

7. Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти / Под ред. В. Мори, Д. Фурментро. – М.: Мир, 1994. – 416 с.

8. Алиев М. М., Шафиева С. В. Обобщение графоаналитического метода оценки устойчивости скважин // Научные исследования и инновации. – 2011. – Т. 5, № 2. – С.117–120.

9. Алиев М. М., Шафиева С. В. Оперативный метод определения забойного давления в условиях депрессии // Техника и технология разработки нефтяных месторождений: сб. докл. науч.-техн. конф., посвященной 60-летию разработки Ромашкинского нефтяного месторождения. – М.: ЗАО «Издательство «Нефтяное хозяйство», 2008. – С. 179–181.

10. Алиев М. М., Шафиева С. В., Каримова Н. Г. Применение линейного и параболического критериев разрушения для оценки устойчивости открытых стволов скважин // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2011. – № 2. – С. 9–16.

Сведения об авторах

Шипилова Ольга Александровна, к. т. н., доцент кафедры нефтегазового оборудования и технологии машиностроения, Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, тел. 8(855)3310145, e-mail: o.shipilova@rambler.ru

Шафиева Светлана Владимировна, к. т. н., доцент кафедры нефтегазового оборудования и технологии машиностроения, Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, тел. 8(855)3310145, e-mail: shafieva_sv@mail.ru

Information about the authors

Shipilova O. A., Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Oil and Gas Equipment and Engineering Technology, Almeteyevsk State Oil Institute, phone: 8(855)3310145, e-mail: o.shipilova@rambler.ru

Shafieva S. V., Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Oil and Gas Equipment and Engineering Technology, Almeteyevsk State Oil Institute, phone: 8(855)3310145, e-mail: shafieva_sv@mail.ru

Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

УДК 519.63+533.6

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЫХОДА НА СТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ ИСКУССТВЕННОГО ТОРНАДО

NUMERICAL CALCULATIONS OF ENERGY CHARACTERISTICS FOR SIMULATION THE STEADY-STATE OUTPUT OF AN ARTIFICIAL TORNADO

Р. Е. Волков, А. Г. Обухов, Н. В. Терехова

R. E. Volkov, A. G. Obukhov, N. V. Terekhova

Тюменский государственный университет, г. Тюмень

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Ключевые слова: полная система уравнений Навье — Стокса; краевые условия; параллельные вычисления; газодинамические характеристики

Key words: complete system of Navier — Stokes equations; boundary conditions; parallel computing; gas dynamic characteristics

Получение восходящего закрученного потока воздуха с помощью вертикального продува было предложено в работах [1–5] и успешно реализовано в лабораторных условиях [6, 7]. В этих работах было численно смоделировано возникновение восходящего закрученного потока именно с использованием вертикального продува воздуха. В работе [6] был экспериментально получен восходящий закрученный поток воздуха при продуве через трубу малого диаметра, а в работе [7] — через трубу диаметром 2 метра.

Предложенная модель газа как движущейся сжимаемой сплошной среды, обладающей диссипативными свойствами вязкости и теплопроводности, при численном моделировании возникающих при холодном вертикальном продуве сложных закрученных течений [8] дает основные газодинамические характеристики, совпадающие с данными натуральных экспериментов [9]. Сопоставление рассчитанных и

измеренных численных значений геометрических размеров и кинетических энергий [10] позволило сделать следующий вывод. Энергия вращательного движения, полученная от энергии вращения Земли вокруг своей оси, будет превосходить половину кинетической энергии всего потока только для диаметра вертикальной части потока не менее 5 метров и скорости продува не менее 15 м/с. При этом основной вклад в общую кинетическую энергию восходящего закрученного потока — порядка 97 % — вносит кинетическая энергия вращательного движения. Именно эту часть энергии восходящий закрученный поток получает от энергии вращения Земли.

Следовательно, для получения достаточно больших значений скоростей окружного движения воздуха и достижения выхода на стационарный самоподдерживающийся режим необходимо использовать трубу большего диаметра и большую скорость продува. Речь идет о проведении более масштабного натурного эксперимента.

В данной работе методика распараллеливания алгоритма численного решения полной системы уравнений Навье — Стокса используется для проведения численных экспериментов по исследованию зависимостей энергетических характеристик восходящего закрученного потока воздуха от скорости вертикального продува. В частности, целью работы является установление с помощью численных экспериментов характера изменения энергетических характеристик формирующегося закрученного потока воздуха при выходе его на стационарный режим.

Полная система уравнений Навье — Стокса. Начальные и граничные условия. Для математического моделирования сложных течений воздуха как сжимаемой сплошной среды, обладающей диссипативными свойствами вязкости и теплопроводности, в работе используется полная система уравнений Навье — Стокса, которая в безразмерных переменных с учетом действия сил тяжести и Кориолиса в векторной форме имеет вид [10]

$$\begin{cases} \rho_t + \mathbf{V} \cdot \nabla \rho + \rho \operatorname{div} \mathbf{V} = 0, \\ \mathbf{V}_t + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} + \frac{T}{\gamma \rho} \nabla \rho + \frac{1}{\gamma} \nabla T = \mathbf{g} - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V} + \frac{\mu_0}{\rho} \left[\frac{1}{4} \nabla (\operatorname{div} \mathbf{V}) + \frac{3}{4} \Delta \mathbf{V} \right], \\ T_t + \mathbf{V} \cdot \nabla T + (\gamma - 1) T \operatorname{div} \mathbf{V} = \frac{\kappa_0}{\rho} \Delta T + \frac{\mu_0 \gamma (\gamma - 1)}{2\rho} \left\{ [(u_x - v_y)^2 + \right. \\ \left. + (u_x - w_z)^2 + (v_y - w_z)^2] + \frac{3}{2} [(u_y + v_x)^2 + (u_z + w_x)^2 + (v_z + w_y)^2] \right\}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\mu_0 = 0,001$ и $\kappa_0 \approx 1,46\mu_0$ — значения безразмерных коэффициентов вязкости и теплопроводности.

В системе (1): t — время; x, y, z — декартовы координаты; ρ — плотность газа; $\mathbf{V} = (u, v, w)$ — вектор скорости газа с проекциями на соответствующие декартовы оси; T — температура газа; $\mathbf{g} = (0, 0, -g)$ — вектор ускорения силы тяжести, а $g = \text{const} > 0$; $-2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V} = (av - bw, -au, bu)$ — вектор ускорения силы Кориолиса, где $a = 2\Omega \sin \psi$, $b = 2\Omega \cos \psi$, $\Omega = |\boldsymbol{\Omega}|$; $\boldsymbol{\Omega}$ — вектор угловой скорости вращения Земли; ψ — широта точки O — начала декартовой системы координат $Oxyz$, вращающейся вместе с Землей.

Начальные условия при описании течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа при постоянных значениях коэффициентов вязкости и теплопроводности представляют собой функции, задающие точное решение [11] системы (1)

$$u = 0, v = 0, w = 0, T_0(z) = 1 - kz,$$

$$k = \frac{l x_{00}}{T_{00}}, \quad l = 0,0065 \frac{K}{m}, \quad x_{00} = 50 \text{ м}, \quad T_{00} = 288^\circ K \quad (2)$$

$$\rho_0(z) = (1 - kz)^{\nu-1}, \quad \nu = \frac{\gamma g}{k} = \text{const} > 0. \quad (3)$$

Расчетная область представляет собой прямоугольный параллелепипед с длинами сторон $x^0 = 1$, $y^0 = 1$ и $z^0 = 0,04$ вдоль осей Ox , Oy и Oz соответственно (рис. 1). Для плотности на всех шести гранях параллелепипеда $x = 0$, $x = x^0$, $y = 0$, $y = y^0$, $z = 0$, $z = z^0$ ставится условие непрерывности потока [12]. Краевые условия для компонент вектора скорости газа на боковых гранях соответствуют условиям непрерывности для нормальной составляющей вектора скорости и условиям симметрии для двух других компонент вектора скорости. На нижней и верхней гранях нормальная составляющая скорости соответствует условиям непротекания, а две другие компоненты скорости — условиям симметрии. Для температуры на боковых гранях значения задаются из начального распределения, а на нижней и верхней гранях — соответствуют условиям симметрии. Продув газа через вертикальную трубу моделируется заданием вертикальной скорости течения газа в зависимости от времени t в виде

$$w(t) = M \cdot [1 - \exp(-10t)] \quad (4)$$

через квадратное отверстие размером $0,1 \times 0,1$ в центре верхней грани расчетной области, M — максимальная скорость продува.

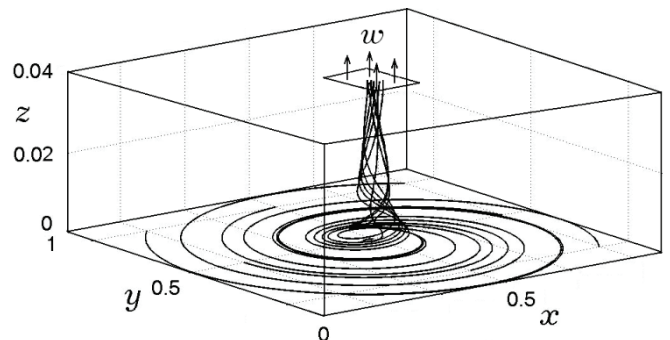


Рис. 1. Расчетная область

Расчеты проводились при следующих входных параметрах: масштабные размерные значения плотности, скорости, расстояния и времени равны соответственно $\rho_{00} = 1,29 \text{ кг/м}^3$, $u_{00} = 333 \text{ м/с}$, $x_{00} = 50 \text{ м}$, $t_{00} = x_{00} / u_{00} = 0,15 \text{ с}$.

Разностные шаги по трем пространственным переменным $\Delta x = \Delta y = 0,005$ (размерное значение $0,25 \text{ м}$), $\Delta z = 0,004$ (размерное значение $0,2 \text{ м}$), а шаг по времени $\Delta t = 0,001$ (размерное значение $0,00015 \text{ с}$).

Суть проведенных численных экспериментов сводится к следующему. Каждый отдельный расчет начинался с моделирования постепенного разгона возникающего восходящего закрученного потока при вертикальном продуве воздуха через верхнее отверстие с постоянной скоростью $w = 20 \text{ м/с}$.

С течением времени возрастают скорости движения воздушного потока в расчетной области D , а следовательно, и его полная кинетическая энергия

$$W = \frac{1}{2} \iiint_D \rho (u^2 + v^2 + w^2) dx dy dz \approx \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \sum_k \rho_{i,j,k} (u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2 + w_{i,j,k}^2) \Delta x \Delta y \Delta z. \quad (5)$$

Вместе с тем растут и скорости окружного (вращательного) движения закрученного потока, вследствие чего возрастает кинетическая энергия вращательного движения

$$W_\varphi = \frac{1}{2} \iiint_D \rho v_\varphi^2 r dr d\varphi dz \approx \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \sum_k \rho_{i,j,k} v_{\varphi i,j,k}^2 r \Delta r \Delta \varphi \Delta z. \quad (6)$$

Возрастание скоростей и энергий восходящего закрученного потока происходит до тех пор, пока он не выйдет на стационарный режим своего функционирования, при котором все термодинамические, скоростные и энергетические характеристики перестают изменяться. Поскольку параметры всех восходящих закрученных потоков воздуха, для которых была проведена эта серия вычислительных экспериментов, были одинаковыми, то время выхода на стационарный режим для них было одно и то же.

После достижения стационарного режима для каждого варианта расчета было выбрано разное продолжение численного эксперимента. А именно, в один и тот же момент времени скачком уменьшалось значение скорости продува до более низкого значения, по сравнению с первоначальным. Результатам изменений в функционировании восходящего закрученного потока после такого скачка скорости продува в каждом из вариантов расчетов посвящено дальнейшее описание вычислительных экспериментов.

Кроме того, для каждого варианта был выполнен численный эксперимент, заключающийся в моделировании разгона закрученного потока воздуха с уменьшенным значением скорости продува до выхода его на соответствующий стационарный режим.

На рисунке 2 представлены графики зависимости от времени полной кинетической энергии (5) W и кинетической энергии вращательного движения (6) W_φ в первой серии численных экспериментов по моделированию потока воздуха в искусственно созданном торнадо.

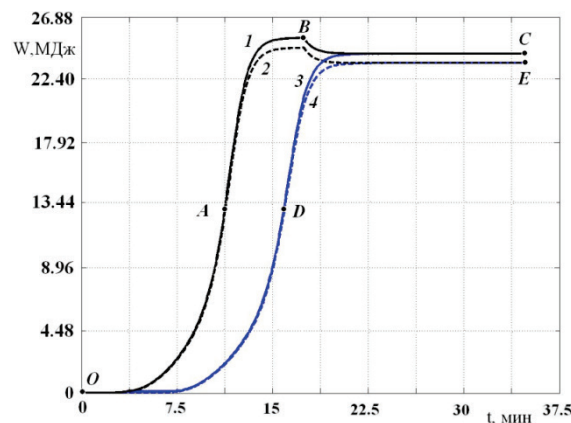


Рис. 2. Зависимость полной кинетической энергии и кинетической энергии вращательного движения от времени в первой серии численных экспериментов

В этой серии численных экспериментов сначала моделировалось возникновение восходящего закрученного потока первоначально покоящегося воздуха с помощью вертикального продува через верхнее отверстие со скоростью $w = 20$ м/с

(сплошная линия 1, соединяющая точки ОАВ) вплоть до выхода всего потока на стационарный режим (точка В). В условиях данного численного эксперимента время выхода на стационарный режим при данной скорости продува составляет 17,5 минут. При этом полная кинетическая энергия потока меняется от нуля до значения 25,39 МДж. На участке ОА изменение полной кинетической энергии от времени описывается экспоненциальной функцией $W(t) = ae^{t/b}$, где коэффициенты $a = 0,094$, $b = 2,278$. На участке АВ изменение полной кинетической энергии от времени аппроксимируется функцией $W(t) = a + \frac{b}{1 + e^{-\frac{t-c}{d}}}$, где коэффициенты $a = 5,81$, $b = 19,59$, $c = 11,62$, $d = 0,73$.

После выхода на стационарный режим (точка В на сплошной линии 1) начинается следующий численный эксперимент, который заключается в том, что скорость продува в этот момент времени резко уменьшается с 20 до 19,5 м/с. Такое резкое уменьшение скорости продува сопровождается постепенным уменьшением скоростных характеристик закрученного потока, а следовательно, полной кинетической его энергии с постепенным выходом на другой стационарный режим с более низким уровнем кинетической энергии. На участке ВС это изменение полной кинетической энергии потока подчиняется закону $W(t) = a + \frac{b}{1 + e^{-\frac{t-c}{d}}}$, где коэффициенты $a = 24,26$, $b = 38,72$, $c = 14,83$, $d = -0,75$. Данный численный эксперимент показал, что при таком незначительном скачкообразном изменении скорости продува на 0,5 м/с численный алгоритм сохраняет свою устойчивость, а весь поток после незначительного снижения величины скоростей выходит на новый стационарный режим с пониженным значением полной кинетической энергии. Пунктирной линией 2 изображена зависимость от времени кинетической энергии вращательного движения (см. рис. 2). Расчеты показывают, что эти два вида кинетической энергии практически совпадают в течение всего времени разгона потока. Различие между ними начинает проявляться лишь при приближении к стационарному состоянию (к точке В). Кинетическая энергия вращательного движения к моменту выхода на стационарный режим в этой точке составляет 24,68 МДж или 97 % от полной кинетической энергии потока. Это соотношение между полной кинетической энергией и кинетической энергией вращательного движения сохраняется и для участка стационарного режима с пониженными значениями кинетической энергии.

И третий численный эксперимент в первой серии заключается в том, что моделируется появление восходящего закрученного потока покоящегося воздуха с помощью вертикального продува через верхнее отверстие сразу с пониженной скоростью $w = 19,5$ м/с (сплошная линия 3, соединяющая точки ОДС) вплоть до выхода всего потока на стационарный режим (см. рис. 2). И оказалось, что при этом выход потока на стационарный режим происходит чуть медленнее (за 20 минут), однако на точно такие же значения кинетических энергий и, следовательно, на такие же значения скоростей, как и у стационарного режима после скачкообразного понижения скорости продува.

Следовательно, в одно и то же стационарное состояние потока воздуха можно прийти двумя различными способами: либо разгонять поток с большей скоростью продува, а затем резко уменьшать скорость продува, либо начинать разгонять поток сразу с уменьшенным значением скорости продува до выхода потока на тот же окончательный стационарный режим. При этом время выхода на стационарный режим одинаковое.

Результаты второй серии численных экспериментов по моделированию потока воздуха в искусственно созданном торнадо представлены на рисунке 3.

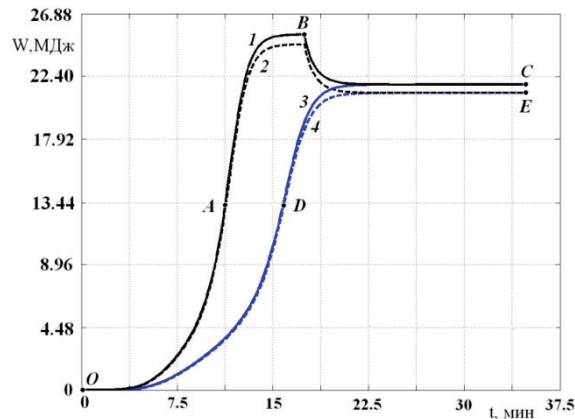


Рис. 3. Зависимость полной кинетической энергии и кинетической энергии вращательного движения от времени во второй серии численных экспериментов

В этой серии численных экспериментов сначала также моделировалось появление восходящего закрученного потока воздуха при вертикальной скорости продува $w = 20$ м/с (сплошная кривая 1, соединяющая точки OAB) до выхода потока на стационарный режим (точка B). В этой серии численных экспериментов время выхода на стационарный режим, значения кинетических энергий и функции их зависимостей от времени сохраняются такими же, как и в первой серии численных экспериментов.

После выхода на стационарный режим (точка B на сплошной линии 1) скорость продува скачком уменьшается до значения 19 м/с. Такое резкое уменьшение скорости продува сопровождается постепенным уменьшением полной кинетической его энергии с постепенным выходом на другой стационарный режим с еще более низким уровнем кинетической энергии. На участке BC это изменение полной кинетической энергии потока подчиняется закону $W(t) = a + \frac{b}{1 + e^{\frac{t-c}{d}}}$, где коэффициенты $a = 21,82$, $b = 175,66$, $c = 14,16$, $d = -0,84$.

Данный численный эксперимент показал, что при таком скачкообразном изменении скорости продува на 1 м/с численный алгоритм так же сохраняет свою устойчивость, а весь поток после снижения величины скоростей выходит на новый стационарный режим с пониженным значением полной кинетической энергии. Пунктирной линией 2 изображена зависимость от времени кинетической энергии вращательного движения. Расчеты показывают, что различие между этими видами кинетической энергии начинает проявляться при приближении к стационарному состоянию (к точке B). В третьем численном эксперименте этой серии моделируется появление восходящего закрученного потока покоящегося воздуха с помощью вертикального продува через верхнее отверстие с пониженной скоростью $w = 19$ м/с (сплошная линия 3, соединяющая точки ODC) вплоть до выхода всего потока на стационарный режим. Выход потока на стационарный режим происходит за 22,5 минуты на такие же значения энергии, как и у стационарного режима после скачкообразного понижения скорости продува.

Результаты третьей серии численных экспериментов по моделированию потока воздуха в искусственно созданном торнадо представлены на рисунке 4.

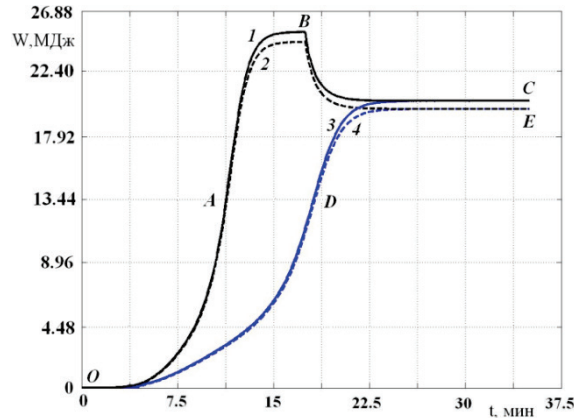


Рис. 4. Зависимость полной кинетической энергии и кинетической энергии вращательного движения от времени в третьей серии численных экспериментов

В этой серии численных экспериментов сначала также моделировалось появление восходящего закрученного потока воздуха при вертикальной скорости продува $w = 20$ м/с до выхода потока на стационарный режим. После выхода на стационарный режим (точка В на сплошной линии 1) скорость продува скачком уменьшается до значения 18,5 м/с. Такое уменьшение скорости продува приводит к постепенному уменьшению полной кинетической энергии потока с постепенным выходом на другой стационарный режим с еще более низким уровнем кинетической энергии. На участке ВС это изменение полной кинетической энергии потока подчиняется закону $W(t) = a + \frac{b}{1 + e^{\frac{t-c}{d}}}$, где коэффициенты $a = 20,48$, $b = 312,69$,

$c = 13,66$, $d = -0,91$. Данный численный эксперимент показал, что при таком скачкообразном изменении скорости продува на 1,5 м/с численный алгоритм так же сохраняет устойчивость, а весь поток после снижения величины скоростей выходит на новый стационарный режим с пониженным значением полной кинетической энергии. Пунктирной линией 2 изображена зависимость от времени кинетической энергии вращательного движения. Расчеты так же показывают, что различие между этими видами кинетической энергии начинает проявляться при приближении к стационарному состоянию. Здесь так же моделируется появление восходящего закрученного потока покоящегося воздуха с вертикальной скоростью продува с пониженной скоростью $w = 18,5$ м/с. Выход потока на стационарный режим происходит за 26,25 минуты на такие же значения кинетических энергий, как и у стационарного режима после скачкообразного понижения скорости продува.

Наконец, результаты четвертой серии численных экспериментов представлены на рисунке 5. В этой серии численных экспериментов после моделирования выхода на стационарный режим восходящего закрученного потока воздуха при вертикальной скорости продува $w = 20$ м/с (в точке В на сплошной линии 1) скорость продува скачком уменьшается до значения 18 м/с. Такое уменьшение скорости продува приводит к уменьшению полной кинетической энергии потока с постепенным выходом на стационарный режим с еще более низким уровнем кинетической энергии. На участке ВС это изменение полной кинетической энергии потока подчиняется закону $W(t) = a + \frac{b}{1 + e^{\frac{t-c}{d}}}$, где коэффициенты $a = 17,38$, $b = 755,91$,

$c = 12,26$, $d = -1,13$.

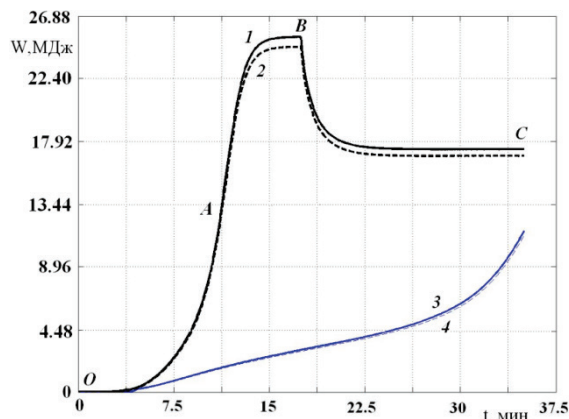


Рис. 5. Зависимость полной кинетической энергии и кинетической энергии вращательного движения от времени в четвертой серии численных экспериментов

Пунктирной линией 2 изображена зависимость от времени кинетической энергии вращательного движения. В этом численном эксперименте моделирование возникновения восходящего закрученного потока с вертикальной скоростью продува $w = 18$ м/с показало, что выхода потока на стационарный режим за время 37 минут не произошло. Рост кинетической энергии при такой скорости продува происходит гораздо медленнее, чем в предыдущих расчетах. Тем не менее, экстраполяция значений кинетической энергии позволяет приближенно оценить время выхода на стационарное состояние, которое составляет порядка 45 минут.

Выводы

Благодаря предложенной методике распараллеливания алгоритма численного решения полной системы уравнений Навье — Стокса в данной работе проведен обширный численный эксперимент по изучению зависимости скоростных и энергетических характеристик восходящего закрученного потока воздуха от скорости вертикального продува. Подобные зависимости имеют принципиальное значение для формулирования конкретных предложений для проведения масштабного натурного эксперимента по созданию восходящего закрученного потока, инициированного вертикальным продувом газа.

Исследования поддержаны Министерством образования и науки РФ (проект №1.4539.2017/8.9).

Библиографический список

1. Абдубакова Л. В., Обухов А. Г. Численный расчет скоростных характеристик трехмерного восходящего закрученного потока газа // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2014. – № 3 – С. 88–94.
2. Обухов А. Г., Абдубакова Л. В. Численный расчет термодинамических характеристик трехмерного восходящего закрученного потока газа // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математические науки. Информатика – 2014. – № 7. – С. 157–165.
3. Абдубакова Л. В., Обухов А. Г. Численный расчет термодинамических параметров закрученного потока газа, инициированного холодным вертикальным продувом // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2014. – № 5. – С. 57–62.
4. Абдубакова Л. В., Обухов А. Г. Расчет плотности, температуры и давления трехмерного восходящего закрученного потока газа при вертикальном продуве // Нефтегазовое дело. – 2014. – Т. 12, № 3. – С. 116–122.
5. Обухов А. Г., Абдубакова Л. В. Численный расчет скоростных характеристик закрученного потока газа, инициированного холодным вертикальным продувом // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2015. – Т. 1, № 2 (2). – С. 124–130.
6. Баутин С. П., Баутин К. В., Макаров В. Н. Экспериментальное подтверждение возможности создания потока воздуха, закрученного силой Кориолиса // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 2 (18). – С. 27–33.
7. Баутин С. П., Макаров В. В. Создание потока воздуха, закрученного силой Кориолиса при использовании трубы двухметрового диаметра Кориолиса // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 4 (32). – С. 39–45.

8. Волков Р. Е., Обухов А. Г. Параллельные вычисления в исследованиях зависимости газодинамических параметров восходящего закрученного потока газа от скорости продува // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2016. – № 1. – С. 92–97.
9. Волков Р. Е., Обухов А. Г. Метод распараллеливания алгоритма численного решения полной системы уравнений Навье — Стокса // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2016. – № 2. – С. 92–98.
10. Разрушительные атмосферные вихри и вращение Земли вокруг своей оси / С. П. Баутин [и др.]. – Екатеринбург: УрГУПС, 2017. – 336 с.
11. Баутин С. П., Обухов А. Г. Одно точное стационарное решение системы уравнений газовой динамики // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2013. – № 4. – С. 81–86.
12. Баутин С. П., Обухов А. Г. Об одном виде краевых условий при расчете трехмерных нестационарных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2013. – № 5. – С. 55–63.

Сведения об авторах

Волков Роман Евстафьевич, аспирант кафедры алгебры и математической логики, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, тел. 89129211245, e-mail: email@romanvolkov.ru

Обухов Александр Геннадьевич, д. ф.-м. н., профессор кафедры бизнес-информатики и математики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89220014998, e-mail: aobukhov@tsogu.ru

Терехова Наталья Владимировна, к. пед. н., доцент кафедры бизнес-информатики и математики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89224777065, e-mail: snv7101@rambler.ru

Information about the authors

Volkov R. E., Postgraduate at the Department of Algebra and Mathematical Logics, Tyumen State University, phone: 89129211245, e-mail: email@romanvolkov.ru

Obukhov A. G., Doctor of Physics and Mathematics, Professor at the Department of Business Informatics and Mathematics, Industrial University of Tyumen, phone: 89220014998, e-mail: aobukhov@tsogu.ru

Terekhova N. V., Candidate of Pedagogy, Associate Professor at the Department of Business Informatics and Mathematics, Industrial University of Tyumen, phone: 89224777065, e-mail: snv7101@rambler.ru

Машины, оборудование и обустройство промыслов

УДК 621.35

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ХРОМИРОВАНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ STRUCTURAL PECULIARITIES OF THE PROCESS OF ELECTROLYTIC CHROMIUM PLATING IN RESTORATION OF WORN PARTS

И. М. Ковенский, С. В. Малыш, В. В. Поветкин

I. M. Kovenskiy, S. V. Malyshev, V. V. Povetkin

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

*Ключевые слова: электролитическое хромирование; термо-эдс;
дырочный полупроводник; структура поверхности*

*Key words: electrolytic chromium plating; thermal EMF; hole semiconductor;
surface structure*

При восстановлении изношенных тяжело нагруженных деталей электролитическим хромированием возможны виды брака, когда осаждение хрома происходит только на отдельных участках детали или же покрытие отслаивается при последующем шлифовании. В работе [1] на специально подготовленных образцах экспериментально показано, что при разбросе величины термо-эдс по поверхности более 100 mV хром осаждается только в местах с наименьшим значением термо-эдс. На основании этих данных высказано предположение о возможности контроля качества подготовки поверхности для электролитического хромирования по результатам анализа распределения термо-эдс по поверхности детали.