

ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 66.067.34

А. А. Боровик, А. И. Вилькоцкий, С. К. Протасов
Белорусский государственный технологический университет

ОЦЕНКИ ДОПУЩЕНИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАСЧЕТОВ ПО ПРОЦЕССАМ И АППАРАТАМ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

При решении многих задач на практических занятиях, а также при выполнении расчетной части курсовых проектов или курсовых работ по процессам и аппаратам химической технологии студентами делаются многочисленные допущения, что вызвано сложностью описания протекающих процессов, недостаточной их изученностью, неточностями существующих методик расчетов, несущественным влиянием на получаемые результаты. Допущения делаются и тогда, когда основной целью обучения является освоение студентами существующих методов расчета процессов и аппаратов, а не получение конкретных численных результатов. Но иногда такие допущения применять не стоит, например в курсовом проектировании при проведении расчетов абсорбции газов со значительным выделением теплоты в жидкости, приводящем к существенному изменению условий проведения процессов и увеличению габаритных размеров аппаратов. Поэтому перед преподавателями кафедры ПиАХП стоит цель обучения студентов навыкам правильной постановки задачи с последующей оценкой применения допущений при проведении разнообразных расчетов по курсу ПиАХТ.

Ключевые слова: абсорбция, абсорбер, тепловой эффект, рабочая линия, равновесная линия.

A. A. Borovik, A. I. Vilkotsky, S. K. Protasov
Belarusian State Technological University

CALCULATION ASSUMPTIONS' ESTIMATION ON THE PROCESSES AND DEVICES OF CHEMICAL TECHNOLOGIES

In solving many problems in practical classes, as well as when performing the calculation of the course projects and course work on the processes and apparatuses of chemical technologies students make numerous assumptions caused by complexity of processes' description, lack of study, inaccuracies of existing calculation methods, insignificant influence on the results. Assumptions are made not only for getting the specific numerical results, but also when the main purpose of teaching is the acquiring by students existing methods of calculation processes and devices. But sometimes these assumptions are not necessary to use, for example, in the course design for calculation significant gas absorption with heat release in the liquid, leading to essential condition changes of the processing and increase the overall size of the device. Therefore, the teachers of the department have to achieve the goal to develop students' skills to formulate the problems, followed by the assumptions' application evaluation in conducting various calculations rate.

Key words: absorption, absorber, thermal effect, working line, equilibrium line.

Введение. На кафедре ПиАХП со студентами химико-технологических и химико-экономических специальностей проводятся лекционные, практические и лабораторные занятия.

Кроме того, студентами указанных специальностей выполняются курсовые проекты и курсовые работы.

При проведении различных расчетов на практических и лабораторных занятиях, а также при выполнении курсовых проектов и работ студентами делаются многочисленные допущения, что вызвано различными причинами.

Многие процессы химической технологии являются многофакторными, а значит, весьма сложными. Вместе с тем при проведении расчетов, особенно при решении задач на практических занятиях, важным является обучение студентов общим методам расчетов тех или иных технологических процессов и аппаратов, а не получение результатов, максимально приближенных к реальным процессам и аппаратам. Поэтому и применяются разнообразные допущения, значительно упрощающие расчеты, что позволяет студентам эффективно и с относительно

небольшими затратами освоить основы расчетов технологических процессов и аппаратов, хотя точность полученных результатов может значительно снижаться. В некоторых случаях применение допущений изначально целесообразно, поскольку не приводит к существенному снижению точности получаемых результатов [1–6].

Однако встречаются ситуации, когда такие допущения применять не стоит [7, 8]. Это имеет место, например, в курсовом проектировании при проведении расчетов процессов абсорбции хорошо растворимых газов, сопровождающейся значительным выделением теплоты в жидкой фазе. Если указанная теплота не отводится или отвод ее недостаточен, то температура жидкости и газа начнет возрастать, а значит, будут изменяться условия проведения процесса, в первую очередь растворимость распределяемых компонентов в жидкости и остальные физико-химические свойства, что приведет прежде всего к изменению условий состояния равновесия и снижению движущих сил абсорбции. Поэтому габаритные размеры проектируемых абсорбционных колонн увеличиваются, что обуславливает рост капитальных и эксплуатационных затрат. И именно габаритные размеры колонных абсорбционных аппаратов (прежде всего высота и внутренний диаметр) являются основными расчетными параметрами в курсовом проектировании по процессам и аппаратам химической технологии.

Основная часть. Важность правильной оценки допущений в курсовом проектировании наглядно можно показать на примере абсорбции аммиака из воздуха водой в непрерывнодействующей противоточной абсорбционной колонне.

В непрерывнодействующей противоточной абсорбционной колонне насадочного типа производится очистка метана от аммиака при давлении $P = 0,5$ МПа и температуре $T = 10^\circ\text{C}$. Орошающая жидкость – чистая вода. Начальное содержание аммиака в газовой смеси $y_n = 0,5\%$ мол., степень его поглощения в аппарате $C_n = 0,9$. Коэффициент избытка жидкого поглотителя φ при условии постоянной температуры абсорбции, но с запасом на возможное тепловыделение составляет 2,4.

Рассчитать среднюю движущую силу процесса абсорбции: а) без учета тепловыделения при поглощении аммиака водой; б) с учетом указанного тепловыделения, но без изменения положения рабочей линии, определенной в первом пункте. Сравнить полученные результаты.

Решение. Растворимость аммиака в воде намного лучше, чем метана. Поэтому аммиак считаем распределяемым компонентом, а метан и воду – инертным газом и жидкостью. Для определения движущей силы массопередачи в координатах $X - Y$ (X – относительная мольная доля

аммиака в воде; Y – относительная мольная доля аммиака в метане) необходимо выполнить построения рабочей и равновесной линий.

Для построения линии равновесия воспользуемся справочными данными [9].

Переведем мольные доли x аммиака в жидком растворе в относительные мольные доли X аммиака по отношению к воде, а также парциальные давления аммиака P^* в газовой смеси, равновесной с жидким поглотителем, в относительные мольные доли аммиака Y^* по отношению к метану. Для этого используем формулы:

$$X = \frac{x}{1-x}; Y^* = \frac{P^*/P}{1-P^*/P},$$

где P – общее давление абсорбции.

Выполним расчет без учета тепловыделения при абсорбции, т. е. при $t = 283 \text{ K} = \text{const}$. Так, например, при $x = 0,02$ и $t = 283 \text{ K}$

$$X = \frac{0,02}{1-0,02} = 0,02041;$$

$$P^* = 2,7 \text{ кПа} = 2700 \text{ Па};$$

$$Y^* = \frac{1400 / 500\,000}{1 - 1400 / 500\,000} = 0,002807.$$

При $x = 0,04$ и $t = 283 \text{ K}$

$$X = \frac{0,04}{1-0,04} = 0,04167,$$

$$P^* = 2,3 \text{ кПа} = 2300 \text{ Па};$$

$$Y^* = \frac{2300 / 500\,000}{1 - 2300 / 500\,000} = 0,004621.$$

Запишем уравнение материального баланса противоточной непрерывнодействующей абсорбционной колонны:

$$\begin{aligned} M &= G \cdot (Y_n - Y_k) = \\ &= L \cdot (X_k - X_n) = L_{\min} \cdot (X_k^* - X_n), \end{aligned}$$

где G и L – мольные расходы инертных газовой (метан) и жидкой (вода) фаз.

Так как на орошение подается чистая вода, то содержание аммиака в ней $X_n = 0$. Поскольку $y_n = 0,5\% = 0,005$, то

$$\begin{aligned} Y_n &= \frac{y_n}{1-y_n} = \frac{0,005}{1-0,005} = \\ &= 0,005025. \end{aligned}$$

Конечное содержание NH_3 в газовой фазе определим исходя из степени поглощения распределяемого компонента:

$$Y_K = Y_H \cdot (1 - C_{II}) = 0,005025 \cdot (1 - 0,9) = 0,0005025.$$

Конечное содержание аммиака в жидкой фазе X_K^* , равновесной к газовой фазе состава Y_H внизу колонны, определим из графика линии равновесия: $X_K^* = 0,046$. Следовательно,

$$L_{\min} = \frac{G \cdot (Y_H - Y_K)}{X_K^* - X_H} = \frac{G \cdot (Y_H - Y_K)}{X_K^*} = \frac{G \cdot (0,005025 - 0,0005025)}{0,046} = 0,0983 \cdot G.$$

Тогда рабочий расход жидкого поглотителя

$$L = \varphi \cdot L_{\min} = 2,4 \cdot 0,0983 \cdot G = 0,23592 \cdot G;$$

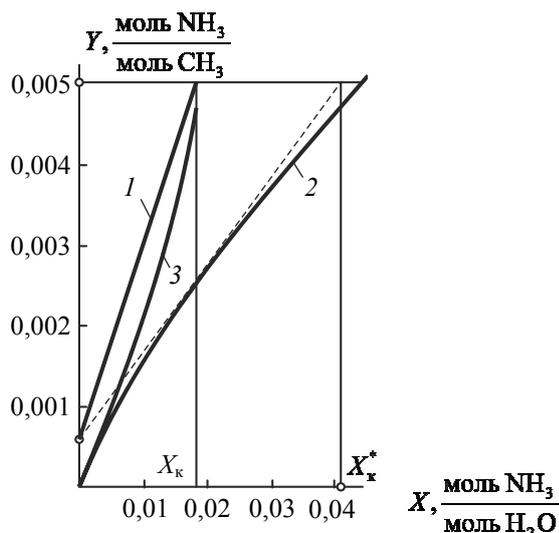
$$\frac{L}{G} = 0,23592.$$

Тогда

$$X_K = \frac{G \cdot (Y_H - Y_K)}{L} + X_H = \frac{G \cdot (Y_H - Y_K)}{L};$$

$$X_K = \frac{G \cdot (0,005025 - 0,0005025)}{0,23592 \cdot G} = 0,01917.$$

В координатах $X - Y$ рабочая линия колонны – это отрезок прямой линии. Координаты одного конца отрезка соответствуют верху колонны (X_H, Y_H), т. е. (0, Y). Координаты второго конца соответствуют низу колонны (X_K, Y_H). Отложив эти точки в координатной плоскости $X - Y$, проводим отрезок рабочей линии (рисунок).



Влияние тепловыделения на положение линии равновесия: 1 – рабочая линия колонны; 2 – линия равновесия при $T = 293$ К; 3 – линия равновесия с учетом тепловыделения

Для установления влияния тепловыделения при поглощении аммиака водой используем уравнение, устанавливающее взаимосвязь состава жидкой фазы X в разных сечениях колонны с ее текущей температурой t . При этом рассматриваем предельный случай, в котором отсутствует теплообмен между фазами и окружающей средой (адиабатическая абсорбция), т. е. все выделяющееся тепло идет на нагрев жидкой фазы [10, 11]. Кроме того, пренебрегаем теплообменом между жидкой и газовой фазой ввиду невысоких температурных напоров и относительно невысокой интенсивности теплоотдачи в газе, а поэтому считаем, что все выделившееся при абсорбции тепло остается в жидком поглотителе, и именно температура жидкой фазы определяет условия равновесия:

$$t = t_H + \frac{q}{C_{ж}} \cdot (X - X_H).$$

В данном уравнении $t_H = 10^\circ\text{C}$ – начальная температура жидкого поглотителя, равная температуре абсорбции: $t_H = 10^\circ\text{C}$; $X_H = 0$; $q = 33\,522$ Дж/моль – дифференциальная теплота растворения аммиака в воде (молярная теплота абсорбции) [12]; $C_{ж}$ – молярная теплоемкость воды. Причем

$$C_{ж} = C_{ж}^{уд} \cdot \mu_{ж},$$

где $C_{ж}^{уд} = 4790$ Дж/(кг · К) – удельная теплоемкость жидкого поглотителя (воды); $\mu_{ж} = 0,018$ кг/моль – молярная масса воды, тогда

$$C_{ж} = 4190 \cdot 0,018 = 75,42 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$t = 10 + \frac{35\,332}{75,42} \cdot (X - 0) = 10 + 468,3 \cdot X.$$

Зададимся несколькими значениями X в пределах от X_H до X_K и определим для них с помощью вышеприведенных формул температуры жидкости t и соответствующие этим температурам равновесные содержания аммиака в газе Y^* .

Так например, при $X = X_K = 0,01917$

$$t = t_H = 10 + 468,3 \cdot X_K = 10 + 468,3 \cdot 0,01917 = 18,977^\circ\text{C} \approx 19^\circ\text{C};$$

$$Y^* = 0,004753.$$

При $X = 0,015$

$$t = 10 + 468,3 \cdot 0,015 = 17,0245 \approx 17^\circ\text{C};$$

$$Y^* = 0,0034524.$$

При $X = 0,01$

$$t = 10 + 468,3 \cdot 0,01 = 14,683 \approx 14,7^\circ\text{C};$$

$$Y^* = 0,002.$$

При $X = 0,005$

$$t = 10 + 468,3 \cdot 0,005 = 12,3415 \approx 12,3^\circ\text{C};$$

$$Y^* = 0,000848.$$

По полученным данным в координатах $X - Y$ откладываем точки и проводим линию равновесия 3 с учетом тепловыделения при абсорбции.

Средние движущие силы массопередачи (абсорбции) определим по формуле [13, 14]

$$\Delta Y_{\text{cp}} = \frac{Y_{\text{H}} - Y_{\text{K}}}{\int_{Y_{\text{K}}}^{Y_{\text{H}}} \frac{dY}{Y - Y^*}}.$$

Интеграл в этом уравнении представляет собой общее число единиц переноса n_{0y} по газовой

фазе: $n_{0y} = \int_{Y_{\text{K}}}^{Y_{\text{H}}} \frac{dY}{Y - Y^*}$. Данный интеграл вычис-

лим приближенно по методу трапеций. Для этого вначале с помощью зависимости получим уравнение рабочей линии абсорбционной колонны (линия 1 на рисунке):

$$Y = \frac{L}{G} \cdot X + Y_{\text{H}} - \frac{L}{G} \cdot X_{\text{K}};$$

$$Y = 0,23592 \cdot X + 0,005025 - 0,23592 \times \\ \times 0,01817 = 0,23592 \cdot X + 0,0005025.$$

Определение средней движущей силы абсорбции без учета тепловыделения [13–16].

Разделим интервал (линия равновесия 2 (рисунок)) изменения содержания аммиака от $X_{\text{H}} = 0$ до $X_{\text{K}} = 0,01917$ на 10 равных частей с шагом

$$h = \frac{X_{\text{K}} - X_{\text{H}}}{10} = \frac{0,01917}{10} = 0,001917.$$

Для каждого X_j , отстоящего от соседних значений X_{j-1} и X_{j+1} на величину h , по уравнению рабочей линии вычисляем соответствующее значение Y_j , а по линии равновесия 2 находим соответствующее равновесное значение Y_i^* . Затем находим значение подинтегральной функции $\frac{1}{Y - Y_i^*}$ в выражении для n_{0y} . Результаты расчетов заносим в таблицу.

Шаг Δh изменения аргумента Y подинтегральной функции будет

$$\Delta h = \frac{Y_{\text{H}} - Y_{\text{K}}}{10} = \\ = \frac{0,005025 - 0,0005025}{10} = 0,00045225.$$

Согласно формуле трапеций находим приближенное значение интеграла:

$$\Delta n_{0y} \approx \Delta h = \left(\frac{Y_1 + Y_{11}}{2} + Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_9 + Y_{10} \right) = \\ = 0,00045225 \cdot \left(\frac{1990,05 + 419,271}{2} + 1447,68 + \right. \\ \left. + 1137,63 + 936,964 + 796,472 + 692,619 + \right. \\ \left. + 612,725 + 549,356 + 497,866 + 455,201 \right) = 3,7678;$$

$$\Delta Y_{\text{cp}} = \frac{0,005025 - 0,0005025}{3,7678} = \\ = 0,0012 \frac{\text{моль NH}_3}{\text{моль CH}_4}.$$

Определение средней движущей силы абсорбции с учетом тепловыделения без отвода теплоты от жидкой фазы и неизменной рабочей линии колонны. Аналогичным образом разделим интервал изменения содержания аммиака от $X_{\text{H}} = 0$ до $X_{\text{K}} = 0,01917$ на 10 равных частей с шагом

$$h = \frac{X_{\text{K}} - X_{\text{H}}}{10} = \frac{0,01917 - 0}{10} = 0,001917$$

и применим метод трапеций для линии равновесия 3. Проведя аналогичные вычисления, получаем результаты и строим график (рисунок).

$$n'_{0y} \approx \Delta h = \left(\frac{Y_1 + Y_{11}}{2} + Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_9 + Y_{10} \right) = \\ = 0,00045225 \cdot \left(\frac{1990 + 3675,3}{2} + 1527,68 + \right. \\ \left. + 1239,1 + 1191,5 + 1147,4 + 1185,1 + 1322,7 + \right. \\ \left. + 1591,6 + 1921 + 2114,9 \right) = 7,26913;$$

$$\Delta Y'_{\text{cp}} = \frac{0,005025 - 0,0005025}{7,26913} = \\ = 0,000622 \text{ моль NH}_3 / \text{моль CH}_4.$$

Находим отношение

$$\frac{\Delta Y_{\text{cp}}}{\Delta Y'_{\text{cp}}} = \frac{0,00125}{0,000622} = 1,9292 \approx 2.$$

Таким образом, тепловыделение при абсорбции аммиака водой приводит к снижению движущей силы массопередачи почти в 2 раза.

Вместе с тем увеличение температуры жидкости на выходе из аппарата всего лишь на 9°C не приведет к существенному изменению физических свойств жидкости и распределяемого компонента (в первую очередь вязкости жидкой фазы и коэффициента молекулярной диффузии аммиака в ней, а значит, и к увеличению значений

коэффициентов массоотдачи, массопередачи, т. е. не вызовет интенсификации массообмена.

Поэтому высота контактной части колонны, обратно пропорциональной средней движущей силе процесса, значительно возрастет.

Следовательно, чтобы высота колонны существенно не изменилась, необходимо предусмотреть отвод тепла от жидкого поглотителя в колонне, либо сделать температуру орошающей жидкости на входе в колонну ниже температуры абсорбции.

Заключение. При проведении различных расчетов по процессам и аппаратам химической технологии студентами делаются многочисленные допущения. Однако в некоторых случаях, например в курсовом проектировании, такие допущения делать нецелесообразно. Таким образом, перед преподавателями кафедры ПиАХП стоит цель обучения студентов навыкам адекватной оценки применения допущений при проведении разнообразных расчетов по курсу ПиАХТ.

Литература

1. Новый справочник химика и технолога. Химическое равновесие. Свойства растворов / под ред. С. А. Симоновой. СПб.: Профессионал, 2004. 998 с.
2. Справочник химика: в 7 т. / под ред. Б. П. Никольского. М.: Химия, 1966. Т. 3. 1072 с.
3. Пери Дж. Справочник инженера-химика: в 2 т. Л.: Химия, 1969. Т. 1. 640 с.
4. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. М.: Альянс, 2007. 576 с.
5. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) / П. Г. Романков [и др.]. СПб.: Химия, 1993. 496 с.
6. Романков П. Г., Фролов В. Ф., Флисюк О. М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи). СПб.: Химиздат, 2009. 542 с.
7. Справочник азотчика / под ред. Е. Я. Мельникова. М.: Химия, 1987. 464 с.
8. Справочник сернокислотчика / под ред. К. М. Малина. М.: Химия, 1971. 744 с.
9. Мельник Б. Д. Инженерный справочник по технологии неорганических веществ: Графики и номограммы. М.: Химия, 1975. 544 с.
10. Рамм В. М. Абсорбция газов. М.: Химия, 1966. 768 с.
11. Рамм В. М. Абсорбция газов. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Химия, 1976. 656 с.
12. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Альянс, 2004. 751 с.
13. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии: в 2 ч. М.: Химия, 2002. Ч. 2: Массообменные процессы и аппараты. 368 с.
14. Плановский А. Н., Рамм В. М., Каган С. З. Процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1967. 847 с.
15. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: в 2 кн. / В. Г. Айнштейн [и др.]; под ред. В. Г. Айнштейна. М.: Логос: Высшая школа, 2002. Кн. 2. 872 с.
16. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / под ред. Ю. И. Дытнерского. М.: Химия, 1991. 496 с.

References

1. *Novyyu spravochnik khimika i tekhnologa. Khimicheskoe ravnovesiye. Svoystva rastvorov* [The new directory chemist and technologist. Chemical equilibrium. Properties of solutions]. St. Petersburg, Professional Publ., 2004. 998 p.
2. *Spravochnik khimika: v 7 t.* [Reference for chemist in 7 vol.]. Moscow, Khimiya Publ., 1966. Vol. 3. 1072 p.
3. Perry J. *Spravochnik inzhenera-khimika: v 2 t.* [Reference for chemical engineers: in 2 vol.]. Leningrad, Khimiya Publ., 1969. Vol. 1. 640 p.
4. Pavlov K. F., Romankiv P. G., Noskov A. A. *Primery i zadachi po kursy processov i apparatov khimicheskoy tekhnologii* [Examples and problems at the rate of processes and apparatuses of chemical technologies]. Moscow, Al'yance Publ., 2007. 576 p.
5. Romanov P. G. *Metody rascheta protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii (primery i zadachi)* [Methods of calculation of processes and devices of chemical engineering (examples and exercises)]. St. Petersburg, Khimiya Publ., 1993. 496 p.
6. Romanov P. G., Frolov V. F., Flisyuk O. M. *Metody rascheta protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii (primery i zadachi)* [Methods of calculation of processes and devices of chemical technologies (examples and exercises)]. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2009. 542 p.
7. *Spravochnik azotchika* [Reference for employee nitrogen production]. Moscow, Khimiya Publ., 1987. 464 p.

8. *Spravochnik sernokislotchika* [Reference for employee sulfuric acid production]. Moscow, Khimiya Publ., 1971. 744 p.
9. Mel'nik B. D. *Inzhenernyy spravochnik po tekhnologii neorganicheskikh veshchestv: Grafiki i nomogrammy* [Engineering handbook on technology of inorganic substances: Graphics and nomograms]. Moscow: Khimiya Publ., 1975. 544 p.
10. Ramm V. M. *Absorbtsiya gazov* [Gas absorption]. Moscow, Khimiya Publ., 1966. 768 p.
11. Ramm V. M. *Absorbtsiya gazov* [Gas absorption]. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 656 p.
12. Kasatkin A. G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow, Al'yance Publ., 2004. 751 p.
13. Dytner'sky Yu. I. *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii: v 2 ch.* [Processes and apparatuses of chemical technology: in 2 parts]. Moscow, Khimiya Publ., 2002. Part 2: Mass transfer processes and devices. 368 p.
14. Planovsky A. N., Ramm V. M., Kagan S. Z. *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Processes and devices of chemical technology]. Moscow, Khimiya Publ., 1967. 847 p.
15. Aynsh'teyn V. G. *Obshchiy kurs protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii: v 2 kn.* [The overall rate of processes and apparatuses of chemical technology: in 2 vol.]. Moscow, Logos Publ., Vysshaya shkola Publ., 2002. Vol. 2. 872 p.
16. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii: posobiye po proektirovaniyu* [Basic processes and apparatuses of chemical technology: A Guide to Design avaniyu]. Moscow, Khimiya Publ., 1991. 496 p.

Информация об авторах

Боровик Андрей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: borovik@gmail.com

Вилькоцкий Андрей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: andrzej.wilkocki@gmail.com

Протасов Семен Корнеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: semenprotas@mail.ru

Information about the authors

Borovik Andrey Alexandrovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Processes and Apparatus of Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: borovik@gmail.com

Vilkotsky Andrey Ivanovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Processes and Apparatus of Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andrzej.wilkocki@gmail.com

Protasov Semen Korneevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Processes and Apparatus of Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: semenprotas@mail.ru