

OPRACOWANIE TECHNOLOGII I APARATURY DO CIĄGŁEGO GOTOWANIA CUKRZYC

I. S. Gułyj, W. D. Popow, S. I. Sirenko

Kijowski Instytut Technologiczny Przemysłu Spożywczego

I. G. Bazał

Instytut Chemii Koloidów i Chemii Wody Akademii Nauk USRR
Kijów, ZSRR

We współczesnej technologii cukru główne jej procesy odbywają się w aparatach o działaniu ciągłym, z wyjątkiem procesu końcowego, najtrudniejszego, jakim jest przeprowadzenie sacharozy z fazy ciekłej w fazę stałą, tj. gotowania cukrzyc, które odbywa się w aparatach periodycznych.

Periodyczność gotowania cukrzyc jest dużą wadą i przeszkodą na drodze podnoszenia rentowności cukrowni i całkowitej automatyzacji fabryk. Dlatego konieczność przejścia na ciągły proces gotowania jest oczywista, a prace nad konstrukcją warnika ciągłego prowadzi się od początku XX wieku. Nad tym problemem pracuje się w wielu krajach produkujących cukier: (Polska, Czechosłowacja, Francja, RFN, Belgia, Anglia, USA, Japonia, Szwecja i inne) a w ZSRR liczne kolektywy badawcze: WNIISP, KTIPP, MTIP, IChKChW Akademii Nauk USRR, WNIKI-prodmasz, Smiełańskie Zakł. Przem. Masz., Lab. Centr. Cukrowni Gniwań i inne.

W Kijowskim Instytucie Technologicznym Przemysłu Spożywczego opracowano wielostronnie proces krystalizacji sacharozy, którego podstawy dali profesorowie I. A. Kucharenko, O. D. Kurylenko, W. I. Możar, A. A. Kirow, M. A. Kiczigin, M. A. Kondak. Ich pracę kontynuowali G. M. Znamienski, P. W. Gołowin, W. D. Popow, A. A. Gierasimienko i inni.

Wszechstronne i szczegółowe badania w zakresie wymiany ciepła i masy podczas gotowania cukrzyc, kinetyki, krystalizacji, hydrodynamiki i fizycznych własności roztworów cukrowych i cukrzyc prowadzi pro-

fesor Popow [15—17] i jego uczniowie [2, 4, 6, 7, 10, 14, 19—25]. Otrzymane wyniki pozwoliły na rozwiązanie wielu ważnych kwestii teoretycznych i praktycznych.

W szczególności na podstawie związków między przenoszeniem ciepła i przenoszeniem masy podczas gotowania cukrzyce [2] w wyniku analizy bilansów masowych gotowania [15, 17] został stwierdzony zasadniczo nowy fakt, bardzo ważny z punktu widzenia technologicznego. Chodzi o to, że od chwili powstania kryształów do końca waru łączna ilość sacharozy w syropie międzykryształowym jest niezmienna, kryształy rosną tylko kosztem doprowadzanego roztworu, z którego odparowuje się cała woda, cukier krystalizuje, a niecukry przechodzą do syropu międzykryształowego obniżając jego czystość (Cz_s).

Analiza procesu gotowania na podstawie równań wiążących wymianę ciepła i masy, praw mechaniki fizyczno-chemicznej i chemii koloidów wykazuje, że stadium wzrostu kryształów przebiega w warunkach izotermicznych i izohydrycznych, które kształtują się od chwili osiągnięcia w pierwszym dociągu roztworu określonego „krytycznego” stężenia ośrodków krystalizacji, w wyniku czego otrzymuje się układ drobnodispersyjny o nowych własnościach („młoda” cukrzyca). Podczas wrzenia cukrzyce warunki te wyrażają się następującym równaniem

$$\frac{dD(W_{odb})}{d\tau} = \frac{d(W_n)}{d\tau} \quad (1)$$

które opisuje warunki istnienia struktury koagulacyjnej i w pełni zgadza się z równaniem wiążącym wymianę ciepła i krystalizację.

Zgodnie z poglądem Rebindera [18] dla powstania struktury koagulacyjnej w układzie dyspersyjnym powinna spotkać się określona liczba cząstek, aby mogły utworzyć siatkę krystaliczną. Cukrzyca jest typowym układem dyspersyjnym krystalizującym, by powstała struktura koagulacyjna w „młodej” cukrzyce trzeba doprowadzić do niezbędnego określonego stężenia ośrodków krystalizacji. Przesłanki te zgadzają się z teoretycznymi założeniami mechaniki fizykochemicznej [18].

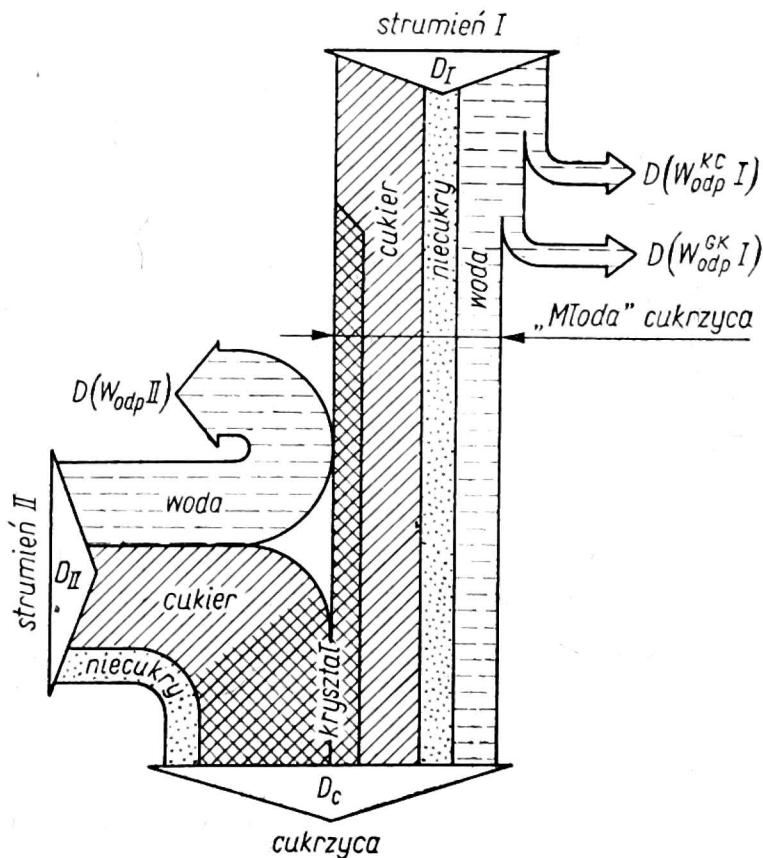
Wnioski te są potwierdzone badaniami prowadzonymi w skali przemysłowej Kucharenki [12] oraz danymi laboratoryjnymi Bazała [2] i Terentiewa [22].

Stwarza to możliwość nowego spojrzenia na technologię ciągłego gotowania cukrzyce, rozwiązania spornego problemu konieczności stadium zarabiania kryształów w procesie ciągłego gotowania i zaproponowania zasad rozwiązania aparaturowego. Z powyższej analizy wynika, że stadium zarabiania kryształów jest z zasady konieczne i służy do wytwarzania „młodej” cukrzyce — układu dyspersyjnego o własnościach koagula-

cyjnych, który zgodnie z prawami rządzącymi przenoszeniem ciepła i masy oraz rekrytalizacji zapewnia otrzymanie cukru monokrystalicznego. Założenia te mają duże znaczenie dla technologii ciągłego gotowania, ponieważ potwierdzają fakt, że rozdział syropu zasilającego w wężu na dwa strumienie jest nieodzowny z zasadniczych powodów.

Wychodząc z jednej natury procesów gotowania periodycznego i ciągłego, wywody powyższe zostały wykorzystane do opracowania nowego sposobu gotowania ciągłego, opartego na prawidłowościach strumieni mas i bilansu mas gotowania, związkach między przenoszeniem ciepła a krystalizacją, rekrytalizacją i własnościami równowagi układów dyspersyjnych.

Zasada metody polega na tym, że syrop cukrowy rozdziela się na dwa strumienie w proporcjonalnych ilościach, zgodnie z równaniami wiążącymi przenoszenie ciepła i masy. Pierwszy strumień, który nazwalimy inicjującym, jest używany tylko do wytworzenia „młodej” cukrzycy z krytyczną zawartością ośrodków krystalizacji, drugi (główny) — tylko do wzrostu kryształów przez odparowanie całej ilości D (W_{II}) zawartej w nim wody, przetworzenie sacharozy D ($CkII$) w fazę stałą i nagromadzenie w syropie międzykryształowym „młodej” cukrzycy wyznaczonej ilości D (Krc) kryształów.



Rys. 1. Wykres Sankeya bilansu mas wężu ciągłego, objaśniający sposób gotowania cukrzycy

D — ilość, W_{odp} — woda odparowana, KC — koncentrator, GK — generator kryształów, C — cukrzyca, MC — „młoda” cukrzyca

W wyniku rozwiązania równań wiążących przenoszenie ciepła i masy otrzymano równania opisujące stadium powstawania i wzrostu kryształów w procesie ciągłego gotowania cukrzycy.

W wyniku rozwiązania równań wiążących przenoszenie ciepła i masy otrzymano równania opisujące stadium powstawania i wzrostu kryształów w procesie ciągłego gotowania cukrzycy.

$$D_I = \frac{D(W_{odp II}) \cdot Bx_{II} \cdot Bx_{MC}(100 - Bx_C)}{Bx_I(100 - Bx_{II})(Bx_C - Bx_{MC})} \quad (2)$$

$$D_{II} = \frac{D(W_{odp II})}{100 - Bx_{II}} \cdot 100 \quad (3)$$

$$\frac{D_I}{D_{II}} = \frac{Bx_{II} \cdot Bx_{MC}(100 - Bx_C)}{Bx_I(Bx_C - Bx_{MC}) \cdot 100} \quad (4)$$

gdzie:

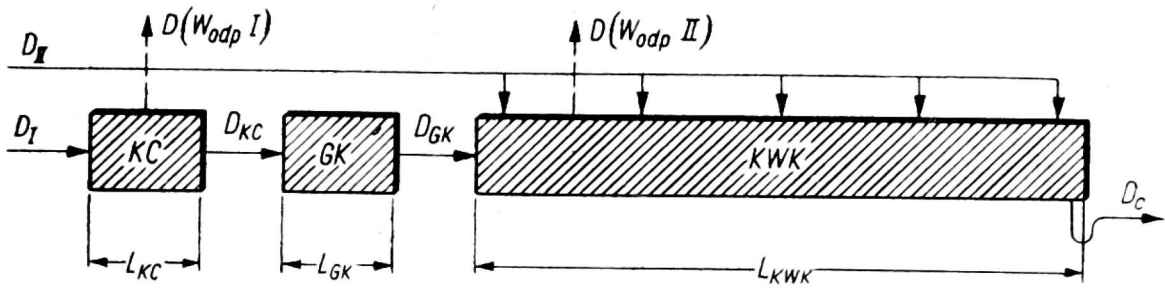
- D — ilość,
- I — strumień pierwszy,
- II — strumień drugi,
- W_{odp} — woda odparowana,
- MC — młoda cukrzyca,
- C — cukrzyca.

Bliższa analiza dowodzi, że badane dotychczas różne prototypy fabryczne werników ciągłych rozmaitych systemów [8] nie spełniają przedstawionych wyżej wymagań technologii gotowania ciągłego. Badania tych aparatów wykazały również, że we wszystkich wypadkach gotową cukrzycę otrzymuje się o strukturze koagulacyjno-kryształizacyjnej, co nie pozwala na uzyskanie metodą ciągłą cukru krystalicznego zadowalającej jakości.

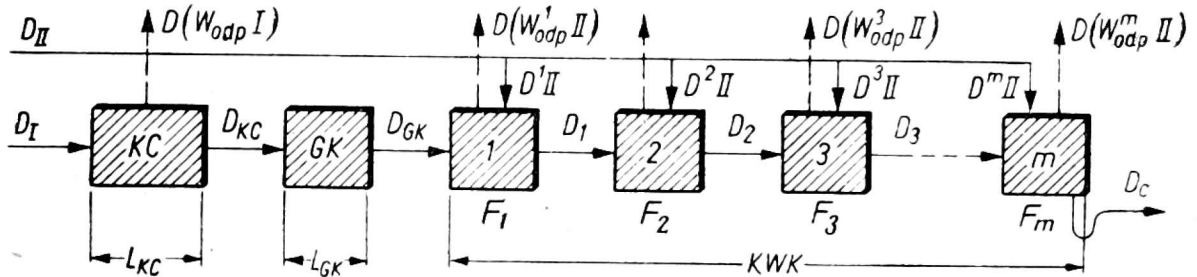
Z opracowanej technologii gotowania ciągłego wynika główna zasada, decydująca o podstawach konstrukcji werników ciągłych dowolnego systemu. Zasada polega na tym, że wernik ciągły powinien zawierać trzy następujące części: koncentrator (KC), generator kryształów (GK) i komorę wzrostu kryształów (KWK), zapewniające dokładne rozdzielanie w przestrzeni trzech przebiegających równocześnie głównych stadiów procesu: zagęszczenie, powstawanie kryształów i ich wzrost.

Mając na uwadze tę zasadę, opracowaliśmy 5 najbardziej charakterystycznych wariantów strukturalnych wernika ciągłego (rys. 2). Warianty I i II opierają się na zasadach reaktorów przepływowych, III, IV i V

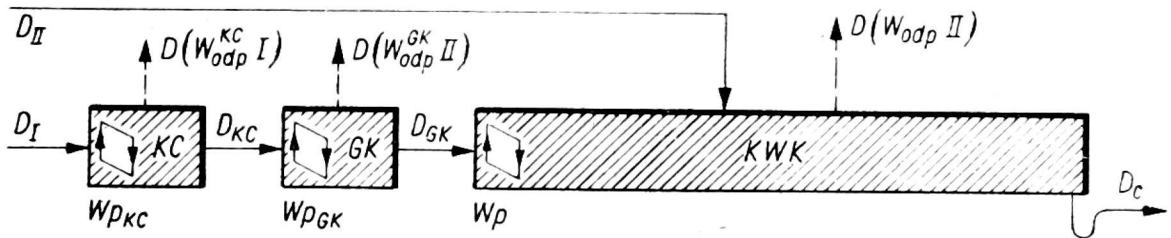
Wariant I



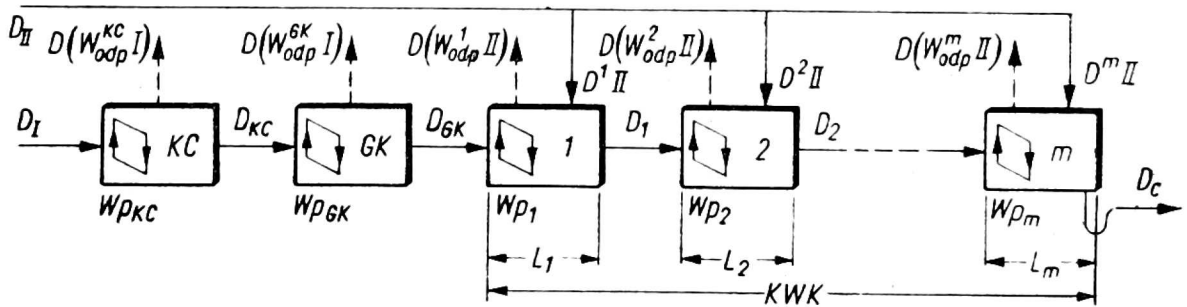
Wariant II



Wariant III



Warianty IV i V



Rys. 2. Schematy strukturalne warkna ciągłego

KWK — komora wzrostu kryształów (pozostałe oznaczenia jak na rys. 1)

na reaktorach z cyrkulacją. Według wariantu IV sekcje KWK mają jednakowe objętości reakcyjne. Charakterystyczną cechą schematu warkna ciągłego według wariantu V jest równość strumieni cieplnych w sekcjach, a nierówność objętości i powierzchni grzejnych odpowiednio do intensywności ruchu ciepła. Aparat jest zasilany roztworem w ilości zwiększającej się w miarę postępu strumienia cukrzycy.

Dla zebrania danych niezbędnych do opracowania metodyki obliczeń elementów składowych warkna ciągłego, a także w związku z dużym zakresem problemów dotyczących ciągłego gotowania, prowadziliśmy badania procesów powstawania i wzrostu kryształów w roztworach cukrowych o różnej czystości [9].

Badania procesu powstawania kryształów utrudnia fakt, że do dziś nie ma jednolitych poglądów na mechanizm powstawania ośrodków krystalizacji i jednolitej teorii tego procesu. Większość prac opiera się na równaniu Gibbsa-Thomsona, które słuszne jest dla warunków stacjonarnych. W znanych pracach prędkość powstawania ośrodków krystalizacji zazwyczaj wyraża się równaniem

$$I_o = K_I \exp\left(-\frac{\beta\sigma^3}{T^3 \ln^2 W_p}\right) \quad (5)$$

gdzie:

- β — wielkość charakteryzująca rodzaj substancji,
- σ — napięcie powierzchniowe na granicy zarodek/roztwór,
- T i W_p — temperatura i przesylenie roztworu,
- K_I — współczynnik.

Aby otrzymać wzór przydatny do obliczeń, wartość I_o aproksymowaliśmy wartością prawdopodobieństwa powstawania ośrodków krystalizacji o krytycznych rozmiarach (B), pozwoliło to, po podstawieniu równania (5), otrzymać równanie następującej postaci

$$B = \exp\left[\frac{\sigma}{T} \left(\sqrt[3]{\frac{\beta}{4}} - \frac{\beta\sigma^3}{T^3 \ln W_p}\right)\right] \quad (6)$$

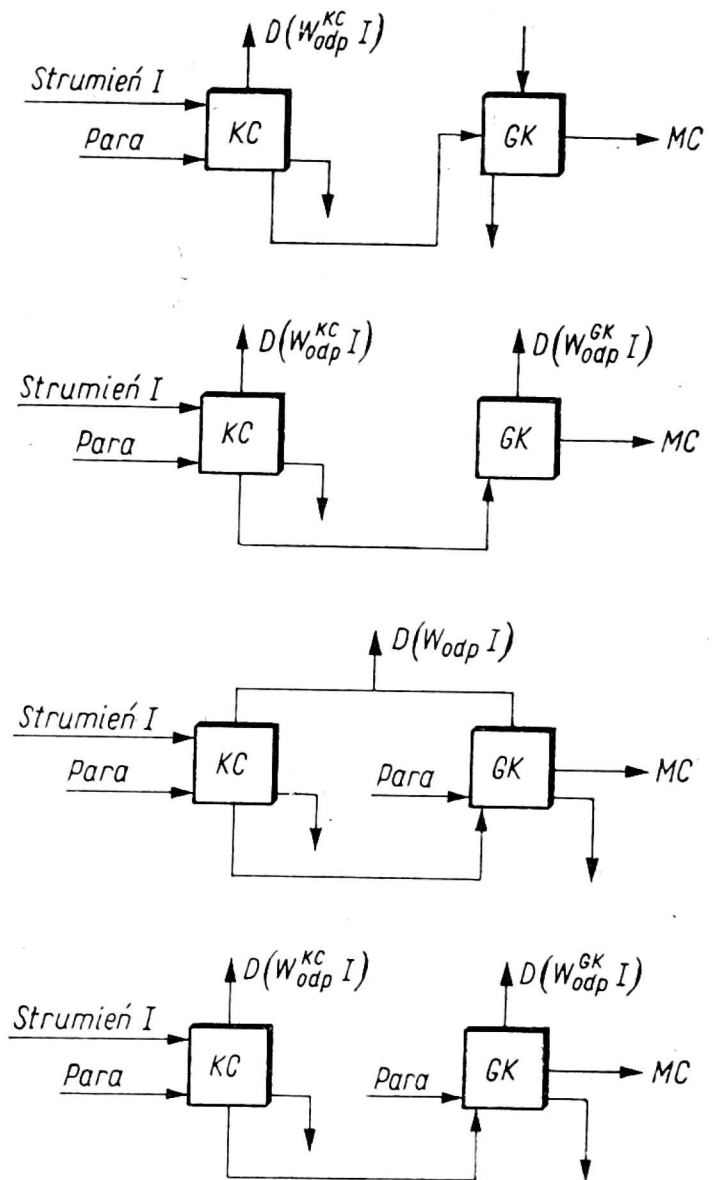
które wykorzystano do przeanalizowania i obliczeń generatora kryształów. Dla praktycznego zastosowania równania (6) wyznaczono doświadczalnie wartości liczbowe σ w zakresie zmian czystości, przesylenia i temperatury odpowiadających warunkom przemysłowego gotowania cukrzyc [9, 20]. Wyniki zestawiono w tab. 1.

Tabela 1

Napięcie powierzchniowe na granicy zarodków kryształów i roztworów,
wartości σ w 10^{-3} N/m

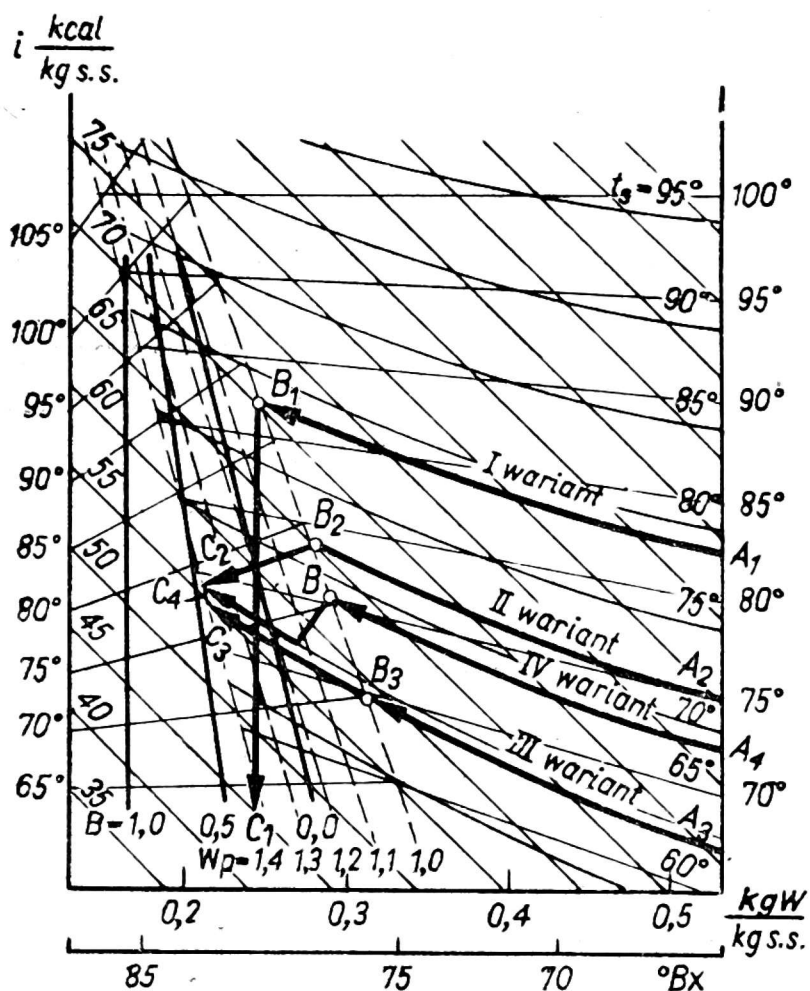
Sposób pomiaru	Czystość								
	100			90			80		
	temperatura °C								
	60	70	80	60	70	80	60	70	80
Z wartości ($\tau_{0,s}$) ⁻¹	1,95	1,56	1,23	2,41	1,40	0,76	2,96	2,36	1,91
Z wartości (τ_1) ⁻¹	1,87	1,63	1,31	2,39	1,59	0,74	2,43	1,80	1,41

Otrzymane wartości σ pozwoliły na wyznaczenie pracy powstawania zarodka sacharozy i jego krytycznego rozmiaru. Wartości σ pozwoliły z równania (6) obliczyć wartość B , a wykres stanu roztworów cukrowych i cukrzyc opracowany przez Popowa [15—17] uzupełnić liniami jednakowego prawdopodobieństwa powstawania zarodków o krytycznych wymiarach. Rozszerzyło to możliwości wykorzystania wykresu i pozwoliło na graficzne przedstawienie i przeanalizowanie procesów przebiegających w koncentratorze i generatorze kryształów. Na podstawie tych badań opracowano warianty schematów strukturalnych ciągłego generowania kryształów (rys. 3) i w oparciu o wykres dokonano teoretycznej analizy wariantów na rys. 4 [20].



Rys. 3. Schematy strukturalne ciągłej generacji kryształów (oznaczenia jak na rys. 1)

W wyniku analizy stwierdzono, że schemat według wariantu I okazał się niedogodny do aparaturowego opracowania generatora kryształów. Prostotą sterowania procesem wyróżnia się schemat według wariantu III. Schemat według wariantu II nadaje się do najłatwiejszego opracowania konstrukcyjnego. Schemat według wariantu IV ma zalety, gdy chodzi



Rys. 4. Przedstawienie procesów w koncentratorze i generatorze kryształów na wykresie Popowa

o wybór warunków pracy generatora kryształów, jego realizację, rozwiązanie konstrukcyjne i sposób sterowania.

Analiza literatury wykazała, że obecnie nie ma jednolitej teorii wzrostu kryształów ani jednolitego punktu widzenia na mechanizm tego procesu. W rzeczywistych roztworach przesyconych proces wzrostu kryształów jest na tyle złożony, że nie można go dostatecznie wyjaśnić z jednego punktu widzenia, chociaż niektóre aspekty tego procesu wyjaśnia jedna teoria, inne druga.

Bażał i Kurylenko [3] na podstawie badań przemian fazowych w układach dyspersyjnych doszli do wniosku, że proces wzrostu kryształów podczas gotowania cukrzycy przebiega w fazie rekrytalizacji według mechanizmu uwarunkowanego asymetrycznym wpływem rozmiarów kryształów na ich liniową szybkość wzrostu i rozpuszczania w strefach okresowych zmian temperatury i stężenia syropu międzykryształowego. Szybkość liniowego wzrostu kryształu jest więc ograniczona szybkością rekrytalizacji.

Z kolei szybkość rekrytalizacji jest funkcją częstości i amplitudy wahań temperatury i stężenia syropu międzykryształowego, które w warnikach zależą od częstotliwości cyrkulacji cukrzycy w częściach składowych warnika ciągłego. Okresowe wahania temperatury (i wskutek tego

również stężenia) syropu międzykryształowego podczas gotowania cukrzycy występują wskutek przegrzewania cukrzycy, przy powierzchni grzejnej, i ochładzania w wyniku samoodparowania rozpuszczalnika, gdy cukrzyca znajdzie się na granicy rozdziału cieczy i oparów, a także wskutek zmian podwyższenia temperatury wrzenia w górnych częściach gotującej się cukrzycy.

Istnienie ujawnionych skutków rekrystalizacji i okresowego działania pola temperaturowego nie budzi wątpliwości i pozwala jakościowo objaśnić niektóre aspekty złożonego procesu przemysłowej krystalizacji sacharozy. Dalszym zadaniem było uzyskanie kinetycznego równania rekrystalizacji, które by pozwoliło ocenić ilościowo i wydzielić to zjawisko w postaci czystej. Sumaryczny efekt działania różnych czynników, w ich liczbie rekrystalizacji, termodyfuzji i cyrkulacji został ujęty przez nas [15, 21, 23] kinetycznym równaniem krystalizacji

$$Kr = Kr_{\max} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\tau}{\Theta_k} \right)^n \right] \right\} \quad (7)$$

gdzie:

- Kr — masowa wydajność kryształów (0/0) w chwili τ od początku krystalizacji,
- Kr_{\max} — teoretyczna maksymalna wydajność kryształów w końcu procesu krystalizacji, do której asymptotycznie zbliża się wartość chwilowa Kr ,
- n i Θ — współczynniki kinetyczne równania, które mają znaczenie współczynnika kształtu krzywej kinetycznej (n) i stałej czasowej procesu (Θ_k); oba te współczynniki zależą od warunków przebiegu procesu i są wyrażone odpowiednimi funkcjami empirycznymi.

Następne zadanie polegało na opisanu parametrów charakteryzujących pracę dowolnej i -tej sekcji warkana ciągłego.

Opierając się na pracach Nagijewa [13] zastosowaliśmy teorię cyrkulacji do analizy procesu w komorze wzrostu kryształów. Zakładając jednorazowy przepływ cukrzycy przez powierzchnię grzejną komory wzrostu kryształów jako cykl, na podstawie tej teorii, bilansu materiałowego, powiązań między wymianą masy i ciepła oraz opracowanego sposobu gotowania opracowano schemat mechanizmu cyrkulacji. W wyniku analizy i przekształceń [9] otrzymano następujące równanie opisujące prawa rządzące nagromadzeniem produktu w i -tej sekcji warkana ciągłego

$$\begin{aligned} \frac{dD_n}{d\tau} = & D_{i-1} + DII^i + \Psi_i [D_{i-1} + DII^i] + \\ & + \Psi_i^2 [D_{i-1} + DII^i] + \dots + \Psi_i^{n-1} [D_{i-1} DII^i] \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie:

ψ_i — krotność cyrkulacji,
 DII^i i D_{i-1} — ilości doprowadzanego i odprowadzanego produktu w jednostce czasu.

Jeżeli w ciągu jednego cyklu z roztworu strumienia II w ilości DII odparowuje się $D(W_{\text{odp}}^i II)$ wody, to zgodnie z równaniami wymiany ciepła i masy [2] ilość krystalizującego cukru wyniesie

$$\Delta D(Kr^i) = \frac{Ck_{II}}{W_{II}} D(W_{\text{odp}}^i II) \quad (9)$$

ilość doprowadzanego roztworu

$$DII^i = D(W_{\text{odp}}^i II) \cdot (1 + Ck_{II}/W_{II}) \quad (10)$$

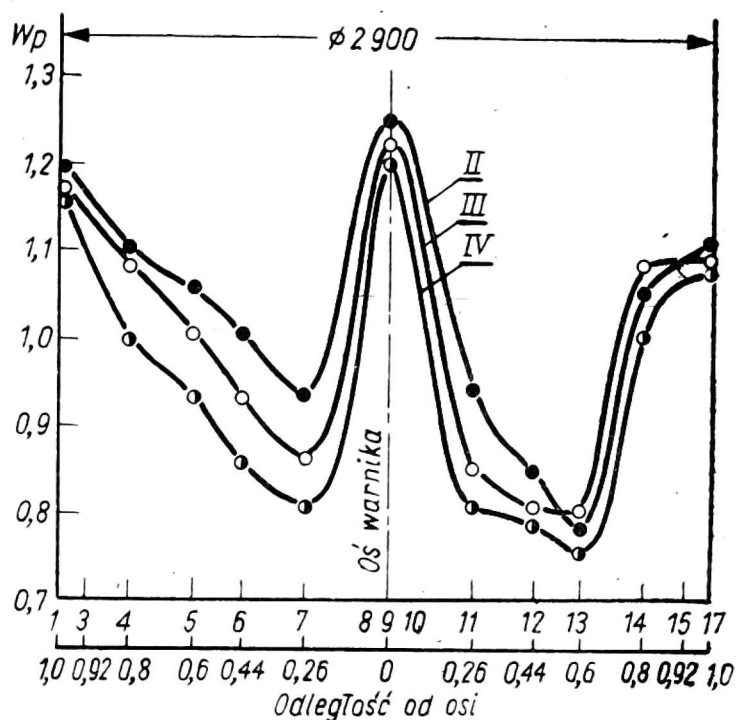
ilość suchej substancji

$$D(SS^i) = \frac{Ck_{II}}{W_{II}} D(W_{\text{odp}}^i II) \quad (11)$$

Analogicznie można opisać zmiany w ciągu jednego cyklu wszystkich wielkości technologicznych, bezwzględnych i względnych, charakteryzujących cukrzycę i syrop międkryształowy, które po liczbie n cykli cyrkulacji można wyrazić równaniem (7).

W ciągu jednego cyklu w i -tej sekcji oprócz wymienionych zmian zachodzi przegrzewanie masy cukrzycy w przestrzeni grzejnej i spadek jej temperatury w przestrzeni wrzenia i w rurze cyrkulacyjnej. Zgodnie z tym, czas jednego cyklu można przedstawić sumą $\tau_c = \tau_{\text{rozp}} + \tau_{kr}$ [9], na którą składa się okres podwyższenia (τ_{rozp}) oraz okres obniżenia i utrzymywania się na stałym poziomie temperatury cukrzycy (τ_{kr}).

Na podstawie danych Gariaży i Trojny [6, 24] wykazano, że wskutek wahań temperatury t_r zachodzi odpowiednia zmiana stężenia (Bx_s) i przesylenia (Wp) syropu międkryształowego cukrzycy (rys. 5). Analiza wykazała, że obserwowane zmiany t_r , Bx_s i Wp przebiegają w czasie τ_c i wskutek cyrkulacji powtarzają się z częstotliwością równą liczbie cykli cyrkulacji n .



Rys. 5. Krzywe współczynnika przesylenia na poprzecznym przekroju fabrycznego warkana II rzutu II, III i IV — okresy gotowania, II — od 0 do 18,6%, III — od 18,6 do 35%, IV — od 35 do 60% czasu gotowania waru

Wykorzystując dane z prac [6, 24] opierając się na dyfuzyjnej teorii krystalizacji, przyjmując szybkość wzrostu równą szybkości rozpuszczania się i zakładając w pierwszym przybliżeniu, że wymiar kryształu (l_{kr}) nie ma wpływu na obie te szybkości, na podstawie naszych równań [9] i wzoru Andrejewa [1] wyznaczyliśmy zmiany l_{kr} w ciągu cyklu cyrkulacji cukrzycy. Wyniki wykazują, że w procesie gotowania cukrzyc zachodzi nie tylko wzrost powstałych kryształów, jak to wynika z dotychczasowych teorii, ale również rozpuszczanie, i że obie wielkości są tego samego rzędu.

Do analizy tego procesu wprowadziliśmy pojęcie sprawności cyklu cyrkulacji cukrzycy w i -tej sekcji komory wzrostu kryształów.

$$\eta_{c,i} = \frac{\Delta D_{kr,i} - \Delta D_{r,i}}{\Delta D_{kr,i}} \quad (12)$$

gdzie:

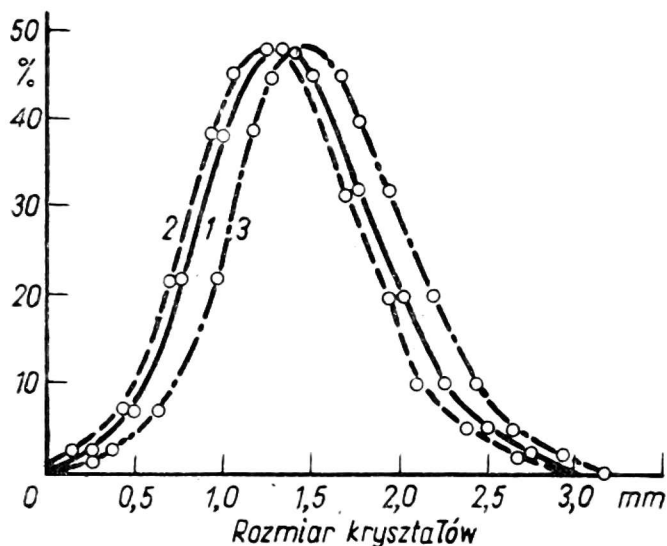
$\Delta D_{kr,i}$ oraz $\Delta D_{r,i}$ — ilości cukru krystalizującego i rozpuszczającego się w ciągu jednego cyklu. Sumaryczny efekt krystalizacji w ciągu jednego cyklu można wyrazić następującym równaniem:

$$\Delta D_{kr,i,sum} = Bx_{s3} [1 - \exp(-k_3 \tau_{kr})] - Bx_{s1} [1 + \exp(-k_1 \tau_{rozp})] \quad (13)$$

którego wartość przy zachowaniu stałych pozostałych warunków zależy od wartości τ_{kr} i τ_{rozp} oraz stosunku stałych z równania Arrheniusa [9].

$$\frac{K_1}{K_3} = \frac{Z_1}{Z_3} \left\{ \exp \left[-\frac{1}{RT} (E_1 - E_3) \right] \right\} \quad (14)$$

Po odkryciu wspomnianego uprzednio mechanizmu cyrkulacji w układach dyspersyjnych, określiliśmy zmiany rozmiarów kryształów w ciągu jednego cyklu cyrkulacji [3, 9]. Jak wynika z rys. 6 — w ciągu jednego



Rys. 6. Krzywa rozrzutu granulacji kryształów w ciągu jednego cyklu cyrkulacji
1 — stan początkowy, 2 — po etapie rozpuszczenia, 3 — po etapie wzrostu kryształów

cyklu cyrkulacji zachodzi jeden akt sumarycznego procesu przemiany, kiedy krzywa wypadkowa rozrzutu rozmiarów kryształów przesuwa się w stronę większych rozmiarów kryształów (krzywa 3).

Pozwoliło to na nowe ujęcie stadium wzrostu kryształów w procesie ciągłego gotowania cukrzyc oraz na wykazanie wpływu charakterystyki konstrukcyjnej aparatu, warunków cieplnych i hydrodynamicznych gotowania na wzrost kryształów. Potwierdzono też słuszność tezy o wzajemnym powiązaniu procesów cyrkulacji i rekrytalizacji, a na tej podstawie sformułowano wymagania stawiane konstrukcyjnemu rozwiązaniu komory wzrostu kryształów wurnika ciągłego. Przy takim postępowaniu proces gotowania cukrzyc, w którym ściśle splatają się procesy wymiany masy, procesy hydrodynamiczne i inne, jest rozpatrywany jako jedna całość.

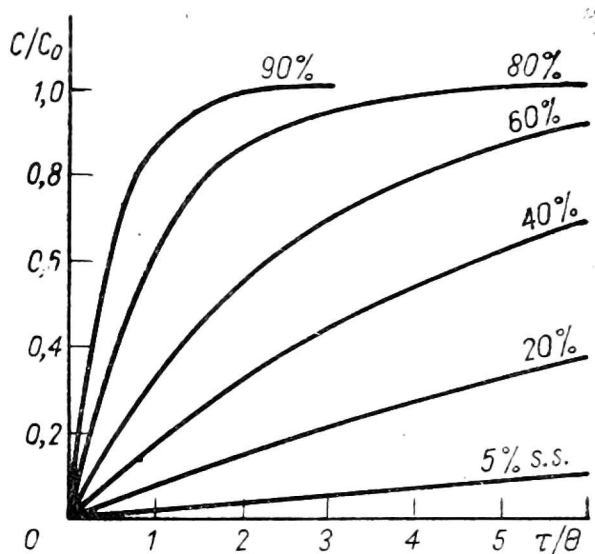
Na podstawie badań stwierdzono, że szybkość wzrostu kryształów — przy zachowaniu niezmiennych pozostałych warunków — jest proporcjonalna do ν_c częstotliwości cyrkulacji układu dyspersyjnego. Można to wyjaśnić tym, że $\nu_t = \nu_c$ a wartość ν_t jest proporcjonalna do intensywności rekrytalizacji. W ten sposób wykazano doświadczalnie, że na wzrost kryształów w warunkach wrzenia układu dyspersyjnego wywiera wpływ częstotliwość jego przepływu przez strefę nagrzewania. Wynik ten ma duże znaczenie, ponieważ stwierdza bezpośredni związek między częstotliwością cyrkulacji a intensywnością rekrytalizacji i wskazuje drogi intensyfikacji stadium wzrostu kryształów w wurnikach ciągłych dowolnego systemu.

Zależności ustalone przez nas [3, 9] pozwalają na teoretyczne objaśnienie wpływu obserwowanego w praktyce gotowania, jaki wywiera inten-

sywność cyrkulacji cukrzycy na szybkość wzrostu i skład granulometryczny kryształów; jasne jest teraz, dlaczego w konstrukcjach wurników dąży się do skracania rurek komór grzejnych, zwiększania przekroju rur cyrkulacyjnych i poszerzania przestrzeni górnej wurnika i wprowadza się różne elementy stymulujące cyrkulację itd.

Dalsza analiza wykazuje, że na skład granulometryczny kryształów, który można przedstawić funkcją rozrzutu ich rozmiarów $\varphi(kr)$, przy zachowaniu niezmiennych pozostałych warunków, decydujący wpływ wywiera charakter krzywej F w komorze wzrostu kryształów wurnika ciągłego, według której w przybliżeniu można oszacować funkcję $\varphi(kr)$.

Stwierdziliśmy, że na kształt krzywej F wpływa stężenie Bx_{II} roztworu strumienia II (rys. 7) i że dobór czasów przebywania w pierwszych



Rys. 7. Wpływ stężenia roztworu II strumienia na charakter krzywej „ F ”
 τ , Θ — rzeczywisty i średni czas przebywania

sekcjach komory wzrostu kryształów według wariantu V schematu strukturalnego jest znacznie lepszy niż według wariantu IV . Wynik ten ma duże znaczenie, ponieważ w pierwszych sekcjach prawdopodobieństwo zlepiania się kryształów jest zawsze większe niż w dalszych; istotny jest więc prawidłowy wybór wariantu konstrukcyjnego rozwiązania sposobu gotowania cukrzycy.

Komora wzrostu kryształów złożona z m sekcji powinna zapewnić pożądaną wartość efektu krystalizacji (przechodzenia sacharozy z roztworu w fazę stałą)

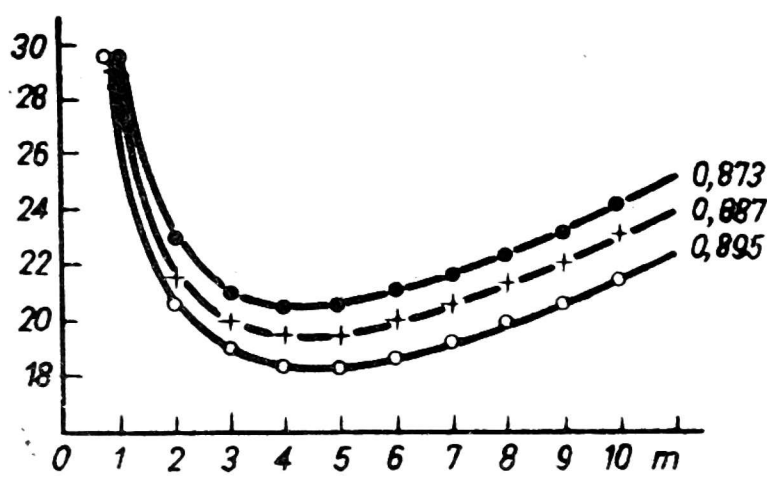
$$X_{sum} = \frac{Kr_m - Kr_{GK}}{Kr_m} \tag{15}$$

gdzie:

Kr_{GK} — masowa zawartość kryształów w generatorze kryształów,

Kr_m — w m -tej sekcji komory wzrostu kryształów.

Poglądy specjalistów na optymalną liczbę komór w wurniku ciągłym



Rys. 8. Koszt względny w zależności od liczby sekcji w komorze wzrostu kryształów warnika ciągłego; parametrem jest efekt krystalizacji X_{sum}

są niezgodne. Brak w literaturze danych do wyznaczenia tej wielkości. Na podstawie obliczeń techniczno-ekonomicznych stwierdziliśmy, że w komorze wzrostu kryształów warnika ciągłego II rzutu optymalna wartość $m = 4 \div 6$ (rys. 8).

Na podstawie badań wprowadziliśmy nowe zmienne [5, 9, 11]:

$$\eta_{sum} = \frac{Kr_{GK}}{Kr_m} = 1 - X_{sum}; \quad (16)$$

$$\eta_i = \frac{Kr_{i-1}}{Kr_i} = 1 - X_i$$

które pozwalają na ustalenie uzupełniającej zależności

$$\eta_{sum} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdots \eta_m = \prod_{i=1}^m \eta_i = \frac{Kr_{GK}}{Kr_m} \quad (17)$$

i posługiwanie się nią dla znalezienia optymalnego podziału objętości reakcyjnej w sekcjach komory wzrostu kryształów. Znając wartość m przeprowadziliśmy obliczenia komory wzrostu kryształów z optymalnym podziałem objętości sekcji. Sprowadzało się to do wyznaczenia zbioru η_i , rozpatrywanego jako funkcja η_1 , wyznaczonego metodą wykreślno-analityczną i spełniającego warunek

$$\prod_{i=1}^m \eta_i - \eta_{sum} = 0 \quad (18)$$

W wyniku analizy teoretycznej i badań eksperymentalnych [9, 10] sporządzono model procesu gotowania cukrzycy w i -tej sekcji warnika ciągłego, wyprowadzono analityczne zależności dla wyznaczenia związku między zmiennymi tego procesu i otrzymano równania umożliwiające

obliczenie funkcji przejścia dla poszczególnych wielkości wymuszających. Takie modelowanie wariantów schematów rozwiązania konstrukcyjnego procesu niestacjonarnego ciągłego gotowania cukrzycy pozwoliło opracować w kilku wariantach schematy automatycznej regulacji procesu ciągłego gotowania (patenty nr 179690, 213703, 234252, 309952).

Na podstawie nowo wykrytych i już znanych zależności opracowano metodykę obliczania części składowych wurnika ciągłego. W założeniach przyjęto wyniki teoretyczne i eksperymentalne wynikające z powiązań wymiany ciepła i masy, hydrodynamiki, cyrkulacji, rekrytalizacji, rozkładu czasu przebywania i stabilności cukrzycy.

Obliczenia koncentratora i generatora kryształów polegają na tym, że dla konkretnego wariantu wurnika ciągłego zestawia się schemat strukturalny koncentratora i generatora, a następnie ustala i konkretyzuje równania bilansów. Na podstawie równań bilansów i powiązań wymiany ciepła i masy oblicza się kolejno D_{GK} , D_{KC} , $D(W_{\text{odp}}^{GK})$, DI , wskaźniki technologiczne roztworu i „młodej” cukrzycy. W oparciu o wskaźniki technologiczne wyznacza się parametry technologiczne, współczynniki przenikania ciepła i niezbędne powierzchnie grzejne F_{KC} i F_{KG} według metodyki, wzorów i wykresów, podanych w pracy Popowa.

Rozwiązanie konstrukcyjne generatora kryształów opracowuje się biorąc pod uwagę $f(\tau)$ i pożądaną wartość F_{GK}/V_{GK} , które wyraziliśmy przez wielkości technologiczne i geometryczne, wartości τ_1 i lokalizację GK w wurniku ciągłym.

Obliczenia komory wzrostu kryształów prowadzono w zależności od wybranego wariantu schematu strukturalnego wurnika ciągłego, danych wyjściowych i wyników obliczeń koncentratora i generatora kryształów. Szczególną cechą metodyki jest rozpoczynanie od wyznaczenia wartości efektu krytalizacji X_{sum} i znalezienia optymalnej liczby sekcji m . Według zadanej funkcji $\varphi(kr)$ wybiera się w przybliżeniu krzywą odpowiedzi i ustala niezbędną wartość Bx_2 . Na podstawie równania (4) oblicza się DII a z równania (3) znajduje się $D(W_{\text{odp}}II)$.

Skład cukrzycy i syropu międzykryształowego w i -tej sekcji wyznacza się według równań otrzymanych z powiązań wymiany ciepła i masy, następnie znajduje się wartości $X_1, X_2 \dots X_i$ i porównuje się z zadaną wartością X_{sum} . Wyznacza się wartości η_{sum} i η_1 a z równań (17) i (18) znajduje się η_i w warunkach optymalnego doboru (podziału) objętości roboczych kolejnych sekcji komory wzrostu kryształów. Na podstawie η_i wyznacza się optymalne wartości X_i , porównuje je z danymi otrzymanymi z rachunku technologicznego i w razie potrzeby wprowadza poprawki.

Na podstawie otrzymanych danych wyznacza się współczynniki przenikania ciepła oraz powierzchnię grzejną F_i w każdej sekcji komory wzrostu kryształów metodą Popowa. Wyznaczywszy wartości F_i/V_i [2]

według otrzymanych przez nas równań dokonuje się powiązania konkretnych wymiarów geometrycznych z parametrami technologicznymi procesu. Po zakończeniu opracowania konstrukcyjnego koncentratora, generatora kryształów i komory wzrostu kryształów znajduje się wartości $\tau_{c,i}$ i Wp_i , wyznacza krzywą F i porównuje ją z przebiegiem wybranym na początku rachunku dla ewentualnego skorygowania wartości $\varphi(kr)$.

Na podstawie wyników obliczeń i zebranych danych opracowano *warianty konstrukcji warnika ciągłego* (patenty 194681, 234253, 258938) które zaprojektowano, wykonano i badano w Cukrowni Gniwań (USRR) w latach 1965—1968.

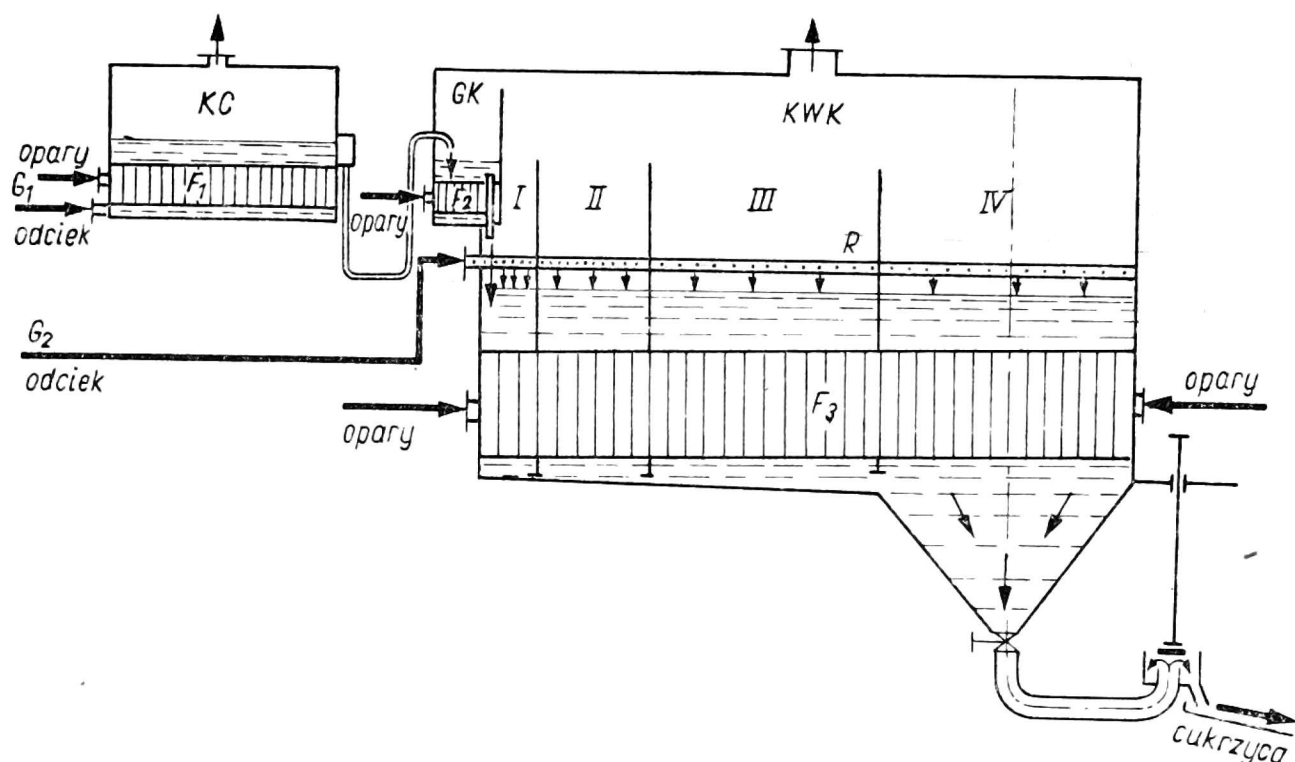
W wyniku badań modelu na skalę półtechniczną i prototypu przemysłowego warnika ciągłego stwierdzono: możliwość ciągłego otrzymywania cukrzycy, o pożądanej jakości, zgodnie z opracowanym sposobem gotowania, przydatność obliczeń elementów strukturalnych warnika ciągłego, praktyczną sprawność zaproponowanej konstrukcji i układu regulacji samoczynnej.

Na podstawie wyników badań opracowano konstrukcję i *schemat automatyzacji* przemysłowego prototypu warnika ciągłego systemu KITPS, który został przyjęty w 1969 r. przez państwową komisję Ministerstwa Przemysłu Spożywczego USRR do użytkowania w Cukrowni Gniwań do ciągłego gotowania cukrzycy II. Konstrukcja aparatu (patenty nr 234253, 259838) została przez nas opracowana wspólnie z Instytutem Chemii Koloidów i Chemii Wody Akademii Nauk USRR przy współpracy z Leningradzkimi Zakładami Admiralicji, Zakładami Przemysłu Maszynowego i Cukrownią Gniwań.

Konstrukcja koncentratora i generatora kryształów opiera się na schemacie wariant IV, konstrukcja komory wzrostu kryształów na wariancie V. Na podstawie badań teoretycznych i techniczno-ekonomicznych, modelowania wariantów rozwiązań konstrukcyjnych i funkcji przejścia, a także prób przemysłowych i danych dotyczących rozkładu sacharozy, przyjęto 4 sekcje komory wzrostu kryształów ($m = 4$).

Na rys. 9 przedstawiono rozwinięty schemat warnika ciągłego systemu KITPS. Charakterystykę techniczną aparatu podano w tab. 2.

Schemat automatyzacji warnika (rys. 10) powstał w wyniku badania dynamiki procesów gotowania ciągłego i opiera się na metodzie bilansowania przepływów (patent nr 133419 z 1960 r.) i opracowanych przez nas wariantach schematu automatyzacji elementów strukturalnych warnika ciągłego (patenty nr 179690, 213703 234252, 309952, 323411 z 1971 r.). Schemat wykorzystuje krajową aparaturę zebraną na tablicy sterowania umieszczonej przy warniku. Zawory regulujące mają zdalne sterowanie, co pozwala w razie potrzeby przejść na ręczne sterowanie poszczególnymi członami wykonawczymi.



Rys. 9. Rozwinięty schemat fabrycznego prototypu warnika ciągłego systemu KITPS
F — powierzchnie grzejne, *I—IV* — sekcje, *R* — rozdzielacz

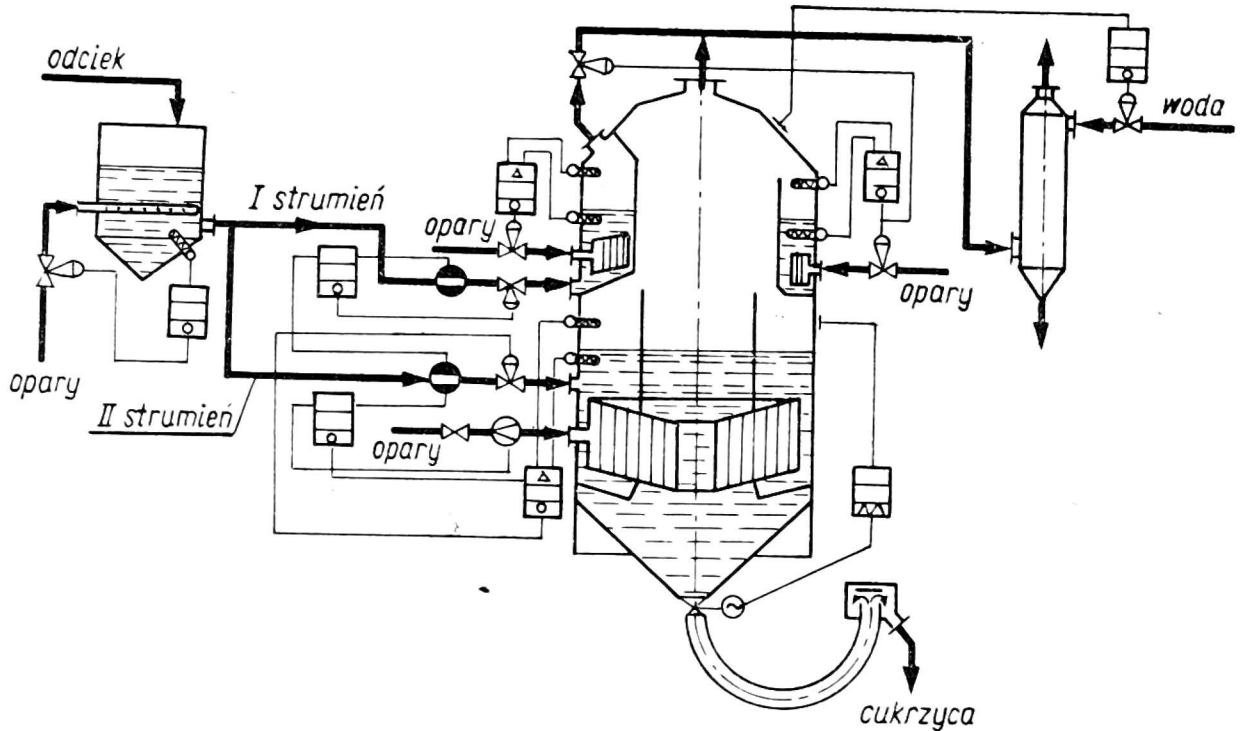
Tabela 2

Charakterystyka techniczna warnika ciągłego o średnicy 3,716 m i wysokości 9,06 m;
 zdolność przerobowa 2000—2500 ton buraków na dobę

	Koncentrator	Generator krysztalów	Komora wzrostu krysztalów
Pojemność, m ³	3,2	0,25	26,4
Powierzchnia grzejna, m ²	24,0	8,8	170
Rurki grzejne			
średnica, mm	102/94	33/30	102/94
długość, mm	400	500	110
Podciśnienie, mm Hg	400	600	600

Badania schematu automatycznej kontroli i regulacji wykazały niezawodność i przydatność w pracy wszystkich układów, a dzięki temu utrzymanie pożądanych warunków pracy warnika ciągłego i uzyskanie cukrzyicy pożądanej jakości (tab. 3).

Odchylenia wskaźników cukrzyicy od wartości zadanych mieszczą się w dopuszczalnych granicach i nie narastają w czasie. Funkcje $\varphi(kr)$ otrzymane metodą analizy sitowej z próbek gotowej cukrzyicy w ciągu 40—50 godzin od rozpoczęcia procesu gotowania ciągłego charakteryzują się przesuwaniem maksimum krzywych w prawo i następnie w stanie

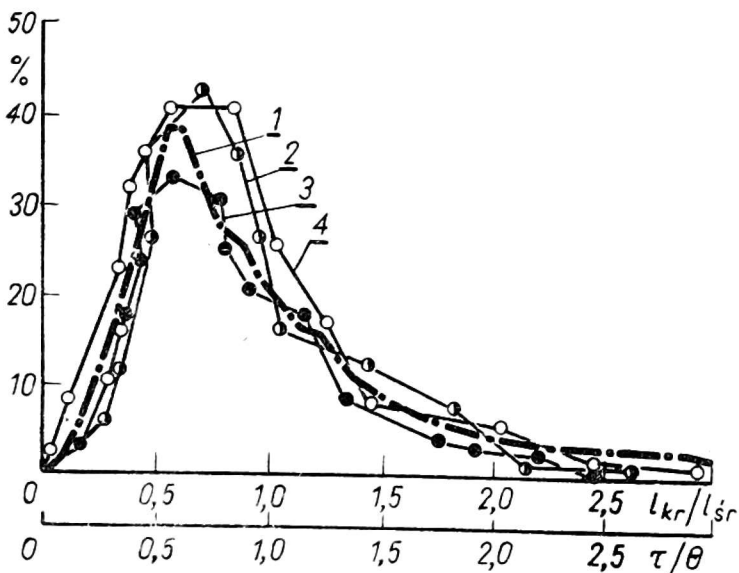


Rys. 10. Schemat automatycznej regulacji prototypu warkana ciągłego KITPS

Tabela 3

Dane analityczne warkana ciągłego

Miejsce pobrania próbek	Cukrzyca				Syrop międzykryształowy			Różnica czystości
	Bx	Ck	Cz	Kr	Bx	Ck	Cz	
Zbiornik	75,30	61,40	81,60	—	—	—	—	—
Koncentrator	80,39	65,51	81,49	—	—	—	—	—
Generator kryształów	85,86	69,72	81,48	14,40	83,21	64,64	77,69	3,79
Komora wzrostu kryształów	93,66	76,30	81,48	43,6	87,32	57,62	65,81	15,67



Rys. 11. Względny rozrzut granulacji kryształów w komorze wzrostu kryształów

1 — krzywa teoretyczna, 2 — początkowa, 3 — pośrednia, 4 — końcowa

ustalonym nie wykazują istotnych zmian. W tym czasie dla sprawdzenia założeń teoretycznych o możliwości prognozowania $\varphi(kr)$ według krzywych c , wykonano porównanie krzywej odpowiedzi komory wzrostu kryształów z granulometryczną funkcją rozdziału kryształów [9].

W wyniku opracowania danych doświadczalnych na temat wymiany ciepła otrzymano w przybliżeniu zgodność równań przenikania ciepła podczas gotowania cukrzycy metodami okresowymi i ciągłymi. Porównanie wskaźników technologicznych cukrzyc gotowanych w warniku periodycznym i ciągłym przedstawiono w tab. 4.

T a b e l a 4

Porównanie analiz produktów gotowanych metodą ciągłą i okresową

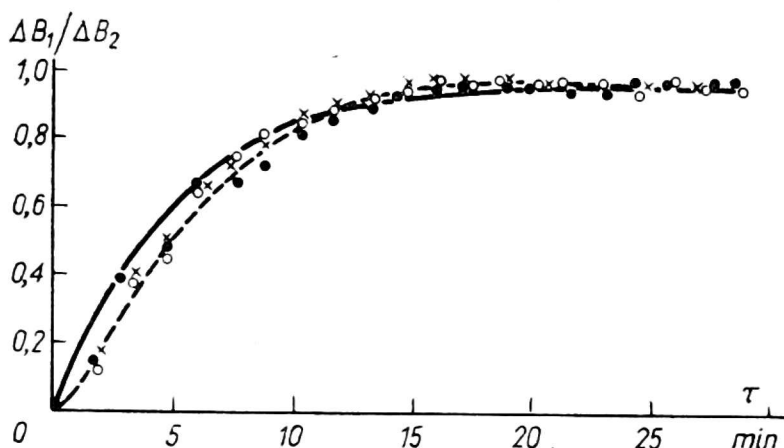
Metoda ciągła	cukrzyca	Bx	93,1	94,1	94,1	93,1
		Cz	81,9	82,6	82,6	81,6
	syrop międzykryształowy	Bx	86,3	88,6	88,7	88,6
		Cz	63,4	65,1	62,8	62,3
Metoda okresowa	cukrzyca	Bx	92,2	93,1	93,6	93,6
		Cz	82,4	81,1	81,2	81,0
	syrop międzykryształowy	Bx	87,2	87,7	87,6	87,0
		Cz	67,8	63,3	63,5	64,0
Zabarwienie w °St	odciek dociągany		59	60	78	82
	cukrzyca gotowana metodą ciągłą		149	149	160	154
	cukrzyca gotowana metodą okresową		137	159	140	146

W czasie kampanii 1970/71 w Cukrowni Gniwań warnik ciągły systemu KITPS do cukrzycy II oraz zwykle warniki cukrzycy III obsługiwał tylko jeden gotowacz. Warniki periodyczne ogrzewano oparami I, natomiast koncentrator, generator kryształów i komorę wzrostu kryształów warnika ciągłego ogrzewano oparami II (nadciśnienie 0,3—0,5 at). Przy gotowaniu cukrzycy II wyniki pracy aparatu były lepsze niż przy gotowaniu cukrzycy III.

W czasie gotowania cukrzycy II jeden aparat systemu KITPS ogrzewany oparami II osiągnął przepustowość odpowiadającą przerobowi buraków 2000—2300 t/d. Otrzymana cukrzyca dała efekt krystalizacji wyższy o 2—4 jednostki czystości, niejednorodność kryształów o 15—30% i średni rozmiar kryształów o 0,1—0,2 mm większe niż cukrzyca gotowana metodą periodyczną. Cukrzycę wirowano na gorąco w wirówkach półautomatycznych. Czas cyklu wirowania wynosił 5—7 minut, podczas gdy przy wirowaniu cukrzycy fabrycznej cykl trwał 10—15 minut. Pozostałe

wskaźniki cukrzyc gotowanych w sposób ciągły i periodyczny były jednakowe.

Zgodność przyjętego poprzednio modelu ze zbudowanym warnikiem sprawdzono modelowaniem na maszynie analogowej i porównano wyniki ze zdjętymi charakterystykami dynamicznymi prototypu doświadczalnego warnika ciągłego (rys. 12). Jak widać, osiągnięto zadowalającą zgodność



Rys. 12. Charakterystyka skokowa prototypu warnika ciągłego

danych teoretycznych i doświadczalnych, co pozwala sformułować wniosek, że opracowany model matematyczny dokładnie opisuje procesy fizyczne ciągłego gotowania cukrzyc.

LITERATURA

1. Андреев И. И.: Журнал физико-химического общества, Т. 40, 397, 1908
2. Бажал И. Г.: Исследование взаимосвязи теплообмена и кристаллизации в утфельных вакуум-аппаратах для уточнения их расчета. Автореферат кандидатской диссертации. КТИПП, Воронеж, 1961
3. Бажан И. Г.: Исследование механизма рекристаллизации в дисперсных системах. Автореферат докторской диссертации, ИКХХВ АН УССР, Киев, 1972
4. Белоконь И. А.: Исследование кинетики кристаллизации сахара в утфельных кристаллизаторах. Автореферат кандидатской диссертации. КТИПП, Киев, 1964
5. Бояринов А. И., Кафаров В. В.: Методы оптимизации в химической технологии. Изд. Химия, Москва, 1969
6. Горяжа В. Т.: Исследование теплообмена при варке утфелей второго продукта. Автореферат кандидатской диссертации, КТИПП, Киев, 1975
7. Гулый И. С.: Исследование теплообмена и кристаллизации в утфельных кристаллизаторах для разработки методики их расчета. Автореферат кандидатской диссертации. КТИПП, Воронеж, 1962
8. Гулый И. С., Бажан И. Г.: Вакуум-аппараты непрерывного действия для уверивания сахарных утфелей (обзор), ЦНИИТЭИпищепром, Москва, 1970
9. Гулый И. С.: Исследование процессов, разработка методов расчета и аппаратуры для непрерывного получения сахарных утфелей второго продукта. Автореферат докторской диссертации. КТИПП, Киев, 1972
10. Зубченко В. П.: Исследование динамики процессов в вакуум-аппарате не-

- прерывного действия. Автореферат кандидатской диссертации. КТИПП, Киев, 1971
11. Кафаров В. В.: Моделирование химических процессов. Изд. Знание, Москва, 1968
 12. Кухаренко И. А.: Кристаллизация сахарозы. Сельхозснабиздат, Киев, 1923
 13. Нагиев М. Ф.: Теоретические основы рециркуляционных процессов в химии. Изд. АН СССР, Москва, 1962
 14. Недужко Е. А.: Исследование влияния перемещивания на теплоотдачу при уваривании утфелей. Автореферат кандидатской диссертации. КТИПП, Киев, 1968
 15. Попов В. Д.: Исследование теплообмена в утфельных вакуум-аппаратах. Автореферат докторской диссертации. КТИПП и ЭНИИ АН СССР, Киев, 1952
 16. Попов В. Д.: Труды КТИПП, вып. 9—15, 1949—1955
 17. Попов В. Д.: Тепловой розрахунок утфельных вакуум-аппаратов, Киев, Держтехвидав, 1958
 18. Ребиндер П. А.: Физико-химическая механика, сер. IV, №№ 39, 40, Изд. Знание, Москва, 1958
 19. Сагань И. И.: Исследование теплообмена при кипении высококонцентрированных сахарных растворов. Автореферат кандидатской диссертации. КТИПП, Киев, 1959
 20. Сиренко С. И.: Исследование процесса кристаллообразования в сахарных растворах и разработка кристаллогенератора утфельного вакуум-аппарата непрерывного действия. Автореферат кандидатской диссертации. КТИПП, Киев, 1970
 21. Скришко И. С.: Исследование кинетики кристаллизации сахара и утфельных вакуум-аппаратах. Автореферат кандидатской диссертации. КТИПП, 1964, Киев
 22. Терентьев Ю. А.: Исследование основных теплофизических и структурно-механических свойств сахарных растворов и утфелей. Автореферат кандидатской диссертации. КТИПП, Киев, 1965
 23. Трегуб В. Г.: Исследование кинетики кристаллизации сахара в утфельных вакуум-аппаратах и кристаллизаторах. Автореферат кандидатской диссертации. КТИПП, Киев, 1969
 24. Тройно В. П.: Исследование теплообмена и циркуляции в процессе уваривания сахарных утфелей. Автореферат кандидатской диссертации. КТИПП, Киев, 1963
 25. Черный А. М.: Исследование теплофизических свойств сахарных растворов для уточнения расчетов пищевого оборудования. Автореферат кандидатской диссертации. КТИПП, Киев, 1960

И. С. Гулый, В. Д. Попов, С. И. Сиренко, И. Г. Бажал

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И АППАРАТУРЫ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ПОЛУЧЕНИЯ САХАРНЫХ УТФЕЛЕЙ

Резюме

Изучены основные закономерности процесса непрерывной варки и кристаллизации сахарных утфелей, получены зависимости и накоплены данные необходимые для расчета кристаллизационной аппаратуры. На основе материальных балансов, связи тепло- и массообмена, рекристаллизации и агрегативной устойчивости разработан новый способ непрерывной варки сахарных утфелей. Установлен основной принцип конструирования вакуум-аппаратов непрерывного действия и их автоматического управления.

Установлена взаимосвязь процессов рециркуляции и роста кристаллов, позволяющая объяснить влияние конструктивной характеристики аппарата, тепловых и гидродинамических условий варки на интенсивность роста кристаллов. Установлено влияние концентрации подкачиваемого раствора на характер кривой отклика аппарата и функцию фракционного распределения кристаллов по размерам. Разработана методика расчета структурных элементов аппарата.

На основании результатов исследования созданы конструкция и схема автоматизации промышленного образца вакуум-аппарата непрерывного действия системы КТИПП, принятого Комиссией в производственную эксплуатацию на Гниванском сахарном заводе для варки утфеля второго порядка.

I. S. Khuliy, V. D. Popov, S. I. Sirenko, I. G. Bazhal

WORKING OUT TECHNOLOGY AND APPARATUS FOR CONTINUOUS GAINING OF MASSECUTE

Summary

Fundamentals of continuous boiling and crystallization of massecutes were studied, at which respective relationships have been determined and data necessary for calculation of pans for crystallization accumulated. A new method of continuous boiling of massecuite has been developed on the basis of material balance, relation between heat and mass exchange, re-crystallization and aggregate stability.

The relationship between re-circulation and growth of crystals has been determined, what enables to explain the influence of constructive characteristics of a pan, thermal and hydrodynamical conditions of boiling on the growth intensification of crystals. The influence of pumped solution concentration on the character of the curve of the work of pan and the fractional crystal distribution according to their size has been determined. The method of calculation of structural elements of a pan has been developed.

On the basis of the investigation results the design and diagram of automation of the industrial continuous vacuum pan, of the Kiev Technological Food Industry Institute system, have been worked out; the Commission has given this vacuum pan over to production operation for intermediate boiling at the Khnivan sugar plant.