TENTAMEN I BIOREAKTIONSTEKNIK (KKR090)

Torsdag 20/12 2012 5 timmar

Claes Niklasson kommer att besöka tentamenslokalen.

Examinator: Claes Niklasson (3027 , 0731-574690)

Tentamen kommer att vara rättad före 7/1 2013

Granskning av tentamensrättning sker 29/1 - 12:30-13.15
i KRTs seminarierum

Tillåtna hjälpmedel: Chalmers typgodkänd räknedosa

Uppgift 1 (10 Poäng):

Vi odlar jäst i en kontinuerlig kemostatodling på glukos och med ammoniak som enda tillgängliga kvävekälla. Andel glukos som konsumeras per bildad mängd biomassa är uppmätt till 2.14 C-mol/C-mol och syreförbrukningen per bildad mängd biomassa är mätt till 0.73 mol/C-mol. Jästens elementarsammansättning är följande $CH_{1.73}O_{0.58}N_{0.13}$.

A: Är någon ytterligare produkt trolig i denna process (förutom koloxid och vatten)? Motivera!

B: Det visar sig att produktionen av koldioxid i processen blir 0.35 C-mol CO_2/C-mol konsumerat substrat. Utred vilket av följande ämnen som är det troligaste alternativet som den okända komponenten. Motivera!

Elementarsammansättningen för några tänkbara produkter:

Citronsyra	Oxalsyra	Metan	Ättiksyra	Etanol
$C_6H_8O_7$	$C_2H_2O_4$	CH_4	$C_2H_4O_2$	C_2H_6O

Uppgift 2 (10 Poäng)

För sporer av den mycket kända och fruktade organismen *bt-treum orginale* har man lyckats göra satsvisa avdödningsexperiment (se tabell). När experimenten kommit igång (konstant temperatur), tar man prover vid två olika tider och beräknar antalet sporer.

Tabell 1

	T = 400 K		**T = 370 K**
10 min	**$N=1.3 * 10^7$**	**13 min**	**$N=1.4 * 10^7$**
40 min	**$N=1.7 * 10^1$**	**39 min**	**$N=2.6 * 10^2$**

A. Bestäm aktiveringsenergin för avdödning av dessa sporer under givna betingelser

B. Beräkna DRT vid 370 K.

C. Beräkna uppehållstid i en ideal tankreaktor för att nå en minskning av organismer med en faktor $1*10^5$ vid temperaturen 400 K. Varför är (inte) tankreaktor ett bra alternativ för avdödning av organismer?

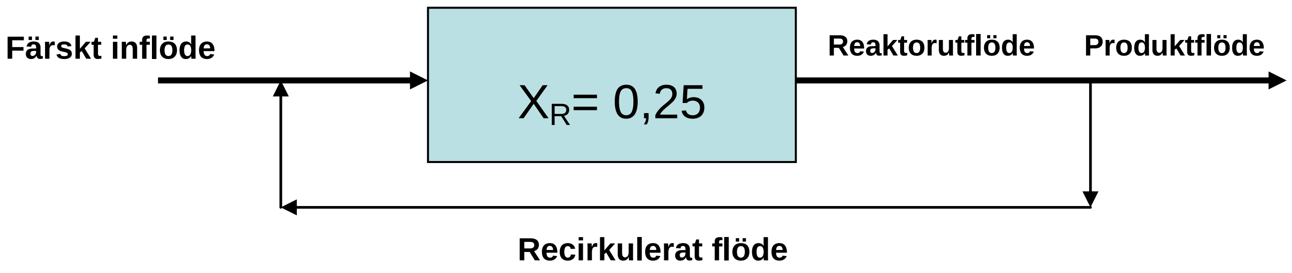
Uppgift 3 (10 poäng)

En gammal reaktor skall användas för att genomföra reaktionen A + 2B → C . I reaktorn reagerar 25 % av det A som går in i reaktorn. I nuläget genomför man denna reaktion helt utan recirkulation. Man funderar dock på att installera en separation av oreagerad A som skulle kunna recirkuleras för att ytterligare höja omsättningsgraden i processen. Färska inflödet består av 30 % A, 20 % inert I, och 50 % B. X_A = omsättningsgrad av A över reaktorn baserat på A i reaktorinflöde.

A: Beräkna sammansättningen i produktflöde då 50 % av oreagerad A (från reaktorutflödet) recirkuleras (recirkulationsflödet innehåller enbart A) och beräkna anläggningens omsättningsgrad för A.

B: Antag att vi vill uppnå en totalomsättning av 80 % map A. Hur mycket (%) måste recirkuleras av oreagerad A ut från reaktorn?

C: Hur mycket A kan maximalt recirkuleras (% av A i reaktorutflödet) (och att vi fortfarande har en reaktion)?



Uppgift 4: (8 poäng)

A: Skriv upp energibalansen för en adiabatisk tubreaktor och skissa på hur temperaturprofilen (i längdriktning) ser ut för en endoterm reaktion (endast denna reaktion) (5)

B: Vad menas med begreppen svarstid, precision och noggrannhet för en sensor inom bioteknik? (3)

Uppgift 5 (12 Poäng)

För en konsekutiv reaktion $A \rightarrow B \rightarrow C$
där båda reaktionerna är av första ordningen

$r_1 = k_1 * C_A$ och $r_2 = k_2 * C_B$

vill man uppnå en så hög koncentration av B som möjligt. I en första optimering försöker man utföra denna konsekutiva reaktion i en ideal tankreaktor med volymen 2 m^3.

Data för processen

$k_1 = 0{,}5\ min^{-1}$
$k_2 = 0{,}8\ min^{-1}$
$C_A^{IN} = 1{,}5\ kmol/m^3$

A: Vilket volymflöde bör man välja för att uppnå maximal koncentration av B?

B: Beräkna koncentrationer (A,B,C) ut från denna ”optimerade” ideala tankreaktor.

C: Hur skulle optimeringen av tiden för optimal koncentration av B bli i en satsreaktor? Det räcker med upprättande av korrekta material balanser och kort beskrivning av beräkningsgång (inga räkningar).

Uppgift 6 (10 Poäng)

En första ordningens reaktion körs i en (icke ideal) reaktor med återflöde (inom reaktorn). Tyvärr har man som ingenjör ingen uppfattning hur själva interna återflödet förändrar flödesbilden i reaktorn, och därmed omsättningsgrad, utan måste genomföra ett spårämnesförsök för att ta reda på detta. En uppehållstidsfördelningsmätning gav följande resultat för sluten mätsträcka.

tid/s	**40**	**80**	**120**	**160**	**200**	**240**	**280**	**320**	**360**
spårämneskonc./ (mmol m^{-3})	**3**	**10**	**140**	**230**	**180**	**90**	**45**	**22**	**2**

Vad blir omsättningsgraden för en 1a ordn. reaktion vars hastighetskonstant är $k = 0{,}003\ s^{-1}$ för följande modeller?

A: Tankseriemodellen

B: Segregerat flöde

C: Dispersionsmodellen

Formelsamling: Bioreaktionsteknik KKR090

Reaktionsomsättning

$n_j = n_j^{\circ} + \Sigma\, \nu_{ij}\, \xi_i$, i = 1,2, ……………R

$F_j = F_j^{\circ} + \Sigma\, \nu_{ij} R_i$ $\qquad R_i = \dfrac{d\,\xi_i}{dt}$

Omsättningsgrad

$F_j = F_j^{\circ}\,(1\text{-}x_j)$, $\qquad x_j > 0 \quad då\ \nu_j < 0$

Reaktionsentalpi

$\Delta H = \Sigma\ \nu_j\ h_j\ =\ \Sigma\ \nu_j\,(\Delta H_f^{\circ})_j$

Medelmolvärme

$< c_p > = \left[1/(T_2 - T_1)\right] \int_{T_1}^{T_2} c_p\ dT$

Reduceringsgrad $\qquad \gamma_i = 4 + a_i - 2b_i - (c_i/c_4)*(4d_4 + a_4 - 2b_4)$

Uppehållstidfördelning

$< t > = \int_0^1 t\,dF(t)$, $\qquad < t > = \int_0^{\infty} t\ E(t)\,dt$ $\qquad$ och $\quad \sigma_t^2 = \int_0^{\infty} (t - < t >)^2\ E(t)\ dt$

Pulsmetoden $\qquad E(t) = \dfrac{c_s}{\int_0^{\infty} c_s\,dt}$ $\qquad$ **Stegmetoden** $\qquad F(t) = \dfrac{c_s - c_{s0}}{c_{s1} - c_{s0}}$

Ideal tankreaktor

$E(t) = (1/\tau)\ \exp(-t/\tau)$

$F(t) = 1 - \exp(-t/\tau)$

Linjär process eller segregerat flöde

$< c_j > = \int_0^{\infty} c_j(t)\,E(t)\,dt$

Spårämnesförsök öppen mätsträcka

$<t>$ = $(L/\mathrm{v})\ [\ 1 + 2(D_{ea}/\ \mathrm{v}L)\ ]$ och $\quad \sigma_t^2 / <t>^2 = 2(D_{ea} / \mathrm{v}L) + 8(D_{ea} / \mathrm{v}L)^2$

Spårämnesförsök sluten mätsträcka

$<t>$ = L/v och $\quad \sigma_t^2 / <t>^2 = 2(D_{ea} / \mathrm{v}L) - 2(D_{ea} / \mathrm{v}L)^2\ [\ 1 - \exp(\ -\mathrm{v}L / D_{ea}\ )]$

Jämförelse av ideal och reell reaktor för första ordningens förlopp

Vid given omsättningsgrad:

$(V_{reell} / V_{ideal}) = 1 + k_1\,\tau_{reell}\ \dfrac{D_{ea}}{v\,L_{reell}}$ $\qquad$ (tom tub)

Vid lika reaktorvolym:

$(1 - x)_{reell} / (1 - x)_{ideal} = 1 + (k_1\,\tau)^2\ (D_{ea} / \mathrm{v}L)$ $\qquad$ (tom tub)

Tankseriemodellen $\qquad <t> = \tau$, $\qquad N = \tau^2 / \sigma_t^2$

INTEGRALS

ELEMENTARY FORMS

1. $\int a\,dx = ax$

2. $\int a \cdot f(x)\,dx = a\int f(x)\,dx$

3. $\int \phi(y)\,dx = \int \frac{\phi(y)}{y'}\,dy, \qquad \text{where } y' = \frac{dy}{dx}$

4. $\int (u + v)\,dx = \int u\,dx + \int v\,dx, \qquad$ where u and v are any functions of x

5. $\int u\,dv = u\int dv - \int v\,du = uv - \int v\,du$

6. $\int u\frac{dv}{dx}dx = uv - \int v\frac{du}{dx}dx$

7. $\int x^n\,dx = \frac{x^{n+1}}{n+1}, \qquad \text{except } n = -1$

8. $\int \frac{f'(x)\,dx}{f(x)} = \log f(x), \qquad (df(x) = f'(x)\,dx)$

9. $\int \frac{dx}{x} = \log x$

10. $\int \frac{f'(x)\,dx}{2\sqrt{f(x)}} = \sqrt{f(x)}, \qquad (df(x) = f'(x)\,dx)$

11. $\int e^x\,dx = e^x$

12. $\int e^{ax}\,dx = e^{ax}/a$

13. $\int b^{ax}\,dx = \frac{b^{ax}}{a\log b}, \qquad (b > 0)$

14. $\int \log x\,dx = x\log x - x$

15. $\int a^x \log a\,dx = a^x, \qquad (a > 0)$

16. $\int \frac{dx}{a^2 + x^2} = \frac{1}{a}\tan^{-1}\frac{x}{a}$

INTEGRALS (Continued)

17. $\int \frac{dx}{a^2 - x^2} = \begin{cases} \frac{1}{a}\tanh^{-1}\frac{x}{a} \\ \text{or} \\ \frac{1}{2a}\log\frac{a+x}{a-x}, \qquad (a^2 > x^2) \end{cases}$

18. $\int \frac{dx}{x^2 - a^2} = \begin{cases} -\frac{1}{a}\coth^{-1}\frac{x}{a} \\ \text{or} \\ \frac{1}{2a}\log\frac{x-a}{x+a}, \qquad (x^2 > a^2) \end{cases}$

19. $\int \frac{dx}{\sqrt{a^2 - x^2}} = \begin{cases} \sin^{-1}\frac{x}{|a|} \\ \text{or} \\ -\cos^{-1}\frac{x}{|a|}, \qquad (a^2 > x^2) \end{cases}$

20. $\int \frac{dx}{\sqrt{x^2 \pm a^2}} = \log(x + \sqrt{x^2 \pm a^2})$

21. $\int \frac{dx}{x\sqrt{x^2 - a^2}} = \frac{1}{|a|}\sec^{-1}\frac{x}{a}$

22. $\int \frac{dx}{x\sqrt{a^2 \pm x^2}} = -\frac{1}{a}\log\left(\frac{a + \sqrt{a^2 \pm x^2}}{x}\right)$

FORMS CONTAINING $(a + bx)$

For forms containing $a + bx$, but not listed in the table, the substitution $u = \frac{a + bx}{x}$ may prove helpful.

23. $\int (a + bx)^n\,dx = \frac{(a + bx)^{n+1}}{(n+1)b}, \qquad (n \neq -1)$

24. $\int x(a + bx)^n\,dx$

$$= \frac{1}{b^2(n+2)}(a + bx)^{n+2} - \frac{a}{b^2(n+1)}(a + bx)^{n+1}, \qquad (n \neq -1, -2)$$

25. $\int x^2(a + bx)^n\,dx = \frac{1}{b^3}\left[\frac{(a + bx)^{n+3}}{n+3} - 2a\frac{(a + bx)^{n+2}}{n+2} + a^2\frac{(a + bx)^{n+1}}{n+1}\right]$

26. $$\int x^m(a+bx)^n\,dx = \begin{cases} \dfrac{x^{m+1}(a+bx)^n}{m+n+1} + \dfrac{an}{m+n+1}\displaystyle\int x^m(a+bx)^{n-1}\,dx \\ \text{or} \\ \dfrac{1}{a(n+1)}\left[-x^{m+1}(a+bx)^{n+1} + (m+n+2)\displaystyle\int x^m(a+bx)^{n+1}\,dx\right] \\ \text{or} \\ \dfrac{1}{b(m+n+1)}\left[x^m(a+bx)^{n+1} - ma\displaystyle\int x^{m-1}(a+bx)^n\,dx\right] \end{cases}$$

27. $$\int \frac{dx}{a+bx} = \frac{1}{b}\log(a+bx)$$

28. $$\int \frac{dx}{(a+bx)^2} = -\frac{1}{b(a+bx)}$$

29. $$\int \frac{dx}{(a+bx)^3} = -\frac{1}{2b(a+bx)^2}$$

30. $$\int \frac{x\,dx}{a+bx} = \begin{cases} \dfrac{1}{b^2}[a+bx-a\log(a+bx)] \\ \text{or} \\ \dfrac{x}{b} - \dfrac{a}{b^2}\log(a+bx) \end{cases}$$

31. $$\int \frac{x\,dx}{(a+bx)^2} = \frac{1}{b^2}\left[\log(a+bx) + \frac{a}{a+bx}\right]$$

32. $$\int \frac{x\,dx}{(a+bx)^n} = \frac{1}{b^2}\left[\frac{-1}{(n-2)(a+bx)^{n-2}} + \frac{a}{(n-1)(a+bx)^{n-1}}\right], \quad n \neq 1, 2$$

33. $$\int \frac{x^2\,dx}{a+bx} = \frac{1}{b^3}\left[\frac{1}{2}(a+bx)^2 - 2a(a+bx) + a^2\log(a+bx)\right]$$

34. $$\int \frac{x^2\,dx}{(a+bx)^2} = \frac{1}{b^3}\left[a+bx-2a\log(a+bx) - \frac{a^2}{a+bx}\right]$$

35. $$\int \frac{x^2\,dx}{(a+bx)^3} = \frac{1}{b^3}\left[\log(a+bx) + \frac{2a}{a+bx} - \frac{a^2}{2(a+bx)^2}\right]$$

36. $$\int \frac{x^2\,dx}{(a+bx)^n} = \frac{1}{b^3}\left[\frac{-1}{(n-3)(a+bx)^{n-3}} + \frac{2a}{(n-2)(a+bx)^{n-2}} - \frac{a^2}{(n-1)(a+bx)^{n-1}}\right], \quad n \neq 1, 2, 3$$

37. $$\int \frac{dx}{x(a+bx)} = -\frac{1}{a}\log\frac{a+bx}{x}$$

38. $$\int \frac{dx}{x(a+bx)^2} = \frac{1}{a(a+bx)} - \frac{1}{a^2}\log\frac{a+bx}{x}$$

39. $$\int \frac{dx}{x(a+bx)^3} = \frac{1}{a^3}\left[\frac{1}{2}\left(\frac{2a+bx}{a+bx}\right)^2 + \log\frac{x}{a+bx}\right]$$

40. $$\int \frac{dx}{x^2(a+bx)} = -\frac{1}{ax} + \frac{b}{a^2}\log\frac{a+bx}{x}$$

41. $$\int \frac{dx}{x^3(a+bx)} = \frac{2bx-a}{2a^2x^2} + \frac{b^2}{a^3}\log\frac{x}{a+bx}$$

42. $$\int \frac{dx}{x^2(a+bx)^2} = -\frac{a+2bx}{a^2x(a+bx)} + \frac{2b}{a^3}\log\frac{a+bx}{x}$$

FORMS CONTAINING $c^2 \pm x^2$, $x^2 - c^2$

43. $$\int \frac{dx}{c^2+x^2} = \frac{1}{c}\tan^{-1}\frac{x}{c}$$

44. $$\int \frac{dx}{c^2-x^2} = \frac{1}{2c}\log\frac{c+x}{c-x}, \qquad (c^2 > x^2)$$

45. $$\int \frac{dx}{x^2-c^2} = \frac{1}{2c}\log\frac{x-c}{x+c}, \qquad (x^2 > c^2)$$

46. $$\int \frac{x\,dx}{c^2 \pm x^2} = \pm\frac{1}{2}\log(c^2 \pm x^2)$$

47. $$\int \frac{x\,dx}{(c^2 \pm x^2)^{n+1}} = \mp\frac{1}{2n(c^2 \pm x^2)^n}$$

48. $$\int \frac{dx}{(c^2 \pm x^2)^n} = \frac{1}{2c^2(n-1)}\left[\frac{x}{(c^2 \pm x^2)^{n-1}} + (2n-3)\int \frac{dx}{(c^2 \pm x^2)^{n-1}}\right]$$

49. $$\int \frac{dx}{(x^2 - c^2)^n} = \frac{1}{2c^2(n-1)}\left[-\frac{x}{(x^2 - c^2)^{n-1}} - (2n-3)\int \frac{dx}{(x^2 - c^2)^{n-1}}\right]$$

50. $$\int \frac{x\,dx}{x^2-c^2} = \frac{1}{2}\log(x^2-c^2)$$

51. $$\int \frac{x\,dx}{(x^2-c^2)^{n+1}} = -\frac{1}{2n(x^2-c^2)^n}$$

INTEGRALS (Continued)

FORMS CONTAINING $a + bx$ and $c + dx$

$$u = a + bx, \qquad v = c + dx, \qquad k = ad - bc$$

If $k = 0$, then $v = \frac{c}{a}u$

52. $$\int \frac{dx}{u \cdot v} = \frac{1}{k} \cdot \log\left(\frac{v}{u}\right)$$

53. $$\int \frac{x\,dx}{u \cdot v} = \frac{1}{k}\left[\frac{a}{b}\log(u) - \frac{c}{d}\log(v)\right]$$

54. $$\int \frac{dx}{u^2 \cdot v} = \frac{1}{k}\left(\frac{1}{u} + \frac{d}{k}\log\frac{v}{u}\right)$$

55. $$\int \frac{x\,dx}{u^2 \cdot v} = \frac{-a}{bku} - \frac{c}{k^2}\log\frac{v}{u}$$

56. $$\int \frac{x^2\,dx}{u^2 \cdot v} = \frac{a^2}{b^2ku} + \frac{1}{k^2}\left[\frac{c^2}{d}\log(v) + \frac{a(k - bc)}{b^2}\log(u)\right]$$

57. $$\int \frac{dx}{u^n \cdot v^m} = \frac{1}{k(m-1)}\left[\frac{-1}{u^{n-1} \cdot v^{m-1}} - (m + n - 2)b\int\frac{dx}{u^n \cdot v^{m-1}}\right]$$

58. $$\int \frac{u}{v}\,dx = \frac{bx}{d} + \frac{k}{d^2}\log(v)$$

59. $$\int \frac{u^m\,dx}{v^n} = \begin{cases} \dfrac{-1}{k(n-1)}\left[\dfrac{u^{m+1}}{v^{n-1}} + b(n - m - 2)\displaystyle\int\frac{u^m}{v^{n-1}}\,dx\right] \\ \text{or} \\ \dfrac{-1}{d(n-m-1)}\left[\dfrac{u^m}{v^{n-1}} + mk\displaystyle\int\frac{u^{m-1}}{v^n}\,dx\right] \\ \text{or} \\ \dfrac{-1}{d(n-1)}\left[\dfrac{u^m}{v^{n-1}} - mb\displaystyle\int\frac{u^{m-1}}{v^{n-1}}\,dx\right] \end{cases}$$

FORMS CONTAINING $(a + bx^n)$

60. $$\int \frac{dx}{a + bx^2} = \frac{1}{\sqrt{ab}}\tan^{-1}\frac{x\sqrt{ab}}{a}, \qquad (ab > 0)$$

61. $$\int \frac{dx}{a + bx^2} = \begin{cases} \dfrac{1}{2\sqrt{-ab}}\log\dfrac{a + x\sqrt{-ab}}{a - x\sqrt{-ab}}, & (ab < 0) \\ \text{or} \\ \dfrac{1}{\sqrt{-ab}}\tanh^{-1}\dfrac{x\sqrt{-ab}}{a}, & (ab < 0) \end{cases}$$

INTEGRALS (Continued)

62. $$\int \frac{dx}{a^2 + b^2x^2} = \frac{1}{ab}\tan^{-1}\frac{bx}{a}$$

63. $$\int \frac{x\,dx}{a + bx^2} = \frac{1}{2b}\log(a + bx^2)$$

64. $$\int \frac{x^2\,dx}{a + bx^2} = \frac{x}{b} - \frac{a}{b}\int\frac{dx}{a + bx^2}$$

65. $$\int \frac{dx}{(a + bx^2)^2} = \frac{x}{2a(a + bx^2)} + \frac{1}{2a}\int\frac{dx}{a + bx^2}$$

66. $$\int \frac{dx}{a^2 - b^2x^2} = \frac{1}{2ab}\log\frac{a + bx}{a - bx}$$

67. $$\int \frac{dx}{(a + bx^2)^{m+1}} = \begin{cases} \dfrac{1}{2ma}\dfrac{x}{(a + bx^2)^m} + \dfrac{2m - 1}{2ma}\displaystyle\int\frac{dx}{(a + bx^2)^m} \\ \text{or} \\ \dfrac{(2m)!}{(m!)^2}\left[\dfrac{x}{2a}\displaystyle\sum_{r=1}^{m}\dfrac{r!(r-1)!}{(4a)^{m-r}(2r)!(a + bx^2)^r} + \dfrac{1}{(4a)^m}\displaystyle\int\frac{dx}{a + bx^2}\right] \end{cases}$$

68. $$\int \frac{x\,dx}{(a + bx^2)^{m+1}} = -\frac{1}{2bm(a + bx^2)^m}$$

69. $$\int \frac{x^2\,dx}{(a + bx^2)^{m+1}} = \frac{-x}{2mb(a + bx^2)^m} + \frac{1}{2mb}\int\frac{dx}{(a + bx^2)^m}$$

70. $$\int \frac{dx}{x(a + bx^2)} = \frac{1}{2a}\log\frac{x^2}{a + bx^2}$$

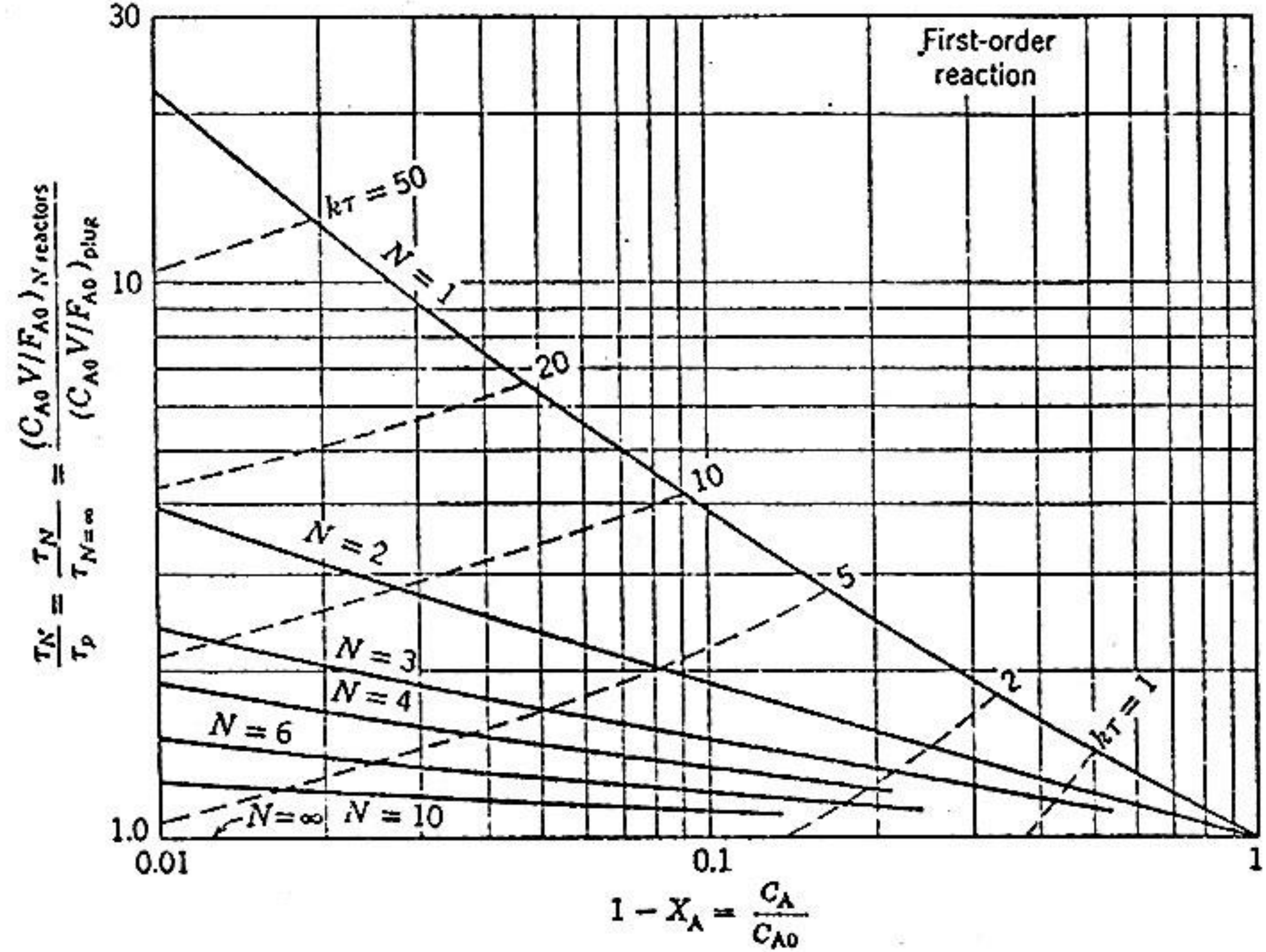
71. $$\int \frac{dx}{x^2(a + bx^2)} = -\frac{1}{ax} - \frac{b}{a}\int\frac{dx}{a + bx^2}$$

72. $$\int \frac{dx}{x(a + bx^2)^{m+1}} = \begin{cases} \dfrac{1}{2am(a + bx^2)^m} + \dfrac{1}{a}\displaystyle\int\frac{dx}{x(a + bx^2)^m} \\ \text{or} \\ \dfrac{1}{2a^{m+1}}\left[\displaystyle\sum_{r=1}^{m}\dfrac{a^r}{r(a + bx^2)^r} + \log\dfrac{x^2}{a + bx^2}\right] \end{cases}$$

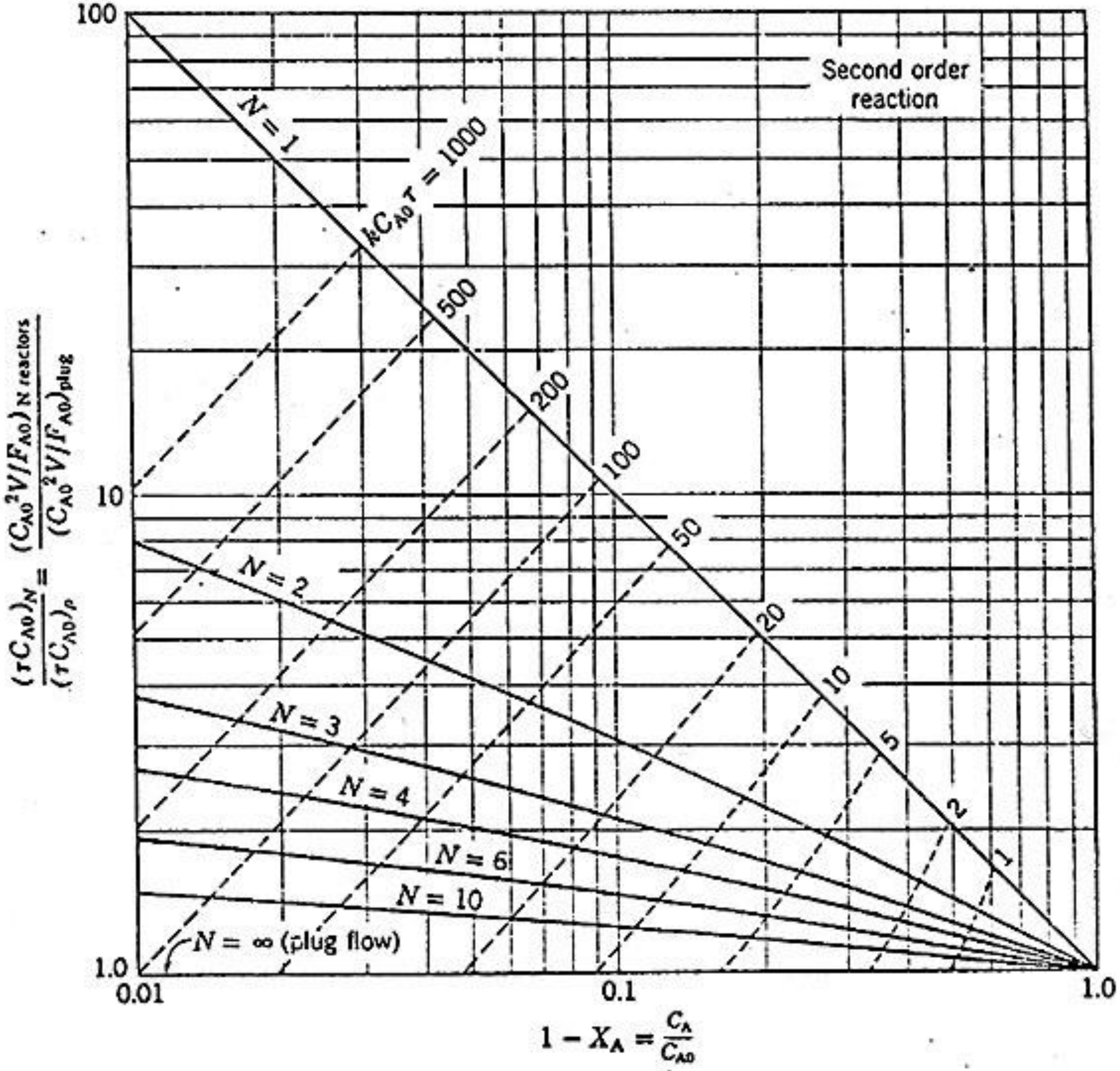
73. $$\int \frac{dx}{x^2(a + bx^2)^{m+1}} = \frac{1}{a}\int\frac{dx}{x^2(a + bx^2)^m} - \frac{b}{a}\int\frac{dx}{(a + bx^2)^{m+1}}$$

74. $$\int \frac{dx}{a + bx^3} = \frac{k}{3a}\left[\frac{1}{2}\log\frac{(k + x)^3}{a + bx^3} + \sqrt{3}\tan^{-1}\frac{2x - k}{k\sqrt{3}}\right], \qquad \left(k = \sqrt[3]{\frac{a}{b}}\right)$$

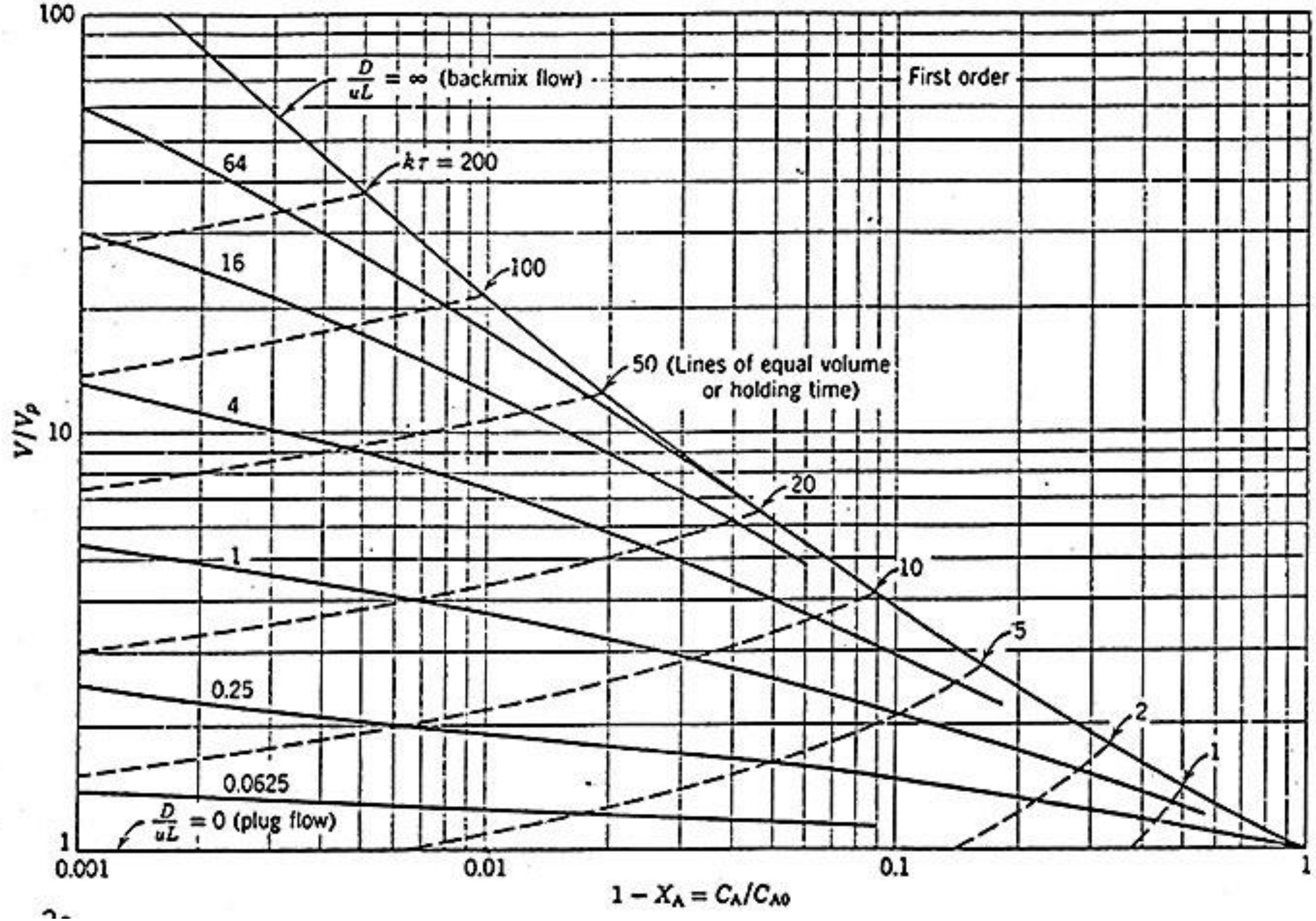
75. $$\int \frac{x\,dx}{a + bx^3} = \frac{1}{3bk}\left[\frac{1}{2}\log\frac{a + bx^3}{(k + x)^3} + \sqrt{3}\tan^{-1}\frac{2x - k}{k\sqrt{3}}\right], \qquad \left(k = \sqrt[3]{\frac{a}{b}}\right)$$



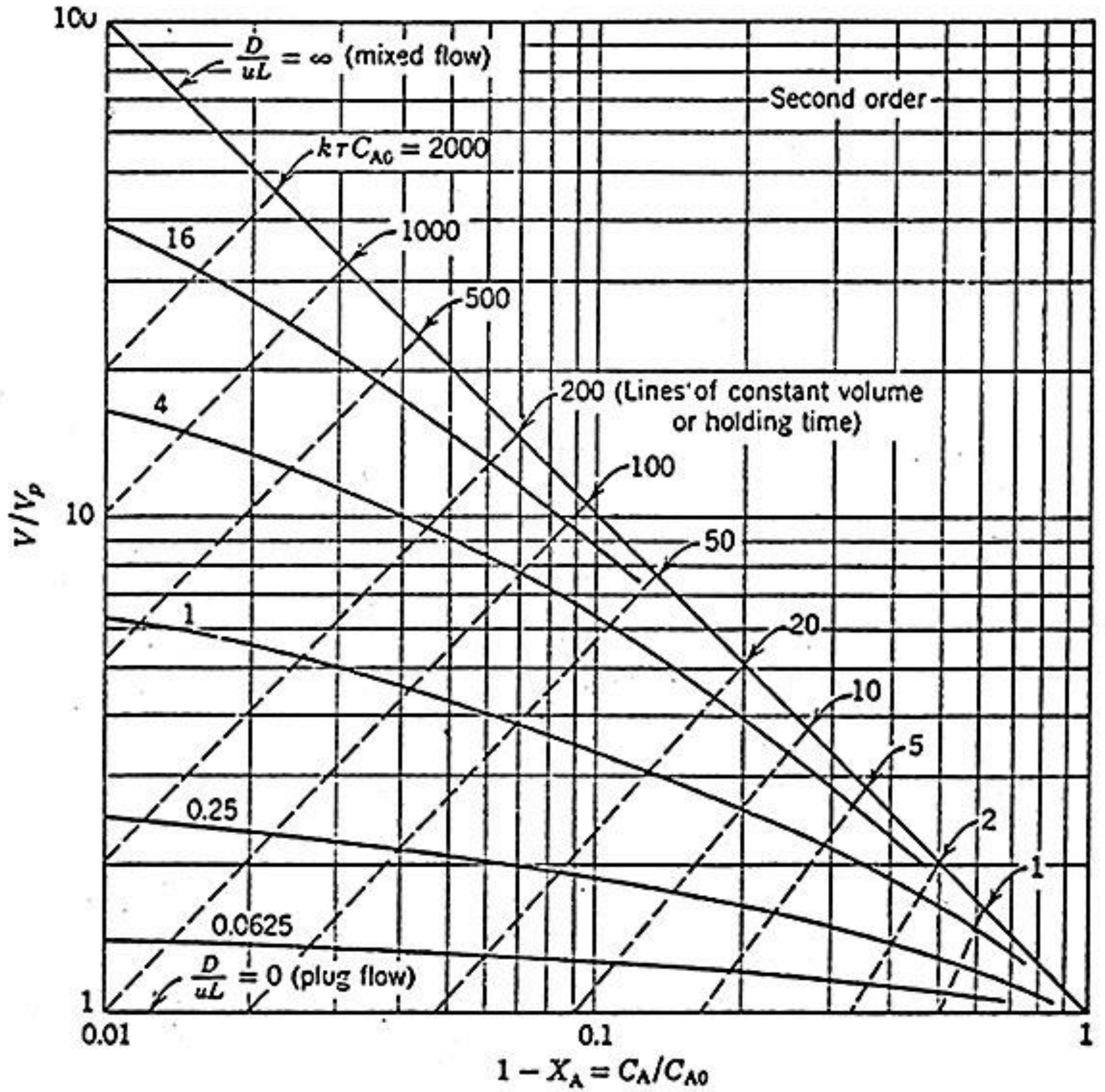
30
10
1.0
0.01
0.1
1
First-order reaction
kτ = 50
20
10
5
2
kτ = 1
N = 1
N = 2
N = 3
N = 4
N = 6
N = ∞
N = 10
τN/τp = τN/τN=∞ = (CA0 V/FA0)N reactors / (CA0 V/FA0)plug
1 − XA = CA/CA0



Second order reaction
N = 1
$kC_{A0}\tau = 1000$
500
200
100
50
20
10
5
2
1
N = 2
N = 3
N = 4
N = 6
N = 10
N = ∞ (plug flow)
100
10
1.0
0.01
0.1
1.0
$\frac{(\tau C_{A0})_N}{(\tau C_{A0})_p} = \frac{(C_{A0}{}^2 V/F_{A0})_{N\ \text{reactors}}}{(C_{A0}{}^2 V/F_{A0})_{\text{plug}}}$
$1 - X_A = \frac{C_A}{C_{A0}}$



100
10
1
V/V_p
0.001
0.01
0.1
1
$1 - X_A = C_A/C_{A0}$
$\frac{D}{uL} = \infty$ (backmix flow)
First order
$k\tau = 200$
100
50 (Lines of equal volume or holding time)
20
10
5
2
1
64
16
4
1
0.25
0.0625
$\frac{D}{uL} = 0$ (plug flow)



100
$\frac{D}{uL} = \infty$ (mixed flow)
Second order
$k\tau C_{A0} = 2000$
1000
500
200 (Lines of constant volume or holding time)
100
50
20
10
5
2
1
16
4
1
0.25
0.0625
$\frac{D}{uL} = 0$ (plug flow)
10
1
0.01
0.1
1
V/V_p
$1 - X_A = C_A/C_{A0}$