

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ В НАСАДОЧНЫХ АППАРАТАХ

**Рассматриваются подходы математического моделирования в насадочных аппаратах. Даны сравнительные конструктивные характеристики деаэраторов с использованием насадочных элементов. Представлены результаты расчета эффективности дегазации  $SO_2$  и  $O_2$  в колоннах с кольцами Рашига, с насадками «Инжехим-2000» и «Инжехим-2002» и сравнение с известными экспериментальными данными. Сделаны выводы о результатах модернизации тепло- и массообменных аппаратов путем использования новых контактных устройств.**



## Введение

**Б**ольшой проблемой теплоэнергетики является неудовлетворительная работа деаэрационных установок для термической деаэрации питательной воды. Практика показывает, что срок службы тепловых сетей, питаемых водой с большой концентрацией агрессивных газов, значительно сокращается. Известны случаи, когда трубы тепловых сетей приходилось менять через полтора–два года работы из-за интенсивной внутренней коррозии вплоть до образования многочисленных сквозных свищей. Выход из строя тепловой сети связан с большими затратами. Особенно ухудшается ситуация с коррозией в сетях, питаемых химоочищенной водой, т.е. в ситуациях, когда внутренняя поверхность труб не защищена коркой накипи.

Проблема энергосбережения – одна из наиболее актуальных. Одним из методов снижения энергозатрат при процессе термической деаэрации может быть разработка и исследование новых конструкций деаэраторов.

В последние годы в практике отечественных и зарубежных предприятий сложилась устойчивая тенденция к замене устаревших

**А.Г. Лаптев\***,  
доктор технических наук; профессор, заведующий кафедрой «Технология воды и топлива», заместитель директора по науке, Казанский государственный энергетический университет

**А.Н. Долгов**,  
аспирант кафедры «Технология воды и топлива», Казанский государственный энергетический университет

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 удовлет-

\* Адрес для корреспонденции: tosha007@list.ru

ворять определенным технологическим требованиям:

- высокая эффективность (т.е. 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.

Деаэраторы и декарбонизаторы предотвращают коррозию труб, радиаторов и котельного оборудования. Они являются незаменимой деталью в промышленных и бытовых системах водоподготовки. Различают деаэраторы сопловые, насадочные, пленочные, струйные и барботажные. Модернизация деаэраторов с целью повышения эффективности процесса удаления растворенных газов является актуальной задачей в водоподготовке.

По принципу действия деаэрация бывает термическая, десорбционная или химическая, вакуумная и др. Из них наиболее распространена термическая деаэрация, характеризующаяся как преимуществами – возможностью работы при пониженных параметрах теплоносителей, что существенно повышает энергетическую эффективность теплоснабжения, так и недостатками – повышенными энергозатратами.

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 общем виде скорость десорбции газа определяется по уравнению:

$$-\frac{dC_{\Gamma}}{d\tau} = (C_{\Gamma} - C_{\Gamma}^*)KF, \quad (1)$$

где  $C_{\Gamma}$  – концентрация газа в воде;  $C_{\Gamma}^*$  – равновесная концентрация газа в воде, соответствующая парциальному давлению этого газа над водой;  $F$  – поверхность контакта фаз (массопередачи);  $K$  – коэффициент массопередачи, м/с;  $\tau$  – время, с.

Количество удаляемого в десорбере газа:

$$M = L(C_{\text{н}} - C_{\text{к}}) = KF\Delta C_{\text{ср}}, \quad (2)$$

где  $L$  – расход воды, м<sup>3</sup>/ч;  $C_{\text{н}}$ ,  $C_{\text{к}}$  – начальная и конечная концентрация газа в воде, кг/кг;  $\Delta C_{\text{ср}}$  – средняя движущая сила процесса десорбции, кг/кг.

Для расчета десорберов важное значение имеет определение коэффициента массопе-

редачи и поверхности контакта фаз. Коэффициент массопередачи вычисляется по уравнению аддитивности фазовых сопротивлений, где коэффициенты массоотдачи в газовой и жидкой фазах находятся по критериальным выражениям [1] или с использованием моделей пограничного слоя [2].

Так как при удалении труднорастворимых газов основное сопротивление массопередаче сосредоточено в жидкой фазе, коэффициент массоотдачи можно вычислить по выражению [3]

$$\beta_{\text{ж}} = A \sqrt{\frac{q a_{\text{в}} \psi_{\text{в}} D_{\text{ж}}}{\epsilon_{\text{св}} \epsilon_{\text{жл}}}}, \quad (3)$$

Где  $A$  – коэффициент пропорциональности;  $q$  – плотность орошения, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> · с);  $a_{\text{в}}$  – удельная поверхность насадки, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $\psi_{\text{в}}$  – коэффициент смачиваемости поверхности насадки;  $D_{\text{ж}}$  – коэффициент диффузии компонента в жидкой фазе, м<sup>2</sup>/с;  $\epsilon_{\text{св}}$  – свободный объем насадки, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\epsilon_{\text{жл}}$  – динамическая составляющая задержки жидкости, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Коэффициент пропорциональности  $A$  для колец, седел, трехгранных спиралей, колпачков из сетки равен 0,68; для насадки «Инжехим–2000» и ее аналогов – 1,12.

В газовой фазе при пленочном режиме работы насадочных колонн теоретическое уравнение для расчета коэффициента массоотдачи при турбулентном движении имеет вид [3]:

$$\beta_{\Gamma} = A \frac{\left( \frac{\epsilon_{\Gamma-\text{ж}}}{\rho_{\Gamma}} \frac{v_{\Gamma}}{q} \right)^{0,25}}{Sc_{\Gamma}^{0,67} q^{0,4}}, \quad (4)$$

где  $Sc_{\Gamma}$  – критерий Шмидта в жидкой фазе,  $Sc_{\Gamma} = v_{\Gamma} / \rho_{\Gamma}$ ;  $v_{\Gamma}$  – коэффициент кинематической вязкости газа, м<sup>2</sup>/с;  $\rho_{\Gamma}$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.

Средняя по объему скорость диссипации энергии равна

$$\frac{\Delta p_{\Gamma-\text{ж}} W_0}{(\epsilon_{\text{св}} - \epsilon_{\text{жл}}) H},$$

где  $\Delta p_{\Gamma-\text{ж}}$  – составляющая перепада давления  $\Delta p_{\text{ор}}$  в орошаемой насадке, вызванная наличием жидкой фазы, Па;  $W_0$  – фиктивная скорость газа (без насадки), м/с;  $H$  – высота слоя насадки, м.

Для колец, седел и регулярных насадок в уравнении (4)  $A \approx 0,013$ . Для нерегулярных насадок «Инжехим 2000-2003»  $A \approx 0,028$ .

Из уравнения (2) для насадочных аппаратов находят поверхность и высоту слоя насадки в виде:

$$F = \frac{M}{K \Delta C_{\text{ср}}}, \quad (5)$$

$$H = \frac{L}{K S a_v} \cdot \frac{C_n - C_k}{\Delta C_{cp}} = h_{ог} n_{ог}, \quad (6)$$

где  $h_{ог}$ ,  $n_{ог}$  – высота и число единиц переноса;  $S$  – площадь поперечного сечения колонны,  $m^2$ .

Выражения (2), (5) и (6) получены при условии идеального вытеснения потоков. Для реальных аппаратов  $F$  и  $H$  будут иметь значения на 20-40 % больше из-за перемешивания потоков в слое насадки.

## Материалы и методы исследования

**Н**ижне рассмотрена математическая модель массопереноса.

В массообменных колоннах под показателями эффективности, как правило, понимают следующие величины: КПД по Мерфи, высоту единицы переноса, высоту эквивалентной теоретической ступени (тарелки), теплогидравлическую эффективность. Все эти величины существенно зависят от гидродинамики потоков и теплофизических свойств разделяемых систем. Если для упорядоченных насадок существует принципиальная возможность прямого численного моделирования потоков, хотя и требующая огромных вычислительных ресурсов, то для неупорядоченных насадок и барботажного слоя это практически невозможно.

Единственный путь моделирования в условиях сложной геометрии контактных устройств – эмпирический или полуэмпирический поиск корреляционной связи между параметрами, определяющими гидродинамические и термодинамические условия в сечении аппарата и собственно показателями работоспособности и эффективности. Степень совершенства модели будет определяться ее универсальностью, которая, в свою очередь, основывается на степени использования без упрощений фундаментальных законов гидродинамики.

## Ключевые слова:

диффузионная модель, дегазатор, насадочные контактные устройства, кольца Рашига, насадка «Инжехим-2000»

Экспериментальный путь моделирования, как правило, приводит к обобщению в виде законов подобия. Их недостатки очевидны. Это не только неприменимость полученных таким образом формул к контактным устройствам другого вида и даже иногда другого типоразмера, но и ограниченный диапазон по нагрузкам и теплофизическим свойствам смесей. В то же время само проведение опытов является довольно затратным мероприятием.

Теоретический, точнее численный путь моделирования хотя и не может полностью исключить необходимость в экспериментальной поддержке ввиду уже упомянутой сложности и индивидуальности условий движения фаз в различных видах насадок, однако за счет опоры на фундаментальные законы способен дать более универсальные зависимости, обладающие предсказательной способностью в отношении новых насадок, для которых еще нет экспериментальных данных.

Дифференциальные уравнения массопереноса с продольным перемешиванием потоков в противотоке, записанные в безразмерной форме в соответствии с диффузионной моделью, имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{1}{Pe_L} \frac{d^2 C_{ж}}{d\xi^2} - \frac{dC_{ж}}{d\xi} = n_{ог} (C_{ж} - C_{ж}^*), \\ \frac{1}{R \cdot Pe_G} \frac{d^2 C_{г}}{d\xi^2} + \frac{1}{R} \frac{dC_{г}}{d\xi} = n_{ог} (C_{ж}^* - C_{г}); \end{cases} \quad (7)$$

где  $C_{г}$ ,  $C_{ж}$  – концентрации компонента в газовой и жидкой фазах, кг/кг;  $Pe_L$ ,  $Pe_G$  – числа Пекле для жидкой и газовой фаз;  $C_{ж}^*$  – равновесные концентрации компонента в жидкой фазе;  $R$  – отношение массовых расходов жидкости и газа;  $\xi$  – безразмерная продольная координата (по высоте слоя).

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



$$\begin{cases} \xi = 0: & C_{ж,н} = C_{ж} - \frac{1}{Pe_L} \frac{dC_{ж}}{d\xi}, \quad \frac{dC_{г}}{d\xi} = 0, \\ \xi = 1: & C_{г,н} = C_{г} + \frac{1}{Pe_G} \frac{dC_{г}}{d\xi}, \quad \frac{dC_{ж}}{d\xi} = 0; \end{cases} \quad (8)$$

где  $C_{ж,н}$  и  $C_{г,н}$  – концентрация компонента на входе в аппарат в жидкой и газовой фазах. Коэффициент перемешивания находится опытным путем для каждой конструкции аппарата. Результаты экспериментов часто обобщаются в виде безразмерного критерия  $Pe$  – числа Пекле [1, 3]:

$$Pe = \frac{Wl}{D_n},$$

где  $D_n$  – коэффициент продольного перемешивания;  $l$  – характерный размер аппарата, м;  $W$  – средняя скорость среды, м/с.

Перемешивание в жидкой фазе для насадочных колонн обобщается в виде выражения [1]:

$$Pe_G = \frac{\bar{u}H}{D_n} = A Re_{d,ж}^m Ga_d^n \frac{H}{d}, \quad (9)$$

где  $Re$ ,  $Ga$  – критерии Рейнольдса и Галилея, рассчитываются по номинальному размеру насадки  $d$  и средней скорости жидкости  $\bar{u}=q/\delta_{жд}$  ( $q$  – плотность орошения,  $m^3/(m^2 \cdot c)$ ;  $\delta_{жд}$  – динамическая составляющая задержки жидкости в насадке). Значения коэффициентов  $A$ ,  $m$ ,  $n$  в выражении (9) по данным различных исследователей имеют вид:

	$A$	$m$	$n$
Кольца размером 6-25 мм внавал (неупорядоченная насадка)	1,9	0,5	-0,33
Кольца и седла размером 13 мм	19,4 ( $a_v d$ )	0,75	-0,69

Результаты исследования структуры потока жидкости в слое насадки обобщены известным критериальным уравнением [3]:

$$Pe_L = 2,348 Re_{ж}^{0,428},$$

где  $Pe_L = qd_{э}/(D_n \epsilon_{св})$ ;  $Re_{ж} = 4q/(a_v \epsilon_{св} v_{жс})$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости,  $m^2/c$ ;  $d_{э}$  – эквивалентный размер насадки, м.

Продольное перемешивание по газовой фазе для нерегулярной насадки описывается выражением [3]:

$$Pe_G = 88,6 Re_{г}^{0,428},$$

где  $Pe_G = W_{г} d_{э}/D_n$ ,  $Re_{г} = W_{г} d_{э}/v_{г}$ ;  $W_{г}$  – скорость газа, м/с.

Система дифференциальных уравнений (7) с граничными условиями (8) записывается в конечно-разностном виде и решается

численными методами на ЭВМ. Решение системы дифференциальных уравнений (7) с граничными условиями (8) дает распределение поля концентраций в жидкой и газовой фазах по высоте колонны и дает возможность рассчитать высоту слоя насадки в дегазаторе с учетом перемешивания потоков.

## Результаты и их обсуждение

На основе использования данной модели выполнены расчеты массообменных процессов. Рассмотрен насадочный дегазатор с кольцами Рашига  $50 \times 50$  мм и насадкой «Инжехим-2000» (рис. 1) с заданными начальными концентрациями [5]. Выполнен расчет дегазации  $SO_2$ . Из рис. 2 видно преимущество насадки «Инжехим-2000».

Выполнен расчет массообменных процессов в насадочных дегазаторах с кольцами Рашига  $25 \times 25$  мм и насадкой «Инжехим-2002» (рис. 3), с заданными начальными концентрациями [5]. Из рис. 4 видно преимущество насадки «Инжехим-2002». Получено удовлетворительное (5-7 %) согласование с экспериментальными данными [5].

Для выбора вариантов модернизации деаэраторов рассмотрены различные типы отечественных и зарубежных насадок [1, 3, 4]. В качестве примера выполнен расчет насадочного аппарата, обеспечивающего необходимое качество деаэрации воды при заданной производительности. Были взяты насадочные деаэраторы с стальными кольцами Рашига  $50 \times 50$  мм, стальными кольцами Палля  $50 \times 50$  мм, керамические седла

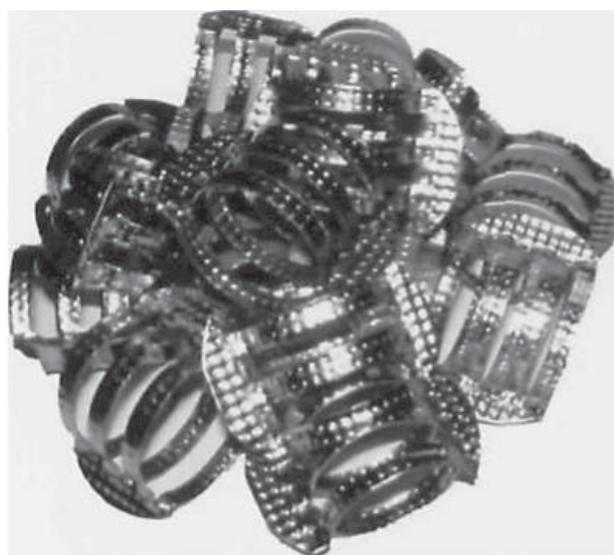
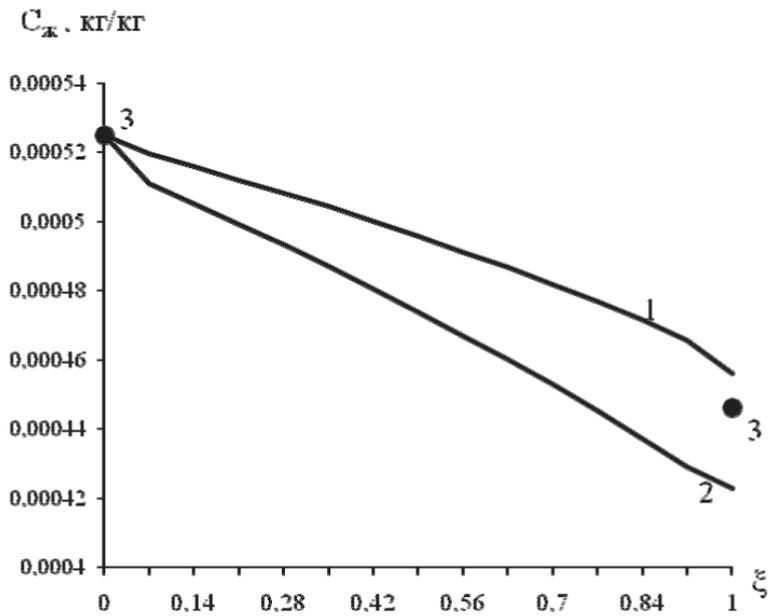
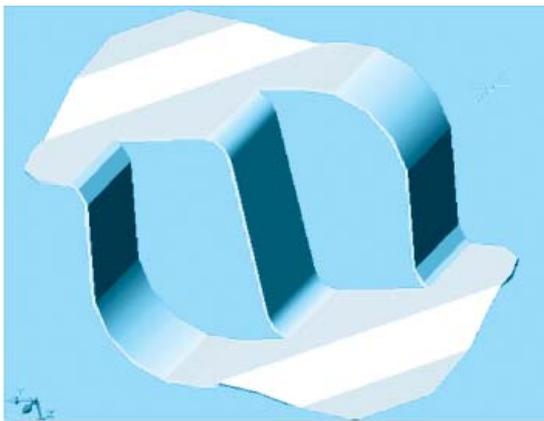


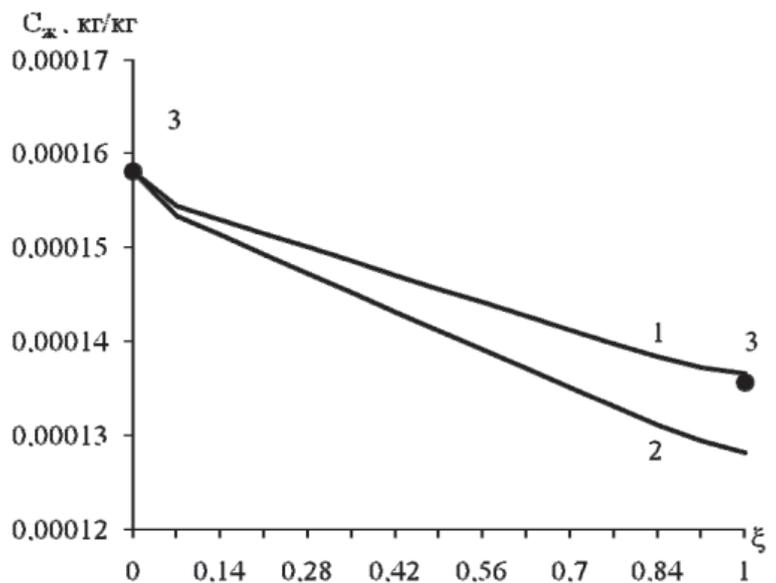
Рис. 1. Вид насадки «Инжехим-2000» [3].



**Рис. 2.** Распределение поля концентраций в жидкой фазе по высоте колонны. Дегазация диоксида серы: 1 – кольца Рашига 50×50 мм, 2 – насадка «Инжехим-2000», 3 – экспериментальные данные для колец Рашига [5].



**Рис. 3.** Элемент насадки «Инжехим-2002».



**Рис. 4.** Распределение поля концентраций в жидкой фазе по высоте колонны. Дегазация диоксида серы: 1 – кольца Рашига 25×25 мм, 2 – насадка «Инжехим-2002», 3 – экспериментальные данные для колец Рашига [5].

**Таблица 1**

Сравнительные характеристики промышленных насадок размером 50×50 мм [3]

Тип насадки	Свободный объем насадки, $\epsilon_{св}$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	Удельная поверхность насадки, $a_v$ , м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	Потеря напора, отн. %	Пропускная способность, отн. %	Эффективность, отн. %
Кольца Рашига	0,95	110	100	100	100
Кольца Палля	0,96	100	63	120	125
Седла Инталокс	-	-	32	144	132
Инжехим-2000	0,96	103	16-22	180-210	153

Инталокс 50 мм и насадкой «Инжехим-2000» (табл. 1), со степенью извлечения 0,99, заданными начальными концентрациями. Выполнен расчет деаэрации кислорода из воды, в результате получены деаэраторы следующих размеров (табл. 2).

Выполнен расчет насадочного деаэратора, характеристики которого по данным Казанской ТЭЦ-3 приведены в табл. 3.

Из приведенных в табл. 3 данных следует, что деаэратор не всегда обеспечивает требуемое содержание кислорода O<sub>2</sub> на выходе при различных режимах и необходима его модернизация. Модернизация заключается в замене устаревших контактных устройств в колонке деаэратора на более эффективные.

Для модернизации действующего деаэратора на Казанской ТЭЦ-3 рассмотрены насадочные деаэраторы с насадкой «Инжехим-2000» номинального размера 45 и 60 мм. В результате расчетов получены представленные в табл. 3 данные и установлены деаэраторы следующих размеров по высоте слоя насадки (табл. 4).

**Таблица 2**

Конструктивные характеристики деаэратора

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

**Таблица 3**

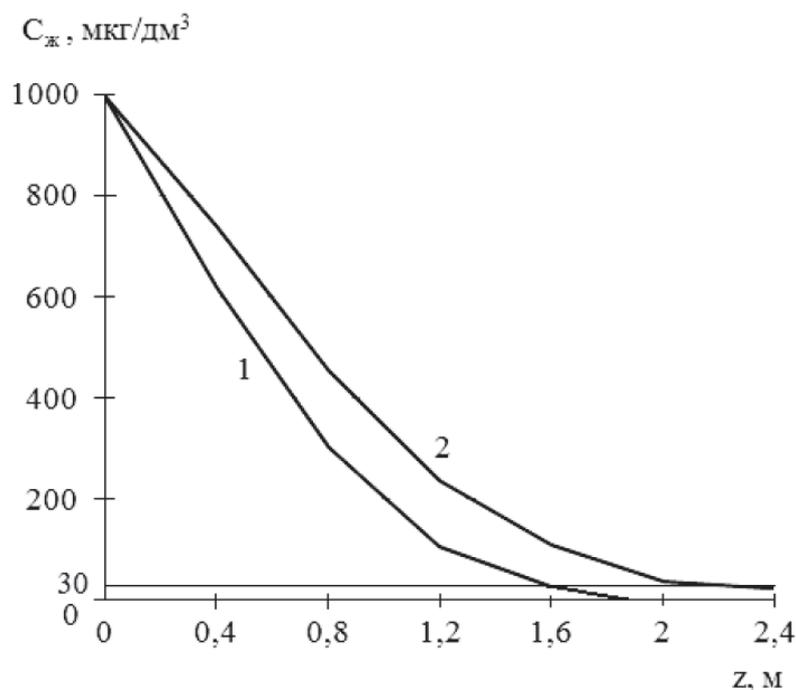
Характеристики работы деаэратора

	Летний период	Весенний период	Зимний период
$L_{\text{жид}}$	130 т/ч	270 т/ч	345 т/ч
$G_{\text{пар}}$	4,5 т/ч	9,3 т/ч	11,9 т/ч
$t_{\text{вх}}$	36	36	36
$t_{\text{вых}}$	100	100	100
$O_2$ вх	>1000	>1000	>1000
$O_2$ вых	47,2	29,5	37
$O_2$ вых норм	Норм. – 30	Норм. – 30	Норм. – 30

**Таблица 4**

Конструктивные характеристики деаэраторов

№	Насадки	Диаметр колонны (м)		Высота насадки (м)	
		при миним-х расходах	при максим-х расходах	при миним-х расходах	при максим-х расходах
1	«Инжехим-2000» размером 45 мм	2,0	2,0	1,1	1,45
2	«Инжехим-2000» размером 60 мм	2,0	2,0	1,45	1,92



Приведенные в табл. 4 результаты по высоте слоя насадки получены по модели идеального вытеснения (метод числа единиц переноса).

Для уточнения результатов с учетом реальной гидродинамики обстановки использована диффузионная модель (7)-(8). Решение системы дифференциальных уравнений позволило получить поле концентраций в жидкой (рис. 5) и газовой фазах по высоте колонны и дало возможность оценить высоту слоя насадки в деаэраторе с учетом перемешивания потоков.

Полученные в работе уравнения, которые дают значения с погрешностью не более 6-8% от экспериментальных [3], что соответствует погрешностям эксперимента, позволяют рассчитать профиль концентраций в массо- и теплообменных колоннах при противоточном движении фаз. Несмотря на простоту, они показали свою надежность в практических расчетах промышленных колонн с насадками при выборе энергосберегающих технических решений модернизации аппаратов.

В результате анализа полученных результатов сделаны следующие выводы:

- ♦ новая насадка при одинаковой высоте слоя обеспечивает меньшую концентрацию компонента на выходе,
- ♦ степень извлечения компонента с насадкой «Инжехим-2000» выше, чем у колец Рашига при меньшем перепаде давления.

← **Рис. 5.** Распределение поля концентраций кислорода в жидкой фазе по высоте колонны. Деаэрация воды: 1 – насадка «Инжехим-2000» размером 45 мм, 2 – насадка «Инжехим-2000» размером 60 мм.

На основе проведенных расчетов массообменных процессов предложена следующая схема модернизации деаэрата ДСА-300. В колонке деаэрата размещается насадка «Инжехим-2000» размером 60 мм высотой Н 2,5 м. Для повышения эффективности деаэрации воды в емкости деаэрата предлагается установить секционирующие перегородки, которые устраняют застойные зоны. Это обеспечивает повышение эффективности удаления кислорода  $O_2$  не менее, чем на 30 %, т.е. содержание кислорода  $O_2$  на выходе из деаэрата не более 20 мкг/дм<sup>3</sup>.

### Заключение

**М**одернизация тепло- и массообменных аппаратов с использованием высокоэффективных контактных устройств является все более актуальным направлением в различных отраслях промышленности и энергетике. Исследования показали, что нерегулярные насадки «Инжехим-2000» и «Инжехим-2002» являются современной альтернативой кольцам Рашига и другим аналогичным насадкам. При равной высоте



слоя они обеспечивает большую производительность, меньшее гидравлическое сопротивление и более высокое качество разделения смесей.

### Литература

1. Рамм В.М. Абсорбция газов. Изд. 2-е. М.: Химия, 1976. 656 с.
2. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2007. 500 с.
3. Лаптев А.Г. Основы расчета и модернизация тепломассообменных установок в нефтехимии / А.Г. Лаптев, М.И. Фарахов, Н.Г. Минеев. Казань: Изд-во Казанск. гос. энерг. ун-та, 2010. 720 с.
4. Сокол Б.А. Насадки массообменных колонн / Б.А. Сокол, А.К. Чернышев, Д.А. Баранов. М.: Инфохим, 2009. 358 с.
5. Чертков Б.А. Кинетика выделения  $SO_2$  из растворов сульфит-бисульфита аммония в насадочных колоннах // Хим. Промышленность. 1966. № 9. С. 685-689.



A.G. Laptev, A.N. Dolgov

## MATHEMATICAL MODEL OF WATER PURIFICATION FROM DISSOLVED GASES IN PACKED APPARATUS

The approaches of mathematical modeling in packed apparatus have been analyzed. The comparative structural characteristics of deaerators are given. Calculation efficiency of the degassing  $SO_2$  and  $O_2$  in the columns with Raschig rings

and attachments «Inzhekhim -2000» and «Inzhekhim -2002» has been made and compared with previous experimental data. Upgrade of heat- and mass- transfer apparatus by highly effective contact devices have been analyzed.

**Key words:** diffusive model, decontaminator, attachment contact devices, rings of Raschig, attachment of «Inzhekhim-2000».