

16. Zoback M. D., Byerlee J. D. A note on the deformational behavior and permeability of crushed granite.— *Int. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 1976, vol. 13, p. 291.
17. Николаевский В. Н., Поляничев А. Н. и др. Дилатансионные эффекты при подземном камуфлетном взрыве.— *ДАН СССР*, 1980, т. 250, № 1.
18. Коротков П. Ф., Лобанов В. С. Расчет взрыва гексогена в алюминии.— *ПМТФ*, 1973, № 4.
19. Рыков Г. В. Влияние скорости деформирования на сжимаемость и сдвиг песчаных и глинистых грунтов при кратковременных нагрузках.— *ПМТФ*, 1969, № 3.
20. Николаевский В. Н., Лившиц Л. Д., Сизов И. А. Механические свойства горных пород. Деформации и разрушение.— *Итоги науки и техники ВИНТИ. Мех. тв. деф. тела*, 1978, т. 11.
21. Крупнин А. В., Соловьев В. Я. и др. Деформация металлов взрывом. М.: Металлургия, 1975.
22. Николаевский В. Н. Дилатансия и законы необратимого деформирования грунтов.— *Основания, фундаменты и мех. грунтов*, 1979, № 5.
23. Васильев Ю. И., Молотова Л. В., Щербо М. Н. О структуре поля напряжений в очаге и параметрах очага при взрыве в мягком грунте.— *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 1979, № 11.
24. McKee C. R., Hanson M. E. Explosively created permeability from single charges.— *Soc. Petrol. Eng. J.*, 1975, December.
25. Спивак А. А., Цветков В. М. О взрыве в твердой среде типа горной породы.— *ФТПРПИ*, 1973, № 5.
26. Bukovich T. R., Lewis A. S. Aids for estimating effects of underground nuclear explosions. Lawrence Livermore Lab., UCRL — 50929, Rev. 1, 1973.

УДК 66.021.32 : 536.248.2

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ЗАКРУЧЕННОМ ГАЗОЖИДКОСТНОМ СЛОЕ

*А. П. Бурдуков, М. А. Гольдштик, А. Р. Дорохов,
В. И. Казаков, Т. В. Ли*

(Новосибирск)

Традиционный способ организации процессов переноса тепла и массы при прямом контакте фаз газ — жидкость на барботажных тарелках имеет определенные преимущества. На его основе созданы многочисленные типы тепло- и массообменных аппаратов, широко используемые в различных областях техники [1, 2]. Однако увеличение эффективности пенно-барботажных аппаратов наталкивается на принципиальные трудности, связанные с ограничением по скорости газовой фазы.

Дальнейшим развитием указанного способа является организация процессов тепло- и массопереноса в закрученных газожидкостных слоях, формирующихся в специальных вихревых камерах [3—5]. По данным [3] эффективность процессов переноса в вихревых газожидкостных аппаратах существенно выше, чем в обычных пенно-барботажных. Следует, однако, констатировать, что достаточно надежная методика расчета тепло- и массообмена в таких аппаратах отсутствует.

Важным этапом в создании методики расчета вихревых газожидкостных аппаратов является установление гидродинамических закономерностей газожидкостного слоя — его структуры, скорости вращения, среднего газосодержания, удельной поверхности контакта фаз (ПКФ) и т. п.

В результате предварительных гидродинамических исследований вихревой газожидкостной камеры [6] было установлено, что в поле центробежных сил, возникающих в закрученном слое, реализуется однородная пузырьковая структура слоя с диаметром пузырей d , значительно меньшим, чем в традиционных барботажных системах. Среднее газосодержание ϕ слабо зависит при этом от скорости газовой фазы w , отнесенной к полной площади направляющего аппарата. Для подобной системы

справедливо соотношение, которое связывает удельную поверхность контакта фаз (ПКФ) a с d и φ :

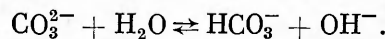
$$(1) \quad a = 6\varphi/d.$$

Непосредственное определение диаметров пузырей в закрученном газожидкостном слое сопряжено с большими техническими трудностями и с погрешностью, вносимой датчиками, располагаемыми в слое, вследствие их возмущающего влияния на определяемую структуру. Косвенное определение d возможно, если известна ПКФ в предположении выполнимости соотношения (1). Для экспериментального определения ПКФ наиболее подходит, как показал анализ [7—10], химический метод, широко используемый для этой цели в пенно-барботажных аппаратах. Сущность химического метода заключается в определении характеристик массопереноса при абсорбции, сопровождаемой химической реакцией (хемосорбции), и установлении связи этих характеристик с кинетикой протекающей химической реакции. Обычно для этой цели используют реакцию взаимодействия углекислого газа CO_2 с раствором щелочи, например NaOH .

Принимают, что взаимодействие CO_2 с раствором щелочи протекает по реакции [1]



с последующей быстрой реакцией



Таким образом, указанная реакция может рассматриваться как протекающая по первому порядку (реакция псевдопервого порядка), для которой при определенных ограничениях справедливо соотношение [8, 10]

$$(2) \quad \beta'_{\text{ж}} = \sqrt{\bar{c}k_2D_A},$$

где $\beta'_{\text{ж}}$ — коэффициент массоотдачи в жидкой фазе при хемосорбции; \bar{c} — средняя концентрация щелочи, кмоль/м³; D_A — коэффициент диффузии CO_2 в растворе, м²/с; k_2 — константа скорости химической реакции, м³/кмоль·с. Существенно, что в (2) не входят гидродинамические характеристики системы. Количество абсорбируемого вещества M (кмоль/с) может быть определено по уравнению

$$M = k'_{\text{ж}}Va(c_1 - \bar{c}_2),$$

где Va — полная межфазная поверхность, м²; c_1, c_2 — концентрация поглощаемого компонента на границе раздела и в массе жидкости, кмоль/м³; $k'_{\text{ж}}$ — коэффициент массопередачи в жидкой фазе при хемосорбции, включающий частные коэффициенты массоотдачи в жидкой $\beta'_{\text{ж}}$ и газовой β_y фазах:

$$\frac{1}{k'_{\text{ж}}} = \frac{1}{m\beta_y} + \frac{1}{\beta'_{\text{ж}}},$$

здесь m — константа фазового равновесия. Для необратимой химической реакции $c_2 = 0$ и

$$(3) \quad M = k'_{\text{ж}}aVc_1,$$

с другой стороны, количество вещества, поглощаемого в слое, можно определить по уравнению

$$(4) \quad M = G_p(c_{\text{н}} - c_{\text{к}})/z,$$

где z — стехиометрический коэффициент реакции; $c_{\text{н}}, c_{\text{к}}$ — начальная и конечная концентрация раствора, кмоль/м³; G_p — расход раствора, м³/с.

Если пренебречь сопротивлением газовой фазы, то можно считать парциальное давление газа на границе раздела фаз равным парциальному давлению в массе газа, тогда значение c_1 можно определить по закону Генри

$$(5) \quad c_1 = p_{\text{ср}}/mRT_*$$

где $p_{\text{ср}}$ — среднее парциальное давление CO_2 в смеси. Из уравнений (3)—(5) можно определить объемный коэффициент массопередачи

$$(6) \quad k'_{\text{жа}} = \frac{M}{Vc_1} = \frac{MmRT}{Vp_{\text{ср}}}$$

Зависимости (2), (6) используются для расчета удельной ПКФ.

Программа экспериментальных исследований вихревой газожидкостной камеры предусматривала исследование массопереноса в газовой фазе, определение ПКФ химическим методом и исследование теплообмена.

Экспериментальная установка (фиг. 1). Вращающийся газожидкостный слой формировался в плоском вихревом аппарате 1 с профилированными торцевыми стенками и с тангенциальной подачей газа через боковую поверхность [5]. Внутренний диаметр камеры 200 мм, высота направляющего аппарата 47 мм. Жидкость (0,5—2*N* раствор NaOH в воде) поступала в камеру из бака постоянного уровня 3 через калиброванный капилляр 4 и сливалась через отверстия в нижней крышке аппарата. Расстояние от направляющего аппарата 2 до этих отверстий определяло высоту пенного слоя *H*. Осушенный воздух из магистрали высокого давления смешивался в заданном соотношении с углекислым газом, который поступал из баллона 8 и через направляющий аппарат подавался в камеру, барботировал через жидкость и выходил в атмосферу по трубе 5. Закрутка слоя осуществлялась тангенциальной подачей газа в камеру 1 и дополнительным ее вращением электродвигателем постоянного тока 6 с регулируемым числом оборотов. Температура газа и жидкости до и после аппарата измерялась термомпарами, влажность воздуха — по показаниям сухой и мокрой термомпар с последующим пересчетом по психрометрической таблице. Расход воздуха и CO_2 измеряли мерными шайбами 7, 9, число оборотов камеры — частотомером, сигнал на который поступал от схемы с фотодиодом. Концентрацию раствора на входе и выходе из аппарата определяли титрованием отобранных проб соляной кислотой с добавлением хлористого бария.

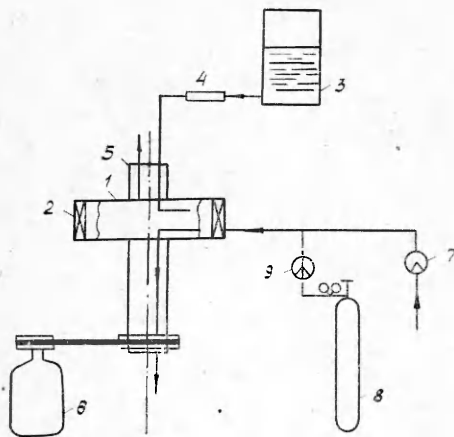
Массоотдача в газовой фазе. Методика расчета ПКФ предусматривает оценку диффузионного сопротивления в газовой фазе. Коэффициент массоотдачи в газовой фазе $\beta_{\text{га}}$ определялся в процессе десорбции водяного пара из раствора в воздух по формуле

$$(7) \quad \beta_{\text{га}} = G_{\text{н}} \rho' RT / V \Delta p_{\text{и}},$$

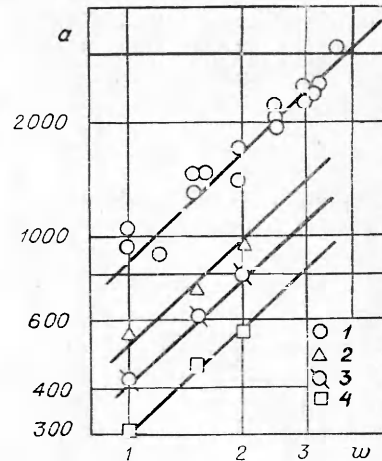
где ρ' — плотность воды, кг/м³; R — газовая постоянная, м³·Па/кмоль·К; T — средняя температура слоя, К; $\Delta p_{\text{и}}$ — среднелогарифмическая разность парциальных давлений водяного пара, Па; $G_{\text{н}}$ — количество воды, ушедшей на увлажнение воздуха, м³/с; V — объем газожидкостного слоя; μ — молекулярный вес воды;

$$(8) \quad G_{\text{н}}^* = G_{\text{н}} (1 - c_{\text{н}}/c_{\text{к}}); \quad \Delta p_{\text{и}}^* = \frac{p_1 - p_2}{\ln \frac{p_* - p_1}{p_* - p_2}} = \frac{\chi p_*}{\ln \frac{1}{1 - \chi}}$$

χ — влажность воздуха на выходе из слоя ($\chi_1 = 0$, $p_1 = 0$); p_* — равновесное давление водяного пара над растворами щелочей, Па [12]. Данные по $k'_{\text{жа}}$ и $\beta_{\text{га}}$, полученные в эксперименте, показали, что величина диффузионного сопротивления в газовой фазе составляет не более 5% от сум-



Ф и г. 1



Ф и г. 2

марного коэффициента массопереноса, что позволяет не учитывать его при расчете ПКФ и считать $k'_{ж}a \approx \beta'_{ж}a$.

Поверхность контакта фаз. Расчет ПКФ по формулам (2), (6) возможен при определенных концентрациях CO_2 на границе раздела фаз. Если зависимость M от c_1 линейна и проходит через начало координат, то расчет $\beta'_{ж}a$ по (6) и $\beta'_{ж}$ по (2) при постоянной поверхности контакта фаз должен укладываться на одну линию, проходящую под углом 45° , в этом случае

$$a = \beta'_{ж}a / \beta'_{ж}$$

Эти условия выполнялись при $c_1 = 2-4$ кмоль/м³, $y = 0-12\%$, $w \geq 1$ м/с.

На фиг. 2 приведены результаты определения ПКФ в зависимости от среднерасходной скорости газа w при различных значениях H и n . Точки 1 получены при $H = 20$ мм, $n = 350$ об/мин, $G_p = 6,1$ мл/с, точки 2-4 при $n = 200$ об/мин, $G_p = 2$ мл/с, $H = 12; 20$ и 35 мм соответственно.

Увеличение скорости газа приводит к существенному возрастанию ПКФ ($a \sim w^{0,9}$), в то время как в обычных барботажных аппаратах $a \sim w^{0,3}$ [5, 13, 14].

Полученную закономерность можно объяснить влиянием центробежного ускорения на диаметр пузырька. Согласно (1), $a \sim d^{-1}$. Полагая, что $d \sim l_k = \sqrt{\sigma / (g_* (\rho' - \rho''))}$ [1, 13], где l_k — капиллярная постоянная; σ — поверхностное натяжение, Н/м; ρ' , ρ'' — плотность жидкости и газа, кг/м³, и определяя центробежное ускорение как $g_* = w_{сл}^2 / R_k$, где $w_{сл}$ — скорость вращения слоя, м/с; R_k — внутренний радиус камеры, м, получим, что $a \sim w_{сл}$. Результаты гидродинамических исследований позволили установить, что скорость вращения слоя $w_{сл}$ однозначно связана при $n = \text{idem}$ линейной зависимостью с расходной скоростью газа w , поэтому $a \sim w$, что и имеет место в эксперименте.

Косвенное подтверждение зависимости (1) позволило использовать ее как основу для получения обобщенной зависимости для расчета ПКФ, не прибегая к анализу размерностей полной системы уравнений. Из (1) следует

$$ad = \delta\varphi.$$

В пенных слоях имеет место слабая зависимость φ от критерия Фруда $Fr = w^2 / gh_0$, где g — ускорение свободного падения; h_0 — высота «светлого слоя» жидкости [14]. В поле центробежных сил характерный линейный

масштаб (капиллярная постоянная) зависит от величины центробежного ускорения, определяемого, в свою очередь, скоростью вращения слоя, поэтому нет необходимости вводить эту скорость в явном виде в критериальное соотношение, тогда критерий Фруда можно записать в виде $Fr \sim \sqrt{l_k/h_0}$. С учетом сказанного можно предположить существование зависимости

$$al_k = f(l_k/h_0, \bar{g}_*),$$

где $\bar{g}_* = g_*/g$ — относительная величина центробежного ускорения.

Результаты эксперимента по определению ПКФ представлены на фиг. 3 в координатах $al_k/(h_0/l_k)^{0,3} - \bar{g}_*$, где сплошная линия — расчет по формуле

$$(9) \quad al_k = 0,33(l_k/h_0)^{0,3} \bar{g}_*^{0,6},$$

которая с точностью $\pm 10\%$ осредняет опытные точки. Формула (9) справедлива в диапазоне изменения параметров $0,2 \leq l_k/h_0 \leq 1,0$; $4,0 \leq \bar{g}_* \leq 40,0$. Точки 1 получены при изменении скорости газа, 2 — концентрации CO_2 в газе, 3 — расхода раствора, 4 — числа оборотов камеры, 5 — высоты пенного слоя. В барботажных аппаратах для расчета удельной ПКФ предлагается зависимость [9, 10]

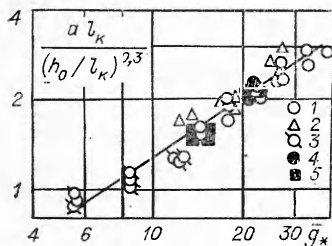
$$(10) \quad ah_0 = 0,61 Fr^{0,2} W^{-0,5} \varphi^{0,5} (\mu'/\mu_{H_2O})^{0,25}.$$

Влияние вязкости в (10) учитывается симплексом $(\mu'/\mu_{H_2O})^{0,25}$, где μ' , μ_{H_2O} — динамическая вязкость исследуемой жидкости и воды соответственно. В наших опытах величина среднего газосодержания изменялась слабо и значение $(\mu'/\mu_{H_2O})^{0,25}$ было практически постоянно (1,1—1,2). С учетом этих замечаний обработка полученных экспериментальных данных в координатах (10) дала расчетную зависимость

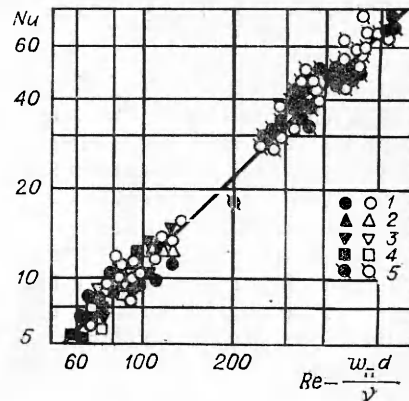
$$(11) \quad ah_c = 0,23 Fr^{0,18} W^{-0,47} \bar{g}_*^{0,60}.$$

Это свидетельствует о том, что удельную ПКФ в аппаратах с вращающимся барботажным слоем можно рассчитывать по уравнениям, полученным для обычных барботажных аппаратов с добавлением симплекса, учитывающего влияние закрутки слоя на величину a . В уравнениях (10), (11) в качестве линейного размера используется значение h_0 , которое существенно зависит от гидродинамики процесса. Предпочтительнее в этом случае за величину l брать значение $l_k = \sqrt{\sigma/(g_*(\rho' - \rho''))}$, тогда уравнение для расчета ПКФ значительно упрощается, например, уравнение (9) можно получить из (11), заменяя величину h_0 на l_k .

Совокупность полученных результатов по зависимости ПКФ от различных параметров позволяет сделать вывод об определяющем влиянии центробежного ускорения на



Фиг. 3



Фиг. 4

структуру барботажного слоя и величину ПКФ. В этой связи можно предположить, что конструктивные особенности различных вихревых газожидкостных аппаратов, заключающиеся в различных способах закрутки слоя, не могут существенно изменить структуру двухфазного слоя, а значит, ПКФ, определяемую по формуле (9).

Тепло- и массоперенос. Результаты определения температуры рабочих сред до и после аппарата были использованы для расчета теплоотдачи. Тепловой поток Q , подведенный к газожидкостному слою, определялся теплотой фазового перехода и конвекцией ($Q = Q_{\text{н}} + Q_{\text{к}}$).

При охлаждении сухого воздуха эти составляющие теплового потока имеют разный знак, и при их равенстве температура жидкости сохраняется постоянной, что и реализовалось в некоторых опытах.

Количество тепла, отводимое газом за счет конвекции, рассчитывалось по соотношению

$$Q_{\text{к}} = wF_{\text{н}}c_p(t_1 - t_2),$$

где c_p — теплоемкость сухого воздуха, Дж/кг·К; t_1, t_2 — температура воздуха до и после аппарата. Коэффициент теплоотдачи, отнесенный к ПКФ, рассчитывался по формуле

$$\alpha = Q_{\text{к}}/Va\Delta t,$$

где Δt — среднеарифметическая разность температур воздуха и воды. Результаты опытов по тепло- и массопереносу в газовой фазе с использованием результатов определения ПКФ могут быть представлены в виде

$$\text{Nu}_{T,D} = A \text{Re}^m \text{Pr}_{T,D}^n,$$

где $\text{Re} = w_{\text{н}}d/v''$ — критерий Рейнольдса; $\text{Nu}_T = \alpha d/\lambda''$, $\text{Nu}_D = \beta_d d/D$ — тепловой и диффузионный критерии Нуссельта; $\text{Pr}_T = \nu''/\lambda''$, $\text{Pr}_D = \nu''/D$ — тепловой и диффузионный критерии Прандтля; λ'' , ν'' , α'' — теплопроводность, кинематическая вязкость и температуропроводность воздуха; D — коэффициент диффузии пара в воздухе; $d, w_{\text{н}}$ — диаметр и скорость всплытия пузырьков. Индексы T и D соответствуют тепловым и диффузионным параметрам. Физические свойства газовой фазы в опытах изменялись незначительно, что в данном случае позволяет исключить из рассмотрения влияние числа Прандтля.

Средний диаметр пузыря рассчитывался по формулам (4), (8), а скорость всплытия — по формуле, взятой из работы [13],

$$w_{\text{н}} = \sqrt{\frac{2\sigma}{d(\rho' - \rho'')} + g_* \frac{d}{2}}.$$

Результаты эксперимента по тепло- и массопереносу обобщены на фиг. 4 в координатах $\text{Nu}_{T,D} - \text{Re}$, где сплошная линия — расчет по формуле

$$\text{Nu}_{T,D} = 0,105\text{Re},$$

которая с точностью $\pm 15\%$ осредняет результаты эксперимента. Факт совпадения данных по тепло- и массопереносу в обобщенных координатах свидетельствует о выполнении аналогии Рейнольдса в рассматриваемом случае и является дополнительным подтверждением корректности приведенного эксперимента.

Полученные данные по определению удельной ПКФ, тепло- и массопереноса во вращающемся газожидкостном слое можно рассматривать как начальный этап в создании более полной и строгой методики расчета вихревых газожидкостных аппаратов, ибо получены для системы газ — жидкость, физические свойства которых изменялись в достаточно узких интервалах. Тем не менее результаты эксперимента и приведенного анализа рекомендуются для расчета таких аппаратов с рабочими средами, имеющими близкие физические свойства.

На фиг. 4 темные точки получены в опытах по исследованию массоотдачи и представляют значения диффузионного числа Нуссельта Nu_{D^*} , светлые — в опытах по теплоотдаче и соответствуют тепловому числу Нуссельта Nu_T . При этом точки 1 получены при изменении скорости газа, 2 — концентрации CO_2 в газе, 3 — расхода раствора, 4 — числа оборотов камеры, 5 — высоты слоя.

Поступила 26 IX 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Рамм В. М. Абсорбция газов. М.: Химия, 1966.
2. Богатых С. А. Циклонно-пенные аппараты. Л.: Машиностроение, 1978.
3. Сафронов А. И., Рева Э. П. и др. Массопередача на входном участке вращающегося барботажного слоя. — ТОХТ, 1976, т. 10, № 4.
4. Андреев Е. И., Коркин В. Д. Расчет процессов в центробежном теплообменном аппарате. — Изв. высш. учеб. заведений. Строительство и архитектура, 1976, № 11.
5. Овчинников А. А. Исследование гидроаэродинамических закономерностей в вихревом массообменном аппарате с тангенциальными завихрителями. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Казань: изд. Казан. хим.-технол. ин-та им. С. М. Кирова, 1973.
6. Гольдштик М. А., Кутателадзе С. С. и др. Вихревая камера. Авт. свидетельство № 613822, м. кл ВО 4 С5/103. БИ, 1978, № 25.
7. Астарита Дж. Массопередача с химической реакцией. Л.: Химия, 1971.
8. Родионов А. И., Винтер А. А. Исследование химическим методом поверхности контакта фаз на ситчатых решетках. I. — Изв. высш. учеб. заведений. Химия и химическая технология, 1966, № 6.
9. Винтер А. А. Определение межфазной поверхности на барботажных тарелках. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. МХТИ, 1966.
10. Родионов А. И., Сорокин В. Е. К расчету поверхности контакта фаз в процессе абсорбции CO_2 растворами щелочей на ситчатых тарелках. — Журнал прикл. химии, 1970, № 11.
11. Родионов А. И., Винтер А. А. Массопередача в газовой фазе на переточных ситчатых тарелках. — Труды МХТИ им. Д. И. Менделеева, 1966, вып. 51.
12. Справочник химика. Т. 3. М.—Л.: Химия, 1964.
13. Кутателадзе С. С., Стырикович М. А. Гидродинамика газожидкостных систем. М.: Энергия, 1976.
14. Дорохов А. Р., Казаков В. И. Исследование гидродинамики тонких газожидкостных слоев на ситчатых решетках. — Хим. и нефтян. машиностроение, 1979, № 12.
15. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. Новосибирск: Наука, 1970.

УДК 532.72

О НЕСТАЦИОНАРНОМ КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛО- И МАССОБМЕНЕ В ЖИДКОСТИ ПРИ БОЛЬШИХ ЧИСЛАХ ПЕКЛЕ

А. Д. Полянин, П. А. Прядкин
(Москва)

В [1] при помощи преобразования Лапласа по времени был определен диффузионный поток на поверхность капли, обтекаемой стационарным стоксовым потоком (поле скоростей Рыбчинского — Адамара), в случае нестационарной диффузии при внезапном включении реакции. В работах [2—5] для анализа ряда нестационарных пограничных задач использовалась автомодельная переменная $\xi \delta^{-1}(z, \eta)$ (ξ и η — нормальная и тангенциальная координаты, связанные с поверхностью тела, t — время, δ — толщина диффузионного пограничного слоя), позволяющая свести исходное уравнение конвективной диффузии к уравнению в частных производных первого порядка для толщины по-