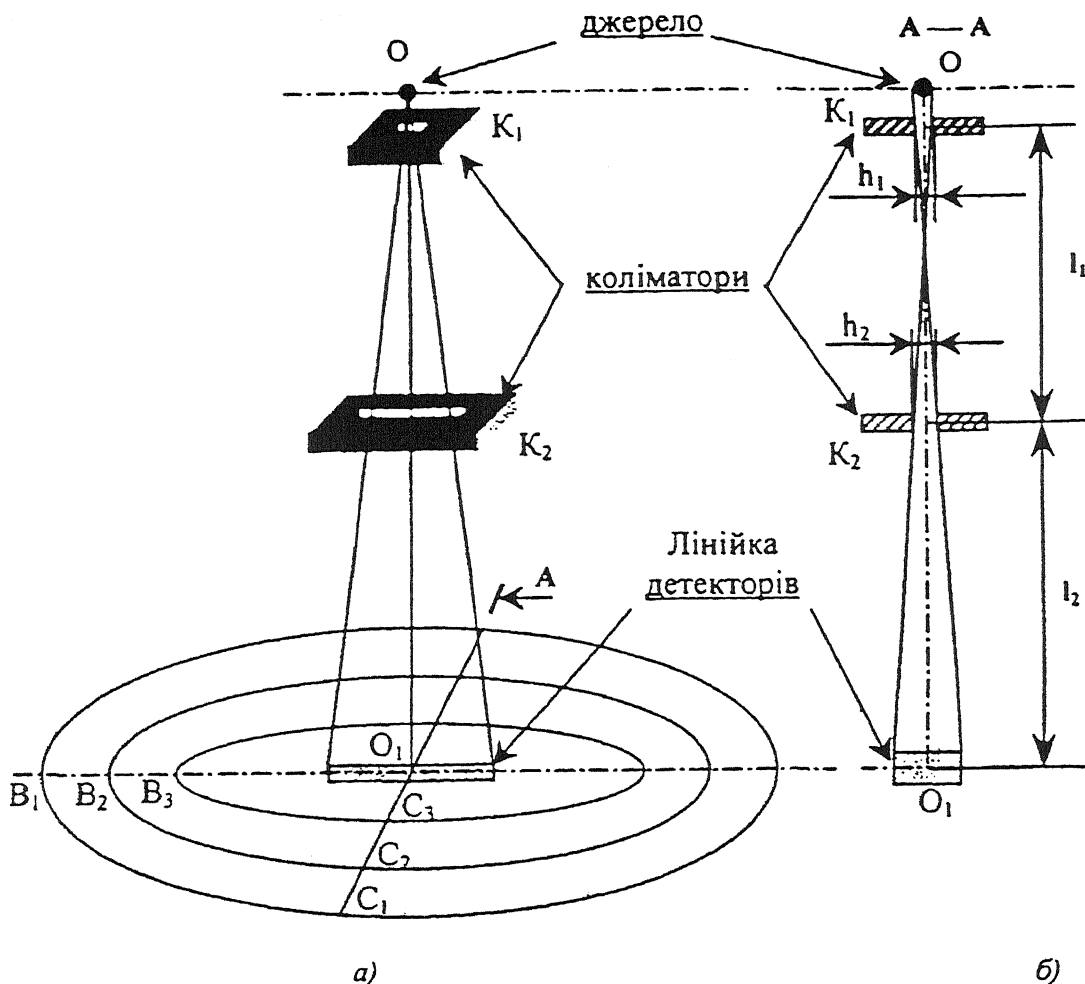
Основним висновком розрахунків, результати яких приведені в табл.2, можна вважати таке: використовуючи напругу на рентгенівському джерелі 300 кВ, можлива безпечна експлуатація рентгенівського інтроскопа для контролю автомобілів без спеціального будинку. Охоронна зона складає біля 10 м від центру лінійки детекторів.

Інтроскоп може бути розміщений у звичайному будинку з фарбуванням стінок, як вказано вище при виконанні таких технічних рішень, що відрізняються від застосованих у "Поліскані-2":

1. Одноракурсне вертикальне сканування.
2. Зменшення апертури опромінення (із 3 см x 400 см до 0,3 см x 400 см).
3. Зменшення струму рентгенівського випромінювача (з 3-5 мА до 1 мА).

Перше рішення не потребує спеціальних технічних засобів, але зменшує рівень відбитка випромінювання в 4 рази за рахунок того, що випромінювання на поверхні землі відбувається на кут 90° , а не 180° .

Друге рішення потребує установки 2-го коліматора (мал.3), максимально наближеного до об'єкта, й не викликає особливих труднощів.



Мал. 3. Діаграма радіаційної обстановки для рентгенівської системи контролю автомобілів із параметрами відповідно до таблиці 2.

Третє рішення з урахуванням двох попередніх поглядів чутливості приймально-перетворювального тракту, вимоги пп. 2 і 3 потребують приблизно на порядок підвищити його чутливість. Аналіз можливості реалізації даного технічного рішення показує таке: виходячи з розрахункових даних – ширина віялового рентгенівського пучка 3 мм на поверхні об'єкта і 9 мм на лінійці детекторів, струм рентгенівської трубки 1 мА, впливає, що в порівнянні із системою "Поліскан - 2" (ширина детектора 10 мм, струм рентгенівської трубки 4 мА) у мобільному інтроскопі корисний сигнал детектора повинен зменшитися в 1,2 рази за рахунок зменшення ширини пучка й у 4 рази за рахунок зменшення струму трубки. Таким чином, для досягнення тієї ж проникної здатності необхідно підвищити чутливість приймально-перетворювального тракту приблизно в 5 разів.

Рішення даної проблеми залежить, у першу чергу, від шумових характеристик детектора, а також від параметрів попереднього підсилювача. У системі "Поліскан-2" застосовані фотодіоди ФД337 площею 1 см² виробництва ОАО "ЦКБ Ритм", м. Чернівці. Вибір даних фотодіодів був зроблений на основі вартості (~20 у.о.) і параметрів, що забезпечують рішення поставленої задачі. Фотодіоди японської фірми Hamamatsu, площею 1 см² коштують ~ 120 USD і перевершують на порядок фотодіоди виробництва ОАО "ЦКБ Ритм" по

темновому струму, проте їхнє застосування призведе до подорожчання системи приблизно на 100 000 у.о.

Альтернативою японським фотодіодам можуть стати фотодіоди Ф1001, розробки НВП "БІТ", м. Київ. З погляду шумових характеристик детектора найбільш важливим параметром є темновий струм фотодіода (табл.3).

Корисний і темновий струми породжують дробовий шум, значення струму дробового шуму можна розрахувати за формулою [8, 9]:

$$i_{ш.др} = 2q(I_T + I_\phi)\Delta f, \quad (6)$$

де I_T - темновий струм; I_ϕ - фото тік; Δf - смуга частот; q - заряд електрона.

Означимо темновий струм, приведений у табл.3, як I_{T_i} де i - порядковий номер, а струм дробового шуму $i_{ш.др}$ і. Тоді при $I_\phi \rightarrow 0$ одержимо відношення:

$$\frac{i_{ш.др.1}}{i_{ш.др.2}} = \frac{I_{T1}}{I_{T2}} = 4 \qquad \frac{i_{ш.др.1}}{i_{ш.др.3}} = \frac{I_{T1}}{I_{T3}} \approx 7,4 \quad (7)$$

З (7) випливає, що застосування фотодіодів Ф1001 дозволяє більш ніж у 7 разів знизити рівень дробового шуму.

Другим визначальним параметром для детектора є його чутливість до рентгенівського випромінювання. Виготовлені на базі фотодіода Ф1001 детектори випробувані з підсилювачами системи "Поліскан-2" і мають у порівнянні з детекторами на базі фотодіода ФД337 у 1,8-2 рази більшу чутливість до рентгенівського випромінювання. Вартість фотодіода Ф1001 у 3-4 рази нижче японських, тому їх використання комерційно виправдане.

У системі "Поліскан-2" використовується попередній підсилювач на базі операційних підсилювачів (ОП) УД284 із вхідним струмом $I_{\text{вх}} \approx 100 \text{ pA}$ і максимальним зсувом напруги по входу $V_{\text{ос}} \leq 100 \text{ mV}$. Застосовуючи сучасні ОП (AD 824В, ОР 482 та інші) із $I_{\text{вх}} \approx 5 \text{ pA}$ і менше, $V_{\text{ос}} \leq 10 \text{ mV}$ можна досягти додаткового зниження темпового струму фотодіодів і шумів ним породжуваних.

Поліпшення характеристик детекторів і попереднього підсилювача призведе до збільшення чутливості приймально-перетворювального тракту більш ніж на порядок. Загальне подорожчання системи за рахунок приймально-перетворювального тракту не перевищить 10% загальної вартості інтроскопу.

Висновки

Існує принципова можливість, розробивши варіант інтроскопа з параметрами, що не поступаються стаціонарному і не потребують дорогого спеціалізованого приміщення, зменшити витрати на систему огляду в цілому. При цьому не виключається створення мобільного варіанта системи огляду, що підвищить ефективність її використання.

Таблиця 1.

Основні характеристики інтроскопа "Silhouette - Scan" фірми Heimann [4]

Розміри об'єкта, що інспектується	Ширина 2,5 м, Висота 4,0 м. Довжина 18 м
Контрастна чутливість	22 рівня сірого видимих на моніторі
Доза опромінення при інспекції	0,015 бер (0,15 мЗв) максимум
Рентгенівський випромінювач:	Напруга 140кВ (160 кВ max.). Струм 1 мА.
Детектори рентгенівського випромінювання	Лінійка детекторів спінтілятор-фотодіод, 4096 каналів
Тип зображення	Чорно-біле, псевдокольорове
Кліматичні умови	+5°C ÷ +40°C
Контроль безпеки	ТВ моніторинг. Світловий бар'єр.

Таблиця 2.

Відстані від центру лінійки детекторів розміром 0,03х4 м², на яких потужність еквівалентної дози становить 30 мбер/год, залежно від матеріалу об'єкта

Енергія випромінювання	Е ₀ =200 кеВ		Е ₀ =300 кеВ	
Площа пучка	0,03х4 м ²	0,003х4 м ²	0,03х4 м ²	0,003х4 м ²
О ₁ В ₁ для алюмінію	27,8 м	9,0 м	35,7 м	13,0 м
О ₁ В ₂ для заліза	24,4 м	7,6 м	31,9 м	11,3 м
О ₁ В ₃ для свинцю	15,5 м	4,9 м	22,6 м	7,1 м

Порівняльні характеристики фотодіодів.

Таблиця 3.

№	Фірма	Темновий струм, Іт, А	Напруга, В
1	"ЦКБ Ритм" ФД337	$1,0 \cdot 10^{-8}$	10
2	Hamamatsu	$5,0 \cdot 10^{-9}$ (макс.)	30
3	НВП "БІТ" Ф 1001	$2,7 \cdot 10^{-9}$ (середн.)	30

Примітки

1. Рижиков В., Свист В., Пашко П., Ополовин О., Гончар С. Пристрої на основі цифрової радіографії для митного контролю // Вісник Академії митної служби України. – 2000. – № 2.
2. Носков Б.М. Ядерная физика. Взаимодействие ядерных излучений с веществами. – Горький, 1972.
3. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. – Справочник по ядерной физике. – Киев, 1975.
4. Heimann Systems. Short Form Catalogue. – Germany, Wesbaden. Heimann System GmbH. – 2000.
5. Санитарные правила размещения и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ № 1858-78.
6. Защита от ионизирующих излучений: В 2 т. /Под ред. Н. Гусева. – М., 1989.
7. Унифицированные правила устройства и безопасной работы радиационно-технологических установок (Унифицированные правила гамма-электрон). – 1988.
8. Бузанова Л.К., Глиberman А.Я. Полупроводниковые фотоприемники. – М., 1976. – Вып. 902.
9. Робинсон Ф.Н.Х. Шумы и флуктуации в электронных схемах и цепях. – М., 1980.



М. Прялін

**ВІДХИЛЕННЯ ВІД НОРМАЛЬНОГО ХОДУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І
ВПЛИВ УНІФІКАЦІЇ НА ЇХ СКОРОЧЕННЯ**

У процесі виготовлення виробів машинобудування постійно здійснюються роботи щодо удосконалення конструкції з метою підвищення якості та конкурентноспроможності продукції. Їх виконання призводить до внесення змін у конструкторську та технологічну документацію. Серед причин які обумовлюють зміни технологічної документації можна виділити такі: впровадження та зміни стандартів; зміни конструкторської документації; удосконалення технології; зміни маршруту виготовлення складових частин конструкції; зміни оснащення в процесі виготовлення виробів; усунення помилок конструктора; усунення помилок технолога; інші причини. Кількість відхилень від нормального ходу технологічного процесу за наведеними причинами та їх питома вага для чотирьох виробів машинобудування наведені в табл. 1.

У всіх чотирьох конструкціях більше всього змін технологічної документації обумовлено змінами конструкторської документації та удосконаленням технології. За даними таблиці 1 сума відхилень з цих причин знаходиться в межах від 45 до 62 %. Зміни технологічної документації призводять до відповідних відхилень від нормального ходу технологічних процесів. Середня кількість цих відхилень, яка припадає на одну зміну технологічної документації для різних років знаходження конструкцій у виробництві, наведена в табл. 2. Одночасно наводиться динаміка середньої кількості цих відхилень у порівнянні з першим роком виготовлення виробів.