УДК 665.75

Моделирование стационарного течения объемной осесимметричной свободной затопленной струи вязкой жидкости

Шамсутдинов Э.В.
Исследовательский центр проблем энергетики

Моделированию струйных течений вязких сред посвящено большое количество работ. В основном они базируются на моделях невязкой сжимаемой жидкости (газа) или моделей несжимаемой вязкой жидкости при условии турбулентности потока. В отличие от предыдущих, в данной работе при моделировании струйных течений вязких несжимаемых сред использовалась система уравнений механики сплошной среды: уравнения движения и неразрывности, при ламинарном режиме течения потока жидкости. При этом использовались следующие допущения:

1. Нестационарность гидродинамических процессов обусловлена зависимостью от времени расхода жидкости G, поступающей в некоторую область трёхмерного пространства, которая может быть как ограниченной так и неограниченной;

2. Рассматриваемые жидкости являются несжимаемыми средами, т.е. удовлетворяют гипотезе постоянства плотности r.

3. Реологическое поведение жидкостей характеризуется гипотезой ньютоновской жидкости, т.е. динамическая вязкость жидкостей m является постоянной величиной.

4. Объёмные силы, влияющие на процессы течения, являются силами тяжести;

Для учета осесимметричности струйных течений использована цилиндрическая система координат (r, j, z). При этом все переменные задачи становятся независимыми от угла j. Система уравнений движения и неразрывности в этом случае записывается в виде:

$$\rho\left(v_r\frac{\partial v_r}{\partial r}+v_z\frac{\partial v_r}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial r}+2\mu\frac{\partial^2 v_r}{(\partial r)^2}+\mu\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial v_r}{\partial z}+\frac{\partial v_z}{\partial r}\right)+\frac{2}{r}\mu\left(\frac{\partial v_r}{\partial r}-\frac{v_r}{r}\right), \qquad (1)$$

$$\rho\left(v_r\frac{\partial v_z}{\partial r}+v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)=-\rho g_z-\frac{\partial P}{\partial z}+2\mu\frac{\partial^2 v_z}{(\partial z)^2}+\mu\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\partial v_r}{\partial z}+\frac{\partial v_z}{\partial r}\right)+\mu\left(\frac{\partial v_r}{\partial z}+\frac{\partial v_z}{\partial r}\right), \qquad (2)$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rv_r)+\frac{\partial v_z}{\partial z}=0. \qquad (3)$$

Для закрученных струй система уравнений движения и неразрывности примет вид:

$$\rho\left(v_r\frac{\partial v_r}{\partial r}+v_z\frac{\partial v_r}{\partial z}-\frac{v_\varphi^2}{r}\right)=-\frac{\partial P}{\partial r}+\mu\left\{2\frac{\partial^2 v_r}{(\partial r)^2}+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial v_r}{\partial z}+\frac{\partial v_z}{\partial r}\right)+\frac{2}{r}\left(\frac{\partial v_r}{\partial r}-\frac{v_r}{r}\right)\right\}, \qquad (4)$$

$$\rho\left(v_r\frac{\partial v_z}{\partial r}+v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}+\frac{v_r v_\varphi}{r}\right)=-\frac{\partial P}{\partial \varphi}+\mu\left\{\frac{\partial^2 v_\varphi}{(\partial z)^2}+\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial r}-\frac{v_\varphi}{r}\right)+\frac{2}{r}\left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial r}+\frac{v_\varphi}{\partial r}\right)\right\}, \qquad (5)$$

$$\rho\left(v_r\frac{\partial v_z}{\partial r}+v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)=-\rho g_z-\frac{\partial P}{\partial z}+\mu\left\{2\frac{\partial^2 v_z}{(\partial z)^2}+\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\partial v_r}{\partial z}+\frac{\partial v_z}{\partial r}\right)+\left(\frac{\partial v_r}{\partial z}+\frac{\partial v_z}{\partial r}\right)\right\}, \qquad (6)$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rv_r)+\frac{\partial v_z}{\partial z}=0. \qquad (7)$$

Для получения конкретных решений эта область заменяется прямоугольной с заранее неизвестными значениями высоты h_z и радиуса h_r, которые уточняются в ходе решения задачи итерационным методом. Постановка граничных условий в этом случае отличается от постановки граничных условий для стеснённых струй, тем, что на границе ставится условие распределения давления при отсутствии струй.

В качестве граничных условий примем:

1. На круговом секторе – части ABC, считаем заданным профиль скорости

$$v_r = f_r(r),\quad v_z = f_z(z), \text{ при } 0 \le r \le d,\quad z = 0 \qquad (8)$$

где $f_r(r)$, $f_z(z)$ - функции, зависящие от характера поступления жидкости в подающие отверстия, δ - диаметр отверстия. На функции $f_r(r)$, $f_z(z)$ накладываются следующие соотношения, имеющие простой физический смысл:

$$\begin{cases} f_r(\delta)=f_z(\delta)=0, \\ 2\pi\int\limits_0^\delta f_z(r)rdr=V. \end{cases} \qquad (9)$$

Так в простейшем случае функции $f_r(r)$, $f_z(z)$ имеют вид:

$$f_r(r)=0\,,$$

$$f_z(z)=\frac{2V}{pd^4}\left(d^2-r^2\right)=\frac{2G}{rpd^4}\left(d^2-r^2\right) \quad (10)$$

где V - объёмный расход через одно подающее отверстие, м3/с; G - массовый расход через одно отверстие, кг/с.

В качестве другого примера функций $f_r(r)$, $f_z(z)$ - можно использовать зависимости, полученные из предположения, что жидкость поступала в отверстия через плавно сужающиеся или плавно расширяющиеся конические каналы, конкретные виды этих зависимостей могут быть получены из решения соответствующей задачи течения в конических каналах.

2. На остальной части сектора ABC используется условие прилипания жидкости:

$$\bar{v}=0\ \bar{v}=0\text{, при } \delta\le r\le h_r,\ z=0 \quad (11)$$

3. На ABB_2A_2, ACC_2A_2 выполняется условие симметрии течения:

$$(\bar{v}\cdot\bar{n})=0\text{, при } 0\le r\le h_r,\ z=h_z \quad (12)$$

$\bar{n}$ - нормаль к границам ABB_2A_2, ACC_2A_2.

4. На $A_2B_2C_2$ примем, что

$$p=const\text{, при } 0\le r\le h_r,\ z=h_z, \quad (13)$$

и так как давление определяется с точностью до постоянной величины, можно положить

$$p=0 \text{ при } 0\le r\le h_r,\ z=h_z \quad (14)$$

Для получения наиболее общего решения запишем задачу в безразмерном виде. Для этого введём безразмерные координаты

$$r^*=\frac{r}{d},\quad z^*=\frac{z}{d}, \quad (15)$$

безразмерные скорости

$$u_{r^*}=\frac{rpd^2v_r}{2G},\quad u_{z^*}=\frac{rpd^2v_z}{2G} \quad (16)$$

и безразмерное давление

$$p^*=\frac{p^2rd^4p}{4G^2} \quad (17)$$

Тогда система уравнений движения и неразрывности запишется в виде

$$\left(u_{r^*}\frac{\partial_{r^*}}{\partial r^*}+u_{z^*}\frac{\partial u_{r^*}}{\partial z^*}\right)=-\frac{\partial p^*}{\partial r^*}+ \\ +\frac{\mu\pi\delta}{2G}\left\{2\frac{\partial^2u_{r^*}}{(\partial r^*)^2}+\frac{\partial}{\partial z^*}\left(\frac{\partial u_{r^*}}{\partial z^*}+\frac{\partial u_{z^*}}{\partial r^*}\right)+\frac{2}{r^*}\left(\frac{\partial u_{r^*}}{\partial r^*}-\frac{u_{r^*}}{r^*}\right)\right\}, \quad (18)$$

$$\left(u_{r^*}\frac{\partial u_{z^*}}{\partial r^*}+u_{z^*}\frac{\partial u_{z^*}}{\partial z^*}\right)=-\rho g_{z^*}-\frac{\partial p^*}{\partial z^*}+ \\ +\frac{\mu\pi\delta}{2G}\left\{2\frac{\partial^2u_{z^*}}{(\partial z^*)^2}+\frac{\partial}{\partial r^*}\left(\frac{\partial u_{r^*}}{\partial z^*}+\frac{\partial u_{z^*}}{\partial r^*}\right)+\left(\frac{\partial u_{r^*}}{\partial z^*}+\frac{\partial u_{z^*}}{\partial r^*}\right)\right\}, \quad (19)$$

$$\frac{1}{r^*}\frac{\partial}{\partial r^*}(r^*u_{r^*})+\frac{\partial u_{z^*}}{\partial z^*}=0 \quad (20)$$

Граничные условия примут вид:

1. $u_{r^*}=\varphi_{r^*}(r^*)$, $u_{z^*}=\varphi_{z^*}(r^*)$,

$$\text{при } 0\le r^*\le 1,\ z^*=0 \quad (21)$$

где для простейшего случая

$$\varphi_{r^*}(r^*)=0,\ \varphi_{z^*}(r^*)=\left[1-(r^*)^2\right] \quad (22)$$

2. $$\bar{u}=0\text{, при } 1\le r^*\le\frac{h_r}{d},\ z^*=0 \quad (23)$$

3. $$(\bar{u}\cdot\bar{n})=0\text{, при } 0\le r^*\le\frac{h_r}{d},\ 0\le z^*\le\frac{h_z}{d}, \quad (24)$$

4. $$p^*=0\ p=0\text{, при } 0\le r^*\le\frac{h_r}{d},\ z^*=\frac{h_z}{d}. \quad (25)$$

Таким образом, решение задачи течения объемной осесимметричной свободной затопленной струи вязкой жидкости зависит от параметров $\mathrm{Re}'=\dfrac{2G}{mpd}$, $Fr'=\dfrac{p^2r^2d^5g}{4G^2}$, $r_k=\dfrac{h_r}{d}$ и от профилей скорости на выходе из отверстий $j_{r^*}(r^*)$, $j_{z^*}(r^*)$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №05-08-65508) и гранта Президента РФ №МК-9718.2006.8.

Работа представлена на VII научную конференцию с международным участием «Успехи современного естествознания», Дагомыс (Сочи), 4-7 сентября 2006. Поступила в редакцию 28.08.2006г

Химические науки

Применение ионного обмена для синтеза сложного оксида

Пимнева Л.А.
Тюменский государственный архитектурно-строительный университет

Развитие атомной энергетики, космической техники, самолето- и ракетостроения, радиоэлектроники, химической промышленности, черной и цветной металлургии, производство керамических и композиционных материалов требуют производства в больших количествах редких, рассеянных металлов высокой степени чистоты. Решение этих задач возможно при использовании замкнутых технологических схем, комплексного использования сырья и безотходных технологий с применением комплексообразующих ионитов.

Кроме того, ионообменные процессы широко используются при умягчении и обессоливании воды, для очистки промышленных сточных вод от токсичных элементов, сорбции ценных микроэлементов из природных вод, в гидрометаллургии, аналитической и препаративной химии, медицине, технологии редких металлов, прикладной химии и других областях. Для этих целей используют как традиционные высокоосновные и сильнокислотные иониты, так и комплексообразующие.

Применение ионообменных процессов позволяет с успехом решать важные народно-хозяйственные и экологические задачи по комплексной переработке природных ресурсов и охране окружающей среды.

Возможности ионного обмена широки. Получение методом ионного обмена с последующим пиролизом новых неорганических материалов – это новое направление в получении сложных оксидов, в том числе и высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалов. В основе неорганического синтеза лежат процессы сорбции ионов металлов или смеси ионов металлов из растворов ионитом с получением композиции "ионит-сорбированные ионы" и пиролиза насыщенного ионита на воздухе и далее в атмосфере газа восстановителя. На стадии сорбции достигается равномерное распределение ионов индивидуальных металлов или их смесей. В условиях пиролиза синтез необходимого соединения осуществляется не по реакциям химического взаимодействия между веществами (оксидами, солями и т.д.), а между ионами, расположенными друг от друга на атомных расстояниях. Кроме этого композиция “ионит-сорбированный ион” характеризуется очень высокой концентрацией последних, достигающей до 5 моль/дм3. Отмеченное облегчает и ускоряет процесс образования синтезируемого соединения. На последних стадиях сушки и пиролиза происходит выгорание органической части ионита и взаимодействие ионов с образованием сложного оксида в виде микросфер. Метод легко управляем, подвергается автоматизации и обеспечивает получение активных к спеканию порошков. Конечным продуктом в этом случае является повторяющий форму зерна ионита гранулят, представляющий по своей микроструктуре плотную упаковку из очень мелких кристаллитов. При формировании из таких гранулятов объемного изделия последние сохраняют первичную структуру, что обеспечивает высокие механические, физико-химические и технологические свойства готового продукта.

В настоящем сообщении рассматривается способ получения сложного оксида куприта иттрия и бария в виде порошков с использованием метода ионного обмена на катионитах. В данном случае порошки получались без включения в схему синтеза операции брикетирования. Это достигалось получением на начальных стадиях композиций «ионит-сорбированные ионы». Использование данного метода позволяет добиться весьма существенного перехода в сверхпроводящее состояние путем частичного замещения кислорода на фтор, хлор, фосфор и серу. Это достигается предварительной обработкой ионита соответствующими солями аммония и на последующей после сорбции стадии пиролиза ионита.

Была изучена совместная сорбция ионов иттрия, бария и меди. Влияние концентрации металлов на совместную сорбцию целесообразно представить в виде математической модели. Для получения модели использован метод математического планирования и метод крутого восхождения по поверхности отклика. В конечном итоге определены условия синтеза композиции «ионит-сорбированные ионы» для пиролиза с определенным соотношением между сорбированными ионами металлов иттрия, бария и меди - $1:2:3$.

Процесс сорбции ионов исследованных элементов фосфорнокислым катионитом КФП-12 описывается уравнением полинома первой степени:

$$\Gamma_Y = 0{,}39 + 7{,}576C_Y - 0{,}356C_{Ba} - 0{,}319C_{Cu} + 11{,}87C_YC_{Ba} + 10{,}625C_YC_{Cu};$$

$$\Gamma_{Ba} = 0{,}755 + 0{,}4C_Y + 6{,}25C_{Ba} - 0{,}7875C_{Cu} - 5{,}0C_YC_{Cu};$$

$$\Gamma_{Cu} = 0{,}433 + 0{,}055C_Y - 0{,}129C_{Ba} + 1{,}434C_{Cu} - 0{,}7C_YC_{Ba} - 0{,}7C_YC_{Cu} + 1{,}613C_{Ba}C_{Cu} + 8{,}75C_YC_{Ba}C_{Cu}$$

Процесс совместной сорбции ионов иттрия, бария и меди на сульфокатионите КУ-2х8 описывается уравнением полинома второй степени и имеет следующий вид: