

УДК 504.054(45)

К.В. Синило, асист.

ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ СТРУМЕНЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ЗА КОМПЛЕКСНОЮ МОДЕЛЛЮ НАУ ТА ПРОГРАМОЮ FLUENT 6.3

Надано результати числового моделювання за програмою Fluent 6.3 струменя відпрацьованих газів від авіаційного двигуна, який викидається поблизу земної поверхні у напрямку вітру. Поставлена задача відповідає моделі супутного обмеженого струменя.

There are represented results of numerical simulations due to program Fluent 6.3 of fulfilled gases jet from aircraft engine. Jet was released close the ground in wind direction. Considered task is corresponding to wall slipsream.

авіаційний двигун, забруднення атмосферного повітря, моделювання емісії, обмежений струмінь, оцінка дисперсії викидів, струмінь відпрацьованих газів, супутний струмінь

Вступ

Експлуатаційні операції аеропорту суттєво впливають на якість атмосферного повітря (АП) як на території, так і навколо аеропорту. Ця проблема загострюється зі зростанням кількості повітряного транспорту та міжнародних перевезень, а також суспільною стурбованістю.

Дослідження структури турбулентних струменів є важливою та актуальною темою за останні роки. Інтерес у цій сфері обумовлено проблемами навколишнього середовища відповідно до викидів від наземного та повітряного транспорту. Використання досвіду та результатів моделювання турбулентних струменів для оцінки параметрів динаміки струменя від авіаційного двигуна (АД) обумовлює підвищення точності існуючих моделей оцінки розсіювання домішок забруднюючих речовин (ЗР) в атмосферному повітрі.

Розроблено три моделі оцінки якості АП на території аеропорту відповідно до міжнародної практики:

LASPORT – система моделювання емісії АД та оцінки дисперсії викидів в АП, яка базується на моделі Лагранжу [1];

EDMS – система моделювання емісії АД та оцінки дисперсії викидів в АП, яка ґрунтується на моделі Гауса [2];

ALAQS – система моделювання оцінки емісій всіх джерел забруднення АП на території аеропорту, у тому числі повітряних кораблів, розроблена організацією Eurocontrol [3].

На підставі програмного забезпечення Fluent 6.3 [4] здійснено числове моделювання супутного струменя поблизу обмежувальної поверхні.

Поставлена задача відповідає моделі струменя відпрацьованих газів від АД, що викидається у напрямку вітру поблизу земної поверхні.

Моделювання супутного струменя за програмою Fluent 6.3

На підставі програмного забезпечення Fluent 6.3 здійснено числове моделювання супутного струменя поблизу обмежувальної поверхні (надстеляючий струмінь). Ця задача відповідає моделі струменя відпрацьованих газів від АД, який викидається у напрямку вітру поблизу земної поверхні.

Моделювання виконано для струменя круглого розтину (діаметр 1 м) на висоті 3,5 м від земної поверхні.

Напрямок руху модельованого струменя та оточуючого середовища збігається, що відповідає моделі супутного струменя. При цьому швидкість оточуючого потоку (вітру) становить 2 м/с. Числове моделювання супутних струменів було виконано програмою Fluent 6.3 для тривимірної задачі з урахуванням вихідних умов (табл.1).

Таблиця 1

Початкові граничні умови для числового моделювання за програмою Fluent 6.3

Швидкість струменя U_{jet} , м/с	50	100	200	300	400	–
Температура струменя T_{jet} , К	343	373	423	473	573	673

Для виконання числового моделювання побудовано розрахункову сітку за допомогою підпрограми Gambit.

Для розв'язання основних рівнянь гідротермодинаміки наведених обмежених струменів використано числовий метод LES, який виконує детальний розрахунок і прогноз миттєвих характеристик потоку, а також забезпечує рішення турбулентності.

Застосування моделі LES збільшує точність та збіжність розв'язання, що обумовлено результатом детального розрахунку основних компонентів турбулентного потоку (вихрової структури) поблизу обмежувальної поверхні. З урахуванням наведених початкових умов, всі рішення збігаються, що підтверджує графік величин нев'язок. Кількість ітерацій становило 13 000.

Аналіз результатів моделювання програми Fluent 6.3 для супутних струменів

На підставі отриманих результатів розрахунку для досліджених супутних струменів та програми TecPlot побудовано:

- профіль максимальної швидкості, тобто вісь струменю (рис. 1);
- вертикальний профіль швидкості (рис. 2);

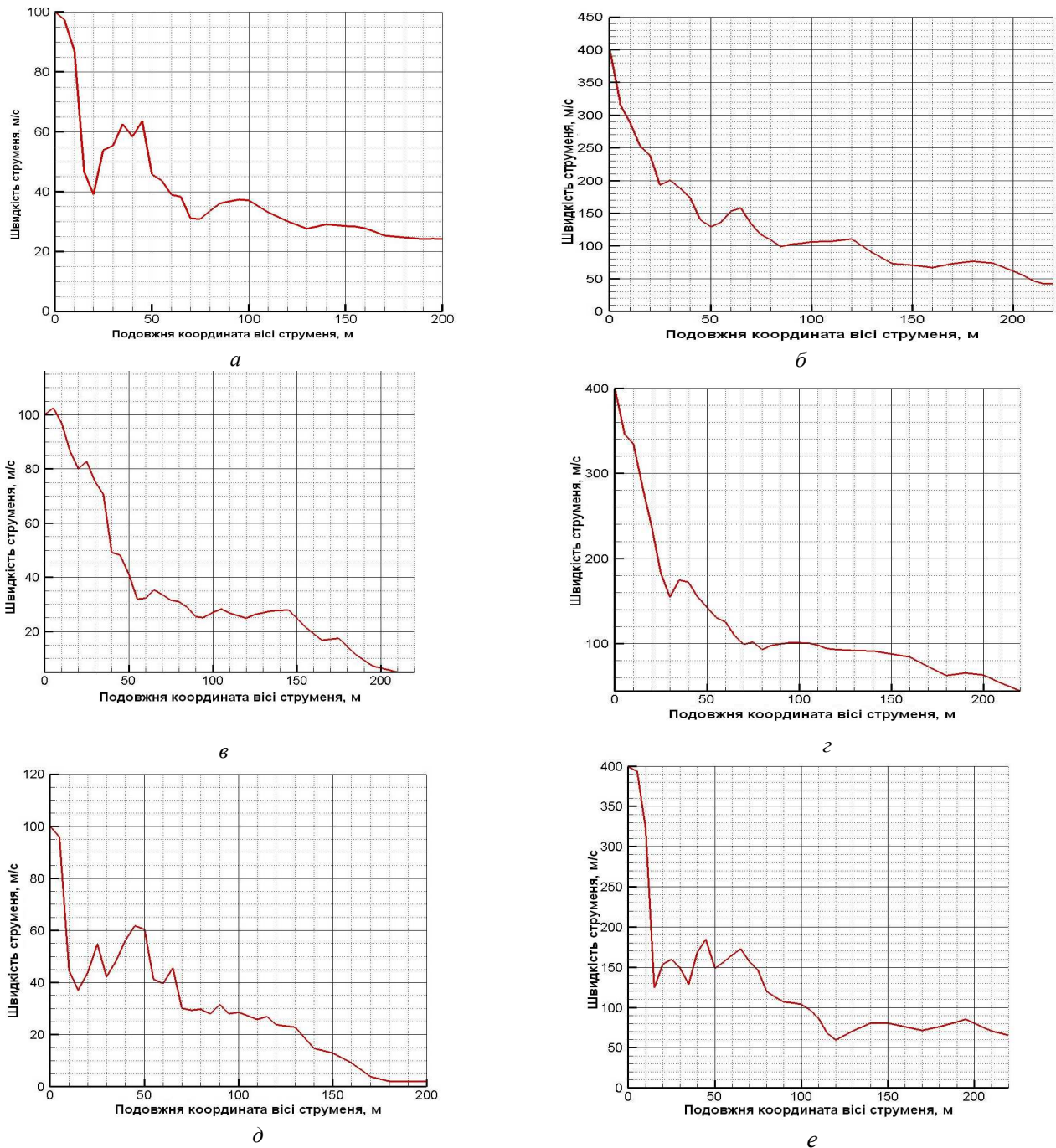
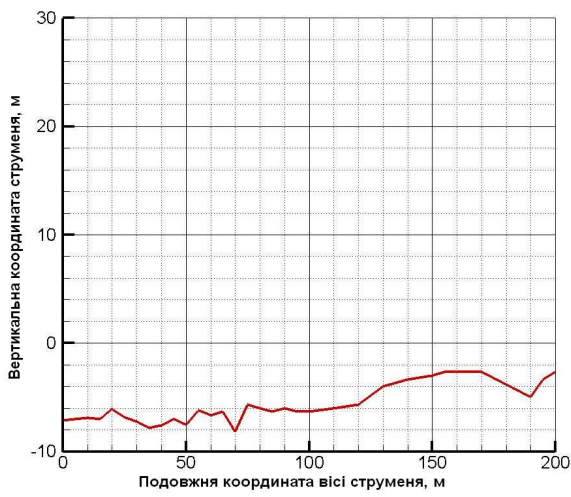
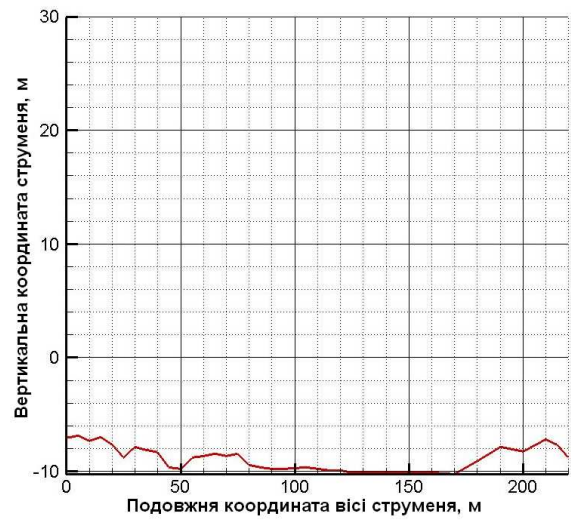


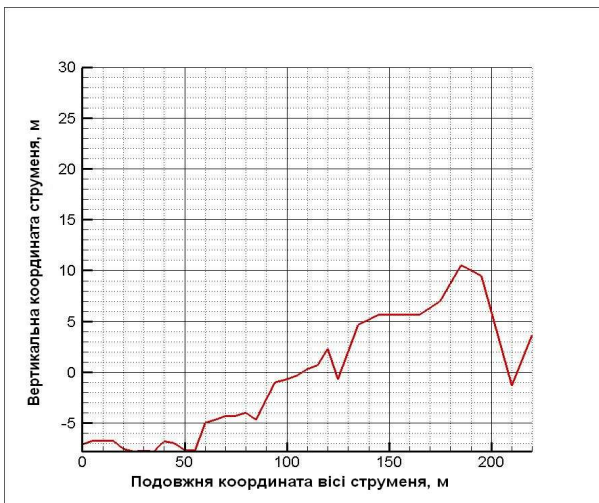
Рис.1. Профілі максимальної швидкості для супутних обмеженого струменя (вісь струменя) з початковою швидкістю 100, 400 м/с для початкової температури 343 К (а, б), 473 К (в, г), 673 К (д, е)



a



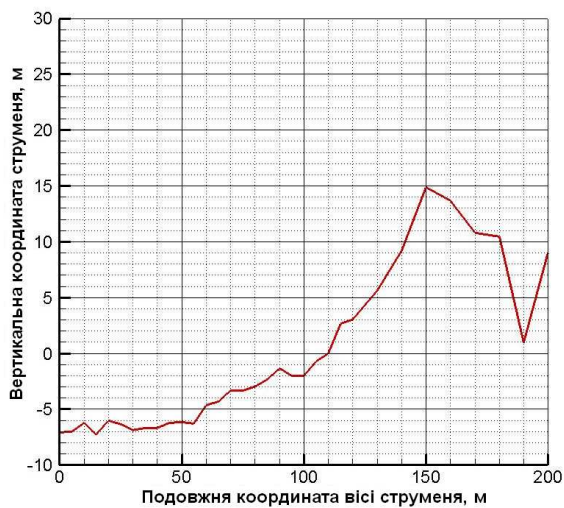
б



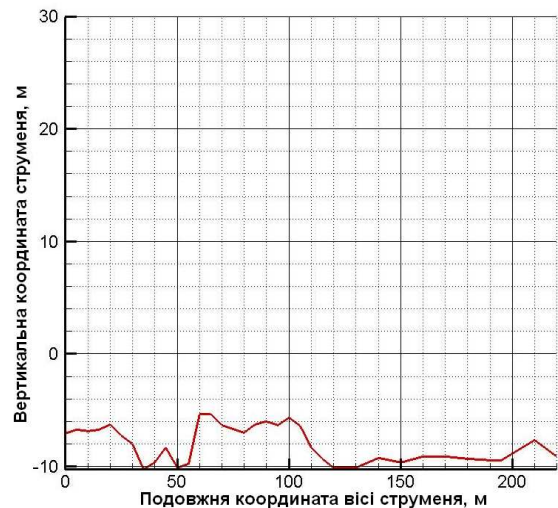
в



г



д



е

Рис. 2. Параметри розповсюдження для обмежених супутних струменів з початковою швидкістю 100, 400 м/с для початкової температури 343 К (*a, б*), 473 К (*в, г*) 673К (*д, е*)

– контури температури (рис. 3, 4), швидкості (рис. 5, 6) та турбулентної в'язкості (рис. 7, 8) для модельованого потоку.

Наведені контури та графіки виконаного чисельного моделювання дозволяють відстежити такі закономірності у характері поведінки супутного обмежувального струменя:

– падіння швидкості впродовж осі струменю прямопропорційна віддаленню від виходу струменя (рис. 1);

– ефект плавучості, який виникає внаслідок перевищення температури струменя над температурою навколишнього середовища. Підйом струменя спостерігається на основній ділянці струменя (рис. 2 (а,в,г); рис. 3, рис. 5, рис. 6, 7);

– ефект Коанди – прилипання струменя до підстеляючої поверхні, внаслідок зниження тиску та розрядження потоку поблизу поверхні, в результаті струмись прилипає до поверхні та рухається вздовж неї (рис. 2 (б,г,д); рис. 4, рис. 6, рис. 8);.

Присутність обмежувальної поверхні (стілки) обумовлює виникнення ефекту Коанди – прилипання струменю газів до стінки.

Цей ефект пояснюється тим, що обмежувальна поверхня перешкоджає надходженню повітря. Внаслідок цього потік поблизу стінки розряджається і формується область пониженого тиску під струменем газів. Поєднані області високого тиску та області пониженого тиску під струменем газів призводить до зрушення струменя в напрямку обмежувальної поверхні під впливом сил тяжіння.

Відповідно до результатів моделювання для струменів поблизу поверхні, динаміка, структура і характер розвитку потоку визначається взаємодією двох протилежних ефектів:

- ефект плавучості;
- ефект Коанди.

Перевага одного з них визначає характер поведінки струменя – спливання або прилипання.

Шарп та Вяз [4] у своїх дослідженнях відмічали, що ефект прилипання потоків газів до обмежувальної поверхні на значних відстанях спостерігається доти, доки ефект плавучості не призводить до відриву струменя від стінки та спливанню його над поверхнею.

Синклар [4] визначив параметри, які відіграють важливу роль під час відриву струменя від поверхні, а саме щодо подолання ефекту присипання:

- температура струменя;
- швидкість струменя;
- геометрія сопла викиду струменя (віддаленість сопла від поверхні).

Температура та діаметр викиду струменя мають суттєвий вплив на відрив струменя від поверхні, оскільки є базовими компонентами архимедових сил. Чим вище температура викиду та діаметр сопла, тим швидше відбудеться відрив.

Наведені параметри також підтверджуються роботами Рамсдале та Тікле[6], які в своїх дослідженнях розглядали вплив величини відношення швидкості струменя до швидкості оточуючого середовища та геометрії викиду струменя на характер його поведінки, а саме відрив струменя від обмежувальної поверхні.

Так, у випадку високих швидкостей струменя, довжина прилипання струменя до стінки зростає, а відрив загальмовується та слабшає.

Результати моделювання підтверджують наведений факт. За значних швидкостей струменя 300, 400 м/с спостерігається прилипання струменя до обмежувальної поверхні (рис. 3, з, д, е, рис. 4, з, д, е, рис. 5, з, д, е), тоді, як за незначних швидкостей 50, 100 м/с домінує спливання струменю у межах основної ділянки (рис. 3, а, б, в, рис. 4, а, б, в, рис. 5, а, б, в)

Присутність обмежувальної поверхні вносить зміни в характер турбулентності потоку, а отже, й у вихрову структуру потоку. Формування ламінарного підшару призводить до значної в'язкості поблизу обмежувальної поверхні.

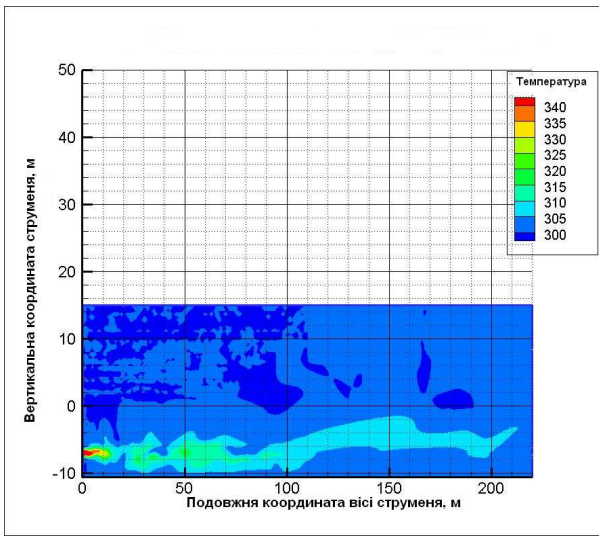
Контури турбулентної в'язкості (рис. 5), на підставі виконаного моделювання, підтверджують вплив підстеляючої поверхні на характер розвитку супутного струменя, а саме його зсування у напрямку поверхні. У випадку домінування ефекту плавучості у супутних обмежених струменях, контури турбулентної в'язкості відображають протилежну тенденцію, а саме, підйом струменя над підстеляючою поверхнею.

Отже, розвиток обмеженого струменя відбувається за такою схемою (механізму): струмінь зміщується в напрямку поверхні та прилипає до неї під дією ефекту Коанди. Швидкість потоку зменшується під час віддалення від виходу струменя. Вихрі, спричинені присутністю поверхні також зменшуються (від'ємна складова завихренності), а потім вступають в дію сили плавучості (позитивна складова завихренності), які викликають відрив струменя.

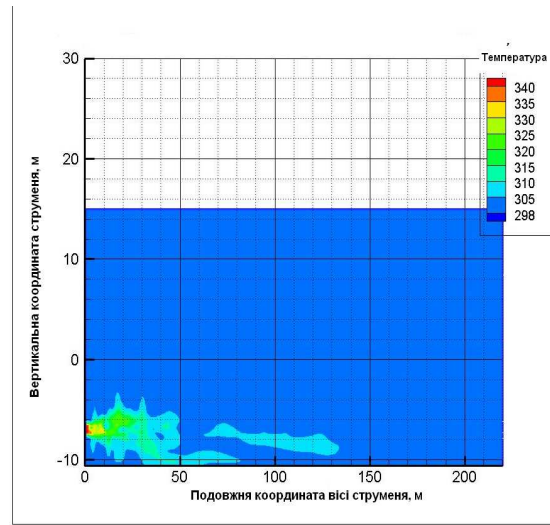
Оцінка ефекту плавучості супутних обмежених струменів відповідно до комплексної моделі НАУ та числового моделювання Fluent 6.3

З урахуванням заданих початкових умов (табл. 1) визначено висоту спливання супутних обмежених струменів за допомогою комплексної моделі НАУ та на підставі результатів числового моделювання за програмою Fluent 6.3. Також визначено подовжню та вертикальну координату скривленої ділянки струменя, внаслідок дії архимедових сил.

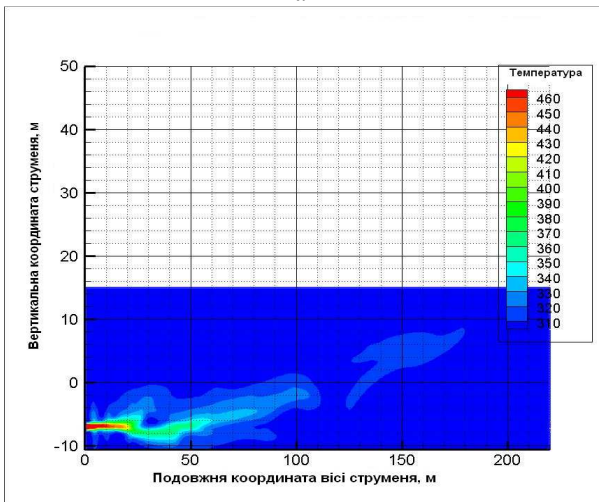
Результати розрахунку наведено у табл. 2.



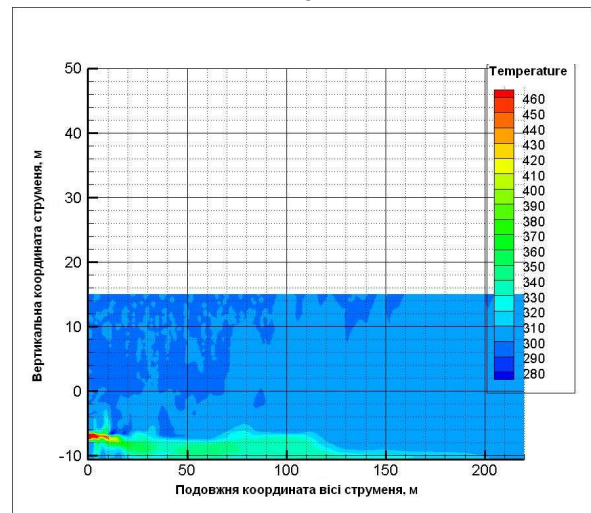
a



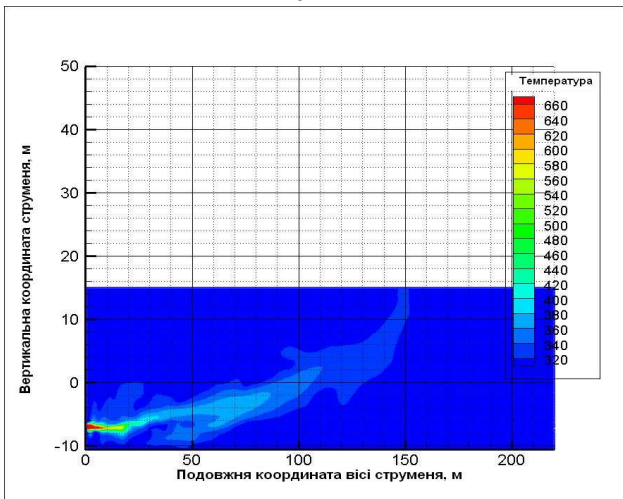
z



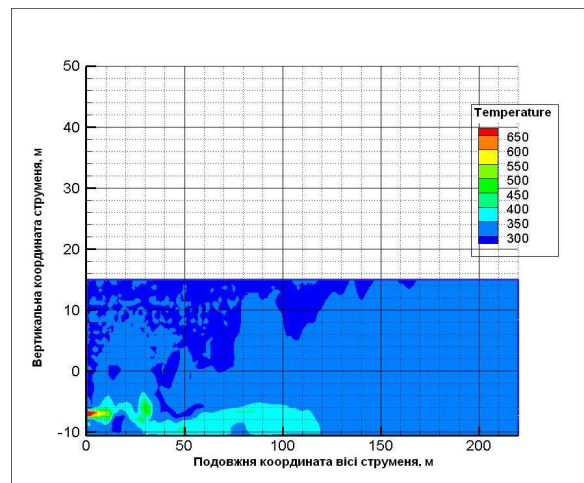
b



d



e



e

Рис. 3. Контури температури для супутніх обмежених струменів для початкової температури 343 К (*a, z*), 473 К (*b, d*), 673 К (*e, e*):

a, b, e – початкова швидкість 100 м/с;

z, d, e – початкова швидкість 400 м/с

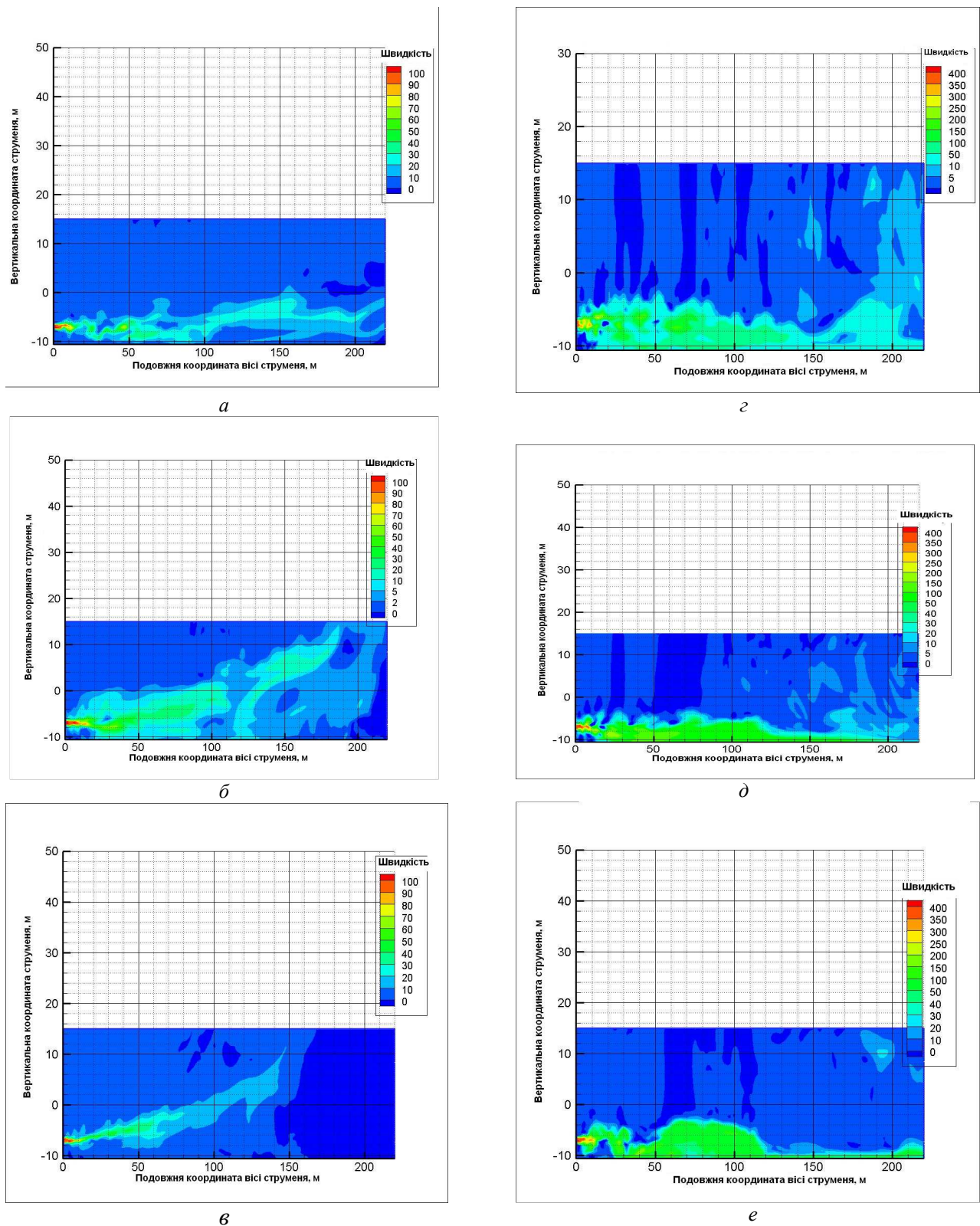
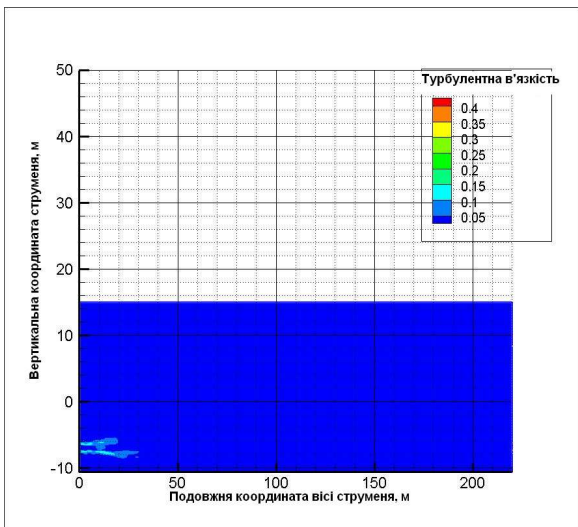


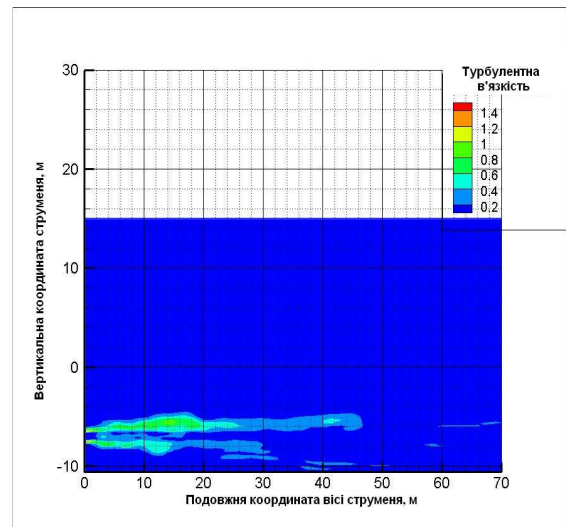
Рис. 4. Контури швидкості для супутних обмежених струменів для початкової температури 343 К (а, з), 473 К (б, д), 673 К (е, е):

а, б, е – початкова швидкість 100 м/с;

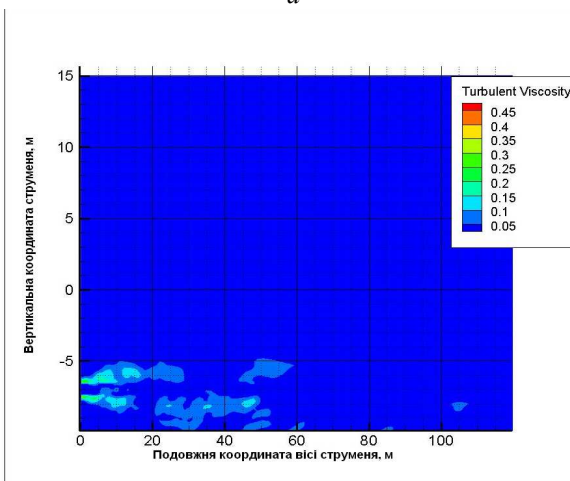
з, д, е – початкова швидкість 400 м/с



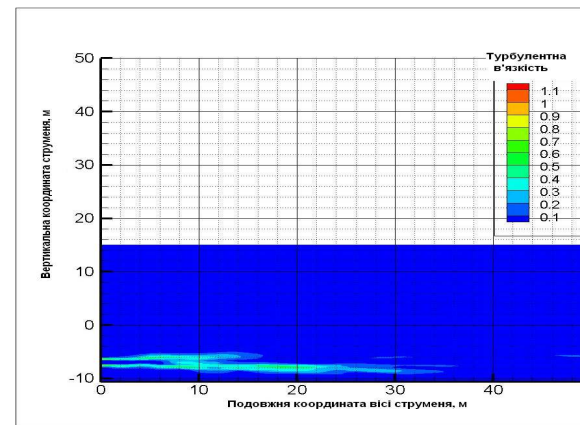
a



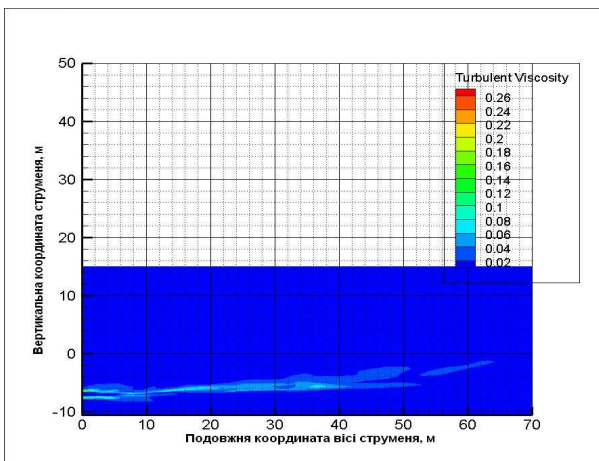
z



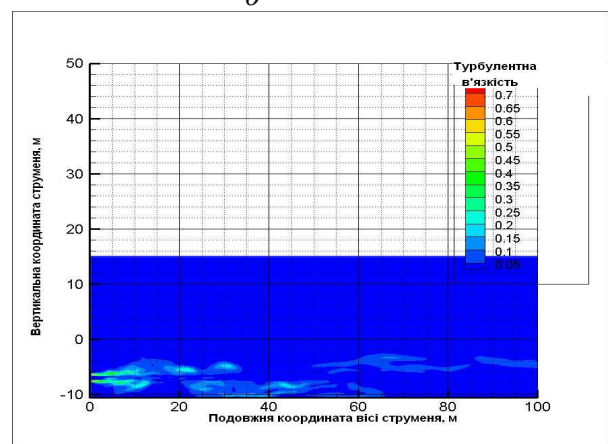
б



д



в



е

Рис. 5. Контури турбулентної в'язкості для супутніх обмежених струменів для початкової температури 343 К (*a, z*), 473 К (*б, д*), 673 К (*в, е*):

a, б, в – початковою швидкістю 100 м/с;

z, д, е – початковою швидкістю 400 м/с

Таблиця 2

Оцінка ефекту плавучості супутних обмежених струменів відповідно до комплексної моделі НАУ та чисельного моделювання Fluent 6.3

Начальні параметри струменю		Чисельне моделювання програмою Fluent 6.3			Комплексна модель НАУ		
Швидкість, м/с	Температура, К	Висота ефекту плавучості dH, м	Ветикальна координата осі струменя Z _E	Подовжня координата X, м	Висота ефекту плавучості dH, м	Ветикальна координата осі струменя Z _E	Подовжня координата X, м
50	343	17.0	20.5	110.5	11.61	15.11	74.83
100	343	5.5	9.0	160	22.99	26.49	149.65
200	343	8.0	11.5	220	45.98	49.48	299.25
300	343	Не зафіксовано			68.96	72.46	448.9
400	343	Не зафіксовано			175.48	178.98	509.7
50	373	17.1	20.6	75	16.31	19.81	71.75
100	373	7.5	11.0	170	32.25	35.75	143.5
200	373	14.5	18.0	220	64.19	67.69	287.0
300	373	Не зафіксовано			96.10	99.6	430.45
400	373	Не зафіксовано			175.48	178.98	509.7
50	473	21.5	25.0	85.0	22.37	25.87	63.7
100	473	17.5	21.0	185.0	44.15	47.65	127.4
200	473	Не зафіксовано			87.74	91.24	254.85
300	473	Не зафіксовано			131.90	135.40	382.25
400	473	Не зафіксовано			175.78	179.28	509.70
50	573	21.0	24.5	85.0	23.21	26.71	57.90
100	573	20.5	24.0	190.0	46.24	49.74	110
200	573	Не зафіксовано			92.84	96.35	200
300	573	Не зафіксовано			138.57	142.07	347.3
400	573	Не зафіксовано			184.9	188.4	399.5
50	673	17.5	21.0	75.0	23.11	26.61	45.0
100	673	22.0	25.5	150	46.24	49.74	106.85
200	673	Не зафіксовано			92.47	95.97	180.0
300	673	Не зафіксовано			137.90	141.40	320.5
400	673	Не зафіксовано			184.18	187.68	854.0

Відповідно до результатів моделювання знайдено залежність виникнення ефекту плавучості від швидкості струменя.

Так, у випадку незначних швидкостей струменя 50, 100 м/с спостерігається спливання струменя у межах основної ділянки, що підтверджує, комплексна модель НАУ та Fluent 6.3.

За значних швидкостях струменю 200, 300, 400 м/с спостерігається прилипання струменя до обмежувальної поверхні, довжина прилипання струменя до стінки зростає, а відрив уповільнюється,

слабшає та не спостерігається, відповідно до результатів числового моделювання

Побудовані профілі, контури швидкості, температури та турбулентної в'язкості, на підставі виконаного нестационарного рішення програмою Fluent 6.3, відображають динаміку розвитку потоку тільки у межах розрахункової зони (30×30×220).

Отже, у випадку наведених високих швидкостей чисельне моделювання відображає тільки ефект Коанди, який у даній ситуації домінує та спостерігаються у межах розрахункового об'єму.

Ефект плавучості та відрив струменя від обмежувальної поверхні чисельне моделювання не фіксує, внаслідок обмеженості розрахункової зони (комп'ютерного ресурса).

Відрив струменю та переваження сил плавучості за вказаних швидкостях настає на значних відстанях від виходу струменя, що підтверджує комплексна модель НАУ.

Висновки

Відповідно до виконаного моделювання за програмою Fluent 6.3 та комплексною моделлю «НАУ» розвиток обмеженого струменя відбувається за наступною схемою: струмінь зміщується в напрямку поверхні та прилипає до неї під дією ефекту Коанди. Швидкість потоку зменшується під час віддалення від вихору струменя. Вихрі, спричинені присутністю поверхні також зменшуються (від'ємна складова завихренності), а потім вступають в дію сили плавучості (позитивна складова завихренності), які викликають відрив струменя.

Відповідно до результатів комплексної моделі НАУ, чим більша початкова швидкість струменю, тим більша величина прилипання та віддаленість відриву струменя від його виходу.

Література

1. Janicke Consulting. LASPORT version 1.3 Reference Book, November 2005, 93 .
2. Emissions and Dispersion Modelling System (EDMS) Reference Manual. FAA-AEE-01-01. U.S. Department of Transportation Federal 3. Aviation Administration, Washington, D.C. CSSI, Inc., Washington, D.C. September 2002.
3. Peeters S. ALAQS-AV Application Reference Manual, Eurocontrol Experimental Centre, 2003.
4. ALAQS CFD Comparison of Buoyant and Non-Buoyant Turbulent Jets, EUROCONTROL Experimental Centre ALAQS, School of Engineering and Design, Brunel University, UK.
5. FLUENT 6.2 User's Manual (2003), Fluent Inc, Lebanon, NH, USA
6. Townsend A.A. The Structure of Turbulent Shear Flow / A.A. Townsend // Cambridge Monographs on Mechanics and Applied Mathematics. – Cambridge University Press.

Стаття надійшла до редакції 01.10.09.