

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2643>
<https://elibrary.ru/QPYNFJ>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Исследование влияния глицина на термостабильность фолиевой кислоты в процессе хлебопечения



М. Е. Лобзанова, В. П. Юстратов^{ID}, С. А. Иванова*^{ID}

Кемеровский государственный университет^{ROR}, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 03.03.2026

Принята после рецензирования: 20.04.2026

Принята к публикации: 05.05.2026

*e-mail: pavvm2000@mail.ru

© М. Е. Лобзанова, В. П. Юстратов, С. А. Иванова, 2026



Аннотация.

В современных условиях проблема дефицита фолиевой кислоты (витамин В₉) в рационе населения приобретает особую актуальность, поскольку недостаточное потребление натуральных продуктов и потери пищевых веществ при термической обработке приводят к дефициту нутриентов. Цель исследования – определить влияние глицина на термическую стабильность свободной фолиевой кислоты в составе рецептуры обогащенного хлебобулочного изделия в процессе выпекания. Объектами исследования выступали образцы, имитировавшие хлебобулочные изделия, приготовленные в лабораторных условиях из муки пшеничной хлебопекарной высшего сорта, питьевой воды, соли, фолиевой кислоты, сахара и глицина. Количественный анализ содержания фолиевой кислоты в образцах проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии.

Установлено, что добавление глицина в тесто существенно повлияло на сохранность фолиевой кислоты при термической обработке. В образцах без глицина потери после термообработки составили более 82 %, тогда как в образцах с глицином – не более 10 %. Растворение фолиевой кислоты с глицином в воде и внесение полученного раствора в смесь муки и других сухих компонентов позволило справиться с неравномерностью распределения фолиевой кислоты в муке.

Совместное применение фолиевой кислоты с глицином способствовало повышению сохранности витамина при выпечке, что имеет важное практическое значение для производства обогащенных продуктов питания. Результаты исследования демонстрируют возможность создания более эффективных технологий обогащения хлебобулочных изделий фолиевой кислотой, что может способствовать решению проблемы дефицита витамина в питании населения.

Ключевые слова. Фолиевая кислота, солублилизованная аминокислота, термостабильность, хлебобулочные изделия, ВЭЖХ

Для цитирования: Лобзанова М. Е., Юстратов В. П., Иванова С. А. Исследование влияния глицина на термостабильность фолиевой кислоты в процессе хлебопечения. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 2. С. 368–379. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2643>

Effect of Glycine on Thermal Stability of Folic Acid during Baking



Marina E. Lobzanova, Vladimir P. Yustratov^{ID}, Svetlana A. Ivanova*^{ID}

Kemerovo State University^{ROR}, Kemerovo, Russia

Received: 03.03.2026
Revised: 20.04.2026
Accepted: 05.05.2026

*e-mail: pavvm2000@mail.ru
© M.E. Lobzanova, V.P. Yustratov, S.A. Ivanova, 2026



Abstract.

Folic acid (vitamin B₉) deficiency is a significant health issue because excessive food processing often leads to nutritional deficiencies. This article describes the effect of glycine on the thermal stability of folic acid in bakery products. The research featured bakery samples made from high-grade wheat flour, drinking water, salt, folic acid, sugar, and glycine. Quantitative analysis of the folic acid was performed using High-Performance Liquid Chromatography (HPLC). Glycine significantly affected the preservation of folic acid during baking. The samples without glycine lost 82% or more of their folic acid after heat treatment, whereas the samples with glycine lost 10% or less. An aqueous solution of folic acid and glycine mixed with flour and other solids improved the distribution of folic acid throughout the dough. Glycine significantly increased the preservation of folic acid during baking, thereby facilitating the production of fortified foods. This method may yield more effective technologies for producing bakery goods fortified with folic acid to eliminate its deficiency in the diet. Future research will determine the nature and mechanism of the effect that glycine exerts on the properties of folic acid.

Keywords. Folic acid, solubilized aminoacetic acid, thermal stability, bakery products, High-Performance Liquid Chromatography (HPLC)

For citation: Lobzanova ME, Yustratov VP, Ivanova SA. Effect of Glycine on Thermal Stability of Folic Acid during Baking. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(2):368–379. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2643>

Введение

Качество жизни напрямую зависит от здоровья, которое определяется правильным питанием с достаточным количеством макро- и микроэлементов. Современный рацион часто не обеспечивает необходимую норму нутриентов, в т. ч. фолиевой кислоты, из-за снижения потребления натуральных продуктов (зелень, бобовые, орехи) и потерь при обработке пищи [1–3].

Фолиевая кислота (витамин B₉) – один из важнейших водорастворимых витаминов группы фолатов, критически значимый для метаболизма человека и являющийся специфическим фактором роста для некоторых микроорганизмов. В организме животных фолиевая кислота вырабатывается кишечными бактериями в небольших количествах [4–6]. Витамин B₉ участвует в ключевых процессах переноса углерода, необходимых для синтеза ДНК и метилирования [7, 8]. ВОЗ рекомендует потреблять 400–600 мкг фолиевой кислоты в сутки взрослым и беременным женщинам [9]. Дефицит этого витамина связан с тяжелыми заболеваниями: дефектами нервной трубки, сердечно-сосудистыми, цереброваскулярными и нейродегенеративными заболеваниями, а также с мегалобластной анемией и некоторыми формами рака [10, 11].

Фолиевая кислота представляет собой кристаллическое соединение желтого цвета без вкуса и запаха, относящееся к водорастворимым витаминам группы В [4]. С химической точки зрения она является гетероциклическим соединением на основе 4-[(птеридин-6-илметил)амино]бензойной кислоты, конъюгированной с одной или несколькими единицами глутамата (рис. 1).

Молекула фолиевой кислоты (птероилглутаминовая кислота) состоит из трех структурных компонентов: птерина (птеридиновое кольцо), п-аминобензойной кислоты и глутаминовой кислоты [4, 12]. Каждый из этих компонентов в отдельности не обладает витаминной активностью (рис. 2).

Эффективным решением стала программа обязательного обогащения продуктов питания фолиевой кислотой [8]. Дефицит витамина диагностируется при уровне менее 6,8 нмоль/л в сыворотке крови и менее 226,5 нмоль/л в эритроцитах, от чего страдает более 40 % женщин в мире независимо от уровня доходов. В 93 странах проводится обогащение пшеничной муки фолиевой кислотой, причем в 81 из них внедрены программы обязательного обогащения муки этим витамином для профилактики дефектов нервной трубки [7]. Благодаря этому риск возникновения данных дефектов

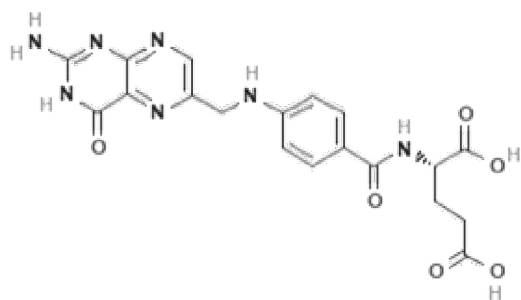
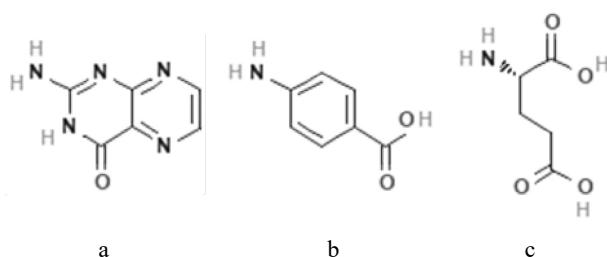


Рисунок 1. Химическая структура фолиевой кислоты

Figure 1. Folic acid: Chemical structure

Рисунок 2. Компоненты фолиевой кислоты:
a – птерин; b – p-аминобензойная кислота;
c – глутаминовая кислотаFigure 2. Folic acid components: a – pterin;
b – p-aminobenzoic acid; and c – glutamic acid

удалось снизить примерно на 40 % в странах с низким и средним доходом, при этом доказав безопасность и экономическую целесообразность подхода [8].

Фолиевая кислота представляет собой важное биологически активное соединение, играющее ключевую роль во многих биохимических процессах организма человека. В связи с этим научные исследования направлены на изучение условий, обеспечивающих ее стабильность. Установлено, что при стандартных условиях хранения (20 °C, относительная влажность 65 %) фолиевая кислота (в твердом состоянии) разлагается со скоростью 1 % в год¹. A. Vora *et al.* [13] исследовали нагревание кристаллической фолиевой кислоты до 800 °C и установили, что при температуре около 180 °C сначала отделилась глутаминовая кислота, а затем произошла деградация птерина и p-аминобензойной кислоты, протекавшая перекрывающимся образом (рис. 2) [13]. При нагревании до 195 °C зафиксирована полная потеря свойств амидных и кислотных функциональных групп, а при повышении температуры до 200 °C произошло интенсивное разрушение структуры, в результате которого кристаллическая форма фолиевой кислоты перешла

в аморфное состояние. Сходную картину деградации наблюдали исследователи [14] при изучении коммерческого лекарственного препарата, содержащего фолиевую кислоту.

При температуре до 180 °C фолиевая кислота в модельных пищевых системах достаточно стабильна. При нагревании до 100 °C в течение 2 ч сохраняется от 75 до 92 % фолиевой кислоты². При многократном нагревании первый нагрев усиливает разрушение фолиевой кислоты при последующей термической обработке³. По-видимому, наличие определенных продуктов распада приводит к более интенсивному разрушению исходного соединения, тогда как присутствие других компонентов, напротив, способствует стабильности фолиевой кислоты. В присутствии железа, аскорбата или их комбинации при высоких температурах (100, 120 и 140 °C) фолиевая кислота была относительно стабильна во всех системах по сравнению с состоянием при отсутствии этих добавок. Аналогичные результаты получены для фолиевой кислоты в сочетании с аскорбиновой кислотой [15].

Приведенные результаты показывают, что фолиевая кислота требует особых условий хранения и применения для сохранения активности, особенно при использовании в медицинских и пищевых целях. Научные исследования продемонстрировали высокую безопасность и экономическую целесообразность обогащения пищевых продуктов фолиевой кислотой⁴ [8, 16, 17]. Однако на стабильность фолиевой кислоты влияют различные факторы: pH среды, температура, свет и окислители. При этом механизмы термической деградации витамина при выпекании хлеба до конца не изучены, а существующие исследования стабильности и биодоступности фолиевой кислоты в процессе производства хлеба немногочисленны [7]. В литературе также недостаточно исследований стабильности фолиевой кислоты в технологических процессах, таких как выпечка хлеба [12, 18, 19]. Определенное влияние на свойства и характеристики фолиевой кислоты оказывают другие компоненты пищевых продуктов, что связано с химическими, биохимическими и физиологическими взаимодействиями между нутриентами [20, 21]. Например, глицин может влиять на кислотно-щелочной баланс среды. В предварительных исследованиях установлено, что глицин увеличивает растворимость фолие-

² Day BPF, Gregory JF. Thermal stability of folic acid and 5-methyltetrahydrofolic acid in liquid model food systems. *Journal of Food Science*. 1983;48:581–587. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1983.tb10795.x>

³ Burton H, Ford JE, Franklin JG, Porter JW. Effects of repeated heat treatments on the levels of some vitamins of the B-complex in milk. *Journal of Dairy Research*. 1967;34:193–197. <https://doi.org/10.1017/S0022029900012346>

⁴ Лобзанова М. Е., Иванова С. А. Современные тенденции обогащения хлебобулочных изделий: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. «Вопросы науки 2025: потенциал науки, достижения и перспективы развития». Анапа, 2025. С. 53–61. <https://elibrary.ru/WEMELP>

¹ Tripet FY, Kesselring UW. Stability of solid folic-acid in relation to temperature and humidity. *Pharmaceutica Acta Helveticae*. 1975; 50(10):318–322.

Таблица 1. Рецептурный состав исследованных образцов (для изготовления 1 единицы изделия)

Table 1. Formulation for laboratory bakery samples, 1 unit

Образцы	Сырье	Мука, г	Вода, г	Соль, г	Фолиевая кислота, мкг/100 г готового продукта	Сахар, г	Глицин, мг/100 г готового продукта
1–4		120	60	0,6	400	–	–
5		120	60	0,6	400	2,4	–
6		120	60	0,6	400	2,4	100
7		120	60	0,6	400	2,4	100
8		120	60	0,6	400	2,4	100

вой кислоты в водных растворах^{5,6} [22]. Поскольку фолиевая кислота чувствительна к высоким температурам, окислению и ультрафиолетовому излучению, изменение pH в продукте может потенциально повлиять на ее стабильность.

Цель исследования – определить влияние глицина на термическую стабильность свободной фолиевой кислоты в составе рецептуры обогащенного хлебо-булочного изделия в процессе выпекания.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования выступали образцы (табл. 1), приготовленные из следующих компонентов: муки пшеничной хлебопекарной высшего сорта (ООО «КДВ Яшкинская Мельница», Россия) согласно ГОСТ 26574-2017; питьевой воды «Бердовская таежная» (ООО «Чистая вода», Россия) в соответствии с ГОСТ 32220-2013; поваренной соли (АО «SALINA», Россия) по ГОСТ Р 51574-2018; фолиевой кислоты (Qingdao Samin Chemical Co., Ltd., Китай) и сахара согласно ГОСТ 33222-2015 (ARO, Россия), а также глицина (Qingdao Samin Chemical Co., Ltd., Китай). Данные образцы имитировали хлебобулочные изделия в лабораторных условиях.

В емкость тестомесителя сначала загружали сухие ингредиенты (муку, фолиевую кислоту, сахар, а также глицин – при необходимости). Компоненты перемешивали, после чего добавляли воду. Затем замешивали до получения однородной эластичной массы (около 10 мин). После формовки изделий и предварительной расстойки образцы выпекали в пароконвектомате в течение 30–35 мин при температуре 180–185 °С и пароувлажнении 30 % (или при сбрызгивании стенки печи водой непосредственно перед посадкой). Готовые образцы, имитирующие хлебобулочные изделия, высушивали методом сублимационной сушки и хранили до проведения последующего химического анализа.

⁵ Лобзанова М. Е. Влияние фолиевой кислоты и глицина на сохранение свежести хлеба: материалы Междунар. науч.-прак. конф. «Теоретические и практические основы научного прогресса в современном обществе». Киров, 2026. С. 146–149.

⁶ Лобзанова М. Е. Влияние фолиевой кислоты и глицина на качество хлебобулочных изделий: материалы Междунар. науч.-прак. конф. «Материалы и методы инновационных научно-практических исследований и разработок». Екатеринбург, 2026. С. 57–60.

Содержание фолиевой кислоты в образцах после выдерживания в термостате определяли методом ВЭЖХ на хроматографе Shimadzu LC-20 Prominence (Shimadzu Corporation, Япония) с диодно-матричным детектором Shimadzu SPD-20MA (Shimadzu Corporation, Япония) и колонкой HyperClone 5 мкм BDS C-18 250×4,6 мм Phenomenex (Torrance, США). Подвижная фаза состояла из бидистиллированной воды (pH = 2,9) и ацетонитрила. Для установления pH = 2,9 использовали раствор серной кислоты 1:10. Значение pH водного раствора измеряли с помощью иономера. В хроматограф вводили раствор исследуемых образцов в количестве 20 мкл. Из заранее измельченной специально подготовленной навески отбирали пробу и помещали ее в перемешивающее устройство для экстракции в соответствии с методикой выполнения измерений МН 2146-2004 «Методика определения фолиевой кислоты в обогащенных продуктах питания» (Минск, Республика Беларусь). Полученные экстракты центрифугировали в лабораторной центрифуге (при 5000–5500 об/мин в течение 20 мин). Температура колонки составляла 25 °С, детектирование проводили при длине волны 286 нм и ширине оптической полосы 20 нм после градиентного элюирования экстракта на хроматографической колонке, скорость потока – 1 мл/мин.

Все числовые значения подвергали первичному статистическому анализу с использованием функционала Microsoft Office Excel 2007. Данные представлены как среднее значение ± стандартное отклонение. С помощью критерия Стьюдента оценивали однородность распределения эмпирических выборок. Для определения статистически значимых различий между средними значениями применяли однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Уровень достоверности статистических различий между контрольной и экспериментальными группами растворов определяли с помощью критерия Тьюки. Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Считается, что в процессе ферментации дрожжи вырабатывают нативные формы фолата, такие как тетрагидрофолат, 5-формилтетрагидрофолат, 5-метилтетрагидрофолат и 10-формилфолат. В работе [7] проанализирована концентрация фолиевой кислоты

в дрожжах и образцах французского хлеба без добавления фолиевой кислоты, при этом количество В₉ в исследованных образцах не установлено. Во время брожения содержание синтетической фолиевой кислоты оставалось практически неизменным, что подтверждает отсутствие значимого влияния дрожжей на содержание фолиевой кислоты в хлебе. Поэтому для изучения сохранности фолиевой кислоты в смеси с глицином в процессе выпекания хлеба на предварительном этапе было принято решение использовать лабораторные образцы, состоящие из муки, воды, сахара, фолиевой кислоты и глицина.

Традиционно уровень фолиевой кислоты в пищевых продуктах определяют с помощью метода ВЭЖХ, обладающего достаточной чувствительностью. Отмечается, что для анализа образцов хлеба требуется дополнительная подготовка и их очистка, что увеличивает время и стоимость исследования [23]. На рисунке 3 представлены хроматограммы образцов с добавлением фолиевой кислоты в сочетании с глицином.

На хроматограммах ВЭЖХ анализа (рис. 3б–е) наблюдались пики в том же временном интервале как и на стандарте фолиевой кислоты, что подтверждает присутствие фолиевой кислоты во всех исследуемых образцах. Однако интенсивность пиков несколько варьировалась между исследованными образцами, что может свидетельствовать о неодинаковом содержании фолиевой кислоты. Опытный образец 4 (рис. 3е) показывает наиболее выраженный пик, тогда как в образце 2 (рис. 3с) пик менее интенсивен. Базовая линия во всех хроматограммах оставалась относительно стабильной, что говорит о хорошем качестве разделения и минимальном уровне шумов. На хроматограммах образцов 1–4 регистрировали дополнительные пики, которые, скорее всего, связаны с присутствием других компонентов в рецептуре. Форма пиков была симметричной, что указывает на удовлетворительное разрешение компонентов.

Таким образом, хроматограмма образца 4 демонстрировала четкий пик фолиевой кислоты с хорошей интенсивностью, что свидетельствует о достаточном содержании витамина в этом образце. В образцах 1 и 3 также присутствуют пики фолиевой кислоты, но с меньшей интенсивностью, чем в образце 2, что указывает на меньшее содержание витамина. Хроматограмма образца 2 имела самый слабый пик среди всех образцов, что подтверждает минимальное содержание фолиевой кислоты в нем. При этом во всех образцах фолиевая кислота присутствует, но в разных концентрациях. Форма пиков достаточно симметрична, что является показателем хорошего разделения компонентов и отсутствия значительных примесей. Это обосновывается аналитическими значениями фолиевой кислоты (табл. 2). Учитывая эти значения и значение вносимой в смесь фолиевой кислоты, установлено, что в результате термической обработки образцов 1–4 разрушено от 83,2 до 86,8 % фолиевой кислоты.

В работе [24] проанализированы образцы французского хлеба на предмет содержания фолиевой кислоты для выявления влияния промышленной обработки на конечное количество этого витамина в продукте. Исследуемые образцы выпекали при разных температурах (160, 190 и 220 °С) в течение 9, 12, 15 и 20 мин с использованием пара или без него в первые 10 с выпекания. Хлеб высушивали методом сублимационной сушки и хранили для последующего химического анализа. Проведенные исследования показали, что условия выпечки существенно влияют на сохранность фолиевой кислоты в готовом хлебе. Наиболее благоприятным режимом оказалась температура 190 °С, при которой было достигнуто наибольшее сохранение витамина. При более низких температурах (160 °С) содержание фолиевой кислоты также оказывалось ниже, хотя потери не столь значительны. В то же время высокие температуры (220 °С) приводили к существенному разрушению витамина из-за термического разложения. Режимы в 9 и 20 мин негативно сказывались на сохранности фолиевой кислоты, тогда как наиболее благоприятным оказался промежуточный вариант – 12–15 мин. Использование пара позволило значительно увеличить содержание фолиевой кислоты в готовом продукте по сравнению с выпечкой без пара. Даже при оптимальных условиях происходило некоторое снижение содержания витамина, однако оно оставалось в допустимых пределах. Максимально эффективное сохранение фолиевой кислоты достигается при температуре выпечки 190 °С, наличии пара в процессе выпечки и продолжительности выпекания 12–15 мин. При соблюдении условий удалось минимизировать потери (не более 25 %) витамина и получить продукт с максимально сохраненной фолиевой кислотой (246,7 мг/100 г продукта). Коммерческие образцы хлеба содержали приблизительно в 2,5 раза меньше фолиевой кислоты в готовом продукте, что соответствует результатам данного исследования.

Ряд исследований [12, 25] касается стабильности фолиевой кислоты в водных растворах, что важно при стерилизации продуктов с ее содержанием. В этих работах рассматривался диапазон температур от 100 до 120 °С, в котором фолиевая кислота демонстрирует хорошую стабильность при различных временных интервалах и значениях pH, особенно в щелочных растворах по сравнению с кислыми. При автоклавировании (121 °С) водного раствора фолиевой кислоты в течение 30 мин произошло полное разложение при pH = 1; при pH = 3 разрушилось около 45 %; при pH от 4 до 12 – до 30 %⁷. В автоклаве фолиевая кислота при pH от 5 до 10 остается практически стабильной при температуре 121 °С в течение 15 мин, а при температуре 100 °С в течение 1 ч, при понижении pH ее стабильность снижалась, фолиевая кислота

⁷ Daniel EP, Kline OL. Factors affecting folic acid determination. Journal of Biological Chemistry. 1947;170:739–746. [https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(17\)30856-6](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(17)30856-6)

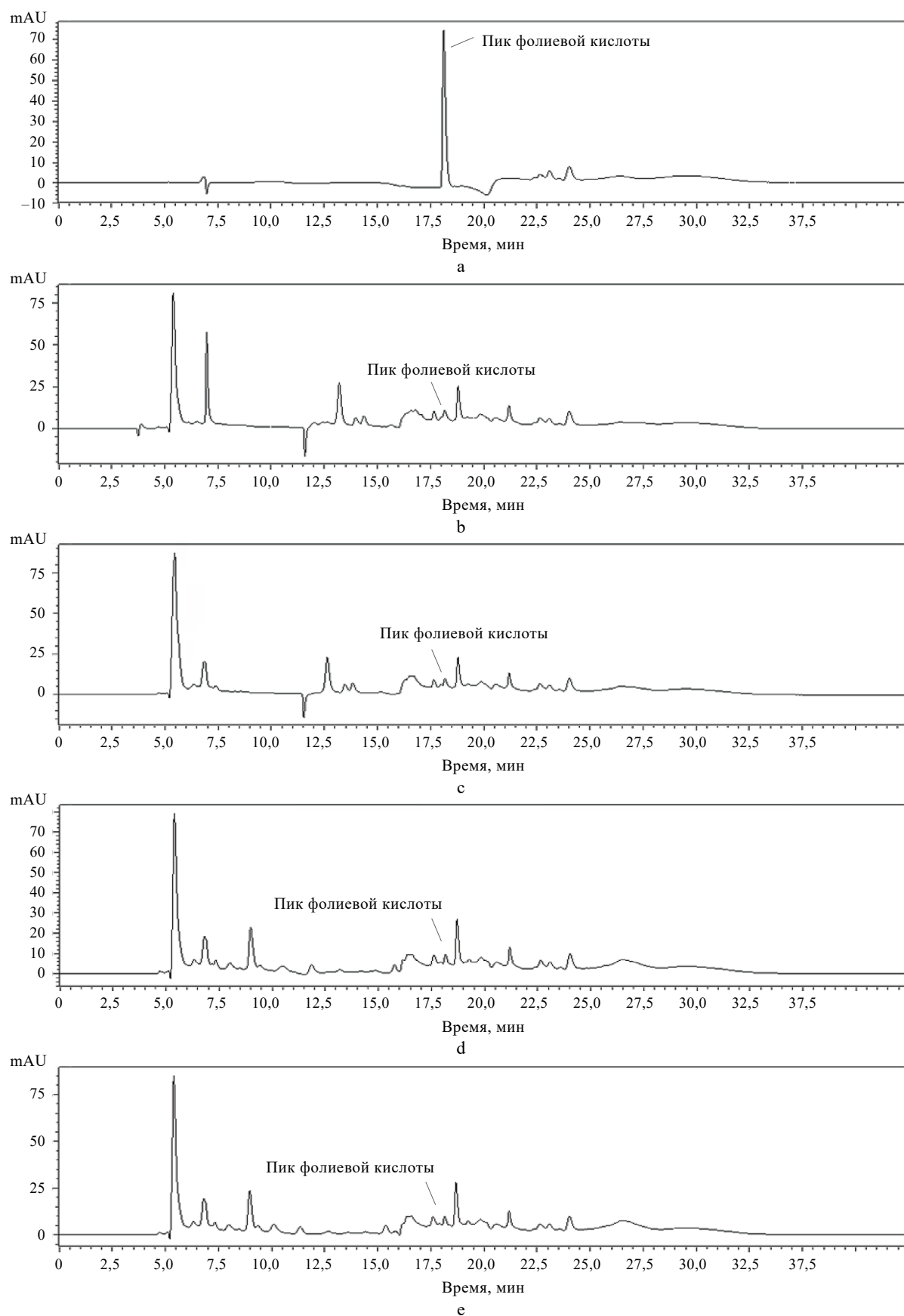


Рисунок 3. Хроматограмма ВЭЖХ анализа: а – стандарт фолиевой кислоты; б – образец 1; с – образец 2; д – образец 3; е – образец 4

Figure 3. HPLC analysis chromatogram: a – folic acid standard; b – sample 1; c – sample 2; d – sample 3; and e – sample 4

Таблица 2. Количество фолиевой кислоты в исследуемых образцах

Table 2. Folic acid in the samples

Образец	Фолиевая кислота, мкг/100 г продукта
1	66,27 ± 3,10
2	67,04 ± 11,87
3	52,80 ± 5,04*
4	65,75 ± 3,54

Примечание: начальное содержание фолиевой кислоты – 400 мкг/100 г продукта. Данные представлены как среднее значение ± стандартное отклонение (n = 3). * – значение значимо отличается $p < 0,05$.

Note: The initial folic acid content is 400 µg/100 g of the product. The data is presented as the mean ± standard deviation (n = 3). * – the value is significantly different from $p < 0.05$.

разлагалась до 50, 20 и 5–10 % при pH 1, 2 и 3–4 соответственно⁸. Аналогичные данные получены другими исследователями^{9,10,11} [12].

После инкубации фолиевой кислоты при 30 °C в течение одной недели наблюдалось ее разложение около 2; 4 и 26 % при pH 4,5; 7,3 и 9,2 соответственно¹². Стабильность фолиевой кислоты отмечена в диапазоне pH аминокислотной кислоты (растворы с комплексами витаминов группы B)¹³.

Период полураспада фолиевой кислоты составлял более 700 ч при pH от 5 и температуре окружающей среды; при pH ниже 4 этот показатель сокращался до 24–64 ч¹⁴. Проанализирован термолиз фолиевой кислоты в нейтральном растворе при микроволновом или обычном нагревании: при классическом нагревании до 100 °C фолиевая кислота проявляла стабильность, тогда как микроволновое воздействие не влияло¹⁵.

⁸ Dick MIB, Harrison IT, Farrer KTH. Thermal stability of folic (Pteroylglutamic) acid. Australian Journal of Experimental Biology and Medical Science. 1948;26:239–244. <https://doi.org/10.1038/icb.1948.25>

⁹ Paine-Wilson B, Chen TS. Thermal-destruction of folacin: Effect of pH and buffer ions. Journal of Food Science. 1979;44:717–722. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1979.tb08484.x>

¹⁰ Garrett ER. Prediction of stability in pharmaceutical preparations II. Vitamin stability in liquid multivitamin preparations. Journal of the American Pharmaceutical Association. 1956;45:171–178. <https://doi.org/10.1002/jps.3030450313>

¹¹ Mneni AP, Beveridge T. Thermal destruction of pteroylglutamic acid in buffer and model food systems. Journal of Food Science. 1982; 47:2038–2041. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1982.tb12940.x>

¹² Koft B, Sevag MG. The liberation of diazotizable amine from pteroylglutamic acid. Journal of the American Chemical Society. 1949;71(9): 3245–3245.

¹³ Biamonte AR, Schneller GH. A study of folic acid stability in solutions of the B-complex vitamins. Journal of the American Pharmaceutical Association (Scientific ed.). 1951;40:313–320. <https://doi.org/10.1002/jps.3030400704>

¹⁴ O'Broin JD, Temperley JJ, Brown JP, Scott JM. Nutritional stability of various naturally occurring monoglutamate derivatives of folic-acid. The American Journal of Clinical Nutrition. 1975;28:438–444. <https://doi.org/10.1093/ajcn/28.5.438>

¹⁵ Cooper RG, Chen TS, King MA. Thermal destruction of folacin in microwave and conventional heating. Journal of the American Dental Association. 1978;73:406–410.

Влияние pH на стабильность фолиевой кислоты при температуре 100 °C исследовано с использованием четырех различных буферных систем: буферный раствор HCl/KCl, универсальный буфер, цитратный буфер и цитратно-фосфатный буфер. Буферные системы позволяли получать растворы с уровнем pH от 1,1 до 12,0. Фолиевая кислота оставалась стабильной при pH от 5 до 12 не менее 10 ч. Ее период полураспада увеличивался до 22 ч при увеличении значения pH до 4, а при pH > 5 период полураспада составлял более 60 ч. Период полураспада фолиевой кислоты практически не менялся при pH = 3 независимо от состава буфера¹⁶. V. De Brouwer et al. установили, что фолиевая кислота оставалась относительно стабильной в диапазоне pH от 2 до 10 как при термической обработке (нагревание до 100 °C в течение 10 мин), так и без нее (инкубация при 37 °C в течение 2 ч) [26]. Наблюдаемый широкий диапазон потерь фолиевой кислоты может быть связан с другими факторами окружающей среды, такими как уровень pH раствора.

Глицин (аминоуксусная кислота) – простейшая органическая нейтральная, глюконеогенная и протеиногенная аминокислота, которая традиционно считается необязательной с точки зрения питательной ценности [27, 28]. Это единственная протеиногенная аминокислота, не имеющая оптических изомеров, т. к. в качестве боковой цепи у нее всего один атом водорода (рис. 4). Глицин относится к заменимым аминокислотам и может синтезироваться в организме человека, но скорость его синтеза ограничена. Расчеты показывают, что у человека средней массы (70 кг) дефицит глицина составляет около 10 г в день даже с учетом его регулярного поступления с пищей [28]. Таким образом, количество глицина не удовлетворяет потребности клеток, потребность в нем является общей и не зависит от каких-либо конкретных обстоятельств, а его дефицит может привести к нарушению функций организма. Поэтому глицин приобретает уникальное пищевое и клиническое значение. В настоящее время глицин классифицируется как условно незаменимая аминокислота, которая поступает в организм как с пищей, так и синтезируется эндогенно, преимущественно из L-серина [29, 30].

Глицин – амфотерное соединение, которое содержит две функциональные группы противоположного характера: аминогруппу (–NH₂) с основными свойствами и карбоксильную группу (–COOH) с кислотными свойствами [27, 28, 31]. Выступая как кислота

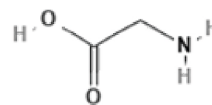


Рисунок 4. Химическая структура глицина

Figure 4. Glycine: Chemical structure

¹⁶ Paine-Wilson B, Chen TS. Thermal-destruction of folacin ...

(по карбоксильной группе), глицин образует соли, а по аминогруппе взаимодействует с кислотами. При взаимодействии с другими аминокислотами глицин образует пептиды. Глицин и фолиевая кислота взаимодействуют в водных растворах благодаря координационным и биохимическим механизмам, что может влиять на стабильность, растворимость и биодоступность фолиевой кислоты [22]. Фолиевая кислота также имеет функциональные группы, способные участвовать в координационных связях (карбоксильные и амидные) [32]. Эти взаимодействия обусловлены химическими свойствами обеих молекул и их способностью к формированию комплексов.

В водных растворах глицин образует координационные комплексы с ионами металлов, которые часто сопутствуют фолиевой кислоте или добавляются в качестве стабилизаторов. В таких комплексах карбоксильная группа фолиевой кислоты функционирует как моно- или бидентатный лиганд, связанный с одним ионом металла, или как мостиковый бидентатный лиганд, связанный с двумя ионами металла [32]. Глицин влияет на их структуру и стабильность, а формирование этих комплексов способно изменять растворимость, спектральные характеристики и устойчивость фолиевой кислоты в растворе.

Глицин хорошо растворим в воде, при добавлении в водный раствор фолиевой кислоты он увеличивает ее растворимость и улучшает коллоидные свойства [22]. Глицин также участвует в ионных взаимодействиях с фолиевой кислотой, которая в зависимости от pH раствора может существовать в ионизированной форме. Это влияет на распределение зарядов в растворе и, соответственно, на стабильность и агрегатное состояние фолиевой кислоты.

В данном исследовании распределение плохо растворимой фолиевой кислоты было неравномерным (табл. 1). Этого можно избежать, если сначала смешать порошок фолиевой кислоты с сахаром, затем добавить полученную смесь в муку, перемешать, а водный раствор глицина внести на последнем этапе [22]. Далее изучали влияние глицина на термоустойчивость фолиевой кислоты, за счет изменения ее структуры и химических свойств. На рисунке 5 представлены хроматограммы образцов с добавлением фолиевой кислоты в сочетании с глицином.

Результаты хроматографического анализа показали, что во всех исследованных образцах (рис. 5) фолиевая кислота присутствовала в одинаковой концентрации, о чем свидетельствовала сопоставимая высота пиков на хроматограммах. Образец 5 (без глицина) демонстрировал более чистую хроматограмму: один выраженный пик фолиевой кислоты и минимальный фоновый шум. В образцах 6–8, содержащих фолиевую кислоту и глицин, наблюдались два четко разделенных пика: основной пик (фолиевая кислота, 5–6 мин) и дополнительный (глицин, 10–12 мин). Отсутствие дополнительных пиков в образце 5 указывает на меньшую

сложность матрицы по сравнению с образцами 6–8. Глицин – низкомолекулярное вещество с максимумом поглощения 210–245 нм, элюируется до фолиевой кислоты^{17,18}, поэтому его добавление не мешало детекции и не влияло на форму и интенсивность пика фолиевой кислоты, однако слегка ухудшало качество хроматограммы за счет незначительного повышения фонового шума. Концентрации глицина в образцах 6–8 идентичны, о чем указывает одинаковая высота соответствующих пиков.

Хроматограммы (рис. 5) подтверждают присутствие фолиевой кислоты во всех образцах (5–8), но в разных концентрациях. Наименьшая концентрация обнаружена в образце 5. Все образцы содержали заявленные компоненты (глицин, фолиевую кислоту) в ожидаемых количествах. Содержание фолиевой кислоты в образцах с глицином оставалось стабильным после термической обработки. Время удерживания пика фолиевой кислоты в образцах 6–8 совпадало, что подтверждает идентичность и количество анализируемого вещества. Следовательно, содержание фолиевой кислоты в образцах 6–8 статистически ($p < 0,05$) идентично при добавлении в тесто одинакового количества глицина. Содержание фолиевой кислоты в образцах после термообработки приведено в таблице 3.

Потеря фолиевой кислоты после термообработки в образце 5 (без глицина) составила более 82 %, тогда как в образцах с глицином – менее 10 %, учитывая некоторую неравномерность распределения фолиевой кислоты в муке. Эту проблему можно решить, если растворять фолиевую кислоту с глицином в воде и вносить полученный раствор в смесь муки и других сухих компонентов.

В исследовании [7] в тесто добавляли 300 мкг фолиевой кислоты на 100 г муки (чистота 87 %). После гомогенизации в обогащенной муке сохранялось 261 мкг фолиевой кислоты на 100 г продукта. После выпечки хлеба (210 °С, с паром, 17 мин) содержание фолиевой кислоты снизилось до 183,8 мкг на 100 г сухого веса готового продукта, что составило 75,3 % от исходного количества. С учетом влажности готового хлеба фактическая концентрация фолиевой кислоты оказалась равной 113,3 мкг на 100 г готового хлеба (в естественном состоянии, т. е. с содержанием влаги).

Во время выпечки внутренняя температура хлеба достигала 97 °С через 16 мин, что соответствовало завершению процесса. Температура в печи сначала снижалась при загрузке теста (до 125 °С), затем постепенно повышалась до 182 °С через 17 мин и до 195 °С через 30 мин. Такой режим обеспечил сохранение 75,3 % фолиевой кислоты в готовом продукте относительно ее количества в обогащенной муке. Для компенсации потерь при выпечке и обеспечения необходимого

¹⁷ Глицин. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Глицин#cite_note-2d932e9125b1a185-5 (дата обращения 01.03.2026).

¹⁸ Glycine. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/750> (дата обращения 01.03.2026).

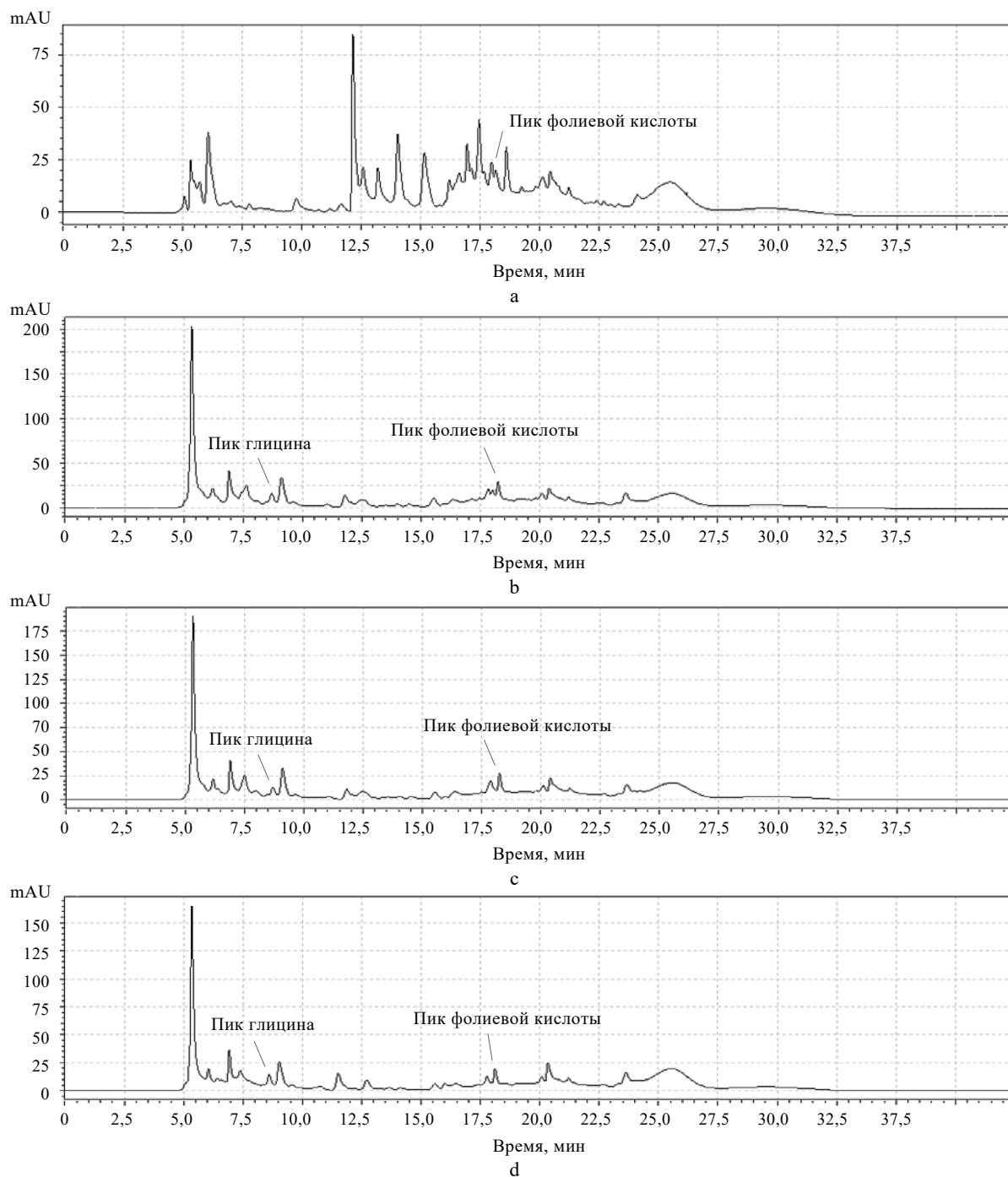


Рисунок 5. Хроматограмма ВЭЖХ анализа опытных образцов после термической обработки на содержание фолиевой кислоты: а – образец 5 (отрицательный контроль); б – образец 6; с – образец 7; d – образец 8
Figure 5. Post-thermal HPLC analysis for folic acid content: a – sample 5 (negative control); b – sample 6; c – sample 7; and d – sample 8

Таблица 3. Количество фолиевой кислоты в образцах с добавлением глицина в количестве 100 мг/100 г продукта
Table 3. Folic acid in samples with glycine (100 mg/100 g of product)

Образец	Фолиевая кислота, мкг/100 г продукта
5	69,41 ± 3,57
6	403,70 ± 15,36
7	375,29 ± 12,22
8	373,45 ± 13,17

Примечание: образец 5 – отрицательный контроль (без глицина). Данные представлены, как среднее значение ± стандартное отклонение (n = 3). Все значения значимо отличаются от отрицательного контроля ($p < 0,05$).

Note: Sample 5 is a negative control (without glycine). The data is presented as the mean value ± standard deviation (n = 3). All values significantly differ from the negative control ($p < 0.05$).

содержания фолиевой кислоты в готовом продукте авторы исследования [7] предлагают вносить в тесто не менее 300 мкг фолиевой кислоты на 100 г муки, тогда в готовом хлебе сохранится количество витамина, достаточное для обеспечения части суточной потребности при регулярном употреблении. Несмотря на наличие термического воздействия, фолиевая кислота оставалась стабильной и полностью доступной для усвоения в кишечнике после имитации процесса пищеварения [7].

А. Vora *et al.* описали трехэтапную деградацию фолиевой кислоты при нагревании [4]. На первом этапе, при температуре около 108 °С, происходила потеря адсорбированной воды, на втором (до 195 °С) – последовательное разрушение структуры: сначала отщеплялась глутаминовая кислота, затем происходило разложение птеринового кольца и п-аминобензойной кислоты (ПАБК, один из трех основных структурных компонентов молекулы фолиевой кислоты). Полное термическое разложение завершалось при температуре около 262 °С. Общая теплота разложения составила 960 ± 24 Дж/г. Процесс включал три эндотермических реакции: первая отвечала за 40 % процесса разрушения (потеря глутаминовой кислоты); вторая – за 8 %; третья (высокотемпературная) – за 52 % (разложение птеринового кольца и ПАБК).

Также исследование показало, что кристаллическая структура фолиевой кислоты при нагревании до 349 °С переходит в аморфное состояние. При 200 °С происходила значительная деградация с образованием углеродного остатка. Весь процесс термического разложения можно разделить на три стадии: потеря воды, отщепление глутаминовой кислоты и последующее разложение оставшихся компонентов до углеродного остатка.

Глицин оказывает эффект на все три стадии деградации фолиевой кислоты за счет физико-химических взаимодействий, влияющих на стабильность структуры и участия в побочных реакциях. Как амфотерная аминокислота, глицин может взаимодействовать с молекулой фолиевой кислоты через свои функциональные группы, что способно изменить характер ее термического разложения. На первом этапе (108 °С) глицин за счет образования дополнительных водородных связей способен корректировать скорость потери адсорбированной воды. На втором этапе аминокислота воздействует на отщепление глутаминовой кислоты и разложение птеринового кольца с ПАБК, образуя комплексы с компонентами молекулы фолиевой кислоты. На заключительной стадии (262 °С) глицин модифицирует общую теплоту разложения и соотношение вкладов отдельных эндотермических реакций. При этом сам глицин начинает разлагаться при 232–236 °С¹⁹ [53], что может дополнительно влиять на процесс термического разложения фолиевой кислоты. Кроме того,

глицин воздействует на кристаллическую структуру фолиевой кислоты, ускоряя переход вещества в аморфное состояние при нагревании выше 260 °С²⁰. Таким образом, добавление глицина потенциально способно как замедлить, так и ускорить отдельные стадии термического разложения фолиевой кислоты, изменяя общий характер ее деградации. Для точного определения характера и степени этого влияния требуются дополнительные экспериментальные исследования.

Выводы

Как известно, при термической обработке хлеба происходит частичная потеря фолиевой кислоты. По разным данным, приемлемым считается разрушение 20–30 % фолиевой кислоты от исходного количества. Итоговая сохранность витамина зависит от совокупности технологических факторов: от помола зерна до условий выпечки и хранения готового продукта.

В результате проведенного исследования установлено, что добавление глицина в тесто существенным образом влияет на сохранность фолиевой кислоты при термической обработке. В частности, при выпекании образцов, не содержащих глицин, потери фолиевой кислоты составили более 82 % от исходного содержания, тогда как в образцах с добавлением глицина – не превысили 10 %. Необходимо подчеркнуть, что использованное в эксперименте содержание глицина (100 мг/100 г продукта) обеспечило максимальную сохранность фолиевой кислоты среди всех исследованных концентраций.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования глицина в качестве стабилизатора при производстве обогащенных хлебобулочных изделий. Практическое значение работы заключается в том, что предложенный подход позволяет значительно повысить эффективность обогащения хлебобулочных изделий фолиевой кислотой, что, в свою очередь, может способствовать решению проблемы дефицита этого витамина в питании населения. Для точного определения характера и степени влияния глицина на свойства фолиевой кислоты, а также для выявления возможности управления этими свойствами требуются дополнительные экспериментальные исследования.

Критерии авторства

М. Е. Лобзанова – концептуализация, исследование, методология, подготовка первоначального черновика. В. П. Юстратов – методология, подготовка первоначального черновика. С. А. Иванова – формальный анализ, рецензирование и редактирование статьи, администрирование проекта.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

¹⁹ Глицин...

²⁰ Glycine...

Contribution

M.E. Lobzanova developed the research concept, designed the methodology, and wrote the initial draft. V.P. Yustratov developed the methodology and wrote the initial draft. S.A. Ivanova provided the formal analy-

sis, wrote the review, proofread the manuscript, and supervised the project.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

Список литературы / References

1. Fallah M, Naeini F, Fahimzad FS, Nouri A, Manesh SMR, *et al.* Nutritional immunology in lifespan. *Experimental Gerontology*. 2026;214:113015. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2025.113015>
2. Zhao Y, Liu X, Li R, Xiao H, Zhao T. Vitamin B₆ nutrition, metabolism, and the relationship of diseases: Current concepts and future research. *Journal of Future Foods*. 2026;6(5):765–779. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2024.12.007>
3. Harak SS, Shelke SP, Mali DR, Thakkar AA. Navigating nutrition through the decades: Tailoring dietary strategies to women's life stages. *Nutrition*. 2025;135:112736. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2025.112736>
4. Vora A, Riga A, Dollimore D, Alexander KS. Thermal stability of folic acid. *Thermochimica Acta*. 2002;392–393: 209–220. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(02\)00103-X](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(02)00103-X)
5. Salishcheva OV, Prosekov AYU. Antimicrobial activity of mono- and polynuclear platinum and palladium complexes. *Foods and Raw Materials*. 2020;8(2):298–311. <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-2-298-311>
6. Vesnina AD, Frolova AS, Chekushkina DYU, Milentyeva IS, Luzyanin SL, *et al.* Gut microbiota and its role in development of chronic disease and aging. *Foods and Raw Materials*. 2026;14(1):174–197. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2026-1-668>
7. Neves DA, Sousa Lobato de KB, Angelica RS, Filho JT, Oliveira de GPR, *et al.* Thermal and *in vitro* digestion stability of folic acid in bread. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2019;84:103311. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103311>
8. Parker J, Kisho A, Hou S, Goodman M, Cravens L, *et al.* Impact of mandatory grain fortification with folic acid on population folate concentrations and the risk of folate deficiency and insufficiency: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Nutrition*. 2026;156(3):101291. <https://doi.org/10.1016/j.tjnut.2025.101291>
9. Gorodetsky R. Folic acid. *Encyclopedia of Toxicology*. 2024;4:751–754. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.00316-X>
10. Arzeni C, Pilosof AMR. Bioaccessibility of folic acid in egg white nanocarriers and protein digestion profile in solution and in emulsion. *Food Science and Technology*. 2019;111:470–477. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.070>
11. Sukhikh S, Babich O, Prosekov A, Patyukov N, Ivanova S. Future of chondroprotectors in the treatment of degenerative processes of connective tissue. *Pharmaceuticals*. 2020;13(9):220. <https://doi.org/10.3390/ph13090220>
12. Gazzali AM, Lobry M, Colombeau L, Acherar S, Azais H, *et al.* Stability of folic acid under several parameters. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2016;93:419–430. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2016.08.045>
13. Vora A, Riga A, Dollimore D, Alexander K. Thermal stability of folic acid in the solid-state. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2004;75:709–717. <https://elibrary.ru/EBNOSR>
14. Jankovi B. Thermal stability investigation and the kinetic study of Folsnak® degradation process under nonisothermal conditions. *An Official Journal of the American Association of Pharmaceutical Scientists*. 2009;11:103–112. <https://doi.org/10.1208/s12249-009-9363-6>
15. Indrawati C, Arroqui I, Messagie MT, Nguyen A, Van Loey M, *et al.* Comparative study on pressure and temperature stability of 5-methyltetrahydrofolic acid in model systems and in food products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2004;52:485–492. <https://doi.org/10.1021/jf0349432>
16. Berry RJ. Lack of historical evidence to support folic acid exacerbation of the neuropathy caused by vitamin B₁₂ deficiency. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2019;110(3):554–561. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqz089>
17. Vollset SE, Clarke R, Lewington S, Ebbing M, Halsey J, *et al.* Effects of folic acid supplementation on overall and site-specific cancer incidence during the randomised trials: Meta-analyses of data on 50 000 individuals. *Lancet*. 2013; 381(9871):1029–1036. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)62001-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)62001-7)
18. Delchier N, Herbig AL, Rychlik M, Renard CMGC. Folates in fruits and vegetables: Contents, processing, and stability. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2016;15(3):506–528. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12193>
19. Phillips R, Pike OA, Eggett DL, Dunn ML. Folate stability in folic acid enriched corn masa flour, tortillas, and tortilla chips over the expected shelf life. *Cereal Chemistry*. 2017;94(6):917–921. <https://doi.org/10.1094/CHEM-02-17-0037-R>
20. Sun X, Wen J, Guan B, Li J, Luo J, *et al.* Folic acid and zinc improve hyperuricemia by altering the gut microbiota of rats with high-purine diet-induced hyperuricemia. *Frontiers in Microbiology*. 2022;13:907952. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.907952>

21. Pérez-Carreón K, Martínez LM, Videa M, Cruz-Angeles J, Gómez J, *et al.* Effect of basic amino acids on folic acid solubility. *Pharmaceutics*. 2023;15(11):2544. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15112544>
22. Лобзанова М. Е., Сухих А. С., Альтшулер О. Г., Иванова С. А. Исследование влияния некоторых кислот на процесс растворимости фолиевой кислоты. *Техника и технология пищевых производств*. 2026. Т. 56. № 1 С. 154–163. [Lobzanova ME, Sukhikh AS, Altshuler OG, Ivanova SA. Effect of acidic media on folic acid solubilization patterns. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2026;56(1):154–163. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2631>
23. Gujska E, Majewska K. Effect of baking process on added folic acid and endogenous folates stability in wheat and rye breads. *Plant Foods for Human Nutrition*. 2005;60(2):37–42. <https://doi.org/10.1007/s11130-005-5097-0>
24. Martins FCOL, Silva RG, Bredariol P, Vanin FM, Souza de D. Exploring an electroanalytical approach in the monitoring of bread quality: The folic acid analysis. *Journal of Food Engineering*. 2026;411:112917. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2025.112917>
25. Liang XS, Zhao FQ, Hao LX. Research on stability of synthetic folic acid. *Advanced Materials Research*. 2013; 781–784:1215–1218. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.781-784.1215>
26. De Brouwer V, Zhang G-F, Storozhenko S, Van Der Straeten D, Lambert E W, *et al.* pH stability of individual folates during critical sample preparation steps in prevision of the analysis of plant folates. *Phytochem Anal*. 2007;18:496–508. <https://doi.org/10.1002/pca.1006>
27. Holeček M. Glycine as a conditionally essential amino acid and its relationship to l-serine. *Metabolism*. 2025;170:156330. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2025.156330>
28. Meléndez-Hevia E, Paz-Lugo de P, Sánchez G. Glycine can prevent and fight virus invasiveness by reinforcing the extracellular matrix. *Journal of Functional Foods*. 2021;76:104318. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.104318>
29. Bassot A, Bulteau AL, Pirola L, Morio B. Glycine metabolism and its alterations in obesity and metabolic diseases. *Nutrients*. 2019;11:1356. <https://doi.org/10.3390/nu11061356>
30. Mino M, Kakazu E, Sano A, Tsuruoka M, Matsubara H, *et al.* Comprehensive analysis of peripheral blood free amino acids in MASLD: The impact of glycine-serine-threonine metabolism. *Amino Acids*. 2024;57(1):3. <https://doi.org/10.1007/s00726-024-03433-2>
31. Каширцева Е. Р., Сафронова А. В., Хохлов В. Ю., Хохлова О. Н. Взаимодействие глицина с гидрогелем на основе сополимера акриламида и акрилата калия. Сорбционные и хроматографические процессы. 2022. Т. 22. № 6. С. 821–830. [Kashirtseva ER, Safronova AV, Khokhlov VYu, Khokhlova ON. Interaction of glycine with a hydrogel based on a copolymer of acrylamide and potassium acrylate. Sorption and chromatographic processes. 2022;22(6):821–830. (In Russ.)] <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10569>
32. Скорик Н. А., Вострецова Е. Н. Растворимость фолиевой кислоты и некоторых синтезированных фолатов металлов. Журнал неорганической химии. 2019. Т. 64. № 12. С. 1319–1325. [Skorik NA, Vostresctova EN. Solubility of folic acid and some synthesized metal folates. *Journal of Inorganic Chemistry*. 2019;64(12):1319–1325. (In Russ.)] <https://doi.org/10.1134/S0044457X19120171>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Лобзанова Марина Евгеньевна / Marina E. Lobzanova eLIBRARY SPIN 5924-7450

Юстратов Владимир Петрович / Vladimir P. Yustratov ORCID 0000-0002-1779-4332; eLIBRARY SPIN 3578-5617

Иванова Светлана Анатольевна / Svetlana A. Ivanova ORCID 0000-0002-1252-9572; eLIBRARY SPIN 1246-6109