

Дёмин А. О.  
Куличков С. В.

(ДВФУ, Политехнический институт, базовая кафедра нефтегазового дела и нефтехимии)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТА МНОГОФАЗНОГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ НА ПРИМЕРЕ ЧАСТИЦЫ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА**

Ключевые слова: моделирование, соударение частиц, потоки, добавка, политетрафторэтилен, распределение Гаусса.

PTFE или политетрафторэтилен - пластик, получаемый химическим путем. В техническом контексте его называют фторопластом. PTFE имеет очень высокую стойкость к химическим реагентам: щелочам, кислотам, растворителям и окислителям, это обусловлено политетрафторэтилена является «скольжение», механическая прочность, а также широкий диапазон рабочих температур - 269 до +260 С°. Комбинация этих свойств сделали материал востребованным во всех отраслях промышленности.

Учет соударения дисперсной фазы со стенками канала сложен и в общем случае зависит от многих параметров. При использовании континуального(двухжидкостного) подхода к моделированию берется в рассмотрение взаимодействие двух фаз и в целом, как континуумов. В этом случае довольно сложно учесть физику явления, так как аналитически будет сложно учесть такие параметры как: материал стенки, размер частицы политетрафторэтилена. Коэффициенты восстановления компонент скорости дисперсной фазы, к примеру, основываются на эмпирической информации. Их значения не вычисляются, а подбираются исходя из наилучшего согласования с опытными данными по другим параметрам потока. Например, таким, как распределение концентрации частиц политетрафторэтилена, или распределение компонент скорости. Как раз-таки в этих случаях Лагранжева метод моделирования позволяет более детально рассмотреть и учесть физику явления, ввиду того, что мы рассматриваем процесс движения и соударения каждой частицы индивидуально.

Для учета процесса соударения частицы политетрафторэтилена в смазочном масле со стенкой в рамках Лагранжева подхода был предложен Зоммерфельдом (Sommerfeld, 1992). Для учета стохастического (случайного) характера процесса было предложено вести в рассмотрение шероховатость материала стенки. Очевидно, что очень мелкие частицы гораздо более чувствительны к неровностям материала стенки, чем крупные частицы.

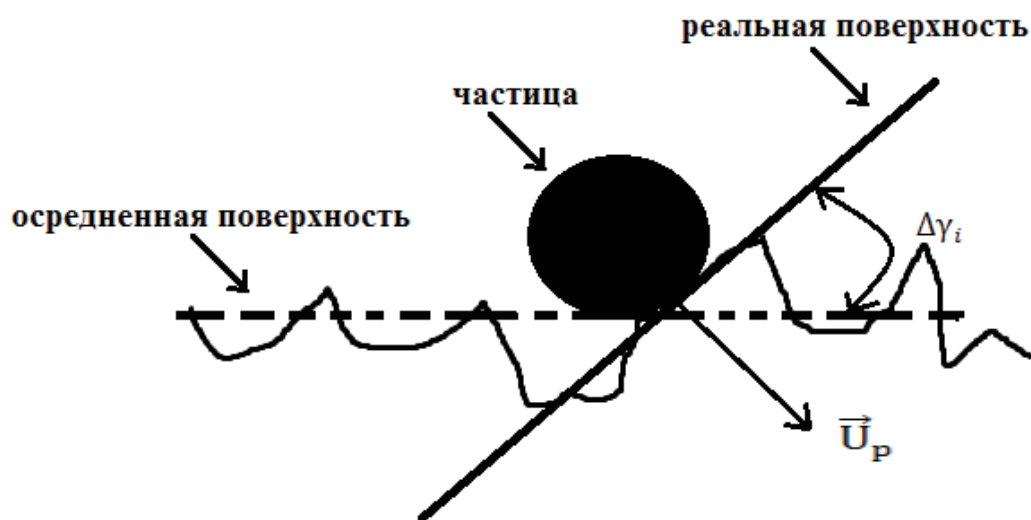


Рисунок 1 - Схематическое изображение процесса соударения маленькой частицы со стенкой.

На рисунке 1 показано влияние масштаба неровности материала стенки и размера частицы на характер их взаимодействия между собой. Можно сделать вывод, что характер соударения сильно зависит от материала стенки, масштаба шероховатости, размера частицы, ее формы. Необходимо принять это во внимание для правильного моделирования явления.

На практике, неровности стенки носят очевидно случайный характер. Для моделирования процесса соударения в рамках Лагранжева подхода принимается, что характер распределения бугорков шероховатости носит так же случайный характер и определяется вероятностной величиной угла наклона виртуальной поверхности стенки. Численно этого угла может быть сгенерирована на основе датчика случайных чисел. Поэтому, полный угол, под которым частица соударяется со стенкой, состоит из угла, образованного направлением подлета частицы, определяемым продольной составляющей скорости частицы  $\vec{u}_p$  и поперечной  $\vec{v}_p$  к поверхности стенки  $\alpha$ , и дополнительного угла, определенного заданной средней степенью неровности поверхности стенки трубы, помноженной на случайное число, выбранное по распределению Гаусса.

$$\alpha' = \alpha + \Delta\gamma + \xi \quad (1)$$

В виду того, что движение частицы рассматривается в контрольном объеме  $V$ , имеющем вид цилиндра или двойного цилиндра, а учет наличия шероховатости поверхности стенки ( $\Delta\gamma$ ) моделирует процесс соударения частицы со стенкой только в продольной плоскости трубы, то возникает необходимость в дополнительном механизме рассеяния дисперсных элементов в

окружном направлении по сечению трубы.

Для учета механизма дополнительного рассеивания частиц в окружном направлении по сечению трубы необходимо определить поперечный угол соударения, составленный углом, образованным направлением подлета частицы, определяемым поперечными составляющими скорости частицы  $\vec{v}_p$  и  $\vec{w}_p$  к стенке трубы  $\beta$ , а так же дополнительным углом, определяемым заданной степенью неровности поверхности стенки трубы в окружном направлении  $\Delta\gamma_w$  помноженной на случайное число.

$$\beta' = \beta + \Delta\gamma_w \cdot \xi_w \quad (2)$$

Где  $\Delta\gamma_w$ - это средний угол шероховатости поверхности стенки трубы в окружном направлении,  $\Delta\gamma_w$ - не зависит от  $\Delta\gamma$  и не коррелирует с ним, а  $\xi_w$  – случайное число, подчиняющееся распределению Гаусса и так же не коррелирует с  $\xi$ .

Частицы могут соударяться со стенками трубы и отскакивать от нее либо с проскальзыванием, либо без такового. Режим взаимодействия частицы со стенкой со скольжением определяется следующим критериальным соотношением, предложенным Мацумото (Matsumoto Saito, 1970);

$$|U_{R1}| \geq \frac{7}{2} \mu_0 (1 + k_{coll}) v_{P1} \quad (3)$$

$$U_{R1} = \sqrt{\left(\bar{u}_{P1} + \frac{D_p}{2} \omega_{P1}^\varphi\right)^2 + \left(w_{P1} - \frac{D_p}{2} \omega_{P1}^x\right)^2} \quad (4)$$

Здесь  $k_{coll}$  – коэффициент аккомодации нормальной компоненты скорости частиц;  $\mu_0, \mu_d$  – статический и динамический коэффициент трения, индекс «1» отвечает значениям компонент скорости и температуры частиц до соударения с поверхностью стенки, «2» - после соударения.

Значения компонент скоростей частиц, движущихся после удара о стенку со скольжением, запишутся следующим образом (Sommerfield, 1992, Huber, Sommerfield, 1998)

$$u_{P2} = u_{P1} - \mu_d \varepsilon_x (1 + k_{coll}) v_{P1} \quad (5)$$

$$v_{P2} = -k_{coll} v_{P1} \quad (6)$$

$$w_{P2} = w_{P1} - \mu_d \varepsilon_\varphi (1 + k_{coll}) v_{P1} \quad (7)$$

$$\omega_{P2}^\varphi = \omega_{P1}^\varphi + 5\mu_d (1 + k_{coll}) v_{P1} \frac{\varepsilon_x}{D_p} \quad (8)$$

$$\omega_{P2}^x = \omega_{P1}^x + 5\mu_d (1 + k_{coll}) v_{P1} \frac{\varepsilon_\varphi}{D_p} \quad (9)$$

Здесь  $\varepsilon_x, \varepsilon_\varphi$  - определяют расположение плоскости движения частиц по отношению к стенке трубы

$$\varepsilon_x = \frac{u_{P1} + \frac{Dp}{2} \omega_{P1}^\varphi}{u_{R1}}, \varepsilon_\varphi = \frac{w_{P1} + \frac{Dp}{2} \omega_{P1}^x}{u_{R1}} \quad (10)$$

Таким образом, можем сделать вывод, что при добавлении в систему смазочной жидкости частицу политетрафторэтилена и дальнейшем соударении сое стенкой материала наиболее математически верное моделирование с учетом физики явления происходит в рамках Лагранжева метода.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. Е. Трощев, Н. С. Бочкарев. Численные методы лагранжевых частиц-точек для одномерных волновых уравнений газовой динамики. ГНЦ РФ ТРИНИТИ 2012.
2. С.В. Зефирова, А.В. Кочетков, И.А. Масумов, А.О. Савихин. Численное моделирование деформирования трубопровода с жидкостью при ударном нагружении. Проблемы прочности и пластичности: Межвуз.сб / Нижегород. ун-т 2011.
3. В.М. Бужник Фторполимерные материалы: Применение в нефтегазовой отрасли. Издательство «НЕФТЬ и ГАЗ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина Москва 2009