
БЕЗОПАСНОСТЬ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ И ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА НА ПЕРЕНОС ПАССИВНОЙ ПРИМЕСИ ПРИ ПРИГОТОВЛЕНИИ ОГНЕТУШАЩИХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ВОДЫ

А.Е. Савенкова;

Е.Б. Алексеик, кандидат технических наук, доцент.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Рассмотрены этапы перемешивания жидкости в турбулентном потоке, в результате чего получена зависимость для расчета времени перемешивания на микроуровне, которая учитывает влияние размера области максимальных турбулентных пульсаций, особенно при малой интенсивности перемешивания. Определены размеры областей с учетом максимальных пульсаций, в которых происходит перемешивание на микроуровне.

Ключевые слова: агрегат жидкости, коэффициент турбулентной диффузии, размер жидких агрегатов, локальная и средняя скорость диссипации энергии, фрактальная размерность поля диссипации энергии

THE NONUNIFORMITY OF THE TURBULENT FLOW ON THE PASSIVE IMPURITY TRANSPORT PREPARATION EXTINGUISHING MIXTURES BASED ON WATER

A.E. Savenkova; E.B. Alekseik.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The stages of mixing liquid in a turbulent flow, whereby for calculating the dependence of the mixing time at the micro level that takes into account the size of the maximal effect of turbulent fluctuations, particularly at low intensity mixing. The sizes of the areas with the maximum ripple in which the mixing takes place at the micro level.

Keywords: unit fluid, turbulent diffusion coefficient, the size of liquid units, local and mean rate of energy dissipation, the fractal dimension of the field of energy dissipation

При приготовлении огнетушащих смесей на основе воды имеют место процессы, связанные с распространением в потоке пассивной примеси, то есть примеси, частицы которой не оказывают существенного влияния на поток.

Процесс перемешивания в аппаратах удобно рассматривать, опираясь на предположение, что в микроскопическом масштабе жидкость обладает гетерогенным строением и имеет локальные градиенты концентрации определенной пространственной протяженности. Эти участки можно представить как небольшие сгустки, капельки или агрегаты жидкости, сохраняющие определенную идентичность – «жидкие частицы» [1, 2].

Моделирование эволюции «жидких частиц» будем проводить, исходя из лагранжева описания.

При рассмотрении перемешивания в турбулентном потоке жидкости, содержащей пассивную примесь с объемной концентрацией X , можно выделить три этапа [2].

На первом этапе происходит распределение крупных «жидких частиц» по всему объему и установление средней концентрации без снижения локальных значений. Этот этап макроперемешивания осуществляется путем конвективного переноса (крупномасштабных пульсаций). При этом объемы «жидких частиц», содержащих примесь, сохраняются и происходит только деформация за счет крупномасштабных турбулентных пульсаций: объем, первоначально занятый примесью, по каким-то направлениям растягивается, а по другим сжимается, искривляясь при этом самым запутанным образом. В результате в каждой точке аппарата концентрация X будет равна единице либо нулю, в зависимости от того, содержала ли соответствующая «жидкая частица» примесь в начальный момент или нет. Таким образом, крупномасштабный перенос приводит к образованию в жидкости очень искривленных и запутанных слоев с резко различающимися значениями концентрации примеси.

На втором этапе размеры областей с однородным составом сокращаются путем разрушения крупных жидких элементов, происходит увеличение зоны контакта между областями с различными составами. При этом размеры «жидких частиц» снижаются до предельного значения. Второй этап перемешивания может включать два различных механизма.

В отсутствие турбулентных пульсаций объем «жидких частиц» остается постоянным, однако они под действием вязкого трения вытягиваются и образуют складки. В итоге жидкость приобретает пластинчатое или слоистое строение. Это явление, как правило, наблюдается при перемешивании высоковязких сред [3].

При наличии турбулентных пульсаций, под их воздействием, «жидкие частицы» постепенно отдают вещество окружающей среде и их размеры уменьшаются.

Оба названных этапа затрагивают макроуровень перемешивания и протекают за время $t_{\text{макро}}$. Условно результаты макроперемешивания изображены на рисунке.

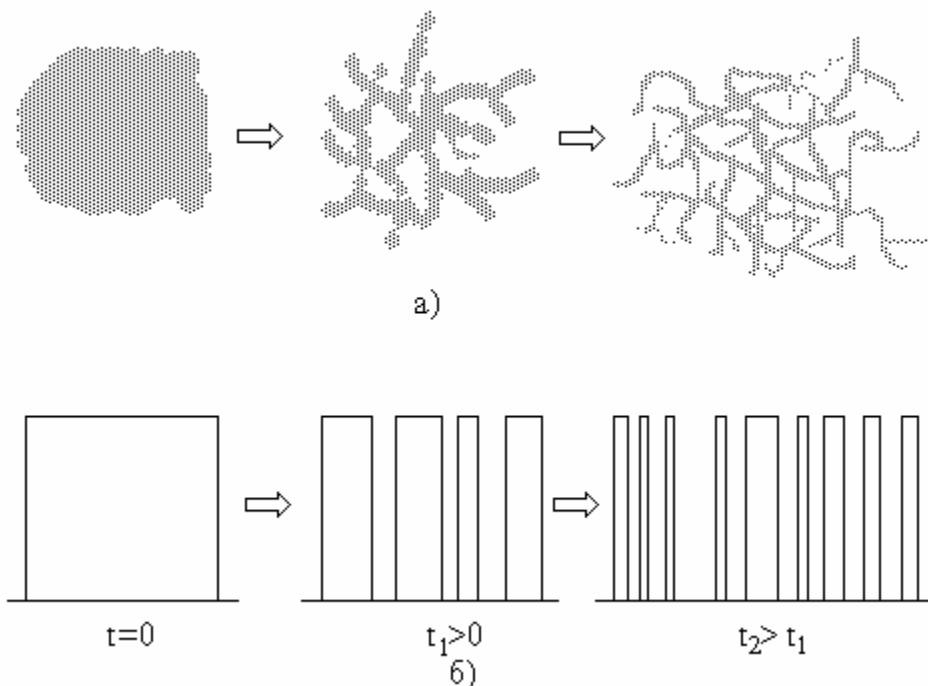


Рис. Турбулентная диффузия за время макроперемешивания:

- а) изменение формы объема, занятого примесью;
- б) схематический вид распределения концентрации примеси вдоль прямой, пересекающей этот объем

Примесь занимает в среде дискретные зоны определенного размера, а функция, определяющая концентрацию X вдоль любого направления, является разрывной. При

достижении определенного предельного значения величины несмешиваемых «жидких частиц», в которых больше не происходит турбулентных колебаний, дальнейшее выравнивание концентрации осуществляется только за счет молекулярной диффузии (третий этап перемешивания). Чем более развита турбулентность, тем меньше размер минимальных турбулентных образований, и тем быстрее заканчивается диффузионное выравнивание концентраций (микроремешивание), так что в аппарате будет присутствовать только диспергированная до состояния молекул «микроремешивание». Для реализации этого процесса необходимо время микроремешивания $t_{\text{микро}}$.

Оценим время, требующееся на распространение пассивной примеси в турбулентном потоке – время макроперемешивания.

Общее уравнение переноса можно записать:

$$\partial X / \partial t + U \cdot \nabla X = -D \cdot \Delta X, \quad (1)$$

где X – концентрация примеси; U – скорость; D – коэффициент молекулярной диффузии.

Для определения времени макроперемешивания рассмотрим перенос примеси в масштабах $l < L$.

В этом случае (1) можно представить в виде:

$$\partial X / \partial t = -U_l (dX/dl), \quad (2)$$

где l – масштаб турбулентных пульсаций; U_l – скорость пульсаций в этих масштабах ($U_l = (\varepsilon^* \cdot l)^{1/3}$).

Тогда из (2) получаем:

$$dX/dt = -(\varepsilon^* \cdot l)^{1/3} dX/dl. \quad (3)$$

Решая (3) относительно t и пренебрегая знаком, получаем:

$$dt = dl / (\varepsilon^* \cdot l)^{1/3}.$$

Интегрируя полученное выражение в пределах от нуля до h , и понимая под ε^* локальное значение скорости диссипации энергии с учетом фрактальной размерности d поля ее диссипации, будем иметь:

$$t_{\text{макро}}^* = 1.5 \frac{h^{d-1} v^{3-d}}{\varepsilon^{12}}. \quad (4)$$

Формула (4) определяет время, за которое пассивная примесь распространится до масштабов λ , и характеризует первый этап перемешивания. Он в равной степени определяется размером области, изначально занятой примесью, и скоростью диссипации энергии, характеризующей интенсивность перемешивающего воздействия. Для турбулентности, отличающейся от однородной ($d \neq 3$), время макроперемешивания зависит, хотя и незначительно, от вязкости среды. По имеющимся в литературе данным, ранее это влияние не учитывалось.

Следует отметить, что при $d \rightarrow 3$ уравнение (4) принимает вид, аналогичный выражению для времени макроперемешивания, предложенному в [4] для аппаратов с мешалкой.

Применительно к конкретному аппарату время макроперемешивания определяется:

$$t_{\text{макро}} = k \cdot t_{\text{макро}}^* \quad (5)$$

где k – коэффициент, учитывающий геометрические размеры аппарата.

Можно считать, что первый этап процесса макроперемешивания связан с коэффициентом турбулентной диффузии D_t . Тогда, используя соображения размерности, имеем:

$$D_t \sim L^2/t_{\text{макро}}, \quad (6)$$

где L – масштаб максимальных турбулентных образований.

В роторных аппаратах перенос в осевом направлении связан только с величиной зазора h . Полагая $L \sim h$ и подставляя (5) в (6), после преобразований получаем:

$$D_t = \frac{2}{3} \cdot \frac{(k \cdot h)^{\frac{7-d}{3}} \cdot \varepsilon^{\frac{7-d}{12}}}{\nu^{\frac{3-d}{4}}},$$

где k – коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально.

Используя выражение для времени макроперемешивания, можно определить размер жидких агрегатов, соответствующих различным моментам времени перемешивания:

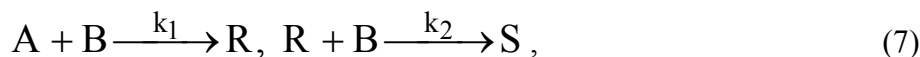
$$\ell(t) = h \left(1 - \frac{k_1 \cdot \varepsilon^{\frac{7-d}{12}}}{h^{\frac{d-1}{3}} \nu^{\frac{3-d}{4}}} t \right)^{\frac{3}{d-1}},$$

где k_1 – эмпирический коэффициент.

Применение данного выражения возможно при $t < t_{\text{макро}}$. При этом размер агрегатов, содержащих примесь, сократится до размеров минимальных турбулентных образований λ , и дальнейшее выравнивание концентрации будет происходить путем микроперемешивания.

Интенсификация процессов теплообмена, а также медленных химических реакций и массообменных процессов связана со стадией макроперемешивания, в то время как характер микроперемешивания оказывает определяющее влияние на ход быстропотекающих многостадийных химических реакций [5].

Известно, что необратимые последовательно-параллельные реакции типа:



и параллельные реакции типа:



весьма чувствительны к степени микроперемешивания, если время микроперемешивания и время реакции имеют один и тот же порядок величины. В частности микроперемешивание может контролировать распределение молекулярной массы при непрерывной полимеризации (реакция типа (7)), оказывать существенное влияние на селективность проведения процессов бромирования некоторых органических соединений в водных растворах, нитрования

бензола, толуола и других аналогичных процессов. Так, из работы [5] известно, что селективность по отношению к выходу толуола при нитровании может изменяться от 1,7 до 27 в зависимости от времени микроперемешивания. Поэтому адекватное описание перемешивания на микроуровне является важной задачей.

Для определения времени микроперемешивания необходимо описать перенос пассивной примеси в масштабах, сравнимых с размерами минимальных турбулентных образований. В работе [4] предложена следующая зависимость, связывающая время микроперемешивания $t_{\text{микро}}$ со значением локальной диссипации энергии ε^* :

$$t_{\text{микро}} = 0.5 \left(\frac{v}{\varepsilon^*} \right)^{0.5} (0.88 + \ln Sc).$$

Учитывая связь между локальным и средним значениями скорости диссипации энергии, можно получить:

$$t_{\text{микро}} = 0.5 \left(\frac{v^{13-3d}}{\varepsilon^{7-d} \cdot h^{4(3-d)}} \right)^{\frac{1}{8}} (0.88 + \ln Sc). \quad (8)$$

Как видно из (8) время микроперемешивания зависит от физических свойств среды, определяемых числом Шмидта и кинематической вязкостью, а также интенсивности процесса перемешивания в аппарате. Ранее предполагалось, что микроперемешивание не связано с какими-либо геометрическими размерами. Однако полученное выражение указывает на влияние размера максимальных турбулентных пульсаций, особенно при малой степени турбулизации. Физической интерпретацией этого неочевидного явления может являться то, что масштаб максимальных пульсаций неявным образом определяет размеры областей, в которых происходит перемешивание на микроуровне.

Литература

1. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика (теория турбулентности). СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. Т. 1. 693 с.
2. Villermaux J., David R. Recent Advances in Understanding of Micromixing Phenomena in Stirred Reactjrs / Chev. Eng. Communications. 1983. V. 21. № 1–3. P. 105–122.
3. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров (Механика процессов). М.: Химия, 1977. 464 с.
4. Geisler R., Mersmann A., Voit H. Makro and Mikromischen im Runrkessel // Chem. Ing, Techn. 1988. № 12. P. 947–952.
5. The effect of micromixing on parallel reac tions / J. Baldyga, J.R. Baurne // Chem. Eng. Sci 1990. V. 45. № 4. P. 907–916.