

УДК 620.1:633.4

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ КОРНЕПЛОДОВ НА ХАРАКТЕР РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

В.С. Корко,

доцент каф. электротехнологии БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Рассмотрены факторы проявлений ультразвука в процессах очистки и мойки, приведены результаты исследования влияния формы и размеров корнеплодов на характер распространения ультразвуковых колебаний в жидких средах.

Ключевые слова: плоды, овощи, эффекты ультразвука, кавитация, очистка, обеззараживание.

The factors of the manifestations of ultrasound in the cleaning and washing processes are considered, the results of study of the influence of the shape and size of root crops on the nature of the propagation of ultrasonic vibrations in liquid media are presented.

Keywords: fruits, vegetables, ultrasonic effects, cavitation, cleaning, disinfection.

Введение

Современные приоритеты в реализации сельскохозяйственной продукции – это проекты по глубокой переработке сырья (сортировка, мойка, сушка, охлаждение, упаковка и т.д.). В настоящее время в потребительских сетях растет спрос на мытые и/или замороженные овощи и фрукты в мелкой фасовке, особенно в вакуумной упаковке. Корнеплоды с остатками земли и другими загрязнителями, в отличие от очищенных и мытых, имеют неприглядный вид, потребителю негигиенично приобретать их, хранить и использовать.

По результатам многочисленных исследований известно, что воздействие ультразвука на объекты в жидких средах обусловлено первичными и вторичными эффектами, оказывающими механические, физико-химические и биологические действия. К первичным эффектам ультразвука, имеющим механическую природу, относят звуковое давление, кавитацию, энергичные микропотоки, поверхностное трение, а к вторичным – коагуляцию, дегазацию, диспергирование и другие явления [1, 2].

При применении ультразвуковых технологий в жидких средах возникает и протекает специфический физический процесс – ультразвуковая кавитация, обеспечивающий максимальные энергетические воздействия, как на сами жидкости, так и на твердые тела в жидкостях. В ультразвуковой волне во время полупериодов разрежения возникают пульсирующие пузырьки (каверны, полости), заполненные паром, газом или их смесью. После перехода в область повышенного давления эти образования резко захлопываются. Сложное вынужденное движение пузырьков, их захлопывание, взаимодействие, слияние друг с другом порождают в жидкости микроударные волны и микропотоки, вызывают локальное нагревание среды, ионизацию. В результате происходит разрушение находящихся в жидкости твердых частиц (кавитаци-

онная эрозия), возникает интенсивное перемешивание жидкости, инициируются или ускоряются различные физические и химические процессы [3, 4].

В работах [1-3] были рассмотрены и исследованы некоторые особенности кавитационных процессов в ванне при мойке и очистке различных деталей и фруктов от загрязнений. Корнеплоды имеют некоторые отличия по форме, размерам и механическим свойствам поверхности, поэтому закономерно исследовать их влияние на конфигурацию поля в ванне при наличии подобных препятствий.

При проектировании формы, размеров и расположения ультразвуковых излучателей в емкости для обработки овощной продукции необходимо учитывать, что форма корнеплодов никогда не бывает геометрически правильной и может быть очень сложной, а поверхность с различными углублениями и неровностями. Например, корнеплоды свеклы, редьки, брюквы по форме могут быть шаровидные, плоско-округлые, конические, цилиндрические, а корнеплоды моркови, сельдерея, хрена в основном имеют удлиненную форму (цилиндрическую, коническую, веретенообразную, с тупым или острым концом). При этом сорта моркови подразделяют по длине корнеплода: каротели (5...8 см); полудлинные (10...20 см); длинные (более 20 см) [5].

Цель настоящей работы – исследование влияния формы и размеров корнеплодов на характер распространения ультразвуковых колебаний в жидких средах.

Основная часть

В контексте задачи по созданию технологии обработки корнеплодов для повышения потребительских качеств важно отметить технологические возможности ультразвука по очистке поверхности, обеззараживанию, дезинфекции, уничтожению микроорганизмов и бактерий, получившие достаточно широ-

кое применение в различных отраслях промышленности, сельского хозяйства и медицины.

К основным законам распространения ультразвуковых волн относятся законы отражения и преломления на границах различных сред, дифракция и рассеяние при наличии препятствий и неоднородностей в среде и неровностей на границах, законы волнового распространения в ограниченных зонах.

В технологии очистки и мойки корнеплодов ультразвуком рассматривается система жидкость – твердое тело. В ультразвуковой ванне вблизи поверхности корнеплодов формируется диффузионный граничный слой жидкости, в котором сосредоточено основное сопротивление переносу молекул реагирующих веществ к межфазной границе или уносу продуктов реакции. При этом практически все основные физико-химические процессы протекают на самой границе раздела сред, где молекулы различных веществ контактируют друг с другом в виде трех последовательных стадий: приближение молекул веществ друг к другу и их столкновение; непосредственно процесс взаимодействия молекул; удаление продуктов реакции из зоны взаимодействия.

Для проведения экспериментов использовали ультразвуковую установку с выходной мощностью 250 Вт, рабочей частотой 18 кГц и ванной с тремя пьезоэлектрическими преобразователями. Чтобы обеспечить возможность исследования параметров ультразвукового поля, создаваемого единичным излучателем, в ванну на время экспериментов помещали изолирующий пластиковый тубус диаметром 100 мм и высотой 120 мм.

Основные размеры, схемы расположения пьезоэлектрических преобразователей в днище ванны и точек измерения активности кавитации приведены на рисунке 1.

Для измерения активности кавитации в ультразвуковой ванне использовали кавитометр ИСА – 6А.

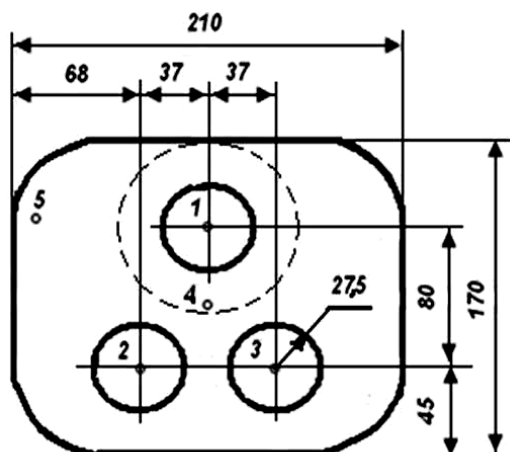


Рисунок 1. Схема расположения трех пьезоэлектрических преобразователей и характерных контрольных точек измерения активности кавитации (1°...5°) в ультразвуковой ванне (штриховой линией показаны контуры изолирующего тубуса диаметром 100 мм)

В использованной для экспериментов установке длина ультразвуковой волны λ составляет

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{1480}{18000} = 0,082 \text{ м},$$

где c – скорость распространения УЗ-волны в воде при температуре 20 °С, м/с;

f – частота ультразвука в установке, с⁻¹.

Так как диаметр излучателя, длина волны ультразвуковых колебаний в установке сравнимы с размерами обрабатываемых корнеплодов, то в однородной жидкости при одностороннем излучении единичного излучателя акустическое поле в некотором приближении можно представить в виде направленного пучка.

При наличии изолирующего тубуса данных размеров распространение ультразвука рассматривается как волновое движение в замкнутом объеме (рис. 2).

Вычислим размер ближней зоны немонотонного

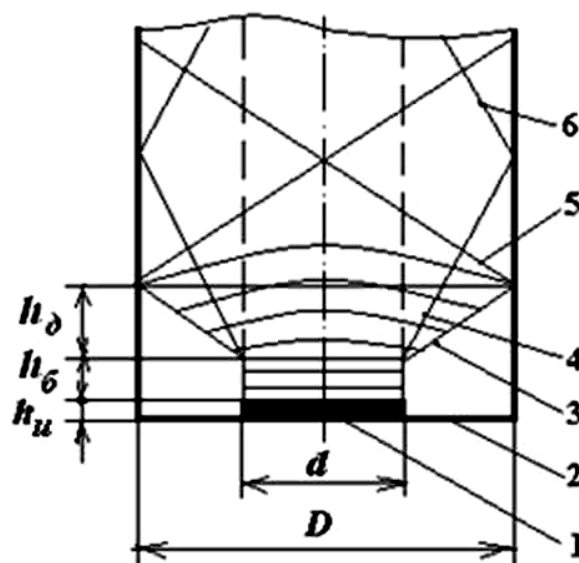


Рисунок 2. Схема формирования акустического поля ультразвукового излучателя в ограниченном пространстве: 1 – излучатель; 2 – корпус ванны; 3, 4, 5, 6 – падающие и отраженные лучи дальней зоны акустического поля; h_u и d – высота и диаметр излучателя; D – диаметр изолирующего тубуса; $h_б$ – размер ближней зоны акустического поля; $h_д$ – расстояние от начала дальней зоны до места контакта падающего луча со стенкой изолирующего тубуса

изменения акустического поля (зоны дифракции Френеля) излучателя [6]:

$$h_б = \frac{d^2}{4\lambda} = \frac{0,055^2}{4 \cdot 0,082} = 0,0092 \text{ м};$$

угол расхождения падающего луча от вертикали (рис. 2) по формуле Фраунгофера:

$$\varphi_p \approx \frac{\lambda}{d} \arcsin 0,61 = \frac{0,082}{0,055} \arcsin 0,61 = 55^\circ,$$

и расстояние от начала дальней зоны до места контакта падающего луча со стенкой изолирующего

тубуса (из рассмотрения образованного прямоугольного треугольника)

$$h_0 = \left(\frac{D}{2} - \frac{d}{2} \right) \operatorname{tg} \varphi_p = \left(\frac{0,1}{2} - \frac{0,055}{2} \right) \operatorname{tg} 55^\circ = 0,016 \text{ м.}$$

На основании приведенных расчетов и рисунка 2 теоретически можно предположить, что акустическое поле в зонах горизонтальной плоскости будет наиболее интенсивным непосредственно над излучателем и до окончания ближней зоны, и наименее интенсивным вблизи стенок изолирующего тубуса, начиная от дна ванны и до места контакта падающего луча со стенкой изолирующего тубуса (на расстоянии $h_0 + h_\sigma + h_u$).

С началом дальней зоны луч акустического поля начинает расходиться, и, вследствие поглощения энергии средой, интенсивность ультразвукового поля монотонно убывает по мере удаления от излучателя. Вместе с тем, в ограниченном пространстве (стенками изолирующего тубуса или ванны) в соответствии с законами геометрической акустики начинают сказываться факторы отражения и преломления лучей на границах различных сред, а также дифракции и интерференции.

Замеры уровней активности кавитации в ванне с тремя излучателями и в цилиндрическом тубусе с одним излучателем производились в указанных на рисунке 1 точках на разных высотах от пьезоэлектрических преобразователей в пятикратной повторности. Соответствующие зависимости представлены на рисунке 3.

Наиболее высокие уровни кавитации наблюдаются в ближней зоне ультразвукового поля непосредственно над излучателями по направлению распространения волны. В зонах горизонтальной плоскости за пределами излучателей непосредственно над днищем акустическое поле имеет наименьшую интенсивность вблизи стенок ванны или изолирующего тубуса (в 1,5...2 раза меньше, чем над излучателем), начиная от дна ванны, и возрастает до расстояния 0,015...0,02 м. Следует отметить, что днище вследствие жесткой механической связи с излучателями, также создает колебания, хотя и меньшей интенсивности.

В дальнейшем, вследствие расхождения луча, по-

глощения энергии, дифракции и интерференции волн, уровни кавитации уменьшаются по закону, близкому к экспоненциальному или степенному. При этом в горизонтальной плоскости с увеличением h картина поля постепенно выравнивается. Так, при $h = 0,02$ м разброс показаний кавитометра в точках измерения составляет порядка 20...25 о.е., а на удалении $h = 0,08$ м – 4...5 о.е. Соответственно степень ослабления интенсивности излучения в диапазоне $h = 0,02...0,08$ м достигает двух и более раз.

Представим уравнения линий трендов, аппроксимирующие зависимости I и IV , в виде наиболее близко подходящих для их описания функций:

– на рисунке 3а

$$k_I = 66537h^3 - 8948h^2 - 44h + 48,1;$$

– на рисунке 3б

$$k_{IV} = 11823h^3 - 18465h^2 + 387,6h + 43,3.$$

С учетом размеров ванны для исследований в качестве препятствий на пути распространения УЗ-волны переменными факторами при исследованиях приняты форма и размеры корнеплодов, расстояния между ними в горизонтальной плоскости, высота их расположения в жидкости над излучателями.

В экспериментах при полном заполнении цилиндрического тубуса ванны (рис. 1) в один слой редисом различных размеров (от 0,02 до 0,4 м), практически вне зависимости от расстояния до излучателей, в воде над объектами (т.е. за препятствиями) уровни активности кавитации приближались к нулю, а под слоем зависимости $k(h)$ были близки к изображенным на рисунке 3б. Отмечено некоторое увеличение значений уровней кавитации, очевидно вследствие явлений отражения волн от поверхностей редиса и интерференции.

Так как размеры редиса в поперечнике в 2...4 раза меньше длины волны ультразвука, рассчитанной выше, то внесение единичного экземпляра редиса практически не повлияло на соответствующие характеристики УЗ-поля. Наблюдалось некоторое уменьшение уровня кавитации (на 6...8 о.е.) непосред-

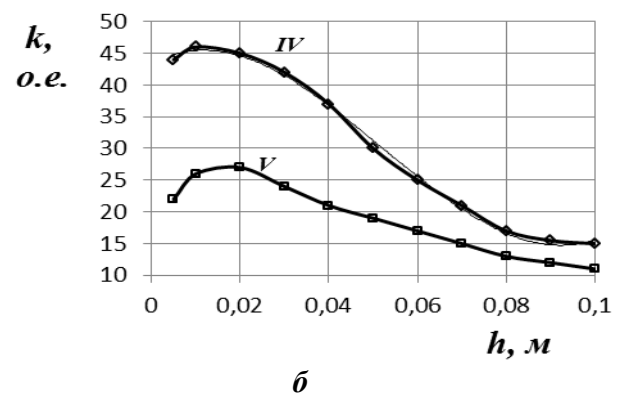
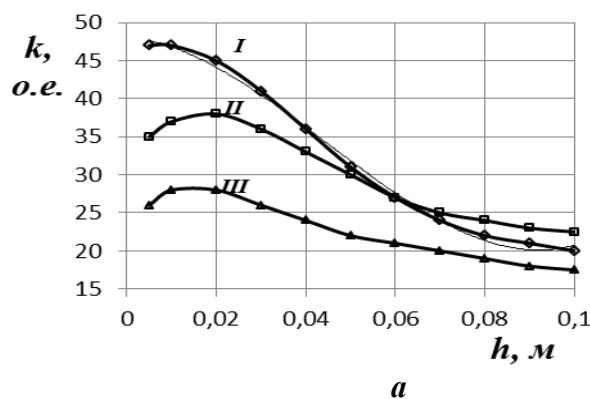


Рисунок 3. Зависимость уровня активности кавитации от расстояния до излучателя в ванне с тремя излучателями (а) и в цилиндрическом тубусе с одним излучателем (б): I – в точке 1 над излучателями; II – в точке 4 в центре между излучателями; III – в точке 5 между корпусом и двумя излучателями (рис. 1); IV – над выделенным излучателем в тубусе; V – возле стенки тубуса (рис. 1) (нежирными линиями на зависимостях I и IV показаны линии тренда)

ственно над верхней зоной поверхности слоя редиса.

Вместе с тем, когда в тубус поместили свеклу практически сферической формы диаметром 0,08 м, что больше диаметра излучателя и соизмеримо с длиной волны, то за этим препятствием, за исключением зоны возле стенок тубуса, также во всех точках наблюдали существенное ослабление уровня активности кавитации. Значит, помимо соотношения длины волны с размерами объекта и излучателя для кавитационных процессов имеет значение и расстояние до стенок ограждающих конструкций (ванны или тубуса).

Дальнейшие эксперименты проводили в ванне с тремя излучателями. При полном заполнении ванны в один слой редисом размерами от 0,02 до 0,04 м, наблюдалась аналогичная картина с предыдущим опытом с одним излучателем. Под слоем редиса зависимости $k(h)$ были близки к изображенным на рисунке 3а, в воде над объектами наблюдали практически отсутствие акустического поля. Это означает, что в таких условиях ультразвуковому воздействию на объекты подвергаются лишь поверхности, обращенные к излучателям.

В следующем опыте в центре ванны поместили свеклу диаметром 8 см и производили замеры уровней кавитации в трех точках: а) непосредственно под объектом, для чего датчик вставляли внутрь свеклы в просверленное отверстие; б) сбоку на уровне центра свеклы; в) над объектом. В качестве переменного фактора приняли расстояние от нижней точки сферического объекта до излучателей h в пределах от 0,005 до 0,04 м с учетом того, что уровень воды в ванне по техническим характеристикам не должен превышать 0,12 м. Соответственно слой воды над свеклой при погружении также изменялся от 0 до 0,04 м. Соответствующие зависимости изменения уровней активности кавитации в различных зонах представлены на рисунке 4.

Размеры исследуемой ультразвуковой ванны позволяют исследовать характеристики поля при наличии двух объектов с переменным расстоянием между ними в горизонтальной плоскости. Для срав-

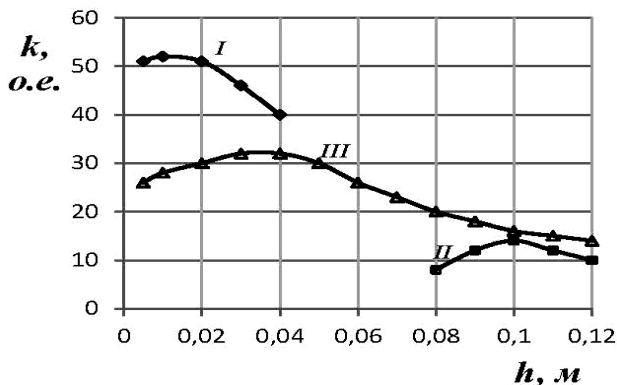
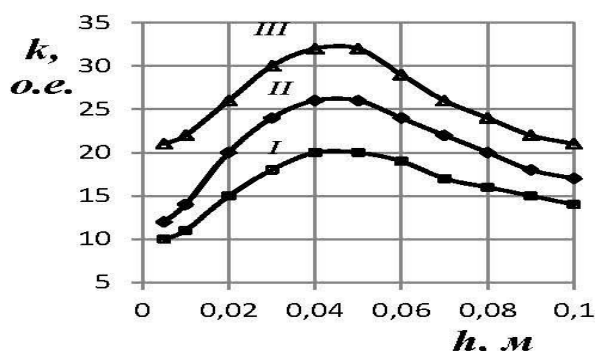


Рисунок 4. Зависимость уровня активности кавитации от расстояния до излучателя в ванне со свеклой диаметром 0,08 м: I – над излучателями; II – над свеклой; III – в наиболее удаленной зоне между корпусом и двумя излучателями (в точке 5, рис. 1)

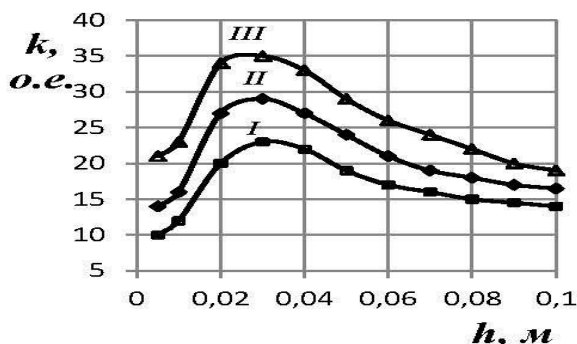
нению результатов по форме и размерам в ванне на уровне 0,02 м от излучателей фиксированно размещали две свеклы диаметрами 0,08 м, а в другом опыте – два отрезка моркови практически цилиндрической формы длиной 0,08 м и диаметром в поперечнике 0,04 м торцами друг к другу.

При проведении опытов в качестве переменной принимали величину зазора 0,03, 0,04 и 0,05 м. Уровень активности кавитации измеряли в зависимости от высоты расположения датчика в центре ванны (рис. 5).

Анализ зависимостей на рисунке 5а показывает, что в данных условиях, когда размеры объектов соизмеримы с длиной волны, с увеличением расстояния между объектами интенсивность кавитационных процессов в центре ванны несколько возрастает в диапазоне h до 0,06 м. Сферические поверхности свекол, обращенные к излучателям, отражают и, в определенной степени, фокусируют в направлении центра акустические волны, и в результате их суперпозиции происходит усиление колебаний. При удалении от излучателей на большее расстояние картина поля несколько изменяется вследствие дифракции волн и



а



б

Рисунок 5. Зависимость уровня активности кавитации в точках № 4 (рис. 1) от расстояния до излучателя в ванне с двумя свеклами (а), двумя морковками (б) и зазором между ними: I – 0,03 м; II – 0,04 м; III – 0,05 м

ослабления их амплитуды в результате поглощения и затухания. В таких условиях обработке ультразвуком подвергаются также и ближние зоны верхних частей сферических поверхностей свеклы со стороны зазора. С уменьшением расстояния между объектами увеличивается экранирующий эффект и уровень активности кавитации в центре ванны снижается.

В опыте с двумя отрезками моркови (рис. 5б) их длина соизмерима с длиной ультразвуковой волны, а в поперечнике диаметр вдвое меньше длины волны, поэтому в меньшей степени на уровни кавитации в центре ванны при изменении зазора между объектами влияют законы отражения акустических волн, а в большей – процессы дифракции и интерференции. При этом если в опытах со свеклой максимальные уровни кавитации в центре ванны наблюдали в диапазоне $h=0,04\dots 0,06$ м, то в опытах с морковью, имеющей меньший диаметр в поперечнике, в пределах $h=0,02\dots 0,04$ м.

Заключение

Полученные результаты экспериментальных исследований показывают, что наличие одного или нескольких корнеплодов в ванне рассматривается как сложное препятствие для распространения акустических волн при одностороннем расположении излучателей. Форма и размеры корнеплодов, их взаимное расположение, расстояние до излучателей существенно определяют конфигурацию и интенсивность акустического поля в ультразвуковой ванне с водой.

Поскольку интенсификация процессов очистки и мойки определяется, главным образом, кавитационными процессами в жидкости, то для достижения требуемого уровня активности кавитации на поверхности обрабатываемого объекта требуется создание определенных условий. Важную роль играет соотношение между длиной волны λ и характерным для условий ее распространения размером излучателя.

Для цилиндрического излучателя при $d \gg \lambda$ распространение колебаний вблизи препятствий происходит, главным образом, по законам геометрической акустики. В связи с отражением ультразвука от препятствий и его волновой природой может происхо-

дить сложение или вычитание амплитуд ультразвуковых давлений одинаковых частот, пришедших в данную точку пространства.

В проектируемой установке для увеличения скорости очистки и удаления загрязнений наиболее эффективным является фронтальное расположение корнеплодов по отношению к ультразвуковым излучателям.

Основные преимущества ультразвуковой очистки и мойки корнеплодов: бережная не повреждающая оболочку очистка без использования специальных моющих средств; удаление всех видов загрязнений, в том числе в полостях, углублениях с одновременным обеззараживанием; сокращение времени обработки без ущерба качеству; доступное по цене оборудование.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Толочко, Н.К. Кавитационные моечно-очистные технологии и их применение в сельском хозяйстве / Н.К. Толочко, А.Н. Челединов. – Минск: БГАТУ, 2018. – 284 с.
2. Толочко, Н.К. Ультразвуковая очистка поверхности яблок от микробных загрязнений / Н.К. Толочко, В.С. Корко, А.Н. Челединов, З.Е. Егорова // Агропанорама. – 2015. – № 5. – С. 27-29.
3. Толочко, Н.К. Факторы неравномерной очистки деталей машин в ультразвуковых ваннах / Н.К. Толочко, В.С. Корко, А.Н. Челединов, В.Л. Ланин // Вестник машиностроения. – 2017. – № 4. – С. 82-85.
4. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности / В.Н. Хмелев [и др.]. – Барнаул: АлтГТУ, 2007. – 416 с.
5. Основы растениеводства: учеб. пособие / И.П. Козловская [и др.]; под ред. И.П. Козловской. – Минск: Беларусь, 2010. – 328 с.
6. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Теория поля /Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. – 7-е изд., испр. – М.: Наука, 1988. – Т. 2. – 512 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 15.12.2020

“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным наукам (зоотехния).

Журнал выходит один раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАТУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842. Стоимость подписки на 1-е полугодие 2021 года: для индивидуальных подписчиков - 31,95 руб., ведомственная подписка - 33,51 руб.