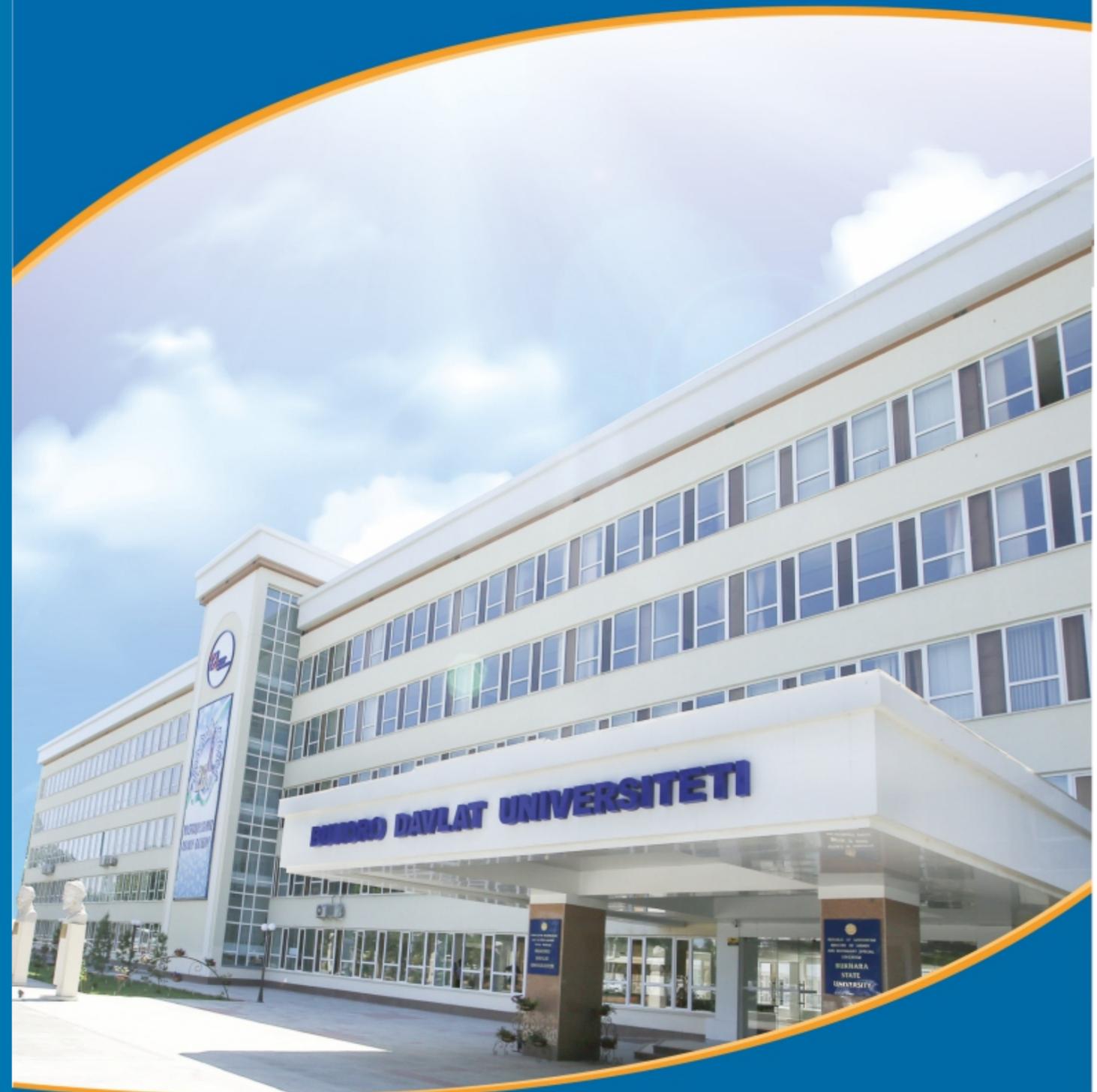


# BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI ILMIY AXBOROTI

Научный вестник Бухарского государственного университета  
Scientific reports of Bukhara State University

6/2023



**BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI ILMIY AXBOROTI**  
**SCIENTIFIC REPORTS OF BUKHARA STATE UNIVERSITY**  
**НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК БУХАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Ilmiy-nazariy jurnal**  
**2023, № 6, iyul**

Jurnal 2003-yildan boshlab **filologiya** fanlari bo'yicha, 2015-yildan boshlab **fizika-matematika** fanlari bo'yicha, 2018-yildan boshlab **siyosiy** fanlar bo'yicha O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasining dissertatsiya ishlari natijalari yuzasidan ilmiy maqolalar chop etilishi lozim bo'lgan zaruriy nashrlar ro'yxatiga kiritilgan.

Jurnal 2000-yilda tashkil etilgan.  
Jurnal 1 yilda 12 marta chiqadi.

Jurnal O'zbekiston matbuot va axborot agentligi Buxoro viloyat matbuot va axborot boshqarmasi tomonidan 2020-yil 24-avgust № 1103-sonli guvohnoma bilan ro'yxatga olingan.

**Muassis: Buxoro davlat universiteti**

**Tahririyat manzili:** 200117, O'zbekiston Respublikasi, Buxoro shahri Muhammad Iqbol ko'chasi, 11-uy.  
**Elektron manzil:** nashriyot\_buxdu@buxdu.uz

**TAHRIR HAY'ATI:**

**Bosh muharrir:** Xamidov Obidjon Xafizovich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

**Bosh muharrir o'rinbosari:** Rasulov To'liq Husenovich, fizika-matematika fanlari doktori (DSc), professor

**Mas'ul kotib:** Shirinova Mexrigiyo Shokirovna, filologiya fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

**Kuzmichev Nikolay Dmitriyevich,** fizika-matematika fanlari doktori (DSc), professor (N.P. Ogaryov nomidagi Mordova milliy tadqiqot davlat universiteti, Rossiya)

**Danova M.,** filologiya fanlari doktori, professor (Bolgariya)

**Margianti S.E.,** iqtisodiyot fanlari doktori, professor (Indoneziya)

**Minin V.V.,** kimyo fanlari doktori (Rossiya)

**Tashqarayev R.A.,** texnika fanlari doktori (Qozog'iston)

**Mo'minov M.E.,** fizika-matematika fanlari nomzodi (Malayziya)

**Mengliyev Baxtiyor Rajabovich,** filologiya fanlari doktori, professor

**Adizov Baxtiyor Rahmonovich,** pedagogika fanlari doktori, professor

**Abuzalova Mexriniso Kadirovna,** filologiya fanlari doktori, professor

**Amonov Muxtor Raxmatovich,** texnika fanlari doktori, professor

**Barotov Sharif Ramazonovich,** psixologiya fanlari doktori, professor, xalqaro psixologiya fanlari akademiyasining haqiqiy a'zosi (akademigi)

**Baqoyeva Muhabbat Qayumovna,** filologiya fanlari doktori, professor

**Bo'riyev Sulaymon Bo'riyevich,** biologiya fanlari doktori, professor

**Jumayev Rustam G'aniyevich,** siyosiy fanlar nomzodi, dotsent

**Djurayev Davron Raxmonovich,** fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Durdiyev Durdimurod Qalandarovich,** fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Olimov Shirinboy Sharofovich,** pedagogika fanlari doktori, professor

**Qahhorov Siddiq Qahhorovich,** pedagogika fanlari doktori, professor

**Umarov Baqo Bafoyevich,** kimyo fanlari doktori, professor

**Murodov G'ayrat Nekovich,** filologiya fanlari doktori, professor

**O'rayeva Darmonoy Saidjonovna,** filologiya fanlari doktori, professor

**Navro'z-zoda Baxtiyor Nigmatovich,** iqtisodiyot fanlari doktori, professor

**Hayitov Shodmon Ahmadovich,** tarix fanlari doktori, professor

**To'rayev Halim Hojiyevich,** tarix fanlari doktori, professor

**Rasulov Baxtiyor Mamajonovich,** tarix fanlari doktori, professor

**Eshtayev Alisher Abdug'aniyevich,** iqtisodiyot fanlari doktori, professor

**Quvvatova Dilrabo Habibovna,** filologiya fanlari doktori, professor

**Axmedova Shoira Nematovna,** filologiya fanlari doktori, professor

**Amonova Zilola Qodirovna,** filologiya fanlari doktori (DSc), dotsent

**Hamroyeva Shahlo Mirjonovna,** filologiya fanlari doktori (DSc), dotsent

**Nigmatova Lola Xamidovna,** filologiya fanlari doktori (DSc), dotsent

**Boboyev Feruz Sayfullayevich,** tarix fanlari doktori

**Jo'rayev Narzulla Qosimovich,** siyosiy fanlar doktori, professor

**Rasulov Zubaydullo Izomovich,** filologiya fanlari doktori (DSc), dotsent

**Qurbonova Gulnoz Negmatovna,** pedagogika fanlari doktori (DSc), professor

**Zaripov Gulmurot Toxirovich,** texnika fanlari nomzodi, dotsent

<b>MUNDARIJA *** СОДЕРЖАНИЕ *** CONTENTS</b>		
<b>ANIQ VA TABIIY FANLAR *** EXACT AND NATURAL SCIENCES *** ТОЧНЫЕ И ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ</b>		
<b>Hasanov I.I.</b>	Kasr tartibli diffuziya tenglamasi uchun Koshi masalasi	4
<b>Murodova U.M.</b>	Cisco Packet Tracer dasturida IoT qurilmalar tarmog'ini loyihalash	11
<b>Turdiyev H.H., Xidirov U.B., Subhonova N.U.</b>	O'zgarmas koeffitsiyentli tashqi manbaga ega integro-differensial issiqlik tarqalish tenglamasidan xotira funksiyasini aniqlash masalasi	16
<b>Subhonova Z.A., Davlatova D.S.</b>	Ko'p o'lchamli kasr tartibli to'lqin tenglamasi uchun qo'yilgan Koshi masalasining yechiluvchanligi	27
<b>Маликов З.М., Наврузов Д.П., Жумаев Ж.</b>	Численное исследование закрученных струйных течений при различной степени закрутки на основе двух-жидкостной модели турбулентности	32
<b>Раззокова М.Б.</b>	Математическое моделирование переноса тепла в плоском солнечном коллекторе	39
<b>Тураев М.М., Наимова М.Ф.</b>	Развитие прудового рыбоводства и аквакультуры в Узбекистане: рациональное использование водных и земельных ресурсов	46
<b>Шадманов И.У.</b>	Эффективный численный алгоритм для расчёта процессов взаимосвязанного тепло-влажпереноса в пористых телах	51
<b>Qurbonov H., Vozorova O'.B., Absalamova D.B.</b>	<b>M G 1 N</b> va <b>G J M 1 N-1</b> Ikkilanma xizmat ko'rsatish sistemalari statsionar navbat uzunliklari taqsimotlari uchun asimptotik munosabatlar	60
<b>Хайриева Ш.С.</b>	Математик ҳисоблашларни ўқитишда ахборот технологиялари воситалари ва уларнинг имкониятлари	66
<b>Turayev A.A., Turayev O.G', Raximova S.M.</b>	Application of superconductor materials in medicine	71
<b>Ergashov A.Q.</b>	Taus metodidan foydalangan holda yarimo'tkazgich fotoanod tarkibidagi qatlamlarning taqiqlangan zona kengligini aniqlash	75
<b>TILSHUNOSLIK *** LINGUISTICS *** ЯЗЫКОЗНАНИЕ</b>		
<b>Ahmadova U.Sh.</b>	Hunarmandchilik sohasi perifrazarida milliy-madaniy xususiyatlar	84
<b>Babayev J.S.</b>	Joint stylistic devices	89

УДК: 532.3

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННЫХ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ  
РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ЗАКРУТКИ НА ОСНОВЕ ДВУХ-ЖИДКОСТНОЙ МОДЕЛИ  
ТУРБУЛЕНТНОСТИ**

**Маликов Зафар Маматкулович,**

*Лаборатория «Механика жидкости, газа и систем гидроприводов»  
института механики и сейсмостойкости сооружений им.  
М.Т. Уразбаева АН РУз, Ташкент, Узбекистан.*

*malikov.z62@mail.ru*

**Наврззов Дилиод Примкулович,**

*Бухарский Институт управления природными ресурсами  
Национального исследовательского университета «ТИИИМСХ».*

*navruzov.d@mail.ru*

**Жумаев Жура,**

*Бухарский государственный университет*

*j.jumayev@buxdu.uz*

**Аннотация.** В данной статье проводится исследование закрученной струи на основе двух-жидкостной модели турбулентности. Данная задача, несмотря на её простоту, является достаточно сложной проблемой для многих моделей турбулентности. Данная модель выведена на основе динамики двух жидкостей. В данном исследовании показано, что разработанная двух-жидкостная модель способна адекватно описывать сложные анизотропные турбулентности. Полученные численные результаты сопоставлены с опытными данными из базы данных ERCOFTAC. Показано, что результаты двух-жидкостной модели, несмотря на использование довольно грубой расчётной сетки, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** закрученная струя, двух-жидкостная модель, схема против потока, степень закрутки, равномерная сетка.

**IKKI SUYUQLIK TURBULENTLIK MODELI ASOSIDA TURBUL DARAJALI AYLANGAN  
JET OQIMLARI SONINI TEKSHIRISH**

**Аннотация.** Ushbu maqolada aylanma oqim jarayonining ikki suyuqlik turbulentlik modeli yordamida olingan tadqiqot natijalari keltirilgan. Ushbu masala soddadek ko'ringani bilan ko'pgina turbulentlik modellari uchun muammolar tug'diradi. Tadqiqotda qo'llanilayotgan model ikki suyuqlik dinamikasi asosida keltirib chiqarilgan. Ushbu tadqiqotda ikki suyuqlik modelining murakkab turbulent anizotropik jarayonlarni ham modellashtirish mumkinligi ko'rsatilgan. Olingan sonli natijalar ERCOFTAC ma'lumotlar bazasidagi tajriba natijalari bilan solishtirilgan. Ikki suyuqlik modelidan foydalangan vaqtda nisbatan qo'pol hisoblash to'rlaridan foydalangan vaqtda ham tajriba qiymatlariga yaqin natijalar olinishi mumkinligi ko'rsatilgan.

**Калит so'zlar:** aylanma oqim, ikki suyuqlik modeli, oqimga qarshi sxema, aylantirish darajasi, teng qadamli to'r.

**NUMERICAL INVESTIGATION OF SWIRLING JET FLOWS WITH DIFFERENT  
DEGREES OF SWIRLING BASED ON A TWO-LIQUID TURBULENCE MODEL**

**Abstract.** In this article, a swirling jet is studied on the basis of a two-fluid turbulence model. This task, despite its simplicity, is quite a difficult problem for many turbulence models. This model is derived based on the dynamics of two-liquids. These papers also show that the developed two-fluid model is able to adequately describe complex anisotropic turbulence. The numerical results obtained are compared with experimental data from the ERCOFTAC database. It is shown that the results of the two-fluid model, despite the use of a rather coarse computational grid, are in satisfactory.

**Keywords:** swirled jet, two-fluid model, counter-flow scheme, degree of twist, uniform mesh.

**Введение.** Закрученные потоки в связи с их многочисленными практическими приложениями представляют собой важный раздел современной гидродинамики. Сложность этих течений стимулирует использование при их изучении самых современных методов исследования. Повсеместно осваиваемые методы численного моделирования, различные тонкие методы измерений, в том числе и бесконтактные, которые перестают быть достоянием отдельных исследовательских лабораторий, получают всё более широкое распространение и позволяют надеяться на значительный прогресс в изучении и предсказании свойств сложных гидродинамических процессов, в том числе и течений с закруткой [1,2]. Закрученные течения широко распространены. Они наблюдаются во многих явлениях природы и часто используются в технике. В качестве примера можно указать на циклоны и торнадо в атмосфере, на водовороты в реках и водоёмах, на вихревой след, оставляемый крылом самолета, на сепараторы и теплообменные аппараты циклонного типа, на дождевальные и разбрызгивающие удобрения сельскохозяйственные машины, на струйные насосы и химические реакторы с вихревым течением. Даже при анализе полёта бумеранга и пчелы используются элементы теории закрученных течений. В технических устройствах с горением интенсивно используется существенное и благоприятное воздействие, оказываемое закруткой подводимых потоков воздуха и топлива на стабилизацию и интенсификацию процесса горения, для обеспечения эффективного и экологически чистого сжигания топлива в самых различных практических областях: в бензиновых и дизельных двигателях, в газовых турбинах и газотурбинных двигателях, в промышленных топках, котлах, а также в ряде других нагревательных систем. Как показывают экспериментальные исследования, закрутка радикальным образом влияет на поле течения – такие важные его свойства и характеристики, как распространение и затухание струй и эжекция вещества струей в инертных потоках, размеры и форма пламени и интенсивность горения в реагирующих потоках, существенно зависят от степени закрутки, сообщённой потоку [3,4].

Влияние начальной закрутки потока на поле течения резко возрастает при увеличении степени закрутки (выраженной параметром закрутки  $S$  или углом установки лопаток  $\varphi$ ). Влияние слабой закрутки ( $S < 0.4$ ) сводится к увеличению ширины свободной или ограниченной струи. Увеличение ширины струи и уменьшение скорости в струе происходят интенсивнее при увеличении степени закрутки [5-8]. Для прикладных задач с горением одним из наиболее существенных и полезных явлений в закрученных струйных течениях можно считать существование рециркуляционной зоны, образующейся в центральной части при сверхкритических значениях параметра закрутки ( $S = 0.6$  для закручивающих устройств с прямым выходом). Численные исследования закрученных потоков со стандартными моделями турбулентности с двумя уравнениями  $k$ - $\epsilon$  показали, что эти модели могут существенно недооценивать скорости смешивания, поэтому для улучшения результатов интенсивно проводятся модификации существующих моделей [9-12, 26]. Такие методы как прямое численное моделирование (Direct Numerical Simulation (DNS)) и метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation (LES)) трудоёмкие, и использование их для решения сложных инженерных задач аэродинамики требуют высокоскоростных вычислительных машин. Поэтому их широкое практическое применение связано с развитием компьютерной техники и по оценкам специалистов может начаться лишь в конце нынешнего столетия. Поэтому в ближайшее время основным рабочим инструментом для решения прикладных задач аэродинамики всё ещё будут оставаться полуэмпирические методы.

Ещё одним подходом к описанию турбулентности является, так называемый двух-жидкостный подход. Данный подход был предложен Сполдингом [13-14]. С помощью данного подхода в работах [15] исследовались неустойчивость Рэлея – Тейлора, в [16] процесс горения, в [17] турбулентные стратифицированные течения, в [18] ограниченное и свободное турбулентные сдвиговые течения и т.д. Дальнейшее развитие двух-жидкостного подхода продемонстрировано в работах [19-20]. В этих работах представлена способность двух-жидкостного подхода с большой точностью описывать турбулентные процессы переноса импульса и тепла в анизотропных турбулентных течениях. Поэтому целью данной работы является применение двух-жидкостной модели для исследования такой сложной задачи, как закрученной струи. Полученные численные результаты сопоставляются с экспериментальными данными из базы данных ERCOFTAC [21].

#### **Постановка задачи.**

Система уравнений несжимаемой турбулентной струи в двух-жидкостной модели имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial t} + \bar{V}_j \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{p}}{\rho \partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial x_i} \right) - v_j v_i \right], \\ \frac{\partial v_i}{\partial t} + \bar{V}_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} &= -\rho v_j \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu_{ji} \left( \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{F_{si}}{\rho} + \frac{F_{fi}}{\rho}, \\ v_{ji} &= 3\nu + 2 \left| \frac{v_i v_j}{\text{def}(\bar{V})} \right| \quad \text{npu } i \neq j, \quad v_{ii} = 3\nu + \frac{1}{\text{div} \bar{v}} \left| \frac{v_k v_k}{\text{def}(\bar{V})} \right| \frac{\partial v_k}{\partial x_k}, \\ \vec{F}_f &= -\rho K_f \bar{v}, \quad \vec{F}_s = \rho C_s \text{rot} \bar{V} \times \bar{v}, \quad \frac{\partial \rho \bar{V}_j}{\partial x_j} = 0, \quad K_f = C_1 \lambda_{\max} + C_2 \frac{|\vec{d} \cdot \bar{v}|}{d^2}. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Двух-жидкостная модель будет использована для исследования закрученной струи, истекающая в затопленное пространство. Известно, что закрученная струя характеризуется такими параметрами как степень закрутки  $S$  и число Рейнольдса  $Re$ . В рассматриваемой задаче закрученная струя истекает в затопленное пространство из круглого сопла и эти параметры равны

$$Re = \frac{DU_0}{\nu} = 56000, \quad S = \frac{\int_0^R V_{0\varphi} V_{0z} r^2 dr}{R \int_0^R V_{0z}^2 r dr}$$

Здесь  $D, R$  - диаметр и радиус сопла,  $U_0$  - максимальная продольная скорость потока на выходе из трубы,  $\nu$  - кинематическая вязкость,  $V_{0z}, V_{0\varphi}$  - продольная и тангенциальная скорости потока на выходе из сопла.

Для исследования осесимметричной закрученной струи запишем систему уравнений (1) в цилиндрических координатах:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{\partial r V_r}{r \partial r} &= 0 \\ \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{\partial V_z}{r \partial r} \right) - \frac{\partial r \mathcal{G}_r \mathcal{G}_z}{r \partial r} \\ \frac{\partial V_r}{\partial t} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} &= \frac{V_\varphi^2}{r} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{\partial V_r}{r \partial r} - \frac{V_r}{r^2} \right) - \frac{\partial r \mathcal{G}_r \mathcal{G}_r}{r \partial r} \\ \frac{\partial V_\varphi}{\partial t} + V_z \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} + V_r \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + \frac{V_r V_\varphi}{r} &= \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{\partial V_\varphi}{r \partial r} - \frac{V_\varphi}{r^2} \right) - \frac{\partial r^2 \mathcal{G}_r \mathcal{G}_\varphi}{r^2 \partial r} \\ \frac{\partial \mathcal{G}_z}{\partial t} + V_z \frac{\partial \mathcal{G}_z}{\partial z} + V_r \frac{\partial \mathcal{G}_z}{\partial r} &= -(1 - C_s) \frac{\partial V_z}{\partial r} \mathcal{G}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_{zr} \frac{\partial \mathcal{G}_z}{\partial r}) - C_r \mathcal{G}_z \\ \frac{\partial \mathcal{G}_r}{\partial t} + V_z \frac{\partial \mathcal{G}_r}{\partial z} + V_r \frac{\partial \mathcal{G}_r}{\partial r} &= -C_s \frac{\partial V_z}{\partial r} \mathcal{G}_z - \left( C_s \frac{\partial r V_\varphi}{r \partial r} - \frac{2V_\varphi}{r} \right) \mathcal{G}_\varphi + \\ &+ \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_{r\varphi} \frac{\partial \mathcal{G}_r}{\partial r}) - 2v_{\varphi\varphi} \frac{\mathcal{G}_r}{r^2} - C_r \mathcal{G}_r \\ \frac{\partial \mathcal{G}_\varphi}{\partial t} + V_z \frac{\partial \mathcal{G}_\varphi}{\partial z} + V_r \frac{\partial \mathcal{G}_\varphi}{\partial r} &= -(1 - C_s) \frac{\partial r V_\varphi}{r \partial r} \mathcal{G}_r + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} [r^2 v_{r\varphi} \left( \frac{\partial \mathcal{G}_\varphi}{\partial r} - \frac{\mathcal{G}_\varphi}{r} \right)] - C_r \mathcal{G}_\varphi \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Экспериментальные значения параметров потока на срезе сопла аппроксимировались следующими выражениями:

$$\begin{aligned} V_{0\varphi} &= 2Sr^2(4 + n_w)(1 - r)^{n_w} \quad V_{0z} = (1 + x_k)(1 - r)^{x_k} \\ n_w &= 4 \text{ u } x_k = 0.06 \end{aligned} \quad (6)$$

Относительные скорости на выходе из сопла были равны:

$$v_z = 0.025, \quad v_r = 0.1r^{0.75}, \quad v_\varphi = 0.1r^{0.75}.$$

Для расчётов использовалась сетка размером 250x250 с шагами  $\Delta z = 0.2$ ,  $\Delta r = 0.02$ . Уравнения в безразмерный вид приводились соотношением всех скоростей к  $U_0$ , а пространственные масштабы к радиусу трубы. Интегрирование по времени проводилось безразмерным шагом  $\Delta t = 0.02$ .

Для обеспечения устойчивости при решении уравнений системы (3) в конвективных членах использована явная разностная схема против потока Леонардо QUICK [22], а для диффузионных членов использовалась центральная разность в неявном виде. Известно, что схема Леонардо QUICK имеет третьего порядка точности для структурированных расчётных сеток. Следовательно, расчётная схема имела точность первого порядка по времени и второго по пространству. Для реализации полунявной схемы использовался метод прогонки. Связь между давлением и скоростями проводилась процедурой SIMPLE [23], где был использован итерационный метод нижней релаксации [24].

#### Численные результаты и обсуждение.

На рисунке 1 показаны численные результаты для безразмерной осевой продольной скорости в зависимости от расстояния до среза сопла [25]. Здесь также представлены опытные данные из [21] для профилей безразмерной осевой скорости при закрутке  $S=0.36$ . Из рисунка видно, что соответствие полученных результатов к опытным данным удовлетворительное.

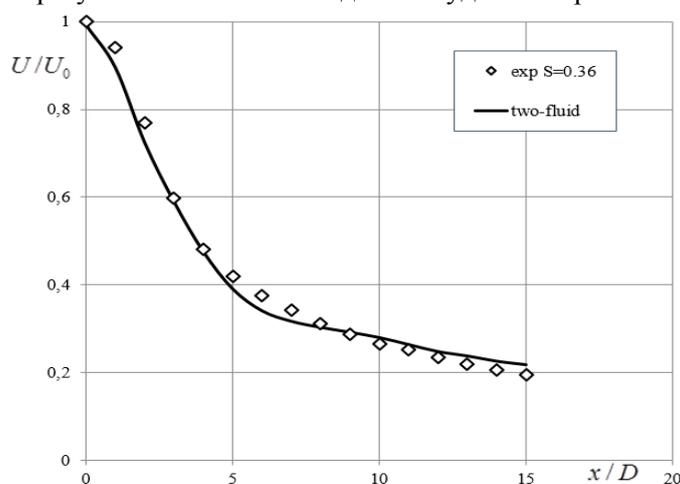


Рисунок 1. Безразмерная осевая продольная скорость в зависимости от расстояния до среза сопла

На рисунке 2 показаны результаты двух-жидкостной модели. Здесь также представлены опытные данные из [21] для профилей безразмерной осевой скорости при закрутке  $S=0.23$ .

На рисунке 3 а) и б) приводятся результаты профиля продольной скорости при малой закрутке.

На рисунке 4 а) и б) приводятся результаты профиля продольной скорости при умеренной закрутке.

Аналогичные результаты для профиля тангенциальной при большой степени закрутки представлены на рисунке 5. Известно, что для получения удовлетворительных результатов для закрученных потоков необходимо сгущение расчётной сетки как в продольном, так и в радиальном направлениях.

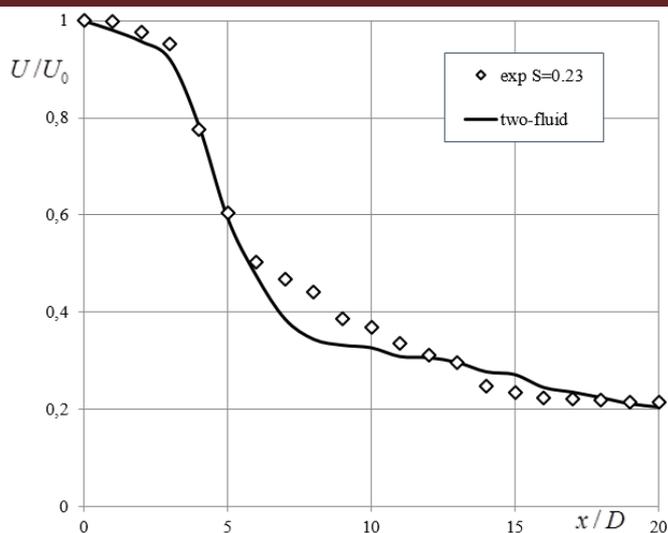


Рисунок 2. Безразмерная осевая продольная скорость в зависимости от расстояния до среза сопла

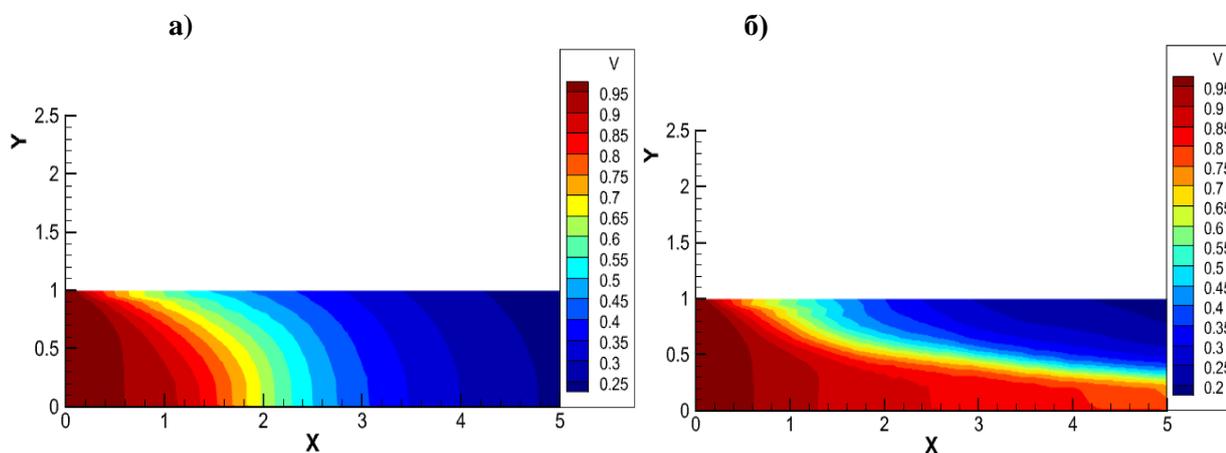


Рисунок 3. Профиль продольной скорости при малом степени закрутки

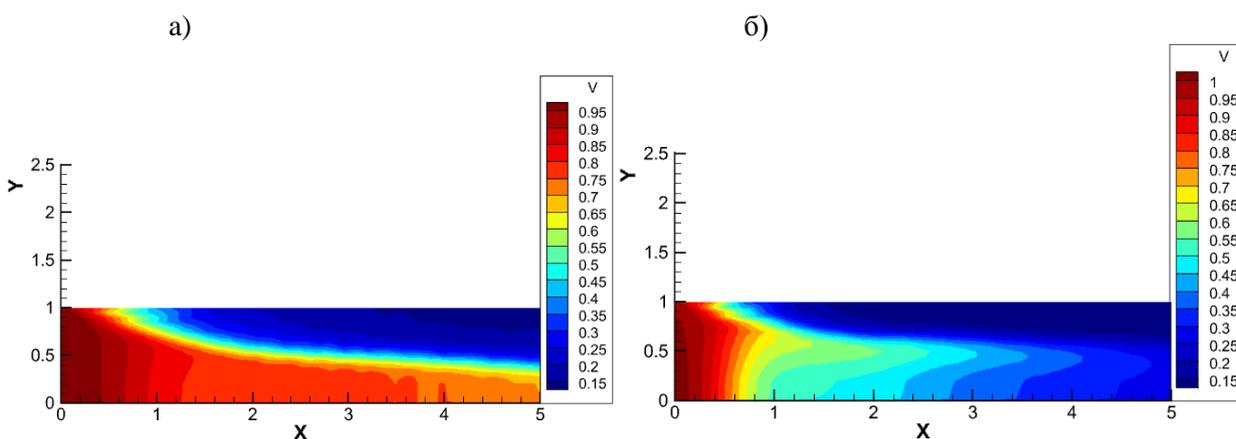


Рисунок 4. Профиль продольной скорости при умеренном степени закрутки

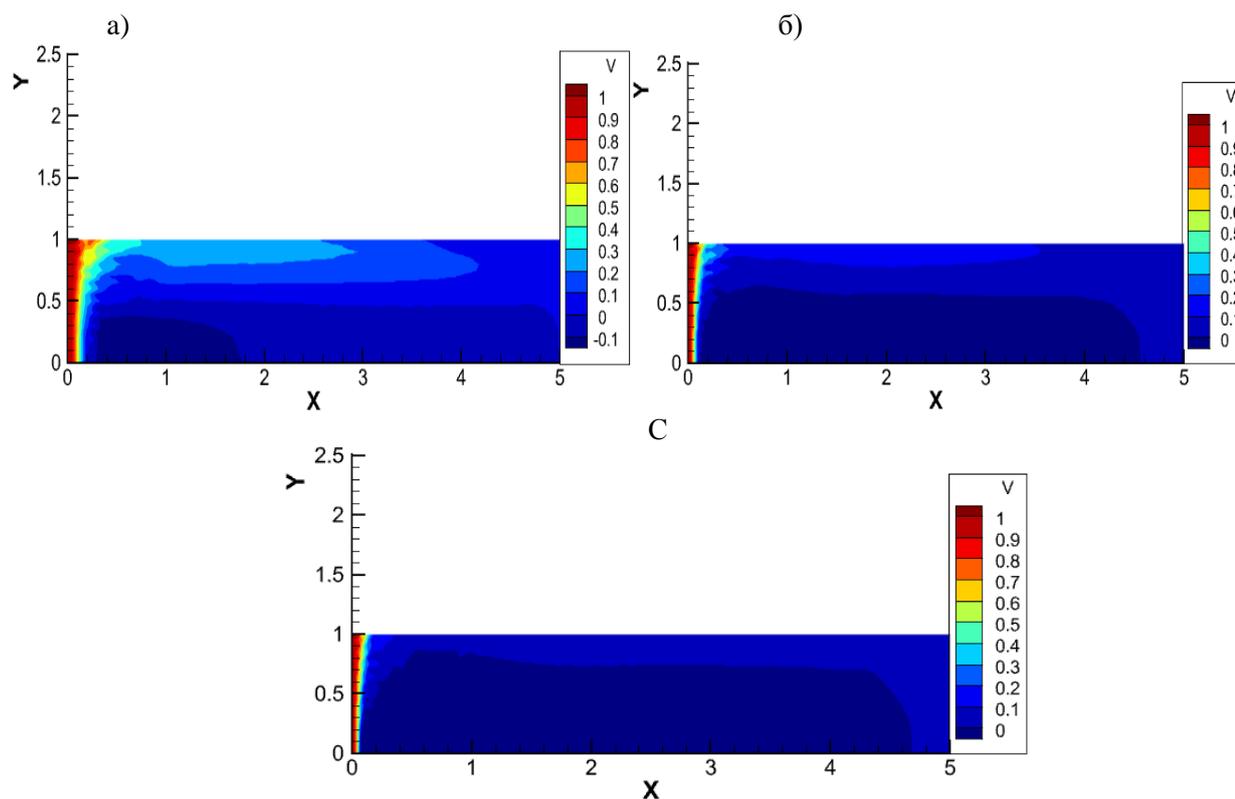


Рисунок 5. Профиль продольной скорости при большом степени закрутки

**Заключение.** В работе для исследования закрученной струи использована двух-жидкостная модель турбулентности. Полученные результаты показывают, что модель турбулентности способна адекватно описывать динамику закрученной струи, несмотря на использования грубой равномерной расчётной сетки. Данное обстоятельство является одним из достоинств предлагаемой модели, потому что многие модели RANS требуют высокого разрешения расчётных сеток и достаточно маленьких шагов интегрирования по времени. Что касается двух-жидкостной модели, интегрирование можно вести существенно крупными шагами по времени. Следующим моментом, как показано в работе [19] является то, что двух-жидкостная модель не страдает аномалией «круглой струи». Смысл данной аномалии заключается в том, что практически все RANS модели для круглой струи дают расширение потока почти в полтора раза больше, чем опытные данные. Поэтому во всех RANS моделях для устранения этой аномалии вводятся специальные поправки. Двух-жидкостная модель способна давать более хорошие результаты, если использовать более мелкую расчётную сетку или провести её гущение на выходе из сопла и в области пограничного слоя.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Son E., Murodil M. Numerical Calculation of an Air Centrifugal Separator Based on the SARC Turbulence Model // *Journal of Applied and Computational Mechanics*. – 2020. <https://doi.org/10.22055/JACM.2020.31423.1871>
2. Arunajatesan, S. and Sinha, N., “Hybrid RANS-LES Modeling for Cavity Aeroacoustics Predictions,” *International Journal of Aeroacoustics*, Vol. 2, No. 1, pp 65-91, 2003.
3. Arunajatesan, S.A., and Dash, S.M., “Progress Towards Hybrid RANS-LES Modeling For High-Speed Jet Flows,” *Paper No. AIAA-2002-0428*, 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, January 14-17, 2002.
4. Sinha, N., Hosangadi, A., and Dash, S.M., “The CRAFT NS Code and Preliminary Applications to Steady/Unsteady Reacting, Multi-phase Jet/Plume Flowfield Problems,” *CPIA Pub. 568* May 1991.

5. Rai, M.M., and Moin, P., "Direct Numerical Simulation of Transition and Turbulence in a Spatially Evolving Boundary Layer," *Journal of Computational Physics*, Vol. 109, pp.1 62-192, 1993.
6. Forsythe, J.R., "Numerical Computation of Turbulent Separated Supersonic Flow Fields", Ph.D Thesis, Wichita State University, 2000.
7. Smirnov, A., Shi, S., and Celik, I., "Random Flow Generation Technique for Large Eddy Simulations and Particle-Dynamics Modeling", *Trans. ASME. Journal of Fluids Engineering*. Vol. 123, pp.359-371, 2001.
8. M. G. Hall, *Vortex breakdown*, *Ann. Rev. Fluid Mech.* 4 (1972), 195–218.
9. A. K. Gupta, D. G. Lilley., N. Syred, *Swirl Flows*, Abacus Press, Cambridge, MA, 1984.
10. O. Lucca-Negro, T. O'Doherty, *Vortex breakdown: A review*, *Prog. Energy Combust. Sci.* 27 (4) (2001), 431–481.
11. K. Oberleithner, C. O. Paschereit, R. Seele, I. Wygnanski, *Formation of turbulent vortex breakdown: Intermittency, criticality, and global instability*, *AIAA J.* 50 (7) (2012), 1437–1452.
12. Spalding D.B. *A turbulence model for buoyant and combusting flows*. 4-th Int. Conf. on Numerical methods in Thermal Problems, Swansea, 15-18 July 1984. Also, as Imperial College report CFD/86/4 (1984).
13. Spalding D.B. *Chemical reaction in turbulent fluids*. *J. Physico-chemical Hydrodyn.*, 4 (1983), pp. 323 – 336.
14. G. A. Hoshoudi. *Rayleigh-Taylor instability in a magnetized quantum plasma taking into account viscosity*. *Plasma Physics*, 2011, Volume 37, No. 9, pp. 831-840
15. Markatos N.C. Kotsifaki C.A. *One-dimensional, two-fluid modelling of turbulent premixed flames*. *Appl. Math. Modell.* 18 (1994), pp. 646 – 657.
16. Y.M. Shen, C.-O. Ng, A.T. Chwang. *A two-fluid model of turbulent two-phase flow for simulating turbulent stratified flows*. *Ocean Eng.*, 30 (2003), pp. 153 – 161
17. A.V. Starchenko, R.B. Nuterman, E.A. Danilkin. *Numerical study of turbulent flows and pollution transport in street canyons*. 2015, Tomsk University Press
18. Malikov Z.M. *Mathematical Model of Turbulence Based on the Dynamics of Two Fluids*. *Applied Mathematical Modelling* 82 (2020) pp.409–436.
19. "European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion", [ercoftac.org](http://ercoftac.org)
20. Leonard B P 1979 *A stable and accurate convective modeling procedure based on quadratic upstream interpolation*. *Comp Meth Appl Mech Eng* 19, pp 59–98.
21. Patankar S.V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Taylor&Francis. ISBN 978-0-89116-522-4, 1980.
22. Zafar Mamatqulovich Malikov, Rabim Alikulovich Fayziev, Dilshod Primqulovich Navruzov, Bekzod Zafar ugli Malikov. "Simulation of swirling flows based on modified two-fluid turbulence model", *Proceedings of the 6th International Conference on Future Networks & Distributed Systems*, 2022
23. Jumayev J., Mustapakulov Ya., Kuldoshev H. *Numerical algorithm for modeling turbulence in a jet with diffusion combustion// 14th international Conference on Application of information and Communication technologies(AICT)*. *Conference Proceedings.(Tashkent, 7-9 okt. 2020)*. pp. 1-4. DOI 10.1109/AICT50176.2020.9368857
24. Жумаев Ж., Опокина Н.А. *Решение математических задач в пакетах математических программ Maxima и MathCAD*. *Электронный учебник*. Казань: КФУ, 2021. – 228 с.
25. Jumayev J., Shirinov Z., Kuldoshev H. *Computer simulation of the convection process near a vertically located source//International conference on information Science and Communications Technologiyes (ICISCT)* 4-6 november. 2019. *Conference Proceedings*. pp.635-638. DOI: 10.1109/ICISCT47635.2019.9012046

УДК: 532

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В ПЛОСКОМ  
СОЛНЕЧНОМ КОЛЛЕКТОРЕ

*Раззокова Мохинур Баходир кизи,*  
*стажёр-исследователь кафедры «Прикладная*  
*математика и технологии программирования»*  
*Бухарского государственного университета*  
*m.b.razzokova@buxdu.uz*

**Аннотация:** в работе представлена модель турбулентности RSM к моделированию турбулентного переноса тепла. Показано, что флуктуация температуры в турбулентном потоке обусловлена разностью температур этих жидкостей. На основе модели турбулентности RSM построена математическая модель турбулентной теплопроводности. Полученная математическая модель турбулентности использована для исследования турбулентного распространения тепла при обтекании плоской пластины. Для верификации модели численные результаты сопоставлены с экспериментальными данными. Полученные результаты показали, что RSM модель турбулентного переноса с большой точностью описывает термодинамические свойства турбулентного потока.

**Ключевые слова:** турбулентный перенос тепла, обтекание пластины, число Нуссельта, схема QUICK, метод контрольного объема, алгоритм SIMPLE.

YASSI QUYOSH KOLLEKTORIDA ISSIQLIK TASHISHNI MATEMATIK  
MODELLASHTIRISH

**Annotatsiya:** Ishda turbulent issiqlik tashish simulyatsiyasi uchun turbulentlik modeli RSM taqdim etilgan. Turbulent oqimidagi harorat fluktuatsiyasi (o'rtacha qiymatdan chetlashish) shu suyuqliklar orasidagi haroratlar farqi bilan bog'liqligi ko'rsatilgan. RSM turbulentlik modeli asosida turbulent issiqlik tashishning matematik modeli yaratilgan. Olingan matmatik modeldan yassi plastina atrofidagi oqim bo'yicha turbulent issiqlik tarqalishini o'rganish uchun foydalanildi. Model to'g'ri tuzilganligini tekshirish uchun raqamli natijalar tajriba yo'li bilan olingan ma'lumotlar bilan taqqoslangan. Olingan natijalar turbulent tashishning RSM modeli turbulent oqimning termodinamik xususiyatlarini katta aniqlik bilan tavsiflashni ko'rsatdi.

**Kalit so'zlar:** turbulent issiqlik tashish, plastina atrofidagi oqim, Nusselta soni, QUICK sxemasi, hajmiy nazorat usuli, SIMPLE algoritmi.

MATHEMATICAL MODELING THERMAL CONDUCTIVITY IN  
A FLAT SOLAR COLLECTOR

**Abstract:** the paper presents the turbulence model RSM to the simulation of turbulent heat transfer. It is shown that the temperature fluctuation in a turbulent flow is due to the temperature difference between these liquids. Based on the RSM turbulence model, a mathematical model of turbulent heat transfer is constructed. The obtained mathematical model of turbulence is used to study the turbulent heat propagation in the flow around a flat plate. To verify the model, the numerical results are compared with and experimental data. The obtained results showed that the RSM model of turbulent transport describes the thermodynamic properties of turbulent flow with great accuracy.

**Keywords:** turbulent heat transfer, plate flow, Nusselt number, QUICK scheme, control volume method, SIMPLE algorithm.

**Введение.** На сегодняшний день в связи с растущим спросом на тепловую энергию, постоянным ростом цен на энергоносители, а также сокращением топливно-энергетических ресурсов и загрязнением атмосферного воздуха актуальной задачей является широкое применение возобновляемых источников энергии. Использование возобновляемых источников энергии в системах теплоснабжения, применение солнечных отопительных установок с высокой ресурсосберегающей и производительностью труда занимают одно из ведущих мест. В мире проводится ряд научно-исследовательских работ, направленных на совершенствование конструкций