

9. Baizharikova, M.A., Tlebaev, M.B., Tazhieva, R.N., Doumcharieva, Zh.E., Aitbaeva, Z.K. Kompyuternyi kontrol parametrov, avtomatizatsiya upravleniya metanovogo sbrazhivaniya organicheskikh otkhodov v bioreaktorakh [Computer control of parameters, automation of management of methane fermentation of organic waste in bioreactors] Final Report of research work. MRNTI 62.01.91,62.01.77. [in Russian].

10. Baizharikova, M.A. Doumcharieva Zh.E., Nurzhigitova Zh.N., Beishen E.M. Raschet skorosti vykhoda metana tekhnologicheskogo protsessa metanovogo sbrazhivaniya organicheskogo substrata [Calculation of the methane yield rate of the technological process of methane fermentation of an organic substrate] // Molodoi uchenyi, Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal [Young Scientist, International scientific journal], 2017. №4.1 (138.1) [in Russian].

11. Vedenev, A.G. Vedeneva, T.A. Biogazovye tekhnologii v Kyrgyzskoi Respublike [Biogas technologies in the Kyrgyz Republic]. – Bishkek: Tipografiya «Evro», 2006. – 90 p. [in Russian].

12. Trakhunova, I.A. Povyshenie effektivnosti anaerobnoi pererabotki organicheskikh otkhodov v metantenke s gidravlicheskim peremeshivaniem na osnove chislennogo eksperimenta [Increasing the efficiency of anaerobic processing of organic waste in a digester with hydraulic stirring based on a numerical experiment]: diss... Cand. tech. science: 05.20.01 / Trakhunova Irina Aleksandrovna. – Kazan, 2014. – 115 p. [in Russian].

13. Sidyganov, Yu.N., Onuchin, E.M., Kostromin, D.V., Medyakov, A.A. Rezultaty matematicheskogo modelirovaniya protsessov teplovogo peremeshivaniya pri anaerobnom sbrazhivanii organicheskikh otkhodov [Results of mathematical modeling of thermal mixing processes during anaerobic digestion of organic waste] // Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Proceedings of the St. Petersburg State Agrarian University]. – 2011. - № 24. – PP. 332-338 [in Russian].

МРНТИ 27.35.14

**А.А. Исахов¹ (orcid-0000-0002-1937-8615),
А.И. Машенкова² (orcid-0000-0003-0300-5053)**

¹Ассоциированный профессор (доцент), ²магистрант
Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
г. Алматы, Казахстан

e-mail:¹alibek.issakhov@gmail.com, ²albus.mash@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ С ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ МЕТЕОУСЛОВИЯХ

Аннотация. В настоящей статье было произведено численное моделирование распространения загрязняющего вещества – углекислого газа с дымовых труб ТЭЦ. Моделирование происходило с использованием системы уравнений RANS и k-ε Standard и k-ω SST моделей турбулентности. При создании модели были использованы приближенные к реальным условия для окружающей среды –

переменное направление ветра, переменная влажность окружающего воздуха и различная температура, изменяющиеся в зависимости от времени суток. В геометрии задачи использовались две дымовые трубы, из которых выходил диоксид углерода со скоростью: 0.5 м/с и 1 м/с. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем для изучения проблемы о загрязнении окружающей среды и уменьшении последствий, оказываемых на экологическую обстановку в целом.

Ключевые слова: осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, течение в поперечном потоке, дисперсия загрязняющих веществ, алгоритм SIMPLE, температурная инверсия.

Введение. В последние годы изменение климатических условий является очень важной проблемой для каждого из нас. Повсеместное появление ТЭЦ является неотъемлемой частью прогресса и урбанизации, однако все промышленные предприятия значительно ухудшают экологическую обстановку по всему миру. Тысячи тонн выбрасываемых веществ от сжигания природных видов топлива ведут ко многим проблемам, связанных с окружающей средой, в том числе с воздушным бассейном, что в свою очередь приводит к необратимым последствиям для флоры и фауны. Точная оценка, анализ и предсказание поведения загрязнителей в воздухе является одной из первостепенных задач для многих ветвей науки. Повсеместное изучение поведения загрязнителей на всей территории Республики Казахстан помогает детальной изучить проблему и заблаговременно предпринять меры по уменьшению последствий, наносимых окружающей среде. Основные виды загрязняющих веществ, образованных после сжигания угля, представлены такими веществами как оксиды углерода (CO_2 , CO), оксиды азота (NO , NO_x), оксиды серы (SO_2 , SO) и твердые частицы. В отличие от антропогенных источников загрязнения, к которым относятся: сжигание угля, нефти и газа для промышленной деятельности [1,2] образование выхлопных газов от автомобилей, природных источников появления загрязняющих веществ в окружающей среде не много, к ним можно отнести извержения вулканов, выделение из почвы нитратов в процессе разложения и разряды молний в атмосфере. Деятельность человека способствует появлению кислотных дождей, тем самым вызывая снижение урожайности культур и разрушению экологии.

Применение математического моделирования и основанных на нем программных пакетов позволяет решать задачи о загрязнении воздушной среды. При описании загрязнения крупных городов и промышленных центров возникают значительные сложности, связанные с существованием большого количества локальных источников (автотранспорт, карьеры и т.п.). Это приводит к сильной неоднородности загрязнения воздуха в пределах города, вследствие чего требуются особые (по сравнению с существующими) методы описания загрязнения окружающей среды [3].

В наши дни использование усредненных уравнений Навье-Стокса (RANS) является неотъемлемой частью численного моделирования множества проблем, в том числе и загрязнения воздушной среды. Каждый год проводятся исследования, позволяющие понять природу поведения распространения течений в различных условиях. Исследование процесса распространения загрязняющих веществ в чистом воздухе помогает предугадывать процесс и тем самым защищать потенциальные участки от будущих загрязнений [4] создали трехмерную модель, использующую k-ε модель турбулентности и решили численно с помощью уравнений RANS. В

роли загрязняющего вещества выступил углекислый газ (CO₂), который испускался тремя различными методами из одного места в построенной геометрии: 1) как продукт химической реакции, 2) с помощью погретmixcombustion модели, основанной на mixturefractiontheory, 3) с постоянной испускаемой массой в момент времени. Глобальное изучение дисперсии загрязнителя происходит уже давно. Многие авторы [5-13] с помощью численного и математического моделирования стремятся всесторонне изучить распространение загрязняющих веществ над промышленными и транспортными районами. Истоки изучения поставленной задачи берут свои корни в работах по изучению смешивания поперечных течений жидкости и газа. Смешение струй существенно усложняет процесс изучения и влияет на такие характеристики струи, как длина и высота образованных вихрей, распределение температуры и другое [14].

Газы, выбрасываемые из труб ТЭЦ, оказывает на жизнедеятельность живых организмов колоссальное влияние. Основные заболевания от данного типа проблем представлены сердечно-сосудистыми и респираторными заболеваниями [15] изучали длительное воздействие NO₂ на бронхиальные заболевания у детей. Благодаря подобным статьям появляется работы, в которых озвучены данные об эффективности удаления загрязнителей из атмосферы.

Условия и методы исследований. Математическая модель, представляющая двумерные и трехмерные течения потока жидкости и газа, описывается усредненными уравнениями Навье-Стокса (RANS). Эти уравнения создают систему уравнений, которая численно решается с помощью программного обеспечения ANSYSFluent. Для численного моделирования использовались k-ε и k-ω модели турбулентности. При построении математической модели была рассмотрена трёхмерная модель нестационарного состояния для анализа течения во всей области. Выбрасываемый газ – углекислый газ. Кроме того, диссипация и давление считаются пренебрежимо малыми. Исходя из вышеизложенного, уравнения RANS принимают следующий вид:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho \tilde{g} \hat{n} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i + S_i \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\bar{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \bar{J}_j + (\bar{\tau} \cdot \bar{v}) \right) + S_h \quad (4)$$

где $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$, $k_{eff} = k + k_t$. Для k-ε модели турбулентности – $\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$, а для k-ω модели турбулентности – $\mu_t = \frac{k}{\omega}$.

$p' = p + \frac{2}{3}\rho k + \frac{2}{3}\mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k}$ – новое значение давления. Корректность модели

турбулентности была подтверждена, с помощью контрольного эксперимента. Причем необходимо отметить, что для решения поставленной задачи было использовано уравнение неразрывности в форме (1), то есть в несжимаемом виде, что связано с тем, что в задаче рассматриваются только нижние слои атмосферы, где плотность остается приблизительно постоянной, что, в том числе, было продемонстрировано в тестовой задаче.

Турбулентная модель SSTk- ε :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b}) \quad (6)$$

здесь P_k – появление турбулентности за счёт вязких сил, которая рассчитывается как:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \left(3\mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \quad (7)$$

$$P_{kb} = -\frac{\mu_t}{\rho \sigma_\rho} \rho \beta g_i \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad P_{\varepsilon b} = C_3 \max(0, P_{kb}),$$

где $\sigma_\rho = 0.9, C_\mu = 0.09, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ – константы.

Турбулентная модель SSTk- ω :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta^* \rho k \omega + P_{kb}$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho k \omega^2 + P_{\omega b}$$

$$\text{где } \mu_t = \frac{k}{\omega}, \quad P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \left(3\mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k \right),$$

$$P_{\omega b} = \frac{\omega}{k} ((\alpha + 1) C_3 \max(P_{kb}, 0) - P_{kb}).$$

Постоянные в данной модели:

$$\sigma_k = 2, \sigma_\omega = 2, \beta = 0.075, \beta^* = 0.09, \alpha = \frac{5}{9}.$$

Для турбулентных течений диффузия рассчитывается как:

$$\vec{J}_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i$$

здесь $Sc_t = \frac{\mu_t}{\rho D_t}$ (по умолчанию число Шмидта равно 0.7).

В настоящей статье при моделировании распространения загрязняющих веществ с Экибастузской ГРЭС воздушная среда имела переменную влажность. Относительная влажность измеряется в процентах и может быть найдена по следующей формуле:

$$RH = \frac{P_{(H_2O)}}{P^*_{(H_2O)}} \times 100\%,$$

где RH – относительная влажность рассматриваемой смеси (воздуха); $P_{(H_2O)}$ – парциальное давление паров воды в смеси; $P^*_{(H_2O)}$ – равновесное давление насыщенного пара.

Результаты исследований. Перед тем, как перейти к настоящей задаче о распространении загрязняющих веществ с Экибастузской ГРЭС необходимо удостовериться в корректности выбранной математической модели. С этой целью сначала была смоделирована и численно решена тестовая задача, экспериментальные результаты которой были получены, а позднее результаты были проанализированы и решены в статье. Геометрия тестовой задачи - трёхмерная модель, представляющая собой боковой выброс в поток закрытого канала. Поперечное течение потоков представлены вертикальным (малый) и горизонтальным (основной) каналами. В вышеуказанных работе, вертикальный канал имеет форму параллелограмма с ребром $D=12.7$ мм. Общая протяженность канала составляет 571.5 мм. Малый канал расположен по центру от боковых стенок и находится на расстоянии 57.15мм от канала с основным потоком. В горизонтальном канале скорость течения определяется по формуле $U = 11 \left(\frac{h}{0.0254} \right)^{\frac{1}{7}}$, где h – высота основного канала. Необходимо отметить, что своего максимума скорость достигает при 11 м/с. В вертикальном канале скорость остается постоянной в течение всех вычислений и составляет 5.5 м/с.

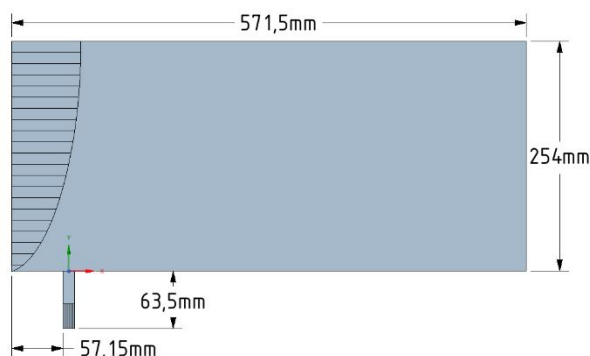


Рис. 1. Вид спереди для тестовой задач

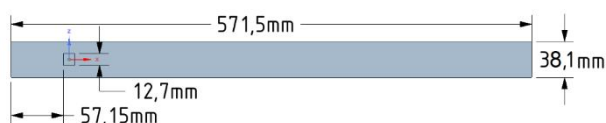


Рис. 2. Вид снизу для тестовой задачи

Вычисления производились на структурированной сетке, разделенной на фиксированное количество делений, представленных в Таблице 1. Использование данной сетке помогает произвести точные и вычислено-оптимальные расчеты.

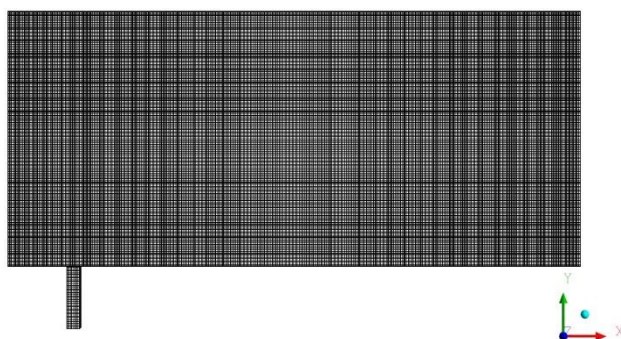


Рис.3. Вычислительная сетка, вид спереди для тестовой задачи

Для заданной геометрии используются следующие виды граничных условий: входные отверстия для вертикального и горизонтального каналов – inlet, стенки вертикального канала и дно–wall, стенки горизонтального канала–periodic, верхняя грань–symmetry. Данные граничные условия были выбраны аналогичным образом, что и уже известных авторов.

В ходе численного моделирования, были решены два типа моделей турбулентности: Standardk- ϵ и SSTk- ω . Полученные результаты были сравнены с численными результатами KeimasiandTaeibi-Rahni [14] и экспериментальными данными Ajersch [16]. Движение потока, исходящего из вертикального канала, продемонстрировано на рисунках 5-7. На рисунках 6-7 показаны контуры распространения и компоненты скорости для точек, находящихся в $x/D=0$ и $x/D=3$.

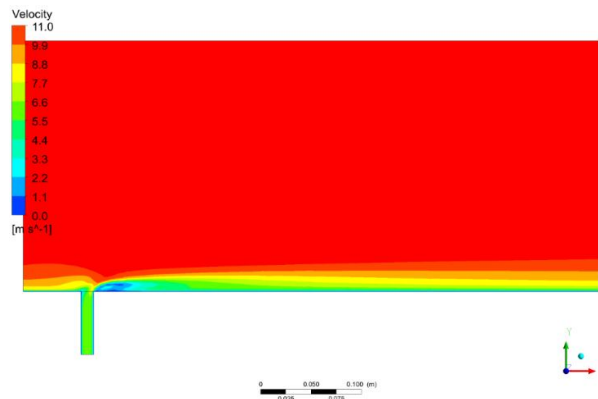


Рис. 4. Профиль скорости движения поперечного потока

Изменение всех трех компонент скоростей были сравнены с экспериментальными и численными значениями других авторов. В процессе моделирования использовались две различные модели турбулентности: k-ε Standard и k-ω SST. Было выявлено, что модель k-ω SST модель показывает значения, приближенные к экспериментальным данным, вследствие чего именно данная модель турбулентности будет использоваться в дальнейшем для проектирования задачи о выбросах с Экибастузской ГРЭС.

В соответствии с уже имеющимися данными были построены профили компонент скоростей.

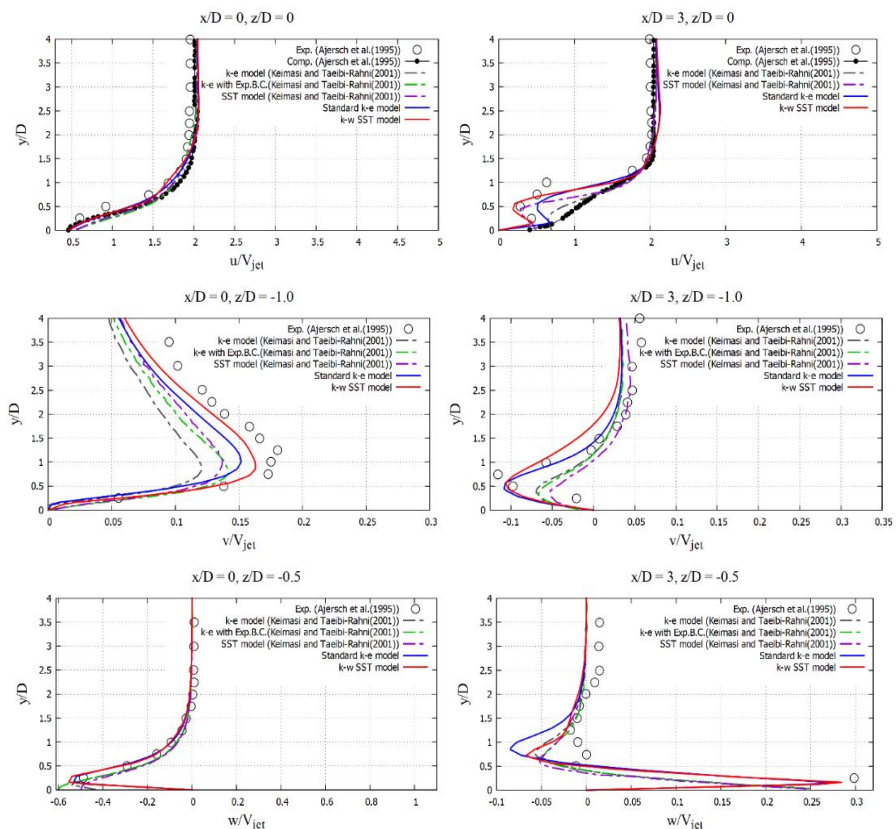


Рис. 5. Сравнение профилей скоростей для тестовой задачи

Экибастузская ГРЭС, находящаяся на северо-востоке Казахстана в Павлодарской области, является самой крупной ТЭЦ в городе Экибастуз. Мощность ТЭЦ, рассчитанная как 4000 МВт и показывающая рабочую мощность в 3500 МВт. Станция начала строиться в 1974 году в рамках проекта СССР по созданию топливно-энергетического комплекса. Основным видом сжигаемого топлива является уголь, в результате чего в атмосферу выбрасывается большое количество CO_2 – углекислого газа. В энергетическом комплексе находятся две дымовые трубы, высота которых равна 300 и 330 м.

При моделировании комплекса ГРЭС рассматривалась площадь общим размером 14000x1800x14000 метров. Были построены две трубы А (330 м в высоту) и В (300 м в высоту). Труба А имеет больший диаметр, равный $D=12$ м и труба В имеет диаметр $d=10$ м. Рядом с трубами расположено пять зданий, размеры которых приведены на рисунке ниже. Здания и трубы находятся ровно посередине рассматриваемой области.

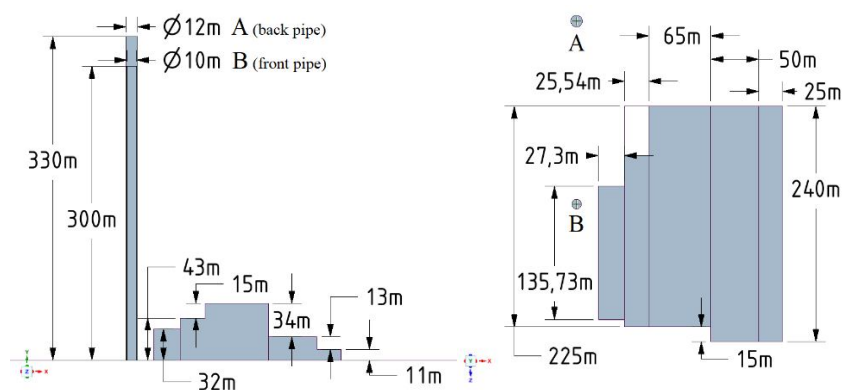


Рис. 6. Геометрия Экибастузской ГРЭС

Для численного решения поставленной задачи была сконструирована сетка, в которой произвелось сгущение к центру и к земле (области, где расположены строения), а затем сгущение к самим зданиям (сетка до 10 м) и к трубам (сетка до 2 м). Общее количество элементов равно 3.383.653, а nodes – 582.100. Выбор подобных размеров сетки обусловлен исследованиями, проведенными ранее [17].

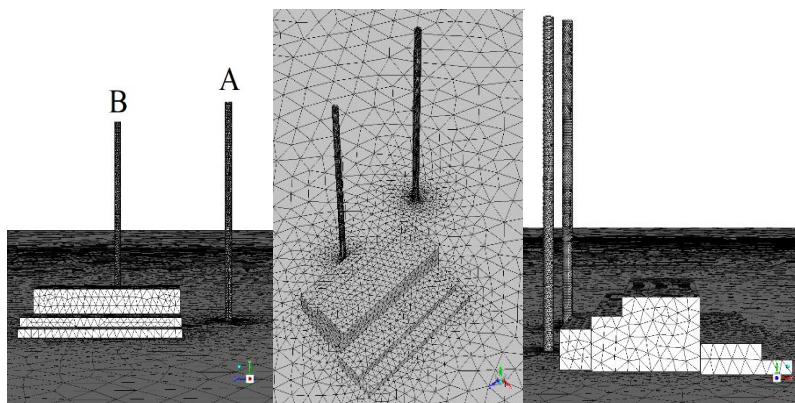


Рис. 7. Вычислительная сетка для Экибастузской ГРЭС

Обсуждение научных результатов. В качестве нестационарных метеорологических условий было рассмотрено переменное направление ветра и изменяющиеся по часам температура и влажность. Используемые значения для температуры и влажности были взяты на основе реальных данных о прогнозе погоды на исследуемой местности с целью приближения задачи к реальным условиям. Измерения влажности и температуры во все моменты времени происходило в точке между трубами по оси z и на высоте 1000 метров над поверхностью земли. Полученные данные позволяют дать полную картину об эволюции определенных конфигурационных параметров, заданных с помощью отдельно подключаемых внешних функций и тем самым определить то, как меняется погода над дымовыми трубами и близлежащими промышленными строениями за одни конкретные сутки.

В первые три часа направление ветра, температура и относительная влажность являются постоянными величинами. Поток направлен вдоль оси OX. Соответственно этому распространение загрязнителя (CO_2) происходит в том же направлении. Падение концентрации из обеих труб ТЭЦ наблюдается только после первого часа и продолжается второй и третий час. Начиная с четвертого часа происходит первое изменение направления ветра на 22 градуса в сторону оси OZ. Также происходит изменение влажности воздушного бассейна: в четвертый час влажность падает до 82.65%, но уже во время пятого и шестого часа влажность падает до приблизительно 76% (с разницей до первого знака после запятой для 5 и 6 часа). Необходимо отметить и то, что после четвертого часа температура имеет различия в каждый час, в который происходило измерение. Этот факт связан с тем, что из-за большого объема области исследования температура не может одновременно изменяться во всей области и поэтому происходит ее постепенное изменение, связанное с распространением ветра. Изменение этих параметров приводит к изменению поведения загрязняющего вещества: испускаемое вещество сносится в направлении течения ветра, а падение на земную поверхность уже не происходит.

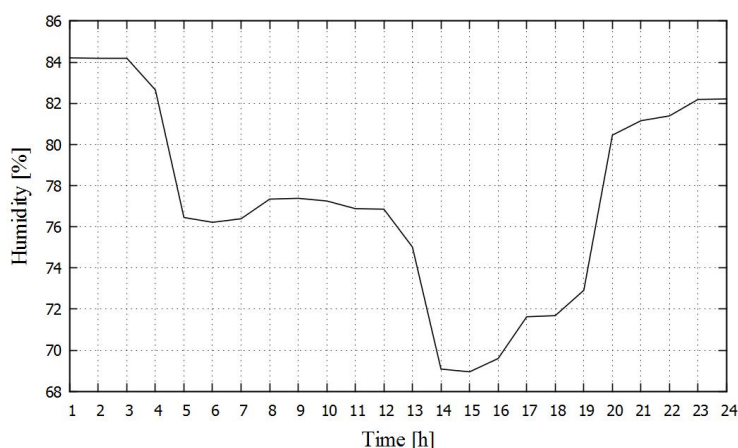


Рис. 8. Данные о распространении влажности внутри области

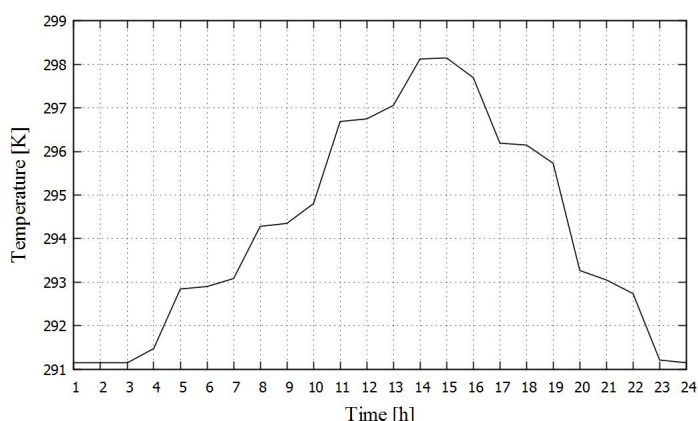


Рис. 9. Данные об изменении температуры в течение суток

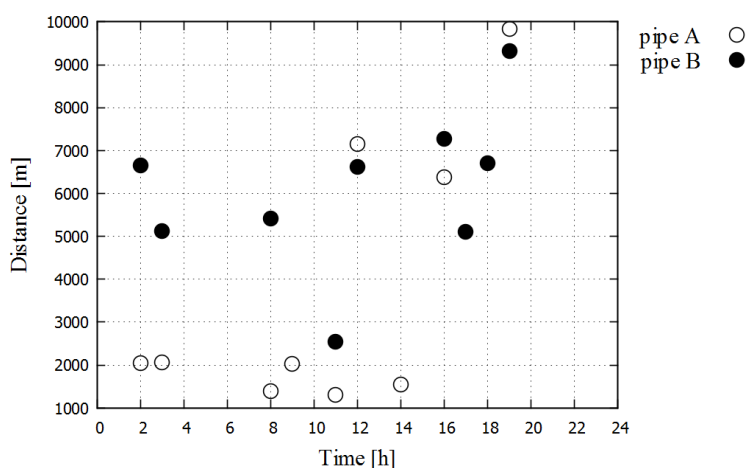


Рис. 10. Дальность падения загрязнителя

Заключение. Целью настоящего исследования было определение поведения самого масштабного выбрасываемого загрязняющего вещества – CO_2 под действием нескольких атмосферных факторов, таких как: переменное направление ветра, изменяющаяся со временем температура и влажность во всем воздушном бассейне над территорией крупнейшей в Казахстане ТЭЦ. В работе были использованы две дымовые трубы, высоты которых составляют 300 и 330 метров, а диаметры различны (10 м и 12 м). Для приближения к реальным условиям около дымовых труб были построены пять строений, которые вносили изменение в общее движение потока воздуха и углекислого газа. Скорость выбрасывания загрязнителей составляет 0.5 м/с и 1 м/с для дымовых труб В (300 м) и А (330 м) соответственно.

Для определения корректности поставленной задачи сначала была смоделирована и численно решена тестовая задача, результаты которой были сравнены с уже имеющимися численными и экспериментальными данными других авторов. Для моделирования были использованы уравнения RANS и выбраны две модели турбулентности: $k-\epsilon$ Standard и $k-\omega$ SST. Выбор данных моделей объясняется оптимальной вычислительной мощностью в процессе вычислений, а также большого количества исследований, изучающих и

показывающих корректность использования указанных моделей. Сравнение и анализ полученных графиков позволили определить, что для изучения задачи в реальных масштабах (1:1) наиболее подходит к- ω SST модель турбулентности, так как данная модель показывает значения максимально приближенные к экспериментальным.

Общее время исследования составляло одни сутки, причём все полученные данные собирались в начале каждого часа, а затем сравнивались друг с другом. Для получения полной картины о том, как ведет себя загрязнитель во всей области исследования, результаты замерялись на 13 линиях, расположенных во всей области на различном расстоянии от дымовых труб. Полученные профили скорости течения потока, а также профили концентрации позволили увидеть полную картину изменений за указанный период. В зависимости от направления ветра характер движения диоксида углерода заметно изменялся. Влияние таких факторов как влажность и температура определяли дистанцию, на которой происходило падение оксида углерода (IV). Данные показывают, что не во всех случаях падение концентрации происходило внутри указываемой области, а только в 9 из 24 случаях для обеих дымовых труб. Интересным фактом является и то, что падение концентраций на поверхность земли происходила не всегда для обеих труб в один час, так в 9, 14, 17 и 18 часы падение концентрации происходило только для одной из двух труб. Данный факт объясняется совокупностью факторов, главными из которых является неравномерное течение ветра из-за образованных вихрей около строений и изменение влажности относительно предыдущего и последующих часов.

Все полученные данные могут быть в дальнейшем использованы для более детального изучения задач о распространении загрязнителей в реальных атмосферных условиях.

Список литературы

1. Zhang, L., Lee, C.S., Zhang, R., Chen, L. Spatial and temporal evaluation of long term trend (2005–2014) of OMI retrieved NO₂ and SO₂ concentrations in Henan Province, China // *Atmospheric Environment*, 2017. Vol. 154, PP.151–166.
2. Zeebe, R.E., Ridgwell, A., Zachos, J.C. Anthropogenic carbon release rate unprecedented during the past 66 million years // *Nature Geoscience*, 2016. Vol. 9(4), PP.325–329.
3. Toja-Silva F, Chen J, Hachinger S, Hase F. CFD simulation of CO₂ dispersion from urban thermal power plant: analysis of turbulent Schmidt number and comparison with Gaussian plume model and measurements // *Journal Wind EngIndAerodyn*, 2017. Vol. 169, PP.177–193.
4. Korinek, T., Frana, K. A dispersion study of CO₂ in a closed area // *The Application of Experimental and Numerical Methods in Fluid Mechanics and Energy*, 2016. AIP Conf. Proc. 1745, 020027-1–020027-7.
5. Brioude, J., Arnold, D., Stohl, A., Cassiani, M., Morton, D., Seibert, P., Wotawa, G. The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART-WRF version 3.1 // *Geoscientific Model Development*, 2013. Vol. 6(6), PP.1889–1904.
6. Buccolieri, R.; Salim, S.M.; Leo, L.S.; Di Sabatino, S.; Chan, A.; Ielpo, P.; de Gennaro, G.; Gromke, C. Analysis of local scale tree–atmosphere interaction on pollutant concentration in idealized street canyons and application to a real urban junction // *Journal Atmosphere Environment*, 2011. Vol. 45, PP.1702–1713.
7. Cao, Q., Shen, L., Chen, S.-C., Pui, D. Y. H. WRF modeling of PM 2.5 remediation by SALSCS and its clean airflow over Beijing terrain // *Science of The Total Environment*, 2018. Vol. 626, PP.134–146.

8. García-Sánchez, C., Van Tendeloo, G., Gorlé, C. Quantifying inflow uncertainties in RANS simulations of urban pollutant dispersion // *Atmospheric Environment*, 2017. Vol. 161, PP.263–273.
9. García Nieto, P. J., Sánchez Lasheras, F., García-Gonzalo, E., & de Cos Juez, F. J. PM 10 concentration forecasting in the metropolitan area of Oviedo (Northern Spain) using models based on SVM, MLP, VARMA and ARIMA: A case study // *Science of The Total Environment*, 2018. Vol. 621, PP.753–761.
10. Griffiths, K. D. Disentangling the frequency and intensity dimensions of nuisance odour, and implications for jurisdictional odour impact criteria // *Atmospheric Environment*, 2014. Vol. 90, PP.125–132.
11. Gromke, C.; Ruck, B. On the impact of trees on dispersion processes of traffic emissions in street canyons. *Bound.-Lay. Meteorol.* 2009, 131, PP.19–34.
12. Hassan I, Findlay M, Salcudean M, Gartshore I. Prediction of film cooling with compound-angle injection using different turbulence models // 6th annual conference of the computational fluid dynamics society of Canada, Quebec, QC, Canada, June 1998, PP. 1–6.
13. Hong, B., Qin, H., Jiang, R., Xu, M., & Niu, J. How Outdoor Trees Affect Indoor Particulate Matter Dispersion: CFD Simulations in a Naturally Ventilated Auditorium // *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018. Vol. 15(12), PP.2862-2870.
14. Keimasi, M. R., & Taeibi-Rahni, M. Numerical Simulation of Jets in a Crossflow Using Different Turbulence Models // *AIAA Journal*, 2001. Vol. 39(12), PP.2268–2277.
15. Anderson, H.R., et al. Quantitative Systematic Review of Short Term Associations Between Ambient Air Pollution (Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulphur Dioxide and Carbon Monoxide), and Mortality and Morbidity // *Division of Community Health Sciences St George's - University of London*, 2007. 121 p.
16. Ajersch, P., Zhou, J. M., Kettler, S., Salcudean, M., and Gartshore, I. S., Multiple Jets in a Cross flow: Detailed Measurements and Numerical Simulations // *International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, ASME Paper 95-GT-9*, Houston, TX, June 1995, PP. 1–16.
17. Issakhov, A., Mashenkova A. Numerical study for the assessment of pollutant dispersion from a thermal power plant under the different temperature regimes // *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019. Vol. 16(10), PP.6089-6112.

Материал поступил в редакцию 26.03.21

А.А. Исахов, А.И.Машенкова

Аль-Фараби атындағы Қазақ Ұлтық университеті, Алматы қ., Қазақстан

ЖЫЛУ ЭЛЕКТРСТАНЦИЯСЫНАН ЛАСТАУШЫ ЗАТТАРДЫҢ СТАЦИОНАРЛЫҚ ЕМЕС МЕТЕОЖАҒДАЙЛАРДАҒЫ ТАРАЛУЫНЫҢ САНДЫҚ МОДЕЛЬДЕУІ

Аннотация. Осы мақалада ЖЭС түтінқұбырларынан ластаушы зат-көмірқышқыл газының таралуын сандық модельдеу жүргізілді. Түрбуленттілік модельдерінің RANS және $k-\epsilon$ Standard және $k-\omega$ SST теңдеулер жүйесін қолдану арқылы өтті. Модельді құру кезінде қоршаған ортағақты жағдайларқолданылды, олар: желдің ауыспалыбағыты, қоршаған ауаның ауыспалы ылғалдылығы және күннің уақытына байланысты өзгереді нәртүрлі температура. Есептің геометриясында екі түтін мұржасы қолданылды, олардан көмірқышқыл газы 0,5 м/с және 1 м/с жылдамдықпен шықты, алынған нәтижелерді қоршаған ортаның ластануы туралы мәселені зерттеу және жалпы экологиялық жағдайға әсер ететін зардаптарды азайту үшін одан әрі пайдалануға болады.

Тірек сөздер: Рейнольдс бойынша орташаланған Навье-Стокс теңдеулері, көлденең ағындағы ағым, ластаушы заттардың дисперсиясы, SIMPLE алгоритмі, температуралық инверсия.

A.Issakhov, A.I.Mashenkova

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

NUMERICAL SIMULATION OF POLLUTANTS DISTRIBUTION FROM A THERMAL POWER PLANT FOR DIFFERENT TEMPERATURE REGIMES

Abstract. In this article, a numerical simulation of the dispersion of a pollutant - carbon dioxide from the chimneys of a power plant was carried out. Modeling was carried out using the RANS equations and k- ϵ Standard and k- ω SST turbulence models. When creating the model, close to real conditions for the environment were used - variable wind direction, variable humidity of the ambient air and different temperatures, changing depending on the time of day. In the geometry of the problem, two chimneys were used, from which carbon dioxide escaped at a speed of 0.5 m / s and 1 m / s. The results obtained can be used in the future to study the problem of environmental pollution and reducing the consequences of the environmental situation as a whole.

Key words: Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, cross-flow flow, dispersion of pollutants, SIMPLE algorithm, temperature inversion.