

## Математическая модель термической деаэрации воды в насадочных колоннах

# 04, апрель 2011

авторы: Лаптев А. Г., Долгов А. Н.

УДК 621.182.12

Казанский государственный энергетический университет  
[tosha007@list.ru](mailto:tosha007@list.ru)

### Введение

Большой проблемой теплоэнергетики является неудовлетворительная работа деаэрационных установок для термической деаэрации питательной воды паровых котлов (деаэрация предназначена для удаления из воды агрессивных газов – кислорода и углекислоты), из за чего происходит интенсивная внутренняя коррозия трубопроводов тепловых сетей, котлов и вспомогательного оборудования. Бывает, что вместо 20 -30 лет тепловые сети служат пять лет. Особенно неблагоприятно обстоят дела в тепловых сетях с открытым водозабором – открытая теплосеть отличается большим расходом воды на подпитку теплосети, так как по одной трубе подается вода на отопление и на горячее водоснабжение.

Задачей расчета деаэраторов является определение размеров зоны деаэрации, обеспечивающих эффективное удаление растворенных эффективных газов из воды. Однако, расчет данных аппаратов выполняется по полуэмпирическим моделям, что ограничивает их модернизацию с использованием новых контактных устройств.

В последние годы в практике отечественных и зарубежных предприятий сложилась устойчивая тенденция к замене устаревших контактных элементов (барботажных тарелок, насадок и т.п.) преимущественно в вакуумных и атмосферных колоннах на модернизированные или вновь разработанные виды насадок, обладающих более широким интервалом устойчивой работы и большей эффективностью.

Насадочные колонны находят широкое применение в промышленности при проведении процессов абсорбции, ректификации и жидкостной экстракции. К достоинствам насадочных колонн можно отнести высокую эффективность и широкий интервал устойчивой работы, сравнительно невысокую стоимость и простоту конструкций, небольшое гидравлическое сопротивление, что особенно важно для работы вакуумных колонн.

При создании насадок новых типов ставятся следующие цели: во-первых, увеличение эффективности массообменного процесса, во – вторых, расширение интервала устойчивой работы аппарата (как по нижнему, так и по верхнему пределам). Для достижения указанных целей насадки должны удовлетворять определенным технологическим требованиям:

- высокая эффективность (то есть по возможности более низкое значение ВЭТТ, более высокие значения коэффициентов массопередачи и степени извлечения);
- небольшое обратное перемешивание;
- низкое гидравлическое сопротивление;
- высокая пропускная способность;
- простота монтажа в колонну.

### **Двухмерная модель**

Эффективность работы насадочных колонн существенно зависит от гидродинамических условий движения газа (пара) и жидкости. Гидродинамика потоков определяется сложной геометрией каналов, формируемых размещением и размером насадки в слое и материалом насадочных элементов, а также входными неравномерностями. Сложные зависимости отмеченных факторов и их взаимное влияние значительно затрудняют получить строгое математическое описание массопереноса и выполнить расчет эффективности разделения. Поэтому, обычно при составлении математических моделей принимают различные допущения. Приемлемость допущений корректируют и проверяют экспериментально.

Для расчета гидродинамики в насадке часто используют различные модификации уравнения Дарси [1, 2] ( $Re < 4$ ) и уравнения Эргана [3, 4], учитывающие силы энергии и вязкости. При  $Re \gg 4$  обычно используют уравнение Эргана, содержащие только квадратичный член [5, 6]. Зернистая среда, или насадочный слой, часто моделируется как случайный массив ячеек идеального перемешивания с определенными связями между ними [7, 8].

В работе [9] рассмотрена двумерная модель насадочного слоя и получена система уравнений для расчета профилей скорости и концентрации. Использование вариационного метода для расчета физических полей в насадочных колоннах представлено в работах [10, 11].

Задачей модернизации колонн является выбор типа насадки, ее геометрических размеров и высоты слоя (количество секций) в аппарате при заданном качестве разделения и производительности.

Систему дифференциальных уравнений записывают для сплошной фазы, а влияние дисперсной учитывают параметрически за счет источников. Источниковые члены связаны с характеристиками пограничного слоя, который образуется на границе раздела фаз [12, 13].

Используя основные концепции модели скоростного континуума для многофазных потоков [14], рассмотрена наиболее физически обоснованная модель движения сплошной среды в слоях насадки, основанная на уравнениях Навье-Стокса. В цилиндрических координатах система уравнений турбулентного переноса импульса (уравнения движения) имеет вид:

$$\begin{cases} \rho_z v \frac{\partial v}{\partial r} + \rho_z u \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \left[ \frac{1}{r} (\mu_z + \mu_{Tz}) \frac{\partial(rv)}{\partial r} + (\mu_z + \mu_{Tz}) \frac{\partial v}{\partial z} \right] + R_{Pr}, \\ \rho_z v \frac{\partial u}{\partial r} + \rho_z u \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \left[ \frac{1}{r} (\mu_z + \mu_{Tz}) \frac{\partial(ru)}{\partial r} + (\mu_z + \mu_{Tz}) \frac{\partial u}{\partial z} \right] + R_{Pz}, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_z r v)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_z u)}{\partial z} = R_{cz}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $v$  - составляющая вектора скорости в радиальном направлении  $r$ , м/с;  $u$  - составляющая вектора скорости в проекции на ось  $Oz$ , м/с;  $R_{Pr}$ ,  $R_{Pz}$  - проекции силы межфазного взаимодействия на оси  $Or$  и  $Oz$ ;  $R_{cz} = \frac{dG}{dV_z}$  - поток массы компонента из одной фазы в другую в элементарном объеме  $dV_z$ ;  $\mu_z$ ,  $\mu_{Tz}$  - коэффициенты молекулярного и турбулентного переноса, Па·с;  $\rho_r$  - плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.

Учет жидкой фазы осуществляется с помощью источников  $R_{Pr}$ ,  $R_{Pz}$ , а также корректировки объема, по которому производится интегрирование:

$$dV_z = d(V_{cz} - \varepsilon_{ж}), \quad (2)$$

где  $dV = dx dy dz = \pi r dr dz$ ;  $V_{cz}$  - удельный свободный объем насадки, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon_{ж}$  - удерживающая способность насадки по жидкой фазе, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Уравнение переноса массы компонента в газовой фазе:

$$v \frac{\partial C}{\partial r} + u \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ (D_z + D_{Tz}) r \frac{\partial C}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (D_z + D_{Tz}) \frac{\partial C}{\partial z} \right] + R_{Cz}, \quad (3)$$

где  $C$  - концентрация;  $D_z$ ,  $D_{Tz}$  - коэффициенты молекулярной и турбулентной диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $R_{Cz}$  - источник массы.

Уравнение переноса тепла в газовой фазе:

$$v \frac{\partial H}{\partial r} + u \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ (\lambda_z + \lambda_{Tz}) r \frac{\partial T_z}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\lambda_z + \lambda_{Tz}) \frac{\partial T_z}{\partial z} \right] + R_{Tz}, \quad (4)$$

где  $H$  - энтальпия, Дж/кг;  $T_z$  - температура;  $\lambda_z, \lambda_{Tz}$  - коэффициенты молекулярной и турбулентной теплопроводности, Вт/(мК);  $R_{Tz}$  - источник тепла.

Применительно к слою насадок в колонне эти уравнения должны дополняться следующими краевыми условиями:

- при  $z = 0$ :  $u = u_n, C = C_n, T_z = T_{zn}$  (на входе);
- при  $z = 1$ :  $\partial u / \partial z = 0, \partial C / \partial z = 0, \partial T_z / \partial z = 0$  (на выходе);
- при  $r = 0$ :  $\partial v / \partial r = 0, \partial C / \partial r = 0, \partial T_z / \partial r = 0$  (на оси симметрии);
- при  $r = \pm R$ :  $v = 0, u = -U_{эф}, \partial C / \partial r = 0, q = -\lambda \partial T_z / \partial r$  (на стенках);

где  $U_{эф}$  - скорость на межфазной поверхности стекающей пленки жидкости, м/с.

Краевые условия для давления определяются из уравнений (1)

Система уравнений (1)-(4) является незамкнутой. Неизвестным здесь являются коэффициенты турбулентного обмена:  $\mu_{Tz}, D_{Tz}, \lambda_{Tz}$ , а также источники импульса, массы и тепла:  $R_{Pr}, R_{Pz}, R_{Cz}, R_{Tz}$ .

Составляющая источника импульса по оси  $Or, R_{Pr}$ , может не учитываться ввиду своей малости.

Остальные источниковые члены могут быть получены по следующим формулам:

$$R_{Tz} = \frac{\psi_{\alpha} a_v (\alpha \Delta T_{zж} + \beta (C^* - C) \Delta H_{zж})}{(V_{св} - \varepsilon_{ж})}, \quad (5)$$

$$R_{Cz} = \frac{\psi_{\alpha} a_v \beta (C^* - C)}{(V_{св} - \varepsilon_{ж})}, \quad (6)$$

$$R_{Pz} = \frac{\psi_{\alpha} a_v \gamma (W_0 + U_{эф})}{(V_{св} - \varepsilon_{ж})}; \quad (7)$$

где  $a_v$  - удельная поверхность насадки,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $\psi_{\alpha}$  - коэффициент активности, включающий в себя и коэффициент смачиваемости;  $\alpha, \beta, \gamma$  - коэффициенты переноса теплоты, массы и импульса в пограничном слое, соответственно;  $W_0, U_{эф}$  - скорости на оси турбулентного ядра потока газовой фазы и на внешней границе пленки жидкости соответственно;  $\Delta H_{zж}$  - теплота, связанная с изменением агрегатного состояния. Теплота  $\Delta H_{zж}$  определяется исходя из изменения энтальпии при конденсации, упрощенно

$\Delta H_{\text{жк}} = r_0 + H_{\text{жк}}$ , где в свою очередь  $r_0$  - теплота парообразования,  $H_{\text{жк}}$  - теплота пара в состоянии насыщения, оба параметра определяются при температуре жидкой фазы  $T_{\text{жк}}$ .

Коэффициенты переноса в турбулентном пограничном слое  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  определяются структурой пограничного слоя, который в свою очередь определяется скоростями  $W_0$ ,  $U_{\text{эф}}$  наряду с молекулярным и турбулентным переносом. Их определение является ключевым этапом моделирования обменных процессов в насадке и показано в работах [12, 13, 15].

Используя подход, который позволяет рассчитывать коэффициент турбулентной вязкости как продолжение пограничного слоя у межфазной поверхности [12, 13], на основании модификации известной гипотезы Клаузера для ядра потока получим:

$$v_{Tz} = \chi u_{*z} \delta_z, \quad (8)$$

где  $\chi=0,4$  – константа Прандтля;  $u_{*z}$  - динамическая скорость трения на межфазной поверхности газ-жидкость, м/с;  $\delta_z$  - эффективная толщина турбулентного пограничного слоя в газовой среде, м [13].

Для расчета динамической скорости на межфазной поверхности нерегулярных насадок и толщины  $\delta_z$  получены выражения [13]:

$$u_{*z} = 1,8 \left( \frac{\bar{\varepsilon} v_z}{\rho_z} \right)^{1/4}, \quad (9)$$

$$\delta_z = \exp \left[ \chi \left( \frac{W_0 + U_{\text{эф}}}{u_{*z}} - 13,76 + 2,5 \ln(30 v_z / u_{*z}) \right) \right], \quad (10)$$

где  $\bar{\varepsilon}$  - средняя скорость диссипации энергии, отнесенная к массе газа в слое насадки, Вт/м<sup>3</sup>.

### Однопараметрическая диффузионная модель

Система уравнений (1)-(4) может быть упрощена исходя из соображений размерности. Многочисленные экспериментальные данные [16, 17] показывают, что для большинства регулярных и нерегулярных насадок справедливо допущение о незначительной доле или полном отсутствии поперечного перемешивания газовой фазы:  $w \gg v$ . Тогда система уравнений преобразуется в систему уравнений, удовлетворяющей известной диффузионной модели:

$$\begin{cases} W_z \frac{dC_z}{dz} = D_{*z} \frac{d^2 C_z}{dz^2} - R_z, \\ W_{\text{жк}} \frac{dC_{\text{жк}}}{dz} = D_{\text{жк}} \frac{d^2 C_{\text{жк}}}{dz^2} + R_{\text{жк}}, \end{cases} \quad (11)$$

где  $W_z, W_{жк}$  - средние скорости газа и жидкости, м/с;  $C_z, C_{жк}$  - концентрации компонента в газовой и жидкой фазах;  $D_{гж}, D_{жг}$  - коэффициенты продольного перемешивания в жидкой и газовой фазах, м<sup>2</sup>/с;  $R_z, R_{жк}$  - источники массы в жидкой и газовой фазах.

Источники массы  $R_z, R_{жк}$  определяют количество массы перераспределяемого компонента, переходящее из одной фазы в другую в единице объема насадочного слоя, и имеет вид

$$R_z = K_{ox} \alpha_v \psi_{\alpha} (C_z - C_z^*), \quad R_{жк} = K_{ox} \alpha_v \psi_{\alpha} (C_{жк}^* - C_{жк}), \quad (12)$$

где  $C_z^*, C_{жк}^*$  - равновесные концентрации компонента в газовой и жидкой фазах.

Граничные условия на входе и выходе из аппарата записываются в виде:

$$\begin{cases} z = 0: & \frac{dC_{жк}}{dz} = 0, \quad W_z C_z + D_{гж} \frac{dC_z}{dz} = 0, \\ z = H: & \frac{dC_z}{dz} = 0, \quad -W_{жк} C_{жк} + D_{жг} \frac{dC_{жк}}{dz} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

где H - высота насадки, м.

Система дифференциальных уравнений (11) с граничными условиями (13) записывается в конечно-разностном виде и решается численными методами на ЭВМ. Решение системы дифференциальных уравнений (11) с граничными условиями (13) дает распределение поля концентраций в жидкой и газовой фазах по высоте колонны и дает возможность рассчитать высоту слоя насадки в адсорбере с учетом перемешивания потоков.

### Результаты исследований

На основе использования данной модели выполнены расчеты массообменных процессов. Был взят насадочный адсорбер с кольцами Рашига 50x50 и насадкой «Инжехим-2000» (рис. 1) [18], с заданными начальными концентрациями. Выполнен расчет абсорбции ацетилена водой. Из рис. 2 видно преимущество насадки «Инжехим-2000».

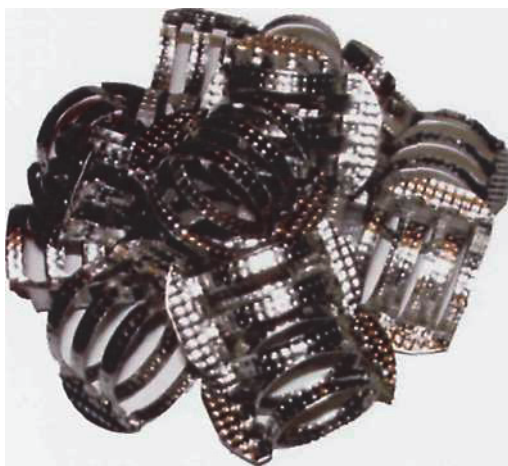


Рис. 1. Вид насадки «Инжехим-2000» [17, 18].

Выполнен расчет насадочного аппарата, обеспечивающего необходимое качество деаэрации воды при заданной производительности. Были взяты насадочные деаэраторы с стальными кольцами Рашига 50x50, стальными кольцами Палля 50x50, керамические седла Инталокс 50мм и насадкой «Инжехим-2000», с степенью извлечения 0,99 и заданной начальной концентрацией. Выполнен расчет деаэрации кислорода из воды, в результате получены деаэраторы следующих размеров (табл. 1).

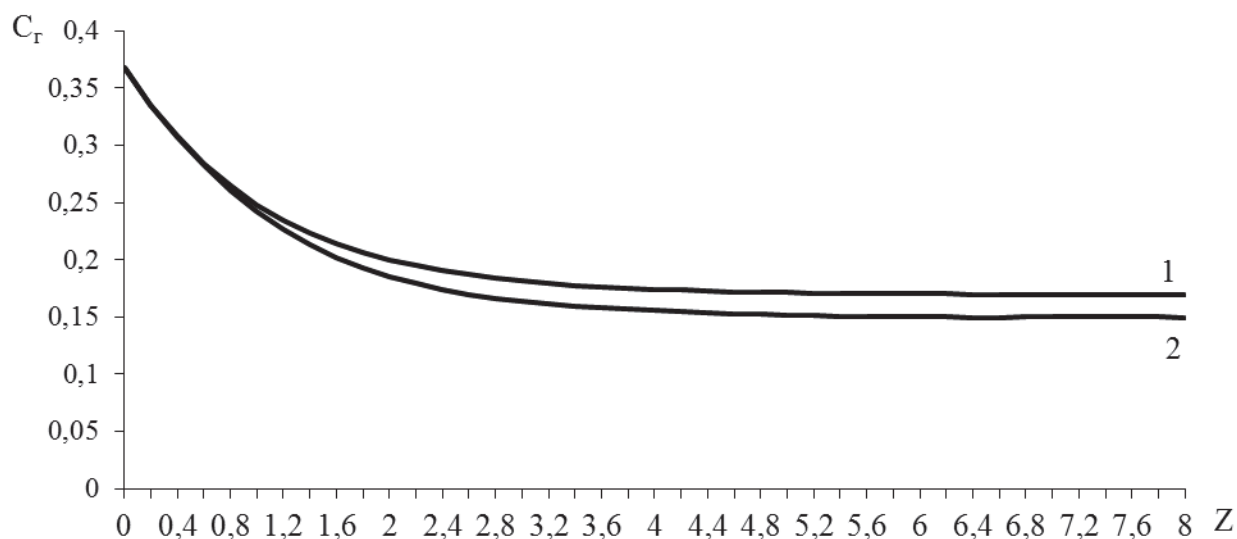


Рис. 2. Распределение поля концентраций в газовой фазе по высоте колонны. Абсорбция ацетилена водой: 1- кольца Рашига 50x50мм, 2 – насадка «Инжехим-2000».

Таблица 1.

Конструктивные характеристики деаэратора.

№	Насадки	Диаметр колонны (м)	Высота насадки (м)
1	кольца Рашига 50x50	1,2	1,07
2	кольцами Палля 50x50	1,0	1,19
3	седла Инталокс 50мм	1,2	0,81
4	«Инжехим-2000»	1,0	0,74

Для рассмотренного выше примера на рис.3 представлены распределения полей концентраций в жидкой и газовой фазах по высоте колонны.

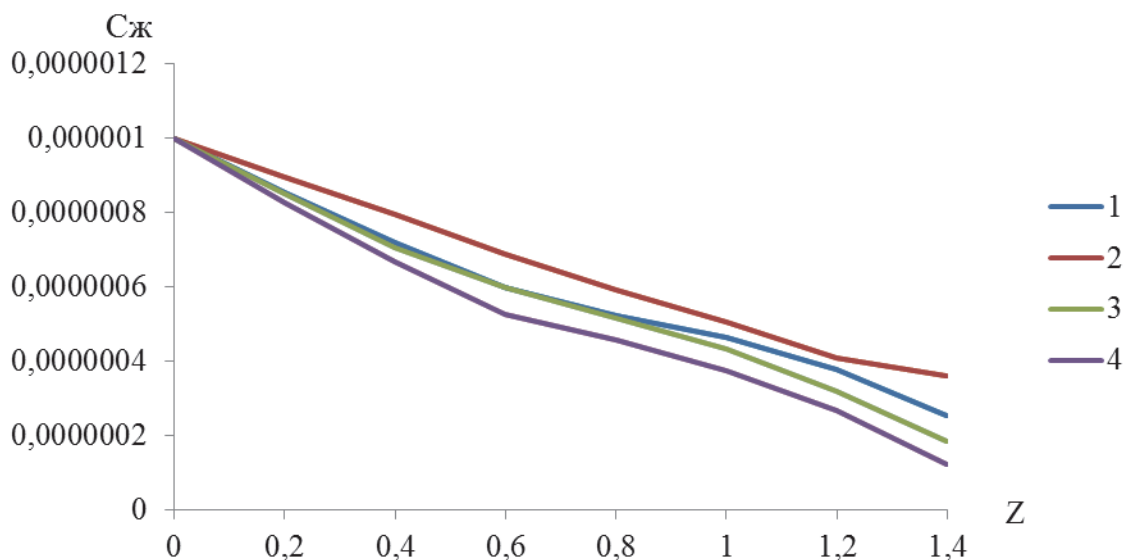


Рис. 3. Распределение поля концентраций кислорода в жидкой фазе по высоте колонны. Деаэрация воды: 1 - кольца Рашига 50x50мм, 2 - стальные кольца Палля 50x50, 3 - керамические седла Инталокс 50мм, 4 - насадка «Инжехим-2000».

В результате анализа полученных результатов сделаны следующие выводы:

- ◆ новая насадка «Инжехим-2000» при одинаковой удельной поверхности по сравнению с другими насадками обеспечивает меньшую концентрацию компонента на выходе, при одинаковой высоте слоя.
- ◆ степень извлечения компонента с насадкой «Инжехим 2000» обеспечивается при меньшем перепаде давления в 2-3 раза.

Модернизация тепло- и массообменных аппаратов с использованием высокоэффективных контактных устройств является все более актуальным направлением в различных отраслях промышленности и энергетике. Исследования показали, что нерегулярная насадка «Инжехим-2000» является современной альтернативой кольцам Рашига и другим аналогичным насадкам. При равной высоте слоя она обеспечивает большую производительность, меньшее гидравлическое сопротивление и более высокое качество разделения смесей.

#### Литература:

1. Слеттери Дж. Теория переноса импульса, энергии и массы в сплошных средах. М.: Мир, 1978.-448с.
2. Шейдеггер А.Э. Физика течения через пористые среды. М.: Гостехиздат, 1960.-250с.
3. Ergun S. Fluid Flow through Packed Columns// Chem. Eng. Progr. 1952 V. №42. P.89.



4. Vortmeyer D., Shuster J. Evaluation of Steady Flow Profiles in Rectangular and Circular Packed Beds by a Variational Method// Chem. Eng. Sci. 1983. V. 38. № 10. P. 1691.
5. Гольдштик М.А. Процессы переноса в зернистом слое. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1984.- 164с.
6. Штерн П.Г. Изотермическое осесимметрическое течение несжимаемой жидкости в контактных аппаратах радиального типа/ П.Г. Штерн, Е.А. Руденчик, С.В. Турунтаев и др. // Инж.-физ. Журнал. – 1989. – Т.56. - № 4 – С. 555.
7. Иоффе И.И. Инженерная химия гетерогенного катализа / И.И. Иоффе, Л.М. Письмен. – М.: Химия, 1965. – 456 с.
8. Штерн П.Г. Процессы переноса в зернистом слое / П.Г. Штерн, Е.А. Руденчик, И.С. Лукьяненко и др. // Теоретические основы химической технологии. – 1997. – Т. 31. - № 4. – С. 428-433.
9. Лаптев А.Г. Моделирование процесса хемосорбции в насадочной колонне. / А.Г. Лаптев, В.А. Данилов. // Химическая промышленность. – 1998. - № 1. – С. 23-26.
10. Ясавеев Х.Н. Определение ВЭТТ для насадочных колонн вариационным методом / Х.Н. Ясавеев, С.Г. Дьяконов, А.Г. Лаптев, В.А. Данилов. // Сб. науч. тр. «Тепломассообменные процессы и аппараты хим. технол.» - Казань. – 1998. – С. 10-17.
11. Дьяконов Г.С. Определение ВЭТТ для насадочных колонн при ректификации газового конденсата / С.Г. Дьяконов, Х.Н. Ясавеев, А.Г. Лаптев // Газовая промышленность. – 1998. - № 10. – С. 20-22.
12. Дьяконов С.Г. Теоретические основы и моделирование процессов разделения веществ / С.Г. Дьяконов, В.И. Елизаров, А.Г. Лаптев – Казань ун-та, 1993. – 483 с.
13. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов / А.Г. Лаптев – Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2007. – 500 с.
14. Динамика многофазных сред / Р.И. Нигматуллин. – М.: Наука, 1987. – 464 с.
15. Ясавеев Х.Н. Модернизация установок переработки углеводородных смесей / Х.Н. Ясавеев, А.Г. Лаптев, М.И. Фарахов. – Казань КГЭУ, 2004. – 305 с.
16. Packed towers in processing and environmental technology / R. Billet. – Weinheim: VCH, 1995. – 238 p.
17. Лаптев А.Г. Гидромеханические процессы в нефтехимии и энергетике: Пособие к расчету аппаратов / А.Г. Лаптев, М.И. Фарахов – Казань: Изд-во Казанского. Гос. ун-та, 2008. – 730 с.

18. Лаптев А.Г. Основы расчета и модернизация тепломассообменных установок в нефтехимии / А.Г. Лаптев, М.И. Фарахов, Н.Г. Минеев. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. – 720 с.
19. Флореа О., Смигельский О. Расчеты по процессам и аппаратам химической технологии. – М.: Химия, 1971 – 447 с.