

ЭФФЕКТИВНАЯ ДОЗА УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ МОЛОКА*

Д.С. Чулков

tds.17.17.@gmail.com

SPIN-код: 2667-0448

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Представлены результаты экспериментов по определению эффективной дозы ультрафиолетового излучения для обеззараживания молока. Была подобрана эффективная доза для последующего проектирования фотохимического реактора, а именно для обеспечения эффективной толщины поглощения. Представлены графики эффективности процесса обеззараживания в зависимости от спектра излучения и спектрограмма излучения импульсной ксеноновой лампы. Показаны изменения биохимического состава продукта в результате обработки источником ультрафиолетового излучения. Рассчитаны необходимые дозы излучения в зависимости от конструкции фотохимического реактора и на основании этого сделаны выводы об эффективности применения импульсной ксеноновой лампы для проведения процесса обеззараживания и сопутствующей D3-витаминации.

Ключевые слова

Обеззараживание молока, молочная промышленность, фотохимия, импульсная ксеноновая лампа, ультрафиолет, фотохимический реактор, молочнокислые бактерии, спектр излучения

Поступила в редакцию 10.12.2021

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

Введение. Интерес к изучению воздействия ультрафиолетового (УФ) излучения на компоненты и микрофлору пищевых продуктов обусловлен перспективой их направленного использования для углубленного регулирования свойств получаемых продуктов [1].

Изменения, происходящие под действием УФ-излучения в бактериях и низших организмах, проходят следующие три стадии: возбуждение и усиление движения, начало деструктивных изменений, смерть клетки в результате фотохимических процессов. Самая чувствительная к действию ультрафиолетовых лучей функция клетки — деление. Облучение при определенной дозе вызывает остановку деления около 90 % бактериальных клеток [1–3].

В испытаниях, описанных в источниках [3, 4], для облучения молока авторы выбирали дозу излучения от 15 до 65 мДж/см². В данном эксперименте была выбрана доза 15, 30 и 65 мДж/см² при облучении ртутной и импульсной ксено-

* Данная работа произведена при поддержке Фонда содействия инновациям, в рамках программы «УМНИК»

новой лампы. Требуется выбрать расстояние от лампы до образцов и рассчитать время облучения, а также измерить характеристики лампы.

Измерение характеристик импульсной ксеноновой лампы. Исходные данные:

- межэлектродное расстояние 120 мм;
- внутренний диаметр колбы 7 мм;
- напряжение зажигания 1100 В;
- емкость конденсатора 300 мкФ;
- частота следования импульсов 2 Гц.

Исследование проводили по следующей схеме. Импульсную ксеноновую лампу закрепляли на штативе в затененной камере и подключали к блоку питания. На расстоянии L_1 см от лампы устанавливали пиродатчик StarLite, нормаль к поверхности детектора которого была прямо направлена на источник излучения. Также измерения проводили с помощью фотодетектора на расстоянии L_3 и спектрометра на расстоянии L_4 .

Во всех экспериментах условия измерения являются неидеальными. Для учета геометрических особенностей эксперимента во всех расчетах введена поправочная функция, учитывающая зависимость измеренного значения от расстояния до лампы и ее габаритов [5]:

$$F\left(\frac{l}{L}\right) = \frac{2l^2}{4l^2 + L^2} + \frac{l}{L} \operatorname{arctg}\left(\frac{L}{2l}\right),$$

где L — длина тела свечения; l — расстояние до лампы.

При измерениях на коротких расстояниях угол обзора некоторых датчиков не позволяет полностью охватить тело свечения лампы, с учетом этого длину тела свечения определяют как

$$L = 2 \sin \alpha \cdot l,$$

где α — угол обзора датчика.

Энергетическую облученность (плотность мощности излучения) рассчитывают на основе данных, полученных с помощью пироэлектрического преобразователя:

$$E_s = \frac{E}{S_1^\perp},$$

где S_1^\perp — площадь приемника излучения в проекции, перпендикулярной направлению регистрации излучения.

По рассчитанному значению спектральной облученности находят спектральную силу излучения:

$$I_s = E_s L_1^2,$$

где $L_1 = 1,2$ м — расстояние от источника до приемника излучения.

Тогда интегральная энергия излучения лампы в джоулях составит

$$E_1^{\text{изл}} = \Omega I_s,$$

где $\Omega = \pi^2$ — телесный угол источника излучения, имеющего вид цилиндра с неизлучающими торцами.

Электрическая энергия, вкладываемая в одну вспышку лампы [6]:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{300 \cdot 10^{-6} \cdot 1100^2}{2} = 181,5 \text{ Дж.}$$

Результаты измерений параметров лампы пироэлектрическим преобразователем ОРНУР представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты эксперимента
с помощью пироэлектрического преобразователя ОРНУР**

Параметр	Значение параметра при расстоянии до лампы, см		
	50	75	100
Измеренная удельная энергия импульса, мДж	3,64	1,75	1,013
	3,58	1,74	1,012
	3,61	1,75	1,018
	3,59	1,77	1,015
	3,55	1,75	1,014
	3,63	1,76	1,023
	3,6	1,76	1,029
	3,59	1,77	1,025
	3,63	1,78	1,029
Среднее	3,60	1,76	1,02
Геометрический коэффициент	0,991	0,996	0,998
Энергетическая облученность, мДж/см ²	5,19	2,52	1,46
Спектральная сила излучения, Дж/стерадиан	12,99	14,19	14,60
Интегральная энергия излучения лампы	128,17	140,09	144,13

Среднее значение интегральной энергии излучения лампы $E = 137,5$ Вт.

Среднее значение КПД преобразования электрической энергии в излучение $\eta = 0,76$.

Обработка спектра излучения. Характерный спектр излучения лампы ИНП 7/120, полученный с помощью спектрометра Solar S100, представлен на рис. 1.

График изменения энергии, выделяемой лампой, представлен на рис. 2. Видно, что в излучение переходит 138 Дж энергии из поданной на лампу электрической энергии, что составляет $\eta = 76$ %. В бактерицидной части излучения (200...280 нм) выделяется порядка 7,5 Дж энергии, что составляет $\eta_{\text{бакт}} = 5,4$ % всего излучения.

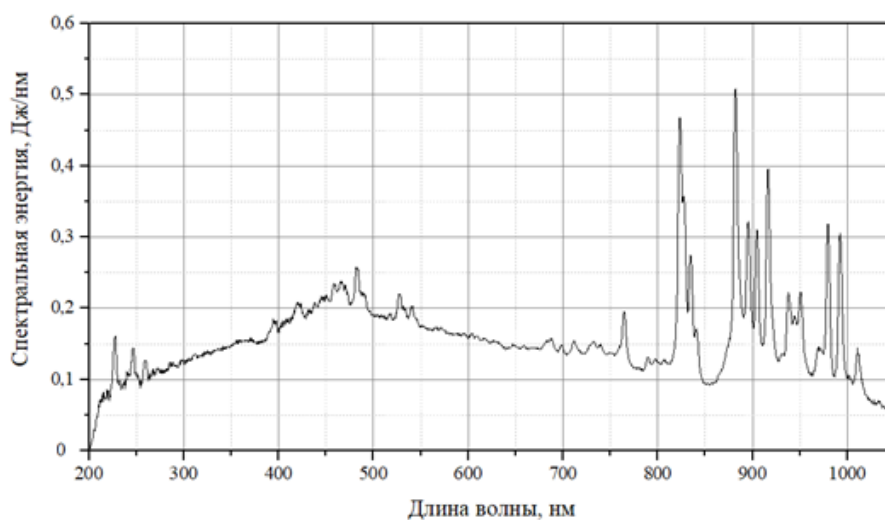


Рис. 1. Спектрограмма излучения импульсной ксеноновой лампы в абсолютных единицах

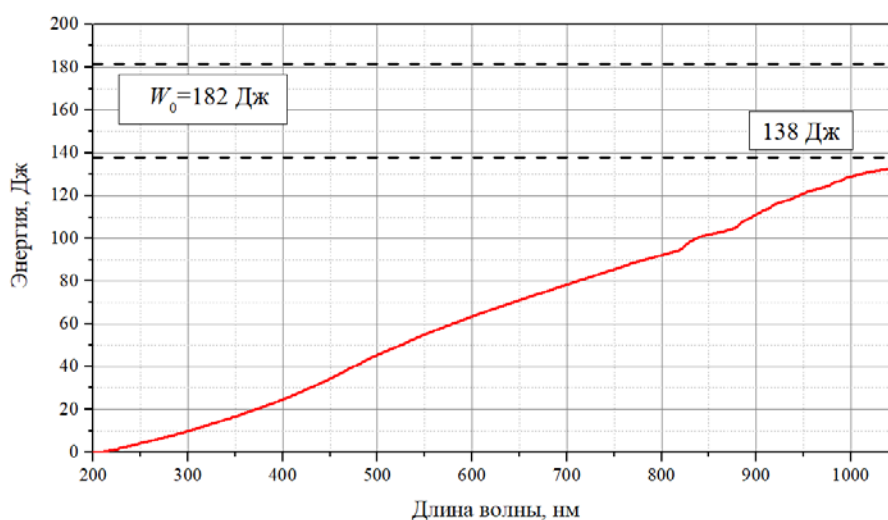


Рис. 2. Спектральное распределение энергии излучения

Результаты эксперимента. Результаты эксперимента с помощью датчика TOCON C8 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений с помощью датчика TOCON C8

Расстояние до лампы, см	Измеренный сигнал, мВ усредненный осциллографом	Удельная плотность мощности в диапазоне 280...100 нм	Спектральная сила излучения	Мощность излучения в диапазоне 280...100 нм, Вт
50	5,02	1,52	0,38	3,74
60	3,50	1,03	0,37	3,66
70	2,80	0,81	0,40	3,93

Среднее значение мощности излучения в УФ-диапазоне $P = 3,78$ Вт.

КПД преобразования электрической мощности в излучение УФ-диапазона $\eta_{изл} = 25$ %.

Результаты измерений с помощью УФ-радиометра представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений с помощью УФ-радиометра

Расстояние до лампы, см	Измеренная энергетическая освещенность в диапазоне 280...100 нм, Вт/м ²	Спектральная сила излучения, Вт/ср	Мощность излучения в диапазоне 280...100 нм, Вт
80	0,65	0,42	4,10
90	0,55	0,45	4,39
100	0,48	0,48	4,73

Среднее значение мощности излучения в УФ-диапазоне $P = 4,4$ Вт.

КПД преобразования электрической мощности в бактерицидное излучение $\eta_{изл} = 29$ %.

Спектрограмма излучения ртутной лампы, полученная спектрометром с расстояния $L = 50$ см, представлена на рис. 3.

Мощность излучения лампы, измеренная с помощью спектрометра:

$$P = \int_{190}^{1100} L^2 \pi^2 E d\lambda = 4,02 \text{ Вт.}$$

Расчет дозы и времени излучения. По полученным энергетическим характеристикам ламп можно рассчитать необходимое время облучения или количество вспышек. Формула для нахождения времени облучения для ртутной лампы имеет вид

$$t = \frac{D_{норм} z}{\frac{P}{\Omega l^2} k \cdot 1000},$$

для импульсной ксеноновой лампы

$$t = \frac{D_{норм} z}{\frac{E}{\Omega l^2} \nu k \cdot 1000},$$

где $D_{норм}$ — нормативная доза облучения для выбранной патогенной среды, мДж/см²; z — количество набираемых доз; Ω — телесный угол источника излучения, $\Omega = \pi^2$; P — мощность излучения ртутной лампы, Вт; E — интегральная энергия излучения импульсной ксеноновой лампы, Дж; k — геометрический коэффициент; l — расстояние до источника излучения, см; ν — частота вспышек импульсной лампы, Гц.

График зависимости плотности энергии ламп от расстояния до них в установке представлен на рис. 3.

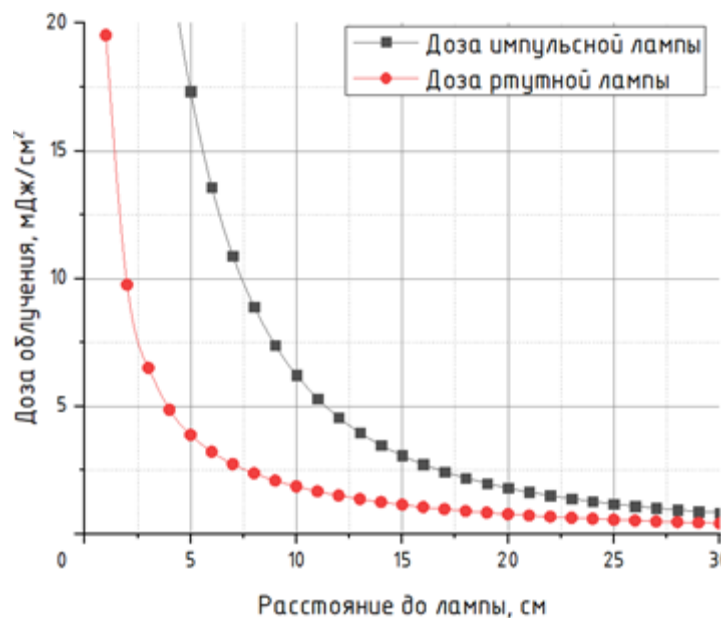


Рис. 3. Зависимость дозы облучения от расстояния до лампы

Рекомендуемые расстояния для работы с установкой 5...25 см. Для эксперимента было выбрано расстояние 15 см.

Параметры ламп разного типа, требуемые для набора необходимой поверхностной дозы в установке БЕТА-Оне с расстояния 15 см, представлены в табл. 5.

Таблица 5

Параметры, требуемые для набора необходимой дозы

Доза излучения, мДж/ см ²	Время горения ртутной лампы, с	Число вспышек импульсной лампы
15	13	3
30	26	5
65	57	11

Частота следования импульсов (вспышек) равна 2 Гц, следовательно, 1 вспышка соответствует времени 0,5 с. таким образом, из табл. 5 видно, что получаемая за одно и то же время доза от импульсной ксеноновой лампы выше, чем доза от ртутной, что позволяет проводить обработку в несколько раз быстрее и эффективнее.

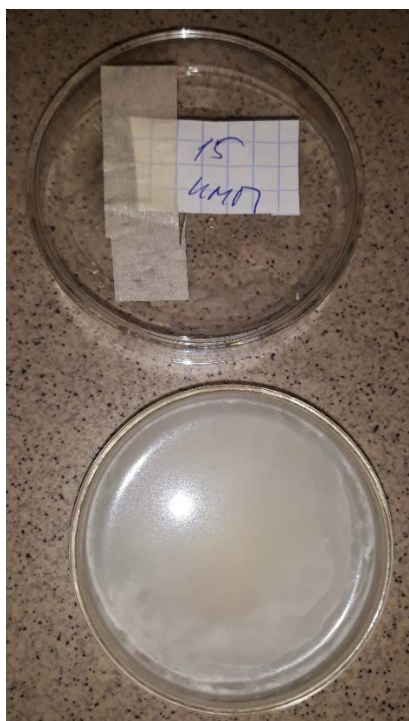
Молоко 3,2%-ной жирности разбавлялось водой 1 : 5 в чашке Петри для увеличения коэффициента пропускания. Общая толщина слоя разбавленного молока получилась равной 7 мм. Для каждой дозы было выделено 6 чашек Петри — 3 для импульсной и 3 для ртутной лампы. Далее проводили облучение ртутной и импуль-

Эффективная доза ультрафиолетового излучения для обеззараживания молока

сней ксеноновой лампой различными дозами, а 2 чашки оставались контрольными и не подвергались облучению. Затем все чашки помещали в термостат при температуре 37 °С на двое суток. Результаты эксперимента представлены на фотографиях (рис. 4, 5, а-е)



Рис. 4. Подготовка чашек Петри к эксперименту



а



б



Рис. 5. Обработанная чашка Петри:

a — импульсная лампа, доза 15 мДж/см²; *б* — ртутная лампа, доза 15 мДж/см²;
в — импульсная лампа, доза 30 мДж/см²; *г* — ртутная лампа, доза 30 мДж/см²;
д — импульсная лампа, доза 65 мДж/см²; *е* — ртутная лампа, доза 65 мДж/см²

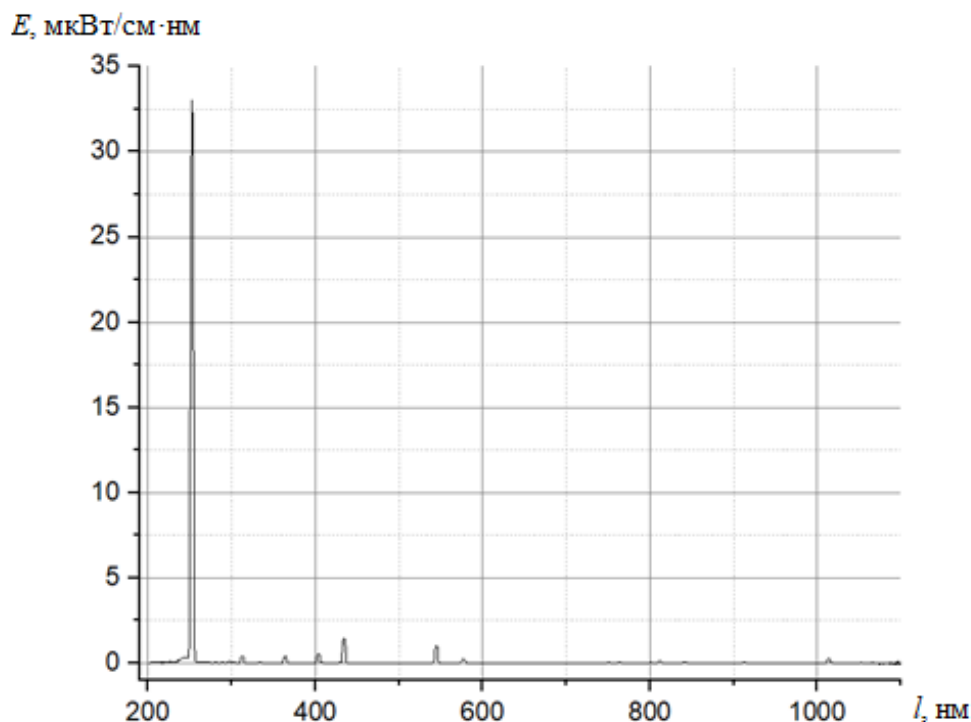


Рис. 6. Спектрограмма излучения

С учетом полученных значений и паспортных данных ртутной лампы низкого давления мощность излучения в бактерицидной части спектра принята равной $P_{рт} = 4,8$ Вт.

Результаты. По результатам серий экспериментов видно, что ультрафиолетовое излучение действительно обладает обеззараживающим действием. Молоко в контрольном образце свернулось, что говорит о действии бактерии *Bacillus subtilis*. Эта бактерия подвижна, быстро развивается в молоке, активно разлагая белки. При этом сначала молоко свертывается без существенного повышения кислотности, затем с поверхности сгустка наступает пептонизация молока. Чем дольше облучали образцы, тем большую дозу излучения вкладывали, и тем эффективней становился процесс обеззараживания.

Заключение. Из полученных результатов можно сделать вывод, что импульсная лампа обладает более выраженным бактерицидным эффектом, в отличие от ртутной лампы. Это объясняется тем, что импульсная лампа излучает в широком спектре, а, как уже было сказано ранее, экстремум поглощения молока приходится на длину волны 193 нм. Следовательно, поглощение ультрафиолетового излучения происходит интенсивнее, и эффективно снижается бактериальная обсемененность продукта.

Уже при дозе 30 мДж/см², исходящей из импульсной ксеноновой лампы, произошло эффективное обеззараживание продукта.

Литература

- [1] Харитонов В.Д., Шерстнева Н.Е. Влияние ультрафиолетового излучения на основные компоненты и микробиологические показатели жидких пищевых продуктов. *Труды БГУ. Сер. Физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем*, 2014, т. 9, № 1, с. 9–22.
- [2] Anugu A.K. Microbial inactivation and allergen mitigation of food matrix by pulsed ultraviolet light. University of Florida, 2013.
- [3] Черных Е.А. Влияние ультрафиолетовой обработки молока коров на его биохимические, технологические и гигиенические свойства. Дисс. ... канд. биол. наук. Дубровицы, ВИЖ, 2006.
- [4] Летаев С.А. Обоснование параметров установки обеззараживания молока на фермах ультрафиолетовым и инфракрасным излучением. Дисс. ... канд. тех. наук. М., ВИЭСХ, 2012.
- [5] Камруков А.С. Кулебякина А.И. Инженерные методы расчета импульсных ксеноновых ламп. М., НИЦ Инженер, 2010.
- [6] Камруков А.С. Основы практической фотометрии. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019.

Чулков Дмитрий Сергеевич — магистрант, кафедры «Экология и промышленная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Чулков Д.С. Эффективная доза ультрафиолетового излучения для обеззараживания молока. *Политехнический молодежный журнал*, 2022, № 01(66). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-01-764>

EFFECTIVE DOSE OF ULTRAVIOLET RADIATION FOR MILK DISINFECTION*

D.S. Chulkov

tds.17.17@gmail.com

SPIN-code: 2667-0448

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper presents the results of experiments to determine the effective dose of ultraviolet radiation for the disinfection of milk. An effective dose was selected for the subsequent design of a photochemical reactor and to ensure an effective absorption thickness. Graphs of the effectiveness of the disinfection process depending on the radiation spectrum and a spectrogram of the radiation of a pulsed xenon lamp are presented. Changes in the biochemical composition of the product as a result of treatment with a source of ultraviolet radiation are shown. The necessary doses of radiation were calculated depending on the design of the photochemical reactor, and on the basis of this, conclusions were drawn about the effectiveness of the use of a pulsed xenon lamp for the disinfection process and the accompanying D3-vitaminization.

Keywords

Milk disinfection, dairy industry, photochemistry, pulsed xenon lamp, ultraviolet, photochemical reactor, lactic acid bacteria, radiation spectrum

Received 10.12.2021

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

References

- [1] Kharitonov V.D., Sherstneva N.E. Impact of ultraviolet light on the basic components and microbiological characteristics of liquid food products. *Trudy BGU. Ser. Fiziologicheskie, biokhimicheskie i molekulyarnye osnovy funktsionirovaniya biosistem* [Proceedings of the Belarusian State University. Series of Physiological, Biochemical and Molecular Biology Sciences], 2014, vol. 9, no. 1, pp. 9–22 (in Russ.).
- [2] Anugu A.K. Microbial inactivation and allergen mitigation of food matrix by pulsed ultraviolet light. University of Florida, 2013.
- [3] Chernykh E.A. Vliyanie ul'trafiol'tovoy obrabotki moloka korov na ego biokhimicheskie, tekhnologicheskie i gigienicheskie svoystva. Diss. kand. biol. nauk [Effect of UF treatment of cow milk on its biochemical, technological and hygienic properties. Kand. biol. sci. diss.]. Dubrovitsy, VIZh, 2006 (in Russ.).
- [4] Letaev S.A. Obosnovanie parametrov ustanovki obezzarazhivaniya moloka na fermakh ul'trafiol'tovym i infrakrasnym izlucheniem. Diss. kand. tech. nauk [Objectivation of parameters for a milk sanitization plant on farms with UF and IK radiation. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, VIESKh Publ., 2012 (in Russ.).
- [5] Kamrukov A.S. Kulebyakina A.I. Inzhenernye metody rascheta impul'snykh ksenonovykh lamp [Engineering calculation methods for pulse xenon lamps]. Moscow, NITs Inzhener Publ., 2010 (in Russ.).

* This work was done with the support of the Innovation Promotion Fund, within the framework of the UMNIK program

- [6] Kamrukov A.S. *Osnovy prakticheskoy fotometrii* [Foundation of practical photometry]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2019 (in Russ.).

Chulkov D.S. — M. Sc. Student, Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Chulkov D.S. Substantiation of technological regimes of underwater hydroabrasive processing of metal products. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2022, no. 01(66). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-01-764.html> (in Russ.).