

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ ДЛЯ РАСЧЕТА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГАЗОАЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО РЕЛЬЕФА

М. Мехди, М.П. Панин

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, Москва, Каширское шоссе, 31*



Средствами пакета ANSYS FLUENT в рамках стандартной k - ϵ -модели турбулентности проведено моделирование обтекания воздушным потоком ряда типичных препятствий (трехмерные куб и полусфера, а также двумерный холм), которые формируют возможный рельеф зоны распространения выбросов АЭС, а также примерно соответствуют геометрии зданий и сооружений, находящихся в этой зоне. Для обеспечения сходимости результатов на расчетной области задается неравномерная пространственная сетка, которая сгущается вблизи поверхности препятствия и внешних границ. Размеры и положения препятствий подбирались для наилучшего совпадения с условиями опубликованных экспериментов. Результаты моделирования величины скорости и направления воздушного потока в целом обнаруживают хорошее совпадение с данными экспериментов в аэродинамических трубах в зонах перед препятствием, над ним, а также в его аэродинамической тени. Достоверно воспроизводятся характерные зоны ускоренного течения, завихрений и обратного течения. Расхождения наблюдаются только в локальных областях сильной турбулентности в аэродинамической тени препятствия вблизи поверхности земли. Все это указывает на возможность полноценного моделирования распространения выбросов АЭС с учетом особенностей рельефа площадки конкретной станции и ее основных сооружений с целью уточнения дозовой нагрузки на персонал и население.

Ключевые слова: газоаэрозольные выбросы АЭС, моделирование турбулентной диффузии, ANSYS FLUENT.

ВВЕДЕНИЕ

Распространение газоаэрозольных выбросов АЭС определяется, в первую очередь, направлением и скоростью ветра. Поперечное по отношению к ветру рассеивание выбрасываемых продуктов связано, главным образом, с естественными флуктуациями направления ветра, турбулентным перемешиванием воздушных масс, обусловленным состоянием атмосферы (восходящими потоками прогретого воздуха), их собственной вязкостью и трением о подстилающую поверхность. При распростра-

© *М. Мехди, М.П. Панин, 2020*

нении выброса в условиях сложного рельефа местности (холмы, овраги и т.п.), а также при наличии зданий и сооружений появляется дополнительный источник турбулентности, вызванный обтеканием воздуха этих препятствий. В этом случае трудно ожидать, что концентрация радиоактивных веществ в воздухе может быть адекватно оценена на основании простых гауссовых моделей, рекомендованных МАГАТЭ [1].

Среди различных методов исследования воздушного потока в атмосфере, таких как эксперименты в аэродинамических трубах и натурные измерения на местности, широко используется вычислительная гидродинамика (ВГ) [2 – 5], которая зарекомендовала себя надежным и экономически эффективным средством моделирования задач турбулентного течения, способным обнаруживать характерные особенности турбулентного обтекания препятствий – аэродинамических теней, зон разрыва и вихревых дорожек [6].

В работе средствами пакета ANSYS FLUENT [7] проведено моделирование обтекания воздушным потоком ряда типичных препятствий (трехмерные куб [8], полусфера [9, 10], двумерный холм [11, 12]), которые формируют возможный рельеф зоны распространения выбросов АЭС, а также примерно соответствуют геометрии зданий и сооружений, находящихся в этой зоне. Форма и размеры препятствий были выбраны исходя из имеющихся публикаций по экспериментам в аэродинамических трубах [13 – 15], что позволило сравнить результаты численного моделирования с данными, полученными в прямых измерениях, и тем самым определить степень надежности используемой расчетной модели. Фактическая цель работы – убедиться в возможности адекватного моделирования распространения газоаэрозольных выбросов в условиях сложного рельефа, что позволяет проводить для АЭС, находящихся в соответствующей местности, расчеты реальной деформации полей концентрации радионуклидов в приповерхностном слое воздуха.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ И РАСЧЕТНАЯ ОБЛАСТЬ

В качестве расчетной модели используются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса (RANS) в рамках стандартной k - ε -модели турбулентности [16, 17]. Последняя широко и успешно применяется для задач распространения примесей в атмосфере [18, 19]. Ключевыми параметрами модели являются кинетическая энергия турбулентности k и скорость диссипации энергии турбулентности ε , которые в работе задаются через скорость трения u^* в виде

$$k = \frac{(u^*)^2}{\sqrt{C_\mu}},$$

$$\varepsilon = \frac{(u^*)^3}{k y},$$

где $C_\mu = 0.09$ безразмерная эмпирическая константа; y – вертикальная координата. Расчетная область определяется типом рассматриваемого препятствия.

Препятствие в форме двумерного холма (рис. 1) параметрически задается в виде

$$x = \frac{1}{2} \xi \left[1 + \frac{a^2}{\xi^2 + m^2(a^2 - \xi^2)} \right], \quad (1)$$

$$y = \frac{1}{2} m \sqrt{a^2 - \xi^2} \left[1 - \frac{a^2}{\xi^2 + m^2(a^2 - \xi^2)} \right], \quad (2)$$

где x – координата вдоль направления ветра; y – вертикальная координата.

Размер подошвы холма равен $2a$. Входящий в формулы (1), (2) параметр ξ из-

меняется в пределах $|\xi| \leq a$. Величина m определяется через средний уклон холма $n = H/a$ как $m = n + (n^2 + 1)^{1/2}$. В расчетах высота холма H принимается равной 0,117 м, а угол среднего уклона – 26°.

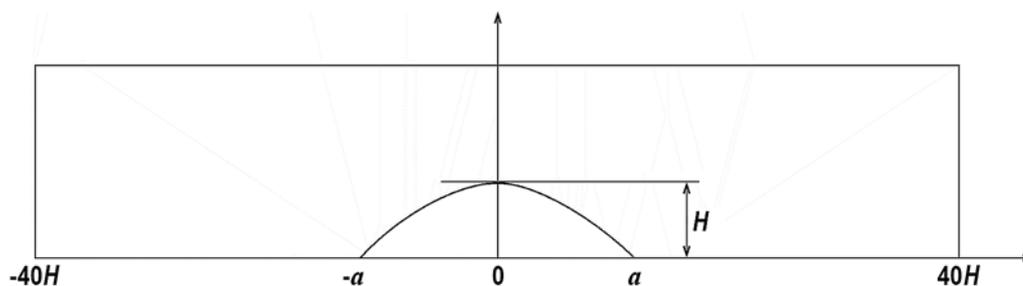


Рис. 1. Схема расчетной области для препятствия в виде двумерного холма

Задачи обтекания трехмерных препятствий в виде полусферы и куба рассмотрены на прямоугольных областях, размеры которых и положения препятствий относительно плоскости входа показаны в табл. 1.

Таблица 1

Размеры и положения препятствий в единицах высоты препятствия H

Препятствие	Вертикальный по z	Продольный по x	Поперечный по y	x – расстояние центра препятствия от входа
Холм	13,7	80	–	40
Полусфера	7,6	26,4	7,6	4,4
Куб	2	10	7	3,5

Для обеспечения сходимости результатов на расчетной области задается неравномерная пространственная сетка, которая сгущается вблизи поверхности препятствия и внешних границ. На рисунке 2 приведен пример такой гексаэдрической сетки для кубического препятствия.

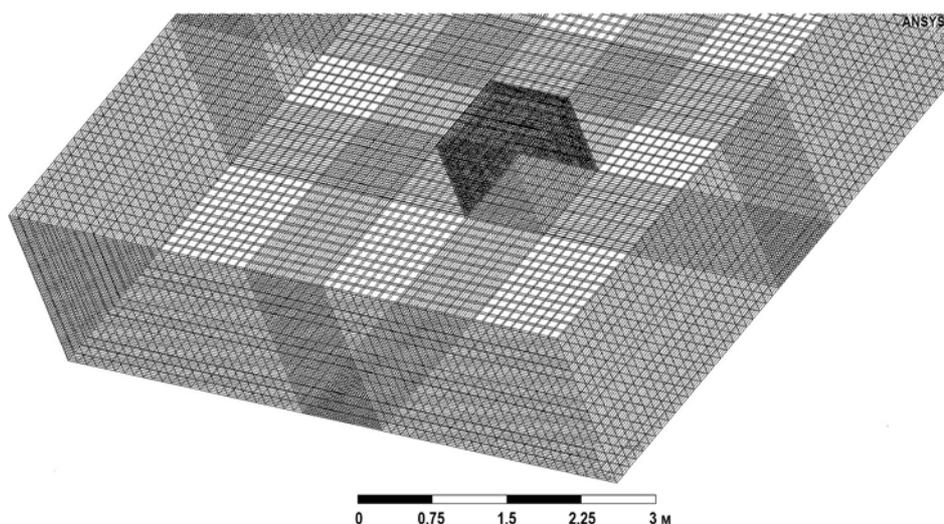


Рис. 2. Трехмерная гексаэдрическая расчетная сетка для кубического препятствия

Закон изменения входной скорости ветра с высотой $u(y)$ для разных препятствий задавался по-разному для обеспечения сравнимости с экспериментальными данными.

Для полусферы профиль скорости ветра на входе определялся степенной функцией, аналогичной используемой в [15]:

$$\frac{u}{U_0} = \left(\frac{y}{H}\right)^n, \quad (3)$$

где $n = 0,135$, а U_0 соответствует скорости ветра на высоте препятствия H .

Для двухмерного холма, следуя рекомендациям работы [20], использован логарифмический профиль скорости, который близок к обнаруживаемому при экспериментах в аэродинамических трубах:

$$u(y) = \frac{u^*}{K} \left[\ln \left(\frac{y + y_0}{y_0} \right) \right], \quad (4)$$

где u^* – скорость трения; y_0 – высота шероховатости в м; K – постоянная Кармана, значение которой принималось равным 0,41. При этом значение скорости свободного потока $U_0 = 4$ м/с достигалось на верхней плоскости расчетной области.

Для расчетов обтекания куба скорость ветра на входе принималась постоянной с высотой, т.е. $u(y) = U_0$, где $U_0 = 0,6$ м/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Фактическими результатами работы явились расчеты величины скорости и направления ветра вблизи препятствий различной формы в сравнении с экспериментальными данными в аэродинамических трубах [13 – 15]. На рисунках 3 – 5 в качестве иллюстрации приведены вертикальные профили продольного (вдоль оси x) компонента скорости потока перед препятствием, над и за ним на оси симметрии препятствия ($y = 0$) для x -координат, указанных в табл. 2. Расчётная скорость на определенной высоте $u(y)$ приведена к величине скорости входного потока U_0 . Начало оси x совпадает с центром препятствия.

Таблица 2

Координаты определения профилей скорости потока перед, над и за препятствием в единицах высоты препятствия H

Препятствие	Перед	Над	За
Холм	-0,5	0	0,5
Полусфера	-1,17	0	1,17
Куб	-1,5	0	1,5

Перед препятствием на расстояниях от него порядка высоты самого препятствия искажение потока незначительно (рис. 3). Отклонение приведенной скорости от единицы связано с влиянием верхней и нижней границ расчетной области. Для куба граничные условия на обеих плоскостях задают нулевую скорость (условие «стена»). При этом высота рассматриваемой области только в два раза превышает высоту препятствия. Для него, тем не менее, торможение потока в зоне $y < H$ заметно – распределение рассчитанных и измеренных скоростей асимметрично относительно середины $y = H$. При расчетах обтекания холма и полусферы на верхней границе заданы условия симметрии, в силу чего торможение на ней отсутствует. Для полусферы расчеты и эксперименты у самой земли обнаруживают слабое обратное течение $u(y) < 0$, вызванное завихрением в нижней части препятствия. В целом совпадение расчетных и экспериментальных данных можно считать вполне удовлетворительным.

Профили продольного компонента скорости ветра, полученные непосредственно над центром препятствия, приведены на рис. 4. Они также демонстрируют хорошее согласие расчетов и экспериментов. Кроме того, на верхней грани наименее обтекаемого препятствия (куба) и расчеты, и эксперименты показывают значительную зону завих-

рений и обратного течения. Выше же этой зоны наблюдается ускоренное течение.

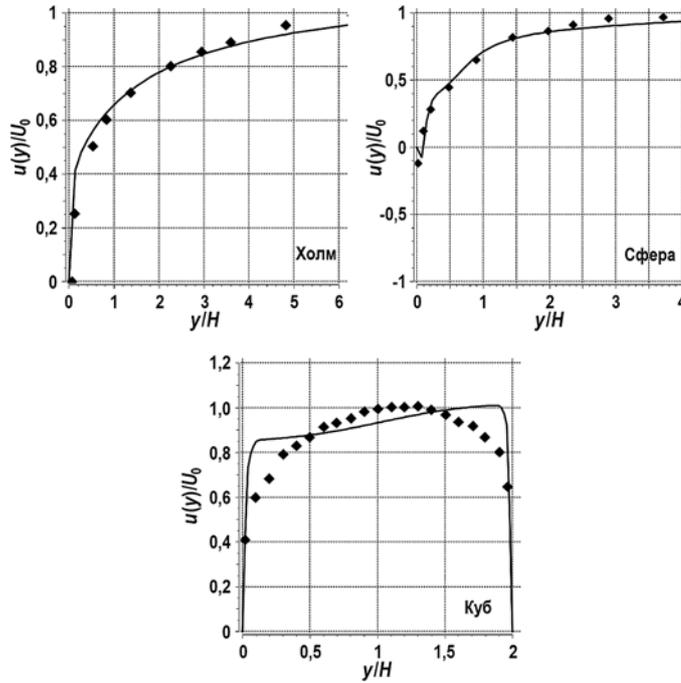


Рис. 3. Вертикальные профили продольного компонента скорости потока перед препятствиями: сплошная линия – расчет; ромбики – экспериментальные данные [13 – 15]

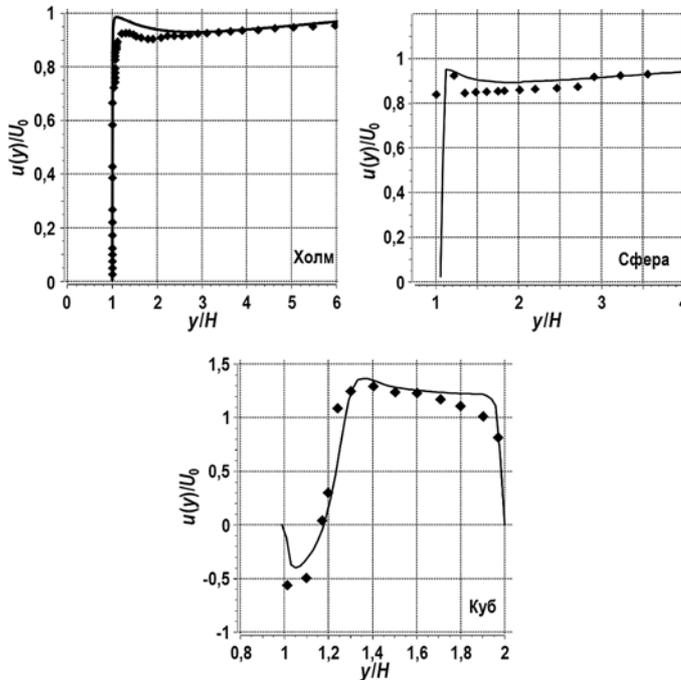


Рис. 4. Вертикальные профили продольного компонента скорости потока над препятствиями: сплошная линия – расчет; ромбики – экспериментальные данные [13 – 15]

Распределение скоростей за препятствием и, особенно, в его аэродинамической тени (рис. 5) характеризуется замедлением и закручиванием потока в обратном на-

правлении – тем большим, чем менее обтекаемым оказывается препятствие. Наиболее сильно данный эффект проявляется для куба. В целом в зоне обратного потока моделирование дает завышение скорости по сравнению с экспериментом. Максимальные различия в абсолютных величинах скорости наблюдаются в зоне наибольшей турбулентности сразу за препятствием непосредственно у поверхности земли. Такая переоценка, скорее всего, обусловлена допущением об изотропной вязкости в числовой модели, которое не является точным, особенно вблизи земной поверхности, где интенсивность турбулентности значительно изменяется в пространстве. К сожалению, использованные нами источники [13 – 15] не содержат сведений о неопределенностях экспериментальных данных.

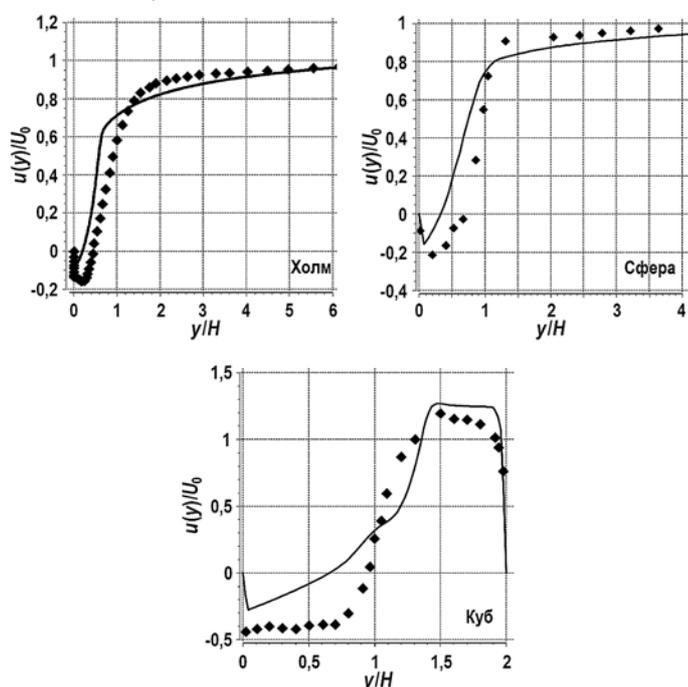


Рис. 5. Вертикальные профили продольного компонента скорости потока за препятствиями: сплошная линия – расчет; ромбики – экспериментальные данные [13 – 15]

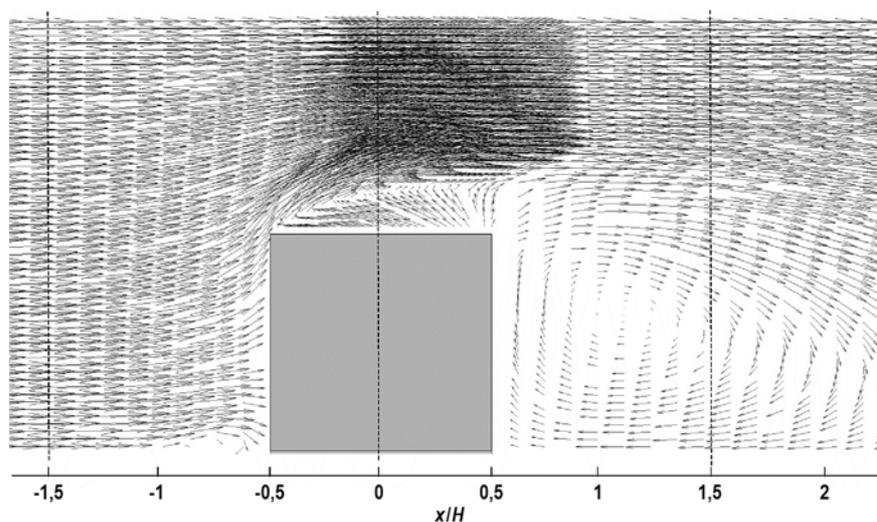


Рис. 6. Поле скоростей потока при обтекании кубического препятствия

Качественные особенности обтекания потоком кубического препятствия хорошо видны на рис. 6, где приведено распределением векторов скорости потока. Вертикальные линии на этом рисунке соответствуют x -координатам, в которых рассчитывались профили скорости для куба, показанные на рис. 3 – 5.

Куб, имитирующий здания и сооружения самой АЭС, является наиболее сложным для обтекания препятствием. Протяженность зоны турбулентности с подветренной стороны (см. рис. 6) является максимальной по сравнению с холмом и полушарием. В отличие от последних, для куба характерно также образование турбулентной зоны с отрыванием потока над верхней плоскостью крыши, а также вдоль вертикальных боковых плоскостей, где образуется пара встречно вращающихся вихрей в горизонтальной плоскости. Отрыв потока начинается перед строением и далее развивается с его фронтальной верхней грани и на боковых стенках. В силу этих особенностей данная задача представляет особый интерес для тестирования современных расчетных алгоритмов вычислительной гидродинамики.

ВЫВОДЫ

Сравнение результатов моделирования обтекания ветром типичных неоднородностей рельефа с прямыми экспериментами в аэродинамических трубах позволяет заключить, что модели на основе RANS-уравнений, несмотря на умеренные вычислительные затраты, дают в целом удовлетворительное совпадение с экспериментом. Исключением являются локальные области сильной турбулентности в аэродинамической тени препятствия вблизи поверхности земли, а также непосредственно над горизонтальными крышами зданий.

Приведенное сравнение дает основание считать, что моделирование распространения газоаэрозольных выбросов АЭС в условиях неоднородного рельефа и наличия зданий и сооружений на основе RANS-уравнений средствами пакета ANSYS FLUENT способно давать адекватные результаты для расчета дозовых нагрузок персонала и локально проживающего населения.

Литература

1. Серия изданий по безопасности № 50-SG-S3. Руководства МАГАТЭ по безопасности. – Вена: МАГАТЭ, 1980.
2. *Leeloossy A., Lagzi I., Kovacs A., Meszaros R.* A review of numerical models to predict the atmospheric dispersion of radionuclides. // *Journal of Environmental Radioactivity.* – 2018. – No. 182. – PP. 20-33.
3. *Yoshihide T., Akashi M., Ryuichiro Y., Hiroto K., Tsuyoshi N., Masaru Yoshikawa T.* AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* – 2008. – No. 96. – PP. 1749-1761.
4. *Gorle C., Beeck J.V., Rambaud P., Tendeloo G.V.* CFD modelling of small particle dispersion: The influence of the turbulence kinetic energy in the atmospheric boundary layer. // *Atmospheric Environment.* – 2009. – No. 43. – PP. 673-681.
5. *Ai Z.T., Mak C.M.* CFD simulation of flow and dispersion around an isolated building: Effect of inhomogeneous ABL and near-wall treatment. // *Atmospheric Environment.* – 2013. – No. 77. – PP. 568-578.
6. *Ступин А.Б., Оверко В.С.* Влияние неоднородности рельефа на рассеивание выбросов в атмосфере. ДонНТУ. – 2006. Электронный ресурс: <http://ea.donntu.org/handle/123456789/6268> (дата доступа 04.07.2020).
7. ANSYS Fluent Theory Guide, ANSYS Inc., 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317, November 2013.
8. *Yu Y., Kwok K.C.S., Liu X.P., Zhang Y.* Air pollutant dispersion around high-rise buildings under different angles of wind incidence. // *Journal of Wind Engineering*

and Industrial Aerodynamics. – 2017. – No.167. – PP 51-61.

9. *Zhenqing L., Shuyang C., Heping L., Takeshi I.* Large-Eddy Simulations of the Flow Over an Isolated Three-Dimensional Hill. // *Boundary-Layer Meteorology.* – 2019. – No. 170(3). – PP. 415-441.

10. *Takeshi I., Kazuki H., Susumu O.* A wind tunnel study of turbulent flow over a three-dimensional steep hill. // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* – 1999. – No. 83. – PP. 95-107.

11. *Ferreira A.D., Silva M.C.G., Viegas D.X., Lopes A.M.G.* Wind tunnel simulation of the flow around two dimensional hills. // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* – 1991. – No. 38. – PP.109-122.

12. *Kim H.G., Lee C.M., Lim H.C., Kyong N.H.* An experimental and numerical study on the flow over two dimensional hills. // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* – 1997. – No. 66. – PP. 7-33.

13. *Trombetti F., Martano P., Tampieri F.* Data Sets for Studies of Flow and Dispersion in Complex Terrain: The «RUSHIL» Wind Tunnel Experiment (Flow Data). – Technical Report No. 4, FISBAT-RT-1991/1.

14. *Martinuzzi R., Tropea C.* The flow around surface-mounted, prismatic obstacles in a fully developed channel flow. // *Journal of Fluids Engineering.* – 1993. – No. 115. – PP. 85-92.

15. *Tavakol M.M., Yaghoubi M., Masoudi Motlagh M.* Air flow aerodynamic on a wall-mounted hemisphere for various turbulent boundary layers. // *Experimental Thermal and Fluid Science.* – 2010. – No. 34. – PP. 538-553.

16. *Juretic F., Hrvoje H.* Computational modeling of the neutrally stratified atmospheric boundary layer flow using the standard $k-\epsilon$ turbulence model. // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* – 2013. – No. 115. – PP. 112-120.

17. *Richards P.J., Norris S.E.* Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models revisited. // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* – 2011. – No. 99. – PP. 257-266.

18. *Xing J., Liu Z.Y., Huang P., Feng C.G., Zhou Y., Zhang, D.P., Wang F.* Experimental and numerical study of the dispersion of carbon dioxide plume. // *Journal of Hazardous Materials.* – 2013. – No. 256. – PP. 40-48.

19. *Kisha M., Jelemensky L.* CFD Dispersion Modelling for Emergency Preparedness. // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* – 2009. – No. 22 (1). – PP. 97-104.

20. *Richards P.J., Hoxey R.P.* Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the $k-\epsilon$ model. // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* – 1993. – No. 46. – PP. 145-153.

Поступила в редакцию 04.07.2019 г.

Авторы

Панин Михаил Петрович, доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: mppanin@mephi.ru

Мехди Менауер, аспирант

E-mail: mehdiyahia1@hotmail.fr

USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS TOOLS TO CALCULATE THE DIFFUSION OF GAS AND AEROSOL EMISSIONS IN CONDITIONS OF A COMPLEX TERRAIN

Mehdi M., Panin M.P.

National Research Nuclear University MEPhI
31 Kashirskoe Hwy, 115409 Moscow, Russia

ABSTRACT

ANSYS FLUENT tools were used as part of a standard turbulence (k - ϵ)-model to simulate the air flow around a number of typical obstructions (a 3D cube, a 3D hemisphere, and a 2D hill) which form a potential terrain in the NPP emission spread area and roughly correspond to the geometry of the buildings and structures within this area. For reproducibility, a non-uniform spatial grid is plotted in the computational region which condenses near the obstruction surface and the outer boundaries. The dimensions and the positions of the obstructions were chosen such that to ensure their best possible coincidence with the conditions of the published experiments. The result of modeling the velocity and direction of the air flow as the whole shows a good agreement with the data from the wind tunnel experiments in the areas in front of and over the obstruction, as well as in its aerodynamic shadow. Typical accelerated flow, vortex, and reverse flow areas are reproduced reliably. There are variances observed only in the local heavy turbulence regions in the obstruction's aerodynamic shadow near the ground surface. All this indicates that it is possible to model in full scale the spread of the NPP emissions taking into account the features of the plant site terrain and the major onsite structures to determine more accurately the personnel and public exposure dose.

Key words: NPP gas and aerosol emissions, turbulent diffusion modeling, ANSYS FLUENT.

REFERENCES

1. Safety Series No. 50-SG-S3. IAEA Safety Guides. Vienna. IAEA, 1980.
2. Leeloosy A., Lagzi I., Kovacs A., Meszaros R., A review of numerical models to predict the atmospheric dispersion of radionuclides. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018, no. 182, pp.20-33.
3. Yoshihide T., Akashi M., Ryuichiro Y., Hiroto K., Tsuyoshi N., Masaru Yoshikawa T. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2008, no. 96, pp.1749-1761.
4. Gorle C., Beeck J.V., Rambaud P., Tendeloo G.V. CFD modelling of small particle dispersion: The influence of the turbulence kinetic energy in the atmospheric boundary layer. *Atmospheric Environment*. 2009, no. 43, pp.673-681.
5. Ai Z.T., Mak C.M. CFD simulation of flow and dispersion around an isolated building: Effect of inhomogeneous ABL and near-wall treatment. *Atmospheric Environment*. 2013, no. 77, pp. 568-578.
6. Stupin A.B., Overko V.S. Influence of the form of a relief on distributions of emissions in an atmosphere. DonNTU, 2006. Available at: <http://ea.donntu.org/handle/123456789/6268> (accessed Jul 04, 2020) (in Russian).
7. ANSYS Fluent Theory Guide, ANSYS Inc., 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317, November 2013.
8. Yu Y., Kwok K.C.S., Liu X.P., Zhang Y. Air pollutant dispersion around high-rise

buildings under different angles of wind incidence. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2017, no. 167, pp 51-61.

9. Zhenqing L., Shuyang C., Heping L., Takeshi I. Large-Eddy Simulations of the Flow over an Isolated Three-Dimensional Hill. *Boundary-Layer Meteorology*. 2019, no. 170(3), pp. 415-441.

10. Takeshi I., Kazuki H., Susumu O. A wind tunnel study of turbulent flow over a three-dimensional steep hill. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1999, no. 83, pp. 95-107.

11. Ferreira A.D., Silva M.C.G., Viegas D.X., Lopes A.M.G. Wind tunnel simulation of the flow around two dimensional hills. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1991, no. 38, pp. 109-122.

12. Kim H.G., Lee C.M., Lim H.C., Kyong N.H. An experimental and numerical study on the flow over two dimensional hills. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1997, no. 66, pp. 7-33.

13. Trombetti F., Martano P., Tampieri F. Data Sets for Studies of Flow and Dispersion in Complex Terrain: The «RUSHIL» Wind Tunnel Experiment (Flow Data). Technical Report No. 4, FISBAT-RT-1991/1.

14. Martinuzzi R., Tropea C. The flow around surface-mounted, prismatic obstacles in a fully developed channel flow. *Journal of Fluids Engineering*. 1993, no. 115, pp.85-92.

15. Tavakol M.M., Yaghoubi M., Masoudi Motlagh M. Air flow aerodynamic on a wall-mounted hemisphere for various turbulent boundary layers. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010, no. 34, pp. 538-553.

16. Juretic F., Hrvoje H., Computational modeling of the neutrally stratified atmospheric boundary layer flow using the standard $k-\varepsilon$ turbulence model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2013, no. 115, pp. 112-120.

17. Richards P.J., Norris S.E. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models revisited. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2011, no. 99, pp. 257-266.

18. Xing J., Liu Z.Y., Huang P., Feng C.G., Zhou Y., Zhang, D.P., Wang F. Experimental and numerical study of the dispersion of carbon dioxide plume. *Journal of Hazardous Materials*. 2013, no. 256, pp. 40-48.

19. Kisha M., Jelemensky L. CFD Dispersion Modelling for Emergency Preparedness. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2009, no. 22 (1), pp. 97-104.

20. Richards P.J., Hoxey R. P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the $k-\varepsilon$ model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1993, no. 46, pp. 145-153.

Authors

Panin Mikhail Petrovich, Associate Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: mppanin@mephi.ru

Mehdi Menaouer, PHD student

E-mail: mehdiyahia1@hotmail.fr