

ДАВЛЕНИЕ ВОДЯНОГО ПАРА ПРИ КИПЕНИИ САХАРНЫХ РАСТВОРОВ

Д. Е. СИНАТ-РАДЧЕНКО, канд. техн. наук

При одном и том же давлении (p , кПа) температура на поверхности кипящего водного раствора сахарозы (t_p , °C) выше температуры насыщенного пара над кипящей водой (t_n) на величину физико-химической депрессии $\Delta T = t_p - t_n$ (рис. 1). Например, при давлении над раствором $p = 100$ кПа и содержании в массе раствора СВ = 85 % $\Delta T = 13,8$ К, и $t_p = 99,6 + 13,8 = 113,4$ °C.

Ввиду значительного расхождения в данных разных исследователей по ΔT и t_p при разных СВ и p автором (графически, в большом масштабе и нескольких системах координат) обобщены данные многочисленных советских и зарубежных исследований [1—3, 6—10]. На рис. 1 значения ΔT охватывают используемые в сахарной и кондитерской промышленности интервалы p и СВ. С понижением p значения ΔT уменьшаются до величин, соответствующих $p = 0,6108$ кПа и $t_n = 0$ °C. При более низких ($p = 0,181$ кПа и $t_p = -14$ °C) пришлось бы сравнивать t_p с температурой переохлажденной воды [4]. Штрих-пунктирная линия на рисунке соответствует насыщенным сахарным

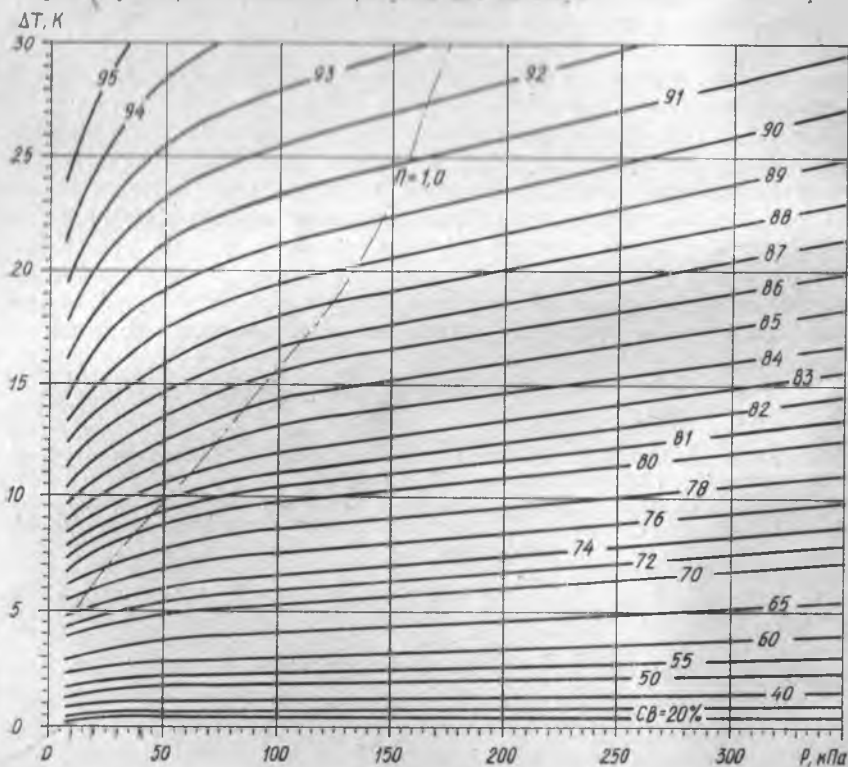


Рис. 1. Физико-химическая депрессия водных растворов сахарозы.

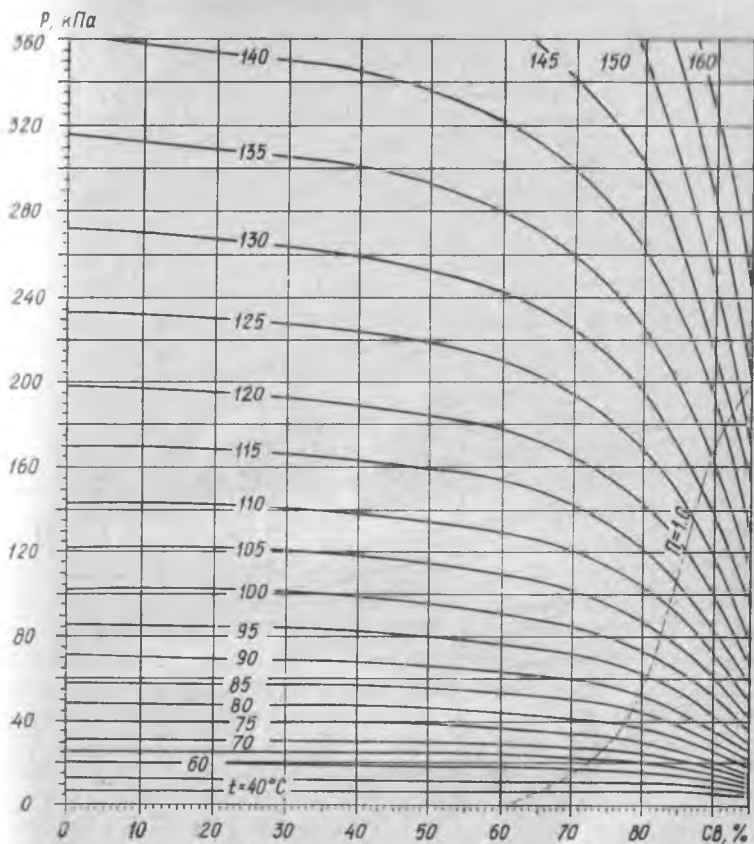


Рис. 2. Давление водяного пара над растворами сахаразы.

растворам, для которых коэффициент пересыщения $\Pi=1,0$. Растворы с более высокими СВ (участок левее кривой насыщения) являются пересыщенными.

При одинаковой температуре давление пара над кипящим сахарным раствором с повышением СВ постепенно падает (рис. 2). Например, при $113,4^\circ\text{C}$ с повышением СВ от 0 до 85 % давление пара над раствором снижается от 160 до 100 кПа.

Внутри паровых пузырей и над поверхностью кипящего раствора водяной пар является перегретым. Паровые пузыри образуются возле поверхности нагрева. Центрами их появления обычно служат пузырьки воздуха, застрявшие в микротрещинах и шероховатостях поверхности. Пузырь может расти лишь в случае, если давление пара в нем выше, чем давление окружающего раствора $p_{\text{пуз}} > p + p_{\text{г}} + \Delta p_{\text{п}} + p_{\text{сф}}$ (здесь $p_{\text{г}}$ — гидростатическое давление столба раствора над пузырьком; $\Delta p_{\text{п}}$ — дополнительное давление, создаваемое силами поверхностного натяжения; $\Delta p_{\text{сф}}$ — дополнительное давление, необходимое для компенсации более низкого давления над вогнутой поверхностью (в частности, сферической) по сравнению с плоской, $p_{\text{пл}}$).

Влияние отдельных составляющих на суммарное давление пара в пузыре нагляднее рассмотреть на примере. Возьмем раствор с СВ=85 % при $p=100$ кПа и высоте столба раствора $H=1$ м.

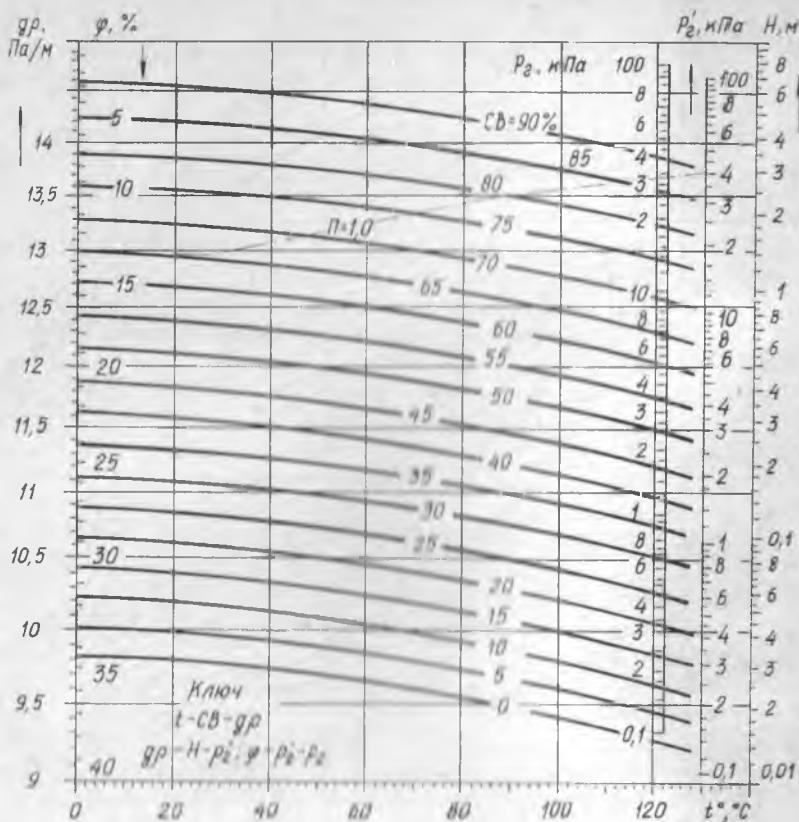


Рис. 3. Гидростатическое давление сахарных растворов и парорастворных смесей.

По уравнению Кельвина $p_{сф}/p_{пл} = \exp[-2\sigma/r\bar{\rho}RT]$, где $\sigma = 70 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$ — поверхностное натяжение на границе раствор—пар [5]; r — радиус парового пузыря, м; $\bar{\rho} = 970 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ — парциальная плотность воды в растворе; $R = 461,522 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ — удельная газовая постоянная водяного пара; $T = 388 \text{ К}$ — абсолютная температура пара. Для рассматриваемого примера (данные о физико-химических свойствах берутся для середины высоты столба раствора) понижение давления пара в сферическом пузыре по сравнению с его давлением над плоской поверхностью не превышает $1 \cdot 10^{-6} p_{пл}$ при $r = 1 \text{ мм}$ и $1 \cdot 10^{-3} p_{пл}$ при $r = 1 \text{ мкм}$. Т. е. в обычных условиях влияние $\Delta p_{сф}$ пренебрежимо мало.

Составляющая, связанная с действием сил поверхностного натяжения, для сферического пузыря с $r = 1 \text{ мм}$ по закону Лапласа дает $\Delta p_n = 2 \delta / r = 2 \cdot 70 \cdot 10^{-3} / 1 \cdot 10^{-3} = 140 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2} = 0,14 \text{ кПа}$. Форма пузыря в процессе его роста и подъема в общем случае отличается от сферической и непрерывно меняется. В момент отрыва пузыря его форма близка к сферической. Отрывные диаметры паровых пузырей растут с понижением p и менее существенно с ростом СВ (эти диаметры составляют 2—3 мм при 100 кПа и 15—20 мм при 20 кПа). В свободных условиях форма всплывающего пузыря близка к сплю-

ценному в направлении движения эллипсоиду вращения (сфероиду). В каналах на форму и размеры пузырей влияют геометрия канала, скорость парорастворной смеси, плотность теплового потока. Учет $\Delta p_{\text{н}}$ необходим на начальной стадии роста пузыря. Для диаметров, близких к отрицательному, влиянием сил поверхностного натяжения можно пренебречь.

Гидростатическое давление столба кипящего сахарного раствора в длинном горизонтальном сечении аппарата $p_r = (1-\varphi)g\rho H$ повышается с ростом H , с ростом плотности раствора ρ (она больше для больших СВ) и с уменьшением доли водяного пара в объеме парорастворной смеси φ (рис. 3). Например, при 115°C (нижняя горизонтальная шкала) для раствора с СВ = 85 % (линии СВ = const — кривые на поле номограммы) получим $g\rho = 13,6$ (здесь g — ускорение свободного падения) и при $H = 1$ м и $\varphi = 0$ гидростатическое давление столба раствора в отсутствие пузырей $p_r' = 13,6$ кПа. Если $\varphi = 0,35$, то $p_r = 8,8$ кПа. Минимальные абсолютные давления в вакуум-аппаратах 15—20 кПа. Таким образом, p и p_r — величины одного порядка.

При $p = 100$ кПа $\Delta T = 13,8$ К и $t_p = 113,4^\circ\text{C}$. На глубине 1 м ($\varphi = 0$) $p + p_r' = 100 + 13,6 = 113,6$ кПа (соответствующая $t_b = 103,2^\circ\text{C}$), физико-химическая депрессия возрастает до 14,1 К (см. рис. 1), а температура кипения раствора повышается до $t_p = 103,2 + 14,1 = 117,3^\circ\text{C}$. С увеличением глубины слоя раствора рост t_p происходит не только из-за повышения p_r , но и из-за связанного с ним повышения ΔT . При $H = \text{const}$ увеличение φ понижает p_r и его влияние на t_p . Например, при $H = 1$ м и $\varphi = 0,35$ $t_p = 116^\circ\text{C}$.

Органические несахара с молярной массой, меньшей, чем у сахарозы, и особенно электролиты, при одинаковых с водными растворами сахарозы СВ и t снижают давление водяного пара над раствором, повышают ΔT , почти не оказывая влияния на плотность раствора.

Поправка δT_d , учитывающая влияние несахаров на дополнительное повышение температуры кипения производственных растворов свеклосахарного производства с доброкачественностью $D_b = 100C_x/\text{СВ} \geq 65\%$ и $\text{СВ} \geq 50\%$ по сравнению с чистыми растворами $\delta T_d = \text{СВ}(100 - D_b) \{ (100 - D_b) / [(100 - 0,93\text{СВ}) (2320 - 20 D_b)] + 2,5 \cdot 10^{-6} p \}$. Например, для раствора с СВ = 85 % и $D_b = 80\%$ при $p = 100$ кПа получим $\delta T_d = 2,7$ К. Для этого раствора $\Delta T_d = \Delta T + \delta T_d = 13,8 + 2,7 = 16,5$ К и при $H = 0$ $t_p = 99,6 + 16,5 = 116,1^\circ\text{C}$.

В процессе выпаривания сахарных растворов параллельно с ростом СВ изменяются значения ΔT , p и p_r . Учет сложного характера этих изменений облегчают предлагаемые в данной статье номограммы и формулы.

Библиографический список

1. Демчук Г. С., Попов В. Д. Депрессия при варке рафинадного утфели // Тр. КТИПП. — 1952. — Вып. 12. — С. 87—100.
2. Попов В. Д. Тепловый розрахунок утфельних вакуум-апаратів. — К., 1968. — 328 с.
3. Принципы технологии сахара / Пер. с англ.; Под ред. П. Хонигл. — М.: Пищепромиздат, 1961. — 616 с.
4. Синат-Радченко Д. Е. Диаграмма состояния системы сахароза — вода // Сах. пром-сть. — 1984. — № 12. — С. 22—23.
5. Синат-Радченко Д. Е. Поверхностное натяжение сахарных растворов // Сах. пром-сть. — 1982. — № 3. — С. 28—31.
6. Соколовский А. Л. Физико-химические основы производства сахара // М.: Пищепромиздат, 1961. — 132 с.
7. Тужилкин В. И., Славянский А. А. Эбулиометрия чистых водных растворов сахарозы // Сах. пром-сть. — 1976. — № 3. — С. 4—11.

8. *Kadlec P., Bretshneider R., Dandar A.* Boiling point elevation of sugar solution.— *La sucrerie belge.*— 1978.— N 11.— P. 369—377.
9. *Meade G. P., Chen I. C. P.* Cane sugar handbook— New York: A Wiley Interscience Publication, 1977.— 947 p.
10. *Vavrinecz G.* Siedepunbserhöhung und Übersättigung von Zucker Lösungen.— *Zuckerindustrie,* 1973.— N 1.— S. 10—17.

Поступила в редколлегию 03.03.86.