

DOI: 10.15593/2224-9400/2024.2.02
УДК 579.22

Научная статья

**М.В. Аверина¹, И.В. Цыганов²,
А.В. Ахова^{1,2}, А.Г. Ткаченко²**

¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

²Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН –
филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия

ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ БИОМАССЫ И ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ БАКТЕРИАЛЬНОЙ КУЛЬТУРЫ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ РОСТА

*Для оценки роста культуры в ходе микробиологических исследований и биотехнологических процессов могут применяться различные методы мониторинга. Наиболее удобный из них основан на измерении оптической плотности культуры в качестве косвенного показателя концентрации взвешенной биомассы. Однако необходимо учитывать влияние на взаимозависимость между этими величинами ряда факторов: вида микроорганизма, морфологии клеток, наличия агрегатов, параметров измеряющего устройства, типа среды и содержания в ней продуктов жизнедеятельности клеток. В свою очередь часть этих параметров меняется по мере роста и развития культуры микроорганизмов, в связи с чем становится актуальным вопрос о возможности использования одного и того же коэффициента пересчета для культуры на разных стадиях роста. Целью данного исследования является изучение взаимозависимости оптической плотности бактериальной культуры и биомассы на разных стадиях периодического роста. В качестве объектов исследования использованы *Escherichia coli* K12 и *Mycobacterium smegmatis* mc²155. В ходе исследования проводилось измерение оптической плотности суспензий клеток с помощью спектрофотометра и определение концентрации абсолютно сухой биомассы путем взвешивания высушенных нитроцеллюлозных фильтров, через которые была пропущена суспензия клеток с известной оптической плотностью. Описана зависимость между этими параметрами, на основе которой вычислены коэффициенты пропорциональности для культур *E. coli* и *M. smegmatis* в процессе активного роста и в стационарной фазе. На основе полученных данных сделан вывод о необходимости применения различных коэффициентов пропорциональности для разных стадий роста с целью получения более точных значений биомассы.*

Ключевые слова: концентрация биомассы, оптическая плотность, периодическая культура.

**M.V. Averina¹, I.V. Tsyganov²,
A.V. Akhova^{1,2}, A.G. Tkachenko²**

¹Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

²Institute of Ecology and Genetics
of Microorganisms UB RAS, Perm, Russian Federation

DEPENDENCE BETWEEN OF BIOMASS AND OPTICAL DENSITY OF BACTERIAL CULTURES AT DIFFERENT STAGES OF GROWTH

*Various cell growth monitoring methods can be used to evaluate culture growth during microbiological studies and biotechnological processes. The most convenient method is to use the optical density of the culture as an indirect measure of the concentration of suspended biomass. However, it is necessary to take into account the influence of a number of factors on the interdependence between these quantities: the type of microorganism, cell morphology, the presence of aggregates, the parameters of the measuring device, the type of medium and the content of cell waste products in it. Some of these parameters, in turn, change as microorganisms grow and develop, and therefore the question of the possibility of using the same conversion factor for a culture at different stages of growth becomes relevant. The purpose of this study is to study the interdependence of the optical density of a bacterial culture and biomass at different stages of periodic growth. The laboratory strain *Escherichia coli* K12 and *Mycobacterium smegmatis* mc²155 were used as research objects. During the study, the optical density of cell suspensions was measured using a spectrophotometer and the concentration of absolutely dry biomass was determined by weighing dried nitrocellulose filters through which a cell suspension with a known optical density was passed. Relationships between these parameters were obtained and, on their basis, proportionality coefficients were calculated for *E. coli* and *M. smegmatis* cultures in the stationary phase and in the active growth phase. Based on the data obtained, it was concluded that it is necessary to use separate proportionality coefficients for different stages of growth to obtain more accurate biomass values.*

Keywords: *biomass concentration, optical density, batch culture.*

Для большинства микробиологических исследований и биотехнологических процессов необходима процедура оценки изменения плотности культуры. Мониторинг роста бактериальных клеток дает информацию об их потребности в источниках углерода и энергии, а также позволяет определить условия выживания и размножения разных видов в разных условиях. С этой целью могут применяться различные методы, такие как прямой подсчет клеток (например, с использованием оптической микроскопии и проточной цитометрии) и колониеобразующих единиц, а также косвенные методы, основанные на измерении биомассы, белка, АТФ, других основных метаболитов, или светорассеяния [1–5].

На промышленном уровне для мониторинга роста микроорганизмов необходимо решение задачи быстрой оценки плотности культуры в условиях непрерывного технологического процесса [6]. В этом случае рассеяния и поглощения светового потока клетками, находящимися в жидкой фазе во взвешенном состоянии, являются наиболее удобными для детектирования параметрами. Измерение интенсивности отклоненного светом клетками света лежит в основе методов нефелометрии. В свою очередь турбидиметрический метод основан на измерении интенсивности светового потока, прошедшего через суспензию клеток. Интенсивность проходящего света уменьшается вследствие поглощения и рассеяния светового потока клетками, что позволяет оценить оптическую плотность (ОП), или мутность, суспензии бактерий [7, 8]. Турбидиметрия характеризуется быстротой и отсутствием негативного воздействия на клетки и является наиболее распространенным аналитическим инструментом для мониторинга роста чистых бактериальных культур [3].

Поскольку значение ОП прямо пропорционально количеству клеток в водной фазе во взвешенном состоянии, ее измерение можно использовать для косвенной оценки других параметров, характеризующих плотность бактериальной популяции. Коэффициенты пересчета между величинами оптической плотности, концентрации биомассы и количества колониеобразующих единиц чрезвычайно полезны на практике. Однако стоит учитывать, что рассеяние света, а следовательно, и коэффициенты пропорциональности на основе ОП зависят от длины волны света, размера и формы частиц. В процессе роста периодической культуры могут изменяться морфология, размеры, степень агрегации клеток, в связи с чем становится актуальным вопрос о возможности использования одного и того же коэффициента пропорциональности для культуры на разных стадиях роста [9–13].

Целью данного исследования является изучение взаимозависимости оптической плотности бактериальной культуры и биомассы на разных стадиях периодического роста.

Экспериментальная часть. В качестве объекта исследования использован штамм *Escherichia coli* K12, полученный из Всероссийской коллекции микроорганизмов и *Mycobacterium smegmatis* mc²155.

Посев *E. coli* производили со скошенного агара LB в колбы Эрленмейера объемом 250 мл с ватно-марлевыми пробками, содержащими 50 мл бульона LB. Культивирование велось при температуре 37 °С и перемешивании 100 об/мин в термостатируемом шейкере 1092 (GFL, Германия) на протяжении 18–19 ч. Полученную культуру затем разводили в 50 мл свежей среды до оптической плотности $OP_{600} = 0,1$ и выращивали при тех же условиях.

Посев *M. smegmatis* производили на пробирку, содержащую 5 мл среды Middlebrook 7H9 с добавлением 25 мкг/мл ампициллина, 0,05 % твин-80. Культивирование осуществляли в термостатируемом шейкере при температуре 37 °С и перемешивании 200 об/мин в течение 24 ч. Выросшую культуру пересевали на колбу со средой аналогичного состава, оптическая плотность полученной суспензии микроорганизмов при этом составляла $ОП_{600} = 0,022$ и выращивали при тех же условиях.

Измерение оптической плотности суспензии клеток осуществляли с помощью спектрофотометра UV-1280 (Shimadzu, Япония) в кювете с длиной оптического пути 10 мм при длине волны света 600 нм ($ОП_{600}$). Предварительно проводилось разведение культуры в 0,9%-ном водном растворе NaCl [14].

Мазки окрашивались 0,1 % раствором генциана фиолетового в течение 10 мин. После этого избыток красителя смывали водой и оставляли до полного высыхания. Микроскопия проводилась на микроскопе МИКМЕД-6 («ЛОМО», Россия), фотографии бактерий были получены с помощью фотокамеры МС 6.3 («ЛОМО», Россия) при 1000-кратном увеличении.

Определение концентрации абсолютно сухой биомассы (АСБ) проводили путем взвешивания высушенных нитроцеллюлозных фильтров, через которые была пропущена суспензия клеток с известной оптической плотностью. Высушивание проводилось в сухожаровом шкафу при температуре 105 °С в течение 18 ч. Для учета изменения веса чистых фильтров за время высушивания были проведены контрольные опыты с фильтрами, через которые вместо суспензии клеток был пропущен такой же объем физраствора [15].

На основании полученных данных построены калибровочные графики зависимости абсолютно сухой биомассы от оптической плотности для культур *E. coli* и *M. smegmatis* и вычислены коэффициенты пропорциональности двух параметров.

Результаты и их обсуждение. Измерение оптической плотности культур через определенные интервалы времени позволило характеризовать их рост в заданных условиях культивирования. На полученных кривых роста можно выделить все основные фазы роста периодической культуры (рис. 1). В течение 5 ч после посева на свежую среду культура *E. coli* характеризуется активным ростом, а затем переходит в стационарную фазу. Поэтому в последующих экспериментах бактерии выращивали в течение 3 ч и 18–19 ч, чтобы получить активно растущую культуру и

культуру в стационарной фазе роста соответственно. Из полученных культур готовили суспензии клеток с разной оптической плотностью, для которых измеряли концентрацию абсолютно сухой биомассы (АСБ).

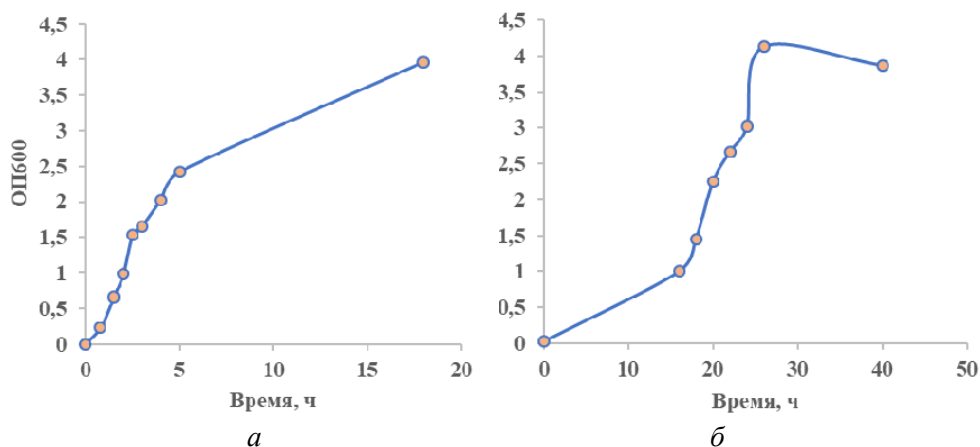


Рис. 1. Кривые роста *E. coli* K12 (а) и *M. smegmatis* (б)

Эксперименты с микобактериями проводились аналогичным образом. Для культуры *M. smegmatis* характерен переход в активную фазу роста через 16 ч после пересева на свежую питательную среду, а в стационарную – через 24 ч (см. рис. 1). Пробы для определения ОП и АСБ активно растущей культуры отбирали через 16–20 ч культивирования, культуры в стационарной фазе роста – через 40 ч.

Микроскопия предварительно окрашенных генцианвиолетом бактерий показала изменение размера и формы их клеток по мере роста периодической культуры (рис. 2).

У клеток *E. coli* в стационарной фазе роста уменьшалась длина и общие размеры клеток по сравнению с активно растущей культурой. Клетки микобактерий в стационарной фазе роста характеризовались уменьшением линейных размеров, а также формированием скоплений. Следует отметить, что культивирование микобактерий проводилось в среде, содержащей поверхностно-активное вещество (твин-80), препятствующее формированию клеточных агрегатов. На основе экспериментальных данных получена зависимость между концентрацией абсолютно сухой биомассы и оптической плотностью культуры *E. coli* на разных стадиях роста (рис. 3). Коэффициент пропорциональности между концентрацией биомассы и оптической плотностью культуры *E. coli* в стационарной фазе составил 3,63 на интервале ОП₆₀₀ = [0,086; 5,456], в стадии активного роста – 2,20 на интервале ОП₆₀₀ = [0,252; 1,716].

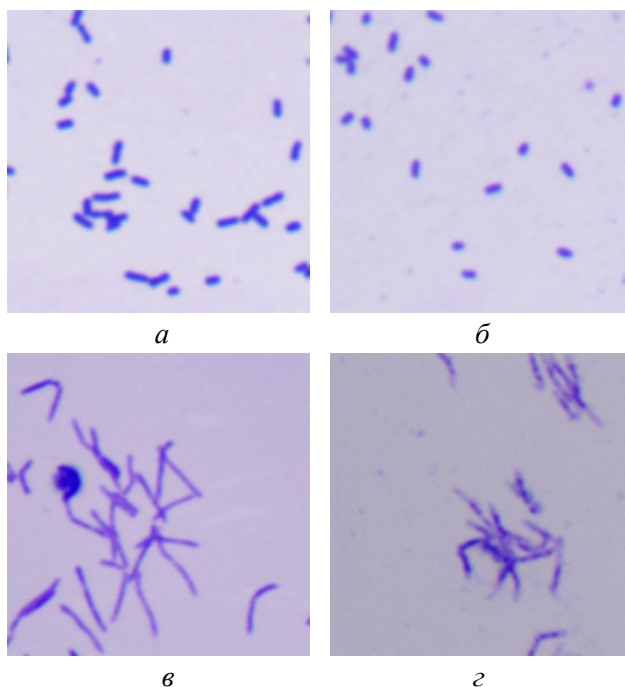


Рис. 2. Микрофотографии клеток *E. coli* в стадии активного роста (а) и стационарной фазе (б) и клеток *M. Smegmatis* в стадии активного роста (в) и стационарной фазе (з)

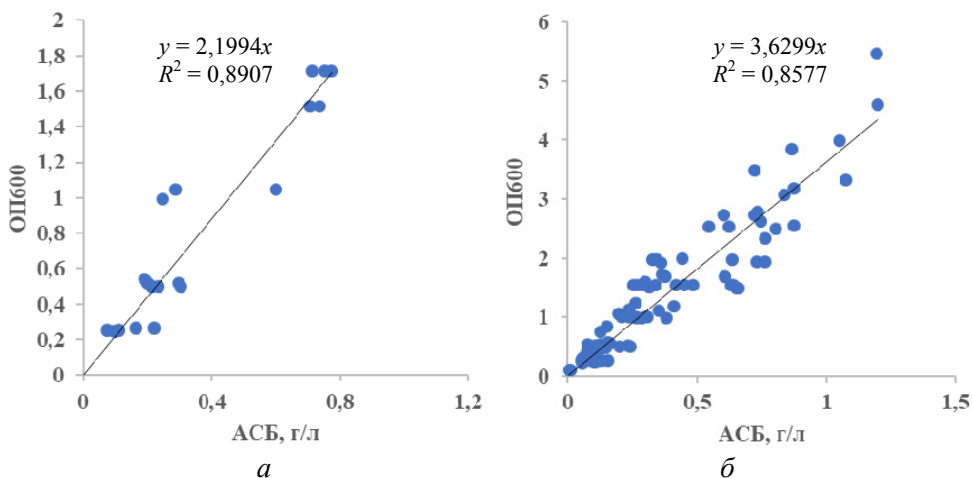


Рис. 3. Зависимость оптической плотности от биомассы культуры *E. Coli* в фазе активного роста (а) и стационарной фазе роста (б)

Для культуры *M. smegmatis* также был определен характер зависимости между концентрацией биомассы и оптической плотностью культуры в стационарной фазе и в фазе активного роста (рис. 4). Коэффициент

пропорциональности для стационарной культуры составил 1,63 на интервале ОП₆₀₀ = [1,00; 3,87], а для активно растущей культуры – 1,85 на интервале ОП₆₀₀ = [1,00; 2,67].

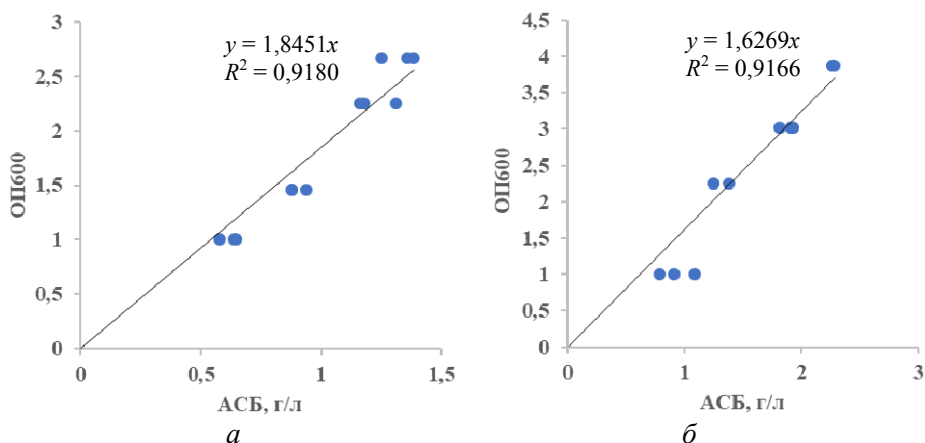


Рис. 4. Зависимость оптической плотности от биомассы культуры *M. smegmatis* в фазе активного роста (а) и стационарной фазе роста (б)

Далее мы оценили применимость полученных коэффициентов пропорциональности для расчета показателей АСБ на основе значений ОП₆₀₀ культуры, полученных опытным путем. При использовании опытных данных и коэффициентов, полученных для культур *E. coli* в соответствующей фазе роста, разница рассчитанных показателей АСБ находилась в пределах инструментальной ошибки (табл. 1). Применение для расчетов коэффициентов, полученных для культуры в другой фазе роста, или усредненного коэффициента пропорциональности приводило к завышению или занижению рассчитанных значений относительно опытных данных.

Таблица 1

Расчет показателей АСБ на основе экспериментальных данных с использованием рассчитанных коэффициентов пропорциональности для культуры *E. coli*

| Показатель | Экспериментальные данные | | | | | Рассчитанные данные | | |
|-----------------------------|--------------------------|------|------|---------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | Среднее | Стандартное отклонение | К _{стац} = 3,63 | К _{эксп} = 2,20 | К _{ср} = 2,92 |
| <i>Стационарная фаза</i> | | | | | | | | |
| АСБ, г/л | 0,15 | 0,10 | 0,08 | 0,11 | 0,03 | 0,13 | 0,22 | 0,16 |
| ОП ₆₀₀ | 0,480 | | | | | | | |
| <i>Фаза активного роста</i> | | | | | | | | |
| АСБ, г/л | 0,23 | 0,21 | 0,31 | 0,25 | 0,05 | 0,14 | 0,23 | 0,17 |
| ОП ₆₀₀ | 0,498 | | | | | | | |

При расчете значений АСБ с применением полученных коэффициентов пропорциональности для *M. smegmatis*, в целом наблюдались похожие закономерности (табл. 2). При этом стоит отметить, что со снижением оптической плотности суспензии клеток (< 2,5) отклонение рассчитанных значений от экспериментально полученных данных возрастало.

Таблица 2

Расчет показателей АСБ на основе экспериментальных данных с использованием рассчитанных коэффициентов пропорциональности для культуры *M. Smegmatis*

| Показатель | Экспериментальные данные | | | | | Рассчитанные данные | | |
|-----------------------------|--------------------------|------|------|---------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | Среднее | Стандартное отклонение | $K_{\text{стац}} = 1,63$ | $K_{\text{эксп}} = 1,85$ | $K_{\text{ср}} = 1,74$ |
| <i>Стационарная фаза</i> | | | | | | | | |
| АСБ, г/л | 1,38 | 1,25 | 1,25 | 1,29 | 0,07 | 1,38 | 1,22 | 1,29 |
| ОП ₆₀₀ | 2,25 | | | | | | | |
| <i>Фаза активного роста</i> | | | | | | | | |
| АСБ, г/л | 1,16 | 1,31 | 1,18 | 1,22 | 0,08 | 1,38 | 1,22 | 1,29 |
| ОП ₆₀₀ | 2,25 | | | | | | | |

Заключение. На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что показатели оптической плотности и концентрации биомассы культуры бактерий разных видов (*E. coli* и *M. smegmatis*) характеризуются разными коэффициентами пропорциональности. При необходимости получения более точных значений количества биомассы следует использовать коэффициенты пропорциональности, специфичные для активно растущих культур и культур в стационарной фазе роста. Различия в преломлении светового потока на разных стадиях роста культуры связаны с изменением формы бактериальных клеток и их расположения.

Список литературы

1. Brown, D.C. Assessing microbial monitoring methods for challenging environmental strains and cultures / D.C. Brown, R.J. Turner // *Microbiology Research*. – 2022. – Vol. 13. – P. 235–257.
2. On-line monitoring of biomass concentration based on a capacitance sensor: assessing the methodology for different bacteria and yeast high cell density fed-batch cultures / C.L. Horta [et al.] // *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. – 2015. – Vol. 32, № 4. – P. 821–829.

3. Simple and versatile turbidimetric monitoring of bacterial growth in liquid cultures using a customized 3D printed culture tube holder and a miniaturized spectrophotometer: application to facultative and strictly anaerobic bacteria / M.R.G. Maia [et al.] // *Frontiers in Microbiology*. – 2016. – Vol. 7. – Article № 1381.
4. Recommendations for calculating growth parameters by optical density measurements / C. Begot [et al.] // *Journal of Microbiological Methods*. – 1996. – Vol. 25, № 3. – P. 225–232.
5. Tortora, G.J. *Microbiology: an introduction* / G.J. Tortora, B.R. Funke, C.L. Case. – Pearson, 2019. – 960 p.
6. Hernandez, A. New turbidimetric method for estimating bacterial growth in heterogeneous media / A. Hernandez, M. Marin // *Process Biochemistry*. – 2002. – Vol. 37. – P. 1125–1128.
7. Основы аналитической химии: учеб.: в 2 т. / Ю.А. Золотов, Е.Н. Дорохова, В.И. Фадеева [и др.]. – 5-е изд., стер. – М.: Академия, 2012. – Т. 2. – 409 с.
8. Knysh, A. Dynamic light scattering analysis in biomedical research and applications of nanoparticles and polymers / A. Knysh, P. Sokolov, I. Nabiev // *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*. – 2023. – Vol. 9, № 2. – P. 020203.
9. Robust estimation of bacterial cell count from optical density / J. Beal [et al.] // *Communications Biology*. – 2020. – Vol. 3. – Article № 512.
10. Myers, J.A. Improving accuracy of cell and chromophore concentration measurements using optical density / J.A. Myers, B.S. Curtis, W.R. Curtis // *BMC Biophysics*. – 2013. – Vol. 6, № 1. – Article № 4.
11. Геворгиз, Р.Г. Оценка биомассы *Spirulina platensis* (Nordst.) Geitl. по оптической плотности культуры / Р.Г. Геворгиз, А.В. Алисиевич, М.Г. Шматок // *Экология моря*. – 2005. – № 70. – С. 96–106.
12. Estimation of bacterial growth rates from turbidimetric and viable count data / P. Dalgaard [et al.] // *International journal of food microbiology*. – 1994. – Vol. 23, № 3. – P. 391–404.
13. Volkmer, B. Condition-dependent cell volume and concentration of *Escherichia coli* to facilitate data conversion for systems biology modeling / B. Volkmer, M. Heinemann // *PLoS ONE*. – 2011. – Vol. 6, № 7. – P. e23126.
14. Бейли, Дж. Основы биохимической инженерии: пер. с англ. в 2-х ч / Дж. Бейли, Д. Оллис. – М.: Мир, 1989. – Ч. 1. – 692 с.
15. Виноградова, А.В. Культивирование микроорганизмов: учеб. пособие / А.В. Виноградова, Г.А. Козлова. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 97 с.

References

1. Brown D. C., Turner R. J. Assessing microbial monitoring methods for challenging environmental strains and cultures. *Microbiology Research*, 2022, Vol. 13, pp. 235–257.

2. Horta C. L. [et al.] On-line monitoring of biomass concentration based on a capacitance sensor: assessing the methodology for different bacteria and yeast high cell density fed-batch cultures. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2015, Vol. 32, No. 4, pp. 821–829.

3. Maia M. R. G. [et al.] Simple and versatile turbidimetric monitoring of bacterial growth in liquid cultures using a customized 3D printed culture tube holder and a miniaturized spectrophotometer: application to facultative and strictly anaerobic bacteria. *Frontiers in Microbiology*, 2016, Vol. 7, article No. 1381.

4. Begot C. [et al.] Recommendations for calculating growth parameters by optical density measurements. *Journal of Microbiological Methods*, 1996, Vol. 25, No. 3, pp. 225–232.

5. Tortora G. J., Funke B. R., Case C. L. *Microbiology: an introduction*. Pearson, 2019, 960 p.

6. Hernandez A., Marin M. New turbidimetric method for estimating bacterial growth in heterogeneous media. *Process Biochemistry*, 2002, Vol. 37, pp. 1125–1128.

7. Zolotov. Ju. A., Dorohova E. N., Fadeeva V. I. [et. al.] edited by Ju.A. Zolotov. *Osnovy analiticheskoj himii [Fundamentals of analytical chemistry]*. M.: Akademija, 2012, Vol. 2, 409 p.

8. Knysh A., Sokolov P., Nabiev I. Dynamic light scattering analysis in biomedical research and applications of nanoparticles and polymers. *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*, 2023, Vol. 9, No. 2, pp. 020203.

9. Beal J. [et al.] Robust estimation of bacterial cell count from optical density. *Communications Biology*, 2020, Vol. 3, article No. 512.

10. Myers J. A., Curtis B. S., Curtis W. R. Improving accuracy of cell and chromophore concentration measurements using optical density. *BMC Biophysics*, 2013, Vol. 6, No. 1, article No. 4.

11. Gevorgiz R. G., Alisievich A. V., Shmatok M. G. Ocenka biomassy *Spirulina platensis* (Nordst.) Geitl. po opticheskoj plotnosti kulture [Biomass estimation of *Spirulina platensis* (Nordst.) Geitl. by optical density of the culture]. *Jekologija morja*, 2005, No. 70, pp. 96–106.

12. Dalgaard P. [et al.] Estimation of bacterial growth rates from turbidimetric and viable count data. *International journal of food microbiology*, 1994, Vol. 23, No. 3, pp. 391–404.

13. Volkmer B., Heinemann M. Condition-dependent cell volume and concentration of *Escherichia coli* to facilitate data conversion for systems biology modeling. *PLoS ONE*, 2011, Vol. 6, No. 7: e23126.

14. Bailey J., Ollis D. *Osnovy biohimicheskoj inzhenerii [Biochemical engineering fundamentals]*. Moscow: Mir, 1989, 692 p.

15. Vinogradova A. V., Kozlova G. A. *Kultivirovanie mikroorganizmov [Cultivation of microorganisms]*. Perm: PNIPU, 2012, 97 p.

Об авторах

Аверина Марина Вадимовна – студентка бакалавриата кафедры «Химия и биотехнология», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29), e-mail: averina.mv@yandex.ru.

Цыганов Иван Вадимович – лаборант лаборатории адаптации микроорганизмов, Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (614081, Пермь, ул. Голева, 13), e-mail: zamegagurrendan@gmail.com.

Ахова Анна Викторовна – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории адаптации микроорганизмов, Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (614081, Пермь, ул. Голева, 13); доцент кафедры «Химия и биотехнология», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29), e-mail: akhovan@mail.ru.

Ткаченко Александр Георгиевич – доктор медицинских наук, заведующий лабораторией адаптации микроорганизмов, Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (614081, Пермь, ул. Голева, 13), e-mail: agtkachenko@iegm.ru.

About the authors

Marina V. Averina (Perm, Russian Federation) – Bachelor's student of the Department of Chemistry and Biotechnology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: averina.mv@yandex.ru).

Ivan V. Tsyganov (Perm, Russian Federation) – laboratory assistant of the Laboratory of Microbial Adaptation, Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms UB RAS (13, Golev str., Perm, 614081, e-mail: zamegagurrendan@gmail.com).

Anna V. Akhova (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Biological Sciences, Researcher of Laboratory of Microbial Adaptation, Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms UB RAS (13, Golev str., Perm, 614081); Associate Professor of the Department of Chemistry and Biotechnology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: akhovan@mail.ru).

Alexander G. Tkachenko (Perm, Russian Federation) – Doctor of Medical Sciences, Head of Laboratory of Microbial Adaptation, Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms UB RAS (13, Golev str., Perm, 614081, e-mail: agtkachenko@iegm.ru).

Поступила: 26.04.2024

Одобрена: 02.06.2024

Принята к публикации: 13.06.2024

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (124020500028-4).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Зависимость между концентрацией биомассы и оптической плотностью бактериальной культуры на разных стадиях роста / М.В. Аверина, И.В. Цыганов, А.В. Ахова, А.Г. Ткаченко // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2024. – № 2. – С. 20–31.

Please cite this article in English as:

Averina M.V., Tsyganov I.V., Akhova A.V., Tkachenko A.G. The relationship between the concentration of biomass and the optical density of bacterial culture at different stages of growth. *Bulletin of PNRPU. Chemical Technology and Biotechnology*, 2024, no. 2, pp. 20-31 (In Russ).