

**В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, И. И. Насырова,
О. С. Дмитриева**

ГАЗОДИНАМИКА ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ КЛАССИФИКАТОРА С СООСНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ТРУБАМИ

Ключевые слова: классификатор, фракционирование частиц, модели турбулентности, k-w SST, сеточная независимость.

В статье рассмотрена проблема описания газодинамики внутри упрощенной модели классификатора с соосно расположенными трубами. Представлен краткий обзор фракционирования сыпучего материала в разных классификаторах. Показано, что для каждого конкретного предприятия, как правило, необходима разработка новой модели классификатора или модернизация стандартной модели. Это обусловлено сильно изменяющимися теплофизическими, технологическими и другими параметрами на разных промышленных объектах. Для решения проблемы авторами разработана конструкция классификатора с соосно расположенными трубами. Для увеличения селективности классификатора необходимо более детальное исследование газодинамики внутри устройства. Предложена упрощенная модель классификатора с соосно расположенными трубами. Описан принцип ее действия. Для уменьшения экономических и временных затрат в работе предлагается проводить исследования с помощью численного моделирования в программном комплексе Ansys Fluent. Для адекватного описания газодинамики внутри классификатора рассматриваются несколько моделей турбулентности: k-ε Standard, k-ε RNG, k-ε Realizable, k-w Standard, k-w SST и Spallart-Allmaras. При проведении численных исследований задавались следующие граничные условия: на входе в устройство среднерасходная скорость от 4 до 12 м/с, на выходе из устройства задавалось атмосферное давление. Необходимое минимальное количество элементов в расчетной модели для проведения численных исследований составляет 219668. Установлено, что неопределенность между 219668 и большим количеством элементов составляет не более 0,2%. Сравнение различных моделей турбулентности по потери давления в классификаторе при разных значениях входной скорости газового потока от 4 до 12 м/с с результатами физического эксперимента показало, что наиболее адекватно описывающими газодинамику моделями являются k-w SST и k-ε Realizable. Неопределенность между разными моделями турбулентности и физическим экспериментом составила в среднем не более 7,1%. Погрешность между результатами, полученных с помощью моделей турбулентности k-w SST, k-ε Realizable и экспериментом составила в среднем 0,61 и 1,07% соответственно.

**V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, I. I. Nasyrova,
O. S. Dmitrieva**

GAS DYNAMICS OF THE FLOW PART OF THE CLASSIFIER WITH COAXIALLY ARRANGED PIPES

Keywords: classifier, particle fractionation, turbulence models, k-w SST, grid independence.

The article considers the problem of describing gas dynamics inside a simplified classifier model with coaxially arranged pipes. A brief overview of the fractionation of bulk material in different classifiers is presented. It is shown that for each specific enterprise, as a rule, it is necessary to develop a new classifier model or upgrade the standard model. This is due to the highly variable thermal, technological and other parameters at different industrial facilities. To solve the problem, the authors have developed a classifier design with coaxially arranged pipes. To increase the selectivity of the classifier, a more detailed study of the gas dynamics inside the device is necessary. A simplified classifier model with coaxially arranged pipes is proposed. The principle of its operation is described. To reduce the economic and time costs in the work, it is proposed to conduct research using numerical modeling in the Ansys Fluent software package. For an adequate description of gas dynamics within the classifier, several turbulence models are considered: k-ε Standard, k-ε RNG, k-ε Realizable, k-w Standard, k-w SST and Spallart-Allmaras. When conducting numerical studies, the following boundary conditions were set: at the entrance to the device, the average exit velocity from 4 to 12 m/s, at the exit from the device, atmospheric pressure was set. The required minimum number of elements in the computational model for numerical studies is 219668. It is established that the uncertainty between 219668 and a large number of elements is no more than 0.2%. Comparison of various turbulence models by pressure loss in the classifier at different values of the gas flow input velocity from 4 to 12 m/s with the results of a physical experiment showed that the most adequately describing gas dynamics models are k-w SST and k-ε Realizable. The uncertainty between the different turbulence models and the physical experiment averaged no more than 7.1%. The error between the results obtained using the k-w SST, k-ε Realizable turbulence models and the experiment averaged 0.61 and 1.07%, respectively.

Неотъемлемой задачей на предприятиях по изготовлению катализаторов и адсорбентов в виде сыпучего порошка является их фракционирование. Для этого необходимо произвести подбор аппаратов, позволяющих с требуемой точностью разделять порошок на различные фракции. В настоящее время предложено большое количество классификаторов, отличающихся по принципу действия, геометрическим особенностям и др. параметрам. Одной из ключевых

характеристик классификатора является граничный размер зерен, отражающий границу разделения сыпучего материала, как правило, на две фракции. Подбор определенной модели классификатора для каждого промышленного предприятия является отдельной задачей. Это связано с большим разнообразием технологических, теплофизических и других параметров, влияющих на данный процесс. Они при этом

варьируются на каждом предприятии: параметры сыпучего порошка (плотность, форма частиц, размер и др.), параметры газовой среды (температура, давление, влажность воздуха), расход газа и сыпучего материала, требуемая степень разделения и т.д. Причем большинство моделей классификаторов можно разделить на следующие группы: центробежные, гравитационные и ситовые [1, 2].

Центробежные классификаторы используются для фракционирования сыпучих материалов, размер которых варьируется от нескольких десятков до нескольких сотен микрон. Основной действующей силой в таких аппаратах является центробежная, превосходящая силу тяжести во множество раз.

Центробежные классификаторы разделяются на две группы: динамические и статические. В первом случае турбулентный дисперсный поток производится за счет механического вращения ротора классификатора, во втором случае – пневматически, посредством употребления устремляющего агрегата или тангенциальной подачи невесомого потока в зону классификации. Центробежный классификатор позволяет увеличить эффективность разделения на 10–15% [3].

Гравитационные классификаторы предназначены для разъединения сыпучего материала с помощью инерционных сил. Выбивание из структуры частиц происходит за счет силы тяжести, вследствие чего происходит опускание этих частиц в бункер. Для фракционирования мелких частиц сыпучего материала они не предусмотрены [4].

В ситовых же классификаторах для разделения мелкодисперсного порошка по отдельным фракциям используют сито, представляющее собой тканую сетку с различным размером элементов. Минусом ситовых классификаторов является потребность в периодической очистке и замене сит. Используются ситовые классификаторы с целью распределения тонкодисперсного сыпучего материала с величиной не более 60 мкм [5].

Как отмечалось выше, ввиду большого количества параметров, влияющих на процесс фракционирования сыпучего материала в классификаторе на каждом промышленном предприятии необходим тщательный анализ и подбор определенной модели аппарата. В большинстве случаев, технологическую линию компонуют несколькими различными классификаторами, их устанавливают последовательно или дорабатывают стандартные модели [6, 7].

В некоторых случаях разрабатываются новые классификаторы. Так, например, в работах [8, 9] была предложена новая конструкция классификатора с соосно расположенными трубами для фракционирования сыпучего материала на основе силикагеля с граничным размером зерен равным 30 мкм. Следует отметить, что устройство успешно было апробировано и сейчас используется в технологической линии на предприятии ООО «Салаватский катализаторный завод», которое специализируется на производстве катализаторов и адсорбентов.

Одним из направлений улучшения классификатора с соосно расположенными трубами является по-

вышение селективности разделения дисперсной системы. Следует отметить, что в устройстве определяющей сепарационной силой является центробежная. Очевидно, что для установления числовых диапазонов различных параметров, влияющих на центробежную силу, необходимо исследование газодинамики внутри классификатора. В то же время, для уменьшения экономических и временных затрат при проведении исследований применяют различные программные продукты, позволяющие, как моделировать газодинамику, так и сепарацию частиц из потока. На первом этапе применения программного продукта, помимо построения двухмерной или трехмерной модели и создания расчетной сетки, необходимо определить наиболее подходящую модель турбулентности.

Целью данной работы является подбор модели турбулентности для описания газодинамики в классификаторе с соосно расположенными трубами. Для проведения численного моделирования на первом этапе была создана упрощенная трехмерная модель классификатора (рис. 1). В качестве программного обеспечения использовался Ansys Fluent. Геометрические размеры модели принимались следующими: диаметр входного отверстия 50 мм, диаметр выходного отверстия 80 мм, высота внешнего цилиндра 100 мм, высота внутреннего цилиндра 130 мм, ширина и высота прямоугольных щелей 4 и 30 мм соответственно.

Принцип действия представленной упрощенной модели классификатора с соосно расположенными трубами заключается в следующем: газовый поток входит в устройство через входное отверстие 1, далее опускается до прямоугольных щелей 5 и при движении через них в межтрубное пространство делится на 2 струи, одна из которых движется в правую сторону, вторая в левую, при этом поток приобретает завихренное движение. После чего структурированные вихри движутся в верхнюю часть устройства в межтрубном пространстве и выходят в окружающую среду через выходное отверстие 2 (рис. 1).

На втором этапе исследований производилась генерация расчетной сетки. Следует отметить, что для получения достоверных результатов необходимо создание качественной сетки. Как правило, при ее создании необходимо генерировать большое количество расчетных элементов. С другой стороны, увеличение количества элементов в расчетной модели приводит к более высоким требованиям к вычислительным мощностям. Для того, чтобы создать качественную сетку и максимально снизить нагрузку на вычислительный компьютер, сервер или другой объект, производят различные упрощения, например, сглаживание кромок, переход от 3D к 2D модели, применение периодичности и пр. В связи с тем, что упрощенная модель классификатора с соосно расположенными трубами является осесимметричной, было произведено секторное моделирование. Для этого модель была разделена на 8 равных частей по 45°.

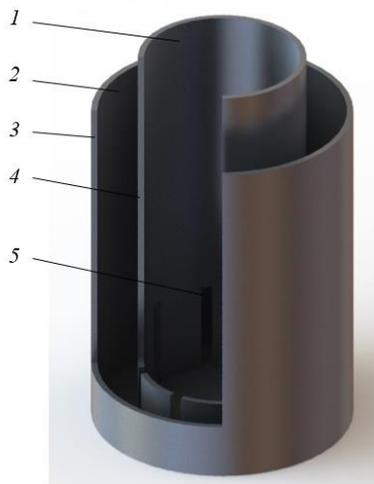


Рис. 1 – Упрощенная трехмерная модель классификатора с соосно расположенными трубами (вид с разрезом): 1 – входное отверстие; 2 – выходное отверстие; 3 – внешний цилиндрический корпус; 4 – внутренний цилиндрический корпус; 5 – прямоугольные щели

Fig. 1 - Simplified three-dimensional model of the classifier with coaxial pipes (sectional view): 1 - inlet; 2 - exit hole; 3 - outer cylindrical body; 4 - inner cylindrical body; 5 - rectangular slots

Таким образом, при создании расчетной сетки в блоке «Mesh» в Ansys Fluent была использована 1/8 часть модели классификатора. Для установления минимального количества элементов проводилось исследование по сеточной независимости. При этом определялись потери давления в устройстве при различном числе расчетных элементов. Между соседними значениями рассчитывалось значение неопределенности. В исследовании упрощенная модель классификатора была разделена на 8850, 17543, 56747, 219668, 878037, 986122 и 3523374 элементов.

На третьем этапе производилось численное моделирование в блоке «Setup» в Ansys Fluent. Определение наиболее подходящей модели турбулентности для описания газодинамики в упрощенной модели классификатора производилось путем сравнения потери давления в устройстве при различной среднерасходной входной скорости газового потока с экспериментальными значениями (рис. 2–3). Следует отметить, что для проведения физических экспериментов упрощенная модель классификатора, представленная на рис. 1, была распечатана на 3D принтере. Для определения объемного расхода воздуха перед устройством устанавливалась труба Вентури, которая также была распечатана на 3D принтере.

Среднерасходная скорость рассчитывалась из уравнения неразрывности потока $G = \rho WF = \text{const}$, где G – массовый расход газа, кг/с; ρ – плотность газа, кг/м³; W – среднерасходная скорость, м/с; F – площадь поперечного сечения, м².

Измерение давления в узкой и широкой частях трубы Вентури и перед упрощенной моделью классификатора с соосно расположенными трубами производилось двумя дифференциальными манометрами testo 510i. Технические характеристики данных

смарт-зондов: диапазон измерений от –150 до 150 кПа, погрешность $\pm 0,05$ кПа (от 0 до 1 кПа), $\pm(0,2$ кПа +1,5% от изм. знач.) для диапазона от 1 до 150 кПа.

После обработки экспериментальных данных было получено, что при изменении среднерасходной скорости газового потока от 4 до 12 м/с потери давления в устройстве составляют от 74 до 670 Па. Таким образом, при проведении численных исследований задавались следующие граничные условия: на входе в устройство среднерасходная скорость от 4 до 12 м/с, на выходе из устройства задавалось атмосферное давление, равное 101325 Па.

Рассматривалось несколько моделей турбулентности: k-ε Standard, k-ε RNG, k-ε Realizable, k-w Standard, k-w SST и Spallart-Allmaras. Следует отметить, что основным уравнением при моделировании газодинамики являлось Навье-Стокса [10]:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f},$$

где ∇ – оператор набла; Δ – векторный оператор Лапласа; t – время, с; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с; p – давление, Па; \vec{v} – векторное поле скорости; \vec{f} – векторное поле массовых сил.

Стандартная k-ε модель является одной из наиболее распространенных, так как очень экономичная к вычислительным ресурсам и позволяет получать результаты приемлемой точности для многих задач. Относительно низкие требования к вычислительным ресурсам в большей степени обусловлены применением пристеночных функций, что позволяет уменьшить плотность сетки в пограничном слое модели. Пристеночные функции не отыскиваются, а описываются эмпирическими формулами. Для описания турбулентных величин в ней применяется система двух нелинейных уравнений – для кинетической энергии турбулентности k и скорости диссипации энергии турбулентности ϵ . Недостатком данной модели является большая неопределенность при расчетах в условиях больших градиентов давления [11, 12].

k-ε RNG модель является модернизированным вариантом стандартной k-ε модели. В частности, имеется дополнительный член в уравнении скорости диссипации энергии турбулентности ϵ , повышающий точность вычислений для высоконапряженных потоков. Данная модель турбулентности позволяет более точно описывать закрученные потоки относительно стандартной k-ε [13, 14].

В k-ε Realizable модели предлагается новая формула для определения турбулентной вязкости и применяется новое уравнение для диссипации ϵ . Недостатком данной модели является получение нефизической турбулентной вязкости в том случае, когда расчетная область включает зоны с турбулентностью и со стационарным флюидом [15, 16].

В стандартной k-w модели решается уравнение для удельной диссипации кинетической энергии турбулентности w . Одним из главных преимуществ данной модели является высокая степень точности описания течений в пристеночной области с высокими градиентами давления. Также модель хорошо описывает структуру потока по каналам с резко изменяющейся геометрией. К недостаткам модели относят

высокую чувствительность к свободному потоку, т.к. большое значение имеют числовые значения k и w .

k - w SST модель турбулентности объединяет преимущества каждой из комбинируемых моделей, рассмотренных выше. Расчет свободного турбулентного потока осуществляется аналогичным образом, как в модели k - ϵ . При этом в пограничном слое k - w SST модель разрешается напрямую, т.е. пристеночные функции не используются. К недостатку данной модели относится завышение уровня турбулентности в «мертвых» областях, где поток практически неподвижен и в областях с высокими ускорениями [17, 18].

Модель Spallart-Allmaras относится к наиболее простым моделям турбулентности, она является однопараметрической. Включает одно дополнительное уравнение переноса турбулентной вязкости. К достоинствам данной модели можно отнести: относительно низкие требования к вычислительным ресурсам и хорошее разрешение пограничных слоев с неблагоприятными градиентами давления. К недостаткам данной модели относится невозможность быстрой адаптации модели к изменению масштаба длины [19, 20].

Результаты исследований показали, что минимальное количество элементов для получения сеточной независимости составляет 219668 при сравнении потери давления в упрощенной модели классификатора с соосно расположенными трубами. Следует отметить, что определение минимального количества элементов производилось при максимальной входной скорости 12 м/с. Это обусловлено тем, что при более высоких скоростях существует вероятность объединения двух соседних вихрей в межтрубном пространстве классификатора. Неопределенность между 8850 и 1753, 17543 и 56747, 56747 и 219668, 219668 и 878037, 878037 и 986122, 986122 и 3523374 составила 6,23, 1,07, 5,32, 0,04, 0,01 и 0,11% соответственно. Таким образом, для снижения требований к вычислительным ресурсам целесообразно применять расчетную сетку с 219668 элементами (табл. 1).

Таблица 1 – Определение минимального количества элементов расчетной сетки

Table 1 - Determination of the minimum number of elements of the computational grid

Количество элементов	Потери давления Δp , Па
8850	623,51
17543	665,01
56747	672,17
219668	709,93
878037	710,21
986122	710,29
3523374	711,1

Сравнение различных моделей турбулентности по потере давления в классификаторе при разных значениях входной скорости газового потока в диапазоне от 4 до 12 м/с с результатами физического эксперимента показало, что наиболее адекватно описывающими газодинамику моделями являются k - w SST и k - ϵ Realizable. Неопределенность между разными

моделями турбулентности и физическим экспериментом составила в среднем не более 7,1%. Анализ результатов показал, что в среднем неопределенность между k - ϵ Standard, k - ϵ RNG, k - ϵ Realizable, k - w Standard, k - w SST и Spallart-Allmaras моделями турбулентности и физическим экспериментом составила 4,03, 5,39, 1,07, 7,10, 0,61 и 3,66% соответственно (рис. 2).

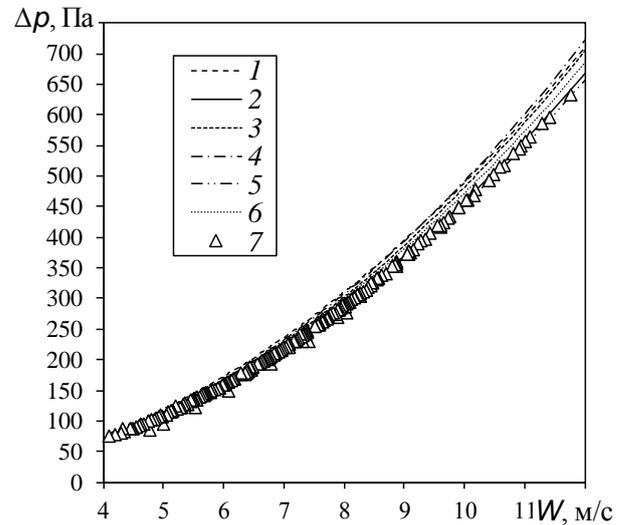


Рис. 2 – Изменение потери давления в классификаторе с соосно расположенными трубами от входной среднерасходной скорости газового потока, модель турбулентности: 1 – k - w Standard; 2 – k - w SST; 3 – k - ϵ Standard; 4 – k - ϵ RNG; 5 – k - ϵ Realizable; 6 – Spallart-Allmaras; 7 – эксперимент

Fig. 2 - Change in pressure loss in the classifier with coaxially located pipes from the inlet average flow velocity of the gas flow, turbulence model: 1 - k - w Standard; 2 - k - w SST; 3 - k - ϵ Standard; 4 - k - ϵ RNG; 5 - k - ϵ Realizable; 6 - Spallart-Allmaras; 7 - experiment

На рис. 3 продемонстрировано в более крупном масштабе сравнение результатов по моделям турбулентности с физическим экспериментом в диапазоне потери давления в классификаторе от 225 до 375 Па и скорости газового потока на входе от 7,5 до 9 м/с. Как видно, результаты, полученные с помощью моделей турбулентности k - w SST и k - ϵ Realizable практически соответствуют результатам эксперимента (рис. 3).

Обработка результатов, полученных при физическом и численном исследованиях, позволила получить нижеследующие уравнения, описывающие изменение потери давления в упрощенной модели классификатора с соосно расположенными трубами от входной скорости газового потока.

При модели турбулентности k - w Standard:
 $\Delta p = 4,5 W^{2,04}$.

При модели турбулентности k - w SST:
 $\Delta p = 4,09 W^{2,05}$.

При модели турбулентности k - ϵ Standard:
 $\Delta p = 3,98 W^{2,08}$.

При модели турбулентности k - ϵ RNG:

$$\Delta p = 3,88 W^{2,10}.$$

При модели турбулентности k-ε Realizable:

$$\Delta p = 4,26 W^{2,03}.$$

При модели турбулентности Spallart-Allmaras:

$$\Delta p = 4,31 W^{2,03}.$$

При физическом эксперименте: $\Delta p = 4,06 W^{2,05}$.

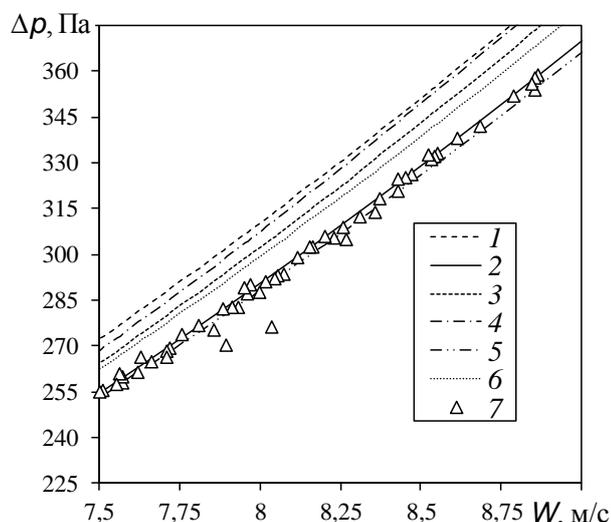


Рис. 3 – Изменение потери давления от 225 до 375 Па в классификаторе с соосно расположенными трубами при входной среднерасходной скорости газового потока 7,5–9 м/с, модель турбулентности: 1 – k-w Standard; 2 – k-w SST; 3 – k-ε Standard; 4 – k-ε RNG; 5 – k-ε Realizable; 6 – Spallart-Allmaras; 7 – эксперимент

Fig. 3 - Change in pressure loss from 225 to 375 Pa in a classifier with coaxially arranged pipes at an inlet average gas flow velocity of 7.5–9 m/s, turbulence model: 1 – k-w Standard; 2 – k-w SST; 3 – k-ε Standard; 4 – k-ε RNG; 5 – k-ε Realizable; 6 – Spallart-Allmaras; 7 – experiment

Таким образом, проведенные исследования показали, что для снижения экономических и временных ресурсов при проведении различных исследований целесообразно использовать численное моделирование с помощью различных программных комплексов, например, Ansys Fluent. Однако, необходимо определить наименьшее допустимое количество элементов в расчетной модели, чтобы максимально снизить требования к вычислительным ресурсам и подобрать модель турбулентности, позволяющую получать результаты, близкие к эксперименту.

На основе проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Необходимое минимальное количество элементов в расчетной модели для проведения численных исследований составляет 219668.

2. Установлено, что неопределенность между 219668 и большим количеством элементов составляет не более 0,2%.

3. Наиболее близкими моделями турбулентности, описывающими изменение потери давления в упрощенной модели классификатора от входной скорости газового потока при физическом эксперименте, являются k-w SST и k-ε Realizable.

4. Погрешность между результатами, полученными с помощью моделей турбулентности k-w SST, k-ε Realizable и экспериментом составила в среднем 0,61 и 1,07 % соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № 2710.2021.4.

Литература

1. P. Fu, Y. Fang, X. Jiang, W. Lv, Y. Huang, Y. Liu, J. Li, Y. Chang, L. Ma, H. Wang, 2020 *J. Cleaner Prod.*, **244** 118782 (2020).
2. А.А. Гарабажиу, *Химическая промышленность*, **82**, 5, 235-244 (2005).
3. X. Yin, W. He, L. Wang, W. Mo, A. Li, *Zurnal prikladnoj spektroskopii*, **88**, 6, 980(1)-980(5) (2021).
4. Y. Jin, H. Lu, X. Guo, X. Gong, *Adv. Powder Technol.*, **30**, 7, 1277-89 (2019).
5. V.I. Kolaitis, M.A. Founti, *Powder Technol.*, **125**, 2–3, 298-305 (2022).
6. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.А. Галиев, *Вестник технологического университета*, **21**, 9, 58-61 (2018).
7. А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, Э.И. Салахова, В.Л. Нгуен, *Вестник технологического университета*, **21**, 11, 59-62 (2018).
8. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, M.A. Ruzanova, O.S. Dmitrieva, *MATEC Web Conf.*, **193**, 01056 (2020).
9. В.Э. Зинуров, И.Н. Мадышев, А.Р. Ивахненко, И.В. Петрова, *Ползуновский вестник*, 2, 205-211 (2021).
10. Я.А. Коркодинов, *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*, 2, 5-16 (2013).
11. В.Г. Судаков, *Ученые записки ЦАГИ*, 1-2 (2003).
12. М.И. Авраменко, *О k-ε модели турбулентности*, РФЯЦ - ВНИИТФ, Снежинск, 2010. 102 с.
13. А.И. Исаев, С.В. Скоробогатов, *Труды МАИ*, 97, 7 (2017).
14. Ю.В. Лапин, М.Х. Стрелец, *Внутренние течения газовых смесей*. Наука, Москва, 1989. 368 с.
15. А.Ю. Снегирёв, *Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений*. Политех. ун-т, Санкт-Петербург, 2009. 143 с.
16. Р.Р. Турубаев, А.В. Шваб, *Вестник Томского гос. ун-та. Математика и механика*, 65, 137-147 (2020).
17. А.В. Гарбарук М.Х. Стрелец А.К. Травин М.Л. Шур, *Современные подходы к моделированию турбулентности*, Политех. ун-т, Санкт-Петербург, 2016. 234 с.
18. Л.Г. Лойцянский, *Механика жидкости и газа*. Наука, Москва, 1987. 840 с.
19. P.R. Spalart, S. Deck, M.L. Shur, K.D. Squires, M.Kh. Strelets, A. Travin, *Theoretical Computational Fluid Dynamics*, **20**, 181-195 (2006).
20. P.E. Smirnov, F.R., *Journal of Turbomachinery*, **131**, 041010 (2009).

References

1. P. Fu, Y. Fang, X. Jiang, W. Lv, Y. Huang, Y. Liu, J. Li, Y. Chang, L. Ma, H. Wang, 2020 *J. Cleaner Prod.*, 244 118782 (2020).
2. А.А. Garabagiou, *Chemical Industry*, 82, 5, 235-244 (2005).
3. X. Yin, W. He, L. Wang, W. Mo, A. Li, *Zurnal prikladnoj spektroskopii*, 88, 6, 980(1)-980(5) (2021).
4. Y. Jin, H. Lu, X. Guo, X. Gong, *Adv. Powder Technol.*, 30, 7, 1277-89 (2019).
5. V.I. Kolaitis, M.A. Founti, *Powder Technol.*, 125, 2–3, 298-305 (2022).
6. A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, O.S. Dmitrieva, A.A. Galiev, *Bulletin of the Technological University*, 21, 9, 58-61 (2018).

7. A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva, E.I. Salakhova, V.L. Nguyen, Bulletin of the Technological University, 21, 11, 59-62 (2018).
8. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, M.A. Ruzanova, O.S. Dmitrieva, MATEC Web Conf., 193, 01056 (2020).
9. V.E. Zinurov, I.N. Madyshev, A.R. Ivakhnenko, I.V. Petrova, Polzunovskiy vestnik, 2, 205-211 (2021).
10. Ya.A. Korkodinov, Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science, 2, 5-16 (2013).
11. V.G. Sudakov, TsAGI Scientific Notes, 1-2 (2003).
12. M.I. Avramenko, On the $k-\epsilon$ model of turbulence, RFNC - VNIITF, Snezhinsk, 2010. 102 p.
13. A.I. Isaev, S.V. Skorobogatov, Proceedings of MAI, 97, 7 (2017).
14. Yu.V. Lapin, M.Kh. Sagittarius, Internal currents of gas mixtures. Nauka, Moscow, 1989. 368 p.
15. A.Yu. Snegirev, High performance computing in technical physics. Numerical modeling of turbulent flows. Polytech. un-t, St. Petersburg, 2009. 143 p.
16. R.R. Turubaev, A.V. Schwab, Bulletin of the Tomsk State University. university Mathematics and Mechanics, 65, 137-147 (2020).
17. A.V. Garbaruk M.Kh. Sagittarius A.K. Travin M.L. Shur, Modern approaches to turbulence modeling, Polytech. un-t, St. Petersburg, 2016. 234 p.
18. L.G. Loitsyansky, Mechanics of liquid and gas. Nauka, Moscow, 1987. 840 p.
19. P.R. Spalart, S. Deck, M.L. Shur, K.D. Squires, M. Kh. Strelets, A. Travin, Theoretical Computational Fluid Dynamics, 20, 181-195 (2006).
20. P.E. Smirnov, F.R., Journal of Turbomachinery, 131, 041010 (2009).

© **В. Э. Зинуров** – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники» ФГБОУ ВО «КГЭУ», vadd_93@mail.ru, **А. В. Дмитриев** – д.т.н., зав. кафедрой «Теоретические основы теплотехники» ФГБОУ ВО «КГЭУ», ieremiada@gmail.com, **И. И. Насырова** – студент кафедры «Теоретические основы теплотехники» ФГБОУ ВО «КГЭУ», iyuza2001@mail.ru, **О. С. Дмитриева** – к.т.н., доцент кафедры ОПТ ФГБОУ ВО «КНИТУ», ja_deva@mail.ru.

© **V. E. Zinurov** – Assistant of the Department of Theoretical Basis of Thermotechnics (TBT), Kazan State Power Engineering University (KSPEU), vadd_93@mail.ru, **A. V. Dmitriev** – Dr. (Technical Sci.), Head of TBT Dep., KSPEU, ieremiada@gmail.com, **I. I. Nasyrova** – student of the TBT dept., KSPEU, iyuza2001@mail.ru, **O. S. Dmitrieva** – PhD (Technical Sci.), Assistant Professor (docent) of the FPE dept., Kazan National Research Technological University, ja_deva@mail.ru.