

УДК 664.032.1

ББК 36-81

К-12

*Алексеев Геннадий Валентинович*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой процессов и аппаратов института холода и биотехнологий ФГБОУ ВПО «СПБ НИУ информационных технологий, механики и оптики», тел.: 8(812)3153776, e-mail [gva2003@rambler.ru](mailto:gva2003@rambler.ru);

*Вороненко Борис Авсеевич*, доктор технических наук, профессор кафедры техники мясных и молочных производств института холода и биотехнологий ФГБОУ ВПО «СПБ НИУ информационных технологий, механики и оптики», тел.: 8(812)2330903;

*Кондратов Аркадий Владимирович*, кандидат технических наук, доцент кафедры техники мясных и молочных производств института холода и биотехнологий ФГБОУ ВПО «СПБ НИУ информационных технологий, механики и оптики», тел.: 8(812)7648161;

*Схаляхов Анзаур Адамович*, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологий, машин и оборудования пищевых производств, декан технологического факультета ФГБОУ ВПО «Майкопский государственный технологического университета, 385000, Республика Адыгея, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191, тел.: 8 (8772)570412.

**КАВИТАЦИОННОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ПИЩЕВОГО СЫРЬЯ:  
ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ**  
(рецензирована)

Рассматривается взаимодействие между жидкостью в кавернах, имеющих разнообразные геометрические формы, и проходящим мимо них транзитным потоком. Оно возникает в случае движения вязкой жидкости с образованием вторичных течений в результате воздействия на поток ограждающей твердой поверхности, имеющей определенную конфигурацию. В работе оцениваются сопротивления, возникающие на поверхности раздела между транзитным потоком и жидкостью в трещине, вопросы обмена объемами жидкости между ними, а также связанные с последними вопросы влияния ограждающей поток твердой стенки на смену режимов движения жидкости. Предлагаются технические средства для эффективного использования выявленных эффектов.

Ключевые слова: модель кавитации, измельчение пищевого сырья, рабочие органы, технические средства для подготовки рабочих органов.

*Alexeev Gennadiy Valentinovich*, Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department of Processes and Devices of the Institute of Refrigeration and Biotechnologies of FSBEI HPE “SPB SRU of Information Technologies, Mechanics and Optics”, tel.: 8 (812) 3153776, e-mail [gva2003@rambler.ru](mailto:gva2003@rambler.ru);

*Voronenko Boris Avseevich*, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Technology of Meat and Dairy Industries Institute of the Institute of Refrigeration and Biotechnologies of FSBEI HPE “SPB SRU of Information Technologies, Mechanics and Optics”, tel.: 8 (812) 233090;

*Kondratov Arkady Vladimirovich*, Candidate of Technical Sciences, assistant professor of professor of the Department of Technology of Meat and Dairy Industries Institute of the Institute of Refrigeration and Biotechnologies of FSBEI HPE “SPB SRU of Information Technologies, Mechanics and Optics”, tel.: 8 (812) 7648161;

*Skhalyakhov Anzaur Adamovich*, Doctor of Technical Sciences, associate professor, professor of the Department of Technologies, Machinery and Equipment of Food Production, dean of the Technological Faculty of FSBEI HPE “Maikop State Technological University “, 385000, the Republic of Adyghea, Maikop, 191 Pervomayskaya Str., tel.: 8 ( 8772) 570412.

# CAVITATION CHOPPING OF FOOD INGREDIENTS: NUMERICAL EVALUATION AND TECHNICAL RECOMMENDATIONS

(reviewed)

*The interaction between the fluid in cavities with a variety of geometric shapes and transit flow passing by them has been considered. It occurs in the case of flowing viscous liquids with the formation of secondary streams due to the effect on the flow of a hard surface having a predetermined configuration. In this research the resistance arising at the interface between the liquid and transit flow in the fracture, the exchange of fluids between them, as well as issues related to the impact of the solid wall enclosing the flow on the regime change of the fluid movement have been estimated. Technical resources for the effective use of the identified effects have been offered.*

*Keywords: model of cavitation, grinding food raw materials, working bodies, technical facilities for preparing working bodies.*

Кавитация как физическое явление, сопровождается большим количеством разнообразных процессов, часть из которых активно используется для разрушения материалов с целью их измельчения. Значимость процессов измельчения сырья для пищевой промышленности трудно переоценить. Интерес все большего количества исследователей привлекают в настоящее время процессы и аппараты тонкого измельчения [1].

К числу физико-механических явлений, успешно используемых для таких целей относятся и различные эффекты, сопровождающие кавитацию [2].

Движение жидкости в полости, замыкающейся на поверхности, для таких случаев целесообразно описать способом Лагранжа, позволяющим детально рассматривать локальные характеристики движения жидкости. Плоская модель движения жидкости в полости, которую можно рассматривать как дефект структуры сырья, в этом случае может быть выбрана в виде прогрессивного периодического движения несвободной материальной точки с голономными связями, где понятие материальной точки отождествляется с понятием жидкой частицы [3].

Если принять, что движение жидкости в дефекте не является функцией времени в явном виде, когда оно осуществляется под воздействием транзитного потока, имеющего постоянную скорость движения  $V_0$ , подобное движение можно также рассматривать как автономное движение.

Рассмотрим силы, действующие в движущейся в дефекте жидкости, предполагая, что дефект имеет форму, близкую по очертанию к эллипсу, и что транзитный поток параллелен большой оси этой эллиптической выемки (рис. 1). Жидкая граница, или поверхность раздела, между транзитным потоком и жидкостью в выемке предполагается отстоящей от ее центра на расстоянии малой полуоси эллипса.

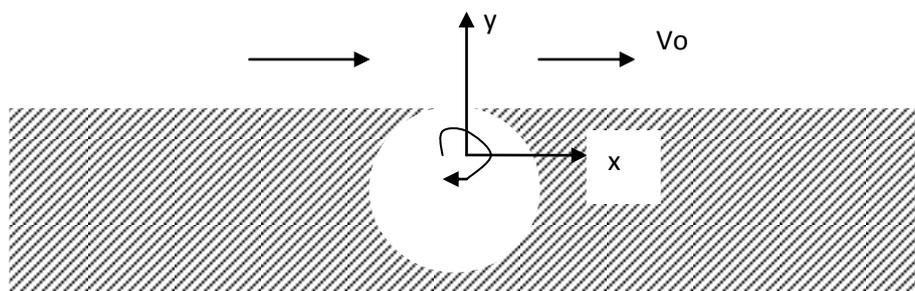


Рис.1. Схема взаимодействия поверхности с внутренней открытой полостью и обтекающего потока жидкости

На твердую границу дефекта накладывается условие ограничения по ее конфигурации, близкой к эллиптической форме. В результате воздействия транзитного потока на жидкость в выемке в последней возникает вращательное движение. Если не учитывать сопротивления движению жидкости, возникающего от влияния ее твердой и жидкой границ, то это движение, обусловленное указанными геометрическими связями, будет происходить по концентрическим замкнутым траекториям с равномерной окружной скоростью.

Обеспечивающие подобное движение силы могут быть представлены в виде функций окружной скорости движения жидкой частицы вдоль эллиптической траектории. Определим составляющие этой скорости из условия, что движение жидких частиц описывается уравнением эллипса в следующем виде:

$$\Psi = q \left( \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \right),$$

где  $\psi$  – функция тока;  $x, y$  – текущие координаты жидкой частицы в декартовой системе;  $a, b$  – большая и малая соответственно, полуоси эллипсов, по которым движется жидкая частица;  $q$  – постоянный параметр.

Составляющая окружной скорости  $u$  вдоль оси  $O_x$  будет равна

$$U_x = \frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{2q}{b^2} y,$$

а составляющая вдоль оси  $O_y$  определится как

$$U_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x} = -\frac{2q}{a^2} x.$$

Тогда проекции силы, вызывающей равномерное движение жидкости по эллиптическим траекториям на оси координат можно представить так:

$$N_x = \kappa_1 \cdot u_x = \kappa_1 \cdot \frac{2q}{b^2} y = c_1 y$$

$$N_y = \kappa_2 \cdot u_y = \kappa_2 \cdot \frac{2q}{a^2} x = c_2 x,$$

где  $\kappa_1; \kappa_2; c_1; c_2$  – постоянные коэффициенты.

В действительности, рассматриваемое движение жидкости в каверне является неравномерным в течение периода её обращения за счёт возникающих при этом сил сопротивления.

Следовательно, во-первых, необходимо учесть внутреннюю силу сопротивления движению жидкости в каверне, возникающую от влияния вязкости, благодаря которой главным образом происходит диссипация энергии, накопленной жидкостью в каверне от транзитного потока.

Эту силу сопротивления можно принять пропорциональной скорости движения жидкости в каверне и представить в виде:

$$T_1 = -\lambda V^n,$$

где  $\lambda$  – некоторый коэффициент пропорциональности;  $V$  – окружная (линейная) скорость неравномерного движения жидкой частицы вдоль эллиптических, но уже неконцентрических траекторий;  $n$ -показатель степени, который может принимать значения  $n = 1; 2$

Составляющие силы сопротивления  $T_1$  вдоль координатных осей запишутся: вдоль оси  $Ox$

$$T_{1x} = -\lambda \left( \frac{dx}{dt} \right)^n,$$

а вдоль оси  $Oy$

$$T_{2y} = -\lambda \left( \frac{dy}{dt} \right)^n.$$

**Знак минус указывает на то, что силы сопротивления противоположны направлению скорости движения жидкости.**

Во-вторых, кроме указанных сил, должны также быть учтены силы сопротивления, возникающие на поверхности раздела между транзитным потоком и жидкостью в дефекте. Эти силы можно записать в виде функции относительной скорости движения жидкости на поверхности раздела, выразив её через скорость транзитного потока  $v_0$  и соответствующую неравномерность окружной скорости  $\frac{dx}{dt}$  движения жидкости в дефекте вдоль оси  $O_x$ .

Тогда имеем:

$$T_2 = \varphi \left( v_0 \pm \frac{dx}{dt} \right).$$

Знак  $\pm$  перед производной  $\frac{dx}{dt}$  показывает, что в общем случае скорость движения жидкости в дефекте может отличаться от скорости транзитного потока на некоторую величину. Для наглядности возьмём здесь знак минус, предполагая, что при подобном взаимодействии может существовать тенденция к отставанию скорости движения жидкости в дефекте против скорости транзитного потока.

Составим динамические уравнения движения жидкой частицы в выемке, предположив, что силой тяжести частицы можно пренебречь.

Тогда имеем:

$$\begin{aligned} F_x &= T_{1x} + N_x + T_2, \\ F_y &= T_{1y} + N_y \end{aligned} \quad (1)$$

где через  $F_x$  и  $F_y$  обозначены проекции равнодействующей силы на координатные оси.

Перепишем систему (1), подставляя значения найденных ранее сил и их проекций, а также учитывая, что  $F = mw$ , где  $m$  – масса жидкой частицы, а  $w$  – её ускорение. Тогда получаем:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \lambda \left( \frac{dx}{dt} \right)^n - c_1 y = \varphi \left( v_0 - \frac{dx}{dt} \right), \quad m \frac{d^2y}{dt^2} + \lambda \left( \frac{dy}{dt} \right)^n + c_2 x = 0 \quad (2)$$

Если  $\varphi$  известна, то система (2) представляет собой неоднородную нелинейную систему двух обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка.

С помощью полученных уравнений можно провести исследования различных состояний жидкости в дефекте в зависимости от характера внешних связей и воздействия со стороны, главным образом, транзитного потока, проходящего мимо.

Аналитическое решение системы уравнений (2) представляет значительные трудности, поэтому для анализа указанных состояний проинтегрируем записанные уравнения численно.

В соответствии с известными рекомендациями по численному решению неоднородных нелинейных систем обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка сведем их к решению системы дифференциальных уравнений первого порядка, выполнив замену переменных:

$$x = y_0; \quad \frac{dx}{dt} = y_1 \quad y = y_2 \quad \frac{dy}{dt} = y_3$$

После такой замены полученную систему уравнений можно переписать в упрощенном виде и решать, выбирая граничные условия из соображений постоянства среды в каверне:

$$y_0(0) = 0 \quad y_1(0) = 1 \quad y_2(0) = 1 \quad y_3(0) = 0 \quad \text{Для получения}$$

решений применяли метод

Рунге-Кутты четвертого порядка с переменным шагом. В качестве временного для решения выбирали интервал 0-0,25 секунды с количеством шагов – 40.

Анализ построенной модели позволил оценить влияние на гидродинамическую обстановку в каверне таких важных технологических параметров, как скорость транзитного потока и внешние силы сопротивления.

Экспериментальное уточнение входящих в систему уравнений численных коэффициентов позволяет рассчитать гидродинамические режимы, при которых возможно разрушение материала за счет действующих центробежных сил и сформулировать некоторые предложения по конструкции рабочих органов и технологии их изготовления [4-17].

Простейшим рабочим органом для реализации описанных эффектов кавитационного измельчения является статор с соосно расположенным в нем ротором, между которыми зазор соизмерим с величиной частиц заданных техническим заданием на измельчение [4].



Рис. 2. Рабочий орган кавитационной установки

Специфической особенностью такого рабочего органа является то, что для обеспечения необходимых гидродинамических режимов в зазоре между статором и ротором на одну или обе поверхности, которыми они обращены друг к другу, нанесен тонкий слой мелкодисперсного абразивного порошка. В зависимости от того, на какую из поверхностей наносится методом гальваностегии абразивный слой, предложены различные топологии и технологии формирования покрытий.

Так, например, для внутренних поверхностей статора могут быть рекомендованы покрытия с чередующимися полосами абразивного зерна [5-10], а для наружной поверхности ротора технологии, предусматривающие специальное магнитное ориентирование зерна или конструкцию из навитой ленты [11-12].

В зависимости от геометрических размеров статора и ротора для закрепления абразивного зерна также могут быть рекомендованы различные технологические устройства [13-15].

Другие конструкции и технологические приемы по подготовке процессов кавитационного измельчения растительного сырья изучались в целом ряде работ с учетом специфики механических свойств самого сырья [16-21].

Выполненные исследования позволяют решить вопросы высококачественного измельчения практически любой дисперсности для большинства видов наиболее часто применяемого растительного сырья.

#### *Литература:*

1. Алексеев Г.В., Головацкий Г.А., Краснов И.В. Некоторые направления повышения эффективности технологического оборудования для переработки пищевого сырья // Известия Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий. 2007. №3. - С. 52-56.
2. Алексеев Г.В., Кондратов А.В. О модели развития кавитационной полости при измельчении пищевого сырья // Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. 2008. №2. - С. 38-42.
3. Алексеев Г.В., Вороненко Б. А., Лукин Н.И. Математические методы в пищевой инженерии : учеб. пособие. СПб.: Лань, 2012. - 156 с.
4. Алексеев Г.В., Кондратов В.А. Рабочий орган для восстановления кавитационного диспергатора: пат. РФ на изобретение № 2339497, 2007.
5. Алексеев Г.В., Наумов В.Н. Покрытие для рабочих органов картофелечистки: а. с. №1629025, БИ №7, 1991.
6. Алексеев Г.В., Наумов В.Н. Uberzug der Arbeitsorgane einer Maschine zur Bearbeitung von Knollen- und Wurzelfruchten. Европейская заявка на 6 с. патент EP 0 403652 A1, Гаага, 1989.
7. Алексеев Г.В., Старостин В. Покрытие рабочих органов очистительной машины для плодовоовощных культур: а. с. №1779319, БИ №45, 1992.
8. Алексеев Г.В., Ардашников Б.Н. Устройство для закрепления зерен абразивного материала на инструменте методом гальваностегии: а. с. №1539241, БИ №4, 1990.
9. Алексеев Г.В., Шохин А.Н. Устройство для нанесения абразивного материала на инструмент: а. с. №1574690, БИ №24, 1990.
10. Алексеев Г.В., Хомский Г.М. Устройство для закрепления зерна: а. с. №1624061, БИ №4, 1991.
11. Алексеев Г.В., Шохин А.Н. Устройство для прикрепления зерен абразивного материала к инструменту: а. с. №1654382, БИ №21, 1991.
12. Алексеев Г.В., Шохин А.Н. Устройство для изготовления абразивных рабочих органов: а. с. №1669422, БИ №30, 1991.

13. Алексеев Г.В., Хомский Г.М. Устройство для закрепления зерен абразивного материала на инструменте методом гальваностегии: а. с. №1745778, БИ №25, 1992.
14. Алексеев Г.В., Шохин А.Н. Устройство для прикрепления зерен абразивного материала: а. с. №1788098, БИ №2, 1993.
15. Алексеев Г.В., Грекова И.В. Рабочий орган устройства для очистки и измельчения пищевых продуктов: патент РФ на изобретение №2062588, БИ №18, 1996.
16. Алексеев Г.В., Грекова И.В. Абразивные покрытия рабочих органов пищевой промышленности // Изобретатели машиностроению. 1997. №1. - С. 23-25.
17. Алексеев Г.В. Устройства для закрепления зерен абразивного материала на поверхности инструмента // Там же. - С. 12-15.
18. Алексеев Г.В., Лагунов Д.В. Особенности контактного взаимодействия поверхностей трения // Техника машиностроения. 2000. №1. - С. 45-48.
19. Алексеев Г.В., Грекова И.В. Возможный подход к решению тепловой задачи и повышение эффективности использования абразивного оборудования // Машиностроитель. 2000. №8. - С. 32-35.
20. Алексеев Г.В., Лагунов В.С. Изготовление абразивных покрытий на неметаллических подложках для обработки продуктов питания // Техника машиностроения. 2002. №4. - С. 28-30.
21. Алексеев Г.В., Гончаров М.В. Ресурсосберегающие направления развития абразивной обработки пищевых материалов // Техничко-технологические проблемы сервиса. СПб.: ГУСЭ, 2013. Т. 26, №4. - С. 48-54.

#### **References:**

1. Alexeev G.V., Golovatsky G.A., Krasnov I.V. Some ways of increasing the efficiency of technological equipment for processing food raw materials // *Proceedings of St. Petersburg State University of Low Temperatures and Food Technologies*. 2007. №3. P. 52 -56.
2. Alexeev G.V., Kondratov A.V. About the model of development of cavitation cavity when grinding food raw materials // *Storage and processing of agricultural raw materials*. 2008. № 2. P. 38 - 42.
3. Alexeev G.V., Voronenko B.A., Lukin N.I. *Mathematical methods in food engineering: textbook*. SPb.:Lan, 2012. 156 p.
4. Alexeev G.V., Kondratov V.A. Working body to restore the cavitation dispersant: The RF Patent № 2339497, 2007.
5. Alexeev G.V., Naumov V.N. Coverage for working parts of potato peeler: a. c. № 1629025. BI № 7, 1991.
6. Alexeev G.V., Naumov V.N. *Uberzug der Arbeitsorgane einer Maschine zur Bearbeitung von Knollen-und Wurzelfruchten*. European Application 6 p. EP 0 403652 A1. The Hague, 1989.
7. Alexeev G.V., Starostin B. Coating of working parts of the cleaning machine for fruit and vegetable crops: a.c. № 1779319. BI № 45, 1992.
8. Alexeev G.V., Ardashnikov B.N. Device for fixing the abrasive grains on the instrument by plating: a. c. № 1539241. BI № 4, 1990.
9. Alexeev G.V., Shokhin A.N. Device for application the abrasive material on a tool: a. c. № 1574690. BI № 24, 1990.
10. Alexeev G.V., Khomsky G.M. Device for grain consolidation: a. c. № 1624061. BI № 4, 1991.
11. Alexeev G.V., Shokhin A.N. Device for attachment of abrasive grain to the tool: a. c. № 1654382. BI № 21, 1991.
12. Alexeev G.V., Shokhin A.N. The apparatus for manufacturing the abrasive working parts: a. c. №1669422. BI № 30, 1991.
13. Alexeev G.V., Khomsky G.M. Device for fixing the abrasive grains on the tool by plating: a. c. № 1745778. BI № 25, 1992.

14. Alexeev G.V., Shokhin A.N. *Device for attaching abrasive grains: a. c. № 1788098. BI № 2, 1993.*
15. Alexeev G.V., Grekova I.V. *Working body of the device for cleaning and grinding of food materials: the RF Patent № 2062588. BI № 18, 1996.*
16. Alexeev G.V., Grekova I.V. *Abrasive coats of working bodies of food industry // Inventors to machine building. 1997. № 1. P. 23 -25.*
17. Alexeev G.V. *Device for fixing the abrasive grains on the surface of the tool // Inventors to machine building. № 1. 1997. P. 12 -15.*
18. Alexeev G.V., Lagunov D.V. *Features of contact interaction of friction surfaces // Technology of mechanical engineering. 2000. № 1. P. 45 - 48.*
19. Alexeev G.V., Grekova I.V. *Possible approaches to solving the heat problem and improving the efficiency of abrasive equipment // Mechanical engineer. 2000. № 8. P. 32 -35.*
20. Alexeev G.V., Lagunov D.V. *Producing abrasive coatings on non metallic substrates for food processing // Technology of mechanical engineering. 2002. № 4. P. 28 -30.*
21. Alexeev G.V., Goncharov M.V. *Resource- saving trends of the development of abrading of food materials // Technical and technological problems of service. SPb.: SUSE, 2013. V. 26. № 4. P. 48- 54.*