

УДК 664.002.5

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАПОВНЕННЯ БАНКИ ПРИ ГРАВІТАЦІЙНОМУ МЕТОДІ РОЗЛИВУ ДО ЗАЗНАЧЕНОГО РІВНЯ

Змєєва І.М., к.т.н.,

Бондаренко О.В., асист.

Подільський державний аграрно-технічний університет

Анотація – Робота присвячена моделюванню процесу заповнення банки при гравітаційному методі розливу до зазначеного рівня.

Ключові слова – рідкі харчові продукти, продуктивність, точність дозування, гідравлічний тракт, моделювання.

Постановка проблеми. Продукція вітчизняних заводів з виробництва обладнання для розливу й пакування різних харчових продуктів за конструктивними особливостями й технічним рівнем не поступається зарубіжним аналогам, має значно нижчу вартість, забезпечена гарантійним і післягарантійним обслуговуванням, що здійснюється на придатніших для споживача економічних умовах і в стислі строки.

Запорукою успіху є технічне переозброєння виробництва. При наявності на ринку великої кількості високотехнологічного, енергоощадного обладнання, автоматизованих ліній, а також відповідних коштів у підприємств, проблем для оновлення парку машин і механізмів, на перший погляд, не існує. Проблема полягає у виборі необхідного устаткування, доцільного для кожного конкретного виробництва.

Аналіз останніх досліджень. При виборі автоматичних ліній розливу чи не найголовнішими критеріями є їх надійність, висока продуктивність і доступна ціна. Серед провідних фірм, що мають багаторічний досвід у випуску обладнання для розливу харчових продуктів і входять до сфери діяльності Міністерства промислової політики України, слід виділити ТОВ НПО "Укрхімпроммаш", м. Мелітополь, Запорізької області, – обладнання для розливу та пакування різноманітних харчових рідин (лікєро-горілочаних, шампанського, винопродукції, пиво-безалкогольних, молочних, соків, сиропів, оцту). За надійністю і продуктивністю ці вітчизняні лінії не поступаються закордонним аналогам і водночас значно дешевші [1, 2].

В останні десять років до розв'язання проблем харчової

промисловості підключилися підприємства ВПК по лінії конверсії, які, маючи потужну технічну та виробничу базу, у стислий термін налагодили виробництво обладнання для харчової та переробної промисловості, яке раніше в Україні не виробляли і завозили як імпорт. Серед флагманів вітчизняної індустрії, які випускають окремі види обладнання цього напрямку, слід виділити такі: ВАТ "НВО Етал", м. Олександрія, Кіровоградської обл., – автомати фасування харчових продуктів та багато інших підприємств [3].

Поряд з перерахованими підприємствами слід звернути особливу увагу на велику кількість малих підприємств з недержавною формою власності. Це різноманітні малі колективні, приватні і спільні підприємства, товариства з обмеженою відповідальністю, фірми, тощо, які здійснюють свою діяльність на основі приватного, колективного чи закордонного капіталу. Такі підприємства у стислий термін адаптувалися у ринковому середовищі України, оперативно реагують на зміни вимог ринку і здебільшого випускають продукцію на потрібному рівні. Серед таких малих підприємств слід відзначити: ВК "Надія", м. Черкаси, – фасувально-пакувальне обладнання, етикетувальні машини, лінії виробництва морозива; МП "Ковчег", м. Київ, – термопакувальне обладнання; ЗАТ "Ранок-92", м. Київ, – міні-пивзаводи; НВП "Інтермаш", м. Київ, – фасувально-пакувальне обладнання; ТОВ "Ело Пак", м. Київ, – фасувально-пакувальне обладнання, обладнання для вакуумної та газової упаковки, тощо. Випуском нового обладнання для харчової, переробної промисловості займається ряд підприємств, серед них: ТОВ НПО "Укрхімпроммаш", фірма "Украгропак", "ВНДХімпроект", тощо.

Постановка завдання. Метою статті є визначення рівняння, яке описує процес розливу, враховуючи взаємозв'язок умов течії газу і рідини і їх фізичні властивості.

Основна частина. Об'єктом дослідження є технологічна операція розливу освітленого яблучного соку в споживчу тару.

Предметом дослідження є технологічні, конструктивні та кінематичні параметри пристрою для розливу освітленого яблучного соку до зазначеного рівня у взаємозв'язку з показниками продуктивності та точності процесу розливу.

Автомат для розливу є складною машиною, як правило, роторного типу, який включає у себе ряд операцій, які визначають робочий цикл автомата. Повний цикл включає у себе подачу та знімання одиниці тари з каруселі автомата, її піднімання та опускання, відкриття та закриття клапанів, у деяких випадках евакуацію повітря, що знаходиться у банці, і створення протитиску, а також вистоювання наповнених одиниць та перед цим їх заповнення. Продуктивність машини для розливу можна виразити в залежності від часу, який витрачається для наповнення банки [1, 4, 5]:

$$\Pi = \frac{I}{\tau_n} \cdot \frac{S_n}{S} \cdot m, \quad (1)$$

де τ_n – час наповнення банки рідиною, с;

S_n, S – відповідно довжина кругового шляху, на якому виконується операція наповнення, та довжина кола каруселі, м;

m – кількість розливних механізмів, шт.

Підвищення продуктивності машини для розливу харчових рідин простим збільшенням кількості розливних механізмів m не дозволяє отримати максимальну ефективність, оскільки в цьому разі збільшуються маса машини, габаритні розміри та її енергоспоживання. Тому у збільшенні продуктивності інтенсивним методом, без збільшення кількості механізмів для розливу, криються можливості значного підвищення ефективності виробництва. Нами пропонується інший шлях – зменшення часу, який витрачається на наповнення одиниці тари τ_n .

Для визначення основних теоретичних передумов і опису теорії процесу розливу на пристрої для розливу звернемося до опису сутності процесу, а для кращого розуміння проілюструємо його. На рис. 1 представлена розрахункова схема пристрою для розливу харчової рідини до зазначеного рівня.

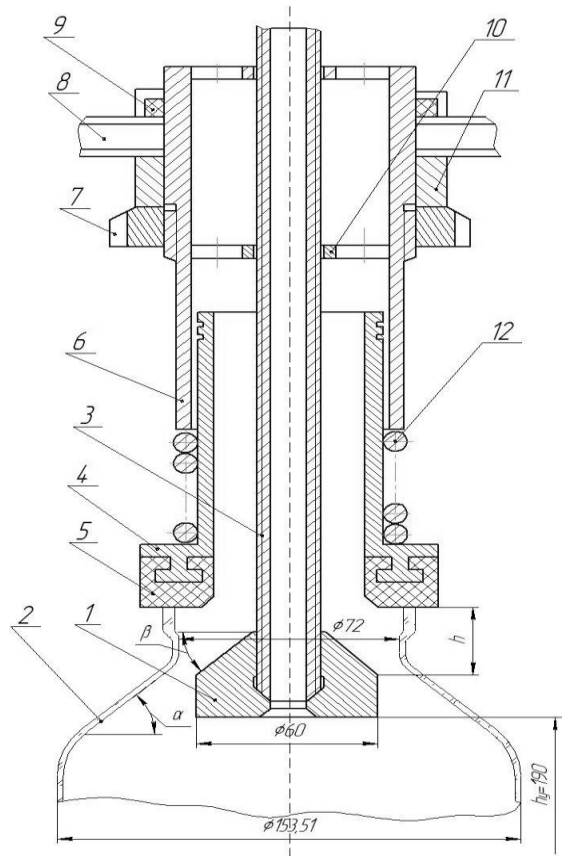
Пристрій для розливу рідини містить встановлену в дно витратного резервуара 8 гільзу 6 з підпружиненим патроном 4 і ущільнюючою манжетою 5, в патроні 4 встановлено повітряну трубку 3 з направляючою 1. Пристрій для розливу рідини працює таким чином: горловина банки щільно притискається до ущільнюючої манжети 5, при подальшому натисканні ущільнююча манжета 5 разом з підпружиненим патроном 4 піднімається до утворення між направляючою 1 і ущільнюючою манжетою 5 зазору, через який рідина попадає в банку.

Повітря, що знаходиться у банці, і піна рідини, що утворюється, через повітряну трубку 3 надходить у розливальний резервуар 8.

Банка наповнюється рідиною до визначеного рівня. Столик з банкою повертається у граничне положення, а ущільнююча манжета 5 разом з підпружиненим патроном 4 опускає банку, і зазор перекривається.

При розливі до зазначеного рівня рідина, після відкриття зливного клапана, надходить у банку і витискає з неї газ до того часу, поки рівень рідини в останній не досягне вхідного отвору повітряної трубки; рідина закриє отвір і газ перестане виходити з банки.

Доза рідини, залитої у банку, визначається глибиною занурення вхідного отвору повітряної трубки, що відводить газ із банки, одночасно повітряна трубка грає роль, по суті, дозуючого пристрою.



1 – направляюча, 2 – банка, 3 – повітряна трубка, 4 – патрон, 5 – ущільнююча манжета, 6 – гільза, 7 – гайка, 8 – дно резервуару, 9 – ущільнення, 10 – втулка, 11 – вставка, 12 – пружина.

Рис. 1. Розрахункова схема пристрою для розливу харчової рідини до зазначеного рівня.

У початковий момент часу банка з внутрішнім об'ємом W заповнена газом повністю. Пристрій для розливу має роздільні канали для рідини і газу. Після відкриття зливного каналу рідина тече через зливний насадок у кільцевому проміжку між внутрішньою поверхнею зливного насадка і зовнішньою поверхнею трубки, що відводить газ, а потім потік, що направляєється на стінки банки у вигляді шатра, стікає по них тонкою плівкою, внаслідок чого об'єм рідини в банці збільшується від нуля до W_p . Рідина, що надходить у банку, витісняє з неї газ по газовідвідній трубці і об'єм газу змінюється від W до W_Γ .

З урахуванням незмінності об'єму банки можна записати:

$$W = W_p + W_\Gamma, \quad \frac{dW_\Gamma}{dt} + \frac{dW_p}{dt} = 0, \quad \frac{dW_p}{dt} = -\frac{dW_\Gamma}{dt}, \quad (2)$$

При розливі до зазначеного рівня спостерігається режим витікання, що встановився, оскільки в межах практично усього часу розливу тиск над рідиною у резервуарі і натиск підтримуються постійними.

Також постійним є і тиск в банці. За даними Брандона Х. [6], за вказаних умов розливу впродовж 95 – 97% часу в банці підтримується постійний тиск і тільки впродовж початкової і завершальної фаз наповнення (3 – 5% часу) воно несуттєво відрізняється від номінального.

Найбільш поширеними є гравітаційні методи розливу при рівності тисків у витратному резервуарі і банці. Визначимо рушійні сили при розливі рідин гравітаційним методом.

Практично при будь-якому методі розливу рідина тече в тару під дією двох основних рушійних сил:

- висоти стовпа рідини над зливним отвором насадка розливного пристрою H ;

- різниці тисків у витратному резервуарі і банці $\Delta p_o = p_1 - p_2$.

де $\frac{dW_P}{dt}$ – витрата рідини, що поступає на дозування Q_P ;

$\frac{dW_G}{dt}$ – витрата газу Q_G , що витісняється.

У загальному вигляді витрату рідини можна визначити з рівняння:

$$\frac{dW_P}{dt} = \mu_P \cdot S_P \sqrt{\frac{2(\Delta p_1 + p_1 - p_2)}{\rho_P}}, \quad (3)$$

де Δp_1 – перепад тиску між вільною поверхнею рідини в пристрої для розливу і вихідним перерізом зливного насадка $\Delta p_1 = \rho_P \cdot g \cdot H$.

Тоді, з урахуванням рушійних чинників, у загальному вигляді рівняння витрати рідини можна записати [7, 8, 9]:

$$Q = \mu_P \cdot S_P \frac{52}{\sqrt{2g \left(H + \frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} \right)}}, \quad (4)$$

або

$$Q = \mu_P \cdot S_P \sqrt{2g \left(H - \frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} \right)},$$

де μ_P – коефіцієнт витрати зливного насадка;

S_P – ефективна площа поперечного перетину вихідного отвору насадка, м²;

H – висота стовпа рідини в пристрої для розливу, м;

p_1 – тиск на вільній поверхні рідини у резервуарі, Па;

p_2 – тиск у банці, в яку відбувається витікання, Па.

Якби газ, що витісняється з банки, мав вільний вихід, то одного б рівняння було досить для опису процесу і визначення витрати рідини при розливі, але при течії по повітряній трубці газу, що відводиться, газ зустрічає в ній певні гідравлічні опори. Газ тече в атмосферу або в простір над рідиною витратного резервуару під дією різниці тисків ($p_2 - p_1$). Таким чином, для рідини різниця тисків гратиме роль гальмівного чинника, що знижує витрату, а для газу – рушійного.

Витікання газу, що витісняється, розглядаючи його як ідеальний, можна описати за допомогою рівняння Сен-Венана-Ванцеля [10]:

$$V = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \cdot \frac{\rho_1}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} \right]}, \quad (5)$$

де p_2 – тиск у резервуарі, з якого виходить витікання, Па;
 p_1 – тиск у середовищі, куди відбувається витікання, Па;
 ρ_0 – щільність газу в резервуарі, кг/м³;
 k – показник адіабати.

Але за певних умов швидкість витікання газу можна розраховувати, як швидкість витікання краплинної рідини

$$V = \sqrt{2(p_2 - p_1) / \rho_0}, \quad (6)$$

Такий вид запису справедливий при малих перепадах тисків [10], а також, коли відношення $V/2C_I$ значно менше одиниці або швидкість течії газу не перевищує 0,2 м/с [11]. Швидкість поширення звуку в повітрі $C_I=340$ м/с, у вуглекислому газі C_I близько 260 м/с. У випадку, що розглядається, швидкість течії газу не перевищує $V=30$ м/с, що менше за допустиму, а відношення $V/2C_I$ не перевищує 0,076. Таким чином, запис у вигляді (6) справедливий, а щільність газу можна вважати постійною.

Витрата газу, що витісняється з банки по трубці, що відводить газ, можна визначити за залежністю:

$$Q_G = \mu_G \cdot S_G \sqrt{2g \frac{p_2 - p_1}{\rho_G \cdot g}}, \quad (7)$$

де S_G – ефективна площа поперечного перерізу каналу повітряної трубки, що відводить газ, м²;

μ_G – коефіцієнт витрати газового каналу, що відводить газ;

ρ_G – щільність газу, кг/м³.

Виходячи з умови нестискання газу, можна припустити з достатньою мірою точності, що об'ємні витрати рідини і газу рівні.

Критерієм оцінки інтенсивності процесу розливу можна вважати такий комплекс гідравлічних і геометричних параметрів розливних пристроїв, при якому забезпечується максимальна витрата рідини. Відповідно, можна зробити висновок, що найбільша ефективність методу розливу, з точки зору забезпечення максимальної швидкості заповнення пляшки, може бути досягнута при певних співвідношеннях перерахованих параметрів.

Зв'язавши процес протікання рідини і газу граничними умовами, отримаємо систему рівнянь, що описують процес у цілому і з неї визначимо загальне рівняння процесу. При цьому необхідно врахувати коефіцієнти витрати рідинного і газового каналів, їх конструктивні розміри, рушійні сили процесу, а також фізичні властивості рідин і газу.

Опис загальної моделі процесу розливу можна представити у вигляді наступної системи рівнянь :

$$\left. \begin{aligned}
 Q_P &= Q_\Gamma, \quad \frac{dW_P}{dt} = -\frac{dW_\Gamma}{dt}, \quad W = W_P + W_\Gamma, \\
 Q_P &= \mu_P \cdot S_P \sqrt{2g \left(H - \frac{p_2 - p_1}{\rho_P \cdot g} \right)}, \\
 Q_\Gamma &= \mu_\Gamma \cdot S_\Gamma \sqrt{2g \frac{p_2 - p_1}{\rho_\Gamma \cdot g}},
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Вихідний отвір зливного насадка розташовується на сполученні з отвором шийки банки, діаметр якої регламентований ГОСТ 5717.2–2003 "Банки стеклянные для консервов. Основные параметры и размеры" залежно від типу банки. Отже, діаметр зливного насадка також можна вважати регламентованим, оскільки у разі істотного відхилення його від діаметра шийки банки неминуче виникнуть додаткові місцеві гідравлічні опори в результаті звуження або розширення струменя рідини. При пошуку умов заповнення, що забезпечать максимальну витрату, можна варіювати діаметрами повітряної трубки, зовнішнім діаметром та внутрішнім каналом. У цьому випадку змінюватимуться умови течії газу і рідини, які взаємозв'язані.

Виходячи з цього, можна зробити припущення про існування визначеного співвідношення площ перерізів каналів для рідини і газу, при якому витрата рідини буде максимальною. Таке співвідношення назовемо гідравлічно найвигідним.

Першим кроком визначення гідравлічно найвигідного співвідношення було знаходження рівняння, що описує процес розливу в цілому. Зовнішній контур вихідного отвору зливного тракту обмежений внутрішнім діаметром шийки банки, а внутрішній – зовнішнім діаметром повітряної трубки для відведення газу (рис. 1). Збільшення площі перерізу зливного тракту можливо лише за рахунок зменшення загальної і ефективної площі перерізу трубки, що відводить газ. Проте, при збільшенні площі перерізу зливного тракту $S_{ж}$, збільшення витрати може не статися через підвищення тиску у порожнині пляшки p_2 внаслідок зменшення ефективної площі каналу повітряної трубки для відведення газу S_Γ , оскільки загальна площа, що зайнята зливним і газовим трактами, постійна. При зменшенні площі відвідного газового каналу вихід газу буде ускладнений. Підвищення тиску газу в пляшці p_2 (при постійних p_1 і H), призводить до зниження ефективного тиску $H_E = H - \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g}$, який визначає величину витрати рідини.

Збільшення площі перерізу газового відвідного каналу S_Γ , відповідно приведе до зменшення ефективної площі перерізу зливного тракту S_P , що також веде до зниження витрати рідини. Отже, потрібно

шукати таке співвідношення площ перерізу трактів, при якому і газ буде витіснятися без особливих перешкод, і рідина поступатиме в банку вільно. Це співвідношення буде цілком визначеним для розливного обладнання при розливі групи рідин з близькими фізичними властивостями (щільність, в'язкість).

Уведемо деякі допущення:

- рідини, для яких розглядається процес, можна з достатньою мірою точності віднести до ньютонівських, що справедливо для соків, ликеро-горілчанних виробів, коньяків, тихих вин, пива, тощо;

- процес вважатимемо ізотермічним, оскільки процес розливу короткочасний, а перед розливом рідини витримуються при температурах гарячого розливу;

- газ, що виходить з пляшки, вважатимемо однофазною системою, без часток рідини.

Позначимо співвідношення площ перерізу трактів через

$$\alpha = \frac{S_P}{S_G}, \quad (9)$$

де S_P – площа поперечного перерізу вихідного отвору зливного тракту, яка є площею кільця із зовнішнім діаметром, рівним діаметру шийки банки, і внутрішнім діаметром, рівним зовнішньому діаметру трубки, що відводить газ, м^2 ;

S_G – площа перерізу відвідного каналу трубки, що відводить газ, м^2 .

Постійність сумарної ефективної площі $S = S_P + S_G$, підтверджується розрахунком при товщині стінки трубки 1 мм.

Виходячи з $\alpha = \frac{S_P}{S_G}$, отримаємо співвідношення між ефективною

площею S і площами S_P і S_G .

$$S_P = \frac{\alpha}{\alpha + 1} \cdot S, \quad S_G = \frac{1}{\alpha + 1} \cdot S, \quad (10)$$

Розглянемо рівняння (4) і (7) у взаємному зв'язку і вирішимо їх спільно, вивівши рівняння, що описує процес розливу в цілому. Вказані рівняння можна розглядати як спрощену модель течії у каналах пристрою для розливу.

Визначимо витрату, як функцію від α і максималізуємо цю функцію.

Розділивши вираз (4) на (7) і звівши отриманий вираз в квадрат, отримаємо з урахуванням рівності об'ємних витрат:

$$I = \left(\frac{\mu_P}{\mu_G} \right)^2 \cdot \left(\frac{S_P}{S_G} \right)^2 \cdot \frac{2g \cdot \left[H - \frac{(p_2 - p_1)}{\rho \cdot g} \right]}{2g \cdot \left[\frac{(p_2 - p_1)}{\rho_G \cdot g} \right]}, \quad (11)$$

Для спрощення перетворень уведемо додатково позначення $\phi = \frac{\mu_P}{\mu_G}$, і $\beta = \frac{\rho}{\rho_G}$, і перетворимо (10) до виду, що виражає різницю тисків

$$I = \phi^2 \cdot \alpha^2 \cdot \frac{\rho g \cdot H - (p_2 - p_1)}{(p_2 - p_1) \cdot \beta},$$

$$(p_2 - p_1) \cdot \beta = \phi^2 \alpha^2 \cdot \rho g H - \phi^2 \alpha^2 \cdot (p_2 - p_1), \quad (12)$$

$$(p_2 - p_1) = \frac{\phi^2 \alpha^2 \cdot \rho g H}{\beta + \phi^2 \alpha^2}$$

Підставивши (12) в рівняння витрати рідини (4), отримаємо [12, 13]

$$Q = \mu_P \cdot S \frac{\alpha}{\alpha + 1} \sqrt{\frac{\beta}{\beta + \phi^2 \alpha^2}} \sqrt{2gH}, \quad (13)$$

Це рівняння описує процес розливу, враховуючи взаємозв'язок умов течії газу і рідини і їх фізичні властивості. Таким чином, його можна розглядати як загальне рівняння процесу гравітаційного розливу.

Література:

1. *Зайчик, Ц.Р.* Упаковывание тихих напитков в бутылки / Ц.Р. Зайчик, В.А. Трунов – М.: ДеЛи, 2000. – 206 с.
2. *Фан-Юнг, А.Ф.* Технология консервирования плодов и овощей / А.Ф. Фан-Юнг, Б.Л. Флауменбаум – М.: Пищепромиздат, 1961. – 326 с.
3. *Войтовский, В.А.* Реестр отечественных производителей / В.А. Войтовский, Я.И. Пыжинский / ОАО "Мелитопольпродмаш" // Мир упаковки. – 2002. – № 1. – С. 208 – 23.
4. *Костин, В.А.* Интенсификация течений в насадках при наложении низкочастотных звуковых колебаний / В.А. Костин, В.С. Кочетов, В.П. Глушков // Электрофизические методы обработки пищевых продуктов: тез. докл. V Всесоюзн.науч.-техн.конф. – М. – 1985. – С.379 – 380.
5. *Шувалов, В.Н.* Машины – автоматы и поточные линии. Теория конструирования, эксплуатация. / В.Н. Шувалов [2-е изд. перераб. и доп.]. – Л.: Машиностроение, 1973. – 483 с.
6. *Brandon, H.* Fluid flow analysis for soft drink filling valves / H. Brandon // Beverage Industry. – 1981. – Vol.71. – 22. – P. 132–138.

7. Рауз, Х. Механика жидкости для инженеров – гидротехников. / Х. Рауз – М. – Л.: Госэнэргоиздат, 1957. – 137 с.
8. Рейлер, М. Деформация и течение. / М. Рейлер – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 198 с.
9. Скобельцин, Ю.А. Истечение жидкостей через насадки, отверстия, распылители, водовыпуски, капельницы: Учебное пособие / Ю.А. Скобельцин // Кубанский с-х. ин-т. – Краснодар, 1989. – 120 с.
10. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселёв – М.: Стройиздат, 1965. – 276 с.
11. Логинов, А.В. Определение гидравлических сопротивлений труднодоступных каналов сложной формы из опытных данных по масоотдаче / А.В. Логинов, И.А. Чередник // Сб. науч. трудов. Воронежская государственная технологическая академия. – 2001. – № 11. – С. 79–80.
12. Костин, В.А. Интенсивный способ увеличения производительности автоматов розлива пищевых жидкостей. / В.А. Костин, В.С. Кочетов // Научные достижения молодых ученых-сельскохозяйственному производству: тез. докл. науч.-практ. конфер. молодых ученых. – Ставрополь. – 1985. – С. 125.
13. Кочетов, В.С. Интенсификация течений в каналах разливающих автоматов. / В.С. Кочетов, В.А. Костин // Изв. Сев.-Кавк. науч. центра высш. шк. Техн.науки. – Ставрополь. – 1983.– № 3. – С.43 – 44.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ БАНКИ ПРИ ГРАВИТАЦИОННОМ МЕТОДЕ РАЗЛИВА ДО УКАЗАНОВОГО УРОВНЯ

Змеева И.М., Бондаренко О.В.

Аннотация – Работа посвящена моделированию процесса заполнения банки при гравитационном методе разлива до указанного уровня.

THE MODELING OF THE PROCESS OF FILLING THE BOTTLE WITH THE GRAVITY FILLING METHOD TO THE SPECIFIED LEVEL

I. Zmeyeva, O. Bondarenko

Summary

The work is devoted to the modeling of the process of filling the bottle with the gravity filling method to the specified level.