

Н.И. Бойко, А.В. Макогон, А.И. Маринин

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБЕЗЗАРАЖИВАЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ТЕКУЧИХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ ПРИ ПОМОЩИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Мета. Експериментально визначити раціональні режими і енергоефективність знезаражуючої обробки текучих харчових продуктів за допомогою високовольтних імпульсних дій у порівнянні з традиційною пастеризацією. *Методика.* Для одержання високовольтних імпульсів на робочих камерах – навантаженні генератора застосована методика генерування імпульсів за допомогою підвищувального трансформатора, високовольтних імпульсних конденсаторів і розрядників з системою загострення фронту імпульсів. Імпульси на навантаженні вимірювалися за допомогою низькоомного резистивного діляника напруги, передавалися по широкопосмуговому коаксіальному кабелю і реєструвалися за допомогою аналогового осцилографа С8-12 або цифрового осцилографа Rigol DS1102E зі смугою пропускання 100 МГц у кожного. Робочі камери заповнювалися водою, молоком або молочною сироваткою і складалися з кільцевидного корпусу, який виготовлено з фторопласта, і металевих електродів, що створюють дно і кришку камери, мають плоскі накладки з харчової неіржавіючої сталі для контакту з харчовим продуктом усередині камери. *Результати.* Одержано високовольтні імпульси на навантаженні генератора з тривалістю по основі 300-1200 нс при частотах проходження імпульсів до 500 імп/с. Експериментально одержані амплітуди імпульсів напруги на навантаженні генератора – до 75 кВ, а напруженості електричного поля – до 35 кВ/см в робочих камерах з зазором 22 мм і до 50 кВ/см в робочих камерах з зазором 15 мм. Вказані характеристики імпульсів дозволили здійснити повну і незворотну інактивацію мікроорганізмів в харчових рідинах в робочих камерах. *Наукова новизна.* Показано, що існують режими обробки харчових продуктів за допомогою високовольтних імпульсних дій, які дозволяють краще зберегти біологічну і харчову цінність продуктів порівняно з тепловою обробкою при їх повному знезараженні і при суттєво менших питомих енерговитратах. *Практична значущість.* Одержані експериментально режими обробки молока, молочної сироватки і води зі зменшеними питомими енерговитратами відкривають перспективу промислового застосування комплексу високовольтних імпульсних дій для знезаражуючої обробки водовмісних харчових продуктів. Бібл. 7, табл. 3, рис. 10.

Ключові слова: генератор високовольтних імпульсів, трансформатор, конденсатор, багатозазорний розрядник, багатоканальний розрядник, робоча камера, знезаражуюча обробка харчових продуктів.

Цель. Экспериментально определить рациональные режимы и энергоэффективность обеззараживающей обработки текучих пищевых продуктов при помощи высоковольтных импульсных воздействий в сравнении с традиционной пастеризацией. *Методика.* Для получения высоковольтных импульсов на рабочих камерах – на нагрузке генератора применена методика генерирования импульсов при помощи повышающего трансформатора, высоковольтных импульсных конденсаторов и разрядников с системой обострения фронта импульсов. Импульсы на нагрузке измерялись при помощи низкоомного резистивного делителя напряжения, передавались по широкополосному коаксиальному кабелю и регистрировались при помощи аналогового осциллографа С8-12 или цифрового осциллографа Rigol DS1102E с полосой пропускания 100 МГц у каждого. Рабочие камеры заполнялись водой, молоком или молочной сывороткой и состояли из кольцеобразного корпуса, выполненного из фторопласта, и металлических электродов, образующих дно и крышку камеры, имеющих плоские накладки из пищевой нержавеющей стали для контакта с пищевым продуктом внутри камеры. *Результаты.* Получены высоковольтные импульсы на нагрузке генератора с длительностью по основанию 300-1200 нс при частотах следования импульсов до 500 имп/с. Экспериментально полученные амплитуды импульсов напряжения на нагрузке генератора – до 75 кВ, а напряженности электрического поля – до 35 кВ/см в рабочих камерах с зазором 22 мм и до 50 кВ/см в рабочих камерах с зазором 15 мм. Указанные характеристики импульсов позволили осуществить полную и необратимую инактивацию микроорганизмов в пищевых жидкостях в рабочих камерах. *Научная новизна.* Показано, что существуют режимы обработки пищевых продуктов при помощи высоковольтных импульсных воздействий, позволяющие лучше сохранить биологическую и пищевую ценность продуктов по сравнению с тепловой обработкой при их полном обеззараживании и при существенно меньших удельных энергозатратах. *Практическая значимость.* Полученные экспериментально режимы обработки молока, молочной сыворотки и воды с уменьшенными удельными энергозатратами открывают перспективу промышленного применения комплекса высоковольтных импульсных воздействий для обеззараживающей обработки водосодержащих пищевых продуктов. Библ. 7, табл. 3, рис. 10.

Ключевые слова: генератор высоковольтных импульсов, трансформатор, конденсатор, многозазорный разрядник, многоканальный разрядник, рабочая камера, обеззараживающая обработка пищевых продуктов.

Введение. Традиционные тепловые способы обеззараживающей обработки (пастеризация и тепловая стерилизация) жидких пищевых продуктов, вино-материалов, напитков являются энергозатратными и не позволяют в достаточной степени сохранить их исходную биологическую и пищевую ценность [1, 2]. Одним из наиболее перспективных способов нетепловой обеззараживающей обработки продуктов является способ обработки при помощи комплекса высоковольтных импульсных воздействий (КВИВ). В англоязычной научной литературе используется термин – PEF-treatment (PEF – pulsed electric field, обработка при по-

мощи импульсного электрического поля). В большинстве своем жидкие пищевые продукты являются водосодержащими. Поэтому важным является вопрос и о рациональных режимах обеззараживающей КВИВ обработки воды.

Цель работы – экспериментально определить рациональные режимы и энергоэффективность обеззараживающей обработки текучих пищевых продуктов при помощи высоковольтных импульсных воздействий в сравнении с традиционной пастеризацией.

© Н.И. Бойко, А.В. Макогон, А.И. Маринин

Экспериментальная установка. Для проведения экспериментальных исследований использовалась установка, которая впервые описана в [3]. Электрическая схема установки с системой управления приведена на рис. 1.

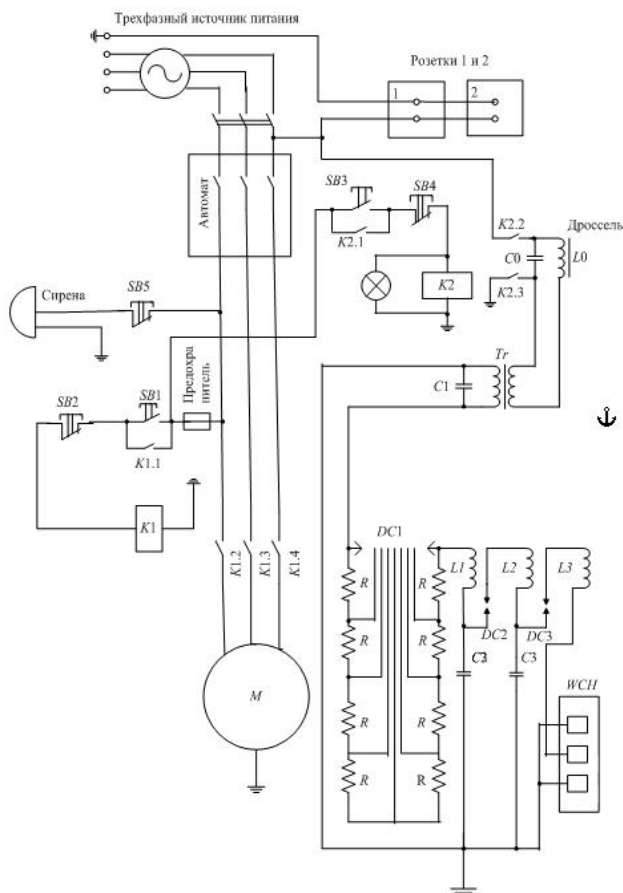


Рис. 1. Электрическая схема КВИВ-установки с системой управления

Установка состоит из низковольтной и высоковольтной частей. Высоковольтная часть состоит из генератора высоковольтных импульсов и нагрузки – рабочей камеры *WCH*. Генератор содержит стартовый каскад ($C1, DC1$) и два каскада обострения ($C2, DC2$ и $C3, DC3$). Каждый каскад содержит конденсатор и разрядник. Разрядник $DC1$ стартового каскада является многоззорным. Все разрядники – многоканальные. В простейшем режиме работы установки используется только первый каскад. Недостатком этого режима является недостаточная крутизна фронта импульсов на нагрузке – рабочей камере *WCH*. Поэтому основная часть экспериментов проведена с использованием всех трех каскадов.

После подключения к трехфазному источнику питания при проточной обработке нажатием кнопки $SB1$ запускается электродвигатель M насоса, перекачивающего обрабатываемый продукт через рабочую камеру *WCH*. Нажатием кнопки $SB3$ подается напряжение на реле $K2$, замыкаются его контакты $K2.1, K2.2, K2.3$, и фазное напряжение силовой сети через фильтр $L0 - C0$ подается на первичную (низковольтную) обмотку трансформатора Tr , запуская в работу установку. В результате на нагрузке – рабочей камере *WCH*,

формируются импульсы высокого напряжения (до 120 кВ) и тока обеих полярностей с частотой следования до 500 имп/с. Кнопкой $SB4$ отключается подача напряжения на фильтр $L0 - C0$ и на первичную обмотку трансформатора Tr . Нажатием кнопки $SB2$ выключается электродвигатель M насоса.

Рабочие камеры. Рабочие камеры (РК), которые являются нагрузкой для КВИВ установки, делятся на стационарные и проточные. В стационарных камерах замена порций продукта осуществляется вручную, а в проточных камерах – благодаря потоку через камеру, который обеспечивает насос и система перекачивания. Последняя содержит емкости для подачи и приема обрабатываемого текучего продукта и шланги. Именно в РК выделяется энергия, яка исходно запасается в основном высоковольтном конденсаторе установки.

Типовые стационарные и проточные камеры приведены на рис. 2 и рис. 3 соответственно.



Рис. 2. Вариант стационарной РК с крышкой – электродом, расположенным рядом

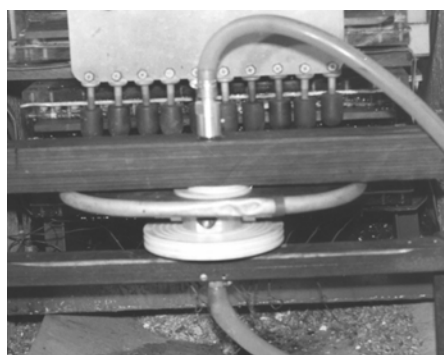
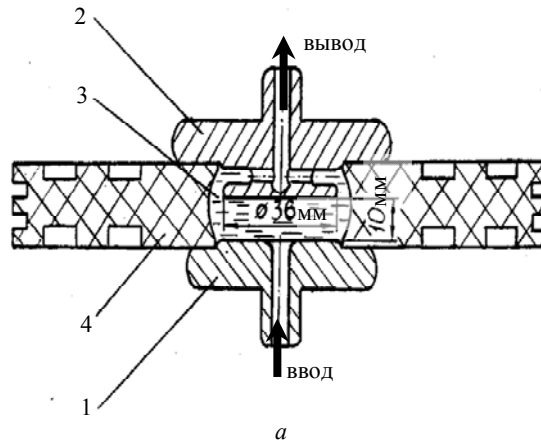


Рис. 3. а – вариант конструкции проточной технологической РК: 1, 2 – электроды, 3 – внутренний объем камеры, 4 – диэлектрический корпус; б – фото РК

Экспериментальные исследования методов КВИВ обработки (PEF-treatment) пищевых продуктов и очистки воды. Экспериментально исследовали влияние КВИВ обработки на микробиологическую обсемененность, санитарно-гигиенические свойства и органолептические показатели молока, молочной сыворотки и воды. Исследования проводились в разных режимах обработки в стационарных и проточных РК на КВИВ установке, описанной выше.

Фото работающей КВИВ установки во время проведения экспериментов показано на рис. 4. Обрабатываемый продукт заливали в РК, которую предварительно стерилизовали при помощи спиртовой горелки, и закрывали камеру стерилизованной крышкой. Использовались камеры двух типоразмеров: с межэлектродным промежутком (расстояние между дисковой крышкой камеры и ее днищем) 15 мм и с межэлектродным промежутком 22 мм. Варьировали время обработки от 10 с до 30 с. На рис. 5 показана РК с межэлектродным промежутком 22 мм.



Рис. 4. Фото работающей КВИВ установки

Для измерения характеристик импульсов на нагрузке КВИВ установки – рабочей камере использовался резистивный низкоомный делитель напряжения

с коэффициентом деления $k_d=1000$. В качестве регистрирующего устройства использовался аналоговый запоминающий осциллограф С8-12 с полосой пропускания 100 МГц и цифровой осциллограф RIGOL DS1102E с полосой пропускания 100 МГц.

Для защиты от электромагнитных помех осциллограф располагался в экранирующей кабине с экранированной по контуру дверью. Сигнал от низковольтного плеча делителя напряжения до осциллографа в измерительной кабине подавался при помощи коаксиального кабеля с двойной оплеткой. Дверь в измерительной кабине может открываться и закрываться плотно как извне, так и изнутри.

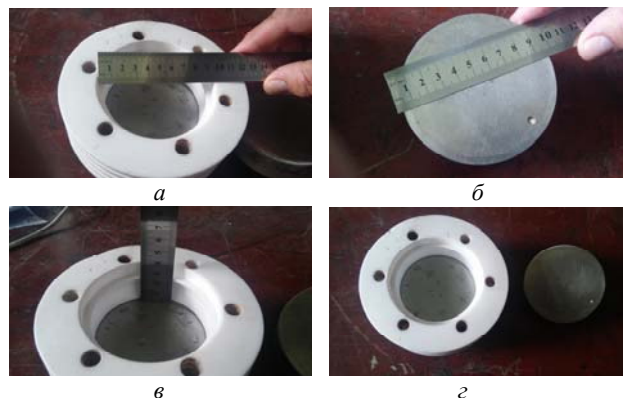


Рис. 5. Рабочая камера с межэлектродным промежутком 22 мм: а – корпус из фторопласта, б – крышка, в – межэлектродный промежуток 22 мм, з – крышка возле камеры

Исследовалось инактивирующее действие КВИВ на различные молочные продукты (молоко, сыворотку, йогурт), а также на воду. При этом воду к экспериментам готовили наши коллеги – соисполнители из Национального университета пищевых технологий (НУПТ), город Киев. Брли воду «София киевская» и обсеменяли ее бактериями группы кишечной палочки (E-coli). При каждом режиме обработки всех исследуемых жидкостей делали три повторения.

Величины межэлектродных промежутков в искровых разрядниках имели следующие значения: для многозазорного разрядника (МЗР) величина отдельного промежутка – приблизительно 5 мм, для первого обостряющего разрядника – приблизительно 20 мм, для второго обостряющего разрядника – приблизительно 20 мм. При этом количество задействованных промежутков в МЗР составляла от 4 до 7 включительно.

Обработка образцов текучих продуктов и воды в РК во всех режимах проводилась импульсами обеих полярностей. За период 20 мс сетевого переменного напряжения в течение полупериода положительного напряжения 10 мс в РК поступало приблизительно 4 импульса одной полярности, а за полупериод отрицательного напряжения 10 мс в РК поступало приблизительно 4 импульса другой полярности.

Результаты экспериментальных исследований методов КВИВ обработки (PEF-treatment). На рис. 6 приведена осциллограмма импульсов на РК с молоком при 7 раскороченных зазорах из 8 в многозазорном разряднике – МЗР без влияния электромагнитных помех и с явно видимым фронтом импульса.

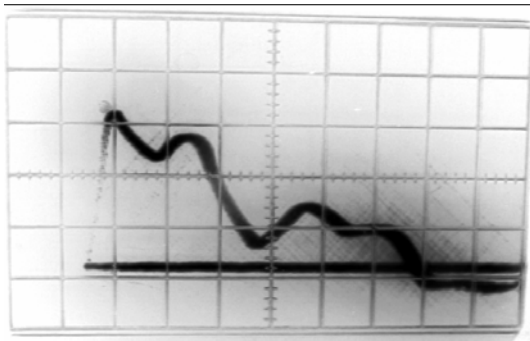


Рис. 6. Типичная осциллограмма импульса напряжения на РК с сырым молоком. Цена деления по оси времени 50 нс/дел; по оси процесса 20 кВ/дел. В многозасорном разряднике раскорочено 7 зазоров из 8. Зазор в РК $d = 22$ мм

Из осциллограммы следует, что длительность фронта импульса в молоке составляет примерно 20 нс, а длительность импульса по основанию до перехода через нуль составляет примерно 300 нс. Амплитуда импульса напряжения – не менее 60 кВ. Отсюда следует, что амплитуда напряженности электрического поля в молоке $60/2,2 \approx 27,3$ кВ/см. Важно и то, что в молоке, которое имеет удельное сопротивление меньше, чем водопроводная или столовая вода, форма импульса – слабо колебательная.

На рис. 7 представлена типичная осциллограмма импульсного напряжения на РК с водой, обсемененной *E.coli*. Осциллограмма получена при помощи цифрового осциллографа Rigol 1102 E.

Из осциллограммы на рис. 7 следует, что амплитуда напряжения на РК с водой в данном режиме КВИВ обработки не меньше, чем 72 кВ, длительность импульса по основанию составляет приблизительно 1200 нс, а форма импульса – аperiodическая, однополярная, через нулевую линию не переходит. Нулевая линия указана на рис. 7 и далее стрелкой, расположенной слева от осциллограммы.

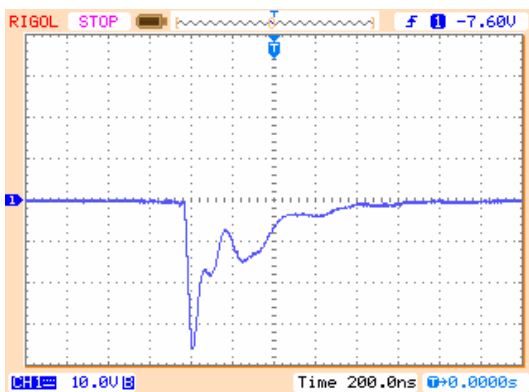


Рис. 7. Типичная осциллограмма импульса напряжения на рабочей камере с водой «София киевская», обсемененной *E.coli*. Цена деления по оси времени 200 нс/дел; по оси процесса 20 кВ/дел. В многозасорном разряднике раскорочено 6 зазоров из 8. Зазор в РК $d=22$ мм. Использован низкоомный резистивный делитель напряжения с коэффициентом деления $k_d \approx 2000$

Два дополнительных всплеска на спаде импульса на этой осциллограмме, а также на других осциллограммах, обусловлены наличием трех высоковольтных емкостных накопителей: основного и двух обостряю-

щих. Фронтальная часть импульса обусловлена последним (вторым) каскадом обострения со вторым обостряющим емкостным накопителем, первый дополнительный всплеск на спаде импульса обусловлен наличием первого каскада обострения с первым обостряющим емкостным накопителем, а второй дополнительный всплеск на спаде импульса обусловлен наличием основного высоковольтного емкостного накопителя.

Результаты микробиологических анализов воды приведены в табл. 1.

Таблица 1

Обнаружение бактерий семейства *E.coli* в воде

Наименование показателя (единицы измерения КОЕ/см ³)	Результаты исследований, КОЕ/см ³	Режим обработки (приблизительный, E, кВ/см)	Режим обработки расчетный, (E, кВ/см)	Время обработки (t, с)
Вода стерильная. Разведение <i>E.coli</i> 10 ⁶	210	30	20,09	10
Вода стерильная. Разведение <i>E.coli</i> 10 ⁶	0	30	31,8	20
Вода стерильная. Разведение <i>E.coli</i> 10 ⁸	60	30	19,0	10
Вода стерильная. Разведение <i>E.coli</i> 10 ⁸	0	30	1,8	20

*Прим.: КОЕ – колониеобразующие единицы.

На рис. 8 представлена типичная осциллограмма импульсного напряжения на РК с молочной сывороткой.

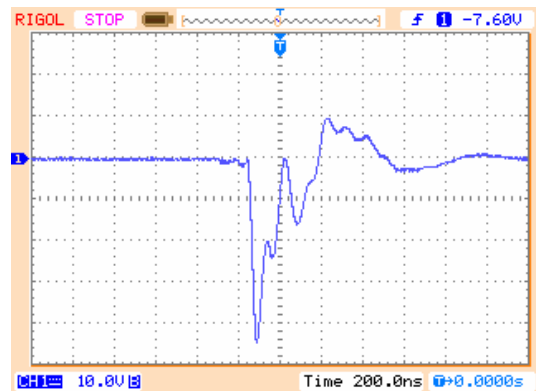


Рис. 8. Типичная осциллограмма импульсного напряжения на РК с молочной сывороткой. Цена деления по оси времени 200 нс/дел; по оси процесса 10 кВ/ дел. В многозасорном разряднике раскорочено 6 зазоров из 8. Зазор в РК $d=22$ мм. Использован низкоомный резистивный делитель напряжения с коэффициентом деления $k_d \approx 1000$

Длительность импульса по основанию на осциллограмме (рис. 8) приблизительно 350 нс. Форма импульса – колебательная с большим декрементом колебаний. Амплитуда импульса напряжения на этой осциллограмме – приблизительно 45 кВ, а амплитуда напряженности – приблизительно 20,45 кВ/см.

На рис. 9 представлена типичная осциллограмма импульсного напряжения на РК с сырым молоком.

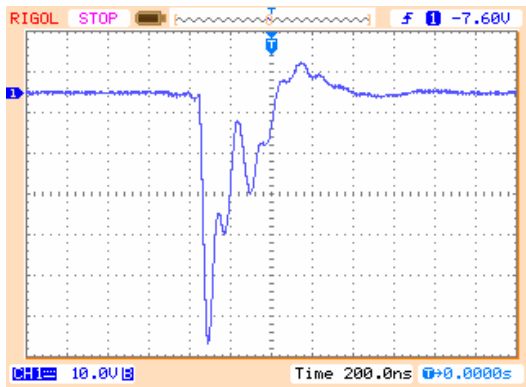


Рис. 9. Типичная осциллограмма импульсного напряжения на РК с сырым молоком. Цена деления по оси времени 200 нс/дел; по оси процесса 10 кВ/дел. В многозазорном разряднике раскорочено 6 зазоров из 8. Зазор в РК $d=22$ мм. Использовался низкоомный резистивный делитель напряжения с коэффициентом деления $k_n \approx 1000$

Результаты микробиологических анализов молочной сыворотки, обработанной при помощи КВИВ импульсами, образец-осциллограмма которых представлен на рис. 8, приведены в табл. 2-5.

Таблица 2

Результаты анализов по выявлению бактерий семейства *E.coli* в молочной сыворотке после КВИВ обработки

Наименование показателя, единицы измерения КОЕ/см ³ <i>E.coli</i>	Результат, КОЕ/см ³
при $E \approx 30$ кВ/см, общем времени обработки $t=10$ с и разведении 10^6	30
при $E \approx 30$ кВ/см, общем времени обработки $t=20$ с и разведении 10^6	0
при $E \approx 30$ кВ/см, общем времени обработки $t=10$ с и разведении 10^8	20
при $E \approx 30$ кВ/см, общем времени обработки $t=20$ с и разведении 10^8	0

Из табл. 2 следует, что после КВИВ обработки молочной сыворотки в РК в течение 20 с высоковольтными импульсами (см. рис. 8), гарантировано

происходит полная инактивация бактерий *E. coli*. При обработке в течение 10 с остаются не инактивированными от 20 до 30 колониеобразующих единиц. Т.е. подтверждено экспериментально существование режима полной гарантированной инактивации при КВИВ – обработке продуктов. В контрольных (не обработанных при помощи КВИВ) образцах молочной сыворотки наблюдался сплошной рост бактерий *E.coli* ($>>1000$ КОЕ/см³).

Длительность импульса по основанию на осциллограмме на рис. 9. приблизительно 350 нс. Форма импульса – колебательная с большим декрементом колебаний (слабо колебательная). Амплитуда импульса напряжения на этой осциллограмме – приблизительно 60 кВ, а амплитуда напряженности – приблизительно $60/2,2 \approx 27,3$ кВ/см.

Результаты лабораторных исследований физико-химических показателей молока после КВИВ обработки (см. рис. 9) приведены в табл. 3.

Из результатов, приведенных в табл. 6, следует, что в КВИВ-обработанном молоке есть фермент пероксидаза, отсутствие которого характерно для топленого, ультрапастеризованного, стерилизованного молока, то есть молока, которое поддавалось обработке большими температурами (больше 100 °С). Однако, в КВИВ-обработанном молоке не выявлен фермент фосфатаза, отсутствие которого характерно для пастеризованного молока. Кроме того, из данных табл. 6 следует, что количество витамина С, весьма чувствительного к различным обработкам, после КВИВ-обработки сохранилось на уровне, отвечающем требованиям нормативной документации (НД), то есть КВИВ-обработка – мягкая обработка. Все анализы (микробиологические и санитарно-гигиенические) обработанных и контрольных проб водосодержащих пищевых продуктов и воды провели специалисты коммунального предприятия «Санэпидсервис» (КП «СЭС», г. Харьков). Это предприятие аккредитовано Национальным агентством Украины по аккредитации (аттестат аккредитации № 2Н1207 от 25.02.2015 г.).

Таблица 3

Физико-химические показатели исходно сырого молока после КВИВ обработки

Наименование показателя, единицы измерения	НД на методы испытаний	Результат исследования	Значение показателя согласно НД	Соответствие НД
1	2	3	4	5
Определение массовой части витамина С титриметрическим методом в пищевых продуктах				
массовая часть витамина С, млн ⁻¹	ГОСТ 30627.2-98	5,0	не регламентировано	соответствует НД
Определение пероксидазы методом качественного анализа в пищевых продуктах				
пероксидаза для топленого, ультрапастеризованного, стерилизованного молока	ДСТУ 7380:2013	выявлена	отсутствует	не соответствует
Определение фосфатазы молока и молочных продуктов методом качественного анализа				
фосфатаза для пастеризованного молока	ДСТУ 7380:2013	не выявлена	отсутствует	соответствует

Энергетическая эффективность высоковольтного макета КВИВ-установки. Энергетическая эффективность определяется двумя составляющими: высокой степени микробиологического (микробиального) обеззараживания обрабатываемого продукта при дан-

ном удельном энергокладе и уменьшенного удельного энергопотребления по сравнению с известными методами (например, тепловой стерилизацией и пастеризацией). Первую составляющую можно оценить, проведя КВИВ-обработку и сделав соответствующие

микробиологические анализы обработанного продукта (воды, молока, молочной сыворотки). Вторую составляющую энергетической эффективности можно оценить, исходя из того, какая часть энергии, потребленной из сети электропитания КВИВ-установкой, доставлена в РК и там выделена, приведя к требуемой степени инактивации микроорганизмов в воде. Поскольку во всех элементах КВИВ-установки, в том числе в высоковольтных конденсаторах, трансформаторе и разрядниках выделяется суммарно не более 0,1 потребленной из сети энергии, то к.п.д. установки можно оценить как 0,9, или 90 % [4-6]. Сложнее оценить сколько же энергии выделено в РК. Сделаем это при помощи осциллограмм импульсов напряжения на РК с обрабатываемым продуктом. Типичная осциллограмма импульса напряжения на камере с обрабатываемой водой приведена на рис. 10.

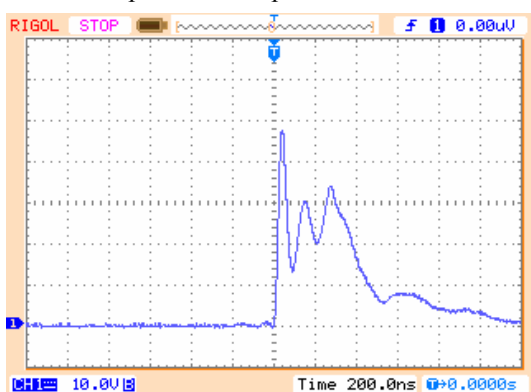


Рис. 10. Типичная осциллограмма импульса напряжения на рабочей камере с обрабатываемой водой

Три пика (максимума), как указывалось выше, на осциллограмме соответствуют процессам разряда трех емкостей (C_1 , C_2 , C_3) на нагрузку – рабочую камеру, в данном случае заполненную водой (см. рис. 1). Первый (наибольший) пик после фронта импульса – максимум напряжения на РК вследствие поступления энергии в камеру от наиболее низкоиндуктивного разрядного контура с емкостным накопителем C_3 . Второй пик соответствует процессу подключения и разряда на РК емкости C_2 . Третий пик соответствует процессу подключения к разряду на РК емкости C_1 , более удаленной от РК и имеющей наибольшую индуктивность.

Энергию, которая выделяется в РК за время обработки, можно оценить по формуле

$$E = nT \int i u dt = nT i_{av} u_{av} t, \quad (1)$$

где i – ток как функция времени, u – напряжение как функция времени, i_{av} – средний ток, u_{av} – среднее напряжение, t – длительность одного импульса по полувысоте – отрезок времени, в течение которого энергия импульса выделяется в РК, n – частота следования импульсов, T – время обработки.

Считаем, что вода в РК является чисто резистивной нагрузкой. Длительность импульсов определяется из осциллограмм.

По осциллограмме напряжения можно найти активное сопротивление R_{wch} воды в камере, зная величину высоковольтной ёмкости C_{hv} , в которой предварительно накапливается энергия после трансформации в трансформаторе ИОМ 100/100 [7]

$$(t/0,7) = R_{wch} \cdot C_{hv}, \quad (2)$$

где t – длительность импульса по полувысоте, а $t/0,7$ – длительность импульса до спада измеряемой величины от амплитудного значения в $e \approx 2,71828$ раз.

Для данной установки $C_{hv} \approx 10^{-8}$ Ф, $t \approx 380$ нс (см. осциллограмму на рис. 10). Таким образом

$$R_{wch} = (t/0,7)/C_{hv} = (3,8 \cdot 10^{-7}/0,7)/10^{-8} \approx 54,3 \text{ (Ом)}.$$

Учитывая, что $u_{av} \approx 40$ кВ, $i_{av} = u_{av}/R_{wch} = 40000 \text{ В}/54,3 \text{ Ом} \approx 736,65 \text{ А}$. Отсюда вытекает, что при $n = 400$ имп/с, $T = 10$ с, $t = 3,8 \cdot 10^{-7}$ с, энергия E_{wch} , которая выделяется в камере, равна

$$E_{wch} = nT i_{av} u_{av} t = 400 \text{ имп/с} \times 10 \text{ с} \times 736,65 \text{ А} \times 40000 \text{ В} \times 3,8 \times 10^{-7} \text{ с} = 16 \times 736,65 \times 3,8 \approx 44,8 \text{ кДж}.$$

При этом средняя мощность P , потребленная в РК камере с водой, составляет приблизительно $P = E_{wch}/T = 44,8 \text{ кДж}/10 \text{ с} \approx 4,5 \text{ кВт}$.

Энергию E_{1C1} , первично запасенную в высоковольтной разрядной цепи в конденсаторе C_1 перед каждым разрядом, можно оценить по формуле

$$E_{1C1} = C_1 \cdot u_{C1}^2 / 2 \approx 10^{-8} \cdot (50 \cdot 10^3)^2 / 2 = 12,5 \text{ Дж}.$$

Оценим суммарную энергию E_{C1} , запасенную в C_1 за время T

$$E_{C1} = nT E_{1C1} = 400 \text{ имп/с} \times 10 \text{ с} \times 12,5 \text{ Дж} = 50000 \text{ Дж} = 50 \text{ кДж}.$$

$$E/E_{C1} \approx 44,8/50 = 0,896.$$

Удельное сопротивление воды в РК можно оценить по формуле

$$\rho = R_{wch} \times S/l, \quad (3)$$

где S – площадь поперечного сечения РК с обрабатываемой жидкостью относительно направления протекания тока, l – длина межэлектродного промежутка в РК камере, т.е. ее (рабочей камеры) высота.

При $S = 3,14 \cdot 4,75^2 \cdot 10^{-4} = 7,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, $l = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$:

$$\rho = 54,3 \text{ Ом} \times 7,1 \times 10^{-3} \text{ м}^2 / 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 25,7 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Оценим нагрев Δt воды в непроточной (стационарной) РК за $T = 10$ с при выделенной в камере энергии $E \approx 44,8$ кДж. Если считать, что половина этой энергии пошла на нагрев воды, а другая половина – на нагрев металлических электродов – крышек РК и ее изоляционного (фторопластового) корпуса, то

$$E = 2 \cdot c \cdot V \cdot \gamma \cdot \Delta t, \text{ т.е. } \Delta t = 0,5 \cdot E / (c \cdot V \cdot \gamma), \quad (4)$$

где $c = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$ – удельная теплоемкость воды, V – объем воды в РК, $\gamma = 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ – плотность воды.

$$V = S \cdot l = 7,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м} \approx 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Таким образом:

$$\Delta t = 0,5 \cdot 44,8 \cdot 10^3 \text{ Дж} / (4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град}) \times 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3) = 53,3 \text{ град}.$$

Полученный расчетный результат хорошо совпадает с экспериментальным результатом по нагреву воды в данной РК при КВИВ-обработке. Измерения проводились тестером М890G при помощи термопары. Измеренный перепад температур от начальной (стартовой) t_{start} до конечной t_{final} составил $\Delta t_{exp} = t_{final} - t_{start} \approx 74 - 20 = 54$ град. Отсюда следует вывод о том, что практически вся электромагнитная энергия, дошедшая до РК, выделяется в ней в виде тепла. Это принципиально важно, поскольку как электромагнитные факторы (напряженность электрического и магнитного поля,

напряжение и ток в РК), так и тепловая энергия являются синергически направленными (однонаправленными) факторами. Такое однонаправленное воздействие приводит к увеличению степени инактивации микроорганизмов в текучих пищевых продуктах, обрабатываемых в РК. При этом вся энергия, поступающая в РК, используется по назначению – на микробиологическое обеззараживание обрабатываемого в камере продукта. Если теперь предположить, что все выделившееся в камере тепло при помощи теплообменника передается в необработанный продукт, не прошедший еще через РК, то коэффициент полезного действия по энергии η_e для данного технологического процесса $\eta_e \approx 85-99,5\%$.

Важным показателем являются также удельные энергозатраты E_{sp} , то есть количество затраченной энергии на обработку единицы (например, единицы объема или массы) продукта. При КВИВ-обработке в промышленном проточном варианте, когда задействован рациональный теплообмен, это количество введенной в РК электромагнитной энергии E_{flow} , которая в камере переходит в тепловую энергию. При этом обеспечивается нагрев Δt_{flow} продукта в проточном режиме, пока он протекает через РК, на несколько градусов Цельсия (например, на 5°C) и переход от докритической температуры до сверхкритической температуры продукта, которая гарантирует при действии сильного внешнего импульсного электрического поля необратимую инактивацию микроорганизмов.

Оценим E_{flow} и E_{sp}

$$E_{flow} \approx c \cdot V \cdot \gamma \cdot \Delta t_{flow} = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град}) \times 10^{-4} \text{ м}^3 \times 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3 \times 5 \text{ град} = 2100 \text{ Дж};$$

$$E_{sp} = E_{flow}/V = c \cdot \gamma \cdot \Delta t_{flow} = 2100 \text{ Дж}/10^{-4} \text{ м}^3 = 2,1 \cdot 10^7 \text{ Дж}/\text{м}^3 = 2,1 \cdot 10^4 \text{ кДж}/\text{м}^3 = (21000/3600) \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 = 5,83 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3.$$

Таким образом, оценочная величина удельных энергозатрат в проточном режиме при КВИВ обработке продуктов составляет $E_{sp} = 5,83 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$. При традиционной схеме микробиологического обеззараживания молока (при помощи тепловой обработки – пастеризации) удельные энергозатраты больше, по меньшей мере, в 4 раза [1, 2].

Выводы.

1. Рациональные режимы работы КВИВ установки для опробованных рабочих камер имеют место при амплитудах напряженностей импульсного электрического поля $E \approx 30 \text{ кВ}/\text{см}$ в жидкости в рабочей камере и при времени обработки в течение 20 с высоковольтными импульсами длительностью 300-1200 нс при частоте следования импульсов $n \approx 400 \text{ имп}/\text{с}$.

2. При рациональных режимах в обработанной воде, молочной сыворотке и молоке полностью и необратимо инактивируются показательные бактерии *E.coli*. При этом фермент пероксидаза в молоке сохраняется. Следовательно, опробованный рациональный режим обеззараживающей обработки молока мягче, чем режим тепловой стерилизации, и примерно соответствует пастеризации.

3. Количество витамина С, весьма чувствительного к различным обработкам, после обработки молока в

рациональных режимах сохраняется на уровне, отвечающем требованиям нормативной документации, то есть КВИВ обработка – мягкая обработка, сохраняющая биологическую и пищевую ценность продуктов.

4. Оценочная величина удельных энергозатрат в проточном режиме при КВИВ обработке продуктов составляет $E_{sp} \approx 6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$, что примерно в 4 раза меньше, чем при традиционной тепловой обработке. При этом энергоэффективность предлагаемого комплекса высоковольтных импульсных воздействий в 4 раза выше по сравнению с пастеризацией.

5. Результаты выполненных исследований открывают перспективу промышленного применения комплекса высоковольтных импульсных воздействий для обеззараживающей обработки водосодержащих пищевых продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минухин Л.А., Гаффнер В.В., Меньшенин Г.А. Анализ путей снижения энергозатрат при пастеризации на малых молочных предприятиях // Аграрное образование и наука. – 2016. – №3.
2. Соловьёв С.В. Повышение эффективности процесса тепловой обработки молока путем обоснования конструктивных и технологических параметров нагревателя: дисс. ... канд. техн. наук (05.20.01). – Великие Луки, 2016. – 155 с.
3. Бойко Н.И., Тур А.Н., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М. Высоковольтный генератор импульсов со средней мощностью до 50 кВт для обработки пищевых продуктов // Приборы и техника эксперимента. – 1998. - №2. – С. 120-126.
4. Кучинский Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. – Ленинград: Энергия, 1973. – 176 с.
5. Потери и КПД в трансформаторах. Режим доступа: www.ets.ifmo.ru/usolzev/SEITEN/u2/tr/1_9.htm.
6. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
7. Богатенков И.М., Иманов Г.М., Кизеветтер В.Е. и др. Техника высоких напряжений: Учебное пособие для вузов. Под ред. Г.С. Кучинского. – СПб: Изд. ПЭИПК, 1998. – 700 с.

REFERENCES

1. Minuhin L.A., Gaffner V.V., Menshenin G.A. Study the possibility of reducing energy consumption during the pasteurization of milk on small enterprises. *Agrarnoe obrazovanie i nauka*, 2016, no.3. (Rus).
2. Solovyov S.V. *Povyshenie effektivnosti protsessy teplovooy obrabotki moloka putem obosnovaniya konstruktivnykh i tekhnologicheskikh parametrov nagrevatelya. Diss. cand. techn. nauk* [Improving the efficiency of the process of milk thermal processing by justifying the design and technological parameters of the heater. Cand. tech. sci. diss.]. Velikie Luki, Russia, 2016. 155 p. (Rus).
3. Boyko N.I., Tur A.N., Evdoshenko L.S., Zarochentsev A.I. High-voltage pulse generator with an average power of up to 50 kW for treatment of food products. *Instruments and experimental technique*, 1998, no.2, pp. 120-126. (Rus).
4. Kuchinskiy G.S. *Vysokovoltnye impulsnye kondensatory*. [High-voltage pulse capacitors]. Leningrad, Energiya Publ., 1973. 176 p. (Rus).
5. *Losses and efficiency in transformers*. Available at: www.ets.ifmo.ru/usolzev/SEITEN/u2/tr/1_9.htm (accessed 15 May 2017). (Rus).

6. Mesiats G.A. *Impul'snaia energetika i elektronika* [Pulsed power and electronics]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 704 p. (Rus).
7. Bogatenkov I.M., Imanov G.M., Kizevetter V.E. *Tekhnika vysokikh napriazhenii: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [High voltage techniques]. Saint Petersburg, PEIPK Publ., 1998. 700 p. (Rus).

Поступила (received) 13.03.2018

Бойко Николай Иванович¹, д.т.н., проф.,

Макогон Артём Витальевич¹,

Маринин Андрей Иванович², к.т.н., доц.,

¹ Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,

61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,

тел/phone +380 57 7076245, e-mail: qnaboyg@gmail.com

² Национальный университет пищевых технологий,

01601, Киев, ул. Владимирская, 68,

e-mail: andrii_marynin@ukr.net

M.I. Boyko¹, A.V. Makogon¹, A.I. Marynin²

¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

² National University of Food Technologies,
68, Volodymyrska Str., Kyiv, 01601, Ukraine.

Energy efficiency of the disinfection treatment of liquid food-stuffs by high-voltage pulse effects.

Purpose. Experimentally determine the rational modes and energy efficiency of decontamination treatment of flowing food products using high-voltage impulse actions in comparison with traditional pasteurization. **Methodology.** We used pulse generation method with the help of a step-up transformer, high-

voltage pulse capacitors and spark gaps with a system of peaking of pulse front to obtain high-voltage pulses in working chambers - the generator load. The pulses on the load were measured by a low-resistance resistive voltage divider, were transmitted over a broadband coaxial cable and recorded using an analog C8-12 oscilloscope or a Rigol DS1102E digital oscilloscope with a bandwidth of 100 MHz for each. The working chambers were filled with water, milk or milk whey and consisted of an annular hull made of PTFE and metal electrodes forming the bottom and the chamber cover having flat linings of food grade stainless steel for contact with the food product inside the chamber. **Results.** We obtained high-voltage pulses on the generator load with a base duration of 300 to 1200 ns at pulse repetition rates up to 500 pulses per second. We obtained experimentally the amplitude of the voltage pulses on the generator load up to 75 kV, and the electric field strength up to 35 kV/cm in working chambers with a gap of 22 mm and up to 50 kV/cm in working chambers with a gap of 15 mm. These characteristics of the pulses allowed complete and irreversible inactivation of microorganisms in food liquids in working chambers. **Originality.** We showed that there are modes of treatment food products with the help of high-voltage pulse actions, which allow better to preserve the biological and nutritional value of the products in comparison with heat treatment with their complete disinfection and at a significantly lower specific energy consumption. **Practical value.** The experimental regimes for treating milk, whey and water with reduced specific energy consumption open the prospect of industrial application of a complex of high-voltage pulse actions for the disinfecting treatment of water-containing food products. References 7, tables 3, figures 10.

Key words: generator of high-voltage pulses, transformer, capacitor, multi-gap discharger, multichannel switch, working chamber, disinfecting food treatment.