УДК 504.054

А.В.ИВАНОВ, *аспирант, andrey-racer@mail.ru*
Ю.Д.СМИРНОВ, *канд. техн. наук, ассистент, qwerik84@gmail.com*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

A.V.IVANOV, *post-graduate student, andrey-racer@mail.ru*
Y.D.SMIRNOV, *PhD in eng. sc., assistant lecturer, qwerik84@gmail.com*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ФОРСУНКИ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В Горном университете была предложена конструкция пневмогидравлической форсунки для систем пылеподавления. Важным этапом разработки форсунок пылеподавления является построение математической вычислительной модели для оптимизации гидравлического течения внутри форсунки с целью сокращения затрат на эксплуатацию.

Ключевые слова: форсунка, VOF-модель, расчетная область, сеточная структура, фрагментация.

OPTIMIZATION OF WORK OF DUST SUPPERESSION SPRAYER WITH USE OF COMPUTING MODELLING

In the Mining University there was set construction of pneumohydraulic sprayer for dust suppression systems. Important development stage of dust suppression sprayer is creation meth computing model for optimization of a hydraulic flow in a sprayer for reduction of working expenses.

Key words: sprayer, VOF-model, calculation area, net structure, fragmentation.

При разработке распылителей для систем пылеподавления важным этапом работы является сокращение затрат на эксплуатацию распылителя. Основные затраты приходятся на потери при гидравлическом течении внутри распылителя. Натурные эксперименты не позволяют определять параметры внутреннего течения, поэтому невозможно применять данный метод исследований для оптимизации конструкции. Рациональным решением данной задачи является использование вычислительного 3D-моделирования. Трехмерная гидравлическая модель позволяет провести подбор параметров распылителя с широким диапазоном значений, определить и оптимизировать течение жидкой и газообразной фаз.

В настоящее время построение таких моделей стало возможным во многих программных комплексах, ориентированных на моделирование течений жидкостей и газов. Выбранный комплекс называется Volume of fluid (VOF) [2]. VOF-модель является континуальной моделью, где сплошные среды взаимопроникающие при рассмотрении двухфазного потока с уже распыленной жидкостью. При этом вводится понятие «газ частиц» или «газ капель».

Недостатком VOF-модели является требование крайне подробной дискретизации расчетного пространства до масштаба мельчайших капель. Это ограничение позволяет моделировать течение газа и жидкой пленки только до момента ее распада, т.е. практи-

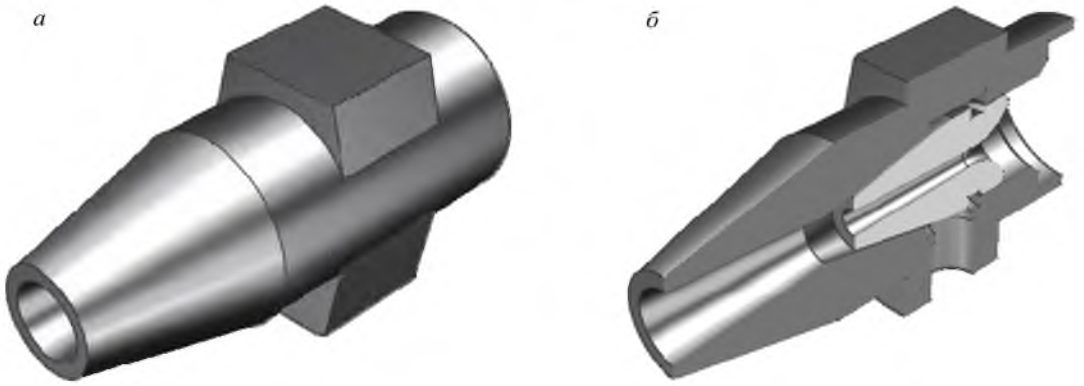


Рис.1. Геометрическая модель распылительной форсунки



Рис.2. Расчетные области для осесимметричного расчета внутреннего течения в форсунке совместно с ближним (*а*) и дальним (*б*) газодинамическим полем

чески исследовать область пространства только внутри и в непосредственной близости от выходного сечения форсунки. Тем не менее существует ряд работ [4, 5], где VOF-модель успешно используется для оптимизации рабочего процесса внутри форсунок, в частности рассматриваемого типа, и позволяет выявлять тонкие аспекты начального взаимодействия движущейся жидкой пленки и потока воздуха.

На основе имеющейся конструкторской документации была построена твердотельная модель распылительной форсунки [1]. Построение модели выполнялось в CAD-системе верхнего уровня Siemens NX 6. Геометрическая модель представляет собой сборку, состоящую из двух деталей: корпуса и внутреннего сопла. Эти элементы конструкции позволяют сформировать расчетную область для исследования внутреннего течения воды и воздуха в форсунке, формирования жидкой пленки и ее фрагментации на капли (рис.1).

Фрагмент конструкции, где рассматриваются процессы встречи жидкой и газообразной фаз, обладает осевой симметрией. Помимо этого, само физическое явление можно также считать осесимметричным. Для таких случаев целесообразно выполнять моделирование на основе осесимметричной постановки. Таким образом, пространственная трехмерная задача сводится к двухмерной, где будут иметь место два направления: осевое и радиальное. На рис.2, *а* приведена расчетная область для решения осесимметричной задачи и определения параметров ближнего газодинамического поля. Расчетная область формируется на основе продольного сечения распылительной форсунки и включает часть окружающего форсунку пространства.

На рис.2, *б* приведена геометрия области для расчета течения внутри форсунки и дальнего газодинамического поля. В отличие от предыдущей модели, рассматривается дополнительная, значительно более обширная, часть внешнего пространства перед форсункой. Протяженность внешнего пространства должна определяться длиной распространения газокапельного облака, формируемого форсункой.

Расстояние, при котором скорость течения капель и несущего газа будет приближаться к нулю, может быть оценено в

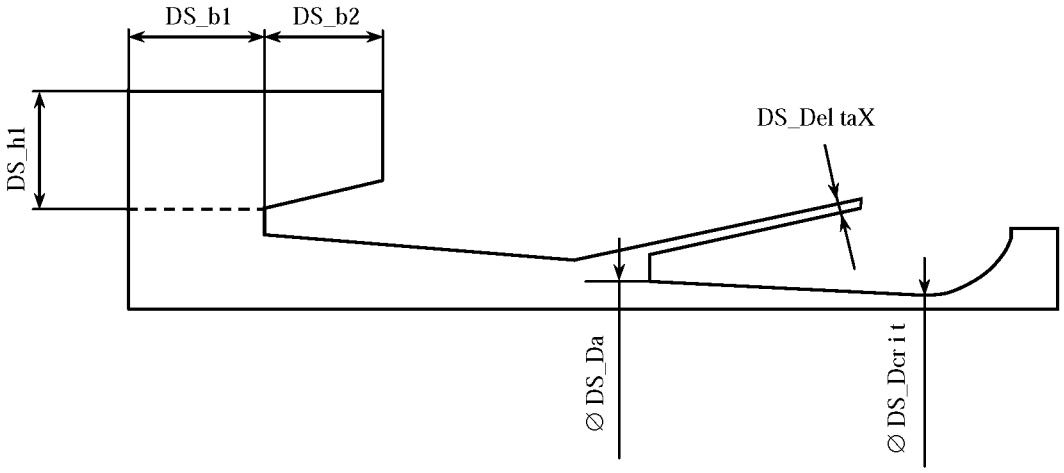


Рис.3. Варьируемые геометрические параметры для первой расчетной области

результате серии последовательных расчетов. В каждом из этих расчетов необходимо будет увеличивать или уменьшать по сравнению с предыдущим протяженность расчетной области, в зависимости от значения скорости течения вблизи наиболее отдаленного от форсунки фрагмента выходной границы (на рис.2, *б* это крайняя левая граница области). Соответственно, осевое расстояние между выходным сечением форсунки и крайней левой границей будет задано как варьируемый геометрический параметр.

С целью исследования влияния геометрических характеристик распылительной форсунки на процесс формирования жидкой пленки и капель для двух построенных геометрических конфигураций была выполнена параметризация, т.е. определение некоторых характерных геометрических характеристик конструкции как варьируемых. На рис.3 приведена схема определения варьируемых геометрических параметров для первой расчетной области.

В качестве параметризованных геометрических характеристик, относящихся к конструкции форсунки, были заданы диаметры критического (DS_Dcrit) и выходного (DS_Da) сечения внутреннего сопла, ширина кольцевого зазора (DS_DeltaX) для подачи воды. Были также параметризованы размеры, задающие протяженность окружающего форсунку пространства: два осевых размера (DS_b1 и DS_b2) и высота (DS_h1) расчетной области.

Известное отношение диаметров критического и выходного сечения внутреннего сопла позволяет определить геометрическое число Маха потока, которое будет реализовываться при достаточном перепаде давлений в ресивере (на входе во внутреннее сопло) и в окружающем пространстве.

Для построения расчетной сетки с упорядоченной структурой (структурированной сетки) необходимо выполнить разбиение исходной расчетной области на фрагменты, имеющие четырехугольную или треугольную форму для плоских расчетных областей. В случае трехмерных расчетных областей разбиение выполняется на элементарные объемы кубической или призматической формы. Структурированная сетка обладает рядом преимуществ: высокой скоростью генерации сетки, экономичностью (меньшее количество элементов на единицу поверхности или объема), устойчивостью расчетного процесса и быстротой сходимости в сравнении с использованием неструктурированной сетки. Экономичное использование структурированных сеток проявляется особенно в тех случаях, когда направление сеточных линий и упорядоченных слоев элементов совпадает с направлением движения потока, а также при наличии больших градиентов параметров течения. Недостатком этого подхода построения сеток является высокая трудоемкость процесса декомпозиции (разбиения) расчетной области на фрагменты, особен-

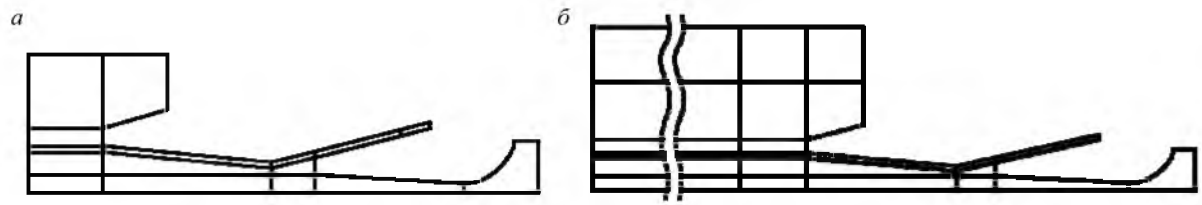


Рис.4. Декомпозиция расчетных областей

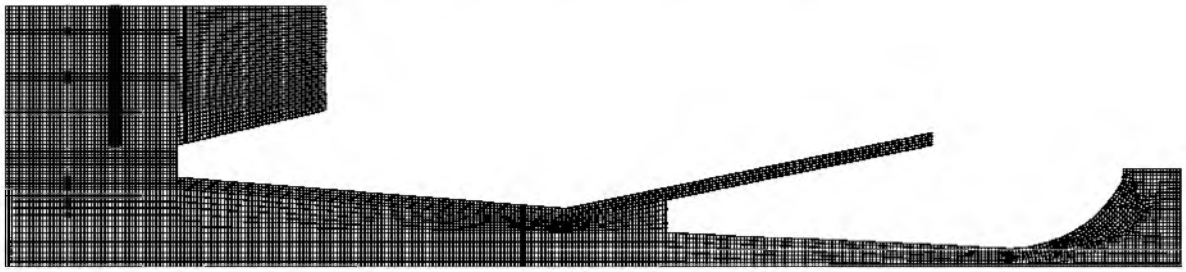


Рис.5. Сеточная структура, построенная для фрагментированной области

но, когда расчетная область имеет сложную пространственную конфигурацию.

Построенные геометрические конфигурации расчетной области (см. рис.2, *а* и *б*) допускают выполнить декомпозицию без значительных временных затрат благодаря тому, что геометрия является плоской, а границы – преимущественно прямолинейными и не образуют острых углов.

На рис.4 приведены результаты декомпозиции исходных конфигураций расчетных областей на четырехугольные фрагменты. Фрагментация в обоих случаях выполнена практически для всего расчетного пространства, кроме зоны дозвукового течения в сужающейся части внутреннего сопла. Существенной необходимости строить структурированную сетку в этой зоне нет из-за ее относительной малости, невысокого градиента параметров и присутствия в этом месте только одной фазы – воздуха. Схема декомпозиции двух областей практически идентична. Для второй конфигурации расширение внешнего пространства выполнено просто за счет добавления Г-образного слоя фрагментов.

Выполненная декомпозиция допускает изменение геометрических параметров форсунки и протяженности внешнего пространства, окружающего форсунку. При этом будут меняться только соотношения и углы наклона сторон фрагментов, а топологическая структура фрагментированной расчетной области будет оставаться неизменной.

Для каждого четырехугольного фрагмента использовалась экономичная схема построения сеточной структуры. В нефрагментированной области сужающейся части внутреннего сопла сеточная структура строилась с использованием универсального неструктурированного алгоритма, который применяется для областей произвольной формы. На рис.5 приведена сетка, построенная для первого варианта расчетной области на основе выполненной декомпозиции.

При проведении вычислительного моделирования на основе сеточных методов всегда целесообразно проанализировать степень влияния плотности, характера распределения и типа элементов сеточной структуры на ключевые параметры задачи. В данном исследовании для нескольких сеточных структур анализировалось изменение ряда локальных и интегральных характеристик при полностью идентичных условиях моделирования. Для двух расчетных областей была проведена декомпозиция и сформирована определенная топологическая структура фрагментов. В связи с этим алгоритм генерации сетки и тип элементов оказались предопределенными. Для структури-

рованного алгоритма в случае плоских областей можно использовать только четырехугольные элементы. Поэтому в качестве варьируемой характеристики для различных сеточных структур рассматривался только размер ячеек.

Условия проведения моделирования соответствуют постановке задачи исследования внутреннего течения форсунки и ближнего газодинамического поля.

На основе выполненного обзора подходов вычислительного моделирования течений газа с дисперсной жидкой фазой был сформулирован инновационный подход для проведения расчетов. Рассмотрены две различные задачи, в одной из которых в фокусе внимания было течение внутри распылительной форсунки и в ближней области внешнего пространства. Исследование в рамках этой задачи проведено с использованием континуальной VOF-модели на основе первой построенной конфигурации расчетной области (см. рис.3, *а*). Во второй задаче для определения характеристик капельного факела рассматривался более обширный участок внешнего пространства перед форсункой. При этом моделирование течения внутри форсунки не исключалось, однако выполнялось на основе более экономичной сетки. Вторая задача решалась на основе дискретно-траекторного подхода с использованием второй построенной конфигурации расчетной области (рис.3, *б*). И в первом, и во втором случае вычислительное моделирование выполнялось в среде программного комплекса гидрогазодинамических расчетов ANSYS FLUENT 12.1.

Результатом работы данного программного обеспечения является вычислительная модель с рассчитанными параметрами состояния жидкой и газообразных фаз в каждой ячейке построенной сеточной структуры. Модель представляет собой ряд элементов в графической оболочке, каждый из которых соответствует определенному моменту времени и позволяет вывести картину распределения в расчетной области значений каждого параметра.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., Правительства Санкт-Петербурга, Центра коллективного пользования Горного университета.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Смирнов Ю.Д.* Разработка инновационного пылеподавляющего устройства для условий северных регионов / Ю.Д.Смирнов, С.В.Ковшов, А.В.Иванов // Записки Горного института. СПб, 2012. Т.195.

2. *Hirt C.W.* Volume of Fluid method for the dynamics of free boundaries / C.W.Hirt, B.D.Nichols // Journal of Computational Physics. 1981. Vol.39.

3. *Madsen J.* Computational and experimental study of sprays from the breakup of water sheets // PhD thesis, Aalborg University, Denmark, 2006.

4. *Steinthorsson E.* Numerical simulations of internal flow in a simplex atomizer / E.Steinthorsson, D.Lee // Proceedings of the Eighth International conference on liquid atomization and spray systems, Pasadena, California, July 2000.

5.Two-Phase computational fluid dynamics analysis applied to prefilming pure-airblast atomizer / P.Buelow, C.Mao, S.Smith, D.Bretz // AIAA Journal of Propulsion and Power. March – April 2003. Vol.19. N 2.

REFERENCES

1. *Smirnov Y.D.* Development of the innovative dust suppression device for conditions of northern regions / Y.D.Smirnov, S.V.Kovshov, A.V.Ivanov // The Proceedings of the Mining Institute. Saint Petersburg, 2012. Vol.195.

2. *Hirt C.W., Nichols B.D.* Volume of Fluid method for the dynamics of free boundaries // Journal of Computational Physics. 1981. Vol.39.

3. *Madsen J.* Computational and experimental study of sprays from the breakup of water sheets // PhD thesis, Aalborg University, Denmark, 2006.

4. *Steinthorsson E., Lee D.* Numerical simulations of internal flow in a simplex atomizer // Proceedings of the Eighth International conference on liquid atomization and spray systems, Pasadena, California, July 2000.

5. *Buelow P., Mao C., Smith S., Bretz D.* Two-Phase computational fluid dynamics analysis applied to prefilming pure-airblast atomizer // AIAA Journal of Propulsion and Power. March – April 2003. Vol.19. N 2.