УДК 621.039.57

С.С. ДОБРОТВОРСКИЙ, Б.А. АЛЕКСЕНКО, Л.Г. ДОБРОВОЛЬСКАЯ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСЧЕТА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБТЕКАНИЯ СЛОЯ АДСОРБЕНТА В ПОЛОСТИ АДСОРБЦИОННОЙ КОЛОННЫ ЗА СЧЕТ ВЫБОРА НАИЛУЧШЕЙ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Розглянуто моделі турбулентності, що використовуються в сучасних програмах розрахунку гідродинамічних течій. Проведено дослідження щодо вибору найкращої моделі турбулентності для використання при розрахунку аеродинамічної моделі обтікання шару адсорбенту у об'ємі адсорбційної колони осушувача. Практично підтверджена за критерієм збіжності рішення оптимальність використання «Spalart-Allmaras (SA) моделі» турбулентності. Виконано апробацію моделі шляхом порівняння отриманих результатів рішення з результатами розрахунків, проведених із застосуванням альтернативних моделей турбулентності.

Ключові слова: моделювання, модель турбулентності, повітряний потік, аеродинаміка.

Рассмотрены модели турбулентности, используемые в современных программах расчёта гидродинамических течений. Проведено исследование по выбору наилучшей модели турбулентности для использования при расчете аэродинамической модели обтекания слоя адсорбента в полости адсорбционной колонны адсорбционного осушителя. Практически подтверждена по критерию сходимости решения оптимальность применения «Spalart-Allmaras (SA) модели» турбулентности. Выполнена аппробация модели путем сравнения полученных результатов решения с результатами расчетов, произведенных с применением альтернативных моделей турбулентности.

Ключевые слова: моделирование, модель турбулентности, воздушный поток, аэродинамика.

Considered the turbulence models used in modern programs of calculation of hydrodynamic flows. Made a study on the selection of the best model of turbulence for use in the calculation of wind flow model of the adsorbent layer in the cavity of the adsorption tower desiccant dryer. Practically confirmed, by the criterion of convergence, the optimal use of "Spalart-Allmaras (SA) model" of turbulence. The model was tested by comparing the results obtained with the results solutions made with the use of alternative models of turbulence.

Keywords: modeling, turbulence model, airflow aerodynamics.

Введение. Математическое моделирование турбулентных течений является исключительно актуальной и быстро развивающейся областью классической и вычислительной гидро- и аэродинамики, при этом ключевым вопросом является поиск приемлемого компромисса между физической адекватностью модели и приемлемым для практического применения уровнем ее сложности [1]. Представление о приемлемости компромисса быстро эволюционирует в сторону все более сложных моделей, что, в свою очередь, требует проведения новых исследований, направленных на определение границ их применимости.

Анализ последних исследований и литературы. В настоящий момент создано большое количество разнообразных моделей для расчёта турбулентных течений: "Spalart-Allmaras", k-e, k-w и ее разновидности, модель Рейнольдсовых напряжений "RSM", "LES" и т. д. [2]. Они отличаются друг от друга сложностью решения и точностью описания течения. Данные модели применяются в различных инженерных расчётах в зависимости от необходимой точности. Практически все они реализованы в современных программах расчёта гидродинамических течений, таких как FlowVision, Autodesk Simulation CFD, Fluent, CFX или OpenFOAM. Все модели имеют преимущества и недостатки.

Цель работы. В настоящей работе рассматривается проблема выбора модели турбулентности, наиболее подходящей для исследования особенностей протекания воздушного потока через слой адсорбирующего вещества методом моделирования указанного процесса с использованием программного пакета FlowVision. Основной целью данной работы является сравнение моделей турбулентности предлагаемых FlowVision, а также их применимости с точки зрения используемых в процессе расчета вычислительных ресурсов.

Постановка проблемы. В ходе математического моделирования процесса протекания потока продувочного воздуха через слой адсорбирующего вещества в потоке наблюдается возникновение зон турбулентности и разности давления (рис. 1). Поскольку скорость газового потока, его турбулентность, температура и давление оказывают большое влияние на скорость динамического испарения, играющую большую роль в процессе регенерации адсорбента, моделирование и изучение протекания продувочного воздуха через слой адсорбента имеет большое значение. При этом возникает проблема выбора модели для расчёта турбулентных течений.

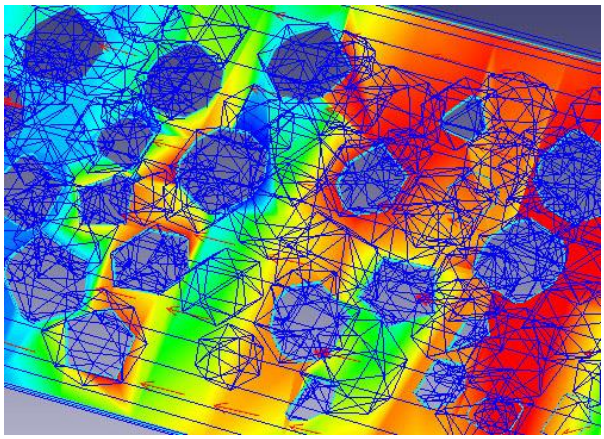

Рис. 1. – Моделирование процесса протекания потока продувочного воздуха через слой адсорбирующего вещества (Градиент Плотность среды)

© С.С. Добротворский, Б.А. Алексенко, Л.Г. Добровольская, 2017

На данный момент не существует универсальной модели турбулентности для широкого диапазона течений. Выбор модели турбулентности зависит от характера турбулентного потока, требуемой точности, доступных вычислительных ресурсов и временных затрат необходимых на процесс моделирования. Для адекватного выбора модели турбулентности необходимо четко представлять свойства и ограничения каждой модели турбулентности.

В настоящем исследовании модель турбулентности выбирается для изучения процесса протекания продувочного воздуха сквозь слой адсорбирующего вещества в адсорбционной колонне осушителя в течение цикла регенерации адсорбента.

Материалы исследований.

Поскольку дать стопроцентную рекомендацию по выбору модели турбулентности в определенных ситуациях практически невозможно, следует, выбрав некоторый критерий, провести экспериментальное сравнение имеющихся моделей и, опираясь на полученные результаты, определиться с моделью турбулентности для конкретной решаемой задачи. Данное исследование проводится путем использования математических методов моделирования исследуемого процесса с применением программного пакета FlowVision, поскольку данный программный продукт позволяет проводить многокритериальную многопараметрическую оптимизацию расчета исследуемой модели за минимальное число итераций.

Для рассмотрения проблемы расчета турбулентности потока используем уравнение Навье-Стокса (1).

$$\begin{gathered} X+\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right)=\frac{du_x}{dt} \\ Y+\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial p_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}\right)=\frac{du_y}{dt} \quad (1) \\ Z+\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial p_{zz}}{\partial z}\right)=\frac{du_z}{dt}, \end{gathered}$$

где: X, Y, Z – удельные массовые силы, м/с^2 ,

p_{xx}, p_{yy}, p_{zz} – проекции нормального напряжения на оси координат, Па,

ρ - плотность, кг/м^3 ,

τ_{ij} – касательные напряжения, Па,

$\frac{du_x}{dt}=\frac{\partial u_x}{\partial t}+\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2}$ – полное ускорение частицы вдоль оси X, м/с^2 ,

u_x, u_y, u_z – проекции скорости на оси координат, м/с.

Для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) используется совокупность полуэмпирических соотношений, в том числе и дифференциальных уравнений, называемых моделью турбулентности. Вопросы замыкания уравнений Рейнольдса решаются на различном уровне сложности, что предопределяет большое разнообразие полуэмперических моделей турбулентности – от сравнительно простых моделей нулевого порядка до моделей с несколькими дополнительными уровнями переноса. Нестационарное решение точных уравнений Навье-Стокса для сложных потоков с большим числом Рейнольдса на данный момент является невозможным. Выделяют два альтернативных способа представления уравнений Навье-Стокса в которых не учитываются мелкомасштабные турбулентные пульсации: метод осреднения по правилам Рейнольдса и метод фильтрации. Обе методики требуют дополнительных уравнений для замыкания всей системы [2]. Также модели турбулентности отличают по числу дифференциальных уравнений, вводимых в дополнение к исходной системе уравнений движения и теплопереноса. Увеличение числа уравнений требует привлечения дополнительной информации полуэмпирического характера для определения модельных коэффициентов и функций, что снижает универсальность модели.

Так, в алгебраических моделях (нулевого порядка) связь между тензором рейнольдсовых напряжений и характеристиками среднего движения задается алгебраическими соотношениями. Современные модели турбулентности данной группы основаны на представлениях о двухслойной структуре турбулентного пограничного слоя и область их применения ограничивается узкой специализацией.

Нелинейные модели турбулентной вязкости получили широкое распространение из-за относительной простоты, вычислительной эффективности и приемлемости для широкого круга свободных и пристенных турбулентных течений. Данная концепция предполагает, что перенос количества движения происходит так же, как и перенос за счет молекулярного движения.

Данные модели характеризуются медленной сходимостью, в связи с чем в вычислительной практике используются сравнительно редко. Сложность расчетов нелинейных моделей приблизительно на 20 % выше, по сравнению с расчетами моделей линейных.

Один из необходимых этапов совершенствования дифференциальных моделей турбулентности состоит в устранении или существенном уменьшении влияния эффектов численной диффузии в расчетах циркуляционных течений. Утверждение о том, что моделирование турбулентности неотделимо от проблем численной реализации моделей турбулентности, в настоящее время является очевидным.

Метод осреднения уравнений Навье-Стокса, предполагающий запись уравнений переноса осредненного по времени потока, со всеми предполагаемыми масштабами турбулентности, значительно уменьшает вычислительные ресурсы, необходимые для решения численной задачи. В том случае, если осредненный поток является стационарным, то основные уравнения не содержат производных по времени и установившееся решение получается более экономичным. Метод осреднения уравнений Навье-Стокса используется в таких моделях турбулентности, как: "Spalart-Allmaras", k-e и ее разновидностях, k-w и ее разновидностях, моделях Рейнольдсовых напряжений "RSM".

Моделирование крупных вихрей "LES" (Lage Eddy Simulations) и использует альтернативный подход, в котором большие вихри решены в нестационарной постановке с использованием системы, так называемых, «фильтрующих» уравнений. Набор «фильтрующих» уравнений по существу служит для исключения из расчета подсеточных вихрей, т. е. вихрей, размер которых меньше ячеек расчетной сетки. Как и в случае осреднения по Рейнольдсу, процесс фильтрации требует добавления специальных уравнений для замыкания всей системы. Статистические величины осредненного потока, которые в основном и имеют практический интерес, представляются в зависимости от времени. Привлекательность "LES" модели заключается в том, что она рассчитывает потери, вызванные самим режимом турбулентного течения, в отличие от моделей турбулентности относящихся к классу "RANS". Применение "LES" модели в промышленных задачах крайне ограничено. Типичное применение данной модели было найдено лишь в достаточно простых геометрических областях, что в основном связано с высокими требованиями данной модели к вычислительным ресурсам.

В моделях турбулентности "Spalart-Allmaras", k-e моделях и k-w моделях используется Гипотеза Буссинеска [3], которая предполагает, что, по аналогии с вязкими напряжениями в ламинарных потоках, турбулентные напряжения пропорциональны градиенту осредненной скорости. Эта гипотеза базируется на рассмотрении турбулентных вихрей как частиц, подобных молекулам в кинетической теории. То есть, вихри заменяют молекулы в роли носителей тепловой энергии и количества движения. Преимущество этой методики заключается в небольших вычислительных ресурсах.

Модель турбулентности "Spalart-Allmaras" является относительно простой, с одним дополнительным уравнением переноса турбулентной вязкости и с точки зрения вычислительных ресурсов является самой экономичной. Эта модель является хорошим выбором для задач с грубой сеткой. Однако, модель "Spalart-Allmaras" является относительно новой и ее использование для широкого класса турбулентных потоков является еще не аппробированным.

Широкое применение в решении практических инженерных задач получила стандартная k-e модель, предложенная Лаундером и Сполдингом [4]. Ошибкоустойчивость, экономичность, и разумная точность для широкого диапазона турбулентных потоков делает ее наиболее применимой в промышленных задачах. Постоянные коэффициенты для этой модели турбулентности получены опытным путем и поэтому она является полуэмпирической. Стандартная k-e модель требует несколько больших вычислительных ресурсов по сравнению с моделью "Spalart-Allmaras", т.к. описывается двумя дополнительными уравнениями переноса.

На базе стандартной k-e с учетом ее недостатков были созданы "RNG" k-e модель и "Realizable" k-e модели. "Realizable" k-e модель требует несколько больших вычислительных усилий по сравнению со стандартной k-e моделью, из-за дополнительных условий и функций в основных уравнениях, а также из-за большей степени нелинейности. Вычисления с помощью "RNG" k-e модели занимает на 10-15% времени центрального процессора больше, чем в случае стандартной k-e модели.

Подобно k-e моделям, k-w модели также являются двухпараметрическими и требуют некоторых вычислительных усилий."SST" k-w модель эффективно сочетает устойчивость и точность стандартной k-w модели в пристеночных областях и k-e модели на удалении от стенок, для этого k-e модель была конвертирована в k-w модель.

Модель Рейнольдсовых напряжений "RSM" (Reynolds Stress Model) и является одной из самых сложных моделей турбулентности. Эта модель не использует предположение о изотропности турбулентной вязкости, а для замыкания уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, решает уравнения переноса для Рейнольдсовых напряжений совместно с уравнением для скорости турбулентной диссипации. По сравнению с k-e и k-w моделями турбулентности "RSM" требует дополнительную память и время центрального процессора из-за увеличения числа уравнений переноса Рейнольдсовых напряжений, также "RSM" модель может потребовать большего количества итераций по сравнению с двухпараметрическими моделями, поскольку в ней заложена ярко выраженная взаимосвязь между Рейнольдсовыми напряжениями и осредненным потоком. В среднем "RSM" требует на 50-60% времени CPU больше, чем двухпараметрические модели турбулентности и на 15-20% больше оперативной памяти. [3] Однако модель "RSM" незаменима в ситуациях, когда анизотропность турбулентного потока оказывает доминирующее влияние на осредненный поток (в высокоскоростных вращающихся потоках и потоках с развитыми вторичными течениями) и имеет больший потенциал для более точного расчета сложных потоков (циклоны, сильно закрученные потоки в камерах сгорания, вращающиеся области, и т. д.)

Помимо временных затрат на итерационный процесс, выбор модели турбулентности может повлиять на сходимость численного решения. Например, стандартная k-e модель является в некоторых случаях сверхдиффузионной, в то время, как "RNG k-e" модель разработана такой, что турбулентная вязкость уменьшается при резких изменениях напряжений. Так как диффузия положительно влияет на сходимость численного решения, то вероятно, что "RNG k-e" модель будет более восприимчивой к неустойчивости в стационарных задачах. Однако, это не является недостатком "RNG k-e" модели, т. к. эта характеристика делает ее более отзывчивой к физической нестабильности, такой как временнозависимые потери турбулентных вихрей.

Для практического сопоставления моделей турбулентности в программной среде FlowVision, была построена аэродинамическая модель обтекания сложной поверхности, образованной группой объемов сферической формы (рис. 2), что обусловлено дальнейшей необходимостью использования модели в процессе расчета условий обтекания слоя адсорбента в полости адсорбционной колонны.

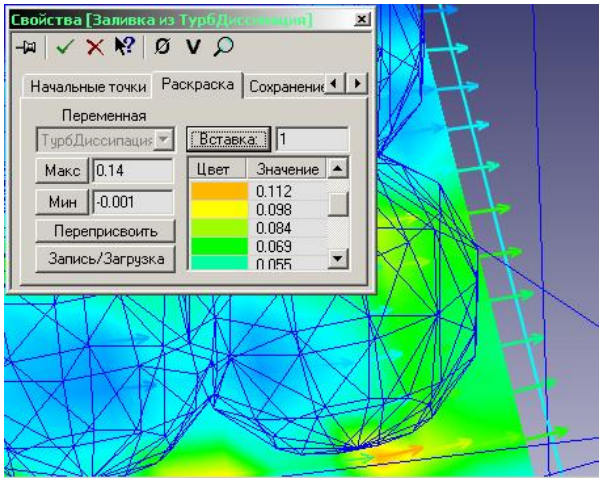

Рис. 2 – Расчет испытательной аэродинамической модели ("Стандартная к-е модель" турбулентности).

Оценка скорости расчета моделей турбулентности проводилась по критерию сходимости численного решения при проведении расчетов по каждой из моделей турбулентности при неизменных параметрах расчета (прил. 1.)

В процессе проведения расчетов получены итерационные графики сходимости решений в процессе расчетов с использованием различных моделей турбулентности (см. рис. 3.1 – 3.7.), практически подтверждающие по критерию сходимости решения преимущество использования "Spalart-Allmaras" модели, как обеспечивающей сходимость решения по уровню <0.1 за 50-70 итераций (см. рис. 3.4.), по сравнению с иными моделями турбулентности, показатель сходимость решения которых по таким расчетным величинам как турбулентная энергия и турбулентная диссипация, за 100 (и более) итераций превышал 0,2 ("SST модель" турбулентности, см. рис. 3.5.), а для прочих моделей не опускался ниже 0,4 (см. рис. 3.1, рис. 3.2, рис. 3.3, рис. 3.6, рис. 3.7.).

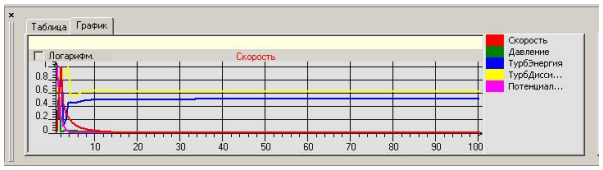

Рис. 3.1 – График сходимости решения, "Стандартная к-е модель" турбулентности

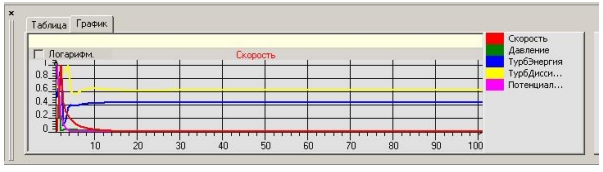

Рис. 3.2 –График сходимости решения, "Низко-Re k-e модель AKN" турбулентности

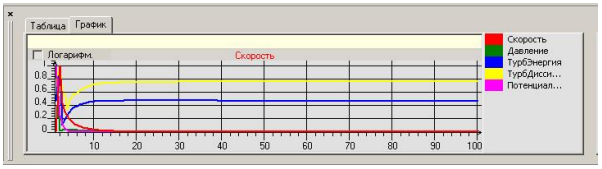

Рис. 3.3 – График сходимости решения, "Квадратичная k-e модель AKN" турбулентности.

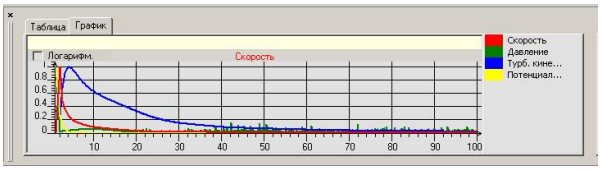

Рис. 3.4 – График сходимости решения, "Spalart-Allmaras модель" турбулентности.

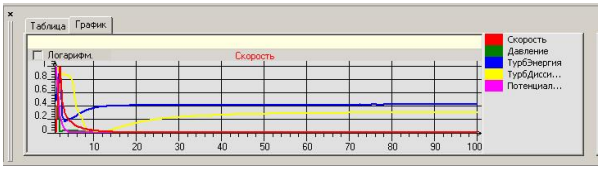

Рис. 3.5 – График сходимости решения, "SST модель" турбулентности.

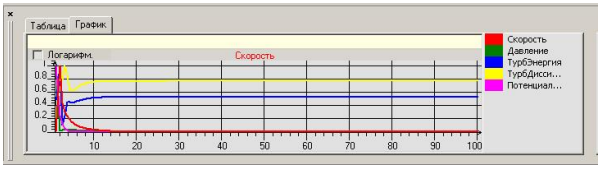

Рис. 3.6 – График сходимости решения, "Низко-Re HL" турбулентности.

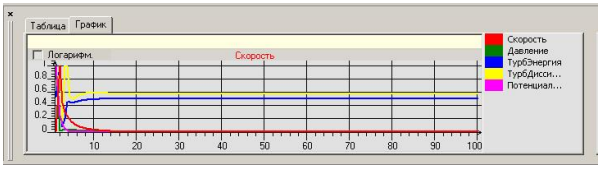

Рис. 3.7 – График сходимости решения, "Низко-Re LS модель" турбулентности.

Приложение 1

Параметры проведения расчетов

Начальные параметры FlowVision		
Параметр		**Значение**
Pr	Число Прандтля	1
Sc	Число Шмидта	1
T-pl	Модель Т-пульсации	Простая
Ka	Число Кармана	0,41
Константа шероховатости		0,246
ΔP (Port1-Port2)		70 kPa
Шаги: неявная схема, КФЛ = 1		Max s. = 1

Результаты исследования. В ходе проводимого исследования выбрана наилучшая модель турбулентности для использования при расчете аэродинамической модели обтекания слоя адсорбента в полости адсорбционной колонны адсорбционного осушителя.

Ценность исследования. Практически подтверждена по критерию сходимости решения оптимальность примененя "Spalart-Allmaras (SA) модели" турбулентности.

Выполнена аппробация модели путем сравнения полученных результатов решения с результатами расчетов, произведенных с применением альтернативных моделей турбулентности.

Список литературы

1. Добротворский С.С. Повышение конкурентоспособности отечественного машиностроительного производства в современных условиях // С.С. Добротворский, Е.В. Басова, Л.Г. Добровольская, А.К. Мялица // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ" : Технологии в машиностроении. Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – Вып.55(42). – С. 25-31.

2. Гарбарук А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур – СПб: Изд-во Политехн. ун- та, 2012. – 88 с.

3. Алексин В. А. Матеатические модели турбулентных течений: Учебное пособие. — М.: МГИУ, 2008. — 54 с.

4. Черный С. Г., Шашкин П. А., Грязин Ю. А. Численное моделирование пространственных турбулентных течений несжимаемой жидкости на основе (k −ε)-моделей // Вычисл. технологии. 1999. Т. 4, №2. С. 74–94.

5. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с. – ISBN 978-5-9221-0920-8.

Bibliography (transliterated)

1. Dobrotvorskiy S.S., Basova E.V., Dobrovolskaya L.G. etc. Povyishenie konkurentosposobnosti otechestvennogo mashinostroitelnogo proizvodstva v sovremennyih usloviyah [*Increase of competitiveness of domestic machine-building production in modern conditions*] Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. No.55(42). pp. 25-31.

2. Garbaruk A.V., Strelets M.H. Modelirovanie turbulentnosti v raschetah slozhnyih techeniy: uchebnoe posobie. SunctPiterburg: Izd-vo Politehn. un- ta. 2012. 88 p. Print.

3. Aleksin V. A. Mateaticheskie modeli turbulentnyih techeniy: Uchebnoe posobie. Moscow. MGIU. 2008. 54 p. Print.

4. Chernyiy S. G., Shashkin P. A., Gryazin Yu. A. Chislennoe modelirovanie prostranstvennyih turbulentnyih techeniy neszhimaemoy zhidkosti na osnove (k-ε)-modeley. Vyichisl. tehnologii. 1999. Vol. 4, No2. pp. 74–94.

5. Volkov K.N., Emelyanov V.N. Modelirovanie krupnyih vihrey v raschetah turbulentnyih techeniy. Moscow. FIZMATLIT. 2008. 368 P. ISBN 978-5-9221-0920-8.

Поступила (received) 05.03.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Удосконалення процесу розрахунку аеродинамічної моделі обтікання шару адсорбенту в порожнині адсорбційної колони за рахунок вибору найкращої моделі турбулентності / С.С. Добротворський, Б.О. Алексенко, Л.Г. Добровольська // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248) – С. 39–43. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

Совершенствование процесса расчета аэродинамической модели обтекания слоя адсорбента в полости адсорбционной колонны за счет выбора наилучшей модели турбулентности / С.С. Добротворский, Б.А. Алексенко, Л.Г. Добровольская // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248) – С. 39–43. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

Improving the process of calculating the aerodynamic flow around the model of the adsorbent layer in the cavity of the adsorption columns by selecting the best model of turbulence / S. Dobrotvorskyy, B. Aleksenko, L. Dobrovolska // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – No 26 (1248). – P. 39–43. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Добротвірської Сергій Семенович - доктор технічних наук, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; тел .: (057) -720-66-25; e-mail: sdobro@mail.ru.

Добротворский Сергей Семенович – доктор технических наук, профессор Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: sdobro@mail.ru.

Dobrotvorsky Sergey Semenovich - Doctor of Technical Sciences, Professor of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) -720-66-25; e-mail: sdobro@mail.ru.

Алексенко Борис Олександрович - аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057) -720-66-25; e-mail: gny4ix@mail.ru.

Алексенко Борис Александрович – аспирант Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: gny4ix@mail.ru.

Aleksenko Boris Aleksandrovich – postgraduate of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) -720-66-25; e-mail: gny4ix@mail.ru.

Добровольська Людмила Георгіївна - кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057) -720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.

Добровольская Людмила Георгиевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.

Dobrovol'skaya Lyudmila Georgiyevna - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) -720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.