

# ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ ENERGY TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

УДК 662.767.2 : (537.212 + 537-962)

Ю.Г. Качан, д-р техн. наук, проф., В.Л. Коваленко, канд. техн. наук, доц., О.І. Лапікова  
Запорізька державна інженерна академія

## ЩОДО ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ ТА МІКРОХВИЛЬОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ЗАДІЯНІ В БІОМЕТАНОГЕНЕЗІ МІКРООРГАНІЗМИ

*Проаналізовано стан сучасних досліджень щодо впливу електричних полів та мікрохвильового випромінювання на мікроорганізми. Узагальнено інформацію, отриману вітчизняними та іноземними науковцями в результаті експериментів над групами бактерій та дріжджів, що задіяні в біометаногенезі. Проаналізовано можливість стимуляції життєдіяльності мікроорганізмів, задіяних в біометаногенезі, та, як наслідок, збільшення виходу біогазу за рахунок впливу на субстрат електричних полів або мікрохвильового випромінювання. Встановлено існування залежності біологічних ефектів від параметрів зазначеного впливу: напруженості, частоти, форми імпульсу, типу модуляції і тривалості. В результаті проведеного аналізу виявлено безсистемність та вибірковість попередніх досліджень і необхідність подальшого уточнення параметрів інтенсифікації біометаногенезу на кожному його етапі, оптимальних з точки зору енергоефективності.*

**Ключові слова:** біогаз, біометаногенез, електричне поле, мікрохвильове випромінювання, мікроорганізми, бактерії

**Вступ.** Через дефіцит паливних ресурсів особливо гостро постає питання розвитку нетрадиційної, а зокрема біогазової енергетики як одного з найбільш перспективних її напрямків.

На даний момент біогазові установки потребують великих енергозатрат для забезпечення власних потреб, що значно знижує їх ефективність. Традиційні методи стимуляції процесу біометаногенезу практично вичерпали себе [1], тому в [2] запропоновано підвищувати продуктивність метантенків використанням електромагнітних полів. Дослідження іноземних та вітчизняних науковців довели, що мікроорганізми, які беруть участь у виробництві біогазу на всіх етапах біометаногенезу, чуйно реагують на такий вплив. Одним з основних напрямів в цій області є експерименти з використанням електричних полів різного характеру та інтенсивності.

**Мета та завдання.** Систематизувати та узагальнити інформацію, отриману вітчизняними та іноземними науковцями в результаті експериментів над різними групами бактерій і дріжджів з використанням електричних полів та мікрохвильового випромінювання. Дослідити можливість інтенсифікації біометаногенезу та підвищення ефективності біогазових установок за рахунок запропонованого методу впливу.

**Матеріал і результати досліджень.** Застосування як об'єкту дослідження бактерій *E.coli* під впливом імпульсних електричних полів задля підвищення оборотної проникності мембран, інтенсифікації поглинання і виділення клітинних речовин показало прискорення цих процесів на 140%, про що в своїх роботах повідомили Д. Чанг та ін. [3]. Також подібний ефект для *Trichoderma reesei* відзначили Г. Кернс та ін. [4]. Дія електричного поля в статичному і змінному режимі також була досліджена для різного роду дріжджів. Так, поведінка *Saccharomyces Cerevisiae* відрізнялася у порівнянні з контрольною культурою максимальним зростанням на 100% при напруженості 0,85 кВ/см [5], а *Actinomyces Eubacterium* і *Streptomyces noursei* при 1,5 мВ/см стрімко розвивалися тільки протягом перших 50 годин від початку впливу, хоча весь час досліду спостерігалось збільшення рівня споживання кисню та утилізації глюкози [6].

Електростимуляція також може використовуватися для підвищення ефективності підкормки в процесах життєдіяльності мікроорганізмів. Під впливом імпульсів електричного поля напруженістю 0,25 кВ/см тривалістю 10 мс дріжджами *Kluveromyces marxianus* в присутності ферменту целлюлоза поліпшується утилізація поживних речовин і підвищується конверсія субстрату в етанол, вихід якого збільшується майже на 40% порівняно з контрольним зразком [7]. Крім того, Г. Кернс та ін. [8] довели, що завдяки такому

полно з інтенсивністю 1,5 мВ/см впродовж 115 годин в *Trichoderma reesei* збільшується активність целюлази і її секреції на 60% і 80%, відповідно, а для різних груп мікроорганізмів при 1,25–3,25 кВ/см спостерігається більш інтенсивне виведення з них токсичних речовин, що підвищує їх життєздатність [9].

Окремим напрямом досліджень впливу на мікроорганізми є експерименти в режимі так званої «далекої зони», що передбачає розповсюдження енергії в середовищі проживання бактерій у вигляді хвиль надвисокої частоти. Він охоплює неіонізуючі радіохвилі і мікрохвильовий діапазон, а також оптичне й іонізуюче, інфрачервоне, видимого спектру, ультрафіолетове, рентгенівське і гамма-випромінювання. Ефект від хвиль низької інтенсивності спостерігався в дослідженнях, які проводилися в 1970 році в Росії і пізніше були продовжені в Європі. У своїй роботі В. Грюндлер та ін. [10] використовували частоти близькі до 42 ГГц. Експерименти продемонстрували, що резонансні явища в дріжджах *Saccharomyces Cerevisiae* збільшують темп їх зростання до 15% або пригнічують його до 29%, залежно від частоти, а саме в діапазоні від 41,83 до 41,96 ГГц.

С. Банік та ін. [11] досліджували життєздатність бактерій *Methanosarcina barkeri* і *Methanosarcina archaeobacterium*, що приймають участь у процесі виробництва біогазу. Мікроорганізми піддавалися впливу полів надвисокої частоти 13,5–36,5 ГГц тривалістю 2 години протягом трьох днів перед додаванням їх в анаеробні реактори. При цьому спостерігалось значне збільшення концентрації метану в біогазовій суміші, яке досягло максимуму 76,3% при 31,5 ГГц, в порівнянні з 52,3% без зазначеної обробки.

У роботах Л. Тамбієва [12] відзначено, що вплив високочастотних мікрохвиль малої потужності 2,2 мВт/см<sup>2</sup> тривалістю 30 хв при довжині хвилі 7,1 мкм призводить до збільшення швидкості зростання ціанобактерії *Spirulina Platensis* на 50%. І. Беляєв та ін. [13] довели, що існує частота конкретної резонансної взаємодії між мікрохвилями низької інтенсивності та хромосомної ДНК в *E.coli*, що також позитивно відображається на процесах її життєдіяльності.

Отже, загалом дослідження показали, що питома швидкість зростання більшості мікроорганізмів, і таких, що беруть участь у біометаногенезі, зокрема, збільшується під впливом полів надвисокої частоти. Чисельність бактерій в опроміненій групі зростає, а їх діаметр збільшується, в середньому, на 20%.

У таблиці 1 наведена узагальнена інформація щодо досліджень, які проводилися над групами бактерій та дріжджів за впливу електричних полів та мікрохвильового випромінювання.

Таблиця 1 – Результати досліджень з використанням електричних полів та мікрохвильового впливу

Вид поля	Найменування мікроорганізму	Параметри впливу	Результат
Електроосмос, електрофорез	<i>E.coli</i>		Збільшення об'єму біомаси на 140%
Постійне електричне	<i>Saccharomyces Cerevisiae</i>		Збільшення темпу зростання на 60% в режимі змінного струму і 50% - постійного
Змінне електричне	<i>E.coli</i>	2,5-50 В/см; частота 100 Гц	Підвищення життєдіяльності
	<i>Saccharomyces Cerevisiae</i>	до 1500 В/см	Максимальне зростання в 2 рази при 0,85 кВ/см
	<i>Trichoderma reesei</i>		Збільшення об'єму біомаси
	<i>Actinomycetous Eubacterium</i> і <i>Streptomyces noursei</i>	1,5 мВ/см; більше 50 год.	Прискорення росту, але тільки протягом перших 50 годин після початкової фази

Продовження табл. 1

Мікрохвильове випромінювання	Saccharomyces Cerevisiae	1-4 мВт/см <sup>2</sup> ; частота близько 42 ГГц	Збільшення темпу зростання до 15% або його зниження до 29% залежно від частоти
	Spirulina Platensis	Довжина хвилі 7,1 мкм; 2,2 мВт/см <sup>2</sup> ; тривалість 0,5 год.	Збільшення об'єму біомаси на 50%
	Methanosarcina barkeri і Methanosarcina archaeobacterium	Частота 13,5-36,5 ГГц; 2 год. протягом 3 днів перед завантаженням в реактор	Значне збільшення концентрації метану, яке досягло максимуму в 76,3% CH <sub>4</sub> при частоті 31,5 ГГц, в порівнянні з 52,3% з контрольним зразком. Збільшення питомої швидкості росту для всього діапазону частот

Як видно з таблиці 1, експерименти мають безсистемний характер та потребують подальшого уточнення, але підтверджують можливість стимуляції процесів життєдіяльності для різних мікроорганізмів даним способом.

**Висновки.** В результаті аналізу наукових досліджень, що проводилися над різними групами мікроорганізмів при використанні електричного та мікрохвильового впливу, встановлено, що існує пряма залежність біологічних ефектів в них від характеристик зазначених полів: напруженості, частоти, форми імпульсу, типу модуляції і тривалості. Встановлено, що правильно підібрані параметри останніх можуть стимулювати процес виробництва біогазу та підвищити ефективність біогазових установок в цілому. Однак, через безсистемність та вибірковість експериментів, а також явно випадковий їх характер і не оптимальність з точки зору енергетичного критерію, є необхідність подальшого уточнення та узагальнення параметрів інтенсифікації біометаногенезу на кожному його етапі, що дозволить, в перспективі, створити інструментарій динамічного керування зазначеним процесом на більш енергоефективному рівні.

#### Список використаної літератури

1. Качан Ю.Г., Коваленко В.Л., Лапікова О.І. Аналіз доцільності впливу на біомасу електричними і магнітними полями / Качан Ю.Г., Коваленко В.Л., Лапікова О.І. // Збірник Міжнародної конференції «Відновлювана енергетика 21 століття». – К. : КНУ, 2015. – С.353-355.
2. Качан Ю.Г., Коваленко В.Л., Лапікова О.І. Аналіз ефективності та перспектив розвитку біогазової енергетики / Качан Ю.Г., Коваленко В.Л., Лапікова О.І. // Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». – К. : НТУУ «КПІ», 2015. – №5 – С.79-83.
3. Chang, Y.H.D., Grodzinsky A.J., Wang, D.I.C. Augmentation of mass transfer through electrical means for hydrogel-entrapped Escherichia coli cultivation / Chang, Y.H.D., Grodzinsky A.J., Wang, D.I.C. // Biotechnology And Bioengineering., 1995. – № 48 – P.149-157.
4. Cellini L. Bacterial response to the exposure of 50 Hz electromagnetic fields / Cellini L., Grande R., Campi E.D., Bartolomeo S.D., Giulio M.D., Robuffo I., Trubiani O., Mariggio // Bioelectromagnetics, 2008. – №29 – P.302-311.
5. Fologea D. Increase of Saccharomyces cerevisiae plating efficiency after treatment with bipolar electric pulses / Fologea D., Vassu-Dimov T., Stoica I., Csutak O., Radu M. // Bioelectrochemistry and Bioenergetics, 1998. – №46 – P.285-287.

6. Grosse H.H. Electrostimulation during fermentation / Grosse H.H // Bioelectrochemistry and Bioenergetics, 1988. – №20 – P.279-285.
7. McCabe A. Increased efficiency of substrate utilization by exposure of the thermotolerant yeast strain, *Kluyveromyces marxianus* IMB3 to electric-field stimulation / McCabe A., Barron N., McHale L., McHale A.P // Biotechnology Techniques, 1995. – №9 – P.133-136.
8. Kerns G., Bauer E., Berg, H. Electrostimulation of cellulase fermentation by pulsatile electromagnetically induced currents / Kerns G., Bauer E., Berg, H. // Bioelectrochemistry and Bioenergetics, 1993. – №32 – P.89-94.
9. Bustard M., Rollan A., McHale A.P. The effect of pulse voltage and capacitance on biosorption of uranium by biomass derived from whiskey distillery spent wash / Bustard M., Rollan A., McHale A.P. // Bioprocess engineering. 1998. – №18 – P.59-62.
10. Grundler W., Keilmann F., Fröhlich H. Resonant growth rate response of yeast cells irradiated by weak microwaves / Grundler W., Keilmann F., Fröhlich H // Physics Letters. A, 1977. – № 62 – P.463-466.
11. Banik, S.; Bandyopadhyay, S.; Ganguly, S.; Dan, D. Effect of microwave irradiated *Methanosarcina barkeri* DSM-804 on biometanogenesis. Bioresource technology. 2005. – № 97 – P.819-823.
12. Pakhomov A.G. Current state and implications of research on biological effects of millimeter waves: A Review of the literature / Pakhomov A.G., Akyel Y., Pakhomova O.N., Stuck B.E., Murphy M.R // Bioelectromagnetics, 1998. – №19 – P.393-413.
13. Belyaev I.Y., Alipov Y.D., Shcheglov V.S. Chromosome DNA as a target of Resonant interaction between *Escherichia coli* cells and low-intensity millimeter waves / Belyaev I.Y., Alipov Y.D., Shcheglov V.S. // Electro-Magnetobiology, 1992. – №11 – P.97-108.

**Y. Kachan**, Dr. Sc. Sciences, prof., **V. Kovalenko**, PhD. Sc. Sciences, **O. Lapikova**  
**Zaporozhye State Engineering Academy**

#### **EFFECT OF ELECTRIC FIELD AND MICROWAVE RADIATION ON MICROORGANISMS INVOLVED IN BIOMETANOGENEZ**

*The state of current research on the influence of electric fields and microwave radiation on microorganisms is analyzed. The information received by domestic and foreign scientists in experiments on groups of bacteria and yeast that are involved in biometanogenesis is overviewed. The possibility of stimulating of microorganisms involved in biometanogenesis and, consequently, increase the yield of biogas due to the impact on the substrate electric fields or microwave radiation is revealed. The existence of biological effects depending on the settings specified exposure: intensity, frequency, pulse shape, modulation type and duration is detected. The analysis was unsystematic and selectivity of previous studies. The need to further refine of biometanogenesis intensification parameters on every step, optimal in terms of efficiency, is revealed.*

**Keywords:** biogas, biometanogenesis, electric fields, microwave radiation, germs, bacteria

#### **References**

1. Kachan Y.G., Kovalenko V.L., Lapikova O.I. Feasibility analysis of impacts on biomass of electric and magnetic fields / Kachan Y.G., Kovalenko V.L., Lapikova O.I. // Collection of International conference "Renewable energy of the 21st century". – K. NUC, 2015. – P. 353-355.
2. Kachan Y.G., Kovalenko V.L., Lapikova O.I. Analysis of efficiency and development prospect of biogas energetic / Kachan Y.G., Kovalenko V.L., Lapikova O.I. // The scientific journal "Energetic: economy, technology, ecology". – NTUU "KPI", 2015. – №5 – P.79-83.
3. Chang, Y.H.D., Grodzinsky A.J., Wang, D.I.C. Augmentation of mass transfer through electrical means for hydrogel-entrapped *Escherichia coli* cultivation / Chang, Y.H.D., Grodzinsky A.J., Wang, D.I.C. // Biotechnology And Bioengineering., 1995. – № 48 – P.149-157.
4. Cellini L. Bacterial response to the exposure of 50 Hz electromagnetic fields / Cellini L., Grande R., Campli E.D., Bartolomeo S.D., Giulio M.D., Robuffo I., Trubiani O., Mariggio // Bioelectromagnetics, 2008. – №29 – P.302-311.
5. Fologea D. Increase of *Saccharomyces cerevisiae* plating efficiency after treatment with bipolar electric pulses / Fologea D., Vassu-Dimov T., Stoica I., Csutak O., Radu M. // Bioelectrochemistry and Bioenergetics, 1998. – №46 – P.285-287.

6. Grosse H.H. Electrostimulation during fermentation / Grosse H.H // Bioelectrochemistry and Bioenergetics, 1988. – №20 – P.279-285.
7. McCabe A. Increased efficiency of substrate utilization by exposure of the thermotolerant yeast strain, *Kluyveromyces marxianus* IMB3 to electric-field stimulation / McCabe A., Barron N., McHale L., McHale A.P // Biotechnology Techniques, 1995. – №9 – P.133-136.
8. Kerns G., Bauer E., Berg, H. Electrostimulation of cellulase fermentation by pulsatile electromagnetically induced currents / Kerns G., Bauer E., Berg, H. // Bioelectrochemistry and Bioenergetics, 1993. – №32 – P.89-94.
9. Bustard M., Rollan A., McHale A.P. The effect of pulse voltage and capacitance on biosorption of uranium by biomass derived from whiskey distillery spent wash / Bustard M., Rollan A., McHale A.P. // Bioprocess engineering. 1998. – №18 – P.59-62.
10. Grundler W., Keilmann F., Fröhlich H. Resonant growth rate response of yeast cells irradiated by weak microwaves / Grundler W., Keilmann F., Fröhlich H // Physics Letters. A, 1977. – № 62 – P.463-466.
11. Banik, S.; Bandyopadhyay, S.; Ganguly, S.; Dan, D. Effect of microwave irradiated *Methanosarcina barkeri* DSM-804 on biomethanation. Bioresource technology. 2005. – № 97 – P.819-823.
12. Pakhomov A.G. Current state and implications of research on biological effects of millimeter waves: A Review of the literature / Pakhomov A.G., Akyel Y., Pakhomova O.N., Stuck B.E., Murphy M.R // Bioelectromagnetics, 1998. – №19 – P.393-413.
13. Belyaev I.Y., Alipov Y.D., Shcheglov V.S. Chromosome DNA as a target of Resonant interaction between *Esherichia coli* cells and low-intensity millimeter waves / Belyaev I.Y., Alipov Y.D., Shcheglov V.S. // Electro-Magnetobiology, 1992. – №11 – P.97-108.

**УДК 662.767.2 : (537.212 + 537-962)**

**Ю.Г. Качан**, д-р. техн. наук, проф., **В.Л. Коваленко**, канд. техн. наук, доц., **О.И. Лапикова**  
**Запорожская государственная инженерная академия**

**О ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
НА МИКРООРГАНИЗМЫ, ЗАДЕЙСТВОВАННЫЕ В БИОМЕТАНОГЕНЕЗЕ**

*Проанализировано состояние современных исследований по влиянию электрических полей и микроволнового излучения на микроорганизмы. Обобщена информация, полученная отечественными и иностранными учеными в результате экспериментов над группами бактерий и дрожжей, которые задействованы в биометаногенезе. Выявлена возможность стимуляции жизнедеятельности микроорганизмов, задействованных в биометаногенезе, и, как следствие, увеличения выхода биогаза за счет влияния на субстрат электрических полей или микроволнового излучения. Установлено существование зависимости биологических эффектов от параметров указанного воздействия: напряженности, частоты, формы импульса, типа модуляции и продолжительности. В результате проведенного анализа выявлена бессистемность и избирательность предыдущих исследований и необходимость дальнейшего уточнения параметров интенсификации биометаногенеза на каждом его этапе, оптимальных с точки зрения энергоэффективности.*

**Ключевые слова:** биогаз, биометаногенез, электрическое поле, микроволновое излучение, микроорганизмы, бактерии

Надійшла 26.12.2016  
Received 26.12.2016