

## МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ АЕРОЗОЛІВ У ПРОЦЕСІ ДУГОВОГО РУЧНОГО ЗВАРЮВАННЯ ПРИ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТА БУДІВНИЦТВІ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВІДІВ

<sup>1</sup>Я.В. Куровець, <sup>2</sup>Я.М. Семчук, <sup>2</sup>В.С. Борин

<sup>1</sup> Івано-Франківське управління філії ВРТП «Укргазенергосервіс» ДК «Укртрансгаз», 76000, м. Тисмениця, вул. Галицька, 91; тел. (0342)552758; e-mail: VRTPIV@ITSIV.ua

<sup>2</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42196, e-mail: bzhd@ac.nung.edu.ua

*Проведено стислий аналіз стану газотранспортної системи України.*

*Показано, що будівництво і реконструкція компресорних станцій вимагає великого об'єму зварювальних робіт.*

*Наведені результати валових виділень шкідливих речовин у процесі зварювання та газовому і плазмовому різанні різних матеріалів при будівництві компресорної станції «Тарутине».*

*Для видалення шкідливих речовин із виробничих приміщень під час електрозварювальних робіт – наведені розрахункові повітрообміни.*

*Досліджено процес дифузії зварювального аерозолю у поєднанні з поширенням тепла під впливом конвективних потоків повітря у приміщенні компресорної станції шляхом математичного моделювання.*

*Моделювання проведено методом кінцевих елементів у середовищі CONSOL з відповідними граничними та початковими умовами.*

**Ключові слова:** моделювання, аерозоль, зварювання.

*Проведен сжатый анализ состояния газотранспортной системы Украины.*

*Показано, что строительство и реконструкция компрессорных станций требует большого объема сварочных работ.*

*Приведены результаты валовых выделений вредных веществ в процессе сварки при газовой и плазменной резки разных материалов в процессе строительстве компрессорной станции «Тарутине».*

*Для удаления вредных веществ из производственных помещений во время электрозварювальних работ – приведены расчетные воздухообмены.*

*Исследовано процесс диффузии сварочного аэрозолю в сочетании с распространением тепла под воздействием конвективных потоков воздуха в помещении компрессорной станции путем математического моделирования.*

*Моделирование проведено методом конечных элементов в среде CONSOL с соответствующими предельными и начальными условиями.*

**Ключевые слова:** моделирование, аэрозоль, сварка.

*The brief analysis of the condition of the Ukraine gas-transport system has been conducted.*

*It was shown that building and reconstruction of the compressor stations require high volume of welding operations.*

*Stated are the results of gross harmful substances emission in the process of welding under gas and plasma cutting different materials in building the compressor station «Tarutyne».*

*To remove harmful substances from production floor areas during welding works – the calculations of air exchange were given.*

*Investigated is the process of diffusion the welding aerosol in combination with distribution of heat under the influence of convection air streams inside the compressor station by mathematical modeling.*

*Modeling is conducted using the method of eventual elements in the CONSOL environment with the proper maximum and initial terms.*

**Keywords:** modelling, aerosol, welding.

**Постановка проблеми, актуальність та доцільність досліджень.** Газотранспортна система України складається з близько 36.6 тис. км газопроводів, 71 компресорної станції, 108 компресорних цехів, оснащених 692-ма газоперекачувальними агрегатами вітчизняного та закордонного виробництва.

Аналіз стану парку газоперекачувальних агрегатів свідчить, що майже 16% агрегатів, які експлуатуються на компресорних станціях відробили свій моторесурс, до 50% – морально застаріли, фізично зношені, тобто не відповідають вимогам надійності, економічної й екологі-

чної безпеки. З цією метою у ДК «Укртрансгаз» розроблено та впроваджуються програми реконструкції компресорних станцій, лінійної частини газотранспортної системи, газорозподільних і газовимірювальних станцій, що вимагає проведення значного об'єму зварювальних робіт, а саме, електродугового зварювання. Цей процес характеризується виділенням шкідливих та небезпечних середників, що є причиною типових професійних захворювань, де широко застосовується електродугове зварювання, значно вищий, ніж в інших галузях промисловості.

Серед усього комплексу шкідливих та небезпечних чинників, притаманних зварювальному процесу, найбільшу загрозу здоров'ю зварювальників наносить зварювальний аерозоль, від якого, зварювальники досі недостатньо захищені.

У процесі зварювання нагріті до високої температури, і тому легші за навколишнє повітря, пари металу, компонентів електродного покриття або інших зварювальних матеріалів підносяться над місцем зварювання і, потрапляючи до зони температур одного порядку з навколишнім повітрям, швидко конденсуються і тверднуть. Утворюється тверда фаза «частини зварювального пилу – аерозоль конденсації». Більшість частинок зварювального аерозолю (близько 90%) розміром до 5 мкм; решта – розміром десяти і соті частки мікрона. Через низку обставин, зокрема протилегність зарядів частинок, спостерігається процес їх агрегації, тобто об'єднання.

Механізм поширення зварювального аерозолю в об'ємі виробничого приміщення вимагає спеціального розгляду, оскільки вирішення проблеми вентиляції безпосередньо залежить від оцінки характеру розповсюдження шкідливих домішок в повітрі виробничого приміщення.

Дослідження умов праці зварювальників, гігієнічної оцінки електродів, відбір проб забрудненого повітря проводилося у цехах та ділянках компресорної станції «Гарутине» в Одеській області. Під час її спорудження застосовувалося здебільшого, ручне дугове зварювання (близько тисячі стиків).

**Аналіз літературних джерел.** У літературі зустрічаються доволі багато підходів до оцінювання закономірності утворення зварювальних аерозолів при дуговому зварюванні та розглядається закономірність їх впливу на організм людини (роботи О.Г. Левченко [1, 2], В.Ф. Демченка [3] тощо). Механізм поширення зварювального аерозолю в об'ємі виробничого приміщення описаний у наукових працях В.М. Ельгермана [4, 5], Ю.О. Полукарова [6], причому у машинобудівній промисловості. Моделювання поширення зварювального аерозолю у приміщеннях компресорних станцій магістральних газопроводів, де застосовують різні види зварювання, матеріали, електроди при різних крайностях повітрообміну у літературних джерелах висвітлено ще недостатньо.

**Мета.** Дослідити механізм поширення зварювального аерозолю у закритих виробничих приміщеннях з використанням вентиляційних систем.

**Виклад основного матеріалу.** Концентрації зварювального аерозолю (ЗА) у закритому приміщенні визначається функціонально залежністю від інтенсивності його утворення, умов зварювання та вентиляції. У роботі [4] розроблено удосконалену методику розрахунку концентрації шкідливих речовин у зоні дихання

зварювальника, виходячи із даних про інтенсивність утворення зварювального аерозолю. Зокрема вказано, що концентрація сполук хрому у складі зварювального аерозолю (ЗА) не залежить від вмісту хрому в основному металі, а концентрація марганцю – залежить і зростає на 10...15% зі збільшенням його вмісту в наплавленому металі від 0,6 до 34%. При цьому, збільшення в основному металі вмісту хрому призводить до зменшення рівня виділень ЗА приблизно на 20%, практично не змінюючи токсичність ЗА. Збільшення в основному металі вмісту марганцю підвищує як рівень виділення, так і токсичність ЗА приблизно в 1,5 рази. На основі даних досліджень автори в [2] вказують, що концентрація у складі ЗА марганцю, хрому й нікелю визначається, насамперед, вмістом цих елементів в електродному металі, а також пружністю їх парів за температур, характерних для стадії точки розплавленого металу. Це дало підстави стверджувати, що рівень виділень ЗА залежить не тільки від потужності (напруги) зварювальної дуги, але й від вмісту в основному металі марганцю, що має найбільш високу пружність парів за температур зварювальної ванни. При цьому, пари марганцю над зварювальною ванною створюють розсіювальну дію на продукти плавлення й випаровування електродного матеріалу.

Авторами статті під час будівництва компресорної станції «Гарутине» у 1997–2000 рр. проведено заміри шкідливих речовин у ході проведення різних видів зварювальних робіт (рис. 1). Кількість шкідливих речовин, що виділяється при зварюванні різних металів, представлено в табл. 1, а кількість виділення шкідливих речовин при газовому і плазмовому різанні металів – у табл. 2. Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони зварювальних цехів зведено до табл. 3.

Встановлено, що інтенсивність виділень ЗА залежить від характеристики процесу, марки зварювальних матеріалів. При цьому визначальний вплив належить складу зварювального металу. ЗА містять сполуки заліза, марганцю, нікелю, хрому, алюмінію, міді і інших речовин, а також газу (оксиди азоту, озон, фтористий водень).

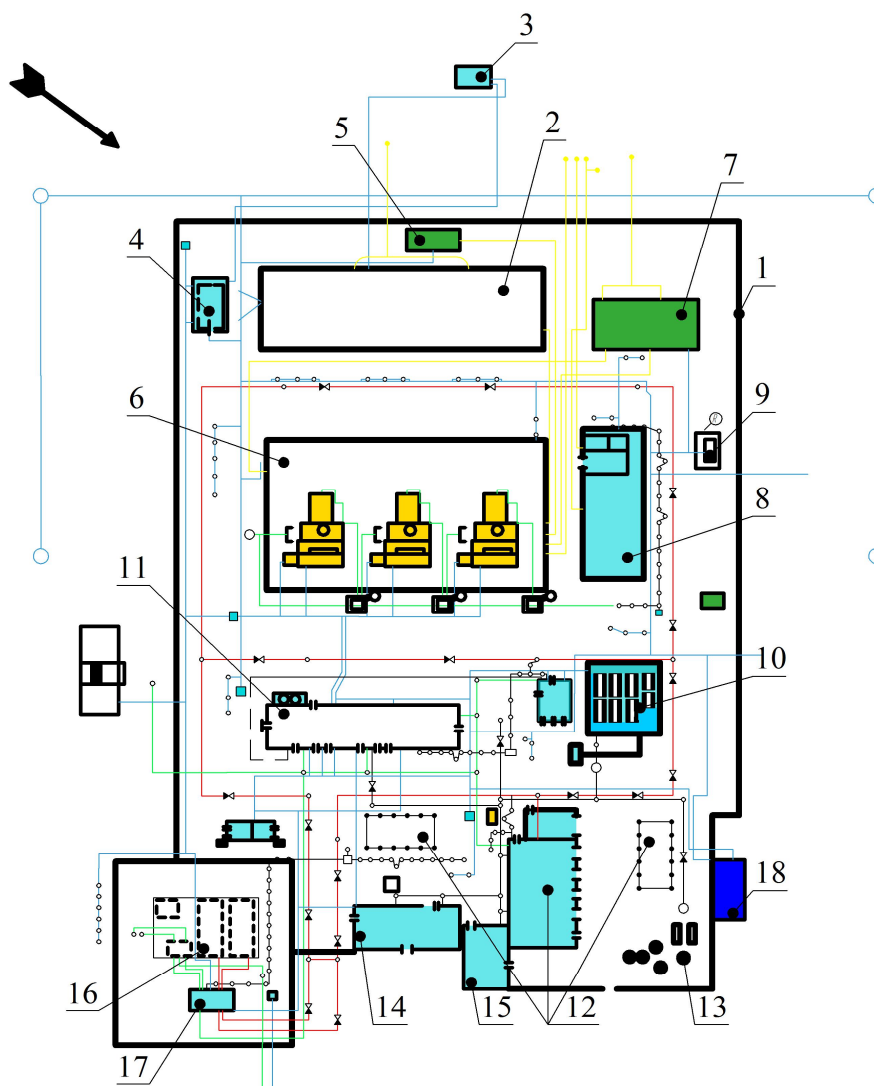
При розрахунку вентиляції було прийнято середні годинні витрати зварювальних матеріалів: для ручного зварювання штучними електродами – до 1,0 кг, механізованого зварювання – 2 кг, автоматичного зварювання – 4 кг.

Загалом, розрахунок повітрообміну за умови виділення шкідливих речовин виконують за формулою:

$$L_в = \frac{G_{сп}}{q_{ГДК} - q_{П}}, \quad (1)$$

де:  $L_в$  - кількість припливного повітря або повітря що видаляється залежно від прийнятої схеми механічної вентиляції,  $м^3/с$ ,

$G_{сп}$  – кількість шкідливих речовин, що виділяються у виробничому приміщенні,  $мг/с$ ,



1 – огорожа; 2 – апарат повітряного охолодження газу (АПО); 3 – вузол заміру перекачуваного газу «Анубар»; 4 – трансформаторна підстанція ТП АПО газу; 5 - вузол цехових кранів обв'язки; 6 – газоперекачувальні агрегати ГПА типу Ц-16; 7 – пиловловлювачі; 8 – блок підготовки наливного та пускового газу; 9 – ємкість збору конденсату; 10 – склад паливно-мастильних матеріалів; 11 – диспетчерська; 12 – гаражі; 13 – біоочищення стоків; 14 – адмінкорпус; 15 – їдальня; 16 – пожежні та господарські резервуари води; 17 – автоматизовані насосні установки АНПУ перекачування води; 18 – підстанція ліній ЛЕП

Рисунок 1 – План комунікацій ГКС «Тартинне»

$q_{ГДК}$  – гранично допустима концентрація шкідливих речовин в приміщенні,  $мг/м^3$  (Визначається за ГОСТ 12.1005-88 ССБТ “Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны”).

$q_{п}$  – концентрація шкідливих речовин в навколишньому повітрі, що подається в приміщення,  $мг/м^3$  виражається за формулою:

$$g_{п} = 0.3 \cdot g_{ГДК} \quad (2)$$

За умови одночасного виділення у повітря робочої зони кількох шкідливих речовин, розрахунки ведуть за тією шкідливою речовиною, для якої необхідне подання чистого повітря у якомога більшій кількості.

Розрахунок повітрообміну у зварювальних цехах проводять за питомим розрахунковим повітрообміном у залежності від зварюваних та

зварювальних матеріалів для різних видів зварювання та теплового різання:

$$L = L_p \cdot q \cdot m + \dots + L_p^n \cdot q^n \cdot m^n \quad (3)$$

де:  $L_p$  – розрахунковий повітрообмін,  $м^3$  на 1 кг витраченого зварювального матеріалу.

$q$  – витрата зварювального матеріалу,  $кг/год$ , яку приймають за даними технологічного процесу для одного зварювального;

$m$  – кількість зварювальних постів;

$n$  – вид зварювання.

З метою розрахунку потрібного повітрообміну для розбавлення шкідливих газів та аерозолів до ГДК приймають кількість припливного повітря за тією шкідливою речовиною, яка вимагає найбільших об'ємів (визначаючи шкідлива речовина) (табл. 4).

Таблиця 1 – Валові виділення шкідливих речовин в процесі зварювання різних матеріалів у ході будівництва компресорної станції «Тарутине»

Спосіб зварювання	Марка зварювального матеріалу	Виділення забруднювача, г/кг зварювального матеріалу					
		аерозоль	сполуки марганцю	оксид хрому	оксид фтористого водню	оксид азоту	оксид вуглецю
Ручне дугове зварювання сталей електродами	УОНИ-13/55	17,0	0,80	-	0,86	-	-
	УОНИ-13/65	6,3	1,21	-	1,20	-	-
	АНО-4	5,8	0,59	-	-	-	-
	АНО-6	17,5	1,41	-	-	-	-
	АНО-11	20,8	0,71	-	-	-	-
	ЭА-606/11	10,3	0,67	0,5	0,3	1,2	1,3
	МЗЗ-III	35	-	-	-	-	-
Ручне дугове зварювання міді	ЦТ-15	7,1	0,53	0,30	1,55	-	-
	ЩЗЧ-1	13,0	0,37	-	1,60	-	-
Ручне дугове зварювання алюмінію	СрМ-0,75 (дріт)	16,3	0,47	-	-	-	-
	ОЗА-1	36,9	-	-	-	-	-
Ручне дугове зварювання різних марок металів	ЭП-245 (дріт)	11,9	0,40	-	0,30	-	-
	ПП-106, ПП-108 (дріт)	11	0,6	-	-	0,8	-
	СВ-16Х16Н2 5 Мб (дріт)	13	3	2	-	-	-
	ЭП-245 (дріт)	10,9	0,45	-	-	-	2,9
	СВ-08ХГН2МТ (дріт)	7,1	-	0,03	-	0,7	10
	МНЖ-КГ5-1-02-0.2 (дріт)	17	0,4	-	-	-	-
	КМЦ (дріт)	8,1	0,5	-	-	-	-
	Д-20 (дріт)	11,0	0,08	-	-	-	-
	АМЦ (дріт)	21,0	0,57	-	-	2,30	-
	АМГ-6Т (дріт)	45	0,70	-	-	0,30	-
	Алюмінієва(дріт)	5	-	-	-	0,8	-
	Титанова (дріт)	10,0	-	-	-	-	-
	Неплавкі електроди	51,0	-	-	-	-	-
ОЗА-2/ак, ОЗА-1 (дріт)	40,1	-	-	-	-	-	
Зварювання сталі з флюсами	ОСП-45	0,08	0,02	-	0,1	0,001	-
	ФЦ-2, ФЦ-6, ФЦ-7	0,09	0,01	-	0,06	0,002	-
	ФЦ-11, ФЦ-12	0,07	0,06	-	0,02	-	-
	АН-22	0,11	0,01	-	0,03	-	-
	АН-26, АН-30, АН-42	0,07	0,05	-	0,04	-	-
	АН-60, АН-64	0,08	0,02	-	-	-	-
	АН-348А	0,1	0,03	-	0,2	0,007	-
	ЖС-450	60	0,134	-	0,17	-	21,9
	К-1	0,04	0,022	-	0,14	-	0,5
	К-8	48	-	-	0,15	-	18,0
К-11	1,2	0,088	-	0,10	0,6	-	

Таблиця 2 – Виділення шкідливих речовин при газовому і плазмовому різанні металів у ході будівництва компресорної станції «Гарутине»

Вид різання	Товщина металу	Вид забруднювачів і їх вміст													
		Аерозоль		Mg		Cr		Ni		Al		CO		NO <sub>x</sub>	
		г/м	г/год	г/м	г/год	г/м	г/год	г/м	г/год	г/м	г/год	г/м	г/год	г/м	г/год
Газове різання вуглецевої сталі	5 мм	2,24	65	0,06	1,7							1,3	48	1,1	35
	10 мм	4,3	120	0,17	3,7							2,4	6,9	2,1	60
	20 мм	8	190	0,25	5							2,2	59	2,0	-
Газове різання легованої сталі	5 мм	2,4	70			0,11	5					1,2	40	-	30
	10 мм	6	140			0,22	5,8					1,5	50	1,4	46
	20 мм	8	200			0,45	9,8					2,5	56	3	49
Газове різання марганцевистої сталі	5 мм	2,4	90	0,6	18							1,3	50	1,2	30
	10 мм	4	130	1,3	30							3	60	1,5	41
	20 мм	9	210	2,3	50							2,4	50	2,1	52
Газове різання сплавів титану	4 мм	6	120							4,5	120	0,7	19	0,4	7
	12 мм	16	318							12	260	1,7	30	0,5	14
	20 мм	20	370							20	340	2,3	37	-	18
	30 мм	30	340							30	330	2,4	39	1,4	-
Плазмове різання вуглецевої сталі	10 мм	45	750	0,09	20							1,0	-	6	-
Плазмове різання низьколегованої сталі	14 мм	5	740	0,17	23							3,0	270	8	-
	20 мм	15	900	0,2	35							3,5	290	16	-
Плазмове різання легованої сталі	5 мм	4	890			0,12	51					1,5	-	6	200
	10 мм	6	1260			0,12	60					1,9	-	10	-
	20 мм	10	1500			0,60	78					2,1	-	13	-
Плазмове різання марганцевистої сталі	5 мм	3,7	780	0,64	1,52							1,5	-	8	140
	10 мм	5,8	800	1,20	1,60							2,8	300	12	-
	20 мм	9,7	950	1,80	150							2,6	-	15	-

Таблиця 3 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони зварювальних цехів

Найменування речовини	ГДК <sub>з</sub> мг/м <sup>3</sup>	Клас небезпеки	Агрегатний стан (а - аерозоль, п - пари)	Примітка
вміст марганцю у зварювальних аерозолях, мас. %				
до 20	0,20	2	а	
до 20-30	0,10	2	а	
хромати, біхромати	0,01	1	а	у перерахунку на CrO <sub>3</sub>
оксид хрому (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,00	2	а	
нікель і його оксиди	0,05	1	а	у перерахунку
оксид цинку	0,50	2	а	
титан і його двоокис	10,00	4	а	
алюміній і його сплави	2,00	2	а	по Al
мідь металева	1,00	2	а	
вольфрам	6,00	3	а	
двоокис кремнію аморфний у вигляді аерозолу конденсації за змісту від 10 до 60 %	2,00	4	а	
двоокис азоту	2,00	2	п	
озон	0,10	1	п	
оксид вуглецю	20,00	4	п	
фтористий водень	0,05	1	п	
солі фтористоводневої кислоти:				
добре розчинні (NaF, KF)	0,20	2	а	по HF
погано розчинні (AlF <sub>3</sub> , NaAlF <sub>6</sub> )	0,50	2	а	по HF

**Таблиця 4 – Розрахункові (питомі) повітрообміни при проектуванні загальнообмінної вентиляції під час електрозварювальних та газорізальних робіт на компресорній станції «Тарутине»**

Технологічні операції	Зварювальні матеріали	Розрахунковий повітрообмін, м <sup>3</sup>	
		виробничих приміщень	відкритих приміщень
Ручне зварювання електродами з товстим покриттям	УОНИ-13/45, УОНИ-13/55 ЭА-606/11, ЭА-981/15 ЭА-48М/18 ЭА-395/9 АНО-3, АНО-4	на 1 кг витрачених електродів	
		7000	3500
		10000	5000
		5000	4000
		9000	4500
Напівавтоматичне зварювання у середовищі СО <sub>2</sub>	Св-08Г2С I <sub>св</sub> = 200А Св208Г2С I <sub>св</sub> = 350 – 450А дріт Св-08 19Н11Ф2С2 Св-08Г6Х16Н25М6	на 1 кг витраченого зварювального дроту	
		4000	2000
		7000	3500
		12000	6000

**Таблиця 5 – Коефіцієнти рівняння дифузії, які входять до складу моделі**

Коефіцієнт	Змінна	Пояснення
$\delta_{ts}$	$Dts\_c$	Коефіцієнт масштабування за часом
$D$	$D\_c$	Коефіцієнт дифузії, тензор коефіцієнта дифузії
$D_{ij}$	$Dx_i x_j\_c$	Тензор коефіцієнта дифузії, $x_i, x_j$ компонент
$R$	$R\_c$	Швидкість реакції утворення абразиву при зварюванні

Для дослідження процесу дифузії зварювального аерозолу застосовано моделювання методом кінцевих елементів у середовищі COMSOL. Теплопередача є дифузійним процесом, тому узагальнене рівняння дифузії має такий самий вигляд, як і рівняння теплопровідності. Дифузія розраховується згідно з рівнянням:

$$\delta_{ts} \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla c) = R, \quad (4)$$

де:  $c$  – концентрація аерозолу;  
 $D$  – коефіцієнт дифузії аерозолу;  
 $R$  – швидкість реакції (процесу) утворення аерозолу в процесі зварювання. Дифузійний процес може бути анізотропним, в цьому випадку  $D$  є тензором.

Установки моделі у вікні параметрів моделі (subdomain).

Коефіцієнти рівняння дифузії, які входять до складу моделі і вводяться у вікні sumdomain, наведені в таблиці 5.

Коефіцієнт масштабування за часом дорівнює, як правило, 1. За необхідності можна змінити масштаб за часом (наприклад, від секунд до хвилин шляхом присвоєння йому значення 1/60).

Коефіцієнт дифузії  $D$  є властивістю середовища і описує дифузійну провідність середовища, де поширюється зварювальний аерозоль, або, іншими словами, залежність між градієн-

том концентрації аерозолу та потоком маси аерозолу (або масовою витратою аерозолу).

Швидкість реакції утворення аерозолу визначає об'ємну концентрацію формування аерозольної маси. Швидкість реакції може бути нелінійною.

Ми визначаємо коефіцієнти рівняння у діалоговому вікні Subdomain Settings (рис. 2).

Для 2D- чи 3D-рівнянь необхідно звернути особливу увагу на ізотропний коефіцієнт дифузії  $D$ . При виборі цього коефіцієнту, задаються діагональні значення тензора коефіцієнта дифузії, так що,  $Dx_i x_j$  є еквівалентним  $D$ .

Граничні умови існують трьох різних типів. Так звана гранична умова концентрації встановлюється на вертикальній або горизонтальній границі поля об'єкта моделювання, де утворюється аерозоль, записується як :

$$c = c_0,$$

де  $c_0$  – є даною концентрацією аерозолу що виділяється при зварюванні.

Якщо працює вентиляція, то права вертикальна границя об'єкта (рис. ) встановлюється у відповідності до

$$(-D \nabla c) \cdot \vec{n} = k_m (c - c_1), \quad (5)$$

де:  $k_m$  – коефіцієнт переносу маси (м/с);  
 $c_1$  – концентрація за межами приміщення компресорної.

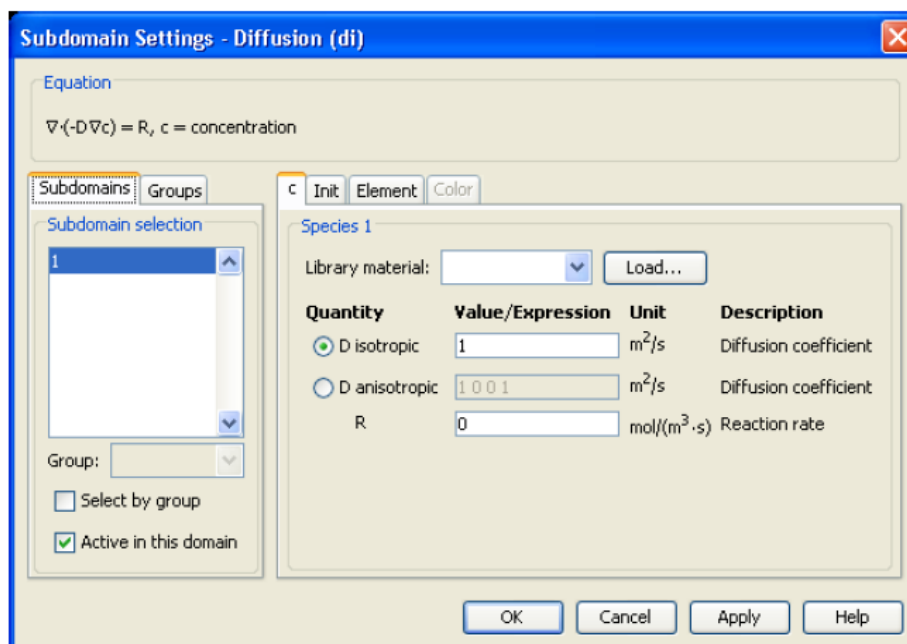


Рисунок 2 – Діалогове вікно Subdomain Settings

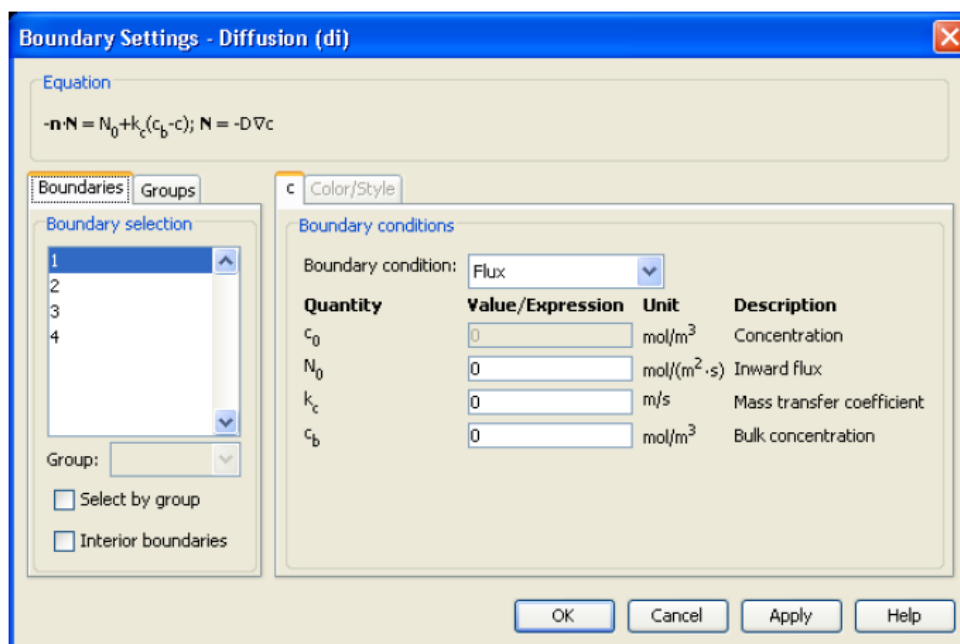


Рисунок 3 – Діалогове вікно Установка граничних умов

Всі інші границі є ізолюючими границями у відповідності до:

$$(-D\nabla c) \cdot \vec{n} = 0. \quad (6)$$

Початкова умова задається дзвоноподібним профілем вздовж x-осі з їх максимумом в  $x=0$  і відповідністю значення  $c=c_0$  в  $x$ :

$$c(t_0) = c_0 \exp(-ax^2). \quad (7)$$

Розв'язок є значенням концентрації аерозолі. Коефіцієнт дифузії встановлюється в  $1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ . Граничні умови приведено в табл. 6.

Зауважимо, що концентрація в рівнянні для граничних умов концентрації  $c_0$  є вхідним заданим значенням.

У рівнянні для режиму потоку,  $k_c$  – визначає коефіцієнт масообміну,  $c_b$  – є об'ємною концентрацією, і  $N_0$  – довільне значення виходу потоку.

Граничні умови вказуються у спеціальному діалоговому вікні Установка граничних умов, яке зображено на рис. 3.

Змінні моделювання. У процесі моделювання дифузії використовує вирази і коефіцієнти для граничних умов, рівнянь та цілей заключного опрацювання (табл. 7).

Буква  $V$  в колонці типу визначає що величина векторна,  $S$  – скалярна.

Таблиця 6 – Граничні умови моделі дифузії

Граничні умови	Пояснення
$c = c_0$	Концентрація
$-\vec{n} \cdot (-D\nabla c) = N_0 + k_c(c_b - c)$	Потік
$\vec{n} \cdot (-D\nabla c) = 0$	Ізоляція/Симетричність
$\vec{n} \cdot (N_1 - D_2) = \frac{D}{d}(c_1 - c_2)$	Тонкий граничний шар
$\vec{n} \cdot (-D\nabla c) = 0$	Осесиметричність

Таблиця 7 – Параметри при моделюванні дифузії

Назва	Тип	Пояснення	Вираз
c	S/B	Концентрація	c
grad_c, cx <sub>i</sub>	S/V	Гرادієнт концентрації	$ c , \frac{\partial c}{\partial x_i}$
dflux_c	S	Дифузійний потік	$ D\nabla c $
ndflux_c	B	Нормальний дифузійний потік	$\vec{n} \cdot (-D\nabla c)$
dflux_c_x <sub>i</sub>	V	Дифузійний потік, x <sub>i</sub> компонент	$\sum_j -D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j}$
Dts_c	S	Коефіцієнт масштабування часу	$\delta_{ts}$
D_c, Dx <sub>i</sub> x <sub>j</sub> _c	S	Коефіцієнт дифузії	D, D <sub>ij</sub>
1	2	3	4
R_c	S	Швидкість реакції	R
N_c	B	Внутрішній дифузійний потік	N <sub>0</sub>
kc_c	B	Коефіцієнт масопередачі	k <sub>c</sub>
cb_c	B	Об'ємна концентрація	c <sub>b</sub>
c0_c	B	Концентрація (початкова)	c <sub>0</sub>

З метою формування комплектних найменувань змінних моделювання до останніх додається суфікс, що складається із символу підкреслювання і назви режиму моделювання (за замовчуванням di), наприклад, dflux\_d di. (Це не застосовується до залежної змінної для концентрації).

Моделювання поєднання конвекції та дифузії. Цей режим моделює найбільш загальний тип перенесення в хімічних системах: перенесення конвекцією та дифузиею. Ми можемо моделювати перенесення конвекцією та дифузиею в 1D, 2D та 3D, а також в осесиметричних системах в 1D та 2D. Залежною змінною в режимі застосування є масова концентрація, c.

Рівняння моделі в часткових похідних

Рівняння для нестационарного та стаціонарного формулювання для категорій, c, c: нестационарним

$$\delta_{ts} \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (-D\nabla c) = R - \vec{u} \cdot \nabla c; \quad (8)$$

стаціонарним

$$\delta_{ts} \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (-D\nabla c + c\vec{u}) = R. \quad (9)$$

В *COMSOL Multiphysics* за замовчуванням застосовується нестационарне формулювання рівняння для типів адвекції та дифузії, в програмному забезпеченні прийнято нестискуваний потік. Тому складова  $c\nabla \cdot \vec{u}$  дорівнює нулю і відкидається з нестационарного формулювання. Це призводить до того, що в полі потоку, де не повністю виконується обмежуюча умова нестискуваності, тобто  $\nabla \cdot \vec{u} = 0$ , складова рівняння зумовлена нефі зичним джерелом не заявляється. Для стаціонарного аналізу термін з похідною за часом відкидається.

Установки моделі у вікні параметрів моделі (subdomain). Коефіцієнти рівняння дифузії, які входять до складу моделі, і вводяться у вікні sumdomain (табл. 8).

Коефіцієнт масштабування за часом дорівнює, як правило, 1. За необхідності існує можливість змінити масштаб за часом, наприклад, від секунд до хвилин шляхом присвоєння йому значення 1/60.

Коефіцієнт дифузії D є властивістю середовища і описує дифузійну провідність середовища де поширюється зварювальний аерозоль, або, іншими словами, залежність між градієнтом концентрації аерозолу та потоком маси аерозолу (або масовою витратою аерозолу).



Таблиця 8 – Коефіцієнти рівняння конвекції та дифузії, які входять до складу моделі

Коефіцієнт	Змінна	Пояснення
$\delta_{ts}$	$Dts\_c$	Коефіцієнт масштабування за часом
$D$	$D\_c$	Коефіцієнт дифузії, тензор коефіцієнта дифузії
$D_{ij}$	$Dx_i x_j\_c$	Тензор коефіцієнта дифузії, $x_i x_j$ компонент
$R$	$R\_c$	Швидкість реакції утворення абразиву при зварюванні
$u, v, w$	$u\_c, v\_c, w\_c$	Швидкість в напрямках $x_1$ -, $x_2$ -, $x_3$ -.

Таблиця 9 – Граничні умови моделі конвекції і дифузії (штучної дифузії)

Граничні умови	Пояснення
$c = c_0$	Концентрація
$-\vec{n} \cdot (-D\nabla c + c \cdot \vec{u}) = N_0$	Потік
$\vec{n} \cdot (-D\nabla c + c \cdot \vec{u}) = 0$	Ізоляція/Симетричність
$\vec{n} \cdot (-D\nabla c) = 0$	Конвективний потік
$\vec{n} \cdot (-D\nabla c + c \cdot \vec{u}) = 0$	Осесиметричність

Швидкість реакції утворення аерозолу визначає об'ємну концентрацію формування аерозольної маси. Швидкість реакції може бути нелінійною.

Ми визначаємо коефіцієнти рівняння у діалоговому вікні Subdomain Settings.

Моделювання конвекції та дифузії виконується методом моделювання штучної дифузії застосовуючи наступні методи:

- 1) ізотропна дифузія;
- 2) дифузія вздовж характеристичних ліній течії;
- 3) дифузія при наявності бокового руху повітря.

Визначення і активізації штучної дифузії:

- 1) відкривається діалогове вікно Subdomain Settings;
- 2) вибирається вкладка Physics;
- 3) за умови попереднього вибору хоча б однієї підобласті, натискається клавіша Artificial Diffusion. Граничні умови наведено в табл. 9.

У рівнянні для граничних умов концентрації,  $c_0$  є концентрацією, яка визначається користувачем, а у рівнянні для умови потоку,  $N_0$  є довільним виразом потоку (течії), який визначається користувачем. Специфікація граничних умов здійснюється в діалоговому вікні Boundary Settings.

Змінні моделювання конвекції і дифузії (штучна дифузія) наведені в табл. 10.

Векторне подання, що позначається  $V$  в колонці Типу, не існує в 1D версії режиму моделювання Конвекція і Дифузія.

Примітка. Для того, щоб сформулювати комплекти імена змінних режиму застосування, додається суфікс, що містить знак підкреслення і ім'я режиму застосування (за замовчуванням cd), наприклад, dflux\_d cd. (Це не стосується залежної змінної для концентрації).

## Висновки

Обґрунтовано, що фізичними процесами, що визначають механізм поширення зварювального аерозолу у приміщенні є дифузія.

Для визначення швидкості поширення аерозолу у закритому приміщенні запропоновано дві моделі, а саме: дифузія аерозоля у поєднанні з моделлю поширення аерозоля та вентиляційними тепловими насосами. Складено моделі для їх розв'язання методом кінцевих елементів у середовищі CONSOL у поєднанні з початковими та граничними умовами.

Подальша робота планується у напрямку виконання розрахунків концентрації токсичних речовин для різних аерозольних домішок, видів зварювальних швів та різних точок зварювання у приміщенні компресорних станцій, що дозволить визначити рівні концентрацій, які перевищують гранично допустимі норми.

## Література

- 1 Левченко О.Г. Процессы образования аэрозоля / О.Г. Левченко // Автоматическая сварка. – 1996. – № 4. – С. 17-22.
- 2 Левченко О.Г. Классификация сварочного аэрозоля и выбор методов нейтрализации / О.Г. Левченко // Автоматическая сварка. – 1999. – № 6. – С. 38-41.
- 3 Демченко В.Ф. Информационно-поисковая система гигиенических характеристик сварочных аэрозолей / В.Ф. Демченко, О.Г. Левченко, В.А. Майлицкий, С.С. Кизитика // Сварочное производство. – 2001. – № 8. – С. 41-45.
- 4 Эльтерман В.М. К вопросу моделирования движения частиц в конвективном потоке воздуха / В.М. Эльтерман, М.З. Брауде // Водоснабжение и санитарная техника. – 1996. – № 1. – С. 9-12.

Таблиця 10 – Параметри при моделюванні штучної дифузії

Назва	Тип	Пояснення	Вираз
c	S/B	Концентрація	c
grad_c, c <sub>x<sub>i</sub></sub>	S/V	Градiєнт концентрації	$ c , \frac{\partial c}{\partial x_i}$
dflux_c	S	Дифузійний потік	$ D\nabla c $
cflux_c	S	Конвективний потік	$ c \cdot \vec{u} $
tflux_c	S	Загальний потік	$  -D\nabla c + c \cdot \vec{u}  $
ndflux_c	B	Нормальний дифузійний потік	$\vec{n} \cdot (-D\nabla c)$
ncflux_c	B	Нормальний конвективний потік	$c \cdot \vec{n} \cdot \vec{u}$
ntflux_c	B	Нормальний загальний потік	$\vec{n} \cdot (-D\nabla c + c \cdot \vec{u})$
dflux_c_x <sub>i</sub>	V	Дифузійний потік, x <sub>i</sub> компонент	$\sum_j -D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j}$
cflux_c_x <sub>i</sub>	V	Конвективний потік, x <sub>i</sub> компонент	$c \cdot u_i$
tflux_c_x <sub>i</sub>	V	Загальний потік, x <sub>i</sub> компонент	$\sum_j -D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} + c \cdot u_i$
cellPe_c	S	Комірка з числом Пекле	$\frac{ \vec{u} \cdot h }{ D }$
Dts_c	S	Коефіцієнт масштабування часу	$\delta_{ts}$
Udl_c	S	Безрозмірна швидкість	$u_{dl}$
D_c, D <sub>x<sub>i</sub>x<sub>j</sub></sub> _c	S	Коефіцієнт дифузії	$D, D_{ij}$
R_c	S	Швидкість реакції	$R$
u_c, v_c, w_c	S	Швидкість c, x <sub>i</sub> компонента	$u_i$
N_c	B	Внутрішній дифузійний потік	$N_0$
c0_c	B	Концентрація (початкова)	$c_0$
beta_c_x <sub>i</sub>	S	Конвективне поле, x <sub>i</sub> компонент	$u_i$
Dm_c	S	Середній коефіцієнт дифузії	$\frac{\sum_{i,j} D_{ij} \beta_i \beta_j}{ \beta }$
res_c	S	Похибка модельного рівняння	$\nabla \cdot (-D \cdot \nabla c + c \cdot \vec{u}) - R$
res_sc_c	S	Похибка наскрізного розрахунку	$\nabla \cdot (c \cdot \vec{u}) - R$
da_c	S	Загальний коефіцієнт масштабування часу	$\delta_{ts}$

5 Эльтерман В.М., Вентиляция химических производств [Текст] / В.М. Эльтерман. – М.: Химия, 1980. – 288 с.

6 Полукаров Ю.О. Моделирование пылевого навантажения на органы дыхания сварника для оценки риска профессиональной заболеваемости : дис... канд. техн. наук: 05.26.01. – К., 2005. – 17 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
19.05.11  
Рекомендована до друку професором  
В. Я. Грудзом