

эффективный; f — «замороженное» течение; m — параметр, выбранный по температуре, соответствующей максимальной теплоемкости при $p = \text{const}$; 1 относится к N_2O_4 , 4 — к O_2 ; ∞ — стабилизированное течение.

Summary

Reported are the results of an experimental study of heat transfer to N_2O_4 with a sinusoidal law of heat flux variation along its length. The heat transfer process has been studied at undercritical and supercritical parameters and different aggregation states of a substance. It is shown that heat transfer enhances over the region of heat load growth (q_c) while its rate decreases over the region of heat load reduction. The quantitative effect of q_c variation on heat transfer can be regarded for by the method of superposition.

Литература

1. Петухов Б. С., Комендантов А. С., Бурдуни М. Н. и др.— В сб.: Диссоциирующие газы как теплоносители и рабочие тела АЭС / Тезисы докладов V Всесоюзной конференции по диссоциирующим газам.— Мн., 1981, с. 104.
2. Нестеренко В. Б., Михалевич А. А., Тверковкин Б. Е. Быстрые реакторы и теплообменные аппараты АЭС с диссоциирующим теплоносителем.— Мн.: Наука и техника, 1978, с. 85, 105.
3. Курганов В. А., Петухов Б. С.— ТВТ, 1974, т. 12, № 2, с. 304.
4. Колыхан Л. И., Нестеренко В. Б. Теплообмен в диссоциирующем теплоносителе четырехоксида азота.— Мн.: Наука и техника, 1977, с. 44.
5. Петухов Б. С., Поляков А. Ф., Расновский О. В.— ТВТ, 1976, т. 14, № 6, с. 1326.
6. Нестеренко В. Б., Бубнов В. П., Котелевский Ю. Г. и др. Физико-химические и теплофизические свойства химически реагирующей системы $\text{N}_2\text{O}_4 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO} + \text{O}_2$.— Мн.: Наука и техника, 1976, с. 93, 325.
7. Физико-химические и теплофизические свойства растворов на основе четырехоксида азота / Под ред. В. Б. Нестеренко.— Мн.: Наука и техника, 1981.— 220 с.
8. Лельчук В. Л., Сорокин А. Г., Шуйская К. Ф.— В сб.: Тепло- и массоперенос.— Мн., 1972, т. 1, с. 147—151.
9. Григорьев В. С. Теплообмен в трубах при переменной по длине тепловой нагрузке и постоянных и переменных свойствах жидкости: Автореф. канд. дис.— М., 1977—16 с.
10. Sleicher C. A., Tribus M. Heat Transfer Fluid Mech. Inst., Stanford University Press (Calif.), 1956, p. 59.

Институт ядерной энергетики
АН БССР

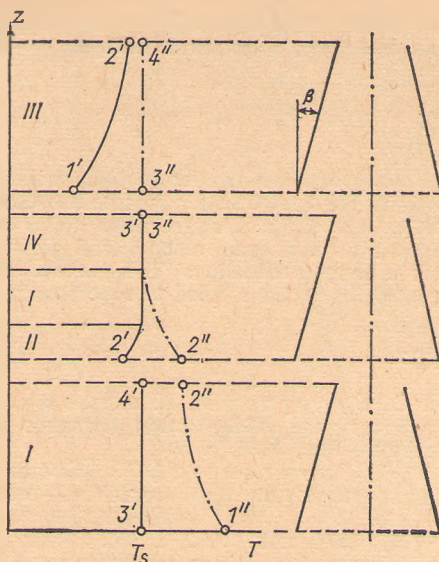
Поступила в редакцию
03.05.82

УДК 536.248.2:62.507.72

А. А. АНДРИЖИЕВСКИЙ, А. А. МИХАЛЕВИЧ, В. Б. НЕСТЕРЕНКО,
А. Г. ТРИФОНОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В АДИАБАТИЧЕСКИХ ПАРОКАПЕЛЬНЫХ ПОТОКАХ

Парокапельные потоки являются широко распространенным типом двухфазного течения в теплообменных и технологических аппаратах энергетических установок и, в частности, в многоступенчатом теплообменном аппарате [1, 2]. На рис. 1 приведены возможные профили температур теплоносителя в трехступенчатом контактном аппарате, который схематично может быть представлен системой прямоточных каналов переменного диаметра, последовательно связанных между собой по входу и выходу противотоков жидкой и паровой фаз. Специфическая (прямопротивоточная) схема движения жидкой и паровой фаз теплоносителя допускает одновременное существование в контактном аппарате различных форм парокапельного потока. Так, областям I—IV на рис. 1 соответствуют режимы совместного течения перегретого пара и насыщенной жидкости, перегретого пара и недогретой



жидкости, насыщенного пара и недогретой жидкости, жидкости и пара на линии насыщения.

В данной работе на примере диссоциирующей системы $N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2 \rightleftharpoons 2NO + O_2$ проводится построение одномерных математических моделей процессов тепломассопереноса при различных режимах течения адиабатических парокапельных потоков в канале переменного диаметра.

Рис. 1. Характерное распределение температур жидкости и пара в трехступенчатом контактном аппарате: 1', 4' и 1'', 4'' — температуры жидкости и пара на входе и выходе аппарата; 2', 3' и 2'', 3'' — между ступенями

МЕЖФАЗНЫЙ ТЕПЛОМАСОБМЕН

В общем случае стационарные уравнения неразрывности и сохранения тепловой энергии двухфазного адиабатического потока имеют вид

$$\operatorname{div} [(\rho''w'')\varphi + (\rho'w')(1 - \varphi)] = 0; \quad (1)$$

$$\operatorname{div} [(\rho''i''w'')\varphi + (\rho'i'w')(1 - \varphi)] = 0.$$

Систему дифференциальных уравнений (1) можно преобразовать к системе алгебраических уравнений, конкретное выражение которых зависит от граничных условий и геометрии канала:

$$[(\rho''w'')\varphi + (\rho'w')(1 - \varphi)] \left(1 - \frac{2z}{d_0} \operatorname{tg} \beta \right)^2 - \frac{(G'' + G')_0}{S_0} = 0; \quad (2)$$

$$[(\rho''i''w'')\varphi + (\rho'i'w')(1 - \varphi)] \left(1 - \frac{2z}{d_0} \operatorname{tg} \beta \right)^2 - \frac{(G''i'' + G'i')}{S_0} = 0, \quad (3)$$

где β — угол, характеризующий конусность канала (рис. 1); d_0 — диаметр нулевого сечения канала. Для компактности последующего математического описания всех разновидностей парокапельных потоков поставим в соответствие уравнениям (2), (3) условные символы

$$\Phi_1(z, (\rho''; \rho'), a_{i0}) = 0; \quad \Phi_2(z, (\rho''i''; \rho'i'), b_{i0}) = 0,$$

где $a_{i0} = (G'', G', d, S, \beta)_0$ и $b_{i0} = (G''i'', G'i', d, S, \beta)_0$ характеризуют граничные значения динамических, тепловых и геометрических характеристик рассматриваемой системы.

Необходимость описания процессов тепломассообмена на развитой межфазовой поверхности раздела требует введения функции распределения капель по размерам $F(d_R)$, которая, согласно [3], может быть представлена экспоненциальной функциональной зависимостью

$$F(d_R) = A \frac{4(d^*)^2}{d_w} \exp\{-2d^*\}, \quad (4)$$

где A — нормирующий множитель; $d^* = d_R/d_w$; d_w — наиболее вероятное значение d_R . Из условия нормировки находим

$$A = 1 / \left\{ \int_0^{(d_K)_{\max}} \frac{4 (d^*)^2}{d_w} \exp \{-2d^*\} d (d_K) \right\}, \quad (5)$$

где $(d_K)_{\max}$ — максимально возможный (при данных условиях) размер капельной влаги. В работе [1] предлагается определять величины d_w и $(d_K)_{\max}$ в уравнениях (4), (5) по соотношению

$$d_w, (d_K)_{\max} = \frac{(We)_1, 2 \sigma}{\rho'' (\omega'' - \omega')^2} \quad (6)$$

при значениях $(We)_1$ и $(We)_2$, соответственно равных 7,5 и 23. Уравнения (4) — (6) позволяют представить полную систему уравнений сохранения стационарного адиабатического парокропильного потока для различных режимов его течения в канале переменного диаметра в одномерном виде.

Режим 1. Совместное течение перегретого пара и насыщенной жидкости

$$\Phi_1(z, (\rho_e''; \rho_s'), a_{i0}) = 0;$$

$$\Phi_2(z, (\rho_e'' i_e''; \rho_s' i_s'), b_{i0}) = 0; \quad (7)$$

$$\frac{d(\rho_e'' \omega'' \varphi S)}{dz} = \frac{(T'' - T_s') N_K S}{r} \Omega(z; d_K);$$

где N_K — суммарное число капель в единице объема:

$$N_K = (1 - \varphi) / \int_0^{(d_K)_{\max}} \frac{\pi d_K^3}{6} F(z; d_K) d (d_K);$$

$$\Omega(z; d_K) = \int_0^{(d_K)_{\max}} \alpha_K(z; d_K) S_K F(z; d_K) d (d_K);$$

$\alpha_K(z; d_K)$ — коэффициент теплоотдачи к каплям диаметра d_K в данном сечении канала; S_K — площадь поверхности капли. К системе уравнений (7) присоединяются уравнения движения для потока и отдельной капли

$$\frac{d(\rho \omega^2)_{\text{CM}}}{dz} = - \frac{dP}{dz} + \tau + \rho_{\text{CM}} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{g}); \quad (8)$$

$$\omega_K \frac{d\omega'_K}{dz} = \frac{3}{4} \zeta_K \rho_e \frac{|\omega'' - \omega'_K| (\omega'' - \omega'_K)}{d_K \rho_s'} + (\mathbf{n} \cdot \mathbf{g}), \quad (9)$$

где ζ_K — коэффициент лобового сопротивления капли;

$$(\rho \omega^2)_{\text{CM}} = \rho_e'' \omega''^2 + \rho_s' (1 - \varphi) \omega'^2;$$

$$\omega' = \int_0^{(d_K)_{\max}} F(z; d_K) \omega'_K d (d_K).$$

При необходимости учета кинетики неравновесной реакции диссоциации $2\text{NO}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO} + \text{O}_2$ в паровой фазе система уравнений (7) — (9) должна быть дополнена системой уравнений неразрывности для отдельных компонент химически реагирующей смеси

$$\frac{d(\rho_m \omega_m)}{dz} = v_m I_{I, II}. \quad (10)$$

Тогда в (7) — (9):

$$\begin{aligned} \rho_e^* &= \sum_{m=1}^4 \rho_m; \\ (\rho_e^* \omega^*) &= \sum_{m=1}^4 \rho_m \omega_m; \\ (\rho_e^* i_e^*) &= \sum_{m=1}^4 \rho_m (i_m + H_m); \\ (\rho_e^* i_e^* \omega) &= \sum_{m=1}^4 \rho_m (i_m + H_m) \omega_m. \end{aligned} \quad (11)$$

При выводе (7) — (10) не учитывались диффузионный перенос тепла и теплопроводность вдоль канала, а также диссипативное рассеивание энергии внутри химически реагирующего потока. Кроме того, предполагалось, что скорость испарения капель меньше скорости выравнивания состава химически реагирующей смеси по сечению канала. Указанные допущения в равной мере относятся и к последующему изложению.

Режим 2. Совместное течение перегретого пара и недогретой жидкости

$$\begin{aligned} \Phi_1(z, (\rho_e^*; \rho_e'), a_{i0}) &= 0; \\ \Phi_2(z, (\rho_e^* i_e^*; \rho_e' i_e'), b_{i0}) &= 0; \\ \frac{d[\rho_e' i_e' (1 - \varphi) \omega S]}{dz} &= (T'' - T') N_K S \Omega(z, d_K); \\ (\rho_e^* \omega' \varphi) \left(1 - \frac{2z}{d_0} \operatorname{tg} \beta\right)^2 &= \frac{G_0^*}{S_0}; \\ \frac{d(\rho_m \omega_m)}{dz} &= v_m I_{1,11}; \\ \Phi_{3,4}(z, (\rho_e^*; \rho_e'), P, d_K) &= 0, \end{aligned} \quad (12)$$

где соотношение $\Phi_{3,4} = 0$ представляет систему уравнений (8), (9) с учетом замены ρ_s на ρ_e' ; величины ρ_e^* , $(\rho_e^* i_e^*)$, $(\rho_e^* \omega')$ и $(\rho_e^* i_e^* \omega)$ определяются аналогично (11). Следует отметить, что появление в (12) дополнительного (по сравнению с (7) — (9)) уравнения неразрывности жидкой фазы связано с необходимостью описания переменного параметра T' , т. е. с увеличением числа степеней свободы рассматриваемой двухфазной системы.

Режим 3. Совместное течение насыщенного пара и недогретой жидкости

$$\begin{aligned} \Phi_1(z, (\rho_s^*; \rho_e'), a_{i0}) &= 0; \\ \Phi_2(z, (\rho_s^* i_s^*; \rho_e' i_e'), b_{i0}) &= 0; \\ \frac{d(\omega' \varphi S')}{dz} &= - \frac{(T_s'' - T) N_K S}{r \rho_s} \Omega(z, d_K); \\ \Phi_{3,4}(z, (\rho_s^*; \rho_e'), P, d_K) &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Режим 4. Совместное течение насыщенного пара и насыщенной жидкости:

$$\Phi_1(z, (\rho_s'; \rho_s'), a_{i0}) = 0;$$

$$\Phi_2(z, (\rho_s'' i_s'; \rho_s' i_s'), b_{i0}) = 0;$$

$$(\rho_s'' \omega'' \varphi) \left(1 - \frac{2z}{d_0} \operatorname{tg} \beta \right)^2 = \frac{G_0''}{S_0}; \quad (14)$$

$$\Phi_{3,4}(z, (\rho_s''; \rho_s'), P, d_K) = 0.$$

Отметим, что необходимые для замыкания систем уравнений сохранения (7) — (10), (12) — (14) интегральные характеристики капельного потока $\alpha_K(z; d_K)$ и ζ_K могут быть определены согласно рекомендациям работ [4, 5].

МАССОПЕРЕНОС ПРИМЕСНЫХ ЧАСТИЦ

В реальных условиях эксплуатации теплообменных и технологических аппаратов двухфазные потоки могут содержать различного рода твердые, жидкие или газообразные примесные компоненты. В этом случае проявляется необходимость учета их взаимодействия с несущей (основной) фазой и, в частности, описания процесса направленного (от газа к жидкости) массопереноса твердых примесных частиц различного линейного размера. Рассматривая примесные твердые частицы как дополнительную инертную фазу (не оказывающую заметного влияния на физико-химические, тепловые и динамические характеристики двухфазного потока), запишем систему уравнений неразрывности и движения частиц определенного линейного размера, которая совместно с системами уравнений (7) — (10), (12) — (14) полностью описывает указанный процесс массопереноса:

$$\frac{dc_{n,K}}{dz} = - \left[\frac{3Q' |\omega_T - \omega_K'}{2Q'' d_K \omega_K'} \omega_{n,K} + \frac{d[\ln(\rho'' \varphi \omega'' S)]}{dz} \right] c_{n,K}; \quad (15)$$

$$\omega_T \frac{d\omega_T}{dz} = \frac{3}{4} \zeta_T \frac{\rho'' |\omega'' - \omega_T| (\omega'' - \omega_T)}{\rho_T d_{T,n}} + (\mathbf{n} \cdot \mathbf{g}); \quad (16)$$

$$c_n = \int_0^{(d_K)_{\max}} c_{n,K} F(z; d_K) d(d_K); \quad (17)$$

$$c = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} c_n \Psi(z; d_{T,n}) d(d_{T,n}). \quad (18)$$

В (15) — (18) $c_{n,K}$ — концентрации, характеризующие улавливание каплями диаметра d_K частиц с линейным размером $d_{T,n}$; c , c_n — соответственно суммарная концентрация частиц в газовом потоке и концентрация частиц с линейным размером $d_{T,n}$; d_{\max} , d_{\min} — пределы нормировки функции распределения частиц по размерам $\Psi(z; d_{T,n})$; $\omega_{n,K}$ — вероятность захвата капель диаметра d_K частицы с линейным размером $d_{T,n}$. Следует отметить, что в отсутствие межфазного массообмена (системы (12), (14)) второй член правой части уравнения (15) обращается в нуль, и оно преобразуется к виду, рекомендованному в работах [6, 7].

В настоящее время существует относительно большое количество рекомендаций по расчету величины $\omega_{n,K}$ в химически инертных двухфазных средах (например, работы [8—10]). Однако, как показал предварительный анализ дисперсного состава примесных частиц в экспериментальном трехступенчатом контактно-аппарате с диссоциирующим теплоносителем [11], существуют заметные различия в уровнях опытных и расчетных значений $\omega_{n,K}$ в области $\operatorname{Stc} \leq (\operatorname{Stc})_{\text{кр}}$ (где $(\operatorname{Stc})_{\text{кр}}$, согласно [12], принадлежит интервалу (0,04; 1,2)). В связи с этим

для замыкания системы уравнений (15) — (18) рекомендуется критериальная форма функциональной зависимости $\omega_{n, k} = f[\text{Stc}]_{n, k}$ [13], скорректированная по результатам экспериментального исследования [11].

На рис. 2 представлены профили локальных значений коэффициента межфазного теплообмена α_V в системе $\text{N}_2\text{O}_4 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO} + \text{O}_2$ для случая «замороженной» смеси (кривая 1) и с учетом кинетики неравновесной химической реакции $2\text{NO}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2 + \text{O}_2$ (кривая 2), а также со-

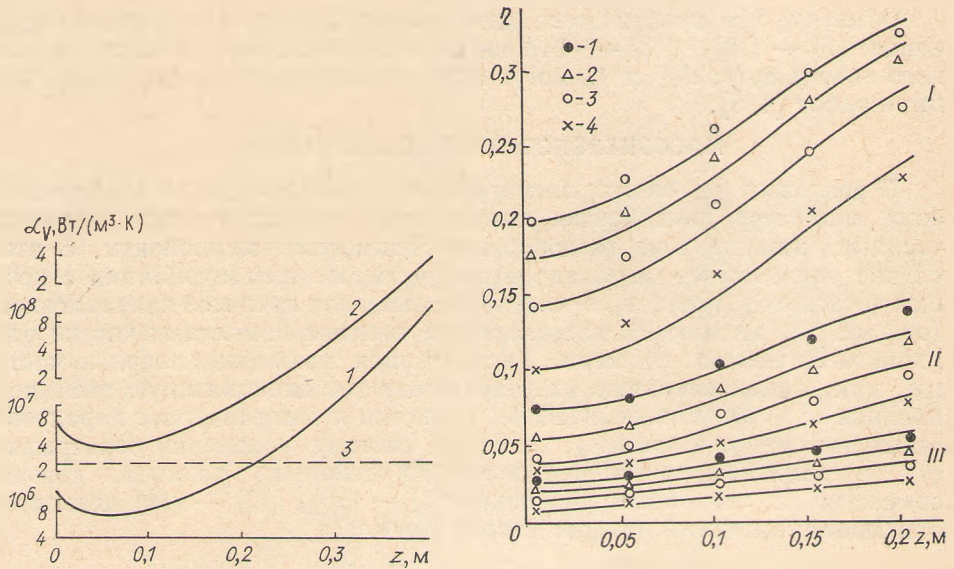


Рис. 2. Распределение удельных коэффициентов межфазного теплообмена по длине канала: 1 — расчет по предложенной методике для «замороженного» случая; 2 — с учетом кинетики химических реакций; 3 — интегральное значение [2]; $G_0 = G_0^* = 3$ кг/с; $T_0^* = 443$ К; $T' = T_s$; $P = 20$ бар; $c_{a0} = 0,005$; $d_0 = 0,2$ м; $\varphi_0 = 0,5$; $\beta = 0,2$ рад

Рис. 3. Сравнение математической модели с экспериментальными данными [14]: I — сульфат аммония; $d_T = 1,22$ мкм; $\rho_T = 1770$ кг/м³; II — дибутилфталат; $d_T = 0,58$ мкм; $\rho_T = 1047$ кг/м³; III — хлористый аммоний; $d_T = 0,27$ мкм; $\rho_T = 1540$ кг/м³; 1— $G_0^* = 0,0153$ кг/с; 2—0,0118; 3—0,0086; 4—0,0053 кг/с; $G_0^* = 0,1408$ кг/с; $d_0 = 0,0302$ м; $\beta = -0,122$ рад

ответствующее интегральное значение этого коэффициента (пунктирная линия), рассчитанное по методике работы [2].

Как следует из рис. 2, зависимость $\alpha_V = f(z)$ носит существенно немонотонный характер и удовлетворительно согласуется (по порядку величины α_V) с рекомендациями работы [2] только при допущении отсутствия влияния химических реакций на процессы теплопереноса. На рис. 3 представлены результаты сравнения опытных (точки) и расчетных (сплошные линии) локальных значений коэффициентов эффективности очистки от примесных частиц (η) в конфузоре экспериментальной трубы Вентури, термодинамические и геометрические характеристики которой приведены в работе [14]. Следует отметить, что методика обработки опытных данных включала процедуру итерационного согласования η_a и η_p на начальных участках конфузора. Это вызвано отсутствием в работе [14] полной экспериментальной информации о начальном состоянии исследуемой газожидкостной системы.

Рис. 2, 3 в достаточной мере иллюстрируют возможные области приложения и достоверность описанных выше одномерных математических моделей течения адиабатических парокпельных потоков (содержащих примесные частицы) в канале переменного диаметра.

Обозначения

z — пространственная координата; T — температура; ω — скорость; G — расход; P — давление; φ — объемное паросодержание; ρ — плотность; i — энтальпия; r — теплота парообразования; x — массовое паросодержание; σ — коэффициент поверхностного натяжения; ω — вероятность улавливания частиц; d — диаметр; S — поверхность; ν — произведение молекулярного веса на стехиометрическое число; J — источник массы, скорость химической реакции; H — энергия связи; \mathbf{n} — единичный вектор в направлении движения; Re , We , Stc — критериальные числа Рейнольдса, Вебера, Стокса; \mathbf{g} — вектор гравитационного ускорения; η — эффективность очистки; τ — приведенные к единице длины потери динамического напора двухфазного потока на трение; $\alpha_V = N_K \Omega_K$ — локальный объемный коэффициент теплоотдачи к каплям; N_K — число капель в единице объема; Ω_K — среднее значение теплоотдачи к капле при единичном температурном напоре; Q — объемный расход.

Индексы: " — пар; ' — жидкость; к — капля; 0 — начальное значение; s — линия насыщения; m — компоненты химической реагирующей смеси; t — твердая частица; $кр$ — критическое значение; V — величина, отнесенная к единице объема; p — расчетное значение; ε — экспериментальное.

Summary

The mathematical models for investigating the local and integral characteristics of heat and mass transfer processes in simultaneous adiabatic flow and that of foreign particles are given. The mathematical model is constructed on the basis of one-dimensional stationary conservation equations for mass, thermal energy and momentum of liquid and vapor phases.

Литература

1. Андрижиевский А. А., Михалевич А. А., Нестеренко В. Б., Трифононов А. Г.— Вестн АН БССР. Сер. физ.-энерг. наук, 1980, № 3, с. 96—102.
2. Карпович А. И. Разработка, исследование и практическое применение барботажно-прямоточных контактных устройств.: Автореф. канд. дис.— Мн.: БТИ, 1975.— 20 с.
3. Lewis H. G., Edwards D. G., Goglia H. Y., Ruce R. I.— Ind. Eng. Chem., 1948, vol. 40, N 1, p. 67—74.
4. Ли К., Рили Д. Ж.— В сб.: Теплопередача / Труды АОИМ, 1968, т. 90, № 4, с. 84—94.
5. Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса.— М.: Химия, 1974.— 688 с.
6. Calvert S.— AIChE J., 1970, vol. 16, N 3, p. 392—396.
7. Goel K. C., Holland K. G. T.— Ind. Eng. Chem. Fund., 1977, vol. 16, N 2, p. 186—193.
8. Ranz W. E., Wong J. B.— Ind. Eng. Chem., 1952, vol. 44, N 6, p. 1371—1381.
9. Goldsmid Y., Calvert S.— AIChE J., 1963, vol. 9, N 3, p. 352—358.
10. Behie S. W., Beestmans J. M.— Can. J. Chem. Eng., 1973, vol. 51, August, p. 430—433.
11. Андрижиевский А. А., Бида Л. А., Ермашкевич В. Н. и др.— Вестн АН БССР. Сер. физ.-энерг. наук, 1980, № 4, с. 125—126.
12. Фукс Н. А. Механика аэрозолей.— М.: Изд-во АН СССР, 1961.— 159 с.
13. Андрижиевский А. А., Трифононов А. Г.— В сб.: Исследование по гидродинамике и теплообмену. Новосибирск, 1980, с. 73—78.
14. Johnstone H. F., Field R. B., Tassler M. C.— Ind. Eng. Chem., 1954, vol. 46, N 8, p. 1601—1608.

Институт ядерной энергетики
АН БССР

Поступила в редакцию
05.08.82

УДК 66.096.5:66.047.2

О. Г. МАРТЫНОВ, В. С. НИКИТИН

ОСОБЕННОСТИ ВАКУУМНОЙ СУШКИ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ ПЛАСТМАСС В ВИБРОВРАЩАЮЩЕМСЯ СЛОЕ

В настоящее время в связи с возрастающими требованиями к качеству литья пластмассовых изделий появляется необходимость глубокой сушки (до сотых долей процента) гранулированного полуфабриката.