22900 – 27170 кДж/м$^3$[5]. Використання суміші органічних речовин дозволяє одержувати більше біогазу, ніж з одного виду сировини. Тому як сировину також вигідно використовувати відходи цукрових заводів, до складу яких зокрема входять сірковмісні речовини.

З викладеного витікає те, що для того щоб створити виробництво біогазу потрібно: ємності сировини, транспортер, метанатор, насоси для завантаження сировини, газгольдер, теплообмінник для підігрівання, сепаратор для відділення води, компресор, балони для газу чи водогрійний котел чи двигун-генератор, абсорбер сірководню (для сірковмісної сировини), бак для осаду, труби металеві чи з пластику або резини, теплоізоляція, прилади для контролю тиску, температури, об'єму газу та концентрації метану, сірководню, вологи. Приміщення каркасного типу для розміщення обладнання. Залежно від продуктивності і призначення біогазу комплектність установки може бути відкорегована.

**Висновки:** 1. Розглянута технологія одержання біогазу з відходів тваринництва та органічної сировини і показано, що в залежності від сировини, крім метану, в ньому присутні діоксид вуглецю, волога, а в деяких випадках і сірководень. 2. Запропонована технологічна схема одержання біогазу, яка може бути використана як промисловими потужними, так і мілкими приватними підприємствами. 3. Приведено характеристику основного обладнання - метанатору та умови, при яких в ньому утворюється біогаз з концентрацією метану 55-75 % об. та 25-45 % об. діоксиду вуглецю.

4. Показано, що біогаз може бути використаний не тільки для одержання тепла, але й електричної енергії, що значно підвищує коефіцієнт корисної дії.

5. Надано перелік засобів контролю, які необхідні для здійснення технологічного процесу в оптимальному режимі.

**Список літератури:** **1.** А. П. Мельник, Я. И. Сенишин. Перспективи одержання похідних вуглеводнів і паливного газу з вітчизняної сировини// Питання розвитку газової промисловості України.- Х.:УкрНДІгаз, 2007.- В 35.-С. 81-86. **2.** P. C. Gilcrease, G. W. Shur. Биогенный метан – энергоресурс будущего// Нефтегазовые технологии. -2008. -№3.-С.16-19. **2.** Експлуатаційникові газонафтового комплексу. Довідник//В.В.Розгонюк, Л.А.Хачикян, М.А.Григіль. – Київ: Росток, 1998.-408 с. **3.** А. Кулик. Биогаз: топливо будущего// Нефть и газ.- 2008.- №1.-С. 62-76. **4.** А. К. Карапетьянц. Термодинамические величины неорганических и органических соединений. Справочник. М.: Химия, 1981.- 580 с.

*Поступила до редколегії 29.10.2009*

**УДК 504.064.4**

***О. В. ШЕСТОПАЛОВ,*** аспірант, НТУ «ХПІ»
***М. А. ЦЕЙТЛІН,*** доктор техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»
***В. Ф. РАЙКО,*** канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОСІДАННЯ ТВЕРДОЇ ФАЗИ В СОЛЯНІЙ КАМЕРІ ПІД ЧАС ЗАКЛАДКИ ЇЇ ВІДХОДАМИ

Наведені загальні закономірності процесів, які відбуваються в підземній камері вилуговування під час її закладки шламом. Визначено оптимальну глибина розташування

шламоподаючої колони, при якій забезпечується вільне осідання шламу та освітлення розсолу без ризику його забруднення твердою фазою відходів.
Ключові слова: підземна соляна камера, тверда фаза, розсіл.

General regularities of the processes, occurring in underground salt camera during bookmark its by wastes are brought. It is determined optimum depth of the location pillars, under which is provided free settle pulp and clearing brine without risk of its contamination by hard phase departure.
Key words: underground salt cavity, hard phase, brine.

## 1. Вступ

Найбільш шкідливим і об'ємним відходом виробництва кальцинованої соди аміачним способом є дистилерна суспензія, що утворюється в кількості 8-10 м$^3$ на 1 т соди [1].

Наразі відходи содового виробництва повністю скидаються в шламонакопичувачі (так звані "білі моря"), що займають сотні гектарів земельних угідь і вимагають для свого будівництва і експлуатації дуже великих капітальних витрат.

Складування в наземних полігонах і скидання рідких відходів в підземні водоносні горизонти не вирішує проблеми і приводить до ще більшого порушення екологічної рівноваги.

В зв'язку з цим, перспективним є використання підземних порожнин задля вирішення проблеми накопичування відходів содового виробництва внаслідок їх використання в якості тампонажного матеріалу, що, в свою чергу, сприятиме підвищенню стійкості земної поверхні. На підставі цього, авторами був розроблений і запатентований спосіб закладки твердих відходів содового виробництва у соляних камерах [2]. Але при закладці відходів по запропонованому способу існує вірогідність підсосу твердих часок шламу із зони осадконакопичення в зону забору освітленого розсолу. Для того, щоб запобігти цьому небажаному явищу, рекомендується розташовувати розсолозаборну і шламоподаючу колони на певній висоті від дна камери. Ця висота залежить від властивостей шламової суспензії, а також геометричних параметрів соляної камери. Визначення оптимальної висоти розташування шламопадаючої та розсолозаборної колон для заданих параметрів камери можливо лише шляхом вирішення осесеметричної задачи осадження шламових відходів у підземній камері із застосуванням методів математичного моделювання процесу.

## 2. Постановка задачі

Маємо циліндричну камеру радіусом $R$ та висотою $H$, що заповнена повністю насиченим розчином солі щільністю $\rho_1$ в спочатку нерухомому стані. У камеру опущені дві труби – одна, що подає відходи (довжина від верху камери $l_1$, діаметр труби $d_1$) та друга, що відкачує розчин (довжина від верху камери $l_2$, діаметр труби $d_2$).

У нагнітаючу трубу, зі швидкістю $V_1$ м$^3$/с подаються шламові відходи щільністю $\rho_2$. Відходи складаються з насиченого розчину солі та нерозчинних твердих частинок щільністю $\rho_3$ з початковою концентрацією $c_1$.

Під дією сили тяжіння тверді частинки опускаються вниз та під дією сил дифузії поширюються горизонтально. З розсолозаборної труби відбирається рідина зі швидкістю $V_2$ м$^3$/с.

Розглянемо рідину, що складається з розчину солі й твердих частинок. Дослідимо рух цієї двофазної рідини.

Запишемо основні рівняння руху. Позначимо через $\rho$ повну щільність рідини, через $c$ – концентрацію твердих частинок в рідині. При цьому

$$\rho = \rho_3 c + \rho_1 (1 - c) \qquad (1)$$

Позначимо через $\mathbf{v}$ вектор швидкості функції. Тоді умова безперервності рідини дає рівняння:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{v} = 0 . \qquad (2)$$

Запишемо рівняння Нав'є-Стокса для в'язкої рідини [3, 4]:

$$\rho \left[ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\operatorname{grad} p + \eta \Delta \mathbf{v} + \boldsymbol{\gamma} , \qquad (3)$$

де $p$ – тиск у рідині, $\eta$ – коефіцієнт динамічної в'язкості, що залежить від концентрації твердих частинок, $\gamma$ – вектор масових сил, що описує гравітаційний вплив.

Оскільки в камері концентрація твердих частинок неоднакова, то в системі буде відбуватися дифузійний масопереніс, що описується рівнянням дифузії у вигляді [4, 5]:

$$\rho \left[ \frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla c \right] = \rho D \Delta c + f \qquad (4)$$

де $D$ – коефіцієнт дифузії, $f$ – функція, що описує джерела речовини (у розглянутій задачі це подача розчину в камеру і відбір з камери).

Одержали систему 6-ти диференціальних рівнянь в частинних похідних (1) - (4) для 6-и невідомих - векторної величини $\mathbf{v}$ та 3-х скалярних величин $\rho$, $c$, $p$.

Оскільки в силу геометрії камери задача має осесиметричний характер, введемо циліндричну систему координат $(r, \varphi, z)$, причому в даній задачі всі величини не залежать від координати $\varphi$. Розмістимо вісь $z$ вздовж осі камери, направивши її вниз. Центр координат розмістимо зверху камери. Запишемо отриману систему рівнянь для введеної циліндричної системи координат, враховуючи, що всі похідні по координаті $\varphi$ дорівнюють 0.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \mathbf{v}_r)}{\partial r} + \frac{\partial \mathbf{v}_z}{\partial z} = 0 \text{ – рівняння безперервності,} \qquad (5)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial \mathbf{v}_r}{\partial t} + \mathbf{v}_r \frac{\partial \mathbf{v}_r}{\partial r} + \mathbf{v}_z \frac{\partial \mathbf{v}_r}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial r} + \eta \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \mathbf{v}_r}{\partial r} \right) - \frac{\mathbf{v}_r}{r^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{v}_r}{\partial z^2} \right), -$$

рівняння Нав’є-Стокса, (6)

$$\rho \left[ \frac{\partial \mathbf{v}_z}{\partial t} + \mathbf{v}_r \frac{\partial \mathbf{v}_z}{\partial r} + \mathbf{v}_z \frac{\partial \mathbf{v}_z}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \mathbf{v}_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \mathbf{v}_z}{\partial z^2} \right) + \rho g ,$$

$$\rho\left[\frac{\partial c}{\partial t}+\mathbf{v}_r\frac{\partial c}{\partial r}+\mathbf{v}_z\frac{\partial c}{\partial z}\right]=$$
$$=\rho D\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial c}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 c}{\partial z^2}\right)+f(r,z)$$
– рівняння дифузії. (7)

Граничними умовами є:

1) умови рівності нулю швидкості рідини на стінках камери:

$$\mathbf{v}\big|_{r=R}=0,\mathbf{v}\big|_{z=H}=0,\mathbf{v}\big|_{z=0}=0; \quad (8)$$

2) умови рівності нулю градієнта концентрації по нормалі до стінки:

$$\left.\frac{\partial c}{\partial r}\right|_{r=R}=0,\left.\frac{\partial c}{\partial z}\right|_{z=H}=\left.\frac{\partial c}{\partial z}\right|_{z=0}=0; \quad (9)$$

Початкові умови приймають вигляд:

1) рівність 0 швидкості точок рідини:

$$\mathbf{v}\big|_{t=0}=0; \quad (10)$$

2) рівність концентрації твердих частинок в рідині 0:

$$c\big|_{t=0}=0; \quad (11)$$

3) тиск в рідині розподілено гідростатично:

$$p=\rho gz. \quad (12)$$

Таким чином, маємо систему рівнянь (1), (5)-(7) з граничними умовами (8)-(9) і початковими умовами (10)-(12). Для замикання системи залишилося визначити функцію *f*, що описує джерела речовини. Оскільки труба, що подає, знаходиться на позначці $z=l_1$, то вона дає потік речовини, що описується дельта-функцією $\rho_2 V_1\delta(r-0)\delta(z-l_1)$.

Аналогічно труба, що відбирає, дає потік речовини $-\rho V_2\delta(r-0)\delta(z-l_2)$.

В'язкість рідини буде істотно залежати від концентрації твердих частинок. Приймемо цю залежність у вигляді [5]

$$\eta=\eta_0\left[1+0.75\frac{c}{1-c}\right]^2, \quad (13)$$

де $\eta_0$ - в'язкість насиченого солоного розчину. Таким чином, в'язкість у твердій фракції відходів вважається нескінченно великою.

Отримана система рівнянь є системою нелінійних рівнянь другого порядку в частинних похідних. Її розв’язок аналітичним способом не представляється можливим. Тому в роботі була реалізована схема чисельного розв’язку даної системи за допомогою сіткових методів. Наведемо тут короткий опис застосованої методики.

**3. Вирішення задачі**

Введемо просторову сітку $(r_k,z_m),k=0..K,m=0..M$

та часову сітку $t_n,n=0..N$.

При цьому крок сітки по змінною $r$ дорівнює $\Delta r = \dfrac{R}{K}$, початкове значення $r_0$=0; крок сітки за змінною $z$ дорівнює $\Delta z = \dfrac{H}{M}$, початкове значення $z_0$=0; крок сітки за змінною $t$ дорівнює $\Delta t = \dfrac{T}{N}$, початкове значення $t_0$=0.

Тут $T$ - час розрахунку, достатньо великий для виходу системи на стаціонарний режим роботи.

Розглянемо шукані величини в точках сітки – $c_{km}^n$, $\rho_{km}^n$, $v_{rkm}^n$, $v_{zkm}^n$, $p_{km}^n$. Похідні в рівняннях (5)-(7) замінимо їх кінцевими різницями. Тоді отримаємо таку систему рівнянь:

$$\frac{\rho_{km}^{n+1}-\rho_{km}^n}{\Delta t}+\frac{1}{r_k}\left(\mathbf{v}_{rkm}^n + r_k\frac{\mathbf{v}_{rk+1,m}^n-\mathbf{v}_{rkm}^n}{\Delta r}\right)+\frac{\mathbf{v}_{zk,m+1}^n-\mathbf{v}_{zkm}^n}{\Delta z}=0,$$

$$\rho_{km}^n\left[\frac{\mathbf{v}_{rkm}^{n+1}-\mathbf{v}_{rkm}^n}{\Delta t}+\mathbf{v}_{rkm}^n\frac{\mathbf{v}_{rk+1,m}^n-\mathbf{v}_{rkm}^n}{\Delta r}+\mathbf{v}_{zkm}^n\frac{\mathbf{v}_{rk,m+1}^n-\mathbf{v}_{rkm}^n}{\Delta z}\right]=-\frac{p_{k+1,m}^n-p_{km}^n}{\Delta r}+$$

$$+\eta_{km}^n\left(\frac{1}{r_k}\left(\frac{\mathbf{v}_{rk+1,m}^n-\mathbf{v}_{rkm}^n}{\Delta r}+r_k\frac{\mathbf{v}_{rk+2,m}^n-\mathbf{v}_{rk+1,m}^n+\mathbf{v}_{rkm}^n}{(\Delta r)^2}\right)-\frac{\mathbf{v}_{rkm}^n}{r_k^2}+\frac{\mathbf{v}_{rkm+2}^n-\mathbf{v}_{rkm+1}^n+\mathbf{v}_{rkm}^n}{(\Delta z)^2}\right),$$

$$\rho_{km}^n\left[\frac{\mathbf{v}_{zkm}^{n+1}-\mathbf{v}_{zkm}^n}{\Delta t}+\mathbf{v}_{rkm}^n\frac{\mathbf{v}_{zk+1,m}^n-\mathbf{v}_{zkm}^n}{\Delta r}+\mathbf{v}_{zkm}^n\frac{\mathbf{v}_{zk,m+1}^n-\mathbf{v}_{zkm}^n}{\Delta z}\mathbf{v}_z\right]=-\frac{p_{km+1}^n-p_{km}^n}{\Delta z}+$$

$$+\eta_{km}^n\left(\frac{1}{r_k}\left(\frac{\mathbf{v}_{zk+1,m}^n-\mathbf{v}_{zkm}^n}{\Delta r}+r_k\frac{\mathbf{v}_{zk+2,m}^n-\mathbf{v}_{zk+1,m}^n+\mathbf{v}_{zkm}^n}{(\Delta r)^2}\right)+\frac{\mathbf{v}_{zkm+2}^n-\mathbf{v}_{zkm+1}^n+\mathbf{v}_{zkm}^n}{(\Delta z)^2}\right)+\rho_{km}^n g,$$

$$\rho_{km}^n\left[\frac{c_{km}^{n+1}-c_{km}^n}{\Delta t}+\mathbf{v}_{rkm}^n\frac{c_{k+1,m}^n-c_{km}^n}{\Delta r}+\mathbf{v}_{zkm}^n\frac{c_{km+1}^n-c_{km}^n}{\Delta z}\right]=$$

$$=\rho_{km}^n D\left(\frac{1}{r_k}\left(\frac{c_{k+1,m}^n-c_{km}^n}{\Delta r}+r_k\frac{c_{k+2,m}^n-c_{k+1,m}^n+c_{km}^n}{(\Delta r)^2}\right)+\frac{c_{km+2}^n-c_{km+1}^n+c_{km}^n}{(\Delta z)^2}\right)+f(r_k,z_m).$$

Дана система являє собою явну схему різницевого методу, що дозволяє на кожному кроці за часом обчислювати значення невідомих величин на наступному часовому шарі через значення, отримані для поточного шару. Початкові значення величин визначаються початковими умовами:

$$\mathbf{v}_{rkm}^0=\mathbf{v}_{zkm}^0=0,\ c_{km}^0=0,\ p_{km}^0=\rho_{km}^0 g z_m,\ \rho_{km}^0=\rho_3.$$

Граничні умови (8)-(9) призводять до умов:

$$\mathbf{v}_{rKm}^n=\mathbf{v}_{zKm}^n=0, \mathbf{v}_{rk0}^n=\mathbf{v}_{zk0}^n=0, \mathbf{v}_{rkM}^n=\mathbf{v}_{zkM}^n=0,$$

$$c_{K-1,m}^n=c_{Km}^n, c_{k,0}^n=c_{k,1}^n, c_{k,M-1}^n=c_{k,M}^n.$$

Оскільки отримана система також є нелінійною, через нелінійність параметра

$$\eta_{km}^{n} = \eta_0 \left[ 1 + 0.75 \frac{c_{km}^{n}}{1 - c_{km}^{n}} \right]^2,$$

то рішення в одному часовому шарі уточнювалися з урахуванням зміни нелінійних параметрів.

У розрахунку були прийняті наступні значення параметрів: $R$=100 м, H=100 м, $\rho_1$=1200 кг/м$^3$, $\rho_2$=2650 кг/м$^3$, $c_1$=0.155, $d_1$=0.146 м, $d_2$=0.219 м. Були отримані поля швидкостей, концентрації, густини та тиску в камері в залежності від розташування шламоподаючої колони, $l_1$. На рис.1 та рис. 2 наведені графіки розподілу концентрації відходів та розподілу щільності рідини по висоті камери для різних $r$ в момент часу $t=T/10$, де $T$ – час повного заповнення камери. Тут прийнято $l_1$=0.4 $H$.

У роботі було досліджено вплив висоти шламоподаючої колони, на розподіл концентрації відходів в камері. На рис. 3-5 наведено розподіл концентрації відходів в камері, рис. 3 відповідає $l_1$=0, рис. 4 – $l_1$=0.2$H$, рис.5 – $l_1$=0.6 $H$.

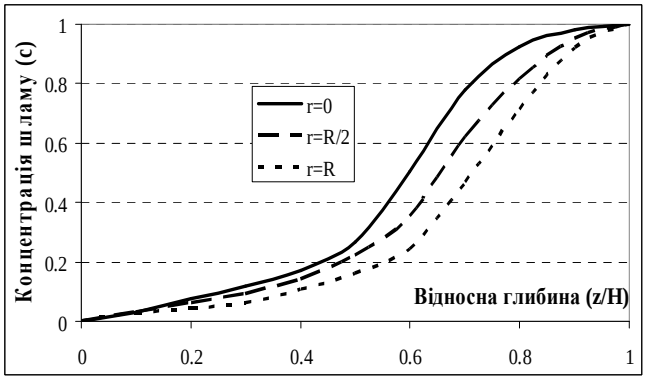


Рис. 1. Розподіл концентрації домішок в камері при $l_1$=0.4 $H$

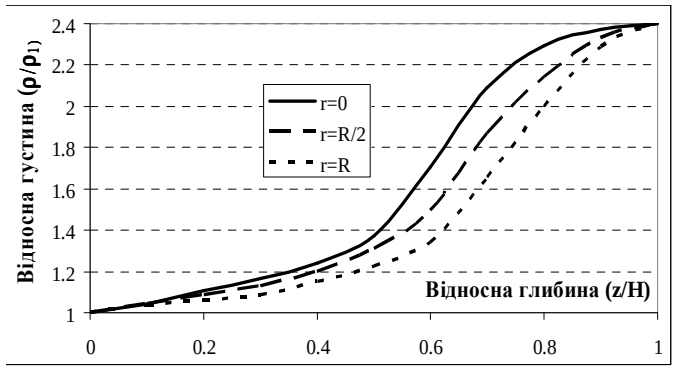


Рис. 2. Розподіл густини рідини в камері при $l_1$=0.4 $H$

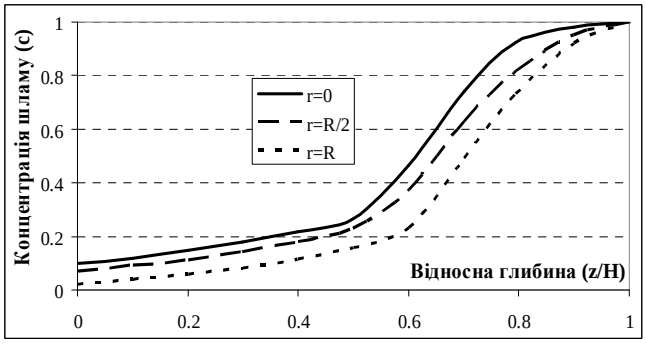


Рис. 3. Розподіл концентрації домішок в камері при $l_1$=0

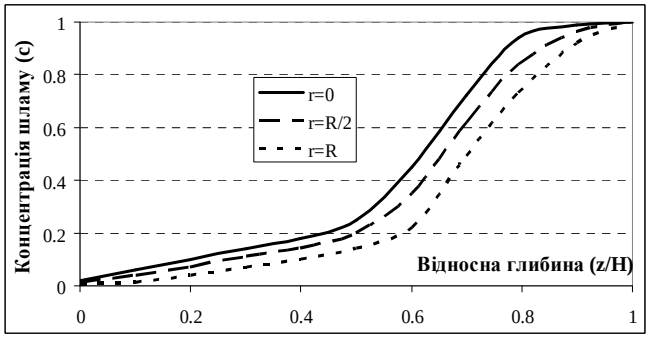


Рис. 4. Розподіл концентрації домішок в камері при $l_1$=0.2$H$

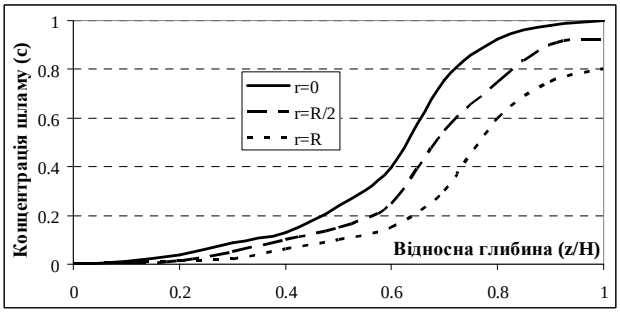


Рис. 5. Розподіл концентрації домішок в камері при $l_1$=0.6$H$

## 4. Висновки

Як видно з наведених графіків, при невеликій висоті труби, що подає шлам, у верхнього краю камери за рахунок перемішування рідини спостерігається певна концентрація відходів, що перешкоджає відбору очищеного розчину солі (див. рис.3). При підвищенні глибини шламоподаючої колони, спостерігається явище неповного заповнення камери відходами, що призводить до зменшення максимальної місткості камери (див. рис.5). Таким чином, виконаний чисельний експеримент дозволяє зробити висновок про оптимальну глибину розташування шламоподаючої колони, в діапазоні (0.3*H*… 0.4*H*).

**Список літератури:** 1. *Ткач Г.А., Шапорев В.П., Титов В.М.* Производство соды по малоотходной технологии.– Харьков: ХГПУ, 1998.– 429 с. 2. Декл. патент №35317 А Україна, МПК 7 B65G5/00, E21F 17/16. Спосіб закладки твердих відходів содових виробництв в підземних соляних камерах / Шестопалов О. В., Цейтлін М. А., Райко В. Ф., Надрук. 10.09.2008, Бюл. № 17. 3. *Хаппель Дж., Бреннер Г.* Гидродинамика при малых числах Рейнольдса // М.:Изд. Мир, – 1976 – 630 с. 4. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика. — Издание 4-е, стереотипное. —М.: Наука, 1988. — Т. VI. Гидродинамика. — 736 с. 5. *Р.И. Нигматулин*. Динамика многофазных сред, тт. 1,2. - М.: Наука, 1987

*Поступила до редколегії 29.11.2009*

**УДК: 628**

***Г.В.СЛЕПЦОВ,*** к.т.н., с.н.с. (ГК «Экополимер»)
***И.Ю.БОЙКО,*** инженер (ГК «Экополимер»)
***Е.С. ЛИСОГОР,*** к.т.н., доцент (НТУ «ХПИ»)

# ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД МЯСОПЕРЕРАБАТЫВАЩЕГО ЗАВОДА

Стічні води м’ясопереробних заводів характеризуются різкими коливаннями складу та високим вмістом зважених речовин, жирів, ХПК і БПК. В роботі наведено результати дослідження кінетики фізико-хімічної очистки СВ м’ясопереробного заводу реагентною напорною флотацією.

Waste water of meat-processing plants is characterized by fluctuation of its analysis and high level of suspended solids, fats, COD and BOD content. In this research work is given research results of physicochemical treatment kinetics of meat-processing plants waste water by chemical agent pressure flotation.

Исследования показателей качества сточных вод (СВ) мясоперерабатывающего завода по производству пищевых полуфабрикатов свидетельствуют о значительных колебаниях состава (табл. 1).

Полную очистку СВ мясоперерабатывающего производства предусмотрено проводить последовательно физико-химическим и биологическим методом. Физико-химическая очистка включает механическую очистку от грубодисперсных примесей, реагентную обработку и напорную флотацию. В данной статье приведены результате исследования реагентной напорной