

Обґрунтування оптимальних параметрів валків для розкачування тіста

І.Я. Стадник • Т.М. Вітенько

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна

Received: 16 March 2019 / Accepted: 25 March 2019

Анотація. У статті проаналізовано дію валків на середовище й розглянуто складний і непередбачуваний процес руху тіста в зазорі між валками та описано методику розрахунку раціональних параметрів формуючих валків, що впливає на розхід тіста. Представлено математичну модель, що враховує реологічні параметри кінцевого продукту. Обґрунтовано функціональні залежності для допустимого діаметру та зазору утвореного між обертовими валками. Розглянуто окремо вплив величини зазору між валками на розхід тіста, радіусу валків на G і комплексний вплив цих двох параметрів. На основі отриманих залежностей встановлено раціональні параметри h і r .

Ключові слова: трифазове середовище, валки, реологія, деформація зсуву, тісто.

Вступ.

Одним з основних напрямків раціонального технічного забезпечення процесу формування виробів в різних галузях промисловості є машини з валковими робочими органами. На сьогоднішній час існує не досить велика різноманітність конструкцій валкових робочих органів, які виконують технологічну операцію нагнітання, транспортування в'язкого середовища. Ці машини потребують удосконалення та дослідження з метою впровадження нових розробок у виробництво. Особлива увага приділяється малогабаритним ефективним машинам з контрольованими процесами, що відбуваються в робочій камері. При створенні таких машин особливу увагу необхідно зосередити на обґрунтуванні схеми та відповідному конструктивному розв'язанні прийнятих рішень, оскільки це суттєво впливає на можливість виготовлення такої машини в умовах підприємств, технологічні можливості яких орієнтовані на ремонт та відновлення техніки [1].

Постановка задачі.

Відомо, що машини для формування в'язкого середовища, повинні впливати на нього таким чином, щоб втрати сировини і готової продукції були мінімальними, а якість виробів висока. Це спонукає до необхідності забезпечення повної відповідності режимів обробки, конструктивних форм і параметрів робочих валкових органів, структурно-механічним властивостям в'язкого середовища [1, 2]. Це визначає сучасні тенденції та завдання щодо конструювання валкових робочих органів у машин різного класу, які виконують робочі процеси: розкачування, нагнітання, замішування, транспортування. Найбільша кількість наукових досліджень присвячена оптимізації профілю конструктивних елементів, застосуванню збірних конструкцій, використанню сучасних матеріалів і покриттів.

Специфіка таких досліджень пов'язана з надзвичайно широким діапазоном властивостей технологічних середовищ, різноманіттям використовуваних матеріалів, відмінністю умов експлуатації. Відзначимо, що дослідження процесу розкачування в'язкого середовища валками пов'язано з необхідністю комплексного використання фізико-хімічної механіки матеріалів, фізики твердих тіл, металознавства тощо. Слід зазначити також, що традиційні способи розкачування в'язкого середовища валками (рис.1) в основному базуються на комбінації деформаційного навантаження – стиснення робочого середовища в квазістатичному і динамічному режимах, причому деформується весь об'єм трифазного середовища [1, 2, 3].

Метою досліджень було встановлення впливу геометрії валків на якість нагнітання за умови горизонтального розкачування тіста.

Розглянемо вузол подачі тіста формувальної машини (рис.1.), що складається з бункера 1 для завантаження тіста, нагнітальної камери 2 виконаної з двох рифлених валків 3, встановлених паралельно з

можливістю проходження тіста між ними. Будь яку з існуючих та розроблених структурних схем за участю валкових робочих органів можна математично описати рівняннями, що зв'язуються у часі безперервними функціями. Будемо враховувати геометричні розміри та характеристики валків, а також властивості і деякі фізико-механічні характеристики в'язкого середовища. Нова запропонована авторами форма поверхні валків відрізняється циліндрично-гвинтовими пазами з постійним по довжині кроком гвинтових ліній.

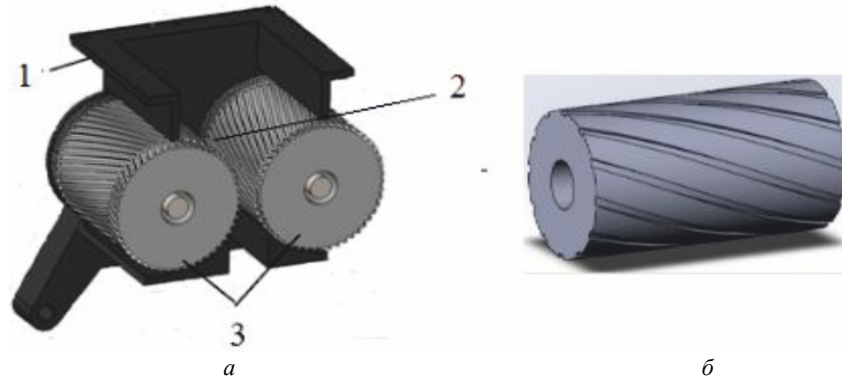


Рис. 1. Схеми: *a* - вузла нагнітання: 1 – бункер; 2 – нагнітальна камера; 3 – рифлені валки; *б* - нова конструкція валка

Викладення основних результатів дослідження. Встановлення особливостей руху середовища в зазорі між валками є досить складним і в той же час практично важливим питанням. Це пов'язано із необхідністю проведення різного роду розрахунків для формуючих робочих валків, що визначають їхню дію на середовище. Для вирішення такого класу задач доцільно залучити алгебру логіки і теорію множини. Водночас необхідно враховувати властивості середовища. Це дасть змогу розглянути компонування як упорядковану множину робочих ланок, а різноманітні їх сполучення – як логічні відношення елементів цієї множини [5]. У загальному випадку ці задачі є багатоекстремальними. При виборі кращого варіанту визначення впливу конструктивних параметрів валків вибрано метод розставлення пріоритету – якісної оцінки варіантів. Вирішення поставлених завдань можливе на основі ретельного вивчення суті процесу, що відбувається під час розкачування тіста валками.

Аналіз робіт [1, 2, 4] показав, що нерівномірність швидкості руху середовища (бубличного дріжджового пшеничного тіста) обумовлена характером течії. Тому суттєвим фактором збільшення ефективності інтенсивної дії валків на середовище є рівномірність розкачування його елементарних об'ємів, що надходять із робочої камери машини. Виходячи із допущень, що питома подача середовища є однаковою для всіх елементарних об'ємів маси, що знаходяться в зазорі між валками, в'язкість залишається постійною і ми її при розрахунках не враховували.

Схематично процес розкачування тіста зображено на рис. 2. Валки однакових діаметрів обертаються назустріч один одному при неперервному русі середовища (пшеничного тіста).

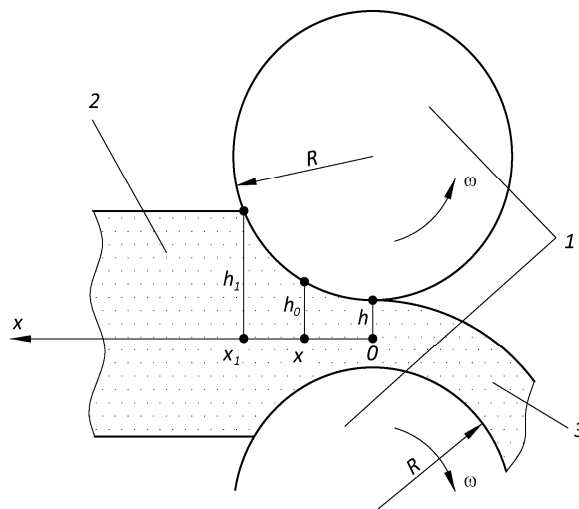


Рис. 2. Профіль схеми розкатки тіста між валками: 1 – обертові валки радіуса R , половинна відстань між якими h_0 ; 2 – потік тіста половинної товщини h на вході робочої камери; 3 – розкатане тісто після проходження валків

Інерційними властивостями в'язкого середовища знехтуємо. Вид функції, що описує розхід буде мати вигляд:

$$J(\text{Par}, A, B) = e^{A(B-\text{Par})^2} \quad (1)$$

За умови, що $J(\text{Par})=G$, невідомі коефіцієнти в рівнянні (1) A та B будуть визначені для кожного випадку методом найменших квадратів. Розглядали три випадки.

1. Зміна зазору між валками по довжині впливає на розхід робочого середовища.

Розглянемо зміну параметрів функції приналежності $J_\mu(h)$ і теоретичної швидкості розходу $G(h)$ в'язкого середовища на валках від зазору h між ними по довжині. Формуємо розподіл розходу J_μ по зазору h , що змінюється від 1...5.5 мм та імовірність наявності даного фактору. Найвища ймовірність 0.92 досліджується за умови $h = 3.6$ мм. По мірі руху від центру вона зменшується до 0,1.

$$J_\mu = \begin{pmatrix} 1 \dots 2.5 \dots 3 \dots 3.6 \dots 4.5 \dots 5 \dots 5.5 \\ 0.1 \dots 0.26 \dots 0.48 \dots 0.92 \dots 0.4 \dots 0.22 \dots 0.1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Для практичного використання виразу (1) необхідно встановити значення A і B . Застосуємо оператор найменших помилок для визначення A та B . Застосуємо оператор найменших помилок програми MathCAD. Використовуємо блок Given – Minerr.

$$n = \text{cols}(\mu_h) \quad n = 7 \quad B = 3.60 \quad A = -0.01$$

Given

$$\sum_{i=0}^{n-1} (\mu_{h_i} - \mu(\mu_{h_0}, A, B))^2 = 0$$

$$\begin{pmatrix} A_h \\ B_h \end{pmatrix} = \text{Minerr}(A, B)$$

$$\frac{A_h}{B_h} = \begin{pmatrix} -0,954 \\ 3.718 \end{pmatrix}$$

$$M := \max \left[(\mu_m^T)^{(1)} \right] \quad m := \min \left[(\mu_h^T)^{(1)} \right]$$

$$M = 0.92 \quad m = 0.1$$

$$A_h = -0.954, \quad B_h = 3.718, \quad i = 0 \dots n-1, \quad h = 1, 1.1 \dots 6$$

$$\mu_h(h) := \mu(h, A_h, B_h)$$

$$h_0 = 1 \quad h_m = 6 \quad c = 2.9$$

За результатами розрахунку залежність швидкості розходу в'язких мас згідно (1), буде мати вигляд:

$$G(h) = e^{-0.95 \cdot (3.72-h)^2} \quad (3)$$

Побудуємо графіки функцій $J_\mu(\mu_h)$, $[G(h)]$ згідно даних (2) рис.3.

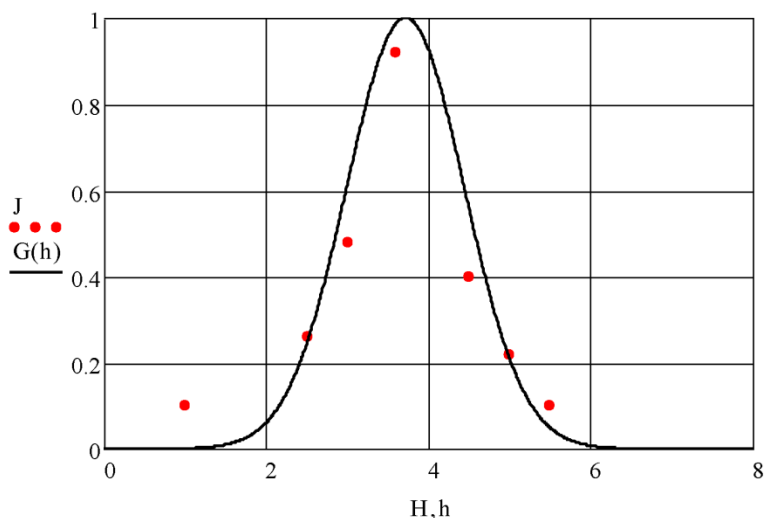


Рис. 3. Функція приналежності розходу середовища по площині валків

На рис.3 кривою представлено результати теоретичних розрахунків, а точками – дослідні дані. Аналіз характеру кривої засвідчує, що величина зазору впливає на розхід і відповідно на якість процесу. Раціональні значення зазору між валками, що забезпечує якісне розкачування тіста знаходиться в межах 3...4.2 мм. Слід зазначити, що порівняння експериментальних і дослідних даних добре корелюються.

В таблиці 1 наведено деякі характеристики тіста та заготовок за різних значень зазору й діаметру валків. Ці дані підтверджують раціональні значення зазору між валками, що отримані на основі теоретичного розрахунку.

Таблиця 1

Дослідні дані властивостей тіста після дії валків й формувального пристрою

№ п/п	n , Об./хв.	m_1 , кг.	G , питоме газоутворення	K^0	h , зазор між валками, мм.	W , вологість	ρ , кг/м ²	Температура
1.	1,2	0,0078	10	1,57	1	31,6	1,12	27
2.	1,2	0,0077	10	1,57	2	31,6	1,12	27
3.	1,2	0,0079	10,2	1,57	2,5	31,7	1,12	27,3
4.	1,2	0,0087	10,2	1,57	3	31,7	1,123	27,2
5.	1,2	0,0097	10,3	1,57	3,5	31,7	1,123	27,3
6.	1,2	0,0099	10,2	1,57	4,5	31,6	1,124	27,4
7.	1,2	0,0098	10,5	1,57	5,5	31,7	1,12	27,4

На наступному етапі досліджували функцію приналежності розходу $GG(h)$ по площині валків як нормовану величину. Інтервал зміни аргументу h : $h_0 = 1 \dots h_m = 7$:

$$GG(h)dh$$

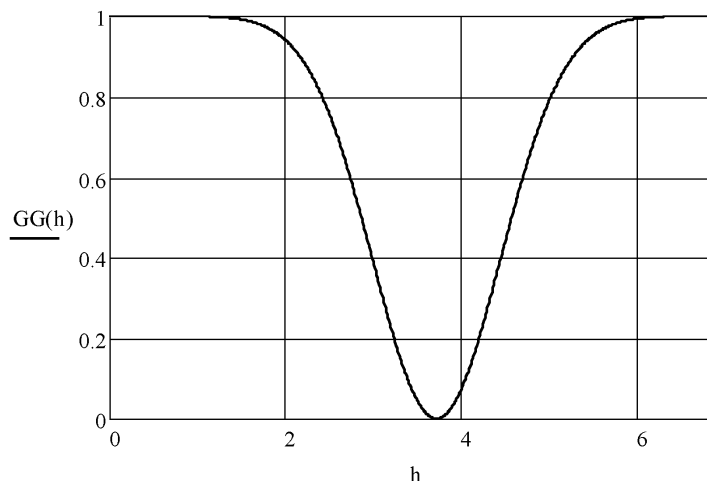
$$S = \int_{h_0}^{h_m}$$

$$S = 9.664$$

На рис.4 зображено залежність функції приналежності $GG(h)$.

$$GG(h) = \begin{cases} C(1-G(h)) & \text{if } 0 \leq h \leq 7 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

Отримані результати підтверджують правильність початкових умов прийнятих для встановлення залежності впливу зазору між валками по довжині на розхід робочого середовища.

Рис. 4. Функція $GG(h)$ розходу в'язкого середовища від величини зазору

2. Вплив радіуса валків.

Проводили дослідження параметрів функції приналежності швидкості розходу в'язкого середовища між валками відносно його радіуса. Фіксували положення точки О (рис.2) в мм. Функцію $GG(r)$ у площині валків шукали як нормовану величину. Принцип розрахунку був аналогічний як у пункті 1.

$$F_{\mu} = \begin{pmatrix} 155 & 158 & 161 & 167 & 170 & 175 \\ 0.14 & 0.36 & 0.68 & 0.66 & 0.32 & 0.11 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$n = \text{cols}(F_{\mu})$$

$$n = 7$$

$$B = 164$$

$$A = -0.1$$

Given
$$\sum_{i=0}^{n-1} (F_{\mu_{1,i}} - G(F_{\mu_{0,i}}, A, B))^2 = 0$$

$$\left(\frac{A_r}{B_r} \right) = Minerr(A, B)$$

$$\frac{A_r}{B_r} = \left(\frac{-0,032}{163,862} \right)$$

Отримуємо формулу залежності розходу середовища від параметру r

$$GG(r) = 0.99 \cdot e^{-0.032 \cdot (163.862 - r)}$$

(лістинг 2)

$$n = cols(\mu_m) \quad n = 7, B := 164, A := -0.1$$

Given

$$\sum_{i=0}^{n-1} (\mu_{m_i} - \mu(\mu_{m_{0,i}}, A, B))^2$$

$$\left(\frac{A_r}{B_r} \right) = Minerr(A, B)$$

$$\sum_{i=0}^{n-1} (\mu_{m_i} - \mu(\mu_{m_{0,i}}, A, B))^2$$

$$A_r = -0.032 \quad B_r = 163.862 \quad mm := \min[(\mu_m^T)^{(1)}] \quad mm = 0.11$$

$$\mu_m(r) := \mu(r, A_r, B_r) \quad n := cols(\mu_m)$$

$$I = 0 \dots n - 1 \quad r = 155, 155.1 \dots 175.$$

Проводимо перевірку нормування по стандарту і підбираємо CC у формулі функції приналежності, вибираючи інтервал зміни аргументу r : $r_0 = 155 \dots r_m = 175$.

$$r_0 = 155 \quad r_m = 175 \quad S = 9.689 \quad CC = 0.99 \quad \mu_m^r = CC \mu_m(r)$$

$$S = \int_{r_0}^{r_m} \mu_m(r) dr$$

Функцію приналежності розходу $GG(r)$ у площині валків шукаємо як нормовану величину. Проводимо перевірку нормування по стандарту $G=9.7$ і підбираємо CC у формулі функції приналежності, вибираючи інтервал зміни аргументу r : $r_0 = 155 \dots r_m = 175$. Отримуємо формулу залежності розходу середовища від параметру r :

$$GG(r) = 0.99 \cdot e^{-0.032 \cdot (163.862 - r)} \tag{6}$$

На основі проведених розрахунків побудуємо графіки функцій $F(\mu_h)$, $[G(h)]$ згідно даних (5) рис.5. На рис.5 кривою представлено теоретичні значення, а точками – дослідні дані. Відповідно до отриманих результатів раціональні значення діаметрів валків від 162...168 мм.

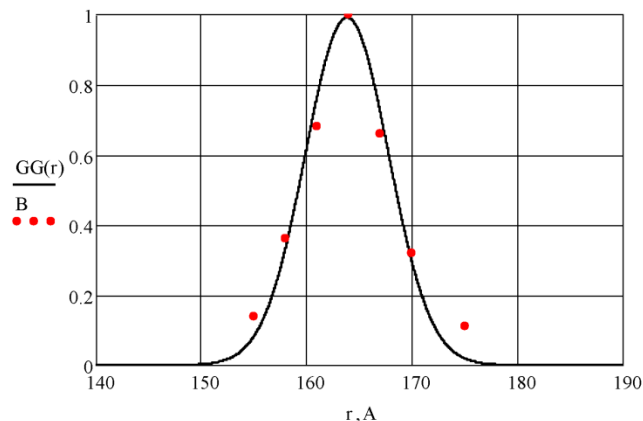


Рис. 5. Залежність розходу середовища від радіус-вектора точки середовища відносно осі валка

3. Комплексний вплив зазору h та радіус-вектора r .

Спільний вплив двох факторів виконували шляхом логічного добутку приналежностей через мінімізацію двох визначених функцій по двовимірній області двох факторів r та h .

$$G(h,r) = \min(GG(h), GG(r)),$$

Для забезпечення точності розрахунків вирішували питання грубозернистості аргументу шляхом вибору числа N – кількості точок поділу діапазону зміни r та h .

$$N=20 \quad i=0\dots N \quad j=0\dots N \quad r_1=155 \quad r_2=175 \quad h_1=0 \quad h_2=7$$

$$M_{i,j} = \mu_r h(r_i, h_j).$$

З практичних міркувань вибираємо підматрицю M усього масиву (r_i, h_j, M_{ij})

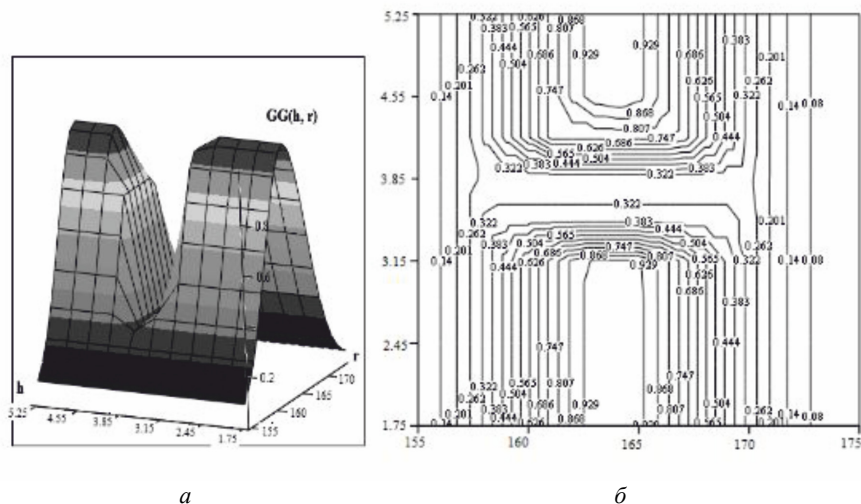
$$r_i = r_1 + (r_2 - r_1)i/N$$

$$h_j = h_1 + (h_2 - h_1)j/N$$

На рис. 6 наведено функціональні залежності розходу середовища залежно від r, i, h .

$$M_m = \min(M) = 0.019$$

$$M = \text{submatrix}(M, 0, 20, 5, 15)$$



теста, радіуса валков на G і комплексне воздействие этих двух параметров. На основе полученных зависимостей установлены рациональные параметры h і r .

Ключевые слова: трехфазная среда, валки, реология, деформация сдвига, тесто.

Design of optimal roll parameters for rolling the dough

I. Stadnyk, T. Vitenko

Abstract. The article defines rather complex and unpredictable movement of dough in the gap between the working rolls and suggests the calculation of the optimal parameters for shaping rolls, particularly the parameters and their effect on the dough. The functional dependences of the permissible diameter and the gap between rotating rollers are substantiated. The block diagram of the geometric bounding parameters of the gradient field of the viscous fluid flow is proposed herewith and the equation on the basic constructive parameters (h , r) affecting the pouring process efficiency is rolled.

The paper presents mathematical modeling of determining the power output over the rolling materials in the gap rotating rollers taking into account the rheological parameters of the final product. Determination of these parameters will reduce energy consumption, increase efficiency and reduce loss of material during production. This solution, proposed in the article, allows determination of the overall quality of the rolled product layer. Analysis of experimental results revealed that the main features of the machine provide the necessary stable shape products and provide good rheological parameters of these products. Rheological testing indicators allow for a rational approach to decision to operate a rolling process. At the same time they improve quality control methods and will have an impact on design parameters of rollers and chambers' modes. The proposed method not only allows obtaining a predetermined pressure, but also allows defining the optimal shape of the gap, wherein the pressure gradient is constant.

Keywords: three-phase medium, Rollers, Rheology, Shear strain, Dough.

References

1. Стадник І. Я. Моделювання руху змішуваних компонентів у камері безлопатевої тістомісильної машини / Ігор Ярославович Стадник. 2011. – (№2).
2. Мачихин Ю. А. Формование пищевых масс / Ю. А. Мачихин. 1992. – 272 с.
3. Мачихин Ю. А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю. А. Мачихин. 1981. – 216 с.
4. Николаев Б. А. Структурно-механические свойства мучного теста / Б. А. Николаев. 1976. – 247 с.
5. Кафаров В. В. Системный анализ процессов химической технологии. / В. В. Кафаров. 1976. – 300 с.
6. Обчислювальне моделювання тістового покриття і фізичної інтерпретації нелінійної реологічної поведінки тіста пшеничного борошна / S.Chakrabarti, J. S. Bergström, E. Lindskog, T. Sridhar
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.04.010>
7. Прокатка хлібного тіста: експерименти та моделювання. Переробка продуктів харчування та біопродуктів/ Evan Mitsoulis, Savvas G. Hatzikiriakos, (2009).
8. Holzapfel, G.A., Нелінійна механіка твердого тіла: континуальний підхід до інженерії/ Holzapfel, G.A., (2000), Нью-Йорк.
9. Простий підхід до прогнозування товщини тіста/ Qi, F., Dai, S.C., Newberry, M.P., Love, R.J., & Tanner, R.I., (2008).
10. Захисне тісто пшеничного борошна/ Xiao, W., Charalambides, M., & Williams, J.G., 2007, no. 42, P. 699–707.