

# ПРИМЕНЕНИЕ МОДУЛЯ ЛАГРАНЖЕВЫХ ЧАСТИЦ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА FLOWVISION ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ОБТЕКАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ЛОКАЛИЗАЦИИ И ЛИКВИДАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ

Смирнова М.Л.,

ООО «ТЕСИС», Нижний Новгород, Россия

Чебан Е.Ю., к.т.н.

ФГОУ ВПО ВГАВТ, Нижний Новгород, Россия

В ранее выполненных работах [3] для исследования взаимодействия нефти с нефтесборными устройствами и боновыми ограждениями было обосновано использование численного моделирования на основе программного комплекса [FlowVision](#). При моделировании учитывалось, что FlowVision позволяет рассчитывать для несмешивающихся жидкостей объемную концентрацию в модели «Свободная поверхность». Нефть моделировалась заданием уравнения для переменной «Концентрация».

Как показали исследования, выполненные во ВГАВТ, такой метод моделирования позволяет решать задачи взаимодействия нефти с одиночными устройствами, например, обтекание бонового ограждения. Моделирование взаимодействия нескольких устройств с помощью программного комплекса FlowVision связано с некоторыми особенностями:

1. Все устройства имеют разные геометрические размеры, поэтому для каждого из них необходима сетка с различным размером ячеек. Рассмотрение большого числа расчетных вариантов показало, что размеры ячеек расчетной сетки могут отличаться на 1-2 порядка. В ряде случаев это приводит к невозможности получить сходящееся решение.

2. Для адекватного моделирования нефтяной пленки на поверхности воды необходимо уменьшение вертикального размера ячеек из-за растекания нефти и уменьшения толщины пленки соответственно, что приводит к увеличению общего количества расчетных ячеек и времени расчета. Это затрудняет использование имеющихся вычислительных ресурсов.

3. Для более точного расчета течений вблизи бонового ограждения в сочетании нефтесборного устройства, а также нефтесборных устройств и корпусов судов необходимо значительно увеличить количество расчетных ячеек, что повышает затраты машинного времени.

4. В моделируемых ситуациях объем жидкости в расчетной области превышает количество нефти в тысячу и более раз, поэтому при растекании пятна изолинии концентрации не позволяют точно определить положение нефтяного пятна при его растекании.

Для преодоления отмеченных трудностей были предприняты попытки найти другую методику решения обтекаемых задач. В работах [1,2] описан метод, в котором нефть моделировалась отдельными частицами, в частности каплями керосина и парафиновыми шариками.

Эксперименты [1,2] проводились в циркуляционном канале, заполненном чистой водой, длиной 1,2 м, шириной 0,3 м, глубиной 0,2 м. Модель загрязнения из акриловых плит высотой 40 мм и толщиной 3 мм с заостренной гранью устанавливалась на расстоянии 0,4 м от конца канала. Для получения траекторий движения капель керосина и парафиновых шариков использовалась высокоскоростная цифровая камера.

В эксперименте использовались парафиновые шарики (плотность  $900 \text{ кг/м}^3$ ), и капли керосина (плотностью  $838 \text{ кг/м}^3$ ), которые выпускались в непосредственной близости от дна канала. Диаметр шариков - 3,4,5 мм. Величина жидких капель контролировалась размером трубки, из которой выпускалась жидкость. Результаты экспериментов сравнивались с численным моделированием в программном комплексе «Flow3D».

Поскольку в программном комплексе FlowVision реализована возможность расчета параметров движения частиц, то на первом этапе решено было сравнить результаты эксперимента, приведенные в [1,2], с результатами моделирования с помощью FlowVision.

Твердотельная модель проточной части канала с установленным в нем загрязнением (рис. 1) была подготовлена в CAD-системе SolidWorks. Размеры канала в фронтальной плоскости были взяты из эксперимента. Поскольку в экспериментальной модели протяженность загрязнения значительно превосходила диаметр нефтяных капель, оказалось возможным проведение численного моделирования в программном комплексе FlowVision в двумерной постановке. В связи с этим в направлении, перпендикулярном плоскости течения, размер геометрической модели канала был выбран 0.01 м.

Моделирование в FlowVision течения несущей фазы (воды) в канале выполнено в рамках модели турбулентного течения несжимаемой жидкости с использованием  $k-\epsilon$  и SST моделей турбулентности (в ходе исследования модель турбулентности менялась). Математическая модель, описывающая такое течение, состоит из уравнений Навье-Стокса и уравнений переноса турбулентной энергии и диссипации.

В качестве входных условий на передней стенке канала задавались нормальная скорость 0.14 м/с и начальная степень турбулизации потока (данные менялись в зависимости от выбранной модели турбулентности). На верхней, нижней и боковых границах канала устанавливалось условие стенки с проскальзыванием. Задняя стенка соответствовала граничному условию выхода. На поверхности загрязнения было задано условие непротекания с турбулентным пограничным слоем, характеризующимся логарифмическим законом изменения касательной компоненты скорости. Схема расстановки граничных условий приведена на рис. 1.



Рис. 1. Расстановка граничных условий и положение фильтра начального распределения частиц в расчетной области.

Моделирование движения нефтяных капель при установившемся течении несущей фазы проведено с использованием модуля Лагранжевых частиц. Программный комплекс FlowVision позволяет моделировать движение частиц одновременно четырех различных размерных групп. В проведенных расчетах размеры частиц были выбраны в полном соответствии с экспериментом [1,2].

Точка выпуска капель моделировалась с помощью фильтра, задающего начальное распределение модельных частиц внутри расчетной области в пределах некоторого трёхмерного объекта. В качестве объекта был выбран куб с линейным размером 5 мм, расположенный вблизи дна канала на расстоянии 0.75 м от входной границы (рис. 1).

Модельные частицы выпускались на каждом временном шаге. Начальная скорость частиц задавалась равной местным значениям скорости несущей фазы. Действие силы сопротивления со стороны частиц на несущую фазу не учитывалось в силу малости их количества.

В расчете использовалась неравномерная начальная расчетная сетка, сгущенная вблизи заграждения и за ним. Дополнительно, для разрешения возвратной зоны, образующейся за заграждением, проводилась адаптация сетки в объеме параллелепипеда. Уровень измельчения сетки менялся в ходе исследования.

Для визуализации результатов моделирования в постпроцессоре отрисовывались траектории движения частиц, а также векторное поле скоростей. Для сравнения результатов траектории частиц, полученные с помощью FlowVision, накладывались на результаты [1,2] в графическом редакторе. Для дальнейшей обработки траектории с помощью координатной сетки вносились в программу Excel, где описывались полиномами различных степеней.

При моделировании с помощью FlowVision использовались две модели турбулентности. Аналогично работам [1,2] проводилась проверка k-ε модели турбулентности, а также рекомендованной в «Руководстве пользователя» модели SST. Все параметры, в том числе сетка, оставались постоянными. Результаты моделирования в сравнении с траекториями [1,2] приведены на рис. 2. Сравнительный анализ с использованием статистических критериев показывает, что точки траекторий при использовании стандартной k-ε модели принадлежат одной совокупности с точностью, превышающей 0,98.

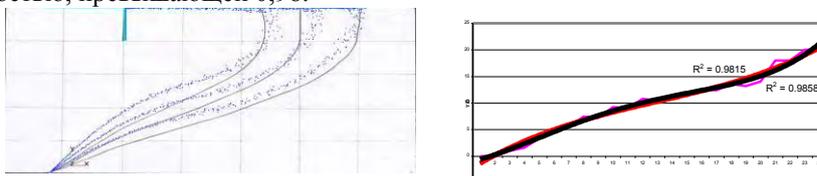


Рис.2. Сравнение экспериментальных и расчетных траекторий частиц парафина с использованием k-ε модели турбулентности.

Для модели SST результаты совпадают с точностью около 0,8. Наблюдается отклонение траекторий частиц в верхней части расчетной области, что в первую очередь связано с изменением структуры потока за пластиной. Также наблюдается отклонение частиц меньшего диаметра, в то время как траектории более крупных частиц достаточно точно совпадают (рис. 3). Такое отклонение, по-видимому, связано с соотношением между силами плавучести частиц, весом и внешними силами со стороны потока. Это полностью согласуется с данными [4], полученными при описании уноса нефти под боновое ограждение.

Сравнение полей скоростей показало, что размеры вихревой зоны за пластиной у k-ε модели меньше и центр вихря смещен вперед. Скорости в нижней части расчетной области в этом случае меньше. Смещение траекторий частиц у модели SST связано с перемещением центра вихревой зоны и увеличением скорости в нижней части расчетной области. В то же время турбулентная дисперсия частиц у модели SST оказалась значительно меньше.

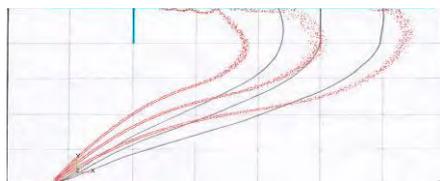


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчетных траекторий частиц парафина с использованием SST модели турбулентности

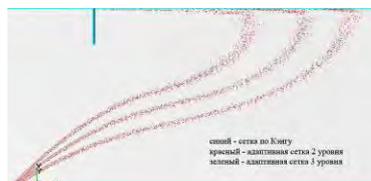


Рис. 4. Сравнение результатов при использовании адаптации расчетной сетки различного уровня

Было выполнено исследование влияния размеров ячеек расчетной сетки на траектории движения частиц. Были рассмотрены сетки с использованием адаптации 3-го уровня (минимальный размер ячеек не менее 1 мм по вертикали и 2 мм по горизонтали), адаптации 2-го уровня (минимальный размер ячеек составил 2 мм по вертикали и 4 мм по горизонтали), а также расчетной сетки, описанной в [1,2]. Анализ траекторий, показанных на рис. 4, позволяет утверждать, что результаты моделирования по трем сеткам принадлежат одной совокупности. В то же время расчетное время для сетки с адаптацией 3-го уровня превышает время расчета для сетки с адаптацией 2-го уровня более чем в 3 раза.

Таким образом, выполненные исследования позволяют утверждать, что модуль «Частицы» программного комплекса [FlowVision](#) может быть использован для моделирования обтекания технических средств локализации и ликвидации разливов нефти и обеспечить необходимую точность при уменьшении расчетного времени.

#### Литература.

1. Lee C.M., Kang K.H., Cho N.S., Trapping of leaked oil with tandem oil fences with Lagrangian analysis of oil droplet motion. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Vol.120, February 1998, p 50-55.
2. Lee, C.M., Kang, K.H., "Investigations on containment-capability and dynamic response of an oil fence in waves," Annual Report of Advanced Fluids Engineering Research Center, AFR-93-F01, pp. 1-42, 1994.
3. Чебан Е.Ю. Использование программного комплекса FlowVision для разработки методики оценки эффективности нефтесборного бонового ограждения // «САПР и Графика», - М.: Изд. «КомпьютерПресс», №1, 2007. – С. 92-96.
4. Clavelle E.J., Rowe R.D. Numerical simulation of oilboom failure by critical accumulation. Proc. 16<sup>th</sup> Arctic and Marine Oilspill Program Technical seminar, Calgary, June 7-9, 1993. Vol 1. - [Ottawa], 1993. – С. 409-418.