

разцах оружия и формирования ТЗ на их разработку с учетом тенденций развития боевого стрелкового оружия в ведущих зарубежных странах.

Кроме того, необходимо знать ситуацию с производством порохов, патронов, оптических прицелов, металла и других материалов, необходимых для производства оружия.

Поскольку без науки конкурентоспособное оружие не создать, то важно исследовать существующие взаимоотношения между оружейными предприятиями, отраслевыми научно-исследовательскими институтами, научными организациями РАН, высшими и средними учебными заведениями и другими организациями, которые так или иначе участвуют в процессе создания боевого стрелкового оружия (Оружие и его создатели – связь времен / под ред. С. А. Писарева, Б. А. Якимовича. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2012. 520 с.).

И, наконец, нельзя забывать о системе «стрелок – оружие», которая акцентирует внимание на анализе перспектив развития Вооруженных сил РФ, самих военнослужащих, использующих стрелковое оружие. Это направление связано с анализом специфики возможных моделей военных действий, в которых предполагается участие представителей Вооруженных сил РФ с использованием отечественного боевого стрелкового оружия.

Уровень государственного управления стрелковой отраслью включает также систему целей, на-

правленных в конечном итоге на формирование эффективной системы создания боевого стрелкового оружия РФ с полноценным ресурсным обеспечением (административным, трудовым, финансовым, материально-техническим, сырьевым, информационным), на разработку и производство различных образцов конкурентоспособного боевого стрелкового оружия для потребностей Вооруженных сил РФ.

При разработке новых образцов современного оружия без системного подхода не обойтись, так как необходимо исследовать систему «параметры цели – источники энергии – патрон – пуля – ствол – кинематическая схема оружия – система «стрелок – оружие» – облик солдата будущего – среда, в которой применяется оружие». Из анализа этой системы вытекает целый перечень целей и задач, направленных, например, на разработку новых боеприпасов, порохов, материалов, новых конструктивных схем оружия, связанных также с совершенствованием самого стрелка, его профессиональных качеств, экипировки и оснащения техническими средствами.

Таким образом, эффективность государственной политики по развитию стрелковой отрасли определяет базовые условия, которые должны обеспечить стабильное функционирование и конкурентоспособное развитие системы создания боевого стрелкового оружия РФ и разработку конкурентоспособного оружия.

B. A. Yakimovich, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

S. A. Pisarev, DSc in Engineering, PhD in Economics, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

R. R. Farkhetdinov, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

About the State Policy Devoted to the Development of the Combat Small Arms Acquisition System

This article describes the system approach to the development of the state policy devoted to the development of the combat small arms acquisition system of the Russian Federation Armed forces.

Keywords: system, system approach, target, combat small arms, policy, management, functions, structure, model.

Получено 10.04.14

УДК 66.063.8

Н. А. Газизуллин, кандидат технических наук, доцент, Казанский национальный исследовательский технологический университет

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОУПРУГОЙ ЖИДКОСТИ В АППАРАТЕ С ТУРБИНОЙ МЕШАЛКОЙ

Методом контрольных объемов выполнено численное моделирование ламинарного течения вязкоупругой жидкости в аппарате с турбинной мешалкой Раштона. Результаты расчетов представлены в виде линий тока вторичной циркуляции жидкости.

Ключевые слова: перемешивание, турбинная мешалка Раштона, вязкоупругая жидкость, метод контрольных объемов, линии тока.

Перемешивание в жидких средах широко используется в химической, фармацевтической, пищевой и ряде других отраслей промышленности в различных технологических процессах [1, 2]. Зачастую эти процессы сопровождаются

образованием сложных структур течения жидкости в аппарате, особенно в случае перемешивания не-ньютоновских жидкостей, используемых в производстве полимерных материалов, лекарственных средств, пищевых и ряда других продуктов. Эффек-

тивность этих процессов основана на расчете таких практически важных характеристик, как время перемешивания и потребляемая на перемешивание мощность, которые, в свою очередь, зависят от характера течения и реологических свойств жидкости.

Широкую область применения находят турбинные мешалки, которые пригодны для перемешивания жидкостей в большом диапазоне изменения вязкости. Их используют для образования взвесей, растворения веществ, интенсификации теплопередачи и в ряде других случаев. Турбинные мешалки снабжены лопатками. В зависимости от способа крепления лопаток и их конфигурации существуют различные типы турбинных мешалок. Наиболее простой и в то же время эффективной является турбинная мешалка Раштона, представляющая собой мешалку с прямыми лопатками, расположенными радиально [1]. Лопатки могут быть приварены к диску или прикреплены с помощью болтов (рис. 1).

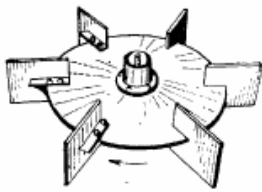


Рис. 1. Турбинная мешалка Раштона

В данной работе проведено численное моделирование ламинарного течения несжимаемой неньютоновской жидкости, описываемой реологической моделью вязкоупругой Олдройд-Б жидкости, в аппарате с турбинной мешалкой Раштона. Исходными уравнениями, описывающими течение жидкости в аппарате, будут уравнения движения и неразрывности в виде [3]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot \rho \vec{v} \vec{v} = \vec{F} + \nabla \cdot (-pI + \sigma); \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкости; p – давление; σ – тензор-девиатор напряжений; I – единичный тензор.

Реологическая модель вязкоупругой Олдройд-Б жидкости записывается в виде соотношения [4]

$$\sigma + \lambda_1 \overset{\nabla}{\sigma} = 2\eta \left(D + \lambda_2 \overset{\nabla}{D} \right), \quad (3)$$

где η – сдвиговая вязкость; λ_1 – время релаксации; λ_2 – время ретардации, а тензор скоростей деформаций определяется как

$$D = \frac{1}{2} \left[\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T \right].$$

Соотношение (3) содержит также верхнюю конвективную производную, определяемую в виде [4]

$$\overset{\nabla}{\sigma} = \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \sigma - (\nabla \vec{v})^T \cdot \sigma - \sigma \cdot \nabla \vec{v},$$

где верхний индекс T обозначает операцию транспонирования.

Течение жидкости будем рассматривать в подвижной, связанной с вращающейся мешалкой, цилиндрической системе координат r, φ, z . Проекция вектора скорости обозначим, соответственно, через u, v, w . Проекция объемной силы в подвижной системе координат содержит ускорение Кориолиса и центробежное ускорение, а также ускорение силы тяжести и имеют вид

$$F_r = \rho(\omega^2 r + 2\omega v); \quad F_\varphi = -2\rho\omega u; \quad F_z = -\rho g.$$

Для решения системы уравнений (1), (2) и (3) используется метод расщепления напряжений [5], согласно которому тензор напряжений расщепляется на вязкоупругую составляющую и вязкую составляющую посредством равенства

$$\sigma = \tau + 2\eta_2 D, \quad (4)$$

где вязкоупругая составляющая тензора напряжений τ удовлетворяет уравнению

$$\tau + \lambda_1 \overset{\nabla}{\tau} = 2\eta_1 D. \quad (5)$$

В формулах (4) и (5) постоянные η_2 и η_1 , представляющие собой, соответственно, ньютоновский и неньютоновский вклады в общую вязкость, определяются соотношениями

$$\eta = \eta_1 + \eta_2; \quad \lambda_2 = (1 - \beta)\eta\lambda_1; \quad \beta = \frac{\eta_1}{\eta}.$$

С учетом (4) уравнение движения (1) примет вид

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v} - \eta \nabla \vec{v}) = \vec{F} - \nabla p + \nabla \cdot (\tau - 2\beta \eta D). \quad (6)$$

Граничные условия на свободной поверхности жидкости включают в себя кинематическое и динамическое условия [6]. Кинематическое условие

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -u \frac{\partial h}{\partial r} + w, \quad (7)$$

где h – высота свободной поверхности жидкости над мешалкой, свидетельствует о том, что скорость движения свободной поверхности в направлении нормали к ней совпадает с нормальной составляющей скорости движения жидкости. Динамическое условие является условием равенства сил, действующих на свободную поверхность. Будем предполагать, что силы поверхностного натяжения незначительны, так как радиус кривизны поверхности жидкости в аппарате достаточно велик. Тогда динамическое условие может быть записано в виде

$$\vec{n} \cdot (-pI + \sigma) = -p_0 \vec{n} \cdot I, \quad (8)$$

где p_0 – атмосферное давление, а вектор нормали к свободной поверхности жидкости

$$\vec{n} = \left\{ -\frac{\partial h}{\partial r}; 0; 1 \right\}.$$

Граничные условия для составляющих скорости на твердых стенках заключаются в отсутствии относительного движения жидкости и твердой поверхности. Тогда на дне и боковой стенке аппарата

$$u = 0; v = -\omega r; w = 0,$$

а на поверхности вала и мешалки, соответственно,

$$u = 0; v = 0; w = 0,$$

где ω – угловая скорость вращения вала и мешалки.

На оси вращения потока под мешалкой примем

$$u = 0; v = 0; \frac{\partial w}{\partial r} = 0.$$

Поскольку форма свободной поверхности жидкости неизвестна и должна быть найдена в результате расчетов, то перейдем от физической области течения к расчетной области с известными границами. Для этого физическую область поделим на две подобласти, нижнюю и верхнюю, горизонтальным сечением, проведенным через верхнюю поверхность мешалки. Введем безразмерные координаты и функции:

$$t^* = \frac{Ut}{L}; r^* = \frac{r}{L}; \varphi^* = \varphi; z^* = \begin{cases} \frac{z}{L}, & z \leq H + b, \\ \frac{z - H - b}{h}, & z > H + b; \end{cases}$$

$$\vec{v}^* = \frac{\vec{v}}{U}; p^* = \frac{L(p - p_0)}{\eta U}; \sigma^* = \frac{L\sigma}{\eta U},$$

где H – высота расположения мешалки над дном аппарата; b – высота лопасти мешалки, а в качестве характерной длины L и характерной скорости потока U выбраны, соответственно, диаметр мешалки d и окружная скорость (в неподвижной системе координат) конца лопасти.

После преобразования координат уравнение неразрывности (2) сохранит вид

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0.$$

При этом проекции вектора скорости в расчетной области будут определяться следующим образом:

$$U = \gamma u^*; V = \gamma v^*; W = w^* - u^* z^* \frac{\partial \gamma}{\partial r^*},$$

где $\gamma = 1$ для нижней подобласти и $\gamma = h^*$ для верхней подобласти; $h^* = h/d$, а u^* , v^* , w^* – компоненты вектора скорости в безразмерной физической области, определяемой преобразованием

$$r^* = \frac{r}{d}; \varphi^* = \varphi; z^* = \frac{z}{d}.$$

В расчетной области уравнение движения (6) в проекциях на оси координат в сочетании с уравне-

нием неразрывности может быть записано в виде обобщенного уравнения переноса

$$\frac{\partial}{\partial t^*} (\Lambda \Phi) + \frac{1}{\gamma h_1 h_2 h_3} \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{h_1 h_2 h_3}{h_k} \Lambda u_k \Phi \right) = \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{h_1 h_2 h_3}{h_k^2} \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_k} \right) + S_\Phi, \quad (9)$$

где приняты следующие обозначения: $h_1 = 1$; $h_2 = r^*$; $h_3 = 1$; $x_1 = r^*$; $x_2 = \varphi^*$; $x_3 = z^*$; $u_1 = u^*$; $u_2 = v^*$; $u_3 = w^*$; k – индекс суммирования; $\Gamma = 1$; $\Lambda = \pi Re$; $Re = \rho n d^2 / \eta$ – центробежное число Рейнольдса; n – число оборотов мешалки в единицу времени, а S_Φ – член типа источника, который определяется соответственно искомой функции Φ .

Уравнение (5) в координатной форме также может быть представлено в виде обобщенного уравнения (9). При этом следует считать $\Gamma = 0$; $\Lambda = We$; $We = \lambda_1 \omega$ – число Вайссенберга.

Численное моделирование течения проводилось методом контрольных объемов в сочетании с алгоритмом *SIMPLE* [7]. Метод контрольных объемов основан на том, что расчетную область разбивают на конечное число контрольных объемов (ячеек) таким образом, чтобы каждая узловая точка содержалась в отдельной ячейке. Алгоритм *SIMPLE* представляет собой итерационную процедуру для расчета полей скорости и давления.

Для расчета формы свободной поверхности жидкости использовалось динамическое условие (8) в проекции на нормаль, которое в безразмерных переменных может быть представлено в виде

$$\frac{\partial h^*}{\partial r^*} = \frac{\sigma_{zz}^* - p^* + (\sigma_{rr}^* - p^*) \left(\frac{\partial h^*}{\partial r^*} \right)^2}{2\sigma_{rz}^*}, \quad (10)$$

где σ_{rr} , σ_{zz} , σ_{rz} – компоненты тензора напряжений.

Решение уравнения (10) проводилось на каждой итерации при фиксированном значении производной $\partial h^* / \partial r^*$ в правой части уравнения, взятом с предыдущей итерации. При вычисленных на k -й итерации значениях высоты свободной поверхности $h_i^{*(k)}$ может не выполняться условие постоянства объема жидкости в аппарате (при этом достаточно учитывать объем жидкости над мешалкой). Таким образом, возникает необходимость введения некоторой поправки $\delta h^{(k)}$ к значениям $h_i^{*(k)}$ на каждом итерационном шаге. Эта поправка находится из соотношения

$$V_0 - V^{(k)} = \pi (R^{*2} - r_s^{*2}) \delta h^{(k)}, \quad (11)$$

где V_0 – объем жидкости над мешалкой с невозмущенной свободной поверхностью; $V^{(k)}$ – объем жидкости над мешалкой на k -й итерации, который вычисляется на каждой итерации путем численного интегрирования по значениям $h_i^{*(k)}$; R – радиус аппарата; r_s – радиус вала; i – индекс нумерации узлов расчетной сетки в радиальном направлении. Следует

отметить, что в соответствии с формулой (11) поправка $\delta h^{(k)}$ не влияет на форму свободной поверхности, а лишь корректирует ее по высоте. Окончательно с учетом поправки $\delta h^{(k)}$ скорректированные значения высоты свободной поверхности $h_i^{*(k)}$ могут быть найдены как

$$h_i^{*(k)} = h_i^{**(k)} + \delta h^{(k)},$$

где в качестве начальных значений $h_i^{*(0)}$ принимается значение, соответствующее положению невозмущенной поверхности жидкости.

В расчетах принимается: $H_0 = D$, $d/D = 0,3$, $d_s/D = 0,05$, $a = d/4$, $b/a = 0,8$, $d_0 = 0,75d$, $H/H_0 = 0,35$, где H_0 – высота невозмущенной поверхности жидкости над дном аппарата; D – диаметр аппарата; d_s – диаметр вала; d_0 – диаметр диска; a – длина лопатки.

Результаты расчетов представлены в виде линий тока жидкости в меридиональном сечении аппарата (рис. 2).

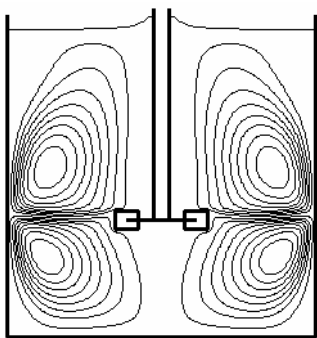


Рис. 2. Радиально-осевая циркуляция в аппарате при $Re = 500$, $We = 5$

Мешалка создает потоки жидкости, которые вызывают циркуляцию во всем объеме аппарата. Окружная циркуляция, называемая первичной, связана с вращением массы жидкости вокруг оси вращения

мешалки. Существенную роль в перемешивании играет вторичное циркуляционное течение, которое накладывается на основное окружное течение. Перемешиванию способствуют два потока радиально-осевой циркуляции, соответственно, сверху и снизу от мешалки. При перемешивании вязких жидкостей вращательное движение объема жидкости в аппарате приводит к понижению уровня жидкости у вала мешалки и образованию воронки [8]. Однако при перемешивании неньютоновской жидкости, обладающей упругими свойствами, наоборот, наблюдается некоторое повышение уровня жидкости у вала. Это явление связано с наличием в вязкоупругих жидкостях эффекта Вайссенберга [4], основанного на возникновении нормальных напряжений при сдвиговом течении жидкости. Нормальные напряжения приводят к тому, что жидкость выдавливается из аппарата и поднимается вдоль вала, создавая эффект поднятия.

Библиографические ссылки

1. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. – Л. : Химия, 1975. – 384 с.
2. Zlokarnik M. Stirring: Theory and Practice. – Weinheim : Wiley-VCH, 2001. – 362 p.
3. Астарита Дж., Маруччи Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей. – М. : Мир, 1978. – 312 с.
4. Larson R. G. The structure and rheology of complex fluids. – New York : Oxford University Press, 1999. – 663 p.
5. Phillips T. N., Williams A. J. Viscoelastic flow through a planar contraction using a semi-Lagrangian finite volume method // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. – 1999. – Vol. 87. – P. 215–246.
6. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. – М. : Наука, 1977. – 408 с.
7. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
8. Газизуллин Н. А. Перемешивание жидкости в аппарате с лопастной мешалкой // Вестник ИжГТУ. – 2010. – № 3(47). – С. 20–23.

N. A. Gazizullin, PhD in Engineering, Associate Professor, Kazan National Research Technological University

Numerical Simulation of Secondary Viscoelastic Flow in a Tank with Turbine Stirrer

Numerical simulation of laminar viscoelastic flow in a tank with a Rushton turbine is carried out by the control volume method. The results of computations are presented as streamline contours of the secondary circulation.

Keywords: mixing, Rushton turbine, viscoelastic fluid, control volume method, streamline contours.

Получено 14.04.14