

## РАЗДЕЛ 1. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

УДК 664.6

### АНАЛИЗ НАГРУЖЕННОСТИ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ «СМУЗИ»

Г.В. Алексеев, Л.В. Минаева, А.Г. Леу

*Прочностные расчеты часто являются основой создания новых образцов технологического оборудования. Успех таких расчетов часто обусловлен тем, что в качестве модели для них выбирают конструкцию предварительно прошедшую проверку в опытно-промышленных условиях. Таким приемом воспользовались авторы, взяв для своей расчетной модели опытную установку для измельчения пищевых продуктов. Ими описан один из вариантов конструкции измельчителя для использования при приготовлении нового для российского рынка и широко используемого за рубежом газированного напитка на основе фруктового или овощного сырья - «смузи». Новый принцип действия, подтвержденный охранным документом ФИПС, позволил создать образец отечественного конкурентоспособного пищевого оборудования. Методы механики твердого тела привели авторов к получению статически неопределимой задачи, которую пришлось дополнить некоторыми аналитическими условиями, сделавшую ее нерешаемой аналитическими методами. Преодоление этих трудностей заставило их выполнить расчетно-графический анализ с помощью пакета прикладных программ Mathcad. Приведены оценочные расчетные данные о конструктивных особенностях новой разработки как в статически определенных условиях, при действии сосредоточенных моментов, так и в статически неопределенных условиях работы оборудования.*

*Ключевые слова: конкурентоспособное оборудование, прочностные расчеты, статически неопределенная модель вала, импортозамещение, фрукты, овощи, распределенный крутящий момент.*

Специфической особенностью работы перерабатывающих производств, в настоящее время, являются ограничения на использование импортной техники, из-за накладываемых на нее санкций. Вместе с тем, обеспечение импортозамещения, в том числе и в области производства продуктов питания, заставляет разрабатывать для этого новые виды оборудования. В такой ситуации оказалось производство «смузи» - газированных напитков наполненных мякотью фруктов или овощей [1-3].

Технической задачей разрабатываемой конструкции является повышение эффективности измельчения продукта, повышение производительности и уровня автоматизации технологического процесса, что обеспечивается особенностями ее работы и оптимизацией параметров.

Сущность заключается в том, что в устройстве для измельчения фруктов и овощей, состоящем из корпуса с загрузочным и выгрузочным отверстиями, измельчающего механизма, в виде размещенного по оси корпуса полого вала и закрепленного на нем измельчительного органа, полый вал выполнен перфорированным и размещен с возможностью перемещения вдоль оси корпуса, а его нижний конец, направленный в сторону выгру-

зочного отверстия, снабжен конической заглушкой с радиально упорным подшипником, при этом верхний конец вала, снабженный кольцевым магнитом, подпружинен и размещен внутри соленоида, а в средней части вала закреплен фрикционный конус, входящий в соприкосновение с приводом при вертикальном перемещении вала. Кроме того, верхний конец полого вала соединен с подающей магистралью функциональной жидкости [4].

Результатом работы такой конструкции является повышение эффективности измельчения фруктов и овощей за счет автоматизации переключения режимов измельчения и выгрузки готовой продукции, что осуществляется регулируемым включением соленоида, генерирующего магнитное поле, которое обеспечивает надежное перекрытие выгрузочного отверстия и соединения вала с приводом в процессе измельчения при размещении вала с возможностью перемещения в вертикальном направлении вдоль оси корпуса. Этому же способствует снабжение вала конической заглушкой с радиально упорным подшипником. С другой стороны, выполнение полого вала перфорированным и соединение его верхнего конца с магистралью функциональной жидкости позволяет легко дезинфицировать рабочую камеру, удаляя остатки измельченного продукта. При необходимости использовать

измельченный продукт, например, для приготовления фруктового или овощного напитка с мякотью, в качестве функциональной жидкости может быть использована газированная вода с вкусовыми компонентами [5-6].

На рисунке 1 изображен продольный разрез описанного устройства. Оно состоит из камеры для хранения измельчаемых продуктов 1 с охлаждаемой рубашкой, резательной камеры 2, патрубка для соединения с сатуратором 3, электромагнита 4, возвратной пружины 5, электропривода с фрикционным редуктором 6, крышки с загрузочным отверстием и пластинчатой пружиной 7, установленного с возможностью осевого перемещения полого перфорированного вала 8, измельчительного органа 9, конической заглушки 10, направляющей воронки 11 и емкости для наполнения 12.

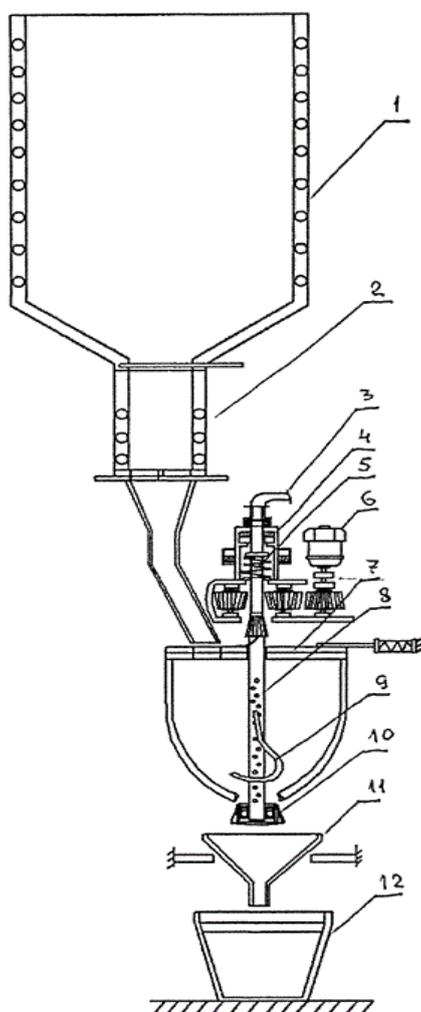


Рисунок 1 – Схема устройства для приготовления «смузи»

При приготовлении лимонного газированного напитка с мякотью, устройство работает

следующим образом. При его включении из камеры 1 один фрукт, например, лимон, поступает в резательную камеру 2, где разрезается на две половины, после этого открывается одна из половин составной перемычки и половина лимона попадает через открытое отверстие загрузочного отверстия крышки 7 внутрь измельчительной емкости, пластинчатая пружина находится в сжатом состоянии. При этом вал 8 находится в крайнем верхнем положении, коническая заглушка 10 замыкает рабочий объем камеры, а конический редуктор привода 6 находится в зацеплении с фрикционным конусом, расположенным на валу 8. Пружина 5 при этом находится в сжатом положении под действием включенного электромагнита 4. Патрубок 3 перекрыт и не допускает попадания газированной воды с вкусовыми ингредиентами в рабочую полость. После включения привода 6 перекрывается отверстие в крышке 7, а измельчительный орган 9, воздействуя на половинку лимона, измельчает ее до необходимой кондиции. После отключения привода выключается электромагнит 4 и пружина 5 перемещает вал 8 в крайнее нижнее положение. Одновременно патрубок 3 открывают для соединения с сатуратором, газированная вода с вкусовыми ингредиентами поступает внутрь полого вала 8 и через перфорацию вымывает из рабочего объема камеры измельченный лимон сначала в направляющую воронку 11, а затем в емкость 12. Одновременно очищая и сам измельчительный орган 9. Далее перекрывается патрубок 3 и включается электромагнит 4, после чего рабочая емкость замыкается. При перемещении полого вала 8 в крайнее верхнее положение открывается отверстие в крышке 7. Процесс загрузки половинки лимона осуществляют через вторую половину составной перемычки и измельчение его с вымыванием полуфабриката повторяется. В случае простой дезинфекции камеры через патрубок 3 подается моющий раствор в емкость 12, из которой удаляется, при этом технологические отходы сливают в специальную емкость [7].

Одним из важнейших конструктивных элементов измельчителя, на котором размещены рабочие измельчительные органы, является вал. Специфические условия нагружения этого узла требуют проведения численных оценок действующих силовых факторов для последующего их использования при выборе геометрических параметров и материала для изготовления вала.

Основной нагрузкой, действующей на валы, является, как правило, крутящий мо-

## АНАЛИЗ НАГРУЖЕННОСТИ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ «СМУЗИ»

мент. При такой схеме нагружения в поперечных сечениях вала действует только одно внутреннее усилие – крутящий момент, численно равный сумме моментов всех сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого сечения. Знак крутящего момента обычно безразличен, поскольку прочность вала зависит в этом случае только от величины крутящего момента и не учитывает направление его действия.

В рассматриваемых условиях крайние поперечные сечения элемента вала  $dx$  поворачиваются друг относительно друга. Если одно из этих сечений мысленно зафиксировать, тогда другое сместится относительно первого на некоторый угол  $d\varphi$  (рис.2). При этом волокно  $ab$  поворачивается на угол сдвига  $\gamma$  и приходит в положение  $ab_1$ .

Связь между углом поворота сечения  $d\varphi$  и углом сдвига волокна  $\gamma$  можно в этом случае записать таким образом [8-9]

$$bb_1 = \rho d\varphi = dx \gamma,$$

откуда 
$$\gamma = \frac{d\varphi}{dx} \rho$$

Если воспользоваться условием эквивалентности напряжений и внутренних усилий для связи касательных напряжений с крутящим моментом, то можно получить, что:

$$M_k = \int_A \tau \rho A = \int_A G \rho \frac{d\varphi}{dx} \rho A = G \frac{d\varphi}{dx} \int_A \rho^2 dA$$

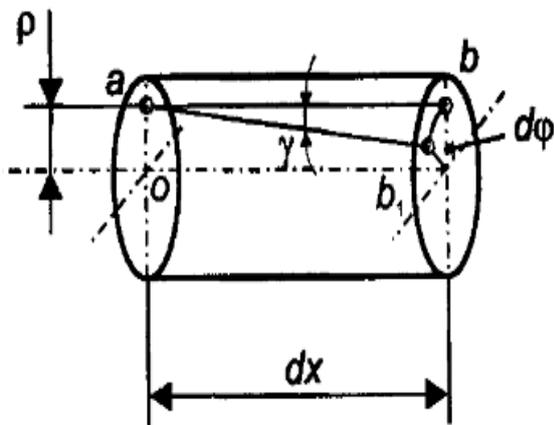


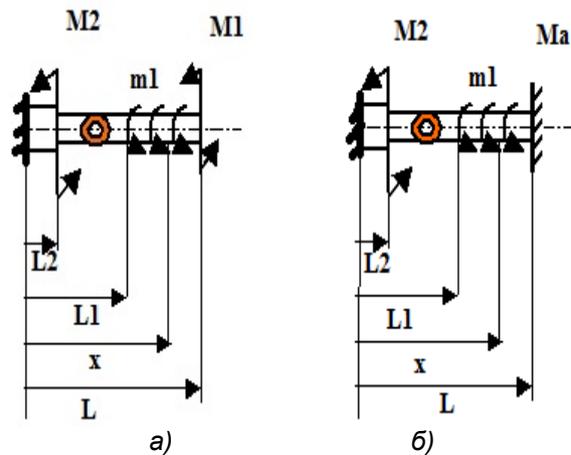
Рисунок 2 – Обычное нагружение сечений вала

Угол для закручивания легко получить интегрированием по длине вала выражения для

$d\varphi$ , получаемого из самого первого из записанных соотношений:

$$\varphi = \int \frac{M_k dx}{GJ_p}$$

В случаях приложения к валу более сложной системы нагрузок, включающей в себя распределенные и сосредоточенные моменты, расчетная схема становится в некоторых случаях статически неопределенной и анализ ее решения целесообразен с применением пакетов прикладных программ для ЭВМ.



а) статически определимая;

б) статически неопределимая

Рисунок 3 – Схемы нагружения вала измельчителя

Рассмотрим два случая расчета нагруженного вала измельчителя. В режиме разгрузки он закреплен только в своей верхней части и все нагрузочные характеристики находятся из обычной системы уравнений равновесия, причем в начальный момент можно считать, что внешние нагрузки сохраняют свои величины [10].

В этот период работы вал измельчителя статически определен. Другая ситуация складывается в режиме активного измельчения.

Оба конца вала закреплены, а сам он подвергается действию, как распределенных моментов (при встрече рабочих органов с уже частично измельченным сырьем), так и сосредоточенной нагрузки при встрече с достаточно большими фрагментами сырья.

Возникает ситуация неопределенности из-за невозможности определения некоторых параметров нагружения конструкции только на основании системы уравнений равновесия, например, крутящего момента в зоне разгрузки полуфабриката.

Размерности, производные от стандартных

$$\begin{aligned}
 \text{Н} &:= \text{N} & \text{м} &:= \text{m} & \text{град} &:= \text{deg} & \text{кН} &:= 1000 \cdot \text{N} \\
 \text{мм} &:= \text{mm} & \text{см} &:= \text{cm} & \text{МПа} &:= 10^6 \cdot \frac{\text{H}}{\text{м}^2}
 \end{aligned}$$

Исходные данные

$$\text{M1} := 3 \cdot \text{кН} \cdot \text{м} \quad \text{M2} := 4 \cdot \text{кН} \cdot \text{м} \quad \text{m1} := -16 \cdot \text{кН} \cdot \text{м}$$

$$\text{m2} := 0 \cdot \text{кН} \cdot \text{м} \quad * \quad \text{G} := 8 \cdot 10^4 \cdot \text{МПа} \quad \text{D1} := 0$$

$$\text{b} := 50 \cdot \text{мм} \quad \text{h} := 50 \cdot \text{мм} \quad \alpha := 0.140 \quad \beta := 0.208$$

$$\text{L1} := 0 \cdot \text{см} \quad * \quad \text{L3} := 10 \cdot \text{см} \quad \text{D} := 20 \cdot \text{мм}$$

$$\text{L2} := 5 \cdot \text{см} \quad \text{L} := 40 \cdot \text{см} \quad \text{d} := 10 \cdot \text{мм}$$

Крутящий момент  $x := 0, \frac{L}{40} \dots L$

$$\text{Mk}(x) := \begin{cases} [\text{M1} + \text{m1} \cdot (\text{L} - x)] & \text{if } \text{L3} \leq x \leq \text{L} \\ [\text{M1} + \text{m1} \cdot (\text{L} - \text{L3})] & \text{if } \text{L2} \leq x < \text{L3} \\ [\text{M1} + \text{M2} + \text{m1} \cdot (\text{L} - \text{L3})] & \text{if } \text{L1} \leq x < \text{L2} \\ [\text{M1} + \text{M2} + \text{m1} \cdot (\text{L} - \text{L3}) + \text{m2} \cdot (\text{L1} - x)] & \text{if } x < \text{L1} \end{cases}$$

Моменты инерции

$$\text{Jk}(x) := \begin{cases} \frac{\pi}{32} \cdot \text{D1}^4 & \text{if } x \leq \text{L1} \\ \alpha \cdot \text{b}^4 & \text{if } \text{L1} < x < \text{L2} \\ \left[ \left[ \frac{\pi}{32} \cdot \text{D}^4 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\text{d}}{\text{D}} \right)^4 \right] \right] \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

Моменты сопротивления

$$\text{Wk}(x) := \begin{cases} \frac{\pi}{16} \cdot \text{D1}^3 & \text{if } 0 \leq x \leq \text{L1} \\ (\beta \cdot \text{b}^3) & \text{if } \text{L1} < x < \text{L2} \\ \left[ \left[ \frac{\pi}{16} \cdot \text{D}^3 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\text{d}}{\text{D}} \right)^4 \right] \right] \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

Рисунок 4 – Начальные данные для расчета

Углы поворота сечений

$$\phi(x) := \int_0^x \frac{\text{Mk}(x)}{\text{G} \cdot \text{Jk}(x)} dx$$

Максимальные напряжения

$$\tau_{\max}(x) := \frac{\text{Mk}(x)}{\text{Wk}(x)}$$

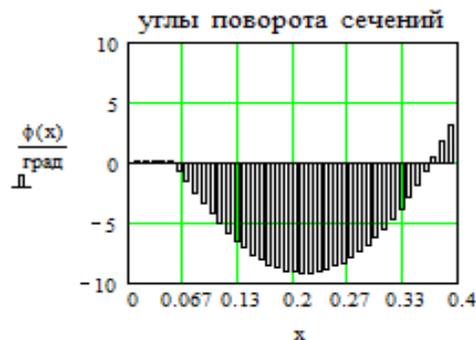
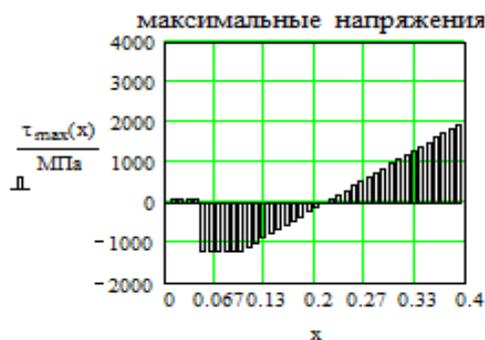


Рисунок 5 – Решения статически определенной задачи

## АНАЛИЗ НАГРУЖЕННОСТИ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ «СМУЗИ»

Для раскрытия неопределенности необходимо дополнительное уравнение. В рас-

считываемом случае для раскрытия неопределенности целесообразно использовать уравнение неразрывности деформаций.

решение уравнения неразрывности деформаций  $\phi=0$

$$M_k(x, Ma) := \begin{cases} [Ma + m1 \cdot (L - x)] & \text{if } L3 \leq x \leq L \\ [Ma + m1 \cdot (L - L3)] & \text{if } L2 \leq x < L3 \\ [Ma + M2 + m1 \cdot (L - L3)] & \text{if } L1 \leq x < L2 \\ [Ma + M2 + m1 \cdot (L - L3) + m2 \cdot (L1 - x)] & \text{if } x < L1 \end{cases}$$

$Ma := 1 \text{ кН}\cdot\text{м}$  начальное приближение

$$\phi(x, Ma) := \int_0^x \frac{M_k(x, Ma)}{G \cdot J_k(x)} dx \quad Ma := \text{root}(\phi(L, Ma), Ma) \quad Ma = 3 \text{ кН}\cdot\text{м}$$

$$\tau_{\max}(x) := \frac{M_k(x, Ma)}{W_k(x)}$$

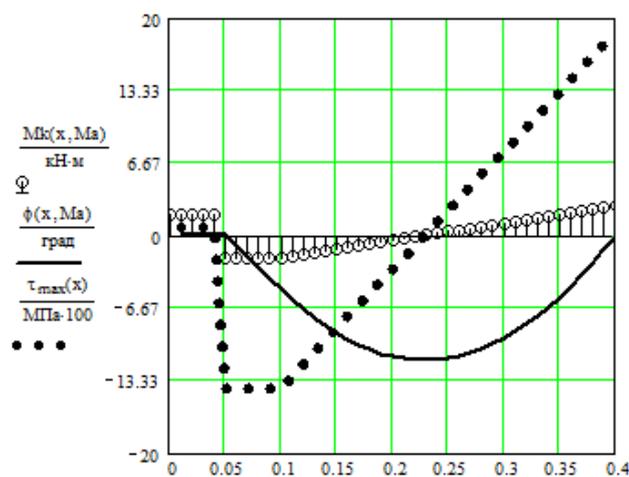


Рисунок 6 – Решения статически неопределенной задачи

Обе задачи, как для активного этапа измельчения, так и для этапа разгрузки решали с использованием пакета прикладных программ Mathcad.

На рисунках 3 - 5 приведены начальные параметры сформулированных задач и результаты их решения.

Выполненный анализ нагруженности предложенной конструкции для измельчения фруктов и овощей, в частности вала, в статически определенной и статически неопределенной постановках, позволил сделать вывод о работоспособности устройства и адекватности получаемых расчетных данных реальным режимам работы. Анализируя полученные количественные оценки, можно сделать вывод о примерно равных максимальных напряжениях и углах сдвига для обоих рассмотренных режимах работы измельчителя. Следует однако

отметить что экстремум углов сдвига практически не меняет своего положения, оставаясь в средней части по длине вала, тогда как максимальные напряжения перемещаются от зоны передачи крутящего момента к зоне разгрузки. Это позволяет сделать вывод о том, что крепление самих рабочих органов к валу целесообразно осуществлять в срединной части вала.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минаева Т.В., Алексеев Г.В. «Устройство для измельчения фруктов и овощей». Патент РФ №131996 на полезную модель, опубликовано: 10.09.2013, Бюл. № 25.
2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учебник для вузов. – 10 издание, - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999, - 592 с.
3. Алексеев Г.В., Кондратов А.В. Перспективы применения кавитационного воздействия для

измельчения пищевых продуктов. Монография / Саратов, 2013.

4. Арет В.А., Вербельз Е.И., Вороненко Б.А., Гусев Б.К. [Оптимизация формы режущей кромки ножей измельчительного оборудования. Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2009. № 10. С. 21-26.](#)

5. Пучков В.Ф., Алексеев Г.В., Леу А.Г. [Использование инноваций в пищевых производствах в условиях экономических санкций](#). В сборнике: [Инновационная наука: прошлое, настоящее, будущее](#) Сборник статей Международной научно-практической конференции: в 2 частях. Ответственный редактор: Сукиасян Асатур Альбертович. 2016. С. 56-59.

6. Арет В.А., Орлов П.В., Пеленко Ф.В. [Добавки как регуляторы консистенции молочных продуктов. Пищевые ингредиенты: сырье и добавки. 2002. № 2. С. 78-79.](#)

7. Холявин И.И., Новиков И.В., Леу А.Г. [Оценка эффективности предварительной подготовки при выработке крахмала](#). В сборнике: [«Инновационно-технологическое развитие науки»](#) сборник статей международной научно-практической конференции: в 3 частях. 2017. С. 162-166.

8. Алексеев Г.В., Мосина Н.А. [Абразивная обработка картофеля и овощей с дискретным энергоподводом](#). Монография / Саратов, 2013.

9. Арет В.А., Орлов В.В., Зеленков С.К. [Выбор перемешивающего устройства на основе построения его морфологической модели. Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2009. № 2. С. 1-5.](#)

10. Алексеев Г.В., Егошина Е.В., Башева Е.П., Верболоз Е.И., Боровков М.И. Оценка конкурентоспособности инновационного технического решения. Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. 2014. № 4. С. 137-146.

**АЛЕКСЕЕВ Геннадий Валентинович**, д.т.н., профессор кафедры Процессы и аппараты пищевых производств Мегафакультета биотехнологий и низкотемпературных систем Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, e-mail: [gva2003@mail.ru](mailto:gva2003@mail.ru), тел: 89213350796.

**МИНАЕВА Лидия Викторовна**, аспирант, кафедры Процессы и аппараты пищевых производств Мегафакультета биотехнологий и низкотемпературных систем Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, e-mail: [linyay99@rambler.ru](mailto:linyay99@rambler.ru), тел. 89045509454.

**ЛЕУ Анна Геннадьевна**, магистр, кафедры Процессы и аппараты пищевых производств Мегафакультета биотехнологий и низкотемпературных систем Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, e-mail: [anna.leu@mail.ru](mailto:anna.leu@mail.ru), тел.:89657527111.