

## Формирование профилей скоростей и концентраций в турбулентном газовом потоке

Поникаров Артем Сергеевич, м.н.с.;  
Теляков Эдуард Шархиевич, д.т.н., профессор  
Казанский национальный исследовательский технологический университет

**Ключевые слова:** массообмен, диффузия, испарение, конденсация, турбулентное течение, деформация профиля скорости, течение газа в трубе.

### ВВЕДЕНИЕ

На процесс массообмена в системах газ – жидкость (испарение, конденсация, ректификация, ...) существенное влияние должен оказывать результирующий конвективный перенос массы на границе раздела [1]. Представляется, что данное обстоятельство целесообразно учитывать уже в самой структуре феноменологического уравнения массоотдачи, поскольку в противном случае приходится проводить обобщения для каждого процесса в отдельности.

Следует отметить, что гидродинамические условия, в которых протекает процесс, оказывают заметное влияние на формирование профилей скоростей и концентраций по сечению каждого из взаимодействующих фазовых потоков, что в свою очередь оказывает влияние на процесс результирующего массообмена. Одновременно профили скоростей и концентраций должны зависеть и от условий обтекания границы раздела фаз, т. е. от аппаратного оформления процесса. Традиционно эффекты влияния массопереноса на гидродинамику считались не значительными, и не учитывались в структуре уравнений массоотдачи, но как выясняется, гидродинамические и диффузионные составляющие оказывают достаточно сильное влияние друг на друга. В то же время, предложенная в [1] универсальная структура уравнения массоотдачи нуждается в дополнительном обосновании.

В настоящее время существует большое количество мощных программных пакетов, которые позволяют проводить моделирование процессов массообмена. Наибольший интерес представляет расчетный программный комплекс Fluent, одним из важнейших преимуществ которого является возможность проводить исследование на многокомпонентных смесях. При постановке задачи в среде Fluent возникает ряд специфических сложностей, которые могут повлиять на результаты моделирования [2]:

- Выбор оптимальной конфигурации расчетной зоны (система координат, способа разбиения расчетной области на ячейки, размер и тип ячеек, узлов, масштаб расчетной зоны, граничные условия для «сетки» и т.д.).
  - Выбор типа решателя и определение оптимальных коэффициентов решателя.
  - Выбор моделей и параметров расчета турбулентной вязкости, диффузии.
  - Учет параметров шероховатости трубы.
  - Выбор модели смешения для многокомпонентных смесей.
  - Способ задания источника массы на границе раздела (стенка трубы) при эквимолярной и не эквимолярной постановке задачи.
  - Решение задачи молекулярной и турбулентной диффузии и т.д.
- При решении задачи в пакете Fluent использовались:

уравнение Навье-Стокса в турбулентной постановке задачи (приближение Релея), уравнение неразрывности, а также первый и второй законы Фика. Задача решалась в двух постановках - эквимолярной и неэквимолярной:

1. Эквимолярная. Наложение внутреннего диффузионного массового потока от стенки трубы на движущийся турбулентный поток среды (на стенке трубы закрепляется постоянная концентрация одного из компонентов бинарной смеси  $C_{ст} = const$ ). В данной постановке задачи среднemasсовые и среднемолярный расходы по длине трубы остаются неизменными, но профили концентраций и скоростей по длине трубы оказываются зависящими от процесса массоотдачи.

2. Неэквимолярная. На процесс массоотдачи накладывался внешний конвективный массовый поток от стенки трубы (на стенке трубы с применением пользовательских функций формируются источники поступления внешних потоков). В данной постановке задачи среднemasсовый и среднемолярный расходы по длине трубы изменяются. Профили концентраций и скоростей по длине трубы оказываются зависящими и от процесса массоотдачи и от интенсивности внешнего конвективного потока.

Численный эксперимент проводился на трубе диаметром 0,2 м и длиной 4 м. На входе в трубу подавался поток бинарной, либо многокомпонентной смеси, а на стенке трубы закреплялась постоянная концентрация смеси, отличная от входной. В результате в движущемся газовом потоке возникал диффузионный (а во втором эксперименте и конвективный) массовый поток. При расчете были использованы следующие граничные условия:

- На входе в трубу задаются характеристики основного потока: начальный профиль скорости плоский, температура потока  $T_{вх}^{вх} = 298$  К.
- Стенка принимается непроницаемой, на ней закрепляется определенная концентрация одного из ПК (псевдокомпонентов)  $C_{ст}^{ст} = const$ , отличная от концентрации этого компонента во входном потоке, а также накладывається условие «прилипания».
- Тепловые эффекты не учитывались.
- Коэффициент динамической вязкости смеси принимается постоянным ( $\mu = const$ ).
- На выходном потоке устанавливалось граничное условие «Pressure outlet», с температурой  $T_{вых}^{вых} = 298$  К. Метод расчета обратных потоков по «normal to boundary». При решении задач течения газов в каналах достаточно часто наблюдается втекание потока через выходную границу вследствие, например, вихревых течений вблизи нее. Параметры втекающего газа (направление потока, температура и параметры турбулентности) для таких случаев необходимо определить. Это делается в меню Pressure Outlet аналогично тому, как задаются соответствующие

параметры на входной границе [1].

- Точность для обеспечения сходимости решения была выставлена равной  $3,5E-5$  как для уравнения движения, так и для уравнения неразрывности.

### ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ

Первый этап исследования был посвящен проверке адекватности расчетной модели. Для проверки модели в первой постановке (эквимолярной) были смоделированы уже известные эксперименты, которые были обобщены Ван Кревеленом [3]. На втором этапе (учет неэквимолярности) были смоделированы уже известные численные эксперименты, проведенные Матюшко Б.Н. [4].

В обоих случаях разработанная модель показала достаточно хорошую корреляцию с данными сравнения: погрешность не превысила 5 % в обеих постановках. Таким образом, можно утверждать, что разработанная модель адекватно описывает и гидродинамические, и массообменные закономерности протекания процессов массоотдачи с меняющимися условиями на поверхности раздела системы.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследования были проведены следующие численные эксперименты, которые также условно можно разделить на два этапа:

**Первый этап.** Проведен численный эксперимент в эквимолярной постановке задачи. В этом случае в эксперименте использовалась модельная бинарная смесь, состоящая из двух псевдокомпонентов, что позволило в широких пределах менять свойства компонентов (мольные массы, коэффициенты диффузии, разница концентраций во входном потоке и на стенке трубы, ...). В результате эксперимента был выявлен эффект «прогиба профиля» скорости, который зависит от фактора неоднородности смеси, определяемого отношением плотностей (мольных масс) псевдокомпонентов [1,5]. Чем больше фактор неоднородности смеси, тем заметнее проявляется «эффект прогиба» профиля скорости, что подтверждает тезис о зависимости профиля скорости от сопутствующего процесса турбулентной диффузии.

**Второй этап.** Проведен численный эксперимент на би-

нарной смеси псевдокомпонентов в неэквимолярной постановке задачи. В этом случае с использованием пользовательской функций пакета Fluent на стенке трубы формировались объемные источники массы, значения которых не изменялось по длине трубы. Это позволило моделировать наложение на процесс внутрифазного массообмена внешнего конвективного массового потока. В данном случае мольные потоки диффундирующих компонентов не равны друг другу и разнонаправлены, в результате чего результирующий мольный и поток через стенку оказывается переменным. Остальные граничные условия принимались теми же, что и для предыдущей постановки задачи. В неэквимолярной постановке задачи также был отмечен эффект «прогиба профиля» скорости [5], однако он оказался зависящим не только от фактора неоднородности смеси, но и от интенсивности конвективного массового потока.

### ВЫВОДЫ

1. Программный комплекс вычислительной гидродинамики Fluent достаточно надежно моделирует сопряженные гидродинамические и диффузионные процессы в турбулентном газовом потоке, причем как в эквимолярной, так и в неэквимолярной постановках задачи.

2. Распространенное мнение, что задачи гидродинамики и массообмена из-за подобия математического описания могут решаться отдельно не всегда корректно, потому что наложение диффузионных процессов на гидродинамические трансформирует как профили скоростей, так и профили концентраций в газовом потоке. Данный эффект подтвердился также в турбулентных течениях, что несомненно требует внимания исследователей.

3. Процессы массоотдачи для каждой из фаз реальных массообменных процессов, протекающих в двухфазных потоках (газ – жидкость), необходимо моделировать с учетом поступления (источник) или отвода (сток) массы на границе раздела фаз по каждой из фаз системы.

4. Разработанная математическая модель позволяет проводить оценку адекватности известных обобщений по массоотдаче, а также может быть использована для разработки новых подходов к описанию массообменных процессов в системах газ (пар) – жидкость.

### Литература:

1. Поникаров А.С., Осипова Л.Э., Теляков Э.Ш. Неэквимолярная массоотдача в системах газ (пар) – жидкость, Теорет. основы хим. технологии, Т.49, №3, 2015, С. 277-286.
2. Батурин О.В. Построение расчетных моделей в препроцессоре GAMBIT универсального программного комплекса FLUENT/ О.В. Батурин, Н.В. Батурин, В.Н. Матвеев. САМАРА, Издательство СГАУ, 2009 г. с 172
3. Van Krevelen D.W., Hofizer P.J., Rec. Trav. Chim., 1949, v. 68, N 4, p. 221-233.
4. Матюшко Б.Н. Исследование влияния поперечного потока вещества на массообмен: дис. ... канд. тех наук: 05.17.08 / Матюшко Борис Николаевич. – Казань, 1978. – 103 с.
5. Поникаров А.С., Осипова Л.Э., Теляков Э.Ш. Формирование профилей скоростей и концентраций в ламинарном газовом потоке. В кн.: ММТТ-28, Ярославль, 2015: материалы. Ярославль: ярославский государственный технический университет, 2015. с. (в редакции).