

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОБМЕНА
В ПОЛЫХ КОНТАКНЫХ ЭКОНОМАЙЗЕРАХ**

А.Г. Муравьев, А.С. Жданов, В.Н. Дунин, Р.И. Хисамов

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого,
ОАО «НПО «Квант» г. Великий Новгород, Россия

Alexandr.Muravev@yandex.ru

This research was carried out on a basis of a mathematical model previously proposed, which allows to obtain the theoretical dependence of the temperature changes of smoke gases, water and the concentration of water vapor in the gas from the height of the apparatus for the cases of co-current and counter-current movement of phases. It was established that schedules of change of water temperature and concentration of water vapor in gas have an obvious extremum. In addition, such parameters as time of achievement of a maximum of temperature of heated-up water and the maximum value of its temperature slightly differ for the cases of co-current and counter-current movement of phases under the same conditions at the entrance to apparatus. In a time interval of increase in temperature of liquid, decrease of concentration of oxides of nitrogen in smoke gases, and the increase in a share of their content in water is negligible.

В настоящее время основная тенденция развития энергетики связана с повышением эффективности использования топливно-энергетических ресурсов, а также с увеличением доли использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР). Немаловажной задачей является вопрос охраны окружающей среды, связанный, в первую очередь, со снижением выбросов загрязняющих веществ.

Одним из основных способов повышения эффективности использования природного газа является утилизация тепла уходящих газов котельных установок. При этом максимальное использование топлива возможно при глубоком охлаждении дымовых газов ниже точки росы и утилизации как физического тепла, так и скрытой теплоты конденсации содержащихся в них водяных паров. Для решения данной задачи в практике котельных установок находят применение принципиально два вида устройств – поверхностные водяные экономайзеры и

контактные теплообменники. Преимуществами последних являются относительно большая интенсивность теплообмена, малые габариты и металлоемкость, простота конструкции. Однако при всех преимуществах при создании таких аппаратов существует ряд сложностей, связанных, в первую очередь, с непосредственным контактом нагреваемой воды с дымовыми газами.

Целью данной работы являлось выявление важных особенностей, возникающих при протекании процессов тепломассообмена в полых контактных аппаратах, предназначенных для утилизации теплоты дымовых газов в котельных установках.

Исследование проведено на базе математической модели, предложенной ранее в статьях [1], [2], позволяющей получить теоретические зависимости изменения температур дымовых газов, воды и концентрации водяных паров в газе по высоте аппарата для случаев прямоточного и противоточного движения фаз. В данной модели принят ряд допущений. Жидкость представляет собой равномерно распределенные по объему контактного теплообменника капли одинаковых размеров радиуса R . Влияние соседних капель не учитывается. Предполагается известной временная зависимость средней по объёму капли температуры для случая, когда на поверхности капли поддерживается постоянная температура. Эта зависимость может быть получена при аналитическом или численном решении внутренней задачи тепло- или массопереноса на капле, а также экспериментально. Теплоперенос и массоперенос к капле в газовой фазе описываются с помощью осреднённых по площади поверхности капли не зависящих от времени коэффициентов теплоотдачи α и массоотдачи β соответственно. Предполагается, что равновесная зависимость парциального давления пара от температуры в рассматриваемом интервале температур имеет линейный вид. Считаются заданными следующие величины:

$T_{\infty H}$ - температура газа на входе в аппарат; T_{dH} - температура жидкости на входе в аппарат;
 $c_{\infty H}$ - мольная концентрация пара в газе на входе в аппарат; W_d - объемный расход жидкости в аппарате; W_c - объемный расход газа в аппарате.

Решение уравнений, составляющих математическую модель, представляет собой зависимости от безразмерного времени τ безразмерной температуры газа Θ_{∞} , безразмерной

средней по объему капли температуры жидкости Θ_d , а также безразмерной мольной

концентрации пара в газовой фазе Φ_∞ , определяемых следующим образом: $\Theta_\infty = \frac{T_\infty - T_{dH}}{T_{\infty H} - T_{dH}}$,

$$\Theta_d = \frac{T_d - T_{dH}}{T_{\infty H} - T_{dH}}, \quad \Phi_\infty = \frac{c_\infty - c_{dH}^*}{c_{\infty H}^* - c_{dH}^*}, \quad \tau = \frac{a_d t}{R^2}, \text{ где}$$

T_∞ - температура газа; T_d - средняя по объему капли температура жидкости; c_∞ - мольная

концентрация пара в газе; c_{dH}^* - мольная концентрация насыщенного пара в газе при

температуре T_{dH} ; $c_{\infty H}^*$ - мольная концентрация насыщенного пара в газе при температуре $T_{\infty H}$;

a_d - коэффициент температуропроводности жидкости; t - размерное время.

Решение уравнений зависит от пяти безразмерных параметров: $\chi = \frac{W_d C_{pd} \rho_d}{W_c C_{pc} \rho_c}$,

$$\omega = \frac{r_m \eta}{C_{pc} \rho_c}, \quad \gamma_T = \frac{3R\alpha W_d}{C_{pc} a_d \rho_c W_c}, \quad \gamma_\Phi = \frac{3R\beta W_d}{a_d W_c}, \quad \delta = \frac{\eta \beta r_m}{\alpha}, \text{ где}$$

C_{pd} , ρ_d - изобарная теплоемкость и плотность жидкости; C_{pc} , ρ_c - изобарная теплоемкость и

плотность газа; r_m - удельная мольная теплота конденсации пара; η - коэффициент, входящий

в выражение, связывающее мольную концентрацию пара в газе на поверхности капель с

температурой $c_f = \eta T_f + \mathcal{G}$, где $\eta = (c_{\infty H}^* - c_{dH}^*) / (T_{\infty H} - T_{dH})$,

$$\mathcal{G} = (T_{\infty H} c_{dH}^* - T_{dH} c_{\infty H}^*) / (T_{\infty H} - T_{dH}).$$

В случае противоточного движения фаз возникает дополнительный параметр –

безразмерное время движения капли в аппарате $\tau_K = a_d t_K / R^2$, t_K - размерное время движения

капель в аппарате.

Связь между временем контакта взаимодействующих потоков теплоносителей t и

высотой аппарата H при известной скорости движения капель жидкости относительно стенок

теплообменника U_T определяется соотношением $t = H / U_T$.

Ниже приведены результаты исследования на основе разработанной математической модели совместного протекания процессов тепломассообмена в полых контактных экономайзерах при прямоточном и противоточном движениях фаз в виде графических зависимостей изменения безразмерных средней по объему капли температуры воды, температуры газа и мольной концентрации пара в газе от безразмерного (или размерного) времени, построенных при различных условиях и следующих исходных данных: $T_{dH} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\infty H} = 180 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $c_{\infty H} = 6,776 \text{ моль/м}^3$, $W_d = 0,00086 \text{ м}^3/\text{с}$, $W_c = 2,0 \text{ м}^3/\text{с}$, $C_{pd} = 4170 \text{ Дж}/(\text{кг К})$, $C_{pc} = 1370 \text{ Дж}/(\text{кг К})$, $\rho_d = 995 \text{ кг/м}^3$, $\rho_c = 0,968 \text{ кг/м}^3$, $\lambda_d = 0,61 \text{ Вт}/(\text{м К})$, $a_d = 1,473 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, $r_m = 43670 \text{ Дж/моль}$. Для расчета коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи использованы выражения, приведенные в [3], для определения скорости движения капель относительно потока газа U – выражение из [4].

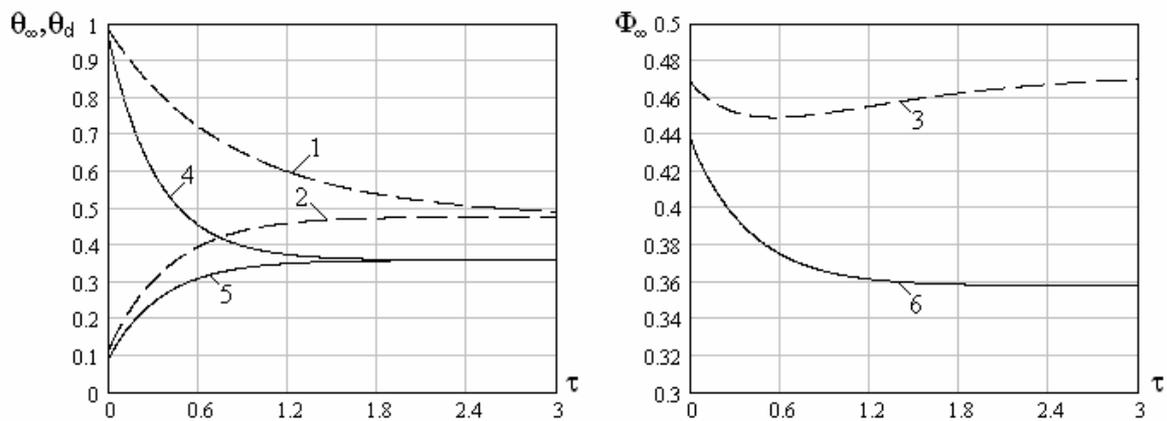


Рис. 1.

Прямоточное движение фаз, $R = 0,5 \text{ мм}$, $\alpha = 323,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$, $\beta = 0,271 \text{ м/с}$, $U = 5,52 \text{ м/с}$;

1, 2, 3 – зависимости соответственно $\Theta_{\infty}(\tau)$, $\Theta_d(\tau)$, $\Phi_{\infty}(\tau)$ при $\chi = 1,345$;

4, 5, 6 – зависимости соответственно $\Theta_{\infty}(\tau)$, $\Theta_d(\tau)$, $\Phi_{\infty}(\tau)$ при $\chi = 4,036$.

На рисунке 1 приведены графики изменения исследуемых величин при различных значениях параметра χ , определяющего соотношение расходов взаимодействующих потоков теплоносителей. Вода на начальном этапе быстро нагревается (зависимости 2, 5) как за счет физической теплоты дымовых газов, так и за счет теплоты выделяющейся при конденсации водяных паров: температура дымовых газов снижается (зависимости 1, 4), мольная

концентрация пара в газе уменьшается (зависимости 3, 6). Далее по ходу движения потоков в теплообменнике скорость нагрева воды уменьшается, и в конечном итоге температура воды достигает максимально возможного предела. Величина максимально достижимой температуры жидкости на выходе из аппарата возрастает по мере снижения расхода воды по отношению к расходу газа. Существенно зависит от параметра χ и характер изменения мольной концентрации водяного пара в дымовых газах. При сравнительно большом его значении (зависимость 6) концентрация пара в газе по всей высоте аппарата снижается. Другая картина возникает при снижении параметра χ , т.е. уменьшении расхода воды по сравнению с потоком газа. Зависимость 3 имеет явный минимум, конденсация водяных паров наблюдается только на начальном этапе взаимодействия потоков теплоносителей. С момента времени $\tau = 0,56$ наблюдается обратная ситуация. Начинается испарение жидкости с поверхности капель, т.е. увеличение концентрации водяного пара в газе. Если целью установки контактного экономайзера является не нагрев воды до максимально возможной или требуемой температуры, а достижение максимального КПД использования топлива, то работа аппарата в подобном режиме является не эффективной.

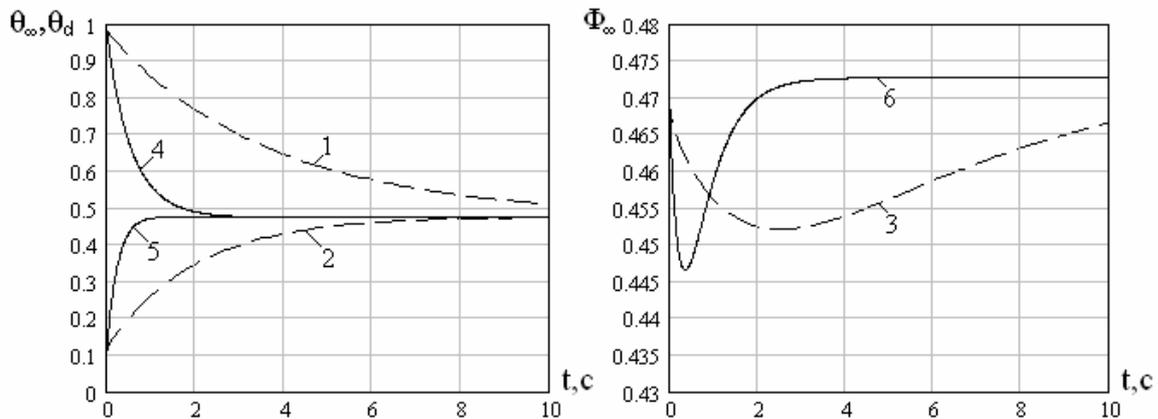


Рис. 2.

Прямоточное движение фаз, $\chi = 1,345$;

1, 2, 3 – зависимости соответственно $\Theta_{\infty}(t), \Theta_d(t), \Phi_{\infty}(t)$ при $R = 1,0$ мм,

$\alpha = 253,6$ Вт/(м² К), $\beta = 0,2$ м/с, $U = 7,8$ м/с;

4, 5, 6 – зависимости соответственно $\Theta_{\infty}(t), \Theta_d(t), \Phi_{\infty}(t)$ при $R = 0,25$ мм,

$\alpha = 420,8$ Вт/(м² К), $\beta = 0,373$ м/с, $U = 3,9$ м/с.

Существенное влияние на интенсивность протекания процессов тепломассообмена в контактных экономайзерах оказывает размер капель жидкости (см. рисунок 2). Размер частиц, во-первых, влияет на скорость их движения относительно потока газа. Величина скорости U в данной математической модели определялась из условия равенства сил тяжести и сопротивления, действующих на падающую каплю. Во-вторых, радиус капли R входит в определение безразмерного времени τ . Для адекватного сравнения графические зависимости, определенные при различных значениях размера капель, приведены к размерному времени t . Из графиков, приведенных на рисунке 2, видно, что с уменьшением размера капель воды скорость протекания процессов тепло- и массообмена существенно увеличивается. Величина максимально достижимой температуры воды (зависимости 2, 5), получаемой на выходе из теплообменника, не зависит от радиуса частиц жидкости, значение же экстремума мольной концентрации водяного пара в газе (зависимости 3, 6) оказывается меньше при снижении размера капель воды.

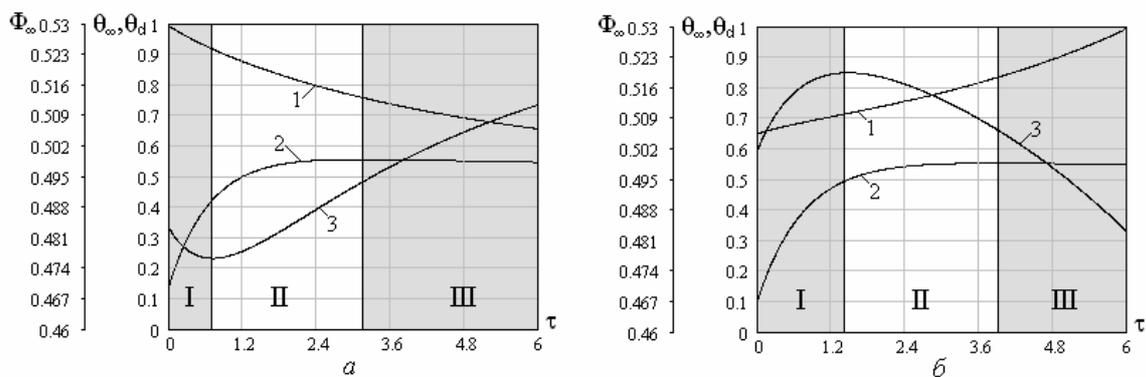


Рис. 3.

a – прямоточное движение фаз, b – противоточное движение фаз;
 1, 2, 3 – зависимости соответственно $\Theta_{\infty}(\tau)$, $\Theta_d(\tau)$, $\Phi_{\infty}(\tau)$ при $\chi = 4,404$, $R = 0,25$ мм,
 $\alpha = 420,8$ Вт/(м² К), $\beta = 0,373$ м/с, $U = 3,9$ м/с.

Из приведенных выше зависимостей видно, что соотношение расходов взаимодействующих потоков теплоносителей и размер капель жидкости оказывают существенное влияние на характер изменения исследуемых величин в контактных экономайзерах. В общем случае, при определенном сочетании параметра χ и радиуса капель R возможна ситуация, представленная на рисунке 3. Как отмечалось ранее, на начальном этапе

(зона I) вода быстро нагревается как за счет физической теплоты дымовых газов, так и за счет теплоты, выделяющейся при конденсации водяных паров. При этом концентрация паров жидкости в газе снижается. Далее по ходу движения воды в контактном теплообменнике начинается обратный процесс (зона II) испарения с поверхности капель. Теперь концентрация водяного пара в газе увеличивается. При этом количество теплоты, затраченное на испарение воды, меньше количества физической теплоты, отдаваемой каплям жидкости в ходе охлаждения дымовых газов. Температура воды продолжает увеличиваться, однако скорость нагрева воды постепенно снижается. После достижения максимума температуры жидкости количество теплоты, затраченное на испарение воды, начинает превышать количество физической теплоты, получаемой от охлаждаемых газов. При этом температура воды начинает уменьшаться по ходу движения в аппарате (зона III).

Следует отметить, что снижение температуры дымовых газов происходит в течение всего времени по ходу движения в теплообменном аппарате. Однако, доля тепловой энергии, получаемой при фазовом переходе содержащейся влаги, существенно превышает количество теплоты, выделяющейся при охлаждении дымовых газов в рассматриваемом интервале температур. Поэтому работа контактного экономайзера в зоне II становится не эффективной, т.к. КПД системы котельной установки с контактным экономайзером при этом уменьшается. Работа же теплообменника в зоне III не имеет смысла, и, более того, недопустима, т.к. противоречит основной цели установки данного аппарата: нагрев воды, использование скрытой теплоты конденсации паров жидкости и в конечном итоге повышение КПД котельного агрегата.

В соответствии с рисунком 3а безразмерное время, соответствующее экстремуму мольной концентрации водяного пара в газе (переход из зоны I в зону II), составляет $\tau_1 = 0,7$ ($t_1 = 0,3$ с), безразмерное время, соответствующее экстремуму температуры воды (переход из зоны II в зону III), составляет $\tau_2 = 3,0$ ($t_2 = 1,27$ с). Скорость движения капель относительно потока газа $U = 3,9$ м/с, примем скорость движения дымовых газов относительно стенок теплообменника $U_{\Gamma} = 1,5$ м/с, тогда скорость капель воды относительно стенок

теплообменника при прямоочном движении фаз составит $U_T = U + U_T = 5,4$ м/с. Оценим габариты контактного экономайзера, при которых возможно наблюдать все указанные зоны, $H = U_T t = 6,9$ м. Данная величина сопоставима с габаритными размерами аппаратов подобного типа. Таким образом, при разработке контактных экономайзеров при определенных условиях следует ограничивать время контакта капель жидкости с потоком газа, что может достигаться путем соответствующего выбора типоразмера агрегата при заданных параметрах взаимодействующих потоков на входе и выбранной схеме движения теплоносителей, или изменять параметры теплоносителей на входе в аппарат для смещения времени наступления неэффективной (недопустимой) зоны эксплуатации за пределы теплообменника.

Исследования показали, что существенной разницы между противоточной и прямоочной схемой движения теплоносителей нет (см. рисунок 3а, 3б): время наступления максимума температуры нагреваемой воды и минимума концентрации водяных паров в газе, а также максимальная температура нагрева воды при одинаковых условиях на входе в экономайзер отличаются друг от друга незначительно.

Одной из серьезных проблем, сдерживающих использование контактных теплообменных аппаратов при утилизации теплоты дымовых газов, считается растворение в воде оксидов, содержащихся в газовой фазе. Поэтому на основе аналогичной математической модели [5], [6] исследовалось поглощение оксидов азота в контактных теплообменниках при сжигании в котельных агрегатах природного газа. Решение данной модели представляет собой зависимости безразмерной концентрации компонента А в жидкой Φ_{Ad} и газовой фазах $\Phi_{A\infty}$ от безразмерного времени τ_A , определяемых следующим образом: $\Phi_{Ad} = \frac{c_{Ad} - c_{AdH}}{c_{A\infty H} / m_A - c_{AdH}}$,

$$\Phi_{A\infty} = \frac{c_{A\infty} / m_A - c_{AdH}}{c_{A\infty H} / m_A - c_{AdH}}, \tau_A = \frac{D_d t}{R^2}, \text{ где}$$

c_{Ad} - мольная концентрация компонента А в жидкости; c_{AdH} - мольная концентрация компонента А в жидкости на входе в аппарат; $c_{A\infty}$ - мольная концентрация компонента А в газе; $c_{A\infty H}$ - мольная концентрация компонента А в газе на входе в аппарат; m_A - константа

равновесия, связывающая молярные концентрации компонента А на поверхности капли в газовой и жидкой фазах $c_{Aэф} = m_A c_{Adf}$ (индекс f обозначает, что значения соответствующих концентраций берутся на поверхности капли); D_d - коэффициент диффузии компонента А в жидкости.

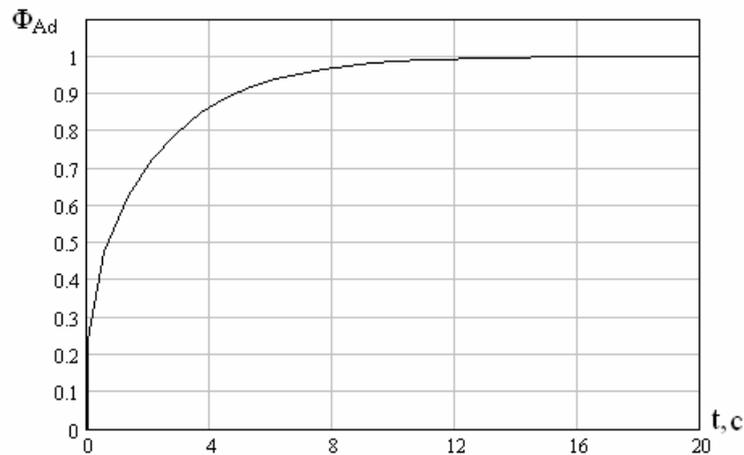


Рис. 4.

Прямоточное движение фаз, $m_A = 24,1$, $R = 0,25$ мм, $D_d = 2,35 \cdot 10^{-9}$ м²/с;
Зависимость безразмерной молярной концентрации NO_x в жидкости от размерного времени
 $\Phi_{Ad}(t)$

Анализ расчетов показал, что растворение оксидов азота протекает медленнее по сравнению с теплообменными процессами (см. рисунок 4). В рассматриваемом временном промежутке (зона I, зона II) до момента наступления максимума температуры нагреваемой жидкости снижение концентрации окислов азота в дымовых газах и увеличение доли их содержания в воде незначительно. Таким образом, применение подобных аппаратов в качестве устройств для снижения выбросов оксидов азота в дымовых газах малоэффективно, однако это позволяет сделать вывод о возможном использовании в некоторых случаях воды, нагреваемой в контактном экономайзере рассмотренного типа, в системах теплоснабжения.

Результаты анализа приведенных в статье зависимостей могут быть полезными при расчетах процессов теплообмена и проектировании полых контактных аппаратов.

Литература

1. Murav'ev A.G. Mathematical Modeling of Heat and Mass Transfer in Gas Absorption on a Drop of a Volatile Absorbent. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2005. Vol. 39. No. 4. pp. 379-384.
2. Муравьев А.Г., Жданов А.С., Дунин В.Н. Математическое моделирование охлаждения потока газа каплями жидкости при противоточном движении фаз. VI-й Минский международный форум по тепломассообмену. Тезисы докладов и сообщений. Минск: ИТМО имени А.В. Лыкова. 2008 т.2, с.147-149.
3. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. Bubbles, Drops and Particles. N.Y.: Academic Press, 1978. 380 p.
4. Рамм В.М. Абсорбция газов. Изд. 2-е, переработ. и доп. М., «Химия», 1976.
5. Муравьев А.Г., Дунин В.Н. Моделирование охлаждения потока газа каплями жидкости при прямоточном движении фаз с учётом абсорбции. Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-20: Сб. трудов XX Международ. науч. конф.: Т. 3. Ярославль: Изд-во Яросл. гос. тех. ун-та, 2007. с. 36-39.
6. Murav'ev A.G., Doonin V.N. Mathematical modeling of cooling of gas flow by drops of a liquid at co-current movement of phases. Heat Transfer Research. 2008. Vol. 39. No. 5. pp. 441-451.