

УДК 66.07.001.2

В.Г. Рябых, канд. техн. наук, доц.,
В.Я. Кожухарь, д-р техн. наук, проф.,
Л.В. Иванченко, канд. техн. наук,
С.Л. Савич, канд. хим. наук,
Одес. нац. политехн. ун-т

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И МАССООБМЕНА В АППАРАТАХ С ВИХРЕВЫМИ ТАРЕЛКАМИ

Введение. Разработка эффективных тепло- массообменных аппаратов имеет важное практическое значение. Из известных способов ускорения процессов тепло- и массообмена (вибрация, ультразвук, электромагнитное поле) наибольшее распространение получили методы гидродинамического воздействия на газожидкостные потоки (диспергирование жидкости, вращение газожидкостных потоков статическими завихрителями). Создание вращающихся потоков позволяет использовать положительное влияние на процессы тепло- массообмена поля центробежных сил, так как в этом случае на границе контакта между газом и жидкостью (межфазной поверхности) возникают микровихри, направленные перпендикулярно межфазной поверхности и ускоряющие перенос тепла и массы.

Анализ последних исследований и публикаций. Наличие таких вихрей обнаружено физиком Тейлором. Микровихри производят дополнительную турбулизацию межфазной поверхности. Возникновение микровихрей связано со сложным характером распределения скоростей вращающихся потоков газа и жидкости. В этом случае абсолютная скорость движения потока может быть разложена (в виде векторов) на тангенциальную, радиальную и осевую составляющие. Величина составляющих векторов скорости меняется. Так, в начальный момент закручивания потока, максимальную величину имеет тангенциальная составляющая, а затем, по мере ослабления вращательного движения, вектор тангенциальной составляющей уменьшается при увеличении радиальных и осевых векторов скорости. На формирование микровихрей оказывает влияние только тангенциальная составляющая скорости, направленная касательно вращательной траектории потока. Следовательно, по мере ослабления вращательного движения (за счет сил трения) необходимо дополнительно подкручивать потоки, увеличивая тангенциальную составляющую векторов скорости за счет параллельной подачи газа в межтарельчатые зоны аппарата. Возникающие при вращении потоков центробежные силы не только ускоряют тепло-массообменные процессы, но и создают сепарационный эффект, снижая унос жидкости с газом. Были разработаны конструкции вихревых тарелок [1...4], одна из которых представлена на рис. 1, и аппаратов (рис. 2) и проведены исследования на моделях аппаратов диаметрами 50, 100 и 150 мм с разным количеством вихревых тарелок (от 3 до 10) при физической абсорбции на системе CO_2 — вода и хемосорбции при поглощении CO_2 растворами углеаммонийных солей (УАС) с разной степенью карбонизации.

Цель работы — экспериментально подтвердить высокую эффективность вихревых тарелок и конических турбулизаторов. По полученным результатам выбрать критериальные уравнения для расчетов коэффициентов массоотдачи и гидравлического сопротивления тарелок.

Изложение основного материала. Все модели аппаратов с вихревыми тарелками были изготовлены из прозрачного материала (оргстекла) для визуального наблюдения за перемеще-

DOI: 10.15276/opr.1.43.2014.41

© В.Г. Рябых, В.Я. Кожухарь, Л.В. Иванченко, С.Л. Савич, 2014

нием газа и жидкости. Для дополнительной турбулизации потоков газа и жидкости в аппарате диаметром 100 мм в межтарельчатых зонах были установлены конические перфорированные турбулизаторы [5].

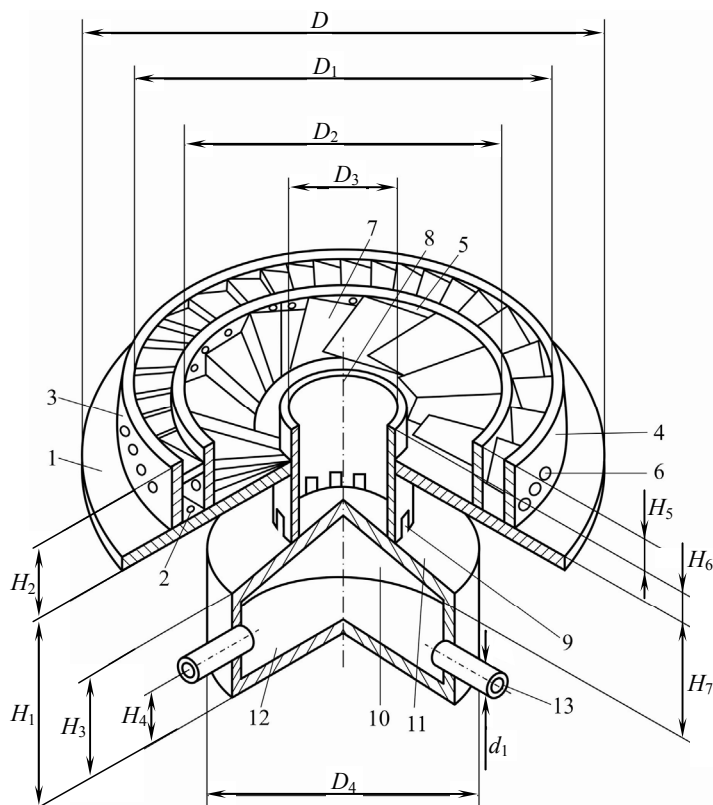


Рис. 1. Вихревая теплообменная тарелка (а.с. №1517192 (СССР)): 1 — горизонтальная пластина с щелевыми отверстиями; 2 — прямоугольные щелевые отверстия; 3, 4 — кольцевые вертикальные перегородки с отверстиями 5 и 6; 7 — пластины над щелевыми отверстиями; 8 — вертикальный сливной патрубок; 9 — щелевые отверстия вертикальные; 10 — цилиндр холодильного элемента; 11 — коническая крышка; 12 — плоское днище холодильного элемента; 13 — патрубки для подачи теплоносителей

Вихревые тарелки (с живым сечением до 20 %) состоят из двух зон, соединенных центральным сливным патрубком. Верхняя (рабочая) зона состоит из щелевых отверстий прямоугольной формы, ориентированных к центру тарелки и размещенных по концентрическим окружностям, между которыми установлены цилиндрические перфорированные перегородки. Сверху щелевые отверстия прикрыты наклонными пластинами, изменяющими направление движения газовой фазы и создающими вращательное движение газожидкостных потоков на рабочей поверхности тарелки.

Нижняя (распределительная) зона тарелок может быть использована для накопления и отвода жидкой фазы из аппарата [1], что иногда необходимо при фракционном разделении жидких смесей, либо для отвода (подвода) тепла [3], что позволяет обеспечивать оптимальную температуру процесса. В аппаратах получали дополнительное увеличение коэффициентов массопередачи примерно на 20...25 % за счет параллельного тангенциального подвода газа в зону размещения каждой вихревой тарелки [3] и еще на 20 % за счет установки в межтарельчатых зонах конических турбулизаторов [5].

Результаты. Опыты проводили на экспериментальных установках, снабженных необходимыми измерительными приборами (газовые счетчики, диафрагмы, манометры) в интервале расходов по газовой фазе (воздух, смесь CO_2 с воздухом) 10...1200 м³/ч и расходов по жидкой фазе (вода, растворы УАС) от 15 до 1500 кг/ч.

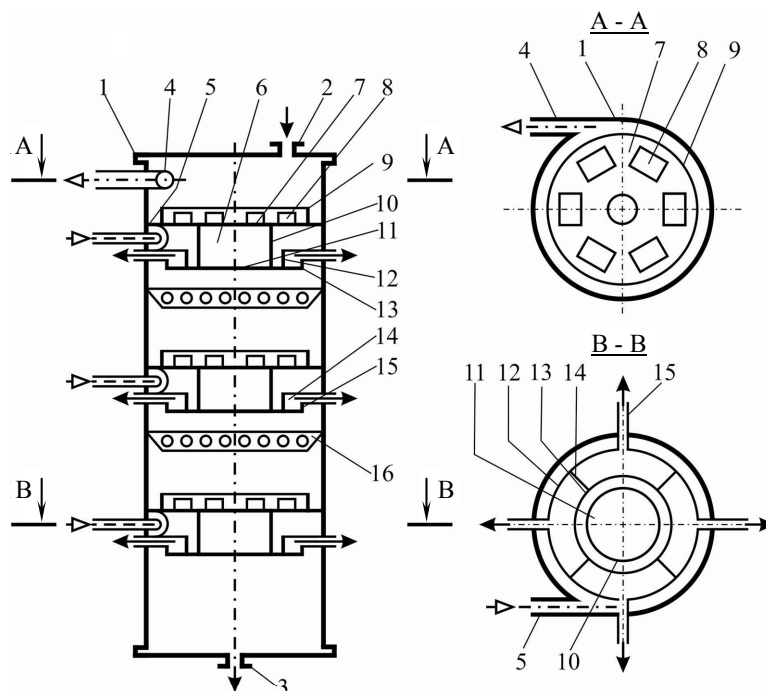


Рис. 2. Тепломасообмінний апарат (патент України № 90772): 1 — корпус; 2, 3 — патрубки для рідини; 4, 5 — патрубки для газу; 6 — сливний патрубок; 7 — робоча зона тарілки; 8 — наклонні пластини над щелевими отворами; 9 — перфоровані кільцеві перегородки; 10 — переливний патрубок; 11 — сливна частина тарілки; 12, 13 — кільцеві перегородки; 14 — радіальні перегородки; 15 — радіальні патрубки; 16 — конічні турбулізатори

Результати опытов обрабатывали с учетом общепринятых методик, измеряя гидравлические сопротивления тарелок и аппарата и определяя концентрации CO_2 в жидких пробах на входе и выходе из аппаратов по результатам титрования. Затем рассчитывали среднюю разность концентраций CO_2 в жидкости, по уравнениям материальных балансов по CO_2 находили массу поглощенного газа, а затем рассчитывали коэффициенты массоотдачи в жидкой фазе по уравнению

$$\beta_{\text{ж}} = \frac{M}{\sum F_T \Delta C_{\text{ср}}}, \quad (1)$$

де M — масса поглощенного жидкостью CO_2 , кг/с;
 $\sum F_T$ — общая поверхность вихревых тарелок в аппарате, м^2 ;
 $\Delta C_{\text{ср}}$ — средняя движущая сила процесса, кг/м^3 ;

$\beta_{\text{ж}}$ — коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, м/с.

Результаты некоторых опытов представлены в табл. 1.

Анализируя результаты, представленные в таблице 1, можно отметить:

- плотность орошения увеличивала коэффициенты $\beta_{\text{ж}}$;
- установка конических турбулизаторов увеличивала $\beta_{\text{ж}}$ примерно на 20 %, а гидравлическое сопротивление возрастало на 10...15 %;
- коэффициенты $\beta_{\text{ж}}$ для вихревых тарелок по сравнению с другими тарелками возрастали на 60...90 %.

Таблиця 1

Результаты исследования массообмена

Параметры	Типы тарелок (диаметр 150 мм)											
	Вихревая (а.с. 603166)			Перекрестно- точная (ПО “Карбона” г. Харьков)			Ситчатая с сотовой насадкой			Вихревая (а.с. 1517192) с коническими турбулизаторами		
Расход жидко- сти $L \cdot 10^6$, м ³ /с	61	79	97	61	79	97	63	82	99	61	79	98
Плотность орошения $\Pi \cdot 10^3$, м ³ /(м ² ·с)	8,45	11,0	13,4	8,45	11,0	13,4	8,45	11,0	13,4	8,5	11,2	13,2
Расход газа $G \cdot 10^3$, м ³ /с	2,16	2,16	2,16	2,14	2,14	2,18	2,18	2,18	2,18	2,16	2,16	2,16
Скорость газа w_r , м/с	0,3	0,3	0,3	0,27	0,27	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Коэффициент массоотдачи, $\beta_{\text{ж}} \cdot 10^3$, м/с	0,99	1,26	1,68	0,4	0,61	1,0	0,91	1,12	1,23	1,19	1,63	2,18

Для получения обобщенных уравнений, учитывающих основные факторы (плотность орошения, скорость газа), влияющие на величину коэффициентов $\beta_{\text{ж}}$, обработку результатов проводили с применением теории подобия [5], рассчитывая критерии гидродинамического подобия Re_r , $Re_{\text{ж}}$, Eu и диффузионного подобия Nu' по формулам:

$$Re_r = \frac{w_r d_3 \rho_r}{\mu_r}; \quad (2)$$

$$Re_{\text{ж}} = \frac{L}{\Pi \nu_{\text{ж}}}; \quad (3)$$

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho_r w_r^2}; \quad (4)$$

$$Nu' = \frac{\beta_{\text{ж}} d_3}{D}, \quad (5)$$

де w_r — линейная скорость газа в щелевых отверстиях тарелок, м/с;

d_3 — эквивалентный диаметр щелевых отверстий тарелок, м;

L — объемный расход жидкости, м³/с;

ρ_r , μ_r — соответственно плотность газа (кг/м³) и динамическая вязкость (Па·с);

$\nu_{\text{ж}}$ — кинематическая вязкость жидкости, м²/с;

Π — периметр щелевых отверстий вихревой тарелки, м;

D — коэффициент молекулярной диффузии, м²/с;

ΔP — гидравлическое сопротивление аппарата, Па.

Для получения критериальных уравнений вида

$$Eu = C_1 Re_r^{m_1} Re_{\text{ж}}^{m_2}; \quad (6)$$

$$Nu' = C_2 Re_r^{n_1} Re_{\text{ж}}^{n_2}, \quad (7)$$

применимых для расчета ΔP и $\beta_{\text{ж}}$ в промышленных аппаратах, подобных моделям исследованных аппаратов, находим графический вид функций: $Eu = f_1(Re_r)$, $Eu = f_2(Re_{\text{ж}})$, $Nu' = f_3(Re_r)$, $Nu' = f_4(Re_{\text{ж}})$. Для этого использовали графики, построенные в логарифмических координатах, из которых определяли показатели степени n_1 , n_2 , m_1 , m_2 по тангенсу угла наклона прямых к оси абсцисс, и постоянные C_1 и C_2 — по отрезкам на оси ординат при пересечении прямых с этой осью для графиков функций $\frac{Eu}{Re_{\text{ж}}^{m_1}} = f_5(Re_r)$ и $\frac{Nu'}{Re_{\text{ж}}^{m_2}} = f_6(Re_r)$. Некоторые графики представлены на рисунках 3 и 4.

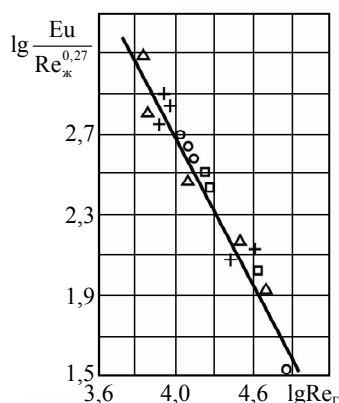


Рис. 3. Зависимость $\lg \frac{Eu}{Re_{\text{ж}}^{0.27}} = f_1(\lg Re_r)$:

□ — $Re_{\text{ж}} = 65,2$; Δ — $Re_{\text{ж}} = 380,3$;
○ — $Re_{\text{ж}} = 0$; + — $Re_{\text{ж}} = 288,5$

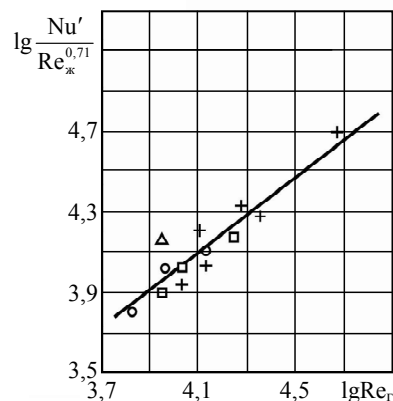


Рис. 3. Зависимость $\lg \frac{Nu'}{Re_{\text{ж}}^{0.71}} = f_2(\lg Re_r)$:

□ — $Re_{\text{ж}} = 288$; Δ — $Re_{\text{ж}} = 107$;
+ — $Re_{\text{ж}} = 65,2$

Показатели степени n и m в полученных критериальных уравнениях и постоянные C_1 и C_2 для разных диаметров вихревых тарелок представлены в таблице 2.

Критериальные уравнения для тарелки диаметром 150 мм были применены при расчете промышленного абсорбера с вихревыми тарелками диаметром 1500 мм в производстве УАС по заказу ПО “Азот” г. Ровно (Украина).

Таблица 2

Показатели степени и постоянные в уравнениях (6) и (7)

Показатели степени и постоянные в критериальных уравнениях	Диаметр тарелки			
	50 мм	100 мм	100 мм с коническими турбулизаторами	150 мм
n_1	-1,19	-1,29	-1,43	-1,81
m_1	0,78	0,70	1,6	0,27
n_2	0,135	1,15	0,84	0,91
m_2	1,0	1,43	0,53	0,71
C_1	4,6	24,83	6,3	2512
C_2	4,1	1479	1,26	5012

Выводы. Анализируя проведенные исследования аппаратов с вихревыми тарелками, можно отметить:

- тарелки имеют высокий коэффициент полезного действия ($\eta = 0,6..0,9$) и небольшое гидравлическое сопротивление (порядка 500 Па);
- тарелки обеспечивают вращательное движение газожидкостных слоев на рабочих поверхностях, что значительно (примерно на 60...90 %) увеличивает коэффициенты массоотдачи в жидкой фазе;
- тарелки хорошо работают без забивания кристаллами щелевых отверстий, что проверено при работе с УАС;
- перспективным является применение таких тарелок в карбонизационных колоннах содовых производств.

Литература

1. А.с. 603166 СССР. Вихревая массообменная тарелка / В.Г. Рябых, Л.М. Шмагин, Г.М. Долгих // Оpubл. 21.12.1977.
2. А.с. 1098115 СССР. Тепломассообменный аппарат / В.Г. Рябых // Оpubл. 22.02.1984.
3. А.с. 1517192 СССР. Вихревая массообменная тарелка / В.Г. Рябых, Ю.И. Андрианов, И.М. Каганский // Оpubл. 22.06.1989.
4. Патент на винахід № 90772 Україна. Тепломасообмінний апарат / В.Г. Рябих, В.Я. Кожухар, В.А. Горнев // Бюл. — 2010 — № 10.
5. Дубиніна, А.І. Процеси та апарати хімічної технології / А.І. Дубинін, Р.І. Гаврилів, І.О. Гузьова; за ред. А.І. Дубиніна. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. — 360 с.

References

1. A.s. 603166 SSSR. Vkhrevaya massoobmennaya tarelka [Inventor's certificate 603166 USSR. Mass transfer vortex plate] / V.G. Ryabikh, L.M. Shmagin, G.M. Dolgikh // Published 21.12.1977.
2. A.s. 1098115 SSSR. Teplomassoobmennyy apparat [Inventor's certificate 1098115 USSR. Heat and mass transfer apparatus] / V.G. Ryabikh // Published 22.02.1984.
3. A.s. 1517192 SSSR. Vkhrevaya massoobmennaya tarelka [Inventor's certificate 1517192 USSR. Vortex mass transfer plate] / V.G. Ryabikh, Yu.I. Andrianov, I.M. Kaganskiy // Published 22.06.1989.
4. Patent na vynakhid # 90772 Ukraina. Teplomasoobminnyi apparat [Patent for invention # 90772 Ukraine. Heat and mass transfer apparatus] / V.H. Riabikh, V.Ya. Kozhukhar, V.A. Hornev // Bull. — 2010 — # 10.
5. Dubynin, A.I. Protsesty ta aparaty khimichnoi tekhnolohii [Processes and equipment of chemical technology] / A.I. Dubynin, R.I. Havryliv, I.O. Huzova; edited by A.I. Dubynin. — Lviv, 2012. — 360 p.

АНОТАЦІЯ / АННОТАЦИЯ / ABSTRACT

В.Г. Рябих, В.Я. Кожухар, Л.В. Іванченко, С.Л. Савич. Дослідження гідродинаміки та масообміну в апаратах з вихровими тарілками. Для підвищення продуктивності розроблено ефективний тепло- масообмінний апарат за допомогою організації додаткової поверхні контакту фаз. Це досягається шляхом введення в нього вихрових тарілок і конічних турбулізаторів. Таке рішення дало змогу збільшити продуктивність і спростити конструкцію апарата, що дозволяє використовувати його як для чистих рідин, так і для суспензій, які містять тверді частинки і кристали. Для порівняльного аналізу експериментальним шляхом необхідно провести дослідження масообміну в апаратах-аналогах і апаратах запропонованої конструкції. Аналіз отриманих результатів дав змогу зробити такий висновок: щільність зрошення збільшувала коефіцієнти $\beta_{\text{ж}}$, установка конічних турбулізаторів збільшувала $\beta_{\text{ж}}$ приблизно на 20 %, а гідравлічний опір зростав на 10...15 % і коефіцієнти $\beta_{\text{ж}}$ для вихрових тарілок порівняно з коефіцієнтами для інших тарілок зростали на 60...90 %. Ці показники підтверджували високу ефективність вихрових тарілок і конічних турбулізаторів. Отримано критеріальні рівняння для розрахунків коефіцієнтів масовіддачі і гідравлічного опору тарілок. Критеріальні рівняння для тарілки діаметром 150 мм були застосовані при розрахунку промислового абсорбера з вихровими тарілками діаметром 1500 мм у виробництві ВАС за замовленням ВО "Азот" м. Рівне.

Ключові слова: вихрові тарілки, гідродинаміка, коефіцієнти масовіддачі.

В.Г. Рябых, В.Я. Кожухарь, Л.В. Иванченко, С.Л. Савич. Исследование гидродинамики и массообмена в аппаратах с вихревыми тарелками. Для повышения производительности разработан эффективный тепло- массообменный аппарат путем организации дополнительной поверхности контакта фаз. Это достигается путем введения в него вихревых тарелок и конических турбулизаторов. Такое решение дало возможность увеличить производительность и упростить конструкцию аппарата, что позволяет использовать его как для чистых жидкостей, так и для суспензий, которые содержат твердые частицы и кристаллы. Для сравнительного анализа экспериментальным путем необходимо провести исследование массообмена в аппаратах-аналогах и предлагаемой конструкции. Анализ полученных результатов позволил сделать следующее заключение: плотность орошения увеличивала коэффициенты $\beta_{\text{ж}}$, установка конических турбулизаторов увеличивала $\beta_{\text{ж}}$ примерно на 20 %, а гидравлическое сопротивление возрастало на 10...15 % и коэффициенты $\beta_{\text{ж}}$ для вихревых тарелок по сравнению с другими коэффициентами других тарелок возрастали на 60...90 %. Эти показатели подтверждали высокую эффективность вихревых тарелок и конических турбулизаторов. Получены критериальные уравнения для расчетов коэффициентов массоотдачи и гидравлического сопротивления тарелок. Критериальные уравнения для тарелки диаметром 150 мм были применены при расчете промышленного абсорбера с вихревыми тарелками диаметром 1500 мм в производстве УАС по заказу ПО "Азот" г. Ровно.

Ключевые слова: вихревые тарелки, гидродинамика, коэффициенты массоотдачи.

V.H. Riabykh, V.Y. Kozhukhar, L.V. Ivanchenko, S.L. Savich. Research of the hydrodynamics and mass-transfer in the apparatus with the vortex plates. To improve performance, an efficient heat- mass transfer apparatus by providing more surface contact between the phases we have developed. This is achieved by introducing into it vortex plates and conical turbulators. Such a solution gives an opportunity to increase productivity and to simplify the construction, it can be used both for pure liquids and for suspensions, which contain solids and crystals. For a comparative analysis experimentally it is necessary to study mass transfer in the apparatus analogues and proposed construction. Analysis of the results led to make the following conclusion: irrigation of density increases the coefficients $\beta_{\text{ж}}$, installation of conical vortex generators increased $\beta_{\text{ж}}$ about on 20 % and the hydraulic resistance increased on 10...15 %, and the coefficients $\beta_{\text{ж}}$ for vortex plates compared to other plates increased on 60...90 %. These figures confirm the high efficiency of vortex plates and conical turbulators. Criterial equations for calculating of mass transfer coefficients and hydraulic flow resistance of plates were obtained. Criterial equations for a plate of 150 mm diameter were used in the calculation of industrial absorber with vortex plates of 1500 mm diameter in the production UAS commissioned by PA "Nitrogen" Rivne.

Keywords: vortex plates, hydrodynamics, mass-transfer coefficients.

Рецензент д-р техн. наук., проф. Одес. нац. политехн. ун-та Эрайзер Л.Н.

Поступила в редакцию 23 мая 2014 г.