

# Vliv různých režimů separace na výtěžek biomasy a proteinů z venkovních řasových kultur

579 663

Ing. KAREL LÍVANSKÝ, CSc., Mikrobiologický ústav ČSAV, Oddělení autotrofních mikroorganismů, Třeboň

**Klíčová slova:** řasy, venkovní kultivace, separace, biomasa, proteiny, výpočet

## Úvod

Už více než 40 let se výzkum zabývá mikroskopickými řasami, které jsou zdrojem nejen biomasy, ale i širokého spektra ostatních produktů [1–3]. Komerčně se ve světě vyrábí ve větším množství jen několik produktů z řas [4] – např. tabletky nebo prášek ze sprayově sušené řasové biomasy (*Chlorella*, *Spirulina*). Výzkum a vývoj v posledních letech ukázal, že řasy se mohou pozitivně uplatnit jako zdroj bílkovin a jiných biologicky cenných látek v krmných směsích pro různé typy živočišné výroby. Je známo, že produktivita venkovních kultur řas i obsah cenných látek v řasách má periodický charakter způsobený střídáním světla a tmy [5]. Výtěžek řasové biomasy či proteinů obsažených v biomase závisí i na koncentraci řas v kultivační jednotce. Tuto koncentraci lze regulovat separací. Dobu separace si můžeme v průběhu 24hodinového cyklu střídání světla a tmy volit. Rozborem čtyř jednoduchých režimů separace řas chceme pomocí modelových výpočtů ukázat, že volba režimu separace ovlivňuje výtěžek řasové biomasy a proteinů z kultivační jednotky.

## Základní výpočtové vztahy

Při separaci řas z kultivační jednotky prochází separátorem objemový průtok řasové suspenze  $Q$ . V separátoru se od živného roztoku oddělí řasové buňky a živný roztok se vrací zpět do kultivační jednotky, neboť obsahuje živiny, které lze ještě využít řasami.

Za dobu separace  $T_s$  se odseparuje množství biomasy:

$$M_b = Q \int_{T_s} X dt \quad (1)$$

Množství proteinů obsažených v odseparované biomase je dáno vztahem:

$$M_p = Q \int_{T_s} Xf dt \quad (2)$$

kde  $X$  je koncentrace řas (sušina) v kultivační jednotce,  
 $f$  – hmotový zlomek obsahu proteinů v řasové biomase,  
 $t$  – čas.

Podle zjištění mnoha autorů [6–9] nejvíce proteinů je v řasách na počátku kultivace (který považujeme za začátek periody světla pro řasové buňky, neboť se teprve do-

stává řasová kultura na ozářenou kultivační plochu) a nejméně na konci této periody. V této periodě lze průběh  $f$  aproximovat lineární závislostí na době trvání kultivace:

$$f = f_0 - \frac{f_0 - f_L}{t_L - t_0}(t - t_0) \quad (3)$$

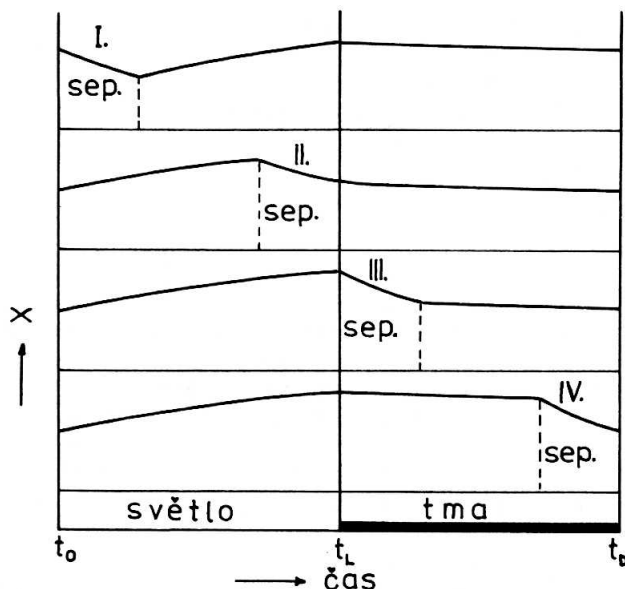
V periodě tmy, kdy řasy nerostou, obsah proteinů v řasách vzrůstá prakticky lineárně s dobou setrvání řas ve tmě. Proto můžeme použít aproximativního vztahu:

$$f = f_L - \frac{f_0 - f_L}{t_D - t_L}(t - t_L) \quad (4)$$

Průběh koncentrace řas je pro různé režimy separace odlišný, jak je znázorněno kvalitativně na obr. 1. Z obrázku je také zřejmý význam symbolů  $t_0$ ,  $t_L$ ,  $t_D$ .

### I. Separace je na začátku kultivace

V průběhu separace, která probíhá za chodu kultivační



Obr. 1. Schéma průběhu koncentrace řas  $X$  ve venkovních kultivačních jednotkách při různých režimech separace biomasy.



jednotky, lze koncentraci řas v kultivační jednotce popsat vztahem:

$$dX/dt = PA/V - (k_{D1} + Q/V) X \quad (5)$$

kde  $P$  je produktivita [množství řas (sušina) produkované za jednotku času vztahované na jednotku ozářeného povrchu suspenze],

$k_{D1}$  – specifická rychlost úbytku řas v periodě světla, zahrnující temnostní respiraci, fotorespiraci a jiné pochody.

Produktivita řas zpravidla vzrůstá exponenciálně s dobou kultivace v dopoledních hodinách, dosahuje maxima  $P_{\max}$  a pak klesá symetricky k hodnotě  $P_{\min}$  na konci kultivace. Proměnlivý charakter produktivity můžeme vyjádřit jako explicitní funkci času:

$$P = P_{\max} - (P_{\max} - P_{\min})(e^{-k(t-t_0)} + e^{-k(t_L-t)}) \quad (6)$$

kde  $k$  je adjustabilní parametr.

(V literatuře [6] jsou uvedeny odlišné matematické výrazy pro produktivitu. Jejich použití je však těžkopádné, neboť obvykle neznáme přesné hodnoty mnoha parametrů a teplota řasové kultury i ozáření, které v těchto vztazích vystupují, se mění nepřetržitě v průběhu kultivace.)

Po skončení separace (kdy  $Q = 0$ ) se rovnice (5) redukuje na tvar:

$$dX/dt = PA/V - k_{D1}X \quad (7)$$

Integrací (nejlépe numerickou) rovnice (5) pro počáteční podmínku  $t = t_0$ ,  $X = X_0$  zjistíme koncentraci  $X_s$  na konci doby separace  $T_s$ . Tuto dobu je napoprvé nutno odhadnout. Integrací rovnice (7) s počáteční podmínkou  $t = t_0 + T_s$ ,  $X = X_s$  nalezneme koncentraci řas  $X_L$  na konci kultivace (kdy  $t = t_L$ ). Tato koncentrace však musí vyhovovat určité podmínce, jak si ukážeme. V periodě tmy, kdy se řasy nenacházejí na kultivační ploše, ubývá koncentrace řas specifickou rychlostí  $k_{D2}$  podle vztahu:

$$X = X_L e^{-k_{D2}(t-t_L)} \quad (8)$$

Pro ustálený chod kultivace řas můžeme odseparovat jenom tolik biomasy, kolik jí naroste a koncentrace řas na konci periody tmy musí být rovna koncentraci řas na počátku kultivace. To vyjadřuje podmínka  $t = t_D$ ,  $X = X_0$  pro kterou z rovnice (8) vyplývá:

$$X_L = X_0 e^{k_{D2}(t_D-t_L)} \quad (9)$$

Pokud se hodnota  $X_L$  vypočtená postupně integrací rovnic (5) a (7) liší od hodnoty  $X_L$  vypočtené podle rovnice (9), pak je nutno iteračním postupem volit jinou dobu separace  $T_s$  a celý výše popsaný postup výpočtu  $X_L$  opakovat tak dlouho, dokud se nepřiblížíme dostatečně přesně k hodnotě  $X_L$  podle vztahu (9). Odpovídající průběh koncentrace  $X$  při separaci trvající již nalezenou dobu  $T_s$  použijeme pro výpočet integrálů v rovnici (1) a (2). Za fve vztahu (2) použijeme výraz daný rovnicí (3).

## II. Separace je na konci kultivace

Zde postupujeme obdobně jako v režimu separace I. s tím, že nejdříve integrujeme rovnici (7) a potom rovnici (5).

## III. Separace je po skončení kultivace

V tomto případě, kdy řasy nejsou osvětleny, dochází k úbytku řasové biomasy specifickou rychlostí  $k_{D2}$  v důsledku temnostní respirace. Při separaci se průběh koncentrace řas v kultivační jednotce řídí podle rovnice:

$$dX/dt = -(k_{D2} + Q/V) X \quad (10)$$

Pro počáteční podmínku  $t = t_L$ ,  $X = X_L$  integrací rovnice (10) dostaneme:

$$X = X_L e^{-(k_{D2} + Q/V)(t-t_L)} \quad (11)$$

Průběh  $X$  po skončení separace vypočteme integrací redukované rovnice (10), kdy  $Q = 0$ , pro podmínku  $t = T_D$ ,  $X = X_0$ :

$$X = X_0 e^{k_{D2}(t_D-t)} \quad (12)$$

Čas konce separace  $t = t_s$  dostaneme porovnáním rovnic (11) a (12):

$$t_s = (V/Q) [\ln(X_L/X_0) + (Q/V + k_{D2}) t_L - k_{D2} t_D] \quad (13)$$

Dobu separace pak vypočteme:

$$T_s = t_s - t_L \quad (14)$$

V rovnici (13) vystupuje koncentrace  $X_L$ , kterou vypočteme numerickou integrací rovnice (7) s přihlédnutím k rovnici (6) pro počáteční podmínku  $t = t_0$ ,  $X = X_0$ .

Dosažením za  $X$  z rov. (11) a vyjádřením  $f$  z rovnice (4) numerickým výpočtem integrálů v rovnici (1) a (2) přes dobu separace  $T_s$  (ta je dána rov. (14)) vypočteme množství odseparované biomasy a proteinů.

## IV. Separace je před začátkem kultivace

Před separací v periodě tmy lze průběh koncentrace řas  $X$  vyjádřit:

$$X = X_L e^{-k_{D2}(t-t_L)} \quad (15)$$

Integrací rovnice (10) pro podmínku  $t = t_D$ ,  $X = X_0$  odřízne průběh koncentrace  $X$  při separaci:

$$X = X_0 e^{(k_{D2} + Q/V)(t_D-t)} \quad (16)$$

Čas začátku separace  $t = t_s$  vypočítáme porovnáním rovnic (15) a (16):

$$t_s = (V/Q) [\ln(X_0/X_L) + (Q/V + k_{D2}) t_D - k_{D2} t_L] \quad (17)$$

Doba separace je pak dána vztahem:

$$T_s = t_D - t_s \quad (18)$$

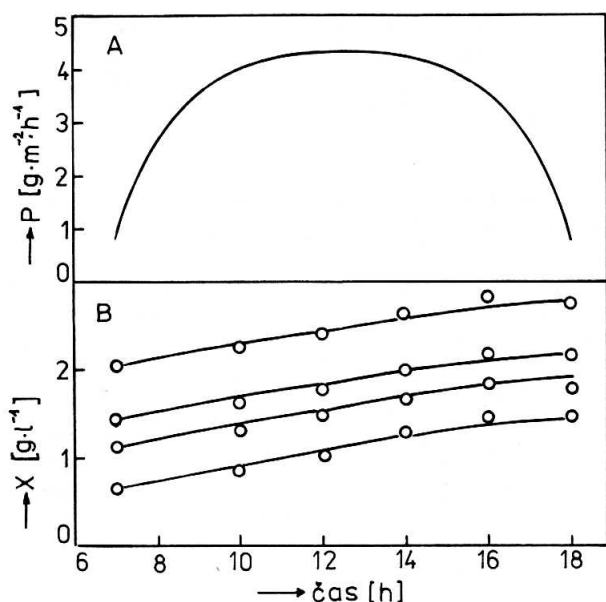
V rovnici (17) vystupuje koncentrace  $X_L$ , kterou vypočteme postupem naznačeným u režimu separace III. Dosažením za  $X$  z rovnice (16) a vyjádřením  $f$  z rov. (4) numerickou integrací rovnic (1) a (2) přes dobu separace  $T_s$  (ta je dána rovnicí (18)) vypočteme množství odseparované biomasy a proteinů.

## Aplikace výpočtových vztahů na kultivační jednotku 225 m<sup>2</sup>

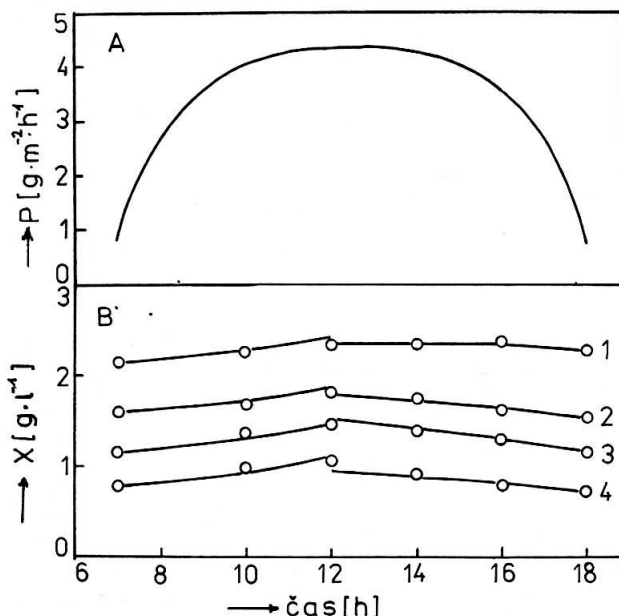
Na třeboňském pracovišti Mikrobiologického ústavu ČSAV byly vyvinuty kultivační jednotky pro řasy, jejichž



schema a funkce byly popsány dříve [10]. (Principiální schema a stručný popis funkce kultivační jednotky byl publikován v tomto časopise [11]). Několik kultivačních jednotek tohoto typu bylo postaveno v rámci spolupráce také v Rupite (BLR). Kultivační jednotka s velikostí kultivační plochy 225 m<sup>2</sup> je již poloproduční velikosti. Příklad průbě-



Obr. 2. Průběh produktivity řas (obr. A) a koncentrace řas (obr. B) v kultivační jednotce 225 m<sup>2</sup>. Body – experimentální hodnoty (převzaté z práce [12]), proložené křivky – vypočteno z rovnic (5) a (6) pro parametry:  $P_{\min} = 0,8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $P_{\max} = 4,48 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $k = 0,69 \text{ h}^{-1}$ ,  $k_{D1} = 0,0042 \text{ h}^{-1}$



Obr. 3. Průběh produktivity řas (obr. A) a koncentrace řas (obr. B) v kultivační jednotce 225 m<sup>2</sup> se separací biomasy od 12 do 18 h (Režim separace II). Body – experimentální hodnoty (převzaté z práce [12]), proložené křivky – vypočteno z rovnic (6) a (7) v režimu bez separace a z rovnic (5) a (6) v režimu se separací. Parametry pro výpočet jsou stejné jako u obr. 2. Číslo u křivek – hodnoty  $Q/V [\text{h}^{-1}]$ : 1 – 0,03, 2 – 0,06, 3 – 0,09, 4 – 0,12.

hu koncentrace řas během kultivace, při různých výchozích koncentracích  $X_0$  je uveden pro kultivační jednotku 225 m<sup>2</sup> na obr. 2B. (Experimentální data byla převzata z práce [12], neboť vlastní údaje nemáme k dispozici). Z obrázku je patrné, že průběh koncentrace řas při kultivaci vypočítaný numerickou integrací rovnice (5) s použitím rovnice (6) dobře souhlasí s naměřenými údaji. Nelineární regresí jsme našli v rovnicích (5) a (6) tyto parametry:  $P_{\min} = 0,8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $P_{\max} = 4,48 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $k = 0,69 \text{ h}^{-1}$ ,  $k_{D1} = 0,0042 \text{ h}^{-1}$ . Vypočítaná hodnota parametru  $k_{D1} = 0,0042 \text{ h}^{-1}$  přibližně odpovídá literárním údajům:  $k_{D1} = 0,0052 \text{ h}^{-1}$  [6],  $k_{D1} = 0,0062 \text{ h}^{-1}$  [13].

Na obr. 3 je uveden příklad průběhu koncentrace řas v kultivační jednotce během kultivace s průběžnou separací řas v odpoledních hodinách (režim separace II). (Vzestupná část: 7.–12. h – vypočteno z rovnic (6) a (7), sestupná část: 12.–18. h – vypočteno z rovnic (5) a (6)). Vypočtený průběh koncentrace řas podle vztahů uvedených v této práci dobře vystihují naměřené hodnoty.

V rovnicích (3) a (4) vystupují parametry  $f_0$  a  $f_L$  jejichž hodnotu je třeba stanovit. Práce [7] uvádí, že řasa *Scenedesmus incrassatulus* R-83 v 8 h ráno obsahuje 43 % proteinů v biomase. V 18 h (ke konci kultivace) je v biomase této řasy 27,8 % proteinů. U řasy *Scenedesmus acutus* S-15 byly zjištěny tyto hodnoty: 8 h ráno 47,8 % a v 18 h 34,9 % proteinů v biomase. Na základě těchto údajů předpokládáme, že na začátku kultivace bude v 7 h ráno v biomase 50 % proteinů ( $f_0 = 0,5$ ) a na konci kultivace v 18 h bude v biomase 30 % proteinů ( $f_L = 0,3$ ).

Výsledky výpočtů výtěžků biomasy a proteinů při různých režimech separace pro kultivační jednotku 225 m<sup>2</sup> jsou uvedeny v tabulce 1. Z tabulky vyplývá, že pro výtě-

Tabulka 1. Vypočtený výtěžek řasové biomasy /z rovnic (1)/ a proteinů v biomase /z rovnic (2)/ z kultivační jednotky 225 m<sup>2</sup> při různých režimech separace

Režim separace	Průtok separátorem (m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )	Doba separace (h)	Výtěžek (kg)	
			Biomasa	Proteiny
I	1	3,4	6,3	2,9
	2	1,8	6,2	3,0
	3	1,2	6,3	3,1
	4	0,9	6,3	3,1
	5	0,7	6,3	3,1
II	1	3,8	6,7	2,2
	2	1,8	6,7	2,1
	3	1,2	6,7	2,1
	4	0,9	6,7	2,1
	5	0,7	6,7	2,1
III	1	3,6	6,6	2,2
	2	1,8	6,6	2,1
	3	1,2	6,7	2,1
	4	0,9	6,7	2,0
	5	0,7	6,7	2,0
IV	1	3,6	6,4	3,0
	2	1,8	6,3	3,1
	3	1,2	6,3	3,1
	4	0,9	6,3	3,1
	5	0,7	6,3	3,1

Parametry použité ve výpočtových vztazích:

$A = 225 \text{ m}^2$ ,  $P_{\min} = 0,8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  
 $V = 12 \text{ m}^3$ ,  $P_{\max} = 4,5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  
 $t_0 = 7,00 \text{ h}$ ,  $k = 0,69 \text{ h}^{-1}$ ,  
 $t_L = 18,00 \text{ h}$ ,  $k_{D1} = k_{D2} = 0,0042 \text{ h}^{-1}$

Režim I:  $X_0 = 2,0 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ ,  
 $X_L = 2,1 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ ,  
 Režim II:  $X_0 = 1,5 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ ,  
 Režim III, IV:  $X_0 = 1,5 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ ,  
 $X_L = 2,1 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$

žek biomasy je nejlépe separovat řasy v odpoledních hodinách kultivace (režim separace II). Maximální výtěžek proteinů dostaneme, je-li separace před začátkem kultivace nebo v ranních hodinách kultivace. Ukazuje se, že kapacita separátoru má značný vliv na dobu separace, avšak jenom málo ovlivňuje výtěžky biomasy a proteinů.



## Použité symboly

$A$	– velikost kultivační plochy	( $m^2$ )
$f$	– hmotový zlomek obsahu proteinů v biomase	(–)
$k$	– adjustabilní parametr v rov. (6)	( $h^{-1}$ )
$k_D$	– specifická rychlost úbytku řas (dýcháním a j. procesy)	( $h^{-1}$ )
$M$	– odseparované množství	(kg)
$P$	– produktivita	( $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ )
$P_{max}$	– parametr v rov. (6)	( $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ )
$P_{min}$	– parametr v rov. (6)	( $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ )
$Q$	– objemový průtok suspenze řas separátorem	( $m^3 \cdot h^{-1}$ )
$t$	– čas	(h)
$T_s$	– doba separace	(h)
$X$	– koncentrace řas (sušina)	( $g \cdot l^{-1}$ )
$V$	– objem řasové suspenze v kultivační jednotce	( $m^3$ )

## Indexy

$b$	– biomasa
$D$	– konec periody tmy
$L$	– konec periody světla
$0$	– počátek periody světla
$p$	– proteiny
$s$	– konec separace
$1$	– v periodě světla
$2$	– v periodě tmy

## Literatura

- [1] BURLEW, J. S. Ed.: *Algal Culture from Laboratory to Pilot Plant*. Carnegie Institute, Washington, DC, 1953.
- [2] SHELEF, G., SOEDER, C. J. Eds.: *Algal Biomass, production and Use*. Elsevier, Amsterdam 1980.
- [3] BOROWITZKA, M. A., BOROWITZKA, L. J.: *Micro-Algal Biotechnology*. Cambridge University Press, Cambridge 1988.
- [4] BENEMANN, J. R., TILLET, D. M., WEISSMAN, J. G.: *Trends in Biotechnology*, 5, 1987, s. 47.
- [5] BARCLAY, W. R., Mc. INTOSH, R. P. Eds.: *Algal Biomass Technologies*. J. Cramer, Berlin 1986, s. 95.
- [6] GOLDMAN, J. C.: *Water Res.*, 13, 1979, s. 119.
- [7] DILOV, Ch., et al.: *Chidrobiologija* (Sofija), 7, 1978, s. 30.
- [8] FURNADŽIEVA, S. T., et al.: *Chidrobiologija* (Sofija), 29, 1987, s. 13.
- [10] ŠETLÍK, I., ŠUST, V., MÁLEK, I.: *Algol. Stud. Třeboň*, 1, 1970, s. 111.
- [11] LÍVANSKÝ, K., KAJAN, M.: *Kvas. prům.*, 35, 1989, s. 239.
- [12] DILOV, CH.: *Mikrovodorasli – Masovo kultivirane i prilozhenie*. Bulgarskata akademija na naukite, Sofija, 1985, s. 128.
- [13] RADMER, R., BEHRENS, R., ARNETT, K.: *Biotechnol. Bioeng.*, 29, 1987, s. 488.

Lektoroval Doc. Ing. J. Páca, CSc.

Lívanský, K.: Vliv různých režimů separace na výtěžek biomasy a proteinů z venkovních řasových kultur. *Kvas. prům.*, 37, 1991, č. 10–11, s. 293–296.

Venkovní kultury řas v režimu střídání světla a tmy se vyznačují periodickým charakterem produktivity a obsahu bílkovin v řasách. Práce se zabývá matematickou analýzou čtyř jednoduchých režimů separace řas pro kultivační jednotku o ploše 225 m<sup>2</sup>. Výpočty ukazují, že pro produkci biomasy je nejvýhodnější separace v odpoledních hodinách kultivace. Pro produkci proteinů je nejvýhodnější separace před začátkem kultivace nebo na jejím počátku. Tehdy je možno získat až o 50 % více proteinů než při separaci řas v odpoledních hodinách.

Ливански, К.: Влияние разных режимов сепарации на выход биомассы и протеинов из культур водорослей. *Квас. prům.*, 37, 1991, № 10–11, стр. 293–296.

Культуры водорослей в режиме чередования света и тьмы отличаются периодическим характером продуктивности и содержанием белковых веществ в них. Работа занимается математическим анализом четырех простых режимов сепарации водорослей для установки культивационной единицы площадью в 225 м<sup>2</sup>. Расчеты показывают, что для продукции биомассы наиболее выгодно сепарация до начала культивирования или на его входе. Тогда можно получить даже на 50 % больше протеинов чем при сепарации водорослей в послеобеденные часы.

Lívanský, K.: Effect of Different Regimes of Separation on Biomass and Protein Content in Cultures of Algae. *Kvas. prům.*, 37, 1991, No. 10–11, pp. 293–296.

Changes of light and dark result in cultures of algae in periodic intracellular changes of productivity and protein level. This article is focused on the mathematic analysis of four simple regimes of algae separation from the culture unit of 225 m<sup>2</sup>. The calculations show that the maximum value of the biomass production can be obtained with the afternoon separation. On the other hand, from the standpoint of protein content the most suitable time for the separation is before or at the start of the cultivation. This procedure permits to obtain by 50 % higher proteins in comparison to the afternoon separation.

Lívanský, K.: Einfluss verschiedener Separationsregime auf die Ausbeute der Biomasse und der Proteine aus Algenkulturen im Freien. *Kvas. prům.*, 37, 1991, Nr. 10–11, s. 293–296.

Die Algenkulturen, die im Freien dem Regime der Abwechslung von Licht und Dunkelheit unterliegen, sind durch einen periodischen Charakter der Produktivität und des Eiweißgehalts in den Algen gekennzeichnet. Der Artikel befasst sich mit der mathematischen Analyse von vier einfachen Regimen der Algenseparation für eine Kultivationaleinheit mit einer Fläche von 225 m<sup>2</sup>. Die Berechnungen zeigen, dass für die Produktion der Biomasse die Separation in den Nachmittags-Kultivationsstunden am vorteilhaftesten ist. Für die Proteinproduktion eignet sich am besten die Separation vor dem Anfang der Kultivationaleinheit oder an ihrem Anfang. In den empfohlenen Phasen können bis um 50 % mehr Proteine als bei der Algenseparation in den Nachmittagsstunden gewonnen werden.