

Отечественные статические смесители для непрерывного смешивания жидкостей

Статические смесители для непрерывного смешивания жидкостей в последние десятилетия широко применяют в российской промышленности. Это обусловлено рядом технико-экономических преимуществ статических смесителей перед традиционными емкостными аппаратами для смешивания (рис. 1): значительно меньшими габаритными размерами и металлоемкостью, отсутствием движущихся частей и, следовательно, большей надежностью.

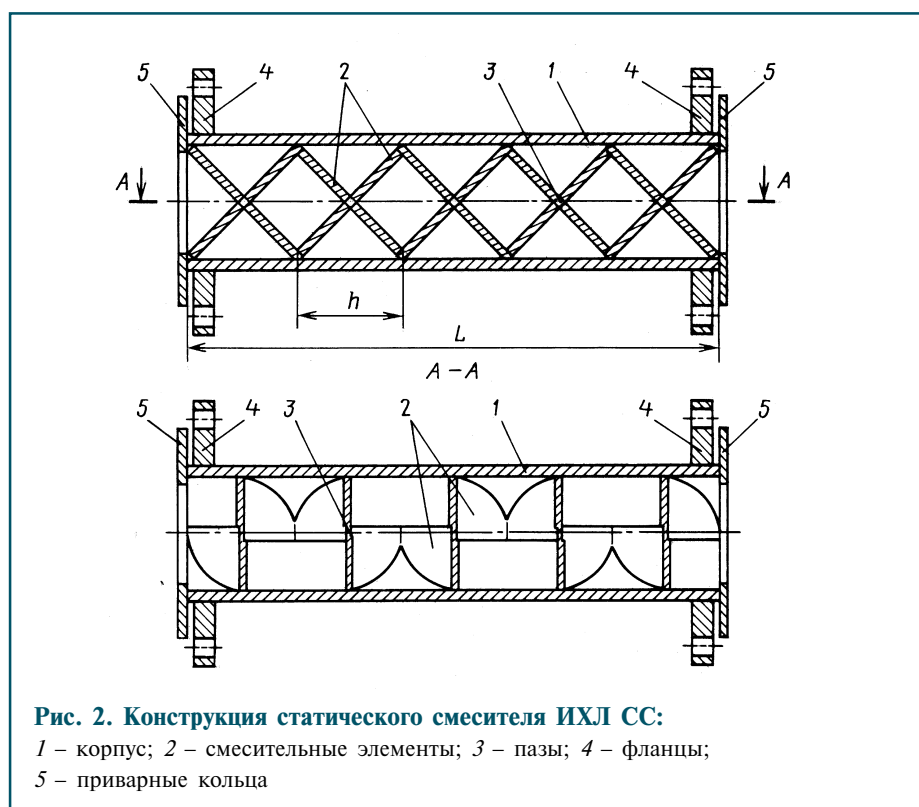
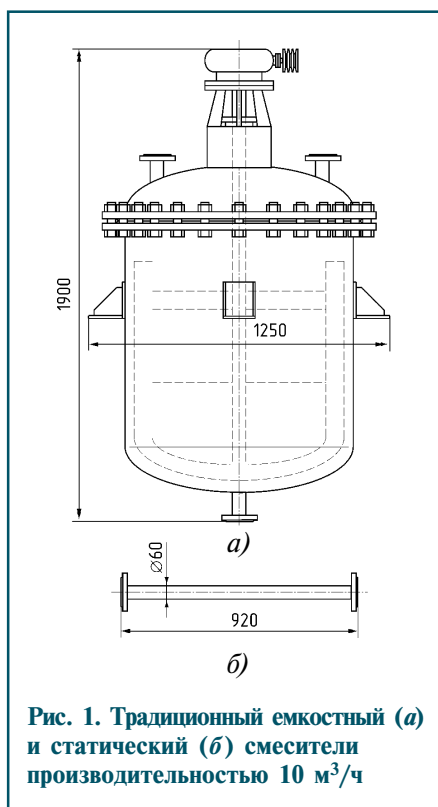
В источниках патентной информации приведено множество технических решений по данной тематике. Основные технические решения разработаны в Швейцарии, США, Японии. Отечественных разработок в области непрерывного смешивания сравнительно немного, среди наиболее интересных можно отметить конструкции статических смесителей [1, 2]. Однако значительное

поперечное сечение смесительных элементов в этих конструкциях, обеспечивающее интенсификацию турбулентного движения жидкости, одновременно создает чрезмерное гидравлическое сопротивление аппарата. Этот же недостаток присущ смесителю, запатентованному в Нидерландах [3]. Мировым лидером в области разработки и выпуска статических смесителей является фирма Sulzer (Швейцария) [4]. Эффективность статических смесителей данной фирмы [5, 6] определяется геометрией их смесительных элементов, которые представляют многочисленные плоскости, расположенные под различными углами к продольной оси аппарата. Принцип действия этих смесителей: неоднородный поток жидкой среды, поступающий в аппарат, неоднократно рассекается смесительными элементами на отдельные

струи, которые перемешиваются друг с другом. Полученная тонкослойная структура потока далее усредняется вследствие влияния турбулентности [4].

Статические смесители ИХЛ СС

На основе подхода, предложенного швейцарскими специалистами, разработаны оригинальные отечественные статические смесители ИХЛ СС [7] (рис. 2). Смесители имеют трубчатый корпус 1, внутри которого расположен смесительный элемент 2 (один или несколько), выполненный в виде гофрированной полосы, участки которой расположены под углом друг к другу и к оси трубчатого корпуса. Часть боковых сторон смесительного элемента выполнена в форме линии сопряжения с внутренней поверхностью трубчатого корпуса. Если смесительных элементов больше одного, то на их боковых сторонах



выполняют пазы 3, которыми смесительные элементы сцеплены друг с другом (рис. 3). Один из концов смесительного элемента упирается в несъемный кольцевой упор на одном конце корпуса. На другом конце корпуса может быть размещен как несъемный, так и съемный кольцевой упор. Статический смеситель может быть выполнен с накидными фланцами 4 на приварных кольцах 5 (см. рис. 2), а также с резьбовым присоединением или с концами под приварку.

Статический смеситель ИХЛ СС работает следующим образом. Трубочатый корпус 1 посредством фланцев 4 или иным способом присоединяют к трубопроводу, по которому движется среда, подлежащая перемешиванию. Внутри корпуса поток среды взаимодействует с поверхностью одного или нескольких смесительных элементов 2. Наклонные к оси корпуса участки смесительного элемента, образующие в совокупности одну ступень смесителя длиной h , интенсивно отклоняют и завихряют поток. Чередующиеся, расположенные под углом друг к другу ступени смешивания, создают интенсивную разнонаправленную турбулентность потока по всему сечению корпуса, вследствие чего достигается эффективное смешивание.

Данная конструкция помимо простоты отличается малой материалоемкостью и высокой технологичностью в производстве. Это позволило организовать выпуск (по заказам) статических смесителей с внутренним диаметром $d_b = 25 \div 300$ мм при длине $L = 225 \div 4000$ мм. Конструкция позволяет без существенных технологических трудностей выпускать статические смесители с d_b от нескольких миллиметров до 2000 мм при длине до 12 000 мм.

Статические смесители ИХЛ СС изготавливают практически из любых металлических материалов в исполнениях с фланцевым, резьбовым присоединением и с концами под приварку. Внешний вид статического смесителя ИХЛ СС ($d_b = 25$ мм, $L = 1000$ мм) приведен на рис. 4.

Физические основы функционирования статических смесителей

В отличие от традиционных емкостных смесителей, в которых смешивание жидкостей осуществляется путем подвода механической энергии от внешнего источника, разработанные статические смесители функционируют при использовании кинетической энергии перемешиваемого потока жидкой среды. Мерой энергии, затрачиваемой в статическом смесителе единицей массы жидкости на вихреобразование в единицу времени, является диссипация энергии [8]:

$$\varepsilon = \frac{(\Delta w)^3}{D} = \lambda \frac{w^3}{D},$$

где Δw — изменение мгновенной скорости жидкости на пути, равном характерному размеру потока D , м/с; w — средняя линейная скорость потока жидкости, м/с; λ — безразмерный коэффициент диссипации энергии.

Гидравлическое сопротивление статического смесителя выражается как энергия, затрачиваемая единицей объема жидкости на прохождение через статический смеситель:

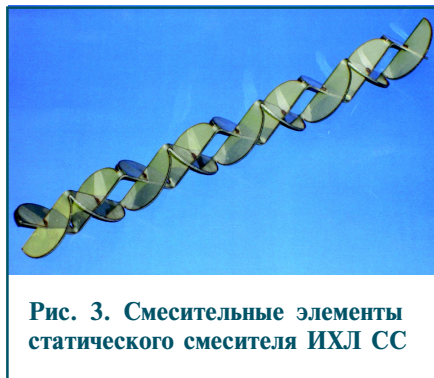


Рис. 3. Смесительные элементы статического смесителя ИХЛ СС



Рис. 4. Статический смеситель ИХЛ СС-25 в собранном и частично разобранном состояниях

$$\Delta p = \varepsilon \tau = \rho w^2 \lambda L / D, \quad (1)$$

где $\tau = L/w$ — среднее время прохождения жидкости через статический смеситель длиной L , с; $\rho = \sum_{i=1}^M \rho_i X_i$ — средняя плотность жидкости; M — число компонентов смеси; ρ_i — плотность i -го компонента, кг/м³; $X_i = V_i/V$ — объемная доля i -го компонента, м³; V_i — объем i -го компонента, м³; V — объем смеси, м³.

Диссипация энергии ε — количество энергии, затрачиваемой в единицу времени на преодоление трения частиц единицы массы жидкой среды для смешивания ее компонентов, т.е. для внедрения одних частиц жидкой среды между другими. Этот механизм проявляется при ламинарном режиме движения жидкой среды через статический смеситель, когда смешивание осуществляется путем перемещения местами отдельных слоев потока, а энергия затрачивается на преодоление трения этих слоев друг о друга. Ламинарный режим в смесителях редко осуществляется на практике, значительно чаще статический смеситель работает в турбулентном режиме. При том, что конечный результат процесса как в ламинарном, так и турбулентном режимах одинаков — внедрение одних частиц жидкой среды между другими путем использования части энергии потока — способ передачи этой энергии от потока жидкой среды как целого к отдельным малым частям потока в турбулентном режиме усложняется. Этот процесс осуществляется благодаря возникновению сложных вихревых движений отдельных частей потока на расстоянии длиной порядка D . Эти движения, оказываясь неустойчивыми, возбуждают движения на протяжении меньших расстояний $d < D$, которые в свою очередь возбуждают еще более мелкие вихревые потоки, вплоть до масштабов $\delta_0 \approx D/Re^{3/4}$, где $Re = wD/\nu$ — критерий подобия Рейнольдса; ν — коэффициент кинематической вязкости жидкости [9, 10]. Таким образом, возбуждение в потоке жидкости турбулентного движения эквивалентно дополнительному рассеянию потока жидкости на $Re^{3/4}$ слоев.

К сожалению, невозможно сколько-нибудь точно указать границу возникновения турбулентности в потоке внутри статического смесителя. Движение потока жидкой среды через статический смеситель представляет типичный пример смешанной задачи гидродинамики, для которой оценки критического значения Re колеблются от нескольких единиц до нескольких десятков. Имеет значение и геометрия потока.

Схема потока жидкости внутри статического смесителя ИХЛ СС простейшей конструкции (см. рис. 2), приведена на рис. 5. Видно, что поток жидкой среды формально можно рассматривать как суперпозицию четырех потоков: двух меандрирующих и двух зигзагообразных. Эти потоки постоянно обмениваются веществом, а следовательно, и кинетической энергией, поэтому приведенная схема является упрощенной. Рассматривая результирующий поток как суперпозицию четырех потоков со средней линейной скоростью w и характерным линейным размером $D = d_b/2$, можно определить значение критерия Рейнольдса для потока: $Re = wd_b/2\nu$. Однако это значение Re не характеризует истинного характера движения жидкости, так как ламинарный или турбулентный режим устанавливается лишь при движении

потока по прямолинейной траектории на расстоянии, превышающем несколько значений D . Поток в статическом смесителе не обеспечивает возможности прямолинейного движения на протяжении такого расстояния, следовательно, в нем всегда присутствуют неустановившиеся, вихревые движения.

Для практики достаточно принять, что на протяжении длины h одной ступени поток рассекается на $n = n_0 Re^{3/4}$ слоев, где n_0 — число плоскостей смесительных элементов в ступени. Число слоев потока на выходе смесителя

$$N = n^{L/h} = (n_0 Re^{3/4})^{L/h} \quad (2)$$

Качество смешивания

В качестве критерия неоднородности смеси нескольких компонентов используют, как правило, среднеквадратическое отклонение доли i -го компонента, определяемое по формуле

$$\sigma_i = \left[\sum_{j=1}^m (x_{ij} - X_i)^2 / (m-1) \right]^{1/2},$$

где x_{ij} — доля i -го компонента, полученная при j -м измерении; m — число измерений доли i -го компонента. Для практики, как правило, более ценной информацией является относительное отклонение доли i -го компонента, определяемое

как $s_i = \sigma_i / X_i$, так как колебания содержания в смеси компонентов, доля которых X_i мала, в большей степени влияют на свойства смеси, чем отклонения содержания в смеси компонентов с большей объемной долей X_i . Поэтому при выборе статического смесителя качество смешивания следует оценивать по значению s_i для компонента с наименьшей объемной долей X_i .

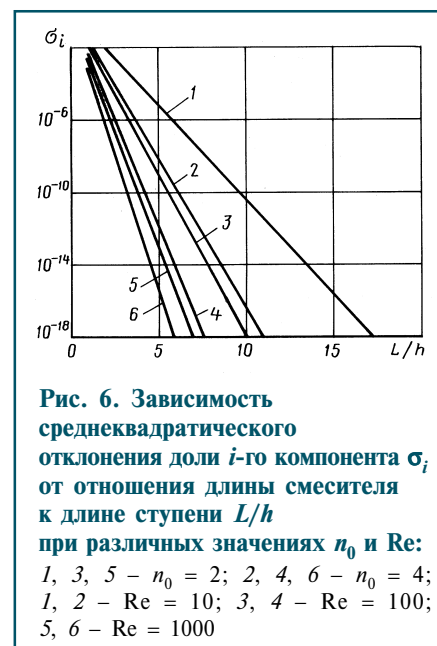
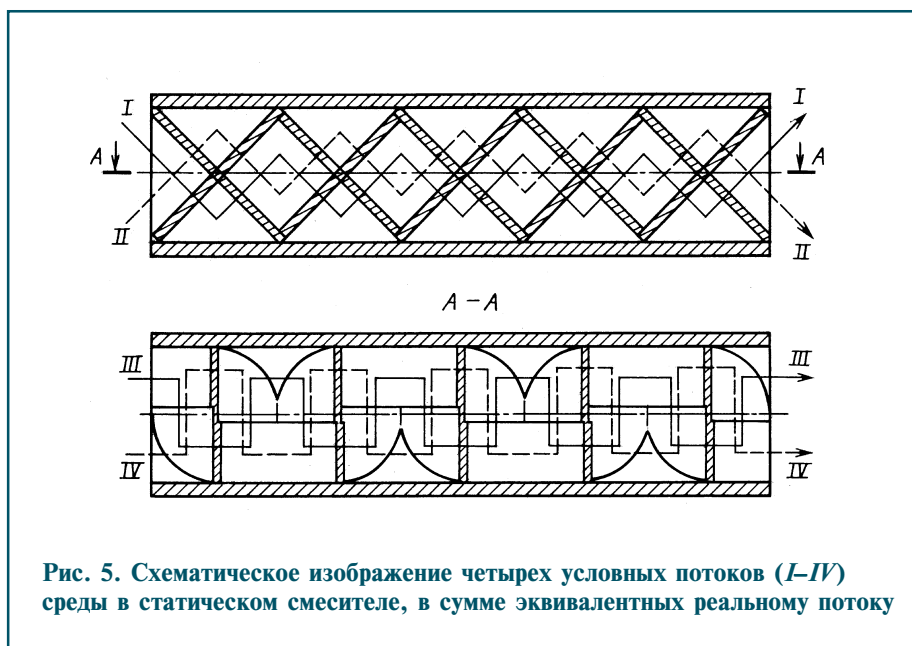
Значение σ_i убывает приблизительно обратно пропорционально числу слоев, на которые рассекается поток смеси. С учетом выражения (2) можно записать

$$\sigma_i \approx (n_0 Re^{3/4})^{-L/h} \quad (3)$$

или, логарифмируя выражение (3), получим

$$\ln \sigma_i \approx -L \left(\ln n_0 + \frac{3}{4} \ln Re \right) / h \quad (4)$$

Так как на практике число плоскостей смесительных элементов $n_0 = 2 \cdot 10$, то при значениях Re порядка десятков и более значение n_0 почти не влияет на эффективность смешивания. Зависимости σ_i от L/h при различных числах Re (рис. 6) показывают, что параметр σ_i , характеризующий неоднородность смеси, быстро (приблизительно экспоненциально) убывает с увеличением длины смесителя L и критерия



Рейнольдса Re . Следовательно, для повышения качества смешивания необходимо увеличивать значения Re и L . Однако, как следует из уравнения (1), гидравлическое сопротивление смесителя линейно возрастает с увеличением L и квадратично — с увеличением скорости w . Это показывает, что повышение качества смешивания достигается путем отбора у потока жидкости дополнительной энергии.

Выбор статического смесителя

Для выбора статического смесителя типа ИХЛ СС, исходя из условий его работы и требуемого качества смешивания, целесообразно использовать номограмму, приведенную на **рис. 7**. Способ пользования номограммой иллюстрируют следующие практические примеры.

Пример 1. Для нужд предприятия пищевой промышленности требуется подобрать статический смеситель для приготовления водно-спиртовой смеси с объемной долей этилового спирта $X_i = 40\%$, расход $Q = 20 \text{ м}^3/\text{ч}$. Допустимая неоднородность смеси нормируется относительным отклонением доли этилового спирта $s_i = 10^{-3}$ (или $0,1\%$). Следовательно, $\sigma_i = s_i X_i \approx 10^{-3}$. Внутренний диаметр смесителя d_B выберем так, чтобы прямая, соединяющая точки, соответствующие значениям d_B и Q ,

пересекала шкалу скоростей потока w в ее средней части. Выбираем смеситель с $d_B = 80 \text{ мм}$, тогда по прямой, соединяющей точки $d_B = 80 \text{ мм}$ и $Q = 20 \text{ м}^3/\text{ч}$, находим значение $w \approx 1,1 \text{ м/с}$. Кинематическую вязкость водно-спиртовой смеси примем приблизительно равной вязкости воды: $\nu \approx 1 \text{ мм}^2/\text{с}$. Проведя прямую линию через точку, отображающую это значение, и точку пересечения первой прямой со вспомогательной линией, получим значение $Re \approx 4,5 \cdot 10^4$. Проведя прямую через данную точку и отмеченный кружком угол координатной сетки, найдем ее пересечение с наклонной линией сетки, соответствующей $\sigma_i = 10^{-3}$, и в этой точке отсчитаем необходимое значение $L/h = 4$. Выбрав смеситель с $h = d_B = 80 \text{ мм}$, получим необходимую длину смесителя $L = 320 \text{ мм}$.

Пример 2. В авиационном топливе содержится небольшая примесь воды. Для предотвращения ее кристаллизации и забивания образующимся инеем топливопроводов и регулирующих устройств двигателей самолетов в зимнее время к топливу добавляют жидкость «И» ($0,2\%$) — органический эфир $C_4H_{10}O_2$. Требуется подобрать статический смеситель для смешивания самолетного топлива ТС-1 с $X_i = 0,2\%$ жидкости «И» при $Q = 50 \text{ м}^3/\text{ч}$. Допустимая

неоднородность смеси нормируется относительным отклонением доли жидкости «И» $s_i = 10^{-3}$ (или $0,1\%$). Следовательно, $\sigma_i = s_i X_i \approx 10^{-6}$. Аналогично **примеру 1** выбираем смеситель с $d_B = 150 \text{ мм}$ и находим значение $w \approx 0,8 \text{ м/с}$. Кинематическую вязкость смешиваемой среды примем равной вязкости топлива ТС-1 в соответствии с ГОСТ 10227–86: $\nu \leq 8 \text{ мм}^2/\text{с}$ (принимаем большее значение вязкости, которое соответствует наихудшим условиям смешивания). Находим $Re \approx 8 \cdot 10^3$ и на пересечении соответствующей прямой с наклонной линией сетки определим значение $L/h = 8$. Для смесителя с $h = d_B = 150 \text{ мм}$ необходимая длина составит $L = 1200 \text{ мм}$.

Если условия эксплуатации статического смесителя предполагают возможность изменения расхода среды, ее вязкости или других условий, необходимо проверить качество смешивания для всех возможных сочетаний граничных условий и затем выбрать смеситель, эффективный во всем интервале условий эксплуатации.

Список литературы

1. Пат. 2097408 РФ, МПК С10L1/32, В01J19/18, В01F5/00. Способ получения жидкого топлива и статический смеситель для его осуществления. Оpubл. 27.11.1997.
2. Пат. 2237511 РФ, МПК В01F5/00. Статический смеситель. Оpubл. 10.10.2004.
3. Пат. 1016271 Нидерланды, МПК В01F5/06. Static mixer apparatus and method for manufacturing same. Public. 27.03.2002.
4. Шнейдер Г. Непрерывное перемешивание жидкостей с помощью статических смесителей // Химическое и нефтяное машиностроение. 1995. № 7. С. 19–23.
5. Пат. 2221631 РФ, МПК В01F5/00. Статический смеситель с профильными слоями. Оpubл. 20.01.2004.
6. Пат. 7040802 США, МПК В29С45/60, В01F5/00. Static mixer for high-viscosity media. Public. 17.06.04.
7. Пат. 75959 РФ, МПК В01F5/00. Статический смеситель.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
9. Richardson L.F. Weather prediction by numerical process. Cambridge: Cambridge University Press, 1922. 236 p.
10. Колмогоров А.Н. Доклады АН СССР. М., 1941. Т. 30. № 4. С. 299–303.

