

УДК 536.24

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССА БИОКОНВЕКЦИИ В НАНОЖИДКОСТЯХ И ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Дмитренко Н.П., канд. техн. наук

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03580, Украина

Розглянено основні аспекти процесу біоконвекції в нанорідинах та пористих середовищах. Проаналізовано властивості різних мікроорганізмів. Наведено загальну математичну модель для розрахунку теплообміну та гідродинаміки процесу біоконвекції.

Рассмотрено основные аспекты процесса биоконвекции в наножидкостях и пористых средах. Проанализированы свойства различных микроорганизмов. Приведено общую математическую модель для расчета теплообмена и гидродинамики процесса биоконвекции.

The main aspects of the bioconvection process in nanofluids and porous media are considered. The properties of different microorganisms are analyzed. A general mathematical model for the calculation of the heat exchange and hydrodynamics of the bioconvection process is given.

Библ. 33.

Ключевые слова: биоконвекция, наножидкость, пористая среда, бактерии.

Введение

Биоконвекция является одной из бурноразвивающихся областей науки на стыке теплофизики, гидромеханики и биологии. Процесс биоконвекции состоит в движении жидкой среды, которое обусловлено направленным потоком микроорганизмов, приводящим к перераспределению плотности среды. В результате этого возникают гидродинамические процессы в среде, подобные процессам естественной конвекции при наличии температурных градиентов. Первые детальные наблюдения биоконвективных потоков микроорганизмов были проведены Х. Вагером в начале XX столетия [1]. Через пятьдесят лет подобные исследования были возобновлены Дж. Р. Платтом [2], который и ввел термин «биоконвекция».

Множество процессов в микробиологической, пищевой, химической и фармацевтической промышленности происходят в условиях интенсивной биоконвекции, поэтому ее изучение носит важный прикладной характер. Например, процессы ферментации [3] сопровождаются интенсивным перемешиванием питательного воздуха со средой микроорганизмов. И для выбора оптимальных режимных параметров ферментации важны исследования различных теплофизических эффектов, особенностей движения и массопереноса микроорганизмов – т.н. биоконвекции.

Некоторые технологические и промышленные процессы требуют понимания механизма бактериального движения и роста биопленок в пористой среде. Такой процесс актуален при развитии технологии микробиологической добычи нефти, где важную роль играет взаимодействие между биоконвекцией и естественной конвекцией.

Кроме того, концепция наножидкостной биоконвекции также имеет широкий круг применений при обработке наноматериалов и создании автомобильных охладителей.

Так как биоконвекция рассматривает поток бактерий и морских водорослей, то следует отметить, что

микроорганизмы имеют большую плотность, чем вода: морские водоросли приблизительно на 5% плотнее, бактерии – почти на 10%. И их подъемное движение обычно вызвано реакцией на внешнее силовое поле тяжести или биохимический стимул. Количество самодвижущихся микроорганизмов [4] в одном кубическом сантиметре может быть очень большим – 10^7 для режима с низкой концентрацией микроорганизмов (когда взаимодействием между отдельными микроорганизмами можно пренебречь) и 10^{11} для «турбулентного» режима, когда микроорганизмы практически плотно упакованы.

Целью данной статьи является анализ исследований по процессам биоконвекции для определения актуальных задач в этой области науки на сегодняшний день.

Классификация микроорганизмов

Микроорганизмы, которые берут участие в процессах биоконвекции, двигаются в определенном направлении вследствие изменения внешних воздействий и в зависимости от этого их разделяют на [5]: хемотаксические, фототаксические, гиротаксические, окситаксические.

Бактерии хемотаксис движутся в результате наличия химических раздражителей и способны двигаться по направлению зачастую к питательным веществам и от токсинов.

В [6] авторы исследовали динамику развития процесса двумерной фототаксической биоконвекции в суспензии. При этом они используют общую модель Винсента и Хилла [7]. Расчетная система уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости была дополнена уравнением для концентрации микроорганизмов, что дало возможность провести серии численных экспериментов, которые показывают переход от стационарного состояния расчетного объекта к периодическим колебаниям и обратно.

Свойство клеток и микроорганизмов ориентироваться и двигаться по направлению к или от источника света, характерное, прежде всего, фототрофным организмам. А такой биоконвективный процесс называют

фототаксис. Существует как положительный фототаксис – движение происходит в направлении к источнику света – осуществляется за счет светочувствительных глазков и жгутиков, так и отрицательный фототаксис – движение идет в противоположном направлении.

Гиротаксис микроорганизм, который движется под гиротаксией, определяется разностью гравитационных и вязких крутящих моментов. Центр массы гиротактического микроорганизма смещается из центра в отрицательном направлении. При гиротаксисе микроорганизм поворачивается так, что он плавает к регрессиям наиболее быстрого падения.

Гхораи и Хилл представили ряд исследований по процессам осесимметричной биоконвекции для гиростатических микроорганизмов [8, 9]. Проведено подробное сравнение результатов по осесимметричной и двумерной биоконвекции. в трехмерном приближении. Полученные результаты указывают на то, что, трехмерные результаты ближе к экспериментальным наблюдениям. Процесс влияния гиротаксичных микроорганизмов на устойчивость системы исследовано в [10].

Микроорганизмы окситаксис, которые проявляют сильное окситактическое поведение (они плавают в областях с более высокой концентрацией кислорода). Например, бактерии, такие как *Bacillus subtilis*, должны потреблять кислород, чтобы они могли дышать. Поэтому присутствие такого типа бактерий требует, чтобы уровень концентрации кислорода внутри жидкости был на достаточно высоком уровне.

Теория окситактической биоконвекции была разработана Хилесдоном и другими в [11 – 14]. Также Кузнецов и Авраменко в [15, 16] исследовали взаимодействие биоконвекции, вызванной подвижными окситактическими микроорганизмами.

Биоконвекция в наножидкостях

Как известно наножидкость представляет собой новый класс теплоносителей, который содержит основную жидкость и твердые наночастицы диаметром 1...100 нм. В наножидкостях обычно используют наночастицы металлов или оксидов металлов, таких как медь и оксид алюминия, а основной жидкостью обычно является вода или этиленгликоль. Нанофлюиды обычно содержат до 5% наночастиц (например, золота, меди, титана, алюминия).

Использование добавок (твердых наночастиц) применяется для повышения теплопроводности и конвективной теплопередачи основной жидкости. Таким образом, нанофлюиды имеют множество применений в промышленности, таких как охлаждающие жидкости, смазки, теплообменники, микроканальные радиаторы и многие другие.

Биоконвекция внутри наножидкости стала актуальной областью исследовательской работы из-за ее основных применений в биомикросистеме, биосенсоров, микроустройств для измерения токсичности наночастиц. Для малых концентраций наночастиц биоконвекция происходит в наножидкости, где наночастицы существенно не повышают вязкость основной жидкости. На-

ночастицы не являются самоходными, и они движутся из-за броуновского движения и термофореза и управляются потоком жидкости.

В [17 – 20] рассмотрены эффекты плавучести, броуновского движения, термофореза и химической реакции на биоконвекцию наножидкостного гиростатического микроорганизма. В ходе исследования установлено, что уменьшение броуновского движения повышает концентрацию объемной жидкости, в то время как термофорез уменьшает ее. Авторы [17, 18] основное внимание уделяют поведенческим характеристикам гиротактических микроорганизмов для описания их роли в тепло- и массопереносе в присутствии магнитогидродинамических сил. Цель использования микроорганизмов в обозначенной системе заключается, прежде всего, в стабилизации суспензии наночастиц из-за биоконвекции, вызванной совместными эффектами сил плавучести и магнитного поля.

В [19] рассмотрено влияние термофореза и броуновского движения пылевой наножидкости на тепловые характеристики биоконвективного потока. Используя метод конечных разностей, получены графические распределения для коэффициента трения стенки, скорости передачи тепла, скорости движения потока и температуры, линии тока и изотермы.

Взаимодействию наножидкости с биоконвекцией посвящено ряд работ Кузнецова [21-23]. В [21] исследована возможность колебательного режима неустойчивости в суспензии наножидкости, содержащей окситатные микроорганизмы. Определено, что дестабилизирующее воздействие микроорганизмов больше, если их концентрация в суспензии увеличивается. Концентрация микроорганизмов измеряется по числу биорегуляции Рэлея. Таким образом, увеличение указанного числа дестабилизирует суспензию. Также показано, что присутствие микроорганизмов увеличивает критическое волновое число.

Суммарное воздействие на начало биотермической конвекции в суспензии, наночастиц, гиростатических микроорганизмов и водорослей рассмотрено в [23]. Проведен линейный анализ неустойчивости, что дало возможность установить границы колебательной неустойчивости.

Биоконвекция и пористые среды

Несмотря на значительное число публикаций по биоконвекции, биологические процессы в пористых средах – относительно новая область исследования. Особенно большой исследовательский вклад в расширение понятия динамики процессов в пористых телах внесли Кузнецов, Нилд, Авраменко в [24-27] и других работах. Биоконвекция в пористых средах – это сложный динамический процесс. Механизм биоконвекции в пористых средах отличается от конвекции микроорганизмов в гомогенной жидкости. Одна из отличительных черт биоконвекции в пористых средах заключается в том, что микроорганизмы могут адсорбироваться пористой средой. С другой стороны, адсорбированные микроорганизмы могут «отрываться» от пористой матрицы

и возвращаться в поток. Накопление микроорганизмов в пористой матрице ведет к уменьшению проницаемости пористой среды. Это уменьшение проницаемости воздействует на способность микроорганизмов проникать через микроканалы. Поэтому, адсорбция микроорганизмов пористой средой воздействует на интенсивность развития биоконвекции. Понимание механизма бактериального движения и роста биопленок в пористой среде – ключ для регулирования и управления некоторыми технологическими и индустриальными процессами.

В [24] авторы исследовали начало гиростатической биоконвекции в флюидах и пористых слоях. В [25] представлено континуальную модель термо-биоконвекции окислительных бактерий в пористой среде для исследования эффекта нагревания микроорганизмов снизу на устойчивость среды в горизонтальном слое, заполненном флюидом, насыщенным пористой средой. Использование метода Галеркина для решения задачи линейной устойчивости дало возможность получить зависимости между критическим значением числа Рэлея и «термическим» числом Рэлея.

Исследовано влияние вертикального потока на начало биоконвекции в суспензии гиростатических микроорганизмов в пористой среде в [26]. Линейный анализ неустойчивости позволил получить уравнение для критического числа Рэлея. Авторы показали, что вертикальный сквозной поток стабилизирует рассматриваемую систему.

Нильд и Кузнецов в [27] рассмотрели задачу Чэна и Минковича для конвективного потока в пористой среде, заполненной наножидкостью, с учетом комбинированного влияния на тепло- и массоперенос термофореза и броуновского движения. При этом авторы использовали модель Бонжорно.

В книге [28] выведены критерии устойчивости биоконвекции гиростатических микроорганизмов в пористых средах. Установлено, что существует критическая проницаемость пористой среды, превышение которой приводит к развитию биоконвекции, а если проницаемость меньше критической, то она подавляется.

Исследования [29-31] были направлены на изучение потока пограничных слоев естественной конвекции наножидкостей над вертикальной плоской пластиной, встроенной в насыщенную пористую среду Дарси, содержащую гиротактические микроорганизмы. В ходе численного решения проанализированы эффекты безразмерных параметров, т. е. числа Льюиса биоконвекции, числа Рэлея биоконвекции, числа Пекле биоконвекции, параметра броуновского движения, коэффициента плавучести, параметра термофореза, индекса изменения степенного закона и числа Льюиса на характеристики потока процесса биоконвекции. Показано, что скачкообразное распределение скоростей и температур сильно зависит от значения показателя Рэлея и параметра изменения степенного закона биоконвекции.

В [32] предложена математическая модель для стационарного пограничного слоя потока наножидкости возле непроницаемой вертикальной плоской стенки в пористой среде, насыщенной наножидкостью и

содержащей окислительные микроорганизмы. Используя предложенную методику выявлено, что концентрация и температура наночастиц обычно повышаются через пограничный слой с увеличением числа Льюиса с биоконвекцией, тогда как безразмерная плотность подвижного микроорганизма только увеличивается ближе к стенке. Температура, концентрация наночастиц и безразмерная плотность подвижного микроорганизма были значительно увеличены с ростом числа Пекле. Температурная и безразмерная плотность подвижного микроорганизма были снижены с увеличением параметра плавучести, тогда как концентрация наночастиц была увеличена.

Математическая модель для расчета биоконвекции

Для того чтобы моделировать процессы биоконвекции необходимо учитывать количество самодвижущихся организмов в рассматриваемой системе. Как уже было отмечено, существует режим с низкой концентрацией микроорганизмов, когда пренебрегается взаимодействие между микроорганизмами и режим с высокой концентрацией, когда течение имеет довольно сложную картину.

Известно, что под действием молекулярного движения микроорганизмы поднимаются в верхний слой жидкости. Когда плотность верхнего слоя (из-за высокой концентрации микроорганизмов) становится больше критической, стационарная структура жидкости становится гидродинамически неустойчивой. В результате возникновения неустойчивости системы, возникает конвективное движение жидкости т.е. происходит процесс биоконвекции.

При моделировании биоконвективных процессов также важно обратить внимание на то, что движение индивидуальной бактерии не полностью определено, а содержит случайный компонент. Поэтому в основных уравнениях должны фигурировать стохастические члены. Определение надлежащей функциональной формы и величины этих стохастических членов – вероятно наиболее сложная часть в создании континуальной модели биоконвекции.

Рассмотрим основные уравнения для процесса биоконвекции в пористой среде. Так как процессы биоконвекции в пористых средах динамически достаточно сложные, то для их моделирования необходимо удовлетворить некоторые условия. Во-первых, пористый материал должен быть полностью насыщен жидкостью, в которой могут плавать микроорганизмы. Поры материала должны быть достаточно большими для биологических организмов и для их перемещения.

Предполагается, что твердая пористая матрица не поглощает микроорганизмы и что суспензия разбавлена, а также, что каждый микроорганизм имеет тот же объем и общую форму и он плавает с одинаковой скоростью.

Модель биоконвекции включает уравнения движения, массообмена для несжимаемой жидкости и уравнения сохранения микроорганизмов.

Для чистой жидкости (без пористой матрицы) уравнение движения имеет вид:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - N_m v \Delta \rho g - N_p v \Delta \rho g, \end{aligned} \quad (1)$$

где u, v, w – компоненты скорости, p – давление, N_m – концентрация микроорганизмов, N_p – концентрация наночастиц, v – средний объем микроорганизма.

В случае с пористой средой система (1) записывается в следующем виде, при этом в качестве сопротивления используется закон Дарси для пористых сред [33].

$$\begin{aligned} c_a \rho \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\mu u}{K}, \\ c_a \rho \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\mu v}{K}, \\ c_a \rho \frac{\partial w}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\mu w}{K} - N_s v \Delta \rho g, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial N_s}{\partial t} &= -\text{div}(N_s \bar{V} + N_s W_c \bar{s} - D \text{grad} N_s) - R_a, \\ \frac{\partial N_c}{\partial t} &= R_a, \end{aligned} \quad (2)$$

где D – коэффициент диффузии микроорганизмов (предполагается, что все случайные передвижения микроорганизмов могут быть учтены процессом диффузии), c_a – коэффициент ускорения, N_c – концентрация адсорбированных микроорганизмов пористым материалом, N_s – концентрация движущихся микроорганизмов, $\Delta \rho = \rho_m - \rho$, K – проницаемость пористой среды, которая определяется уравнением Кармана-Козени [33]

$$K = \frac{d^2 \phi^3}{180(1-\phi)^2}. \quad (3)$$

Здесь ϕ – пористость среды связанная с концентрацией адсорбированных микроорганизмов следующим соотношением

$$\phi = \phi_0 - N_c v, \quad (4)$$

где d – эффективный диаметр волокон, составляющих пористую среду, ϕ – начальная пористость, когда отсутствуют адсорбированные микроорганизмы $N_c = 0$. Скорость адсорбции определяется следующим выражением:

$$R_a = k_a N_s - k_d N_c, \quad (5)$$

где k – коэффициент, характеризующий скорость адсорбции микроорганизмов, k_d – коэффициент, характеризующий скорость десорбции микроорганизмов.

Выводы

На основе проведенного анализа публикаций по биоконвекции классифицированы свойства основных видов бактерий принимающих участие в указанном процессе. Изложены общие аспекты процесса биоконвекции в наножидкостях и в пористых средах и приведена континуальная математическая модель, которая позволяет анализировать влияние различных параметров на динамику системы. Также анализ публикаций указывает на то, что комбинированное влияние микроорганизмов, наночастиц, пористой среды и переменных теплофизических свойств, представляет интересную для дальнейших исследований проблему динамики жидкости в различных технологических процессах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wager H. On the effect of gravity upon the movements and aggregation of *Euglena viridis*, Ehbr., and other microorganisms // Phil. Trans. Roy. Soc. London. – 1911. – В. 201. – P. 333–390.
2. Platt J.R. “Bioconvection patterns” in cultures of the swimming organisms // Science. – 1961. – V.133. – P. 441–443.
3. Долинский А.А., Авраменко А.А., Басок Б.И., Кузнецов А.В. Биоконвективные эффекты в процессах ферментации // Пром. теплотехника. – 2005. – Т. 27. N 5. – С. 5 – 10.
4. Авраменко А.А., Басок Б.И., Кузнецов А.В., Тыринов А.И. Турбулентная биоконвекция // Доповіді національних академії наук України. – 2008. №1, С. 76–82.
5. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B0%D0%BA%D1%81%D0%B8%D1%81>
6. Ghorai S., Hill N.A. Penetrative phototactic bioconvection // Physics of fluids. – 2005. – V.17, 074101.
7. Vincent R.V., Hill N.A. Bioconvection in a suspension of phototactic algae // J. Fluid Mech. –1997. – V. 327. – P. 343–371.
8. Ghorai S., Hillz N.A. Axisymmetric Bioconvection in a cylinder // J. theor. Biol. – 2002. V. 219. P. 137–152.
9. Ghorai S., Hill N.A. Gyrotactic bioconvection in three dimensions // Physics of fluids. – 2007. – V. 19. – 054107
10. Kuznetsov A.V., Avramenko A.A. Effect of small particles on the stability of bioconvection in a suspension of gyrotactic microorganisms in a layer of finite depth // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2004. – 31, N 1. – P. 1 – 10.
11. Hillesdon A.J., Pedley T.J. Bioconvection in suspensions of oxytactic bacteria: linear theory // J. Fluid Mech. – 1996. – V. 324. –P. 223–259.
12. Hillesdon A.J., Pedley T.J., Kessler J.O. The development of concentration gradients in a suspension of chemotactic bacteria // Bull. Math. Biol. – 1995. – V. 57. –

P. 299–344.

13. *Metcalf M., Pedley T.J.* Bacterial bioconvection: weakly nonlinear theory for pattern selection // *J. Fluid Mech.* – 1998. V. 370 – P. 249–270.

14. *Metcalf M., Pedley T.J.* Falling plumes in bacterial bioconvection // *J. Fluid Mech.* – 2001. – V. 445. – 121–149.

15. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V.* Bio-thermal convection caused by combined effects of swimming of oxytactic bacteria and inclined temperature gradient in a shallow fluid // *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow.* – 2010. – Vol. 20. – No.2. P. 157–173.

16. *Kuznetsov A.V.* Investigation of the onset of thermo-bioconvection in a suspension of oxytactic microorganisms in a shallow fluid layer heated from below // *Theoretical and Computational Fluid Dynamics.* October 2005, Volume 19. – Issue 4. – P. 287–299.

17. *Faiza N., Anum S., Lifeng Z., Anum N.* MHD biconvective flow of Powell Eyring nanofluid over stretched surface // *Aip Advances.* – 2017. – V.7. 065013

18. *Makinde O.D., Animasaun I.L.* Thermophoresis and Brownian motion effects on MHD bioconvection of nanofluid with nonlinear thermal radiation and quartic chemical reaction past an upper horizontal surface of a paraboloid of revolution // *Journal of Molecular Liquids.* – 2016. V.221. P. 733–743.

19. *Naheed B., Sadia S., Sulaiman Z., Islam R., Hossain M.A., Gorla R.S.* Numerical Solutions for Gyrotactic Bioconvection of Dusty Nanofluid along a Vertical Isothermal Surface // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2017. V. 113, P. 229–236.

20. *Naheed B., Sadia S., Hossain M.A.* Influence of Variable Thermophysical Properties on Nanofluid Bioconvection along a Vertical Isothermal Cone // *International Journal of Heat and Mass Transfer* Volume. – 2016. – № 552. – P. 229–236.

21. *Kuznetsov, A.V.* The onset of nanofluid bioconvection in a suspension containing both nanoparticles and gyrotactic microorganisms // *Int. Commun. Heat Mass Transfer.* – 2010. – V. 37. – P. 1421–1425.

22. *Kuznetsov A.V.* Nanofluid bioconvection in water-based suspensions containing nanoparticles and oxytactic microorganisms: oscillatory instability // *Nanoscale Research Letters* December. – 2011. – 6.: – 100.

23. *Kuznetsov A.V.* Non-oscillatory and oscillatory

nanofluid bio-thermal convection in a horizontal layer of finite depth // *Eur. J. Mech. B.Fluids.* – 2011. – V. 30. – P. 156–165.

24. *Kuznetsov A.V., Avramenko A.A.* Effect of Fouling on Stability of Bioconvection of Gyrotactic Microorganisms in a Porous Medium // *Journal of Porous Media.* – 2005. – V. 8. – P. 45 – 53.

25. *Kuznetsov A.V.* The onset of thermo-bioconvection in a shallow fluid saturated porous layer heated from below in a suspension of oxytactic microorganisms // *Eur. J. Mech. B/Fluids.* – 2006. V.25. P. 223–233.

26. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V.* The Onset of Convection in a Suspension of Gyrotactic Microorganisms in Superimposed Fluid and Porous Layers: Effect of Vertical Throughflow // *Transport in Porous Media.* – 2006. –V. 65, – P. 159–176.

27. *Kuznetsov A.V., Nield D.A.* The Cheng–Minkowycz problem for natural convective boundary layer flow in a porous medium saturated by a nanofluid: A revised model // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2013. – V. 65. – P. 682–685.

28. *Kambiz Vafai* Porous media Handbook of Edited by 2005 by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press, p. 742.

29. *Mahdy A.* Gyrotactic Microorganisms Mixed Convection Nanofluid Flow along an Isothermal Vertical Wedge in Porous Media // *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering.* –2017. – V.11, – No.4. – 2017 P. 829–839.

30. *Mahdy A.* Free Convection Flow Over a Vertical Flat Plate in Nanofluid Porous Media Containing Gyrotactic Microorganisms with Prescribed Density Motile Microorganisms Flux // *Thammasat International Journal of Science and Technology.* 2017. – Vol.22, No.2. – P. 91–105.

31. *Mahdy A., Sameh E. Ahmed.* Laminar Free Convection Over a Vertical Wavy Surface Embedded in a Porous Medium Saturated with a Nanofluid // *Transport in Porous Media.* – 2012, V. 91, Issue 2, P. 423–435

32. *Anvar Beg O., Prasad V.R., Vasu B.* Numerical study of mixed bioconvection in porous media saturated with nanofluid containing oxytactic microorganisms // *Journal of Mechanics in Medicine and Biology.* – 2013. – V.13, Issue 04, P. 1350067-1 – 1350067-25.

33. *Nield D.A., Bejan A.* Convection in porous media. – NY: Springer-Verlag, 1999.

MAIN ASPECTS OF THE PROCESS OF BIOCONVECTION IN NANOFUIDS AND POROUS MEDIA

Dmitrenko N.P.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, st. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680 Ukraine

Bioconvection is one of the rapidly developing fields of science at the junction of thermophysics, hydromechanics and biology. The process of bioconvection consists in the movement of a liquid medium, which is caused by a directed flow of microorganisms, leading to a redistribution of the density of the medium. As a result, hydrodynamic processes occur in the medium, similar to the processes of natural convection in the presence of temperature gradients. Based on the analysis of publications on bioconvection, the properties of the main species of bacteria participating in the bioconvection process are classified. The general aspects of the bioconvection process in nanofluids and in porous media are described. The continuum mathematical model that allows analyzing the influence of various parameters of bioconvection is given. Also, the analysis of publications indicates that the combined effect of microorganisms, nanoparticles, porous media and variable thermophysical properties, is an interesting problem of fluid dynamics in various technological processes.

References 33.

Key words: Bioconvection, nanofluid, porous media, bacteria.

1. *Wager H.* On the effect of gravity upon the movements and aggregation of *Euglena viridis*, Ehbr., and other microorganisms. *Phil. Trans. Roy. Soc. London.* 1911. B. 201. P. 333–390.

2. *Platt J.R.* “Bioconvection patterns” in cultures of the swimming organisms. *Science.* 1961. V.133. P. 441–443.

3. *Dolinskyu A.A., Avramenko A.A., Basok B.I., Kuznetsov A.V.* Biokonvektivnye efekty v procesah fermentatsii. [Bioconvective effects in fermentation processes], *Promyshlennaya teplotehnika.* [Promyshlennaya teplotehnika]. 2005, V.27, №5. p.5 – 8. (Rus).

4. *Dolinskyu A.A., Avramenko A.A., Basok B.I., Turinov A.I.* Turbulentnaya bioconveksiya. [Turbulent bioconvection]. *Dopovidi natsionalnoi akademii nauk Ukrainu.* [Dopovidi natsional'noyi akademii nauk ukrayiny]. 2008, №1, p. 76-82. (Rus).

5. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B0%D0%BA%D1%81%D0%B8%D1%81>

6. *Ghorai S., Hill N.A.* Penetrative phototactic bioconvection. *Physics of fluids.* 2005. V.17, 074101.

7. *Vincent R.V., Hill N.A.* Bioconvection in a suspension of phototactic algae. *J. Fluid Mech.* 1997. V. 327. P. 343–371.

8. *Ghorai S., Hillz N.A.* Axisymmetric Bioconvection in a cylinder. *J. theor. Biol.* 2002. V. 219. P. 137–152.

9. *Ghorai S., Hill N.A.* Gyrotactic bioconvection in three dimensions. *Physics of fluids.* 2007. V. 19. – 054107

10. *Kuznetsov A.V., Avramenko A.A.* Effect of small particles on the stability of bioconvection in a suspension of gyrotactic microorganisms in a layer of finite depth. *International Communications in Heat and Mass Transfer.* 2004. 31, N 1. P. 1 – 10.

11. *Hillesdon A.J., Pedley T.J.* Bioconvection in suspensions of oxytactic bacteria: linear theory. *J. Fluid Mech.* 1996. V. 324. P. 223–259.

12. *Hillesdon A.J., Pedley T.J., Kessler J.O.* The development of concentration gradients in a suspension of chemotactic bacteria. *Bull. Math. Biol.* 1995. V. 57. P. 299–344.

13. *Metcalfe M., Pedley T.J.* Bacterial bioconvection: weakly nonlinear theory for pattern selection. *J. Fluid Mech.* 1998. V. 370 P. 249–270.

14. *Metcalfe M., Pedley T.J.* Falling plumes in bacterial bioconvection. *J. Fluid Mech.* 2001. V. 445. p. 121–149.

15. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V.* Bio-thermal convection caused by combined effects of swimming of oxytactic bacteria and inclined temperature gradient in a shallow fluid. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow.* 2010. Vol. 20. No.2. P. 157–173.

16. *Kuznetsov A.V.* Investigation of the onset of thermo-bioconvection in a suspension of oxytactic microorganisms in a shallow fluid layer heated from below. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics.* October 2005, Volume 19. Issue 4. P. 287–299.

17. *Faiza N., Anum S., Lifeng Z., Anum N.* MHD biconvective flow of Powell Eyring nanofluid over stretched surface. *Aip Advances.* 2017. V.7. 065013

18. *Makinde O.D., Animasaun I.L.* Thermophoresis and Brownian motion effects on MHD bioconvection of nanofluid with nonlinear thermal radiation and quartic chemical reaction past an upper horizontal surface of a paraboloid of revolution. *Journal of Molecular Liquids.* 2016. V.221. P. 733–743.

19. *Naheed B., Sadia S., Sulaiman Z., Islam R., Hossain M.A., Gorla R.S.* Numerical Solutions for Gyrotactic Bioconvection of Dusty Nanofluid along a Vertical Isothermal Surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2017. V. 113, P. 229–236.

20. *Naheed B., Sadia S., Hossain M.A.* Influence of Variable Thermophysical Properties on Nanofluid Bioconvection along a Vertical Isothermal Cone. *International Journal of Heat and Mass Transfer Volume.* 2016. № 552. – P. 229–236.

21. *Kuznetsov, A.V.* The onset of nanofluid bioconvection in a suspension containing both nanoparticles and gyrotactic microorganisms. *Int. Commun. Heat Mass Transfer.* 2010. V. 37. – P. 1421–1425.

22. *Kuznetsov A.V.* Nanofluid bioconvection in water-based suspensions containing nanoparticles and oxytactic microorganisms: oscillatory instability. *Nanoscale Research Letters* December. 2011. 6 – 100.

23. *Kuznetsov A.V.* Non-oscillatory and oscillatory nanofluid bio-thermal convection in a horizontal layer of finite depth. *Eur. J. Mech. B.Fluids.* 2011. V. 30. P. 156–165.

24. *Kuznetsov A.V., Avramenko A.A.* Effect of Fouling on Stability of Bioconvection of Gyrotactic Microorganisms

in a Porous Medium. *Journal of Porous Media*. 2005. V. 8. P. 45 – 53.

25. *Kuznetsov A.V.*, The onset of thermo-bioconvection in a shallow fluid saturated porous layer heated from below in a suspension of oxytactic microorganisms. *Eur. J. Mech. B.Fluids*. 2006. V.25. P. 223–233.

26. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V.* The Onset of Convection in a Suspension of Gyrotactic Microorganisms in Superimposed Fluid and Porous Layers: Effect of Vertical Throughflow. *Transport in Porous Media*. 2006. V. 65, P. 159–176.

27. *Kuznetsov A.V., Nield D.A.* The Cheng–Minkowycz problem for natural convective boundary layer flow in a porous medium saturated by a nanofluid: A revised model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013. V. 65. P. 682–685.

28. *Kambiz Vafai Porous media Handbook* of Edited by 2005 by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press, p. 742.

29. *Mahdy A.* Gyrotactic Microorganisms Mixed Convection Nanofluid Flow along an Isothermal Vertical

Wedge in Porous Media. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*. 2017. V.11, No.4. 2017 P. 829–839.

30. *Mahdy A.* Free Convection Flow Over a Vertical Flat Plate in Nanofluid Porous Media Containing Gyrotactic Microorganisms with Prescribed Density Motile Microorganisms Flux. *Thammasat International Journal of Science and Technology*. 2017. Vol.22, No.2. P. 91–105.

31. *Mahdy A., Sameh E. Ahmed.* Laminar Free Convection Over a Vertical Wavy Surface Embedded in a Porous Medium Saturated with a Nanofluid. *Transport in Porous Media*. 2012, V. 91, Issue 2, P. 423–435

32. *Anvar Beg O., Prasad V.R., Vasu B.* Numerical study of mixed bioconvection in porous media saturated with nanofluid containing oxytactic microorganisms.

Journal of Mechanics in Medicine and Biology. 2013. V.13, Issue 04, P. 1350067-1 – 1350067-25.

33. *Nield D.A., Bejan A.* Convection in porous media. NY: Springer-Verlag, 1999.

Получено 27.09.2017

Received 27.09.2017