

## Изследване на хидродинамичното поле на импелер с дъгообразни лопатки с оглед приложение в биореактори за организми, чувствителни към деформации

Добрин Георгиев Серафим Влаев

*A study on the flow field of a modified arc-shaped-blade impeller intended for application in bioreactors with shear-sensitive cells: The study presents scientific results related to shear characteristics of a novel impeller intended for use in stirred bioreactor with shear-sensitive biomass. The shear parameters are compared with critical reference values reported in the literature and with data of the conventional flat-blade impeller type Rushton and show favorable for further studies and application in industrial fermentation vessels.*

**Keywords:** mixing, arc-blade impeller, shear parameters

### ВЪВЕДЕНИЕ

Известно е, че реакторите с разбъркване, използвани в биотехнологичната индустрия, прилагат повишени стойности на специфична мощност, с оглед постигане на по-висока степен на аерация и по-високи концентрации на разтворен кислород, необходим за жизнения цикъл на организмите. Например, за да се запази коефициента на масопренасяне на кислорода при промяна на мащаба от 60 литра на 2 m<sup>3</sup>, необходимата мощност нараства то 0.2 на 0.9 kW/kgO<sub>2</sub>; подробни данни по този въпрос са реферирани в [1]. В същото време, повишените нива на специфична мощност във ферментаторите (респ. мощност в единица обем) пораждаат механични напрежения върху организмите, чиито стойности може и да нарушат жизнеспособността им [2]. За да се избегнат несъответствия между изисквания и възможности, разбъркващите устройства в биореакторите се изследват за скорости и напрежения на срязване. Напоследък в рамките на проект за производство на екзополисахариди от екстремофилни микроорганизми - у нас бе изпитана една нова конструкция разбърквачо устройство с модифицирани дъгообразни лопатки [3,4]. Интерес представлява, както нейният потенциал за разбъркване и специфична мощност, така и генерираните от нея напрежения на срязване с оглед запазване жизнеспособността на микроорганизмите при налична чувствителност към този параметър.

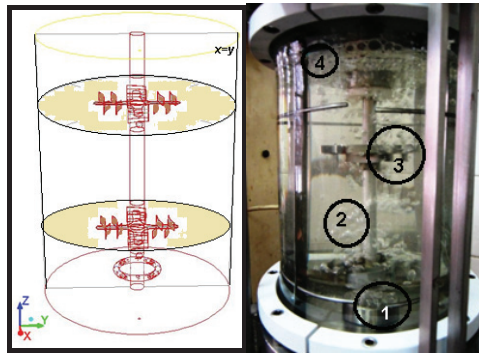
Цел на настоящето изследване е оценка на механичните напрежения в зоните на интензивно въздействие на импелера.

В рамките на това изследване: (1) с помощта на модел бяха определени зоните на интензивно въздействие, като скорости, вектори и разпределение; (2) в тези зони бе определена скоростта на срязване за среда, близка до ферментационната при производство на екзополисахариди; (3) получените резултати бяха сравнени с данни за конвенционална бъркачка и с литературни данни за допустимите механични напрежения при клетки и филаментни микроорганизми.

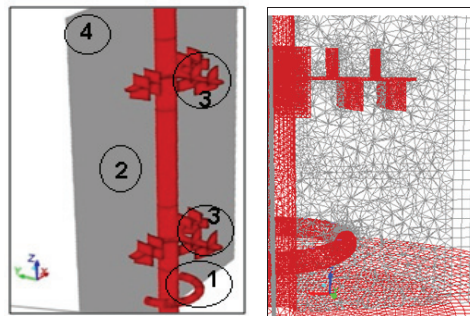
### ИЗЛОЖЕНИЕ

#### Апаратура и метод на изследване

Апаратът представлява цилиндричен съд с диаметър T=0.16m и вертикална бъркачка с два импелера с дъгообразни лопатки в конфигурация T/3, както е показан на фиг. 1. Паралелно са показани зоните на изследване (1-4), които биха могли да бъдат критични за чувствителни към механични напрежения микроорганизми.



Фиг. 1 Схема на биореактора



Фиг. 2 Геометричен модел и характеристични зони

Изследването бе проведено с методологията на изчислителната механика на флуиди (CFD) и математичен модел, базиран на уравненията на Навие-Стокс, усреднени във временен интервал и допълнени с уравнения за турбулентна кинетична енергия и скорост на нейната дисипация ( $k - \epsilon$  модел) [5,6]. Моделът бе разширен за отчитане на неютоновото поведение на средата чрез въвеждане на реологично уравнение (7), съдържащо индекс на течение  $n$  и коефициент на консистентност  $K$ , съответстващи на ферментационната среда. Компютърно изчислените компоненти на тензора на напрежението бяха използвани за определяне на скоростта на тангенциална деформация по уравнение 6.

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{p}{\rho} + \frac{2}{3}k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( v_i \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (1)$$

**Вискозитети**

**Стандартно приближение | "k-ε":**

$$V_t = V_a + V_T$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon'} \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu_s + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = \Pi - \epsilon' \quad (4)$$

$$\mu_a = K \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)^{n-1} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \epsilon'}{\partial t} + U_i \frac{\partial \epsilon'}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu_s + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon'}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon'}{k} \Pi - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon'^2}{k} \quad (5)$$

$$\Pi = \frac{\mu_t}{\rho} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$$

скорост и напрежение на срязване

$$\dot{s} = \frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

$$\tau_w = K\dot{s} \quad (7)$$

**Подробности за числения експеримент.** Пространствената дискретизация на моделирания обем включва неструктурирана конформална мрежа (тетраедрична при лопатките) със съгъстяване в пристенните зони и достига  $0,9 \cdot 10^6$  крайни обеми с линеен размер  $< 0.05 \text{ mm}$  (Фиг. 2).

За числената симулация на хидродинамичното поле бе използван приложният софтуерен пакет *ANSYS FLUENT (Release 13.0, ANSYS, Inc., 2010)*. Граничните условия, съгласно номенклатурата на Fluent включваха "symmetry" за свободната повърхност на флуида, „stationary wall“ с нулеви скоростни градиенти при стените на корпуса и „moving wall“ с присвоена оперативна ъглова скорост на въртене за вала и разбъркващите елементи. Междофазовият масообмен газ-течност в хода на симулациите е обезпечен от „Ойлер-Ойлер мултифазен модел“, при който импулсите и непрекъснатостта се изчисляват за всяка фаза поотделно, като се отчита и контактът между тях. Изчислителната процедура бе проведена при зададен критерий за сходимост на математичните отклонения между итерациите  $1 \times 10^{-6}$ , както за скоростните слагаеми, така и за турбулентните променливи. Валидността на модела бе проверявана чрез сравнение на изчислените стойности (за моменти, числа на мощност и скорост на срязване) с експериментално установени [6].

Във връзка с паралелни изследвания на екзополisahаридни продуктивни системи с Антарктически дрожди, представляващи интерес за практиката, като моделна среда бе възприета средата от този лабораторен опит, достигаш привидни вискозитети до  $15 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ . В математичния модел, това бе представено с коефициент на консистентност  $K=0.02 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  и индекс на течение  $n = 0.78$ .

## РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

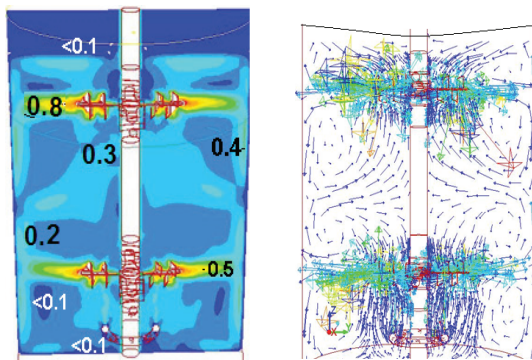
Контурен скоростен профил на хидродинамичното поле и векторна диаграма на циркулацията са представени на фиг. 3. На тяхна база са разграничени зони на интензивна първична циркулация и изхвърляне от лопатките, и зони на вторична радиално-осева циркулация между тях. Общата циркулация се подсилва и от присъствието на газ от пръстеновидния разпределител в долната част на съда. Показаното разпределение на линейните скорости съответства за случай на разбъркване при  $600 \text{ rpm}$ .

Диаграма на скоростите на срязване е представена на фиг. 4, а осреднените по площ стойности на най-важните параметри са събрани в табл.1. Зоните са както следва: зона 1 – за газоразпределителя, зона 2 – за флуида, зона 3 – за импелера и зона 4 – за подповърхностния слой.

### Критерии за установяване на критични интервали на напрежение

В изследванията на стрес-чувствителни клетки са установени някои гранични стойности на параметри на срязване с критично въздействие върху микроорганизмите, предимно филаментни и многоклетъчни с морфология, която лесно може да се наруши при ъглови деформационни въздействия [7,8]. Например от [8] е видно, че при класическия вариант на турбина с прави лопатки, използвана в ненютонови среди при ъглова скорост  $600 - 700 \text{ rpm}$ , като критични се възприемат максималните скорости на срязване  $\dot{s} \approx 2,5 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$  и напрежения на срязване  $\tau_w$  до

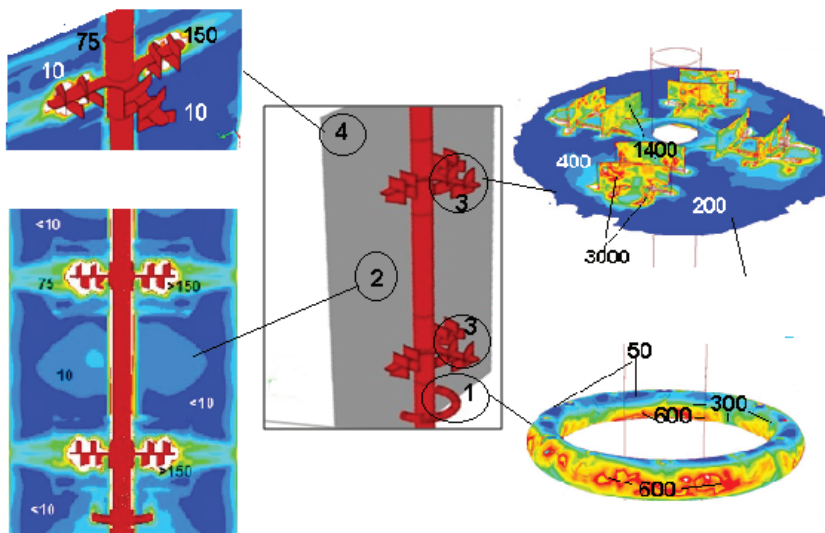
$55\text{N/m}^2$ . При конвенционалните бъркачки, критични стойности могат да се наблюдават дори и при по-ниски ъгли скорости. Например при  $400\text{rpm}$  и диаметър равен на изследвания в настоящия случай, в зоната на отворите на газоразпределителя при класическата турбина с прави лопатки се регистрират пикове в скоростта на срязване от порядъка на  $2,32 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ .



Фиг. 3 Разпределение на линейната скорост на разбъркване (m/s) по интензитет и посока във вертикалната равнина на симетрия в биореактора

**Обсъждане и перспективи за приложение на устройството**

Сравнявайки резултатите от Таблица 1 с референтните критични стойности, установяваме по-благоприятни условия на разбъркване при изследваният импелер. В зоната на газоразпределителната тръба, скоростта на срязване не надхвърля  $800\text{s}^{-1}$ , а в зоната на импелера (с извити лопатки) максималната стойност не надвишава  $10^4\text{s}^{-1}$ . Тези факти утвърждават възможността за използването на импелера с дъгообразни лопатки при отглеждане на микроорганизми, чувствителни към напрежения на тангенциална деформация.



Фиг.4. Скорости на срязване в маркираните зони на изследване

Таблица 1 Обобщение на получените резултати за основните параметри на срязване

Зони	Минимална деформация $\dot{\epsilon}_{\min}, s^{-1}$	Максимална деформация $\dot{\epsilon}_{\max}, s^{-1}$	Осреднена деформация $\dot{\epsilon}_{av}, s^{-1}$	Максимално напрежение $\tau_w, N.m^{-2}$
1	50	600	458	2,9
2	2	150	58	1
3	200	10000	3800	26,3
4	1	60	2	0,48

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено е предварително изследване на параметрите на срязване на импелер с дъгообразни лопатки. Показано е, че устройството може да се окаже перспективно за приложение при микроорганизми, чувствителни на деформации на срязване. Изследването му с помощта на компютърна хидродинамика показва, че скоростите на срязване в критичните зони са около два пъти по-ниски от тези на конвенционалния импелер с прави лопатки, докато напреженията на срязване - сравнени с нормите за съхранение жизнеспособността на клетки - не надхвърлят критични стойности, като при разбъркване с конвенционален импелер, такава опасност е на лице.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Atkinson, B., Mavituna, F., Bioengineering and Biotechnology Handbook, Ch.9. Gas-Liquid Mass Transfer, Nature Press Macmillan Publ, 1983, p. 750.
- [2] Paul E., Atiemo-Obeng V., Kresta S., Handbook of Industrial Mixing, Science and Practice, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2004.
- [3] Kraitshev, S., Vlaev, S.D., Lossev, V., Staykov, P., A new arc-blade version of a turbine impeller suitable for bioreactors, Botechnol & Biotechnol. Eq. 15 (2000) 128-131.
- [4] Vlaev, S.D., Georgiev, D., CFD- characterisation of the MV-impeller related to polysaccharide dispersion mixing, Sci.Wrks of the Univ. of Food Processing (Plovdiv), 51, 2014.
- [5] Ranade, V.V., CFD for designing process equipment: expectations, current status and path forward, Ind. Eng. Chem. Res., 42 (2003) 1115-1128.
- [6] Vlaev, S.D., Georgiev D., Nikov, I., Elqotbi, M., The CFD approach for shear analysis of mixing reactor: Verification and examples of use, J. Engng Sci. Technol. 2(2) (2007) 177-187.
- [7] Kelly, S., Grimm, L.H., Bendig, C., Hempel, D.C., Krull, R., Effects of fluid dynamic induced shear stress on fungal growth and morphology Process Biochemistry 41 (2006) 2113.
- [8] Chisti, Y. Hydrodynamic damage to animal cells, Critical Reviews in Biotechnology 21 (2011) 67-110.

### За контакти:

Добрин Петров Георгиев, гл. ас. д-р, Катедра „Химично инженерство“, Университет „Проф. д-р Асен Златаров“, Бургас, тел: 0878664450, dpg@abv.bg  
Серафим Димитров Влаев, проф. д-р, Лаборатория по химични и биохимични реактори, Институт по инженерна химия при БАН, 0888715437, mixreac@gmail.com

**Благодарности:** Изследването е част от проект с ФНИ по договор ДТК02/46.

**Докладът е рецензиран.**