

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗРЫВНОГО ИСПАРЕНИЯ ВОДЫ В ЭКСТРУДЕРЕ С ВАКУУМНОЙ КАМЕРОЙ

Д. И. Фролов, А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, П. К. Воронина

На сегодняшний день продуктов, выпускаемых на основе сырья растительного происхождения с помощью термопластической экструзии выпускается очень много, начиная от сухих завтраков и заканчивая кормами для животных. Из всех макроструктур, пористая представляет наибольший интерес при производстве функциональных добавок к хлебобулочной продукции. Для получения экструдатов пористой макроструктуры используют короткие неохлаждаемые фильеры, при выходе расплава через такую фильеру происходит резкий сброс давления, что приводит к взрывному испарению воды и образованию пористой макроструктуры. При определении характеристик взрыва наибольшие трудности возникают при рассмотрении процесса перехода жидкости в перегретое состояние и следующего за ним детонационного вскипания жидкости. При испарении жидкости большая часть тепловой энергии, потраченной на перегрев жидкости, преобразуется в механическую энергию сжатия и кинетическую энергию движущейся парожидкостной смеси, за счет чего и получается пористая структура. Кроме взрывного испарения свободной воды влажность экструдата уменьшается за счет сушки путем конвективного массообмена. Опираясь на уравнения первого закона Фика, состояния идеального газа и теорию подобия был рассчитан конвективный массообмен влаги в атмосферных условиях экструдирования и при применении вакуумной камеры экструдера. При этом скорость испарения влаги с поверхности экструдированного продукта при использовании вакуумной камеры возрастает примерно в 30 раз, что оправдывает ее применение для увеличения скорости сушки экструдата и увеличению его пористости вследствие взрывного испарения воды при увеличенном градиенте давления между камерами.

*Ключевые слова:* экструдат, растительное сырье, влажность, коэффициент расширения.

### Введение

На сегодняшний день продуктов, выпускаемых на основе сырья растительного происхождения с помощью термопластической экструзии выпускается огромное количество, начиная от сухих завтраков и заканчивая кормами для животных [1, 8].

Согласно классификации экструзионных продуктов по макроструктуре различают продукты с волокнистой, однородной и пористой структурой. Из всех макроструктур, пористая представляет наибольший интерес при производстве сухих завтраков, функциональных добавок к хлебобулочной продукции. Основными компонентами экструдатов пористой структуры являются 80% крахмалов и 10–15% белков [5, 6].

Структурообразование экструдатов наиболее активно начинает проявляться уже на стадии плавления и дозирования где поддерживается температура 120–180 °С и давление 4...6 МПа, где материал (увлажненное и перемешанное зерновое сырье) переходит в вязкотекучее состояние. В этих условиях происходит желатинизация крахмалов и денатурация белков, при этом кристаллические области, такие как амилозы и амилопектины переходят из неупорядоченного высокоэластичного состояния в вязкотекучее [2]. Структурообразование расплавов происходит под действием сил сдвига и растяжения в головке экструдера и фильере матрицы, при этом в зависимости от конструкции фильеры

и технологических факторов (температура, давление, состав сырья) возможно, получить экструдаты различной макроструктуры. Для получения экструдатов пористой макроструктуры используют короткие неохлаждаемые фильеры, при выходе расплава через такую фильеру происходит резкий сброс давления, что приводит к взрывному испарению воды и образованию пористой макроструктуры [3, 4].

**Целью** работы является описание теоретических зависимостей процесса взрывного испарения воды в экструдере с вакуумной камерой.

### Объект и методы исследования

При определении характеристик взрыва наибольшие трудности возникают при рассмотрении процесса перехода жидкости в перегретое состояние и следующего за ним детонационного вскипания жидкости. Под детонационным вскипанием принимается лавинообразное образование центров кипения в объеме перегретой жидкости и последующее быстрое испарение жидкости. При испарении жидкости большая часть тепловой энергии, потраченной на перегрев жидкости, преобразуется в механическую энергию сжатия и кинетическую энергию движущейся парожидкостной смеси.

$$\Delta E = M \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

где  $M$ ,  $c_p$ ,  $\Delta T$  – масса, теплоемкость

и величина перегрева «взрывающейся» порции жидкости.

Разрушающая способность взрыва определяется механизмом вскипания жидкости и количеством выделившейся энергии, пропорциональной величине

$$E = c_p \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T \quad (2)$$

где  $c_p$  – теплоемкость;

$\rho$  – плотность;

$V$  – объем вскипевшей части жидкости;

$\Delta T$  – величина перегрева,  $\Delta T = T - T_S$ .

Механизм вскипания воды зависит от взаимодействия следующих факторов: внешний или внутренний импульс давления, под действием которого активируются центры кипения, месторасположение и плотность этих центров; время и последовательность их активации; зависимость количества центров кипения от давления, температуры и наличия примесей в жидкости.

Характер вскипания изменяется в зависимости от относительной величины перегрева

$$\varepsilon = \frac{(T - T_S)}{(T_n - T_S)} \quad (3)$$

где  $T$ ,  $T_S$ ,  $T_n$  – температуры жидкости, ее насыщенных паров и предельного (достижимого) перегрева.

При малых перегревах  $\varepsilon \ll 1$  обычно наблюдают кипение на отдельных центрах; в этом случае в парожидкостную смесь превращается малая часть перегретой жидкости, непосредственно прилегающая к центрам кипения.

При перегревах, близких к предельным  $\varepsilon \approx 1$ , вскипание носит взрывной характер, а в парожидкостную смесь превращается весь объем перегретой жидкости.

Наиболее важной характеристикой взрывного вскипания жидкости служит возникающий при этом импульс давления, который и оказывает влияние на коэффициент расширения экструдата.

Кроме взрывного испарения свободной воды влажность экструдата уменьшается за счет сушки путем конвективного массообмена [7].

Определим скорость испарения воды с поверхности экструдата, когда над его поверхностью сухой воздух. Поскольку массообмен определяется конвективным процессом, то удобно определять поток массы пропорционально разности между массовыми концентрациями на поверхности и в окружающей среде:

$$\dot{m}_A = h_m A (C_{As} - C_{A\infty}) \quad (4)$$

где  $\dot{m}_A$  – скорость испарения воды, кг/с;

$h_m$  – коэффициент конвективного массообмена, м/с;

$A$  – площадь поверхности, м<sup>2</sup>;

$C_{As}$  – массовая концентрация влаги на поверхности, кг/м<sup>3</sup>;

$C_{A\infty}$  – массовая концентрация влаги в окружающей области кг/м<sup>3</sup>.

Уравнение (4) является основным уравнением для расчета конвективного массообмена при малых значениях потока массы, и оно определяет смысл коэффициента конвективного массообмена  $h_m$ . Уравнение (4) аналогично по форме записи закону Ньютона при охлаждении.

На рис. 1 приведена схема испарения влаги с поверхности экструдата. Для решения данной

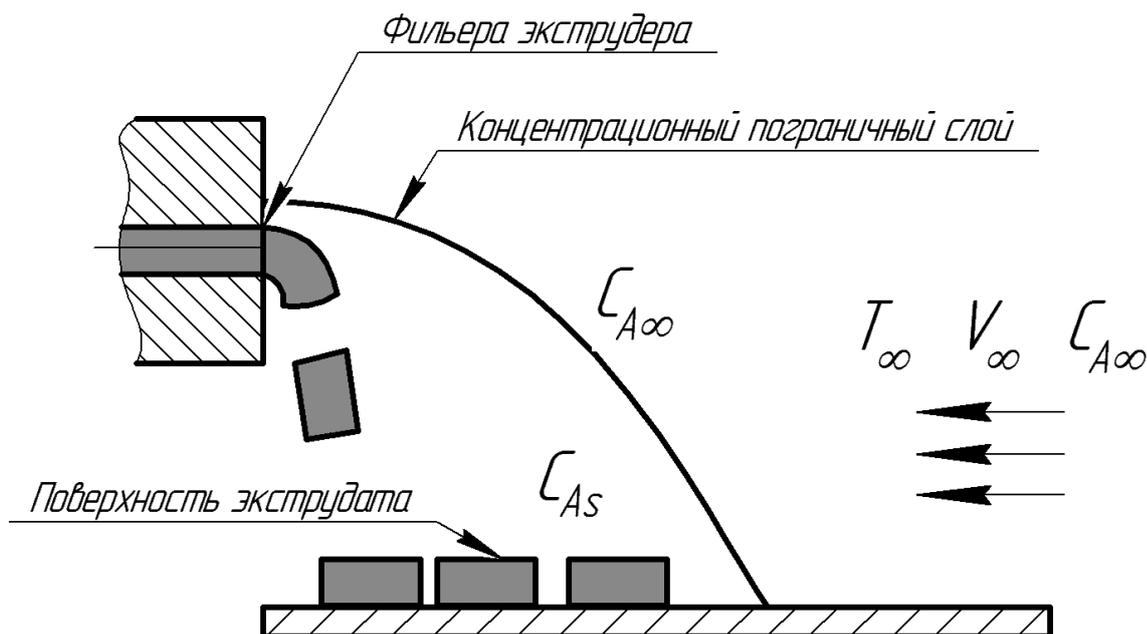


Рис. 1. Схема испарения влаги с поверхности экструдата

задачи рассмотрим перенос тепла от горизонтальной поверхности на которой развивается тепловой пограничный слой. Над поверхностью экструдированного продукта образуется концентрационный пограничный слой, внутри которого концентрация изменяется в направлении, перпендикулярном горизонтальной поверхности. Снаружи пограничного слоя концентрация водяного пара остается постоянной и равной своему значению в окружающей среде.

Между процессами конвективного теплообмена и массообмена есть подобие. Если вывести уравнения сохранения для процессов конвективного переноса тепла и массы, то эти уравнения окажутся подобными, причем массовая концентрация  $C_A$  аналогична температуре  $T$ , а коэффициент бинарной диффузии  $D_{AB}$  аналогичен коэффициенту температуропроводности  $\alpha$ .

Методом расчета коэффициента массообмена является использование соответствующего безразмерного соотношения для конвективного теплообмена с подстановкой соответствующих безразмерных комплексов, описывающих процесс массообмена. Безразмерным комплексом, описывающими теплообмен, является число Нуссельта; массообмен – число Шервуда; отношение переноса количества движения к теплопроводности – число Прандтля; отношение переноса количества движения к массовой диффузии – число Шмидта; отношение силы инерции к силе вязкости – число Рейнольдса [9].

### Результаты и их обсуждение

Рассчитаем скорость испарения воды с поверхности экструдата имеющий поверхность  $0,8 \text{ м}^2$ , скорость воздуха над экструдатом  $0,1 \text{ м/с}$  при экструдировании на поверхность лотка, и  $6 \text{ м/с}$  при экструдировании в вакуумную камеру экструдера. Температура воздуха  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  и воды в экструдате равна  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Относительная влажность воздуха  $80\%$  и  $10\%$  при экструдировании в вакуумную камеру. Перед расчетом подберем соответствующее безразмерное соотношение для числа Шервуда, определим будет ли течение ламинарным или турбулентным. Для этого рассчитаем число Рейнольдса по формуле:

$$\text{Re}_A = \frac{\rho \cdot V_\infty \cdot L}{\mu} = \frac{1,146 \cdot 0,1 \cdot 0,8}{18,4 \cdot 10^{-6}} = 4982 \quad (5)$$

где  $\text{Re}_A$  – критерий Рейнольдса при атмосферном давлении;

$\rho$  – плотность воздуха,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $V_\infty$  – скорость воздуха в конце лотка,  $\text{м/с}$ ;  
 $L$  – длина лотка,  $\text{м}$ ;  
 $\mu$  – коэффициент динамической вязкости,  $\text{Н}\cdot\text{с/м}^2$ .

Число Рейнольдса для вакуумной камеры найдем

$$\text{Re}_V = \frac{\rho \cdot V_\infty \cdot L}{\mu} = \frac{1,146 \cdot 6 \cdot 0,8}{18,4 \cdot 10^{-6}} = 298956 \quad (6)$$

Течение воздуха полностью турбулентное в обоих случаях, поэтому безразмерные критерий Шервуда найдем из выражения

$$\begin{aligned} Sh_A &= 0,036 Sc^{1/3} \text{Re}_A^{0,8}; \\ Sh_V &= 0,036 Sc^{1/3} \text{Re}_V^{0,8} \end{aligned} \quad (7)$$

используя физические свойства воды и воздуха при  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , имеем коэффициент бинарной диффузии воздух – вода  $D_{AB} = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ , критерий Шмидта

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} = \frac{16,18 \cdot 10^{-6}}{2,6 \cdot 10^{-5}} = 0,622$$

Найдем число Шервуда для атмосферного давления

$$Sh_A = 0,036 \cdot 0,622^{1/3} \cdot 4982^{0,8} = 27,89$$

для вакуумной камеры

$$Sh_V = 0,036 \cdot 0,622^{1/3} \cdot 298956^{0,8} = 737,99$$

Коэффициент конвективного теплообмена  $h_m$  найдем из выражения критерия Шервуда

$$Sh = \frac{h_m \cdot L}{D_{AB}} \quad (8)$$

выразим его из выражения (8), получим для атмосферного давления

$$\begin{aligned} h_m^A &= \frac{Sh_A \cdot D_{AB}}{L} = \frac{27,89 \cdot 2,6 \cdot 10^{-5}}{0,8} = \\ &= 9,06 \cdot 10^{-4} \text{ м/с} \end{aligned}$$

для вакуумной камеры соответственно

$$\begin{aligned} h_m^V &= \frac{Sh_V \cdot D_{AB}}{L} = \frac{737,99 \cdot 2,6 \cdot 10^{-5}}{0,8} = \\ &= 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ м/с} \end{aligned}$$

Определим концентрацию паров воды у поверхности экструдатов и в окружающем воздухе. У поверхности экструдированного продукта воздух насыщенный и имеет относительную влажность  $100\%$ . Соотношение между относительной влажностью, температурой насыщения и парциальным давлением водяного пара запишется как [10]:

$$P_A = \phi \cdot P_{нас} \quad (9)$$

где  $P_A$  – парциальное давление водяного пара при атмосферном давлении, Па;

$\phi$  – относительная влажность воздуха, %;

$P_{нас}$  – давление насыщенного пара, Па

Из таблиц для водяного пара давление насыщения при температуре воздуха 25 °С равно  $P_{нас} = 3169$  Па; давление насыщения водяного пара вблизи поверхности экструдированного продукта при примерной температуре 60 °С равно  $P_{пов.нас} = 19932$  Па.

1) Произведем расчет концентрации водяного пара при выбросе экструдированного продукта в атмосферный воздух:

а) Концентрация водяного пара у поверхности экструдированного продукта:

$$C_{As} = \frac{M_w \cdot P_{пов.нас}}{R_u \cdot T} = \frac{18 \cdot 19932}{8,314 \cdot 10^3 \cdot 333} = 0,13 \text{ кг/м}^3 \quad (10)$$

где  $M_w$  – молярная масса воды, г/моль;

$R_u$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(Кмоль · град);

$T$  – температура, °К.

б) Концентрация водяного пара в воздухе над экструдированным продуктом при относительной влажности воздуха  $\phi_\infty = 60\%$ :

$$C_{A\infty} = \frac{M_w \cdot \phi_\infty \cdot P_{нас}}{R_u \cdot T} = \frac{18 \cdot 0,60 \cdot 3169}{8,314 \cdot 10^3 \cdot 298} = 0,014 \text{ кг/м}^3 \quad (11)$$

Теперь рассчитаем скорость испарения воды по формуле (4):

$$\dot{m}_A = h_m^A A (C_{As} - C_{A\infty}) = 9,06 \cdot 10^{-4} \cdot 0,64 \cdot (0,13 - 0,014) = 6,726 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (12)$$

2) Произведем расчет концентрации водяного пара при выбросе экструдированного продукта в вакуумную камеру экструдера:

а) Концентрация водяного пара у поверхности экструдированного продукта:

$$C_{As} = \frac{M_w \cdot P_{пов.нас}}{R_u \cdot T} = \frac{18 \cdot 19932}{8,314 \cdot 10^3 \cdot 333} = 0,13 \text{ кг/м}^3 \quad (13)$$

б) Концентрация водяного пара в воздухе над экструдированным продуктом при относительной влажности воздуха  $\phi_\infty = 5\%$  в вакуумной камере:

$$C_{A\infty} = \frac{M_w \cdot \phi_\infty \cdot P_{нас}}{R_u \cdot T} = \frac{18 \cdot 0,05 \cdot 3169}{8,314 \cdot 10^3 \cdot 298} = 1,151 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3 \quad (14)$$

Теперь рассчитаем скорость испарения воды по формуле (4), видоизменив для вакуумной камеры:

$$\dot{m}_V = h_m^V A (C_{As} - C_{A\infty}) = 2,4 \cdot 10^{-2} \cdot 0,64 \cdot (0,13 - 0,00115) = 1,979 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (15)$$

В итоге получим разницу в скорости испарения влаги с поверхности экструдированного продукта при атмосферном давлении и вакууме:

$$\frac{\dot{m}_V}{\dot{m}_A} = \frac{1,979 \cdot 10^{-3}}{6,726 \cdot 10^{-5}} = 29,423 \quad (16)$$

## Выводы

Получено теоретическое описание зависимостей процесса взрывного испарения воды в экструдере с вакуумной камерой. Опираясь на уравнения первого закона Фика, состояния идеального газа и теорию подобия был рассчитан конвективный массообмен влаги в атмосферных условиях экструдирования и применении вакуумной камеры экструдера. При этом скорость испарения влаги с поверхности экструдированного продукта при использовании вакуумной камеры возрастает примерно в 30 раз, что оправдывает ее применение для увеличения скорости сушки экструдата и увеличению его пористости вследствие взрывного испарения воды при увеличенном градиенте давления между камерами.

## Список литературы

1. Остриков, А.Н. Технология экструзионных продуктов / А.Н. Остриков, Г.О. Магомедов, Н.М. Дерканосова и др. – СПб.: Проспект науки, 2007. – 202 с.
2. Курочкин, А.А. Регулирование структуры экструдатов крахмалсодержащего зернового сырья / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов, П.К. Воронина // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 4. – С. 94–99.
3. Курочкин, А.А. Моделирование процесса получения экструдатов на основе нового технологического

- решения/А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов, П.К. Воронина // Нива Поволжья.– 2014.– № 30.– С. 70–76.
4. Патент 2460315 Российская Федерация МПК А23L1/00. Способ производства экструдатов /Г.В. Шабурова, А.А. Курочкин, П.К. Воронина, Г.В. Авроров, П.А. Ерушов, № 20011107960; заявл. 01.03.2011; опубл. 10.09.2011, Бюл. № 25.– 6 с.
  5. Курочкин, А.А. Экструдаты из растительного сырья с повышенным содержанием липидов / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов, П.К. Воронина//Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии.– 2014.– № 4.– С. 70–74.
  6. Курочкин, А.А. Получение экструдатов крахмалсодержащего зернового сырья с заданной пористостью // А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс.– 2014.– № 6 (22) .– С. 109–114.
  7. Курочкин, А.А. Технология производства кормов на основе термо-вакуумной обработки отходов с/х производства /А. А. Курочкин, Д.И. Фролов//Инновационная техника и технология.–2014.– № 4. С. 36–40.
  8. Фролов, Д.И. Повышение питательности экструдированных кормов для животных / Д.И. Фролов, В.А. Никишин // Сборник научных трудов Sworld. 2014. Т. 7. № 4. С. 98–101.
  9. Буланов, Н.В. Взрывное вскипание диспергированных жидкостей: Дис. ... д-ра физ.– мат. наук: 01.04.14/ Буланов Николай Владимирович.– Екатеринбург, 2001.– 284 с.
  10. A two-phase mixture model of liquid-gas flow and heat transfer in capillary porous media – I. Formulation / Chao-Yang Wang, C. Beckermann // Int. J. Heat Mass Transfer.– 1993.– Vol. 36.– No.11.– P.2747–2758.

## THEORETICAL DESCRIPTION OF THE EXPLOSIVE EVAPORATION WATER IN AN EXTRUDER TO A VACUUM CHAMBER

*D. I. Frolov, A. A. Kurochkin, G. V. Shaburova, P. K. Voronina*

Today, products manufactured on the basis of raw materials of plant origin using thermoplastic extrusion produced a lot, ranging from breakfast cereals and ending animal feeds. Of all the macrostructures porous is of greatest interest in the production of functional additives to bakery products. For extrudates porous macrostructure use short uncooled die at the exit of the melt through a die is a sharp release of pressure that leads to explosive evaporation of water and formation of a porous macrostructure. When determining the characteristics of the explosion the greatest difficulties arise when considering the transition process fluid in a superheated state followed by a detonation of boiling liquid. When liquid evaporates much of the heat energy spent in the overheating of the liquid is converted into mechanical energy of compression and the kinetic energy of moving liquid-vapor mixture, due to which a porous structure. In addition to the explosive evaporation of free water moisture content of the extrudate is reduced by drying by convective mass transfer. Based on the equation of Fick's first law, the ideal gas law and the theory of similarity was calculated convective mass transfer of moisture in the atmospheric conditions of extrusion and the application of the vacuum chamber of the extruder. The rate of evaporation of moisture from the extruded product by using the vacuum chamber is increased about 30 times that justify its use for increasing the drying rate of the extrudate and increases its porosity due to explosive evaporation of water at an increased pressure gradient between the chambers.

*Keywords: extrudate, vegetable raw materials, moisture, expansion coefficient.*

### References

1. Ostrikov, A.N. extrusion technology products / A.N. Ostrikov, G.A. Magomedov, N. M. Derkanosova et al.– SPb .: Science Prospect, 2007.– 202 p.
2. Kurochkin, A.A. Adjusting the structure of the extrudates starch grain material / A.A. Kurochkin, G. V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronin // Bulletin of the Samara State Agricultural Academy.– 2013.– № 4.– S. 94–99.
3. Kurochkin, A.A. Simulation of the process of obtaining extrudates based on new technological solutions / A.A. Kurochkin, G. V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronin // Volga Niva.– 2014.– № 30.– S. 70–76.
4. Patent 2460315 Russian Federation A23L1 IPC / 00. A method of producing extrudates /G.V. Shaburova, A.A. Kurochkin, P.K. Voronin G.V. Auror, P.A. Erushov, № 20011107960; appl. 01.03.2011; publ. 10.09.2011, Bull. № 25.– 6.

5. Kurochkin, AA The extrudates from vegetable raw materials with a high content of lipids / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronin // Bulletin of the Samara State Agricultural Academy.– 2014.– № 4.– S. 70–74.
6. Kurochkin, A.A. The resulting extrudate of starch grain and raw materials with a given porosity // A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov // HHI century: the results of the past and the present problems of a plus.– 2014.– № 6 (22) .– S. 109–114.
7. Kurochkin, A.A. feed production technology based on thermo-vacuum treatment of waste / agricultural production / A.A. Kurochkin, D.I. Frolov // innovative engineering and technology.–2014.– № 4. С. 36–40.
8. Frolov, D.I. fortification extruded animal feed / D.I. Frolov, V.A. Nikishin // Collection of scientific works Sworld. T. 2014. 7. № 4. С. 98–101.
9. Bulanov N.V. Explosive boiling dispersed liquid: Dis. ... Dr. Sci. Sciences: 01.04.14 / Bulanov Nikolai Vladimirovich.– Yekaterinburg, 2001.– 284 p.
10. A two-phase mixture model of liquid-gas flow and heat transfer in capillary porous media – I. Formulation / Chao-Yang Wang, C. Beckermann // Int. J. Heat Mass Transfer.– 1993.– Vol. 36.– No.11.– P.2747–2758.