

Манукян А.А., Селивёрстова Т.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ОТ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХАРАКТЕРА ЛАНДШАФТА

Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина

В данной работе исследовано поведение потока загрязняющих веществ, в процессе их распространения из дымовой трубы. Это поможет лучше понять, каким образом происходит загрязнение воздуха. С помощью программы Solid Edge созданы три трёхмерные модели для точечного источника загрязнения с разным типом рельефа: ровный ландшафт, холмистый ландшафт и городская застройка, которая состоит из зданий различных размеров. Трёхмерные модели имеют одинаковые геометрические размеры, дымовую трубу, а разный тип рельефа помогает исследовать поведение потока в различных условиях. На основе трёхмерных моделей реализованы модельные задачи с использованием программного продукта ANSYS. Вычисления в программном продукте ANSYS проводятся с помощью метода конечных элементов. Созданы полигональные сетки для трёхмерных моделей для реализации метода конечных элементов. Показано, как меняется траектория потока примесей в зависимости от характера ландшафта. В модели с ровным рельефом траектория потока загрязняющих веществ направлена вниз. В модели с холмистым ландшафтом после столкновения с препятствием траектория потока загрязняющих веществ направлена вверх. В модели с городской застройкой после столкновения с препятствием траектория потока загрязняющих веществ так же направлена вверх. Выявлено, что городская застройка оказывает меньшее влияние, чем неровный рельеф. Прежде всего, это связано с высотой препятствия относительно высоты источника загрязнения. Изменение траектории потока влияет на уровень концентрации загрязняющих веществ. Первая и третья модели имеют схожий уровень концентрации загрязняющих веществ. Во второй модели уровень концентрации загрязняющих веществ ниже. Установлено, что уровень концентрации загрязняющих веществ значительно снижается после столкновения с холмистым ландшафтом, высота которого превышает высоту дымовой трубы.

Ключевые слова: моделирование, загрязнение атмосферы, точечный источник, примеси, ANSYS, вычислительная гидродинамика, метод конечных элементов.

Постановка проблемы

Несмотря на стремительное развитие альтернативной энергетики в последние годы, вопрос загрязнения окружающей среды до сих пор остается актуальным для Украины [1]. Электростанции, заводы, вентиляционные шахты, автомобильный транспорт на двигателях внутреннего сгорания, самолеты – все это служит источником примесей, попадающих в атмосферу. Современные вычислительные системы позволяют реализовать не только сложные математические расчеты, но и их визуальное моделирование, в том числе загрязнения окружающей среды. Наглядная демонстрация данного про-

цесса, в сочетании с полученными численными результатами предоставляет возможность подойти к решению проблемы комплексно.

Анализ последних исследований и публикаций

Существуют различные способы исследования загрязнения окружающей среды и построения как математических, так и визуальных моделей. К ним относится мониторинг, статистика, регрессионный анализ, нейронные сети, трёхмерные модели, модели выбросов, метеорологические модели, химические модели, Гауссовы модели. Модели распространения примесей в атмосфере подразделяются на два класса: рассеивание примесей в атмосфере и загряз-

Таблица 1

Параметры объекта моделирования

Размер	Ширина	Длина	Высота	Высота трубы	Диаметр основания трубы	Диаметр вентиляционного отверстия
Геометрический (мм)	20000	40000	12000	6000	1300	1100
Физический (м)	400	800	240	120	26	22

нение атмосферного воздуха. Ряд программных продуктов реализуют класс задач вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics), которые основаны на системе нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка. Такие уравнения могут решаться по методу: конечных разностей, конечных элементов, конечных объёмов, сложенных частиц [2–4].

Постановка задачи

Целью статьи является исследование траектории распространения потока примесей в атмосфере в зависимости от характера преград.

Изложение основного материала исследования

Как известно, существует множество типов источников загрязнения атмосферы. В статье рассмотрен антропогенный производственный точечный источник, иными словами – дымовая труба, которая выделяет загрязняющие вещества, сосредоточенные в одной точке.

Для реализации модельных задач необходимо построить трёхмерную модель среды. Для её создания использовалась программа Solid Edge. Solid Edge – это набор простых программных инструментов, направленных на все процессы разработки изделия: 3D-проектирование, моделирование и производство. Благодаря синхронной технологии Solid Edge сочетает скорость и простоту прямого моделирования с гибкостью и контролем параметрического конструирования. Все рассмотренные модели выполнены в масштабе 1:20, имеют форму прямоугольного параллелепипеда, одинаковые геометрические размеры, содержат дымовую трубу (табл. 1).

Рассмотрим процесс распространения загрязнения в моделируемом объеме «Model 1» для плоского ландшафта с источником загрязнения – дымовая труба (рис. 1,а). «Model 2» представляет холмистый ландшафт, физическая высота холмов на уровне 175 м (рис. 1,б). Источник загрязнения находится на расстоянии 320 м. «Model 3» – квартал застройки на расстоянии 480 м от которого находится источник загрязнения. Высота зданий 14–80 м (рис. 1,в).

Для визуального моделирования процесса загрязнения атмосферы использовался программный комплекс ANSYS, который представляет собой универсальную программную систе-

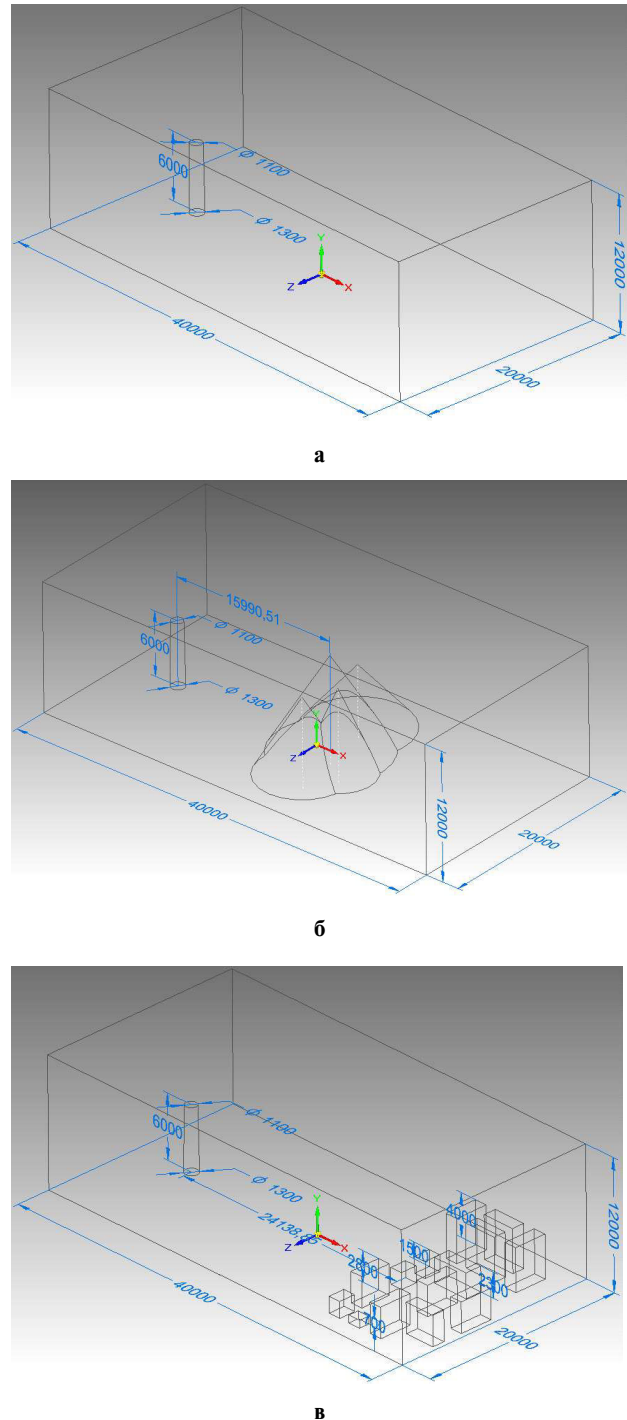


Рис. 1. Геометрия объекта моделирования: а – «Model 1»; б – «Model 2»; в – «Model 3»

му анализа, реализованную на методе конечных элементов. В ANSYS интегрировано приложение вычислительной гидродинамики CFD (Computational Fluid Dynamics), которое является частью CFX. CFX – это совокупность численных, теоретических и экспериментальных методов, предназначенных для моделирования течения жидкостей и газов, реагирующих потоков, процессов теплообмена [5]. Программные модули ANSYS интегрированы в рабочую плат-

форму ANSYS Workbench, которая является основой для предоставления комплексной и интегрированной системы моделирования.

В платформе Workbench проект представляется тремя блоками (рис. 2), которые заполняются методом переноса из меню инструментов Toolbox.

Блок Geometry содержит трёхмерную модель объекта моделирования процесса загрязнения. Блок Mechanical Model предназначен для

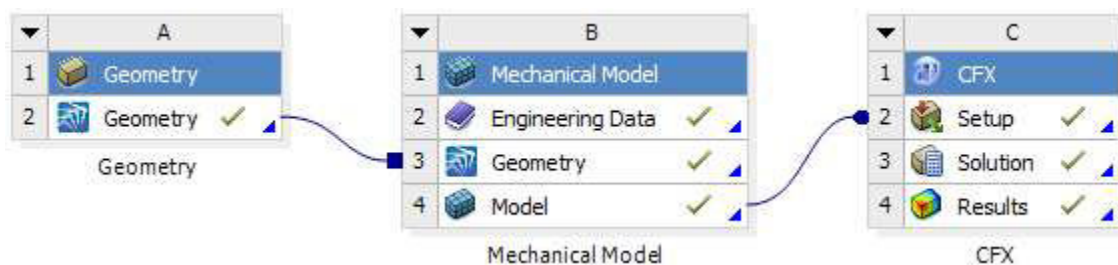


Рис. 2. Схематическое представление проекта

Таблица 2

Основные параметры CFX

Относительное давление атмосферы (Па)	Фрактальная интенсивность	Шкала длины вихря (м)	Скорость выделения загрязняющих веществ (м/с)	Коэффициент вихревой вязкости	Декартовы компоненты скорости (м/с)		
					x	y	z
0	0,5	0,25	0,1	10	1	0	0

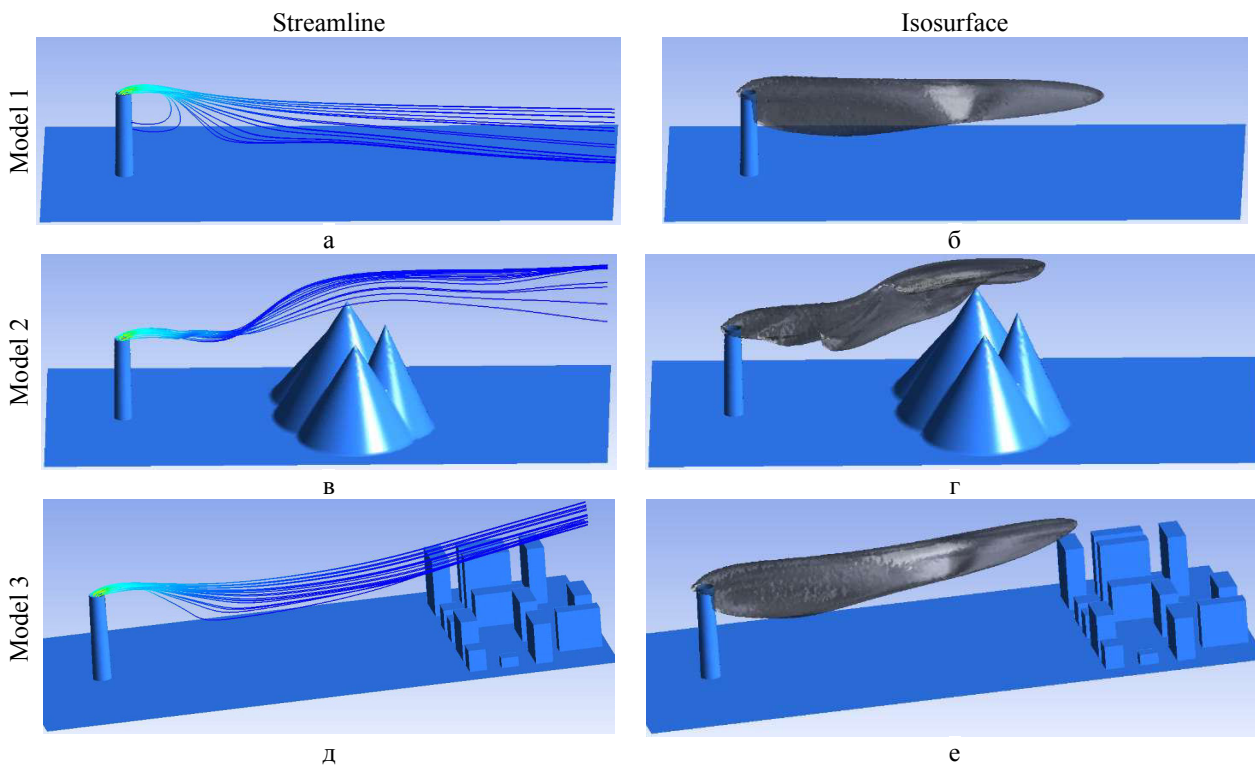


Рис. 3. Распределение загрязняющих веществ

задания механических свойств модели и зонирования на основании именованных наборов (Named Selections). Именованные наборы представляют собой плоскости с заданным именем, которые можно использовать в других интегрированных приложениях. После создания именованных наборов появляется возможность задать параметры для симуляции ветрового потока, выброса загрязняющих веществ и поведения атмосферы. Поскольку ANSYS – система конечно-элементного анализа, для трёхмерной модели необходимо создать полигональную сетку (Mesh), конечными элементами которой будут треугольники. Блок вычислительной гидродинамики (CFX) предназначен для задания параметров расчета (табл. 2).

В CFX входит предпроцессор, решатель и постпроцессор, который позволяет отобразить результаты расчета в виде распределения и потока концентрации загрязняющего вещества (рис. 3).

Анализ линии потоков (рис. 3,а,в,д) и изоповерхности (рис. 3,б,г,е) позволит исследовать поведение потока загрязняющих веществ при встрече с препятствием в виде элемента ландшафта или городской застройки. Результаты визуального моделирования подтверждают наличие восходящих потоков вблизи соответствующих элементов ландшафта.

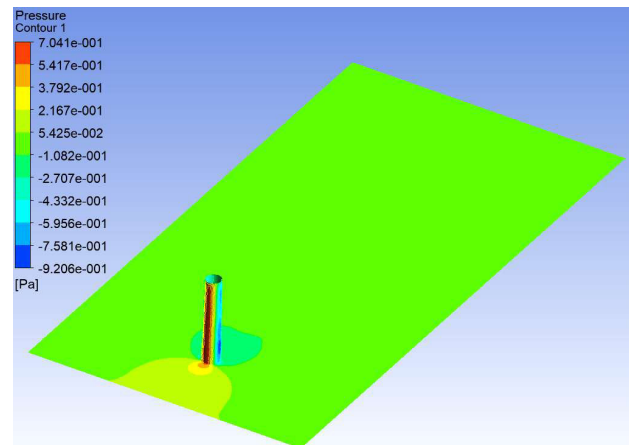
На рис. 4 приведен контур давления ветра для наклонных поверхностей (рис. 4,б) и плоскостей, находящихся во фронте к направлению ветра (рис. 4,в).

Численный анализ полученных расчетных данных возможен путем использования инструмента Probe с заданием координат тестовых точек (табл. 3). Высота точек взятия проб отличаются, поскольку поток загрязняющих веществ имеет разную траекторию.

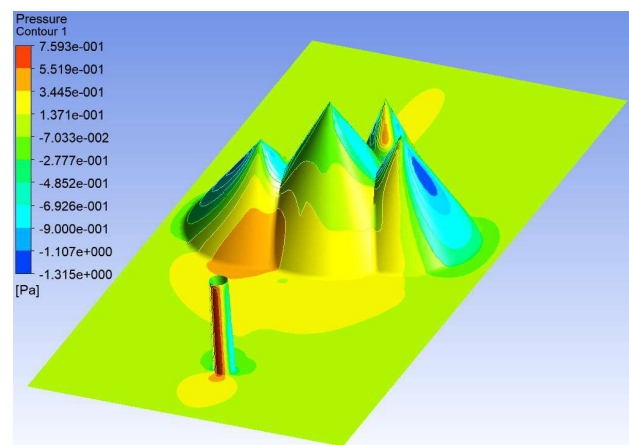
Все пробы были расположены вдоль траектории потока загрязняющих веществ на одинаковом расстоянии от трубы.

Выводы

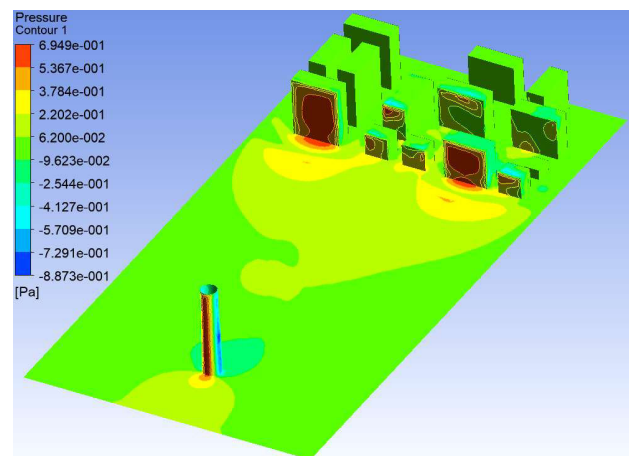
По результатам визуального моделирования возможно сделать вывод, что поведение траектории потока загрязняющих веществ меняется в зависимости от препятствий, встречающихся на пути. Как в модели с неровным рельефом (рис. 3,в), так и в модели с кварталом застройки (рис. 3,д) траектория поднимается вверх. В исходном же варианте траектория стремится вниз (рис. 3,а). По результатам полученных численных данных, на основании взятия проб, путём взятия проб можно сделать вывод, что уро-



а



б



в

Рис. 4. Контур давлений:
а – «Model 1»; б – «Model 2»; в – «Model 3»

Концентрация загрязнений

Модель	Точка взятия пробы	Концентрация (кг/м ³)	Высота (мм)
«Model 1»	Вентиляционное отверстие	0,989983	6000
	Середина потока	0,0589674	5700
	Конец потока	0,00229462	5000
«Model 2»	Вентиляционное отверстие	0,945833	6000
	Над препятствием	0,0180535	9700
	За препятствием	0,000503585	11000
«Model 3»	Вентиляционное отверстие	0,994091	6000
	Середина потока	0,0668258	6000
	Над кварталом застройки	0,00223406	8100

вень концентрации загрязняющих веществ сильно снижается с увеличением расстояния от дымовой трубы. Данные первой и третьей модели (табл. 3) весьма схожи. Однако, данные второй модели показывают, что при столкновении потока с препятствием концентрация существенно уменьшается. Высота квартала застройки недостаточна, чтобы повлиять на снижение уровня концентрации в третьей модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *IEA raises its five-year renewable growth forecast as 2015 marks record year* [Electronic resource] // International Energy Agency. – 2016. – Mode of access: <https://www.iea.org/newsroom/news/2016/october/iea-raises-its-five-year-renewable-growth-forecast-as-2015-marks-record-year.html>.
2. *Бойко В.В., Пляцук Л.Д.* Анализ методов математического моделирования розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері // Екологічна безпека. – Суми, 2010. – № 6. – С.1-4.
3. *Бабков В.С., Ткаченко Т.Ю.* Анализ математических моделей распространения примесей от точечных источников. // Информатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – Донецьк, 2011. – № 13. – С.147-155.
4. *Наумов В.А.* Математическое моделирование распространения взвешенных примесей от точечного источника и их осаждение в водотоке. // Известия КГТУ. – Калининград, 2017. – № 44. – С.46-58.
5. *ANSYS CFX* [Electronic resource] // ANSYS. – Mode of access: <http://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>.

Поступила в редакцию 01.11.2017

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАЕКТОРІЇ ПОШИРЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ ВІД ТОЧКОВОГО ДЖЕРЕЛА В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ХАРАКТЕРУ ЛАНДШАФТУ

Манукян А.А., Селівьорстова Т.В.

У даній роботі досліджено поведінку потоку забруднюючих речовин, в процесі їх поширення з димової труби. Це допоможе краще зрозуміти, яким чином відбувається забруднення повітря. За допомогою програми Solid Edge створені три тривимірні моделі для точкового джерела забруднення з різним типом рельєфу: рівний ландшафт, горбистий ландшафт і міська забудова, яка складається з будівель різних розмірів. Тривимірні моделі мають однакові геометричні розміри, димову трубу, а різний тип рельєфу допомагає дослідити поведінку потоку в різних умовах. На основі тривимірних моделей реалізовані модельні задачі з використанням програмного продукту ANSYS. Обчислення в програмному продукті ANSYS виконується за допомогою методу скінченних елементів. Створено полігональні сітки для тривимірних моделей для реалізації методу скінченних елементів. Показано, як змінюється траєкторія потоку домішок в залежності від характеру ландшафту. У моделі з рівним рельєфом траєкторія потоку забруднюючих речовин спрямована вниз. У моделі з горбистим ландшафтом після зіткнення з перешкодою траєкторія потоку забруднюючих речовин спрямована вгору. У моделі з міською забудовою після зіткнення з перешкодою траєкторія потоку забруднюючих речовин так само спрямована вгору. Виявлено, що міська забудова чинить менший вплив, ніж нерівний рельєф. Перш за все, це пов'язано з висотою перешкоди щодо висоти джерела забруднення. Зміна траєкторії потоку впливає на рівень концентрації забруднюючих речовин. Перша і третя моделі мають схожий рівень концентрації забруднюючих речовин. У другій моделі рівень концентрації забруднюючих речовин нижче. Встановлено, що рівень концентрації забруднюючих речовин значно знижується після зіткнення з горбистим ландшафтом, висота якого перевищує висоту димаря.

Ключові слова: моделювання, забруднення атмосфери, точкове джерело, домішки, ANSYS, обчислювальна гідродинаміка, метод скінченних елементів.

RESEARCH OF THE TRAJECTORY OF POLLUTION DIFFUSION FROM A POINT SOURCE DEPENDING ON THE NATURE OF THE LANDSCAPE*Manukian A.A., Selivyorstova T.V.***National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine**

The behavior of the flow of pollutants during process of diffusion from a chimney is investigated in this paper. It will help to understand the process of air pollution better. By means of the Solid Edge program three three-dimensional models for a point source of pollution with different types of landscape are created: a flat landscape, a hilly landscape and an urban landscape, which consists of buildings of different sizes. Three-dimensional models have identical geometrical sizes, a chimney, and different types of landscape help to research behavior of a flow in different conditions. On the basis of three-dimensional models, model problems are implemented using ANSYS software. Computation in the software product ANSYS are performed using the finite element method. Polygon meshes for three-dimensional models are created for implementation of the finite element method. The changes in trajectory of the pollutants flow depending on the nature of the landscape were shown. In the model with a flat landscape, the path of the pollutant flow is directed downward. In the model with a hilly landscape, after collision with an obstacle, the trajectory of the pollutant flow is directed upward. It is revealed that urban development exerts less influence, than an unsmooth landscape. First of all, it depends on the height of the obstacle relative to the height of the source of pollution. The change in the flow trajectory influences the level of concentration of pollutants. The first and third models have a similar level of concentration of pollutants. In the second model the level of concentration of pollutants is lower. It was stated that the concentration level of pollutants considerably decreased after the collision with a hilly landscape that exceeds chimney height.

Keywords: modeling, air pollution, point source, impurities, ANSYS, computational fluid dynamics, finite element method.

REFERENCES

1. IEA raises its five-year renewable growth forecast as 2015 marks record year. (2016, October 25). Available at: <https://www.iea.org/newsroom/news/2016/october/iea-raises-its-five-year-renewable-growth-forecast-as-2015-marks-record-year.html>.
2. Boiko V.V., Pliatsuk L.D. Analiz metodiv matematychnoho modeliuвання rozpovsiudzhennia zabrudniuiuchykh rehovyn v atmosferi [The analysis of mathematical modeling methods of pollutants diffusion in the atmosphere]. *Ekolohichna bezpeka*, Sumy, 2010, vol. 6, pp. 1-4. (in Ukrainian).
3. Babkov V.S., Tkachenko T.Yu. Analiz matematicheskikh modeley rasprostraneniya primesey ot tochechnykh istochnikov [The analysis of mathematical models of diffusion of impurities from point sources]. *Informatyka, kibernetyka ta obchysluvalna tekhnika*, Donetsk, 2011, vol. 13, pp. 147-155. (in Russian).
4. Naumov V.A. Matematicheskoye modelirovaniye rasprostraneniya vzveshennykh primesey ot tochechnogo istochnika i ikh osazhdeniye v vodotoke. [Mathematical modeling of distribution of suspended impurities from a point source and its deposition in the watercourse]. *Izvestiya KGTU, Kaliningrad*, 2017, vol. 44, pp. 46-58 (in Russian).
5. ANSYS CFX (n.d.). Available at: <http://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>.