

ФОРМУЛЫ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ И КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ЧИСТЫХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ САХАРНЫХ РАСТВОРОВ

Вязкость сахарных растворов характеризует интенсивность действия сил торможения относительно перемещению слоев раствора, обуславливает мощность насосов и мешалок, влияет на реологические свойства уфелей, определяет скорость процессов тепло- и массообмена. Ее изучению посвящены сотни работ советских и зарубежных исследователей [1-8 и др.]. Однако для сдвиговых динамической (μ , Па·с) и кинематической (ν , м²/с) вязкостей нет единых формул, которые бы охватывали весь используемый в сахарном производстве диапазон температур (t , °С или T , К), массовых процентных содержаний сахарозы (S_x , %) и сухих веществ ($СВ$, %), доброкачественностей ($Дб = 100 S_x / СВ$, %) и объемных долей пузырьков газа в растворе (φ).

При ламинарном течении ньютоновских жидкостей деформация относительного сдвига одинакова у всех слоев, μ не зависит от скорости деформации, определяется периодом релаксации упругих касательных напряжений и служит характеристикой раствора. В случае появления турбулентности возникает зависящая от скорости потока турбулентная вязкость (много больше μ), которая не относится к физико-химическим константам. Величину ν/μ называют текучестью. Кинематическая вязкость $\nu = \mu / \rho$, где ρ - плотность, кг/м³.

Данные о μ воды (μ_B) согласно Международной таблице усредненных экспериментальных значений динамической вязкости воды и водяного пара [9; 10] имеют предельную относительную погрешность $\delta\mu = 1,0\%$. Для значений μ_B при $-10\dots+130^\circ\text{C}$ и ν_B (кинематическая вязкость для воды) при $10\dots140^\circ\text{C}$ автору удалось получить простые формулы такой же точности:

$$\lg \mu_B = (0,685 - 103,21/T)^{-1}, \quad (1)$$

$$\text{и} \quad \lg(10^9 \cdot \nu_B) = (0,6688 - 98,4/T)^{-1}. \quad (2)$$

Здесь μ_B , мПа·с, а $\nu_B \cdot 10^9$, м²/с.

В рассматриваемом диапазоне T влияние давления при $p < 4$ МПа на μ_B незначительно. Коэффициенты сжимаемости сахарных растворов меньше, чем у воды, и уменьшаются с ростом СВ [11]. Поэтому в условиях сахарного производства, где p обычно не превышает 1 МПа, его влияние на вязкость сахарных растворов пренебрежимо мало.

Для чистых сахарных растворов в координатах $\lg \mu_z$ (μ_z - динамическая вязкость чистых сахарных растворов) - мольная доля сахара $x_{cx} = (1900/Cx - 18)^{-1}$ изотермы начинаются от значений $\lg \mu_B$ ($x_{cx} = 0$) и представляют собой слабо изогнутые плавные кривые. Углы наклона касательных к кривым при $x_{cx} = 0$ уменьшаются с ростом T . При температурах около 30°C изотермы - прямые линии, при более низких температурах изотермы отклоняются вверх, а при более высоких - вниз. Результаты графического представления данных о вязкости чистых сахарных растворов использованы при получении формул

$$\lg \mu_z = \lg \mu_B + 3,09 \cdot 10^{-11} T^{-4,253} (1900/Cx - 18)^{2,363} T^{-1,722}, \quad (3)$$

$$\lg(\nu_z \cdot 10^9) = \lg \nu_B + 2,357 \cdot 10^{-12} T^{-4,44} (1900/Cx - 18)^{2,45} T^{-1,771}. \quad (4)$$

Для температур $15\dots100^\circ\text{C}$ и $Cx = 0-85\%$ (в этом интервале температур и концентраций μ_z и ν_z меняются в несколько миллионов раз) $\delta\mu_z = 12\%$ и $\delta\nu_z = 11\%$. Сахарные растворы ведут себя как ньютоновские жидкости, если $\mu_z < 100$ Па·с. С повышением Cx и снижением T μ_z и ν_z резко возрастают (при $\mu_z > 100$ Па·с раствор переходит в стеклообразное состояние). Чем больше значение μ_z , тем больше изменяется эта величина с изменением T .

Производственные сахарные растворы содержат различные примеси (несахар). Их количество в массе сухих веществ пропорционально

(1 - Дб/100), а качественный состав весьма разнообразен и сильно влияет на вязкость. В производственных растворах всегда есть пузырьки газов (воздух, аммиак CO_2 и др.). Поэтому вязкость производственных растворов целесообразно представить в виде

$$\mu_r = \mu_t \cdot \epsilon_{Дб} \cdot \epsilon_{\varphi} \quad (5)$$

где $\epsilon_{Дб}$ и ϵ_{φ} - поправочные коэффициенты, учитывающие влияние соответственно Дб и φ на μ_r (они аналогично влияют и на ν_r).

Обычно $\mu_t > \mu_p$. Их разность увеличивается с понижением T и Дб. В зависимости от состава примесей вязкости меласс при одинаковых T , СВ и Дб могут отличаться друг от друга в до 10 раз. Но на практике мелассы, полученные при переработке свеклы нормального качества, обычно не очень отличаются по вязкости.

На основе работы А.Н.Беннета и А.Р.Нисса [3] для температур 40...80 °С, СВ = 74-86 % и Дб = 60-100 % с $\delta\epsilon_{Дб} = 5\%$ имеем

$$\epsilon_{Дб} = 1 - 5 \cdot 10^{-6} (100 - Дб) (100 - t) (СВ - 60). \quad (6)$$

Данные Р.Орта, Г.Брейтунга [3], Г.М.Знаменского [4], А.М.Черного [5] и др. показывают более сильное влияние Дб на вязкость. С их учетом для Дб = 55-100 % и того же, что и для μ_t и ν_t диапазона T и СВ,

$$\epsilon_{Дб} = 1 - 0,37 (1 - Дб/100) (380 - T) / (1900/СВ - 18)^2. \quad (6)$$

Сырцовые мелассы, как правило, значительно более вязкие, чем свекловичные. Для них эта поправка не годится, как и для свекловичных меласс в конце производства, когда перерабатывается свекла длительного хранения. Поправка $\epsilon_{Дб}$ имеет ориентировочный характер, отражая качественное влияние температуры, концентрации и доброкачественности производственных растворов на их вязкость.

В некипящих производственных сахарных растворах содержание пузырьков газа обычно порядка $\varphi = 0,01$ и не превышает $\varphi = 0,1$. Раствор с пузырьками газа превращается в эмульсию с более высокой вязкостью μ_3 . На основе экспериментальных данных [2; 8] при $\varphi \leq 0,3$ нами получена зависимость

$$\epsilon_{\varphi} = \mu_3 / \mu_p = 1 + 4,5 \varphi, \quad (7)$$

совпадающая с формулами Гатчека ($\varphi \leq 0,4$) и Бачинского для вязкости суспензий со сферическими частицами. Таким образом, пузырьки газа (их диаметр от тысячных до десятых долей миллиметра) при посто-

лином давлением ведут себя как твердые шарики. При высоких φ образуются пены. Прочность их пространственных структур растет с повышением вязкости раствора.

Влияние pH на μ_p при $pH < 11$ мало (на уровне погрешности вискозиметров), причем незначительное увеличение вязкости в щелочных растворах по сравнению с кислыми [8] можно не учитывать (так же, как и влияние ПАВ).

При инверсии сахарозы снижается pH и в случае постоянства СВ уменьшается μ_p (вязкость падает с уменьшением молекулярной массы растворенного сахара и для растворов моносахаридов она меньше, чем для раствора сахарозы при одинаковых T и S_x).

Использование полученных формул рассмотрим на примерах. Для воды при $40^\circ C$ по формулам (1) и (2) получим $\mu_0 = 651,1 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ и $\nu_0 = 661,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Найдем вязкость мелассы при $40^\circ C$ ($313,15 \text{ К}$) с СВ = 83,5 %, Дб = 60 % ($\rho = 1425 \text{ кг/м}^3 = 1,425 \text{ г/см}^3$), которая содержит 20 см^3 газа в 1 кг. По формулам (3) и (4)

$\mu_z = 11,63 \text{ Па}\cdot\text{с}$ и $\nu_z = 8,104 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ (из $\nu_z = \mu_z / \rho$ получим $8,161 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$). По формуле (6) $\xi_{Дб} = 0,5623$ и

$\mu_p = 11,66 \cdot 0,5623 = 6,540 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Из таблицы Врейтунга при $40^\circ C$ и СВ = 83,5 % $\mu_p = 6,516 \text{ Па}\cdot\text{с}$, из таблицы Орта $\mu_p = 6,30 \text{ Па}\cdot\text{с}$, а из таблицы Беннета и Нисса - $\mu_p = 8,50 \text{ Па}\cdot\text{с}$ [3]. Объемная доля газов в мелассе $\varphi = 20 / (1000 / 1,425 + 20) = 0,0277$. По формуле (7) $E_\varphi = 1,125$. Вязкость мелассы с пузырьками газа

$\mu_z = 6,540 \cdot 1,125 = 7,358 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Насыщенный водный раствор сахарозы при $40^\circ C$ имеет $S_x = 70,22 \%$. Для него по формуле (3)

$\mu_z = 0,118 \text{ Па}\cdot\text{с}$. В насыщенных растворах низкой доброкачественности вязкость растет за счет повышения концентрации сухих веществ.

Программа для расчета динамической и кинематической вязкости одна и та же (меняются только значения некоторых коэффициентов). Она короткая, и ее легко можно записать в перепрограммируемое запоминающее устройство микрокалькулятора, например "Электроника МК-52".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ICUMSA methods of sugar analysis / Ed. by H. G. S. de Whalley. - Amsterdam: Elsevier PC, 1964. - 153 p.
2. Измерение вязкости в сахарном производстве / А. И. Громковский, С. З. Иванов, В. П. Палади, В. Г. Черникина. - М.: ЦИТИПищепром, 1969. - 64 с.

3. Герасименко А.А., Олянская С.П., Гривцева Э.А. Меласса и мелассообразование в сахарном производстве. - К.: Выда шк., 1984. - 320 с.

4. Знаменский Г.М. Технологическое оборудование сахарных заводов. - М.: Пищепромиздат, 1952. - 424 с.

5. Черный А.М. Исследование теплофизических свойств сахарных растворов для уточнения расчетов пищевого оборудования: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - К., 1960. - 20 с.

6. Попов В.Д. Основы теории тепло- и массообмена при кристаллизации сахарозы. - М.: Пищ. пром-сть, 1973. - 320 с.

7. Синат-Радченко Д.Е. Влияние концентрации и температуры на теплофизические свойства сахарных растворов // Сахар. пром-сть. - 1975. - № 8. - С. 26-28.

8. Сапронова Л.А. Влияние некоторых факторов на вязкость продуктов сахарного производства // Сахар. пром-сть. - 1987. - № 11. - С. 45-47.

9. Ривкин Л.С., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. - М.: Энергия, 1980. - 424 с.

10. Александров А.А., Трахтенгерц М.С. Вязкость воды при температурах $-20...150$ °C // ИЖ. - 1974. - № 4. - С. 659-666.

11. Синат-Радченко Д.Е. Некоторые термодинамические термические коэффициенты сахарных растворов // Сахар. пром-сть. - 1983. - № 12. - С. 20-22.

12. Викторов М.М. Методы вычисления физико-химических величин и прикладные расчеты. - Я.: Химия, 1977. - 360 с.