

УДК 621.9

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗА И ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОГО АБРАЗИВНОГО ПОТОКА

Ф. Л. Ли

Центр общего образования Военной академии Китайской республики,
83059 Гаосюн, Тайвань, Китай
E-mail: fulinlih@gmail.com

Методом конечных объемов с помощью алгоритма SIMPLE со встроенным магнитогидродинамическим кодом численно моделируются параметры двухфазной магнитореологической жидкости при различных условиях.

Ключевые слова: магнитогиродинамика, магнитореологическая жидкость, численное моделирование, магнитореологический абразивный поток, многофазный поток.

DOI: 10.15372/PMTF20160222

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время проводится большое количество исследований магнитных и магнито-реологических жидкостей. В обоих случаях в рабочую немагнитную жидкость добавляются магнитные микрочастицы (феррочастицы). Диаметры вводимых частиц, их физические свойства и области применения различаются. Диаметр частиц магнитной жидкости (МЖ) составляет $1 \div 10$ нм, диаметр частиц магнитореологической жидкости (МРЖ) — $0,1 \div 5,0$ мкм. При воздействии внешнего магнитного поля предел текучести МЖ увеличивается от единиц до нескольких сотен паскалей, в то время как диапазон значений предела текучести МРЖ достигает десятков килопаскалей. Поскольку указанные параметры жидкостей отличаются от параметров, используемых в промышленности при традиционных методах обработки, метод абразивной обработки получил широкое распространение в прикладной биомедицине и химии, аэрокосмической и оборонной промышленности.

Вследствие воздействия магнитных полей, наличия градиентов температур и особенностей течения многофазных сред описание течения МРЖ является достаточно сложным, некоторые параметры течения трудно определить.

В последнее время активно развивается технология электроэрозионной обработки микроэлектромеханических систем, однако на поверхностях микродеталей, изготовленных с

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального совета по науке Тайваня (Китай) (код проекта NSC 99-2221-E-145-004).

ее помощью, имеется большое количество микронеровностей. При электроэрозионной обработке на поверхности образуется слой с выплавленными лунками. Такую поверхность сложно подвергнуть дальнейшей обработке, что оказывает существенное влияние на качество поверхности. Указанные выше проблемы изучались во многих работах. В [1] путем численного моделирования исследовался процесс финишной обработки поверхностей с использованием магнитных абразивов. В качестве параметров процесса обработки использовались сила взаимодействия с поверхностью и величина рабочего зазора.

Созданные ранее технологии обработки в абразивном потоке имеют недостаток, заключающийся в том, что на шероховатую поверхность действует недостаточно большая сила, и поэтому эти технологии не могут быть использованы для обработки твердых поверхностей образцов с большой кривизной. В настоящее время обработка поверхностей магнитоабразивным потоком применяется при изготовлении деталей оптических приборов. В работе [2] исследовано изменение предела текучести материала образца при течении в трубе МРЖ, содержащей 15 % феррочастиц, при этом предел текучести составлял более 1,9 кПа при величине магнитной индукции внешнего магнитного поля 2,2 кГс. В [3] рассматриваются физические свойства МРЖ, с помощью электронного сканирующего микроскопа исследовано изменение микроструктуры МРЖ при воздействии магнитного поля. В [4] с использованием реологического уравнения Гершеля — Балкли изучены параметры магнитореологического потока в плоском канале.

В [5] разработан магнитореологический метод обработки поверхностей абразивными потоками, что позволило уменьшить размеры неровностей на поверхностях образцов до наномасштабных. В [6] с использованием численного анализа изучены параметры процесса финишной обработки поверхности с помощью магнитореологического абразивного потока. Показано, что с использованием численных моделей можно достаточно точно определить параметры потока.

В последнее время разработаны теоретическая модель и численный метод, позволяющие, рассчитав силу воздействия на абразив F_m и силу сдвига F_{sh} , получить скорость удаления частиц материала с поверхности образца и определить шероховатость поверхности [7, 8]. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, подтвердившее надежность расчетов. В [9] при построении модели используются три реологических уравнения пластической модели Бингама, модели Гершеля — Балкли и модели Кэссона. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными. В [10] разработаны численные методики анализа характеристик МРЖ и эффективности абразивов. Также с помощью уравнений МРЖ при различных значениях плотности посева частиц, входного давления и индукции магнитного поля исследованы эффективность реза на криволинейных поверхностях и изменение свойств МРЖ.

Внешнее магнитное поле широко применяется в технологиях полировки и финишной обработки поверхностей. Основной целью данной работы является разработка методов численного моделирования течения МРЖ с использованием методов исследования магнитогидродинамики (МГД), реологии, динамики многофазного потока, а также с использованием уравнений состояния отдельных частиц.

1. ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА

1.1. Эффективность реза. В [8] показано, что нормальная сила F_m (рис. 1), с которой частицы абразива воздействуют на МРЖ, определяется по формуле

$$F_m = \frac{mx_m B \nabla B}{\mu_0}, \quad (1)$$

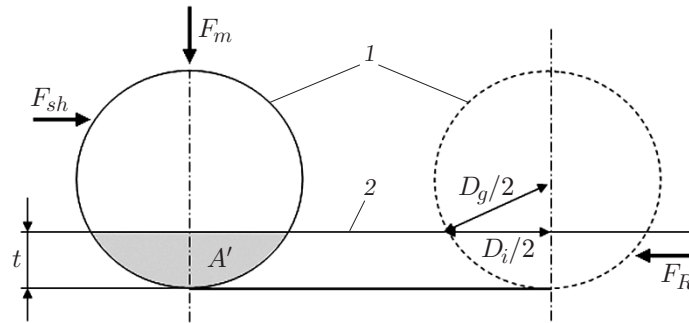


Рис. 1. Схема резки абразивной частицей поверхности образца [8]:
1 — частицы абразива, 2 — обрабатываемая поверхность

где m — масса феррочастицы, зависящая от плотности посева частиц; x_m — магнитная восприимчивость абразива, определяемая следующим образом:

$$x_m = \mu_0 \frac{M}{B}, \quad \nabla B = \frac{\partial B}{\partial y}.$$

Здесь $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м — магнитная проницаемость в вакууме; M — намагниченность, определяемая по эмпирической формуле $M = 411,84B - 427,32B^3 + 220,85B^4$; $B(x, y)$ — плотность магнитного потока. Вычислив суммарное значение $F_{m, sum}$, твердость по Бринелю НВ можно определить следующим образом:

$$\text{НВ} = \frac{F_{m, sum}}{(\pi/2)D_g(D_g - \sqrt{D_g^2 - D_i^2})} \quad (2)$$

(D_i — диаметр основания внедренного шарового сегмента частицы; D_g — диаметр частицы абразива SiC).

Если в качестве материала образца выбрать нержавеющей сталь и используя метод Виккерса, определить твердость по Бринелю, то она будет постоянной величиной, равной 277. Если плотность посева абразивных частиц составляет $N = 800, 1000, 1200, 1500$ меш, то диаметр абразивных частиц равен $D_g = 1,900 \cdot 10^{-5}; 1,520 \cdot 10^{-5}; 1,267 \cdot 10^{-5}; 1,013 \cdot 10^{-5}$ м. Из формулы (2) вычисляется диаметр D_i (см. рис. 1). Глубина разреза t частицей абразива определяется по формуле

$$t = \frac{D_g}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{D_g^2 - D_i^2}.$$

1.2. Критерий реза. В данной работе определяется сила воздействия абразивных частиц на образец, вследствие которого образуются разрез глубиной t и шероховатость Ra, при этом действуют сдвиговая сила F_{sh} , обусловленная движением жидкости, и сила сопротивления материала деформированию F_R . Соотношение этих двух сил является критерием реза. С помощью этого критерия можно выбрать соответствующий режим резания. В данной работе используются следующие критерии процесса резания:

1) средняя глубина разреза:

$$\bar{t}_{avg} = \sum_{n=1}^n t_n;$$

2) шероховатость поверхности:

$$\text{Ra} = \sum_{n=1}^n \frac{|t_n - \bar{t}_{avg}|}{n};$$

3) сдвиговая сила потока:

$$F_{sh} = (A_0 - A')\tau$$

(τ — напряжение сдвига; A_0 — общая площадь сечения абразивной частицы; A' — площадь поперечного сечения канала реза);

4) сила сопротивления деформированию:

$$F_R = A'\sigma_y$$

(σ_y — предел текучести).

1.3. Механизм резания. Рассмотрим процесс финишной обработки поверхности с помощью магнитореологического абразивного потока, в случае когда роль абразива выполняют частицы немагнитного материала. Под действием внешнего магнитного поля эти частицы воздействуют на абразивные частицы SiC, что приводит к появлению силы F_m , действующей на образец. Это позволяет проводить обработку (резание) образца, поскольку сдвиговая сила F_{sh} , возникающая вследствие движения жидкости, превышает силу сопротивления образца пластическому деформированию F_R .

В зависимости от соотношения величин F_{sh} и F_R возможны три случая:

1) $F_{sh} > F_R$ (стандартное резание);

2) $F_{sh} < F_R$ (частицы абразива перекатываются по поверхности);

3) $F_{sh} < F_R$, но значение F_m настолько велико, что трение качения абразивных частиц отсутствует, в этом случае для получения глубокого разреза необходима большая сила сдвига F_{sh} .

2. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Уравнения и краевые условия. Из формулы (1) следует, что основной переменной в рассматриваемой задаче является плотность магнитного потока B . В соответствии с законом Ома при прохождении проводящей жидкости через однородное внешнее магнитное поле в ней индуцируется ток, вследствие чего появляется индуцированное магнитное поле. В результате меняются плотность магнитного потока и скорость жидкости. В таких случаях для получения динамических характеристик магнитного поля обычно используется МГД-модель. Для определения поля скоростей необходимо использовать уравнение неразрывности и уравнения сохранения количества движения. Примем следующие основные допущения: поток является несжимаемым ламинарным; броуновским движением пренебрегается; феррочастицы не объединяются и не осаждаются; внешнее магнитное поле постоянно во времени; поляризация отсутствует; гравитацией пренебрегается. При этих допущениях имеем следующие уравнения:

— уравнение неразрывности

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0;$$

— уравнения сохранения количества движения

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} + W \frac{\partial U}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) + \frac{\text{Ha}}{\text{Re}} (J_y B_z - J_z B_y),$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + W \frac{\partial V}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right) + \frac{\text{Ha}}{\text{Re}} (J_z B_x - J_x B_z),$$

$$U \frac{\partial W}{\partial X} + V \frac{\partial W}{\partial Y} + W \frac{\partial W}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} \right) + \frac{\text{Ha}}{\text{Re}} (J_x B_y - J_y B_x),$$

где $\text{Re} = U_0 h / \nu$ — число Рейнольдса, представляющее собой соотношение инерционных и вязкостных сил; $\text{Ha} = B_0 h \sqrt{\sigma / \mu}$ — число Гартмана, представляющее собой соотношение

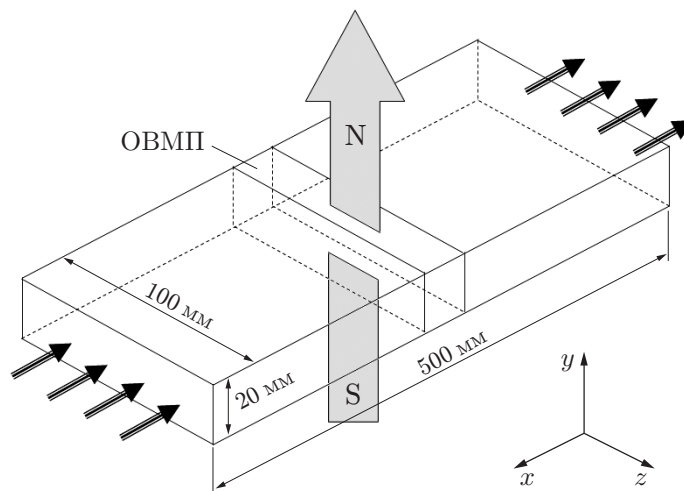


Рис. 2. Расчетная область и граничные условия (ОВМП — область воздействия магнитного поля)

магнитных и вязкостных сил; h — характерная длина; σ — электрическая проводимость жидкости; μ — динамическая вязкость; ν — кинематическая вязкость.

Магнитореологическая жидкость состоит из феррочастиц различного размера с различной концентрацией, базовой рабочей жидкости и поверхностно-активных веществ. Наличие добавок, внешнего магнитного поля и поля температур может оказывать дополнительное воздействие на течение МРЖ. Для моделирования свойств МРЖ поверхностное напряжение сдвига образца определялось с использованием модели Бингама неньютоновской жидкости и экспериментальных данных [9]. Это позволяет получить выражения для напряжения пластичности τ_y и пластической вязкости μ_p , зависящих от величины магнитного поля:

$$\tau_y = -33,10 + \frac{67,09 \ln B}{B} + \frac{51,54}{B^{1,5}},$$

$$\mu_p = 5918,57 + 10\,191,33 \ln B + 6110,52(\ln B)^2 + 1222,70(\ln B)^3.$$

Соответственно, зная скорость деформации сдвига $\dot{\gamma}$ вблизи поверхности образца, получаем выражение для поверхностного напряжения сдвига

$$\tau = \tau_y + \mu_p \dot{\gamma}.$$

Рассматривается канал с прямоугольным сечением (рис. 2). Скорость на входе и характеристики МРЖ во входном сечении заданы: $\rho = 6,63 \cdot 10^3$ кг/м³, $\mu = 2,16 \times 10^{-3}$ кг/(м·с), $\sigma = 3,46 \cdot 10^6$ 1/(Ом·м), $\mu_0 = 1,61 \cdot 10^{-4}$ Гн/м. На входе в расчетную область задаются вектор скорости и температура, на выходе ставится граничное условие, которому соответствует полностью развитое течение, на стенках канала задается условие прилипания.

2.2. Схемы численного решения. При решении задач механики жидкости и газа выбор метода численного расчета оказывает существенное влияние на точность расчетов. В рассматриваемом случае трехмерные расчеты несжимаемого ламинарного потока проводились на основе уравнения коррекции давления для разделенного решателя с помощью метода конечных объемов. Была выбрана схема дискретизации второго порядка точности в направлении вверх по потоку. Для расчетов давления и скорости применялся алгоритм SIMPLE.

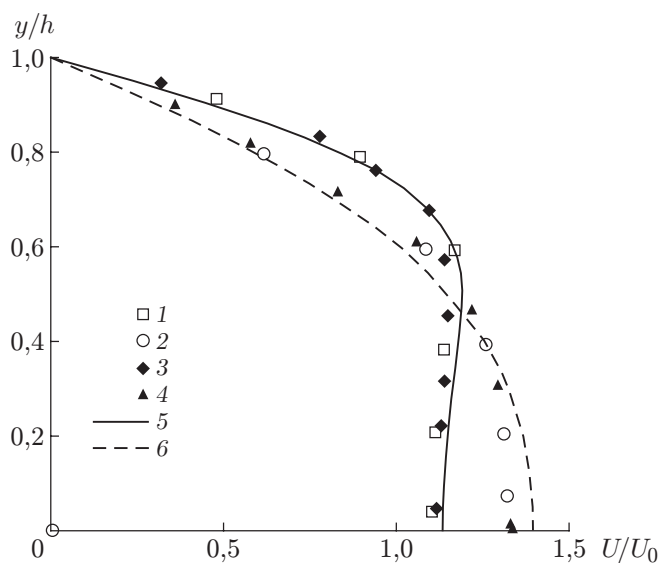


Рис. 3. Распределение скорости в поперечном квадратном сечении ($\delta/h = 0,025$):
 1, 2 — экспериментальные данные [11], 3, 4 — экспериментальные данные [12], 5, 6 —
 численное решение; 1, 3, 5 — $x = 1$, 2, 4, 6 — $x = 4$

Трехмерные гексагональные сетки создавались с помощью генератора сеток Gambit. В случае течения жидкости в трубе ее скорость увеличивается по мере приближения к центру и уменьшается вблизи стенок, поэтому вблизи стенок сетка должна быть более мелкой. Результаты проведенного расчета сравниваются с экспериментальными данными [11, 12]. В этих экспериментах $Re = 100$, $S = 40$, $h = 1$. Проведено сравнение профилей скорости при $x = 1, 4$. Рассматривался водно-абразивный поток. Наилучшее соответствие экспериментальным данным получено для сетки с соотношением $\delta/h = 0,025$ (рис. 3).

При наличии магнитного поля скорость потока изменяется вследствие действия силы Лоренца. Проведено сравнение распределений компонент скорости по оси x , полученных в результате аналитического и численного решений (рис. 4). При наличии внешнего магнитного поля аналитическое решение имеет следующий вид:

$$u(y) = \hat{u} \left(1 - \frac{\text{ch}(\text{Ha} y)}{\text{ch}(\text{Ha})} \right), \quad \hat{u} = \frac{1}{\text{Ha}} \frac{1}{\text{th}(\text{Ha})}.$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Анализ МГД-течения. При подавлении турбулентности электромагнитным полем жидкость подвергается воздействию силы Лоренца. При этом можно выделить три зоны течения: область подавления турбулентности, вихревую область и область пристенного струйного течения [13].

На рис. 5 представлены распределения скорости в центре канала и вблизи стенки, а также скорости деформации сдвига вдоль оси x канала. Несмотря на то что во входном сечении задается равномерное распределение скорости, влияние стенок канала приводит к увеличению скорости в центральной части канала и ее уменьшению вблизи стенок. При наличии внешнего магнитного поля в диапазоне $x/h = -12 \div -2$ поток полностью турбулизируется. При $x/h = -2,00 \div -0,75$ в результате воздействия внешнего магнитного поля профиль скорости, соответствующий полностью развитому турбулентному течению, принимает М-образную форму. В диапазоне $x/h = -0,75 \div 0,75$ магнитное поле оказывает наиболее существенное воздействие на область течения. В этой области структура потока

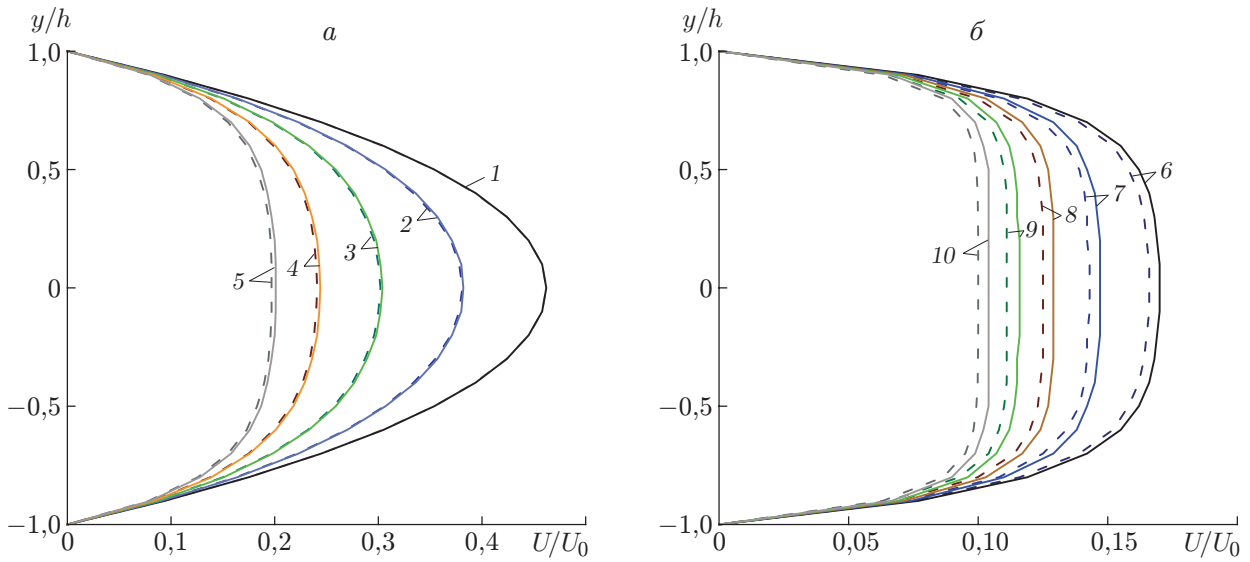


Рис. 4. Распределение скорости в поперечном квадратном сечении:
a — $Ha = 1 \div 5$, *б* — $Ha = 6 \div 10$; сплошные линии — численное решение, штриховые —
 аналитическое решение; 1 — $Ha = 1$, 2 — $Ha = 2$, 3 — $Ha = 3$, 4 — $Ha = 4$, 5 — $Ha = 5$,
 6 — $Ha = 6$, 7 — $Ha = 7$, 8 — $Ha = 8$, 9 — $Ha = 9$, 10 — $Ha = 10$

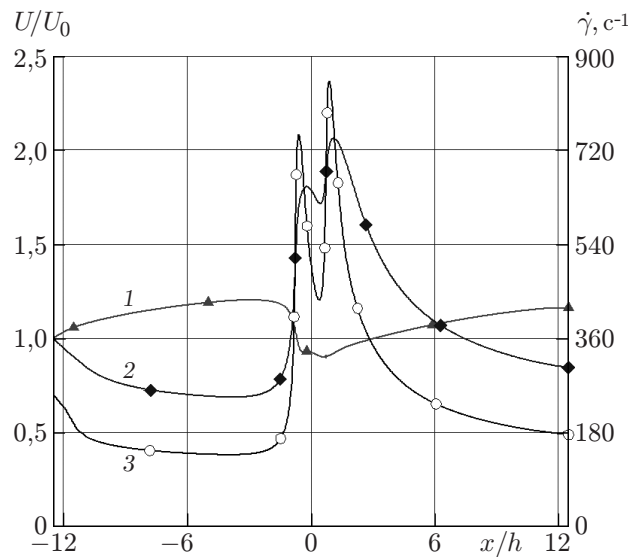


Рис. 5. Распределения скорости в центре канала (1), пристенной скорости (2)
 и скорости деформации сдвига (3) вдоль оси x

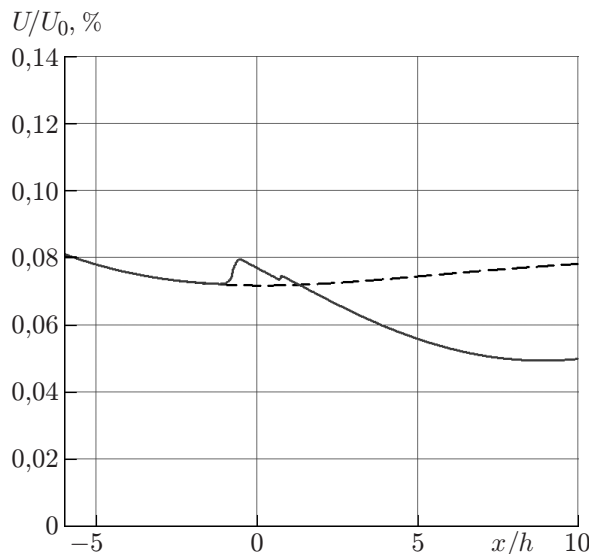


Рис. 6. Зависимость интенсивности турбулентного течения в центре канала от координаты x при наличии магнитного поля (сплошная линия) и в его отсутствие (штриховая линия)

представляет собой крупномасштабные вихри. Течение в указанной области полностью находится под воздействием силы Лоренца и оказывает наиболее значительное влияние на параметры реза. Скорость в центре канала падает, скорости вблизи стенок увеличиваются, что приводит к возникновению большой скорости сдвиговой деформации.

На профиле скорости имеется два пика, первый пик находится перед областью воздействия магнитного поля, второй — за ней. В зоне взаимодействия магнитного поля и поля скорости вследствие влияния силы Лоренца увеличивается эффективность реза. При наличии индуцированного магнитного поля градиент скорости вблизи стенок увеличивается за счет увеличения скорости деформации сдвига. В диапазоне $x/h = 0,75 \div 12,00$ жидкость покидает область воздействия магнитного поля. В отсутствие влияния силы Лоренца характеристики течения постепенно восстанавливаются: скорость в центре канала увеличивается, скорость вблизи стенок уменьшается, М-образная форма профиля скорости постепенно сглаживается, поэтому в конце канала профиль скорости соответствует полностью развитому турбулентному течению. Флуктуации скорости в пограничном слое вблизи стенки на 11 % больше, чем в основном потоке, что аналогично газодинамическому эффекту в струйном течении в канале.

На рис. 6 показано распределение интенсивности турбулентного течения в центре канала при наличии и отсутствии магнитного поля. В отсутствие магнитного поля в области $x/h = -6,00 \div -0,75$ интенсивность турбулентного течения уменьшается на 1 %, тогда как при его наличии — увеличивается. Вне зоны действия внешнего магнитного поля скорость вдоль оси канала по-прежнему находится под влиянием силы Лоренца, что приводит к ее постепенному увеличению и уменьшению интенсивности турбулентного течения. Таким образом, магнитное поле может эффективно использоваться для уменьшения интенсивности турбулентного течения.

Для повышения эффективности процесса резания частицы абразива должны создавать положительную прижимную силу F_m , при этом сила воздействия жидкости на образец F_{sh} должна превышать предел текучести материала образца F_R . Сила F_m определяется плотностью магнитного потока, F_{sh} — полем скоростей.

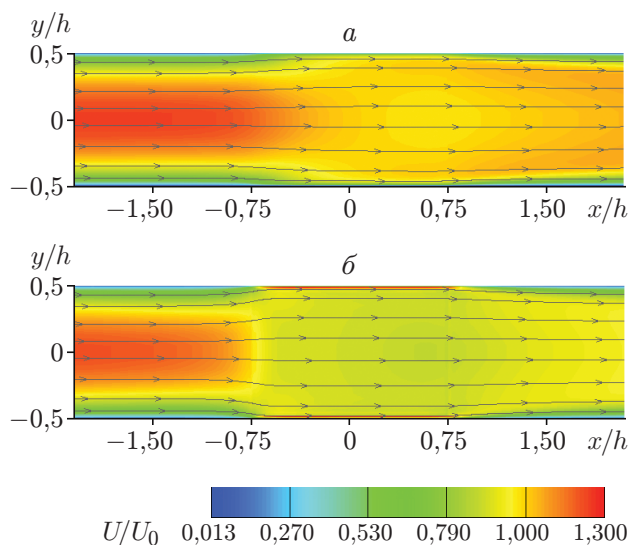


Рис. 7

Рис. 7. Поле скоростей потока в немагнитном материале при различных значениях индукции магнитного поля:

a — $Ha = 100$, b — $Ha = 400$

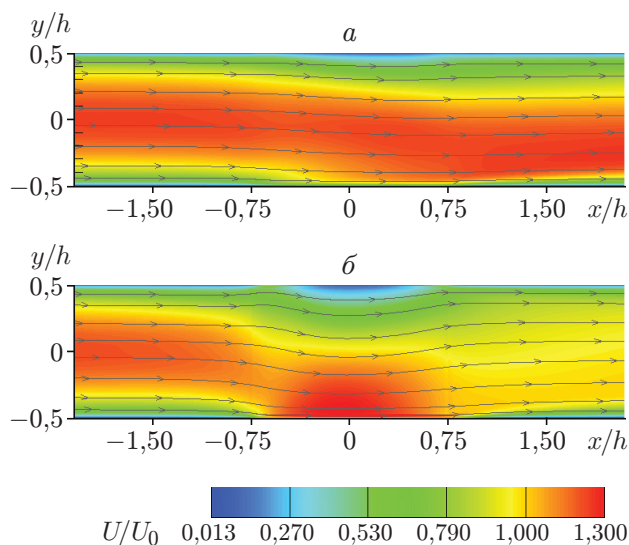


Рис. 8

Рис. 8. Поле скоростей потока в магнитном материале при различных значениях индукции магнитного поля:

a — $Ha = 100$, b — $Ha = 400$

Проведены исследования образцов из немагнитного и магнитного материалов.

На рис. 7 показано поле скоростей потока в немагнитном материале. Видно, что в этом случае при увеличении внешнего магнитного поля наличие наведенного магнитного поля приводит к увеличению прижимной силы F_m вследствие действия силы Лоренца. В центре канала течение замедляется, и жидкость перераспределяется к стенкам канала, форма профиля скорости становится М-образной, поэтому вблизи поверхности значение F_{sh} увеличивается. В случае если материал образца изготовлен из магнитного материала (рис. 8), внешнее магнитное поле и образец вследствие взаимной индукции создают значительно большее прижимное усилие на поверхность, но, поскольку между внешним магнитным полем и магнитным материалом возникает индуктивность магнитного потока, которая препятствует протеканию жидкости через поверхность образца, М-образный профиль скорости исчезает и значение F_{sh} уменьшается.

3.2. Эффективность процесса резания при различных свойствах материала образца. На рис. 9, a приведена зависимость глубины разреза от числа Рейнольдса при различных значениях числа Гартмана для немагнитного материала (стекла). При увеличении числа Рейнольдса увеличение скорости приводит к росту индуцированного тока и наведенного магнитного поля, при этом глубина разреза увеличивается. При увеличении магнитной индукции увеличиваются плотность магнитного потока в области разреза и шероховатость поверхности. Поскольку плотность посева абразивных частиц N зависит от их диаметра, из (1) следует, что чем больше значение N , тем больше прижимная сила каждой частицы, а следовательно, и их суммарная прижимная сила $F_{m,sum}$. С уменьшением диаметра абразивной частицы уменьшается ее масса, а значит, и суммарная прижимная сила $F_{m,sum}$. Оба фактора оказывают влияние на глубину внедрения частиц в материал образца. В то же время чем больше плотность посева абразивных частиц, тем меньше глубина разреза, но при этом улучшается качество поверхности (рис. 9, b).

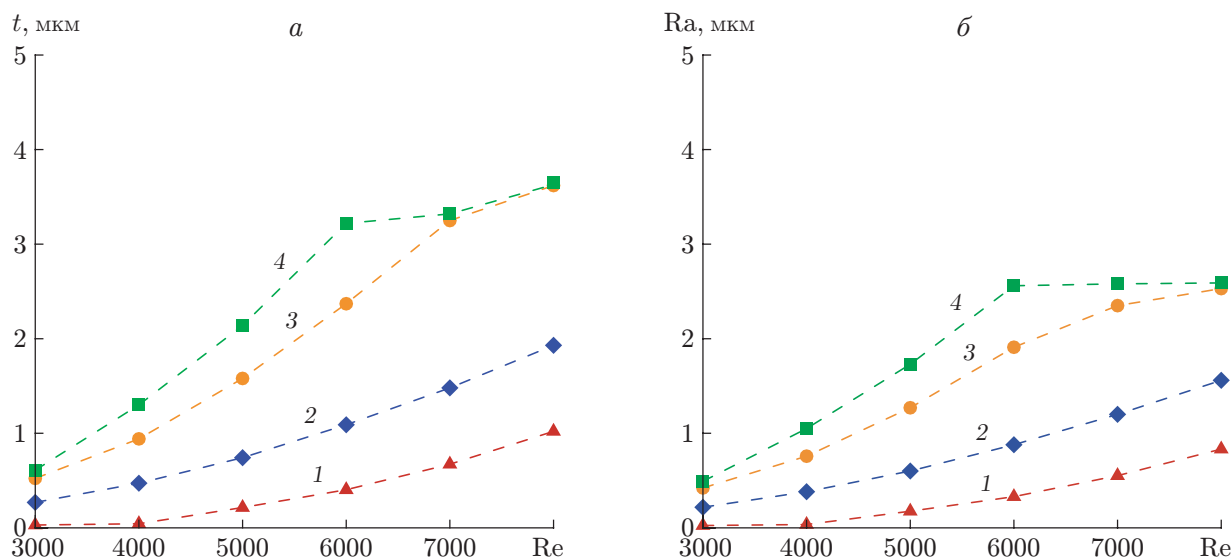


Рис. 9. Зависимости глубины разреза t (а) и шероховатости поверхности Ra (б) немагнитного материала от числа Рейнольдса Re при $N = 800$ меш и различных значениях числа Гартмана Ha :
 1 — $Ha = 200$, 2 — $Ha = 400$, 3 — $Ha = 600$, 4 — $Ha = 800$

С использованием результатов численного моделирования получены зависимости глубины разреза и шероховатости поверхности от параметров задачи

$$t = -1,6 \cdot 10^{-9} Re^2 - 1,7 \cdot 10^{-6} Ha^2 + 8,1 \cdot 10^{-7} Re Ha + 6,7 \cdot 10^{-5} Re + 7,2 \cdot 10^{-4} Ha - 9,5 \cdot 10^{-1},$$

$$Ra = -1,4 \cdot 10^{-8} Re^2 - 1,1 \cdot 10^{-6} Ha^2 + 5,2 \cdot 10^{-7} Re Ha + 2,3 \cdot 10^{-4} Re + 8,8 \cdot 10^{-4} Ha - 1,2.$$

Для того чтобы учесть механические характеристики немагнитного материала, полученные выше выражения для t и Ra нужно умножить на поправочные коэффициенты C , D . Для стекла значениям плотности посева абразивных частиц $N = 800, 1000, 1200, 1500$ меш соответствуют значения $C = 1,000; 0,799; 0,665; 0,532$. Значение D для стекла равно единице, для керамики — $0,275$.

Рассмотрим случай, когда в качестве образца используется магнитный материал, например железо. Для этого случая зависимости глубины разреза и шероховатости поверхности от числа Рейнольдса при различных значениях числа Гартмана представлены на рис. 10. При увеличении числа Рейнольдса на входе скорость жидкости возрастает, что приводит к увеличению индуцированного магнитного поля, создаваемого наведенным током, и, следовательно, к увеличению глубины разреза. При увеличении числа Гартмана увеличивается взаимная индукция между внешним магнитным полем и магнитным материалом образца, а также напряженность генерируемого поля. С увеличением чисел Рейнольдса и Гартмана глубина разреза увеличивается, но при этом ухудшается качество поверхности. Сравнение с результатами, полученными для немагнитного образца, показывает, что в случае использования магнитного материала в результате воздействия на порядок меньшего внешнего магнитного поля глубина разреза почти в два раза больше, при этом качество поверхности улучшается (см. рис. 9,б, 10,б). Основная причина этого различия заключается в наличии индуктивности магнитного потока между внешним

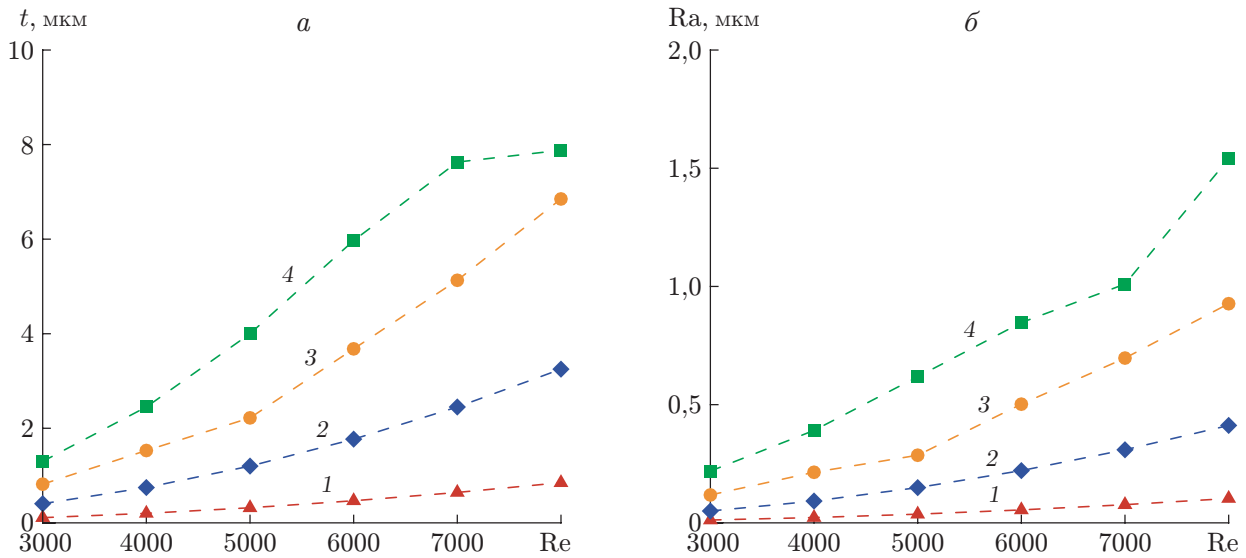


Рис. 10. Зависимости глубины разреза t (а) и шероховатости поверхности Ra (б) магнитного материала от числа Рейнольдса Re при $N = 800$ меш и различных значениях числа Гартмана Ha :

1 — $Ha = 20$, 2 — $Ha = 40$, 3 — $Ha = 60$, 4 — $Ha = 80$

магнитным полем и магнитным материалом, что приводит к наведению магнитного поля на поверхность образца. При этом распределение напряженности магнитного потока становится равномерным, а распределение глубины разреза — более однородным.

С использованием результатов численного моделирования получены зависимости глубины разреза и шероховатости поверхности от параметров задачи

$$t = -1,4 \cdot 10^{-8} Re^2 - 1,1 \cdot 10^{-6} Ha^2 + 5,2 \cdot 10^{-7} Re Ha + 2,3 \cdot 10^{-4} Ha + 8,8 \cdot 10^{-4} Re - 1,2,$$

$$Ra = 1,4 \cdot 10^{-8} Re^2 + 9,8 \cdot 10^{-5} Ha^2 + 3,9 \cdot 10^{-6} Re Ha - 2,2 \cdot 10^{-4} Re - 1,9 \cdot 10^{-2} Ha + 7,2 \cdot 10^{-1}.$$

Для того чтобы учесть механические характеристики магнитного материала, полученные выше выражения для t и Ra нужно умножить на поправочные коэффициенты C , D . Для железа значениям плотности посева абразивных частиц $N = 800, 1000, 1200, 1500$ меш соответствуют значения $C = 1,000; 0,802; 0,666; 0,533$, значение D равно единице.

3.3. Анализ сдвиговых напряжений. Как отмечено выше, процесс резания является эффективным, если сдвиговое напряжение в потоке больше предела текучести материала образца. На рис. 11, 12 представлены зависимости сдвигового усилия жидкости и силы сопротивления пластическому деформированию от числа Рейнольдса для немагнитного и магнитного материалов соответственно. Из рис. 11 следует, что при использовании в качестве образца немагнитного материала ($F_{sh} > F_R$) процесс резания является эффективным. Это объясняется тем, что под влиянием внешнего магнитного поля профиль скорости становится М-образным и поэтому на поверхности стенки возникает большое сдвиговое усилие. Из рис. 12 следует, что в случае, когда используется магнитный материал ($F_{sh} < F_R$), процесс резания является менее эффективным.

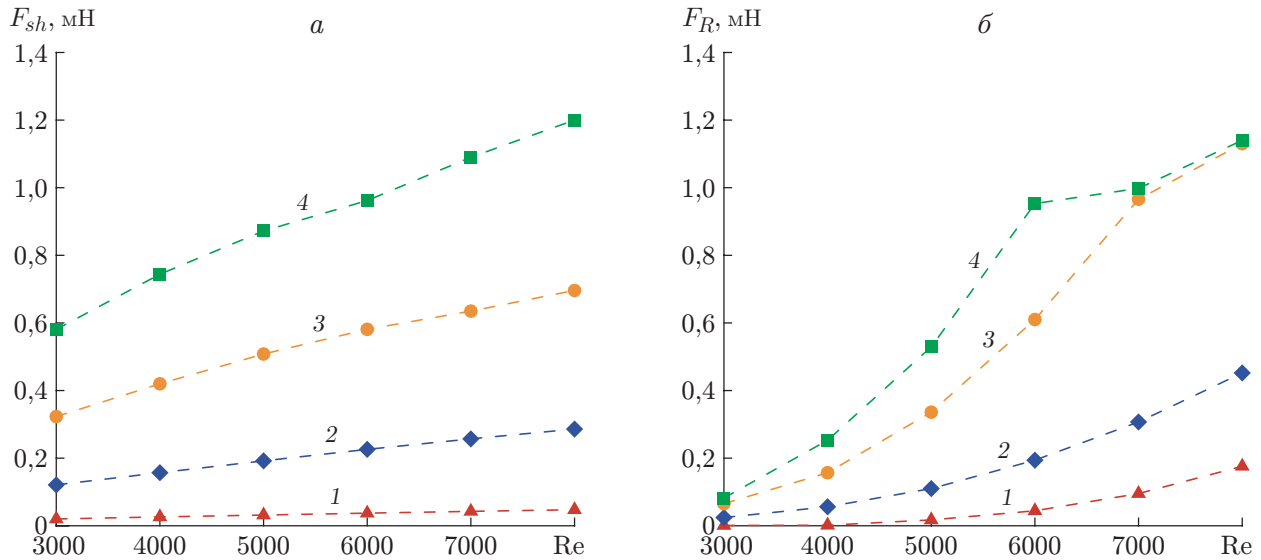


Рис. 11. Зависимости сдвигового усилия жидкости F_{sh} (а) и силы сопротивления пластическому деформированию F_R (б) от числа Рейнольдса Re для немагнитного материала при $N = 800$ меш и различных значениях числа Гартмана Ha :

1 — $Ha = 200$, 2 — $Ha = 400$, 3 — $Ha = 600$, 4 — $Ha = 800$

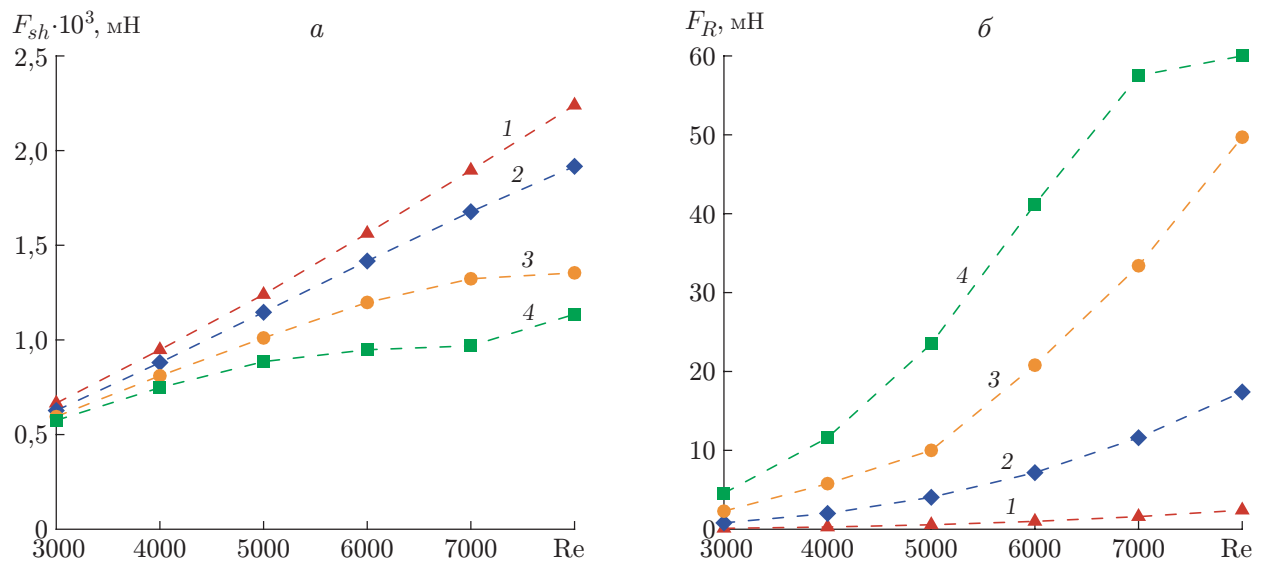


Рис. 12. Зависимости сдвигового усилия жидкости F_{sh} (а) и силы сопротивления пластическому деформированию F_R (б) от числа Рейнольдса Re для магнитного материала при $N = 800$ меш и различных значениях числа Гартмана Ha :

1 — $Ha = 20$, 2 — $Ha = 40$, 3 — $Ha = 60$, 4 — $Ha = 80$

4. ВЫВОДЫ

В данной работе выполнено численное моделирование процесса финишной обработки поверхностей образцов из магнитных и немагнитных материалов. Исследована эффективность финишной обработки поверхности с помощью магнитореологического абразивного потока при различных параметрах, в частности при различных значениях чисел Гартмана и Рейнольдса. Получены аналитические зависимости глубины разреза и шероховатости поверхности от числа Рейнольдса при различных параметрах намагниченного потока и различных механических свойствах образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kim J. D., Choi M. S.** Simulation for the prediction of surface-accuracy in magnetic abrasive machining // *J. Materials Proc. Tech.* 1995. V. 53. P. 630–642.
2. **Dang A., Ooi L., Fales J., Stroeve P.** Yield stress measurements of magnetorheological fluids in tubes // *Industr. Engng Chem. Res.* 2000. V. 39. P. 2269–2274.
3. **Tao R.** Super-strong magnetorheological fluids // *J. Phys. Condens. Matter.* 2001. V. 13. P. R979–R999.
4. **Widjaja J., Samali B., Li J.** Electrorheological and magnetorheological duct flow in shear-flow mode using Herschel — Bulkley constitutive model // *J. Engng Mech.* 2003. V. 129. P. 1459–1465.
5. **Jha S., Jain V. K.** Design and development of the magnetorheological abrasive flow finishing process // *Intern. J. Machine Tools Manufacture.* 2004. V. 44. P. 1019–1029.
6. **Jha S., Jain V. K.** Modeling and simulation of surface roughness in magnetorheological abrasive flow finishing process // *Wear.* 2006. V. 261. P. 856–866.
7. **Das M., Jain V. K., Ghoshdastidar P. S.** Analysis of magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process // *Intern. J. Adv. Manufactur. Technol.* 2008. V. 38. P. 613–621.
8. **Das M., Jain V. K., Ghoshdastidar P. S.** Fluid flow analysis of magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process // *Intern. J. Machine Tools Manufactur.* 2008. V. 48. P. 415–426.
9. **Jha S., Jain V. K.** Rheological characterization of magnetorheological polishing fluid for MRAFF // *Intern. J. Adv. Manufactur. Technol.* 2009. V. 42. P. 656–668.
10. **Lih F. L., Miao J. M., Kuo C. W., et al.** Numerical analysis on the rheological characterization and finishing efficiency of MRAFF process // *J. Flow Visual. Image Process.* 2011. V. 18. P. 11–28.
11. **McDonald J. W., Denny V. E., Mills A. F.** Numerical solutions of the Navier — Stokes equations in inlet regions // *J. Appl. Mech.* 1972. V. 39. P. 873–878.
12. **Dogruoz M. B.** CFD benchmark testing of selected laminar flow problems. S. l.: Univ. of Arizona, 2002.
13. **Andreev O., Kolesnikov Yu., Thess A.** Experimental study of liquid metal channel flow under the influence of a nonuniform magnetic field // *Phys. Fluids.* 2006. V. 18. 065108.

Поступила в редакцию 21/IV 2014 г.