



УДК 622

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ КАВИТАЦИОННОГО ДИСПЕРГАТОРА-СМЕСИТЕЛЯ



SIMULATION OF FLOW IN THE WORKING CHAMBER OF A CAVITATION DISPERSER-MIXER

Пахляян Ирина Альбертовна

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры МОНГП,
Кубанский государственный
технологический университет
pachlyan@mail.ru

Pakhlyan Irina Albertovna

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Associate Professor Department of MONGP,
Kuban state technological university
pachlyan@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена трехмерному CFD моделированию течения в рабочей камере диспергатора – смесителя – устройства, применяемого для смешивания многофазных потоков, в том числе для приготовления буровых, промывочных и тампонажных растворов при строительстве и капитальном ремонте скважин. Освещены вопросы построения гидродинамической модели потока.

Annotation. The Article is devoted to three-dimensional CFD modeling of the flow in the working chamber of a disperser-mixer-a device used for mixing multiphase flows, including for the preparation of drilling, flushing and grouting solutions during the construction and overhaul of wells. The issues of constructing a hydrodynamic flow model are highlighted.

Ключевые слова: диспергирование; гидродинамика; кавитация; многофазное течение; моделирование в STAR-CCM+.

Keywords: dispersion; hydrodynamics; cavitation; multiphase flow; modeling in STAR-CCM+.

Сервисные компании и буровые предприятия уделяют повышенное внимание технологии приготовления и параметрам применяемых буровых и тампонажных растворов, от которых, в-первую очередь, зависит качество выполняемых работ по строительству и капитальному ремонту скважин [1].

Перспективным для интенсификации процессов диспергирования и смешивания в многофазных средах является использование эффекта кавитации, который оказывает значительное влияние на тиксотропные и фильтрационные свойства глинистых растворов, прочность цементного камня за счет очень высокой локальной концентрации энергии при небольших средних затратах мощности.

Для эффективной реализации механизма интенсификации процессов смешивания, диспергирования, эмульгирования, гомогенизации при приготовлении буровых и тампонажных растворов с целью повышения их качества был разработан кавитационный диспергатор-смеситель [2] (рисунок 1).

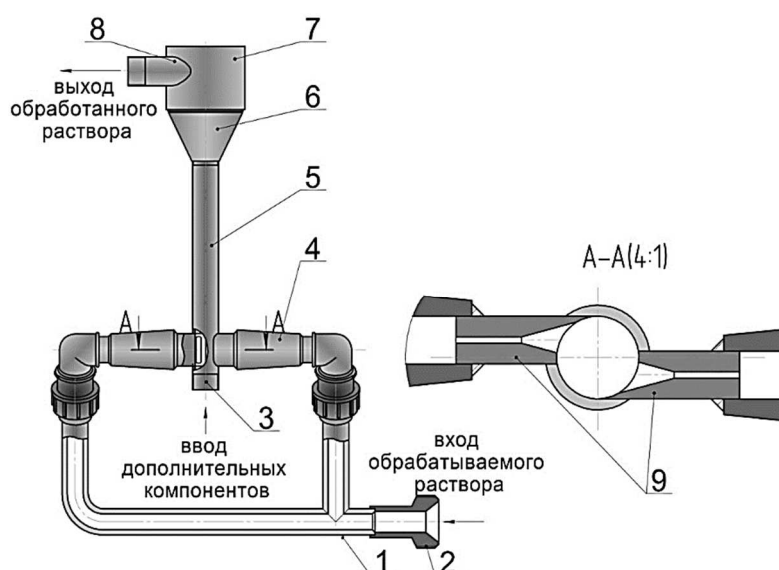


Рисунок 1 – Кавитационный диспергатор-смеситель:

1 – линия подвода раствора; 2 – входной штуцер; 3 – линия подвода раствора; 4 – корпус; 5 – рабочая камера; 6 – диффузор; 7- цилиндр; 8 – патрубок выхода раствора; 9 – генераторы кавитации



В абсолютном большинстве случаев, при проектировании новых гидроустройств используются расчеты в CFD пакетах, например STAR-CCM+. С их помощью моделируются процессы течения в проточных частях и оптимизируется геометрия рабочих камер.

Поскольку в разработанном диспергаторе основные процессы кавитации и смешивания происходят в кавитаторах и рабочей камере для предварительного расчета будем рассматривать трехмерные области обозначенные цифрами 5 и 9.

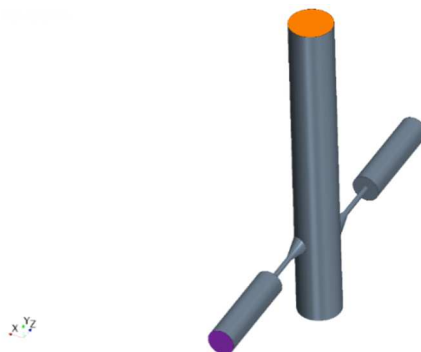


Рисунок 2 – Трехмерная модель исследуемой области

Разбиение данных областей на контрольные объемы выполнено с параметрами представленными в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры сетки

Базовый размер, мм	1
Базовый размер в области кавитаторов, мм	0,32
Толщина призматического слоя, мм	0,6
Растяжение призматического слоя	1,3
Число призматических слоев	5

Для правильного расчета профиля скорости струи размер сеточной ячейки, в каждой из исследуемых областей, выбран из условия:

$$a = 0,1 \cdot d,$$

где a – базовый размер сетки; d – эквивалентный диаметр исследуемой области.

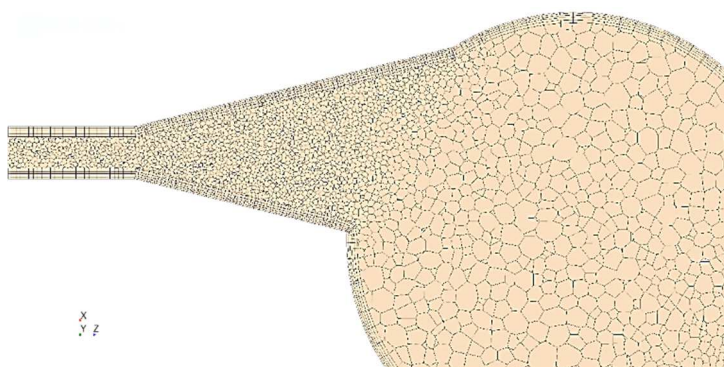


Рисунок 3 – Расчётная сетка в горизонтальном сечении кавитаторов

Предварительный расчет предполагает построение поля давлений в исследуемой области для определения возникновения кавитации. Для этого необходимо математическое описание поведения текучей среды. В случае несжимаемой жидкости необходимо решение дискретных аналогов уравнения сохранения количества движения (уравнение Навье – Стокса):

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}; \tag{1}$$

и уравнения сохранения массы (уравнение неразрывности):



$$\operatorname{div} v = 0; \tag{2}$$

где \vec{v} – векторное поле скоростей; t – время; ν – кинематическая вязкость; ρ – плотность жидкости; p – давление; \vec{f} – векторное поле массовых сил.

При работе диспергатора образуется турбулентный поток. CFD пакеты для моделирования турбулентности мгновенные уравнения Навье-Стокса усредняют по времени. Осредненные по времени уравнения Навье-Стокса являются уравнениями Рейнольдца и для трехмерного случая представляются в виде:

$$\begin{cases} X - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \nabla^2 \bar{u}_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot (\overline{\rho u_x u_x}) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\rho u_x u_y}) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\rho u_x u_z}) = \\ \quad = \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial x} \cdot \bar{u}_x + \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial y} \cdot \bar{u}_y + \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial z} \cdot \bar{u}_z \\ Y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \nabla^2 \bar{u}_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot (\overline{\rho u_y u_x}) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\rho u_y u_y}) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\rho u_y u_z}) = \\ \quad = \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial x} \cdot \bar{u}_x + \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial y} \cdot \bar{u}_y + \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial z} \cdot \bar{u}_z \\ Z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu \nabla^2 \bar{u}_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot (\overline{\rho u_z u_x}) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\rho u_z u_y}) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\rho u_z u_z}) = \\ \quad = \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial x} \cdot \bar{u}_x + \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial y} \cdot \bar{u}_y + \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial z} \cdot \bar{u}_z \end{cases} \tag{3}$$

Для определения напряжений Рейнольдца $(\overline{\rho u_i u_j})$, используется SST K- ω модель турбулентности, использующая два дифференциальных уравнения в частных производных для двух переменных [3]:

k – кинетическая энергия турбулентности, определяемая как:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta * k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot [(v + \sigma_k v_T)] \frac{\partial k}{\partial x_j} \tag{4}$$

и ω – удельная скорость диссипации, определяемая как:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot [(v + \sigma_\omega v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j}] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \tag{5}$$

Коэффициенты замыкания и вспомогательные соотношения [3]:

$$F_2 = \tanh \cdot \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta * \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \tag{6}$$

$$P_k = \min \left(\tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10\beta * k \omega \right) \tag{7}$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta * \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \tag{8}$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right) \tag{9}$$

$$\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1) \tag{10}$$

$$\alpha_1 = \frac{5}{9}, \alpha_2 = 0,44;$$

$$\beta_1 = \frac{3}{40}, \beta_2 = 0,0828;$$

$$\beta * = \frac{9}{100};$$

$$\sigma_{k1} = 0,85, \sigma_{k2} = 1;$$

$$\sigma_{\omega 1} = 0,5, \sigma_{\omega 2} = 0,856.$$

Другие параметры физической модели представлены на рисунке 4.

Свойства текучей среды были заданы близкими к свойствам воды. Для задания давления на входе использовалась граница обозначенные фиолетовым цветом (рис. 2). Граница с давлением на выходе обозначена оранжевым цветом. Остальные границы заданы в качестве абсолютно твердых стенок. Для построения поля давлений выбрана стационарная постановка задачи.

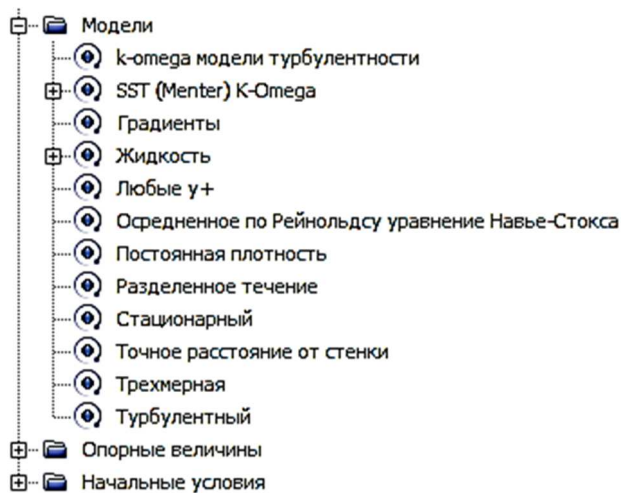


Рисунок 4 – Задание физической модели

При давлении на входе $p_{вх} = 1,15$ Мпа и расходе $Q = 16 \frac{л}{с}$ расчёт показал следующие поля давлений и скоростей:

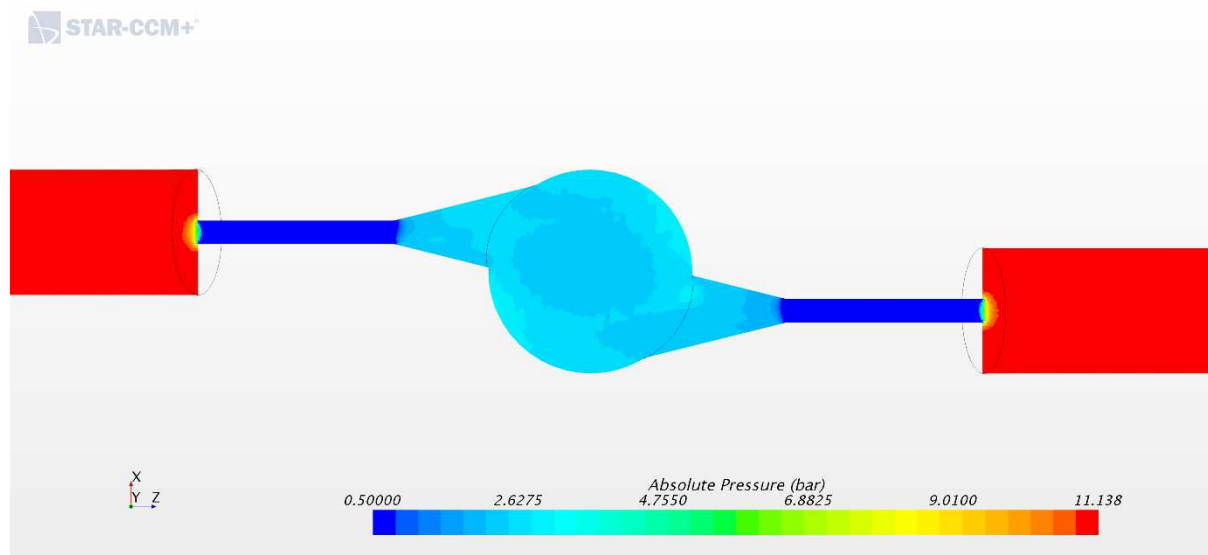


Рисунок 5 – Поле давления в горизонтальном сечении кавитаторов

Можно наблюдать падение давления в соплах кавитаторов ниже давления насыщенных паров, таким образом создаются условия для возникновения кавитации [4]. Анализ картины векторов скоростей (рис. 6) показывает, как образуется большой вихрь на оси рабочей камеры, что способствует наиболее эффективному перемещиванию:

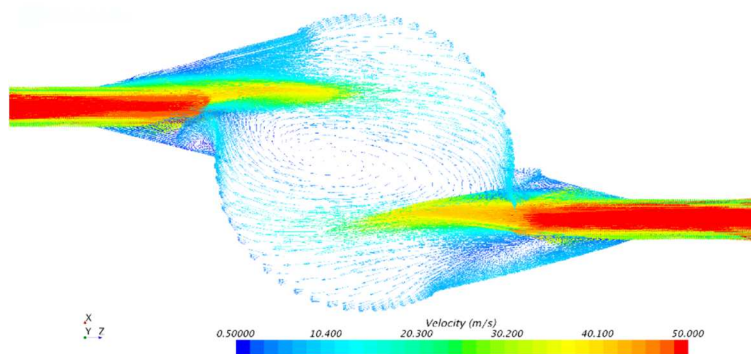


Рисунок 6 – Векторы скоростей в горизонтальном сечении кавитаторов



Выводы

Путем изменения геометрических размеров данных кавитаторов (ширины и длины щели), а также изменением параметров насоса можно гибко регулировать пропускную способность диспергатора-смесителя. В рабочей камере 5 происходит процесс образования, роста, схлопывания кавитационных камер, что способствует интенсивному перемешиванию, диспергированию твердых частиц раствора.

Выполнение генераторов кавитации 9 в виде плоских щелевых насадок, позволяет генерировать кавитацию в любых сложных многофазных растворах для получения стабильных коллоидно-монодисперсных систем.

Результаты проведенных исследований показывают, что приготовление тампонажных растворов кавитационным диспергатором-смесителем позволило практически до 4 раз снизить водоотделение тампонажных растворов, повысить предел прочности цементного камня в среднем в 1,2 раза.

Ускорить процесс формирования цементного камня (сроки начала схватывания сократились на 9–12 %, конца схватывания на 6–8 %, время загустевания на 6–9 %).

Литература

1. Пахлян И.А. Исследование гидроэжекторных смесителей, модернизация их конструкций и совершенствование технологии приготовления буровых промывочных и тампонажных растворов : дисс. ... канд. – Краснодар, 2010.
2. Патент РФ № 116068. Кавитационный диспергатор-смеситель. Авт. Омелянюк М.В., Пахлян И.А. – Заявка № 2011143283. – Дата 20.05.2012.
3. Wilcox D.C. (2008), Formulation of the $k-\omega$ Turbulence Model Revisited, 46, AIAA Journal, pp. 2823–2838, doi: 10.2514 / 1.36541
4. Омелянюк М.В., Пахлян И.А. Разработка устройства для интенсификации процессов смешивания и диспергирования при приготовлении буровых и тампонажных растворов // Инженер-нефтяник. – М., 2014. – № 4. – С. 20–23.

References

1. Pakhlyan I.A. Research of the hydro-jet mixers, modernization of their constructions and improvement of the technology of the drilling flushing and plugging mud preparation : dissertation ... Cand. – Krasnodar, 2010.
2. RF Patent № 116068. Cavitation dispersant-mixer. Avt. Omelyanyuk M.V., Pakhlyan I.A. – Application № 2011143283. – Date 20.05.2012.
3. Wilcox D.C. (2008), Formulation of the $k-\omega$ Turbulence Model Revisited, 46, AIAA Journal, pp. 2823-2838, doi: 10.2514 / 1.36541
4. Omelyanyuk M.V., Pakhlyan I.A. Development of a device for intensification of the mixing and dispersion processes at preparation of drilling and plugging solutions // Petroleum engineer. – M., 2014. – № 4. – P. 20–23.