

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-569016>

Оригинальное исследование



Исследование эффективности нагрева воды в режиме кавитации на начальном этапе приготовления зерновой патоки

В.Н. Нечаев¹, А.В. Алёшкин², П.А. Савиных³¹ Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Княгинино, Российская Федерация;² Вятский государственный университет, Киров, Российская Федерация;³ Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого, Киров, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Зерновая патока — ценный источник переваримого протеина и кормового сахара для сельскохозяйственных животных. На начальном этапе производства данной кормосмеси существующие устройства и схемы нагрева воды недостаточно эффективны. В этой связи разработано новое устройство для ускоренного нагрева воды пассивного типа.

Цель работы — оценка эффективности применения кавитатора для нагрева воды в установке для производства зерновой патоки.

Методы. Для проведения исследований кавитатор, выполненный в виде конуса с лепестками, угол раствора которого $16^{\circ}8'$, смонтирован в стеклянной трубе нагнетательной ветви водяного контура установки для приготовления зерновой патоки. Лепестки во время проведения опытов устанавливались в трубу прямыми или отогнутыми на 15° . В лабораторных условиях проводился сравнительный эксперимент по нагреву воды объемом 50 л, начиная со значения ее температуры 20°C и через каждый градус до 30°C , как с кавитатором, так и без него. Критериями эффективности процесса выступали: время и удельные энергозатраты нагрева воды.

Результаты. В результате проведенных исследований установлены значения критериев эффективности процесса нагрева воды с использованием кавитатора и без него. Получены линейные зависимости температуры воды от времени нагрева. Показано, что создаваемый эффект кавитации за основанием конуса не стабилен, но, все-таки, более интенсивный за конусом с прямыми лепестками. Отмечено, что коэффициент гидравлического сопротивления для кавитатора с отогнутыми на 15° лепестками больше на 10%, чем с прямыми.

Заключение. Использование кавитатора при нагреве воды на начальном этапе приготовления зерновой патоки повышает эффективность процесса на 20%.

Ключевые слова: кавитатор; эффект кавитации; время нагрева; удельные энергозатраты.

Как цитировать:

Нечаев В.Н., Алёшкин А.В., Савиных П.А. Исследование эффективности нагрева воды в режиме кавитации на начальном этапе приготовления зерновой патоки // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 6. С. 575–583. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-569016>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-569016>

Original Study Article

Study of water heating efficiency in cavitation mode at the initial stage of grain molasses preparation

Vladimir N. Nechaev¹, Alexey V. Aleshkin², Peter A. Savinykh³¹ Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Russian Federation;² Vyatka State University, Kirov, Russian Federation;³ Federal Agrarian Scientific Center of the North-East named after N.V. Rudnitsky, Kirov, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Grain molasses is a valuable source of digestible protein and feed sugar for farm animals. At the initial stage of production of this feed mixture, the existing devices and water heating schemes are not effective enough. Therefore, a new passive-type device for accelerated heating of water has been developed.

AIM: Evaluation of efficiency of a cavitator for heating water at the grain molasses production plant.

METHODS: In order to conduct studies, a cavitator made in the form of a cone with vanes, the apex angle of which is 16°8', is installed in a glass pipe of the injection branch of the water circuit of the plant for the preparation of grain molasses. During the experiments, the vanes were installed in the pipe straight or bent by 15°. In laboratory conditions, a comparative experiment was carried out to heat water with a volume of 50 liters, starting from its temperature of 20°C and through each degree to 30°C, both with and without the cavitator. The process efficiency criteria were: time and specific energy consumption of water heating.

RESULTS: As a result of the conducted studies, the values of the efficiency criteria for the water heating process with and without the cavitator are found. Linear dependence of water temperature on heating time is obtained. It has been shown that the created cavitation effect behind the base of the cone is not stable, but still more intense behind the cone with straight petals. It is noted that the coefficient of hydraulic resistance for the cavitator with vanes bent by 15° is 10% greater than with straight ones.

CONCLUSIONS: Use of a cavitator when heating water at the initial stage of preparing grain molasses increases efficiency of the process by 20%.

Keywords: cavitator; cavitation effect; heating time; specific energy consumption.

To cite this article:

Nechaev VN, Aleshkin AV, Savinykh PA. Study of water heating efficiency in cavitation mode at the initial stage of grain molasses preparation. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023;90(6):575–583. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-569016>

Received: 04.09.2023

Accepted: 15.10.2023

Published online: 15.12.2023

ОБОСНОВАНИЕ

Как известно, показатели продуктивности и здоровья сельскохозяйственных животных на 60–70% зависят от качества кормов и уровня кормления, а в остальном определяются генетическим потенциалом животных и условиями их содержания. При этом на приготовление кормов в животноводстве приходится до 30% всех энергозатрат кормопроизводства, включая такие операции как заготовку и раздачу кормов [1]. В свою очередь, удельные затраты энергии на производство кормов в России в 1,5–3 раза превосходят аналогичные показатели стран ЕС, при этом продуктивность животных ниже на 35–50% [2]. Особенно энергоемким остается процесс тепловой обработки кормов, на которую ежегодно затрачивается до 1,8 млрд. кВт·ч электроэнергии [3]. В связи с этим вопрос снижения удельных затрат энергетических ресурсов при приготовлении корма, в том числе, обработанного тепловыми способами, является актуальным. В настоящее время в фермерских хозяйствах наиболее широкое применение находит технология влаготермомеханической обработки зерна злаковых культур в зерновую патоку, сбалансированную по переваримому протеину и кормовым сахарам [4]. Чаще всего в устройствах для приготовления соответствующего корма нагрев воды малоэффективен и требует монтажа дополнительного активного источника тепла, что повышает себестоимость готового продукта. Экспериментально-теоретических исследований, посвященных применению пассивных источников тепла, создающих, например, эффект кавитации в устройствах производства зерновой патоки практически нет. Поэтому совершенствование технологии и оборудования для приготовления зерновой патоки носит, на наш взгляд, своевременный характер.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью исследования является оценка эффективности применения кавитатора для нагрева воды в установке для производства зерновой патоки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ранее авторами настоящей статьи изучены вопросы приготовления патоки из зерна злаковых культур (рожь, пшеница, ячмень), где были определены оптимальные режимы и настроечные параметры используемой установки [5]. Однако, остался не до конца изучен вопрос предварительного нагрева воды до температуры 30°C, которая обусловлена технологией производства патоки.

Для устранения данной проблемы разработана лабораторная установка (рис. 1), состоящая из рамы 1, водяного контура, включающего в себя технологическую емкость 2, пассивный измельчитель 3, центробежный насос 4 1СМ65-50-160/2-м с приводом от электродвигателя 5 АИР 100L2 У2 мощностью 5,5 кВт и системы всасывающего 6 и нагнетательного 7 трубопроводов.

На горизонтальном участке нагнетательной ветви предусмотрена возможность монтажа кавитатора в стеклянной трубе 8, прозрачность которой обеспечивает условия наблюдения и регистрации за происходящими процессами потока жидкости. Кроме того, для определения давления перед кавитатором на нагнетательной ветви после насоса установлены манометры РОСМА ТМ-310Р до 0,16 МПа и (или) МРФ до 6 бар. Для измерения температуры воды в емкости использовался датчик температуры 6 ТСТ-81-1,5.

Для изучения процесса нагрева воды в нагнетательной ветви водяного контура установлен кавитатор (рис. 2), основным элементом которого является конус 1 с углом

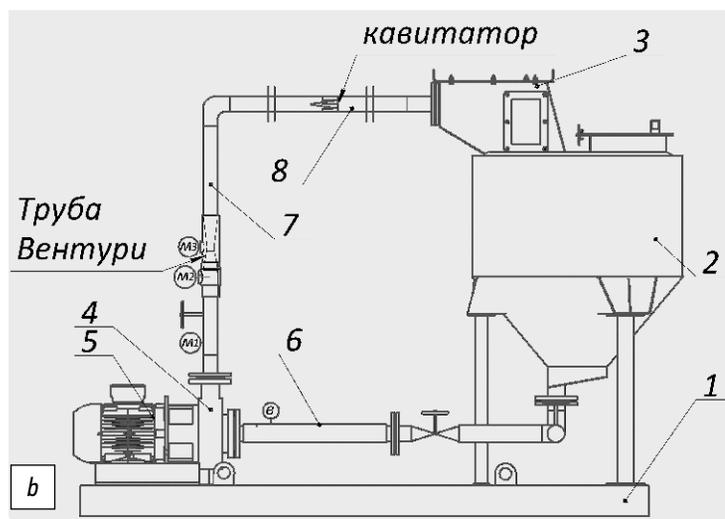


Рис. 1. Лабораторная установка: а — общий вид; б — схема установки.

Fig. 1. Laboratory setup: a — general view; b — setup layout.

раствора $16^{\circ}8'$, способствующий сужению проходного сечения трубопровода и, предположительно, образованию эффекта кавитации за основанием конуса. Дополнительным элементом кавитатора являются лепестки 2, которые в свою очередь устанавливались в трубу прямыми или отогнутыми на 15° . Основная функция лепестков – это закрепление конуса в трубе и создание дополнительного сопротивления потоку жидкости.

Для видеорегистрации поведения жидкости до, при обтекании конуса и после прохождения кавитатора была использована высокоскоростная камера Evercam 1000-4-M монохромной записи с частотой 1000 к/с при разрешении 1280×800 . Наблюдение за распределением температуры исследуемой поверхности осуществлялось бесконтактным способом с помощью тепловизора Testo 865. Значение потребляемой установкой мощности фиксировалось прибором К-505.

При проведении опытов использовалась вода средней жесткости с минерализацией 214 ppm (мг/л), определенной с помощью прибора TDS-3. Как известно, качество воды как теплоносителя по своему солевому составу и примесям существенным образом влияет на эффективность работы систем теплоснабжения [6, 7]. Температура воздуха в лаборатории и атмосферное давление во время проведения эксперимента составляло соответственно 16°C и 750–755 мм.рт.ст. Число параллельных опытов равнялось трем, поэтому экспериментальные данные, представленные ниже, определены как средние арифметические. После каждого опыта вода сливалась, водяной контур установки принимал исходную температуру.

Технологический процесс протекает следующим образом. Технологическая емкость установки заполняется водой объемом 50 л, после чего включается центробежный насос. Далее за счет постоянной циркуляции в замкнутом водяном контуре вода нагревается до значения 20°C . С этого момента идет фиксация параметров нагрева воды через каждый градус до 30°C как с кавитатором, так и без него при прочих равных условиях. Для оценки рабочего процесса выбраны такие критерии эффективности, как время и удельные энергозатраты нагрева воды.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе для подтверждения или опровержения гипотезы об интенсификации процесса нагрева воды в установке для приготовления зерновой патоки проведен сравнительный эксперимент по нагреву воды с 20 до 30°C в присутствии и отсутствии установленного кавитатора при двух вариантах положения лепестков. По результатам эксперимента построен график процесса нагрева (рис. 3), который показывает, что нагрев идет эффективней с использованием кавитатора. Причем время, затраченное на нагрев 50 л воды, чуть меньше при использовании кавитатора с прямыми лепестками, чем с отогнутыми при соответствующих значениях 11,32 мин. и 11,38 мин. Схема с применением кавитатора с прямыми лепестками позволяет ускорить процесс нагрева воды более чем на 20% по сравнению со схемой, где он отсутствует. Характер изменения температуры нагрева по времени во всех случаях имеет линейную зависимость.

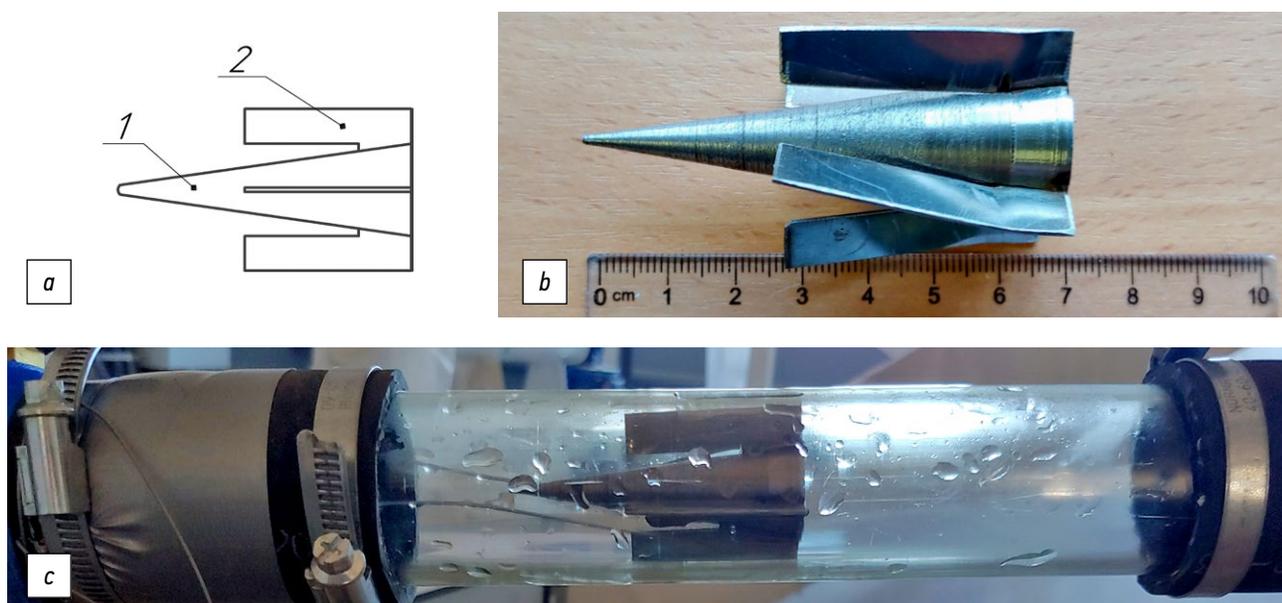


Рис. 2. Кавитатор: *a* — схема: 1 — конус; 2 — лепестки; *b* — общий вид (лепестки отогнуты на 15°); *c* — в стеклянной трубе с прямыми лепестками.

Fig. 2. The cavitator: *a* — layout: 1 — cone; 2 — vanes; *b* — general view (petals bent by 15°); *c* — inside a glass pipe with straight vanes.

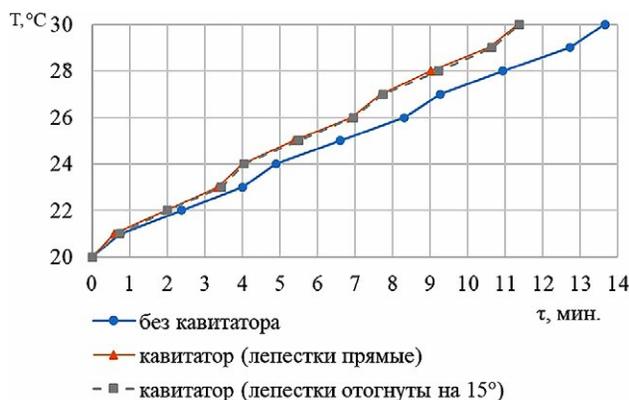


Рис. 3. Время нагрева воды до 30°C.
Fig. 3. Time of water heating up to 30°C.

При анализе результатов получены уравнения изменения значений температуры воды от времени:

$$T = 0,7043 \cdot \tau + 20,292, \quad (1)$$

$$T_{п.л.} = 0,8482 \cdot \tau + 20,315, \quad (2)$$

$$T_{о.л.} = 0,8449 \cdot \tau + 20,263. \quad (3)$$

Уравнения наилучших аппроксимаций функций (1)–(3) достаточно точно описывают процесс нагрева, о чем свидетельствуют высокие значения коэффициентов детерминации: $R_1^2 = 0,997$, $R_2^2 = 0,9964$, $R_3^2 = 0,9967$.

Далее определены удельные затраты электроэнергии на нагрев 1 литра воды на 1°C по формуле:

$$w_{уд.} = \frac{P \cdot \tau}{V \cdot \Delta T}, \quad (4)$$

где P — средняя потребляемая мощность электродвигателя, кВт; τ — время нагрева воды, с; V — объём воды в баке, л.; ΔT — изменение температуры воды, °C.

В результате вычислений построена гистограмма распределения удельных энергозатрат (рис. 4). Как можно заметить, минимальное значение выбранного критерия эффективности наблюдается при монтаже кавитатора с прямыми лепестками и составляет 1,8878 Вт·ч/л·°C, что меньше по значению аналогичного показателя примерно на 3% для нагрева воды без кавитатора. Расхождение значений при установке кавитатора с разным положением лепестков незначительно и составляет не более 1%.

На втором этапе исследования после того, как была доказана эффективность применения кавитатора, визуально можно определить эффект кавитации с помощью высокоскоростной съемки. Для начала рассмотрим геометрическую картину на примере движения жидкости в стеклянной трубе, в которой установлен кавитатор с прямыми лепестками (рис. 5). Не следует забывать,



Рис. 4. Средние значения удельных энергозатрат нагрева воды.
Fig. 4. Average values of specific energy consumption of water heating.



Рис. 5. Схема процесса кавитации.
Fig. 5. Cavitation process diagram.

что по результатам предыдущих опытов это самая эффективная схема нагрева. Как можно заметить, процесс движения жидкости в неустановившемся режиме достаточно сложный и, в общем случае, до и при обтекании конуса движущаяся жидкость представляет собой семейство линий тока, которые формируют спектр течения. При приближении к основанию конуса давление резко падает с одновременным повышением скорости движения воды. В результате закипания жидкой фазы за основанием конуса и на расстоянии до $0,3D$ (D — диаметр основания конуса) от его основания становится заметным образование пузырьков пара, диаметр которых не превышает 1,5 мм. В определенный момент времени из-за возмущающих факторов предположительно, например, из-за скачка давления или внутреннего трения частиц жидкости образуются вихри. Пузырьки пара, двигаясь дальше при расширении живого сечения трубы с высокой скоростью схлопываются с выделением тепловой энергии, что, в свою очередь, приводит к дополнительному нагреву воды. Под воздействием течения вихри уплывают, образуя «хвост» кавитации. По его протяженности косвенно можно судить об интенсивности эффекта кавитации. За, так называемым, «хвостом» течение жидкости приобретает установившийся характер. Далее процесс повторяется, т.е. за основанием конуса происходит образование новых пузырьков, вихрей и т.д. Важно, что полученные результаты в целом не противоречат теории кавитации [8, 9].

К сожалению, в рамках настоящего исследования не представляется возможным графически представить динамику движения жидкости, поэтому принято решение показать несколько последовательных кадров для двух вариантов установки кавитатора (рис. 6). Для обоих случаев видно, что эффект кавитации за основанием конуса несколько не стабилен. Однако, для первого случая (рис. 6, *a*) вихревые зоны более плотные, а длина «хвоста» кавитации более протяженная. Отогнутые лепестки способствуют незначительному закручиванию потока, что видно по линиям тока, но не влияют на дополнительное парообразование (рис. 6, *b*).

Для подтверждения результатов наблюдений была проведена тепловизионная съемка стеклянной трубы в зоне до кавитатора и после него в одном из опытов в режиме нагрева с использованием кавитатора с прямыми лепестками (рис. 7). В начальный момент нагрева (рис. 7, *a*) по перекрестному курсору тепловизора заметно, что температура воды за кавитатором повышается приблизительно на 5,5% с 20,1° до 21,2°C, далее в середине

температурного режима (рис. 7, *b*) и в конце (рис. 7, *c*) температура возрастает в среднем около 3%.

На заключительном этапе исследований определены гидравлические сопротивления в сети, вызываемые кавитатором. Для предлагаемой конструкции кавитатора с прямыми и отогнутыми лепестками, падение напора определялось по результатам эксперимента формулой:

$$\Delta H = \frac{\Delta P}{\rho g}, \quad (5)$$

где ΔP — разность давлений на входе перед кавитатором и выходе после кавитатора, Па.

Согласно результатам гидравлических испытаний установки данный показатель определен для двух случаев: для кавитатора с прямыми лепестками $\Delta P_{п.л.} = 34474$ Па, а также с отогнутыми лепестками на 15° — $\Delta P_{о.л.} = 37921$ Па; ρ — плотность воды, кг/м³. При температуре воды 20°C плотность воды принята равной $\rho = 998$ кг/м³ [10].

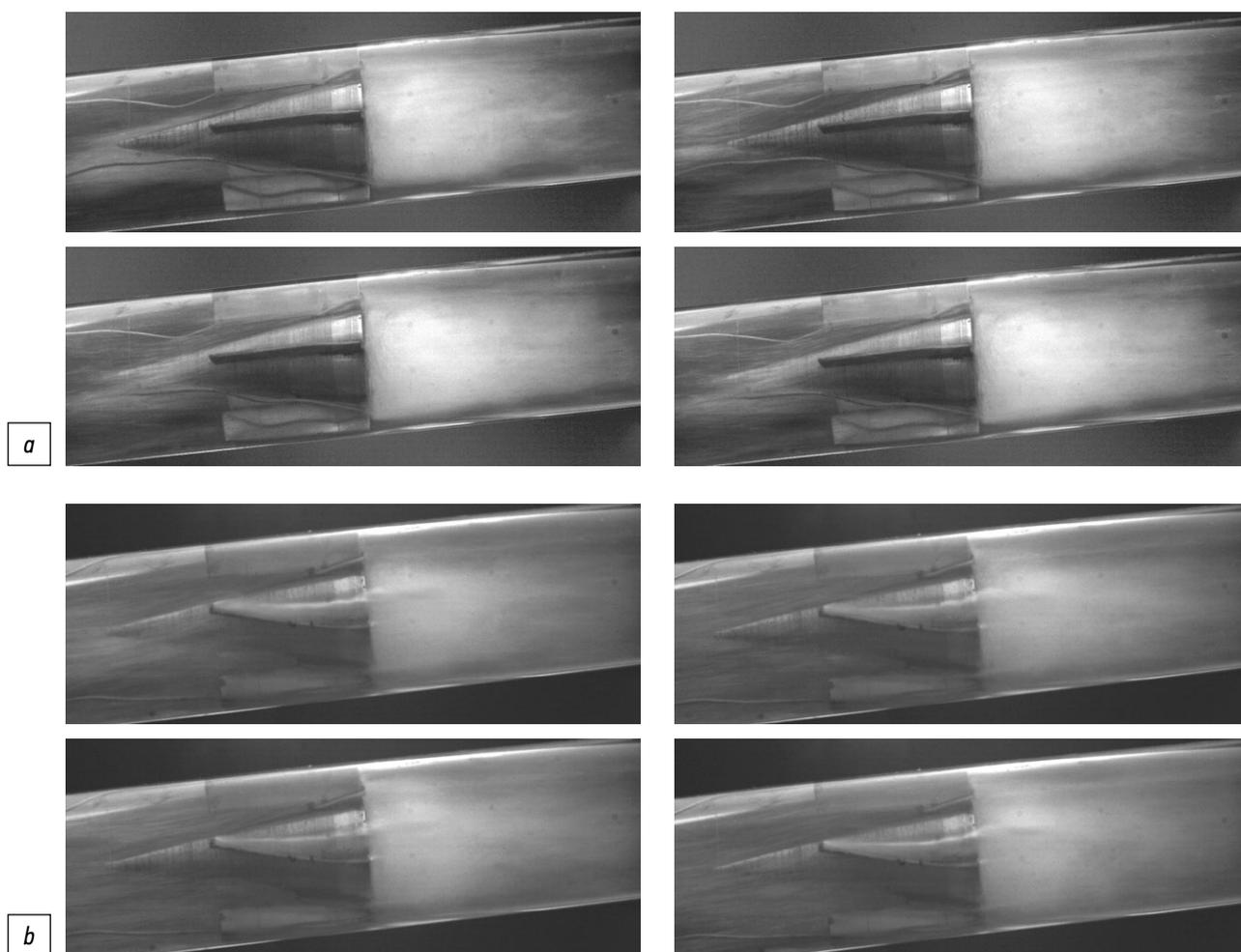


Рис. 6. Последовательные кадры записи процесса кавитации (слева-направо) высокоскоростной камерой в интервале температур воды от 20 до 30°C: *a* — кавитатор с прямыми лепестками; *b* — кавитатор с лепестками, отогнутыми на 15°.

Fig. 6. Sequential frames of recording the cavitation process (from left to right) by a high-speed camera in the water temperature range from 20 to 30°C: *a* — the cavitator with straight vanes; *b* — the cavitator with vanes bent by 15°.

Тогда согласно формулы (1) падение напора равно: для первого варианта $\Delta H_{п.л.} = 3,52$ м, для второго — $\Delta H_{о.л.} = 3,87$ м.

Затем, коэффициент гидравлического сопротивления можно вычислить согласно соотношению:

$$\zeta_{кав.} = \frac{\Delta P}{\rho v^2}, \quad (6)$$

где v — скорость течения воды в нагнетательном трубопроводе равна $v = 6,29$ м/с.

Тогда для кавитатора с прямыми лепестками $\zeta_{кав. (п.л.)} = 1,75$, с отогнутыми $\zeta_{кав. (о.л.)} = 1,92$.

Видно, что при втором варианте установки кавитатора падение напора и коэффициент гидравлического сопротивления по сравнению с первым вариантом больше на 10%.

Как известно плотность воды несколько снижается при повышении ее температуры, однако, при нагреве воды с температуры 20°C до 30°C существенных изменений в значениях гидравлических сопротивлений не происходит.

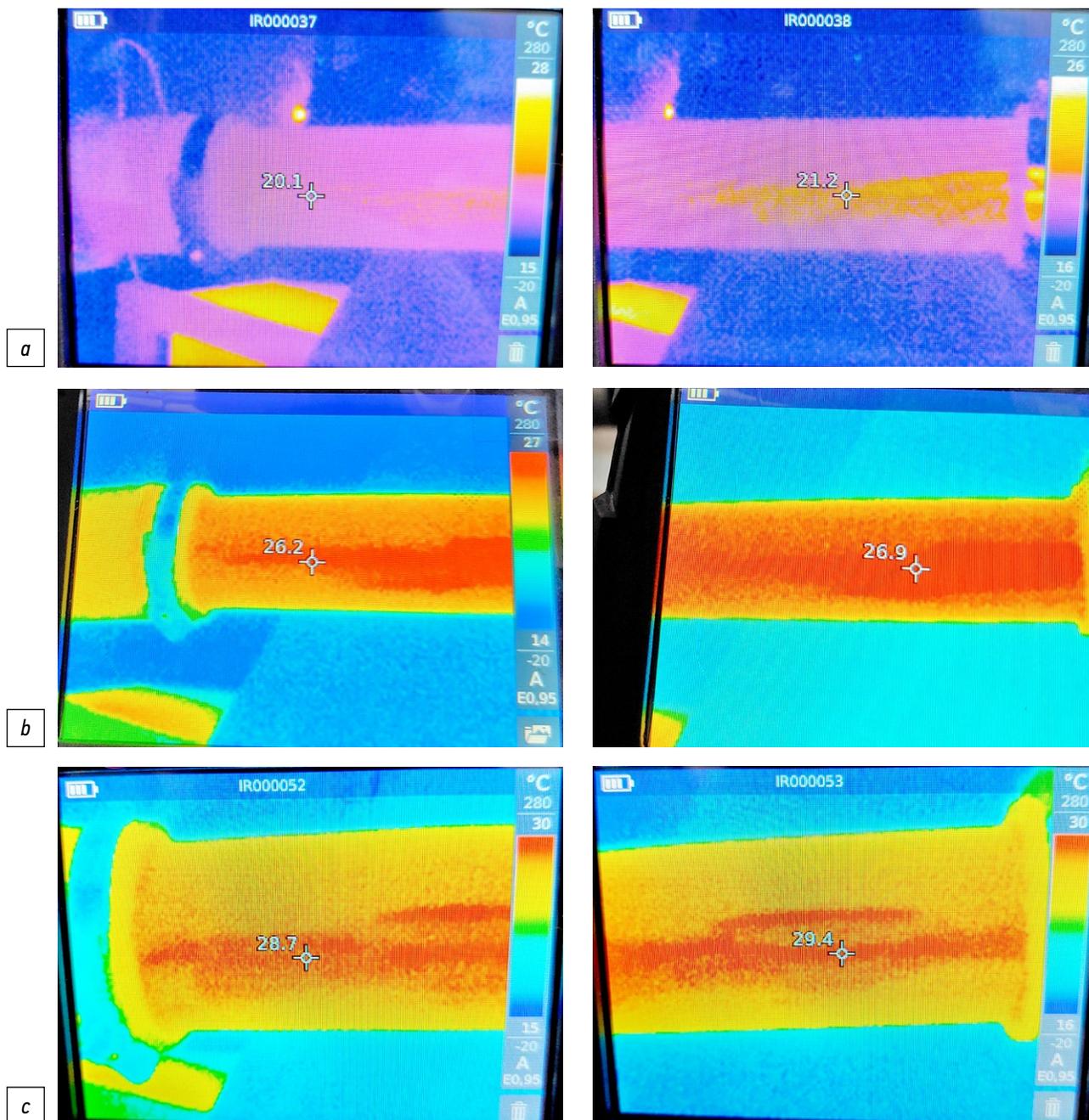


Рис. 7. Изображения термограмм трубы с кавитатором в процессе нагрева воды с тепловизионным прицелом до/после кавитатора: *a* — температура 20,1°C/21,2°C; *b* — температура 26,2°C/26,9°C; *c* — температура 28,7°C/29,4°C.

Fig. 7. Images of tube thermograms with the cavitator during water heating with thermal imaging sight before/after the cavitator: *a* — temperature is 20,1°C/21,2°C; *b* — temperature is 26,2°C/26,9°C; *c* — temperature is 28,7°C/29,4°C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении стоит отметить, что, безусловно, существует много способов нагрева воды при приготовлении жидких кормовых смесей, у каждого из них найдутся свои преимущества и недостатки. Но, все-таки, сельхозпроизводители в первую очередь ориентируются на простые, но эффективные технические решения. В нашем случае по результатам лабораторных исследований удалось установить, что в установках для приготовления зерновой патоки возможно повысить эффективность нагрева воды путем монтажа в нагнетательный трубопровод кавитатора. Представленное устройство, состоящее из конуса, не представляет сложности в изготовлении и в монтаже. Остается нерешенной небольшая конструктивно-технологическая проблема: после нагрева воды до 30°C и добавлении в технологическую емкость зерна перенаправить поток водно-зерновой смеси в обход кавитатора. Использование устройства при нагреве воды на начальном этапе приготовления зерновой патоки повышает эффективность процесса на 20%.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. В.Н. Нечаев — подготовка и проведение испытаний, представление результатов, описание результатов и формулирование выводов исследования, подготовка текста статьи; А.В. Алёшкин — постановка проблемы, разработка концепции статьи и методологии исследования, анализ данных; П.А. Савиных — научное руководство, анализ и доработка текста. Авторы

подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведенным исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. V.N. Nechaev — preparation and conduct of tests, presentation of results, description of results and formulation of study conclusions, preparation of the article text; A.V. Aleshkin — problem formulation, development of article concept and research methodology, data analysis; P.A. Savinykh — scientific leadership, analysis and revision of the text. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сысуев В.А., Алешкин А.В., Савиных П.А. Кормоприготовительные машины (теория, разработка, эксперимент): в 2-х т. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2008. Т. 1.
2. Морозов Н.М., Рассказов А.Н. Конкурентность продукции животноводства — состояние и направления повышения // Никоновские чтения. 2017. № 22. С. 59–65.
3. Морозов Н.М. Развитие машинных технологий и систем технических средств для механизации и автоматизации процессов в животноводстве // Техника и оборудование для села. 2013. № 8. С. 2–7.
4. Перевозчиков А.В., Воробьева С.Л., Березкина Г.Ю. Влияние зерновой патоки в рационах коров на качественные характеристики сырого молока и продуктов его переработки // Аграрный вестник Урала. 2019. №7(186). С. 51–58. doi: 10.32417/article_5d52af4470c055.81551465
5. Нечаев В.Н. Оптимизация настроечных параметров пассивного измельчителя при приготовлении ржаной патоки // Агроинженерия. 2023. Т. 25. № 3. С. 41–48. doi: 10.26897/2687-1149-2023-3-41-48
6. Басымбекова А., Кабылбекова Б.Н., Аманбаева К.Б. Жесткость воды и ее влияние на образование накипных отложений в трубопроводах систем теплоснабжения // Научные труды ЮКГУ им. М. Ауэзова. 2016. № 3 (38). С. 6–8.
7. Алексеев В., Архипов А., Пискунов Д., Никитин А., и др. Водоподготовка технологических систем паровых и водогрейных котлов: жесткость воды и методика ее измерения // ТехНадзор. 2016. № 1 (110). С. 224–225.
8. Аганин А.А., Ильгамов М.А., Косолапова Л.А., и др. Схлопывание кавитационного пузырька в жидкости вблизи твердой стенки // Вестник Башкирского университета. 2013. Т. 18, № 1. С. 15–21.
9. Исаков А.Я., Рябцев К.А. Вихревая кавитация в технологических устройствах // Вестник КамчатГТУ. 2003. № 2. С. 207–214.
10. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992.

REFERENCES

1. Sysuev VA, Aleshkin AV, Savinyh PA. *Feed preparation machines (theory, idea, experiment): [2 Vols.]*. Kirov: NIISKH Severo-Vostoka; 2008. T. 1. (In Russ).
2. Morozov NM, Rasskazov AN. Competitiveness of livestock products – state and directions of increase. *Nikonovskie chteniya*. 2017;22:59–65. (In Russ).
3. Morozov NM. Development of computer technologies and technical means for mechanization and automation of processes in animal breeding. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2013;8:2–7. (In Russ).
4. Perevozchikov AV, Vorob'eva SL, Berezkina GYu. Influence of grains in cows rings on qualitative characteristics of raw milk and products of its treatment. *Agrar. vestn. Urala*. 2019;186(2):51–58. (In Russ). doi: 10.26897/2687-1149-2023-3-41-48
5. Nechaev VN. Optimising the setting parameters of a passive grinder used for rye molasses preparation. *Agroinzhenneriya*. 2023;25(3):41–48. (In Russ). doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-41-48
6. Basymbekova A, Kabylbekova BN, Amanbaeva KB. Water rigidity and its influence on the formation of scale deposits in the pipelines of heat supply systems. *Nauchnye trudy YUKGU im M Auezova*. 2016;3(38):6–8. (In Russ).
7. Alekseev V, Arkhipov A, Piskunov D, et al. Water treatment of process systems of steam and hot water boilers: water rigidity and measurement method. *TekhNadzor*. 2016;1(110):224–225. (In Russ).
8. Aganin AA, Il'gamov MA, Kosolapova LA, et al. Collapse of a cavitation bubble in fluid near rigid wall. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*. 2013;18(1):15–21. (In Russ).
9. Isakov AYa, Ryabtsev KA. Vortex cavitation in technological devices. *Vestnik KamchatGTU*. 2003;2:207–214. (In Russ).
10. Idel'chik IE. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam*. Moscow: Mashinostroenie; 1992. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

* Нечаев Владимир Николаевич,

доцент, канд. техн. наук,
доцент кафедры «Технические
и биологические системы»;
адрес: Российская Федерация, 606340, Княгинино,
ул. Октябрьская, д. 22;
ORCID: 0000-0002-7566-6013;
eLibrary SPIN: 9562-7900;
e-mail: nechaev-v@list.ru

Алёшкин Алексей Владимирович,

профессор, д-р техн. наук,
профессор кафедры «Механика
и инженерная графика»;
ORCID: 0000-0002-6949-1480;
eLibrary SPIN: 5084-5478;
e-mail: usr00008@vyatsu.ru

Савиных Пётр Алексеевич,

профессор, д-р техн. наук,
зав. лабораторией «Механизация животноводства»;
ORCID: 0000-0002-5668-8479;
eLibrary SPIN: 5868-9317;
e-mail: peter.savinyh@mail

AUTHORS' INFO

* Vladimir N. Nechaev,

Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering),
Associate Professor of the Technical
and Biological Systems Department;
address: 22 Oktyabrskaya street, 606340 Knyaginino,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0002-7566-6013;
eLibrary SPIN: 9562-7900;
e-mail: nechaev-v@list.ru

Alexey V. Aleshkin,

Professor, Dr. Sci. (Engineering),
Professor of the Mechanics
and Engineering Graphics Department;
ORCID: 0000-0002-6949-1480;
eLibrary SPIN: 5084-5478;
e-mail: usr00008@vyatsu.ru

Peter A. Savinykh,

Professor, Dr. Sci. (Engineering),
Head of the Mechanization of Animal Husbandry Laboratory;
ORCID: 0000-0002-5668-8479;
eLibrary SPIN: 5868-9317;
e-mail: peter.savinyh@mail

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author