

УДК 669.053.4

АППРОКСИМАЦИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТВОРОВ ЕДКОГО НАТРА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В РАСЧЕТАХ ТЕПЛООБМЕНА

Г. И. ЕФРЕМОВ, А. Б. НИКОЛАЕВ, Л. Г. БУРМАГИНА

(Московская государственная текстильная академия им. А. Н. Косыгина)

При расчетах процессов теплообмена, выпаривания и кристаллизации растворов необходимо знать их удельную теплоемкость c_p , коэффициент λ теплопроводности и $a = \lambda / c_p \rho$, температуропроводности, коэффициент μ динамической (или кинематической $\nu = \mu / \rho$) вязкости при различных концентрациях и температурах. Данные параметры входят и в критерии теплового подобия. Так, критерий подобия Прандтля учитывает комплексное влияние теплофизических свойств:

$$Pr = c_p \mu / \lambda = \nu / a,$$

где ρ — плотность раствора.

В процессе тепловых расчетов параметры раствора находят при различных температурах и давлениях путем интерполяции табличных данных. Предпочтительно для ускорения расчетов иметь аппроксимации теплофизических свойств от температуры и концентрации. При этом, как правило, повышается точность, поскольку при ручном счете применяется обычно линейная интерполяция. Кроме того, при применении ЭВМ удобнее использовать аппроксимирующие зависимости, чем ввод табличных данных.

В текстильной промышленности при обработке волокон и полотен широко применяются растворы едкого натра. Разбавленные растворы подвергаются упариванию. По теплофизическим свойствам едкого натра известные опытные величины различаются в ряде случаев на несколько процентов [1..3], поэтому для аппроксимации нами приняты только данные из [1]. В большинстве случаев при нахождении аппроксимирующих зависимостей для растворов нельзя использовать правило аддитивности, которое приводит к существенным ошибкам [2, 3].

Результаты зависимости плотности растворов едкого натра от температуры приведены ранее (табл. 1, [1]).

Для аппроксимации плотности использована формула коэффициента термического расширения [2]:

$$\beta = (\rho^2_1 - \rho^2) / 2(t_1 - t) \rho_1 \rho, \quad (1)$$

где ρ_1 и ρ — известная и искомая плотности при температурах соответственно t_1 и t и постоянной концентрации раствора.

После преобразований с учетом (1) имеем

$$\rho = \rho_1 [\sqrt{\beta^2(t_1 - t) + 1} - \beta(t_1 - t)]. \quad (2)$$

После обработки на ЭВМ данных табл. 1 из [1] методом наименьших квадратов на основании (2) найдена полуэмпирическая зависимость

$$\rho = (\rho_0 + kX) [\sqrt{\beta^2 t^2 + 1} - \beta t], \quad (3)$$

где $\rho_0 = 1000$ кг/м³ — плотность воды при 0 °С;

t и X — соответственно температура (°С) и концентрация (%) раствора;

$k = 11,1$ — опытный коэффициент.

На основании результатов опытов принято усредненное значение $\beta = 5 \cdot 10^{-4}$, 1/К. Максимальное отклонение расчетных и опытных данных составляет 1,3%, а среднее отклонение 0,6%. Показатели зависимости удельной теплоемкости раствора едкого натра от температуры и концентрации приведены в табл. 3 [1], после их обработки по методу наименьших квадратов получена эмпирическая зависимость

$$C_p = 3848 - 13,86X - 0,015t^2 + 3,3t \text{ (Дж/кг} \cdot \text{К)}. \quad (4)$$

Сравнение расчетных (4) и опытных данных удельной теплоемкости растворов едкого натра приведено на рис. 1 при концентрации X последнего (кривые 1..4) соответственно 10; 20; 30 и 40%. Среднее отклонение расчетных и опытных результатов составляет $\pm 0,77\%$, а максимальное отклонение 26% наблюдается лишь при $t = 0$ °С и концентрации 40% и редко встречается в практических расчетах.

В [1] (табл. 2) данные зависимости кинематической вязкости растворов едкого натра от температуры и концентрации получены на основании величин динамической вязкости. Эта зависимость является довольно сложной. Для вязкости предложены формулы в [2, 3], где при концентрациях ниже 30% рекомендуют сетку Девиса ($t < 20$ °С) и диаграмму Дюринга ($t < 80$ °С) [3]. Не приводятся зависимости изменения параметров в широком диапазоне. Для диапазона $t = 20 \dots 100$ °С и $X = 10 \dots 50\%$ нами получена формула

$$\nu = t^m 10^{(2,5m - 6,545)}, \text{ (м}^2\text{/с)}, \quad (5)$$

где коэффициент $m = 0,29 + 0,0337X$.

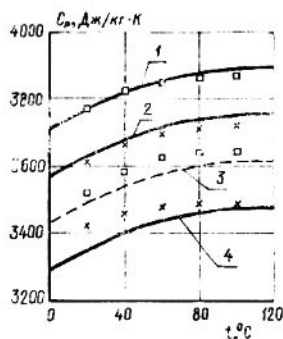


Рис. 1.

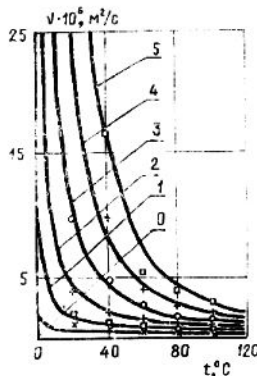


Рис. 2.

На рис. 2 сравниваются результаты расчета согласно (5) и опытные данные кинематической вязкости при различной концентрации X едкого натра: 0...5 — соответственно 0; 10; 20; 30; 40 и 50%. Средняя расчетная погрешность составляет 4,4%, а максимальная 15,2%.

Погрешность при расчетах теплопроводности растворов по формулам [2, 3] равняется от 5 до 50%. Для составления критериев из величин с такой точностью их погрешность может достигать более 100%, что неприемлемо.

После обработки опытных данных (табл. 4 [1]) по теплопроводности методом наименьших квадратов получена эмпирическая зависимость

$$\lambda = 0,509 + (0,0627 - 0,000567X) (\lg t - 0,732), \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}. \quad (6)$$

Сравнение результатов расчета по этой зависимости с опытными показано на рис. 3 для X соответственно 1...5: 10; 20; 30; 40 и 50%. Средняя погрешность расчета согласно (6) составляет 0,3%, а максимальная 0,9% в диапазоне $t = 20 \dots 120^\circ\text{C}$ и $X = 10 \dots 50\%$.

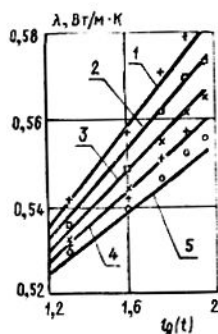


Рис. 3.

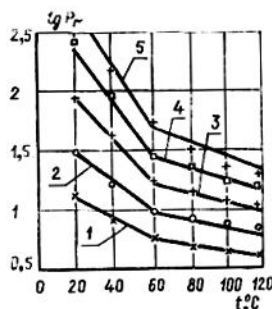


Рис. 4.

Критерий Pr Прандтля для жидкостей и растворов можно рассчитать на основании (3...6). Ввиду взаимного влияния погрешностей этих уравнений при составлении критерия Pr зависимость для него целесообразно искать непосредственно по опытным данным. Значения критерия Pr для растворов едкого натра найдены на основании [1]. При их обработке методом наименьших квадратов получена зависимость в интервалах параметров $t = 20 \dots 65^\circ\text{C}$ и $X = 10 \dots 50\%$:

$$Pr = 2,9 \cdot 10^{n(106-t)}, \quad (7)$$

а также для $t = 65 \dots 120^\circ\text{C}$ и $X = 10 \dots 50\%$:

$$Pr = 1,82 \cdot 10^{N(315-t)}, \quad (8)$$

где коэффициенты $n = 0,0004855X + 0,0025$ и $N = 0,000093X + 0,00089$. Средняя погрешность расчетов по этим уравнениям составляет соответственно 2,4 и 3%, а максимальная 5,2 и 6,1%.

Результаты сравнения расчетов согласно (7) и (8) с опытными данными приведены на рис. 4, где обозначения кривых аналогичны рис. 3.

Критерий R_g для воды удобнее рассчитывать по одному уравнению из [4] для всего интервала температур $t=20\dots120^\circ\text{C}$. Тогда с учетом данных из [1] получаем

$$R_g = 8,36 \cdot 1,016^{-t}, \quad (9)$$

согласно которому средняя погрешность расчета составит 7,6%, а максимальная 10,6%.

Уравнения (7...9) следует использовать в расчетах процесса теплообмена. Например, отношение критериев R_g и $R_{g_{ст}}$ стенки в соответствии с (7) имеет вид

$$R_g/R_{g_{ст}} = 10^{n(106-\Delta t)}, \quad (10)$$

где Δt — разность температур среды и стенки.

При этом расчетные уравнения теплообмена упрощаются.

ВЫВОДЫ

Предложены зависимости для расчета плотности растворов едкого натра с одним поправочным коэффициентом, а также зависимости для определения теплоемкости, теплопроводности и вязкости таких растворов. Выведены эмпирические уравнения для расчета критерия Прандтля, с применением которых упрощаются уравнения теплообмена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Флореа О., Смигельский О. Расчеты по процессам и аппаратам химической технологии. — М.: Химия, 1971.
2. Перри Д. Г. Справочник инженера-химика. — М.: Химия, 1969.
3. Брейтшнайдер С. Свойства газов и жидкостей. — М.: Химия, 1966.
4. Ефремов Г. И., Сажин Б. С. Испытание и расчет эмсвиковаго теплообменника. — М., МТИ, 1979.

Рекомендована кафедрой процессы и аппараты химической технологии. Поступила 27.02.97.