

УДК 536.24

А. В. Овсянник

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, пр. Октября, 48, Гомель, Беларусь, 246746

ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ НА НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Предложены соотношения в размерном и безразмерном виде для определения интенсивности теплоотдачи при кипении на ребренных поверхностях различного типа и профиля. Полученные соотношения показывают, что коэффициент теплоотдачи при развитом пузырьковом кипении жидкостей не зависит от профиля ребра, а определяется только внутренними характеристиками процесса кипения, теплофизическими свойствами жидкости, режимными параметрами (давлением насыщения и тепловой нагрузкой) и геометрическими параметрами ребра.

Ключевые слова: Теплоотдача – Кипение — Продольные ребра — Радиальные ребра — Обобщенное ребро.

Correlations in dimensional and nondimensional view for determination of the intensity of heat transfer during in boiling on ribbed surfaces of different type and profile are offered here. Received correlations show that coefficient of convective heat exchange in developed bubble boiling of liquids doesn't depend on rib profile, but is defined only by inside characteristics of the process of boiling, thermo-physical properties of liquid, operating conditions (such as saturation pressure and heat supply) and by geometrical parameters of a rib.

Keywords: Heat transfer — Boiling — Longitudinal ribs — Radial ribs — Synthesized rib.

I. ВВЕДЕНИЕ

Анализ существующих моделей процессов теплообмена при кипении жидкостей как на гладких (изотермических) [1, 3, 5, 9], так и на ребренных (неизотермических) [2] поверхностях показывает, что все они в своей структуре содержат такую количественную характеристику, как коэффициент теплоотдачи, который должен быть заранее задан или определен экспериментально, что не всегда возможно или крайне затруднительно. Кроме того, ряд моделей содержит в результирующих и промежуточных формулах константы, которые также определяются экспериментальным путем или оцениваются с определенной степенью погрешности. Такой подход к математическому или физическому моделированию не позволяет определить интенсивность теплоотдачи на теплоотдающей поверхности прямым путем, используя полученные зависимости, без проведения экспериментальных исследований или использования ранее полученных экспериментальных данных, соответствующих условиям существования физической или математической модели. Все эти факторы не позволяют рассчитывать теплообменную аппаратуру с фазовым переходом (кипением) различных энергетических установок прямым путем, т.к. отсутствует информация о распределении температуры и коэффициентов теплоотдачи на теплоотдающей поверхности. Задача заключается в получении аналитических или полуэмпирических зависимостей, позволяющих рассчитывать интенсивность теплообмена при кипении на неизотермических (ребренных) поверхностях.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЕ РЕШЕНИЕ

Рассматривается коэффициент теплоотдачи на продольных и радиальных ребрах при развитом пузырьковом кипении и различных профилях ребра.

Продольные ребра. Обобщенное дифференциальное уравнение теплопроводности продольного ребра из работы [9] имеет вид:

$$\lambda \cdot \left[2L \cdot f_2(x) \cdot \frac{d^2 \vartheta}{dx^2} + 2L \cdot \frac{df_2(x)}{dx} \cdot \frac{d\vartheta}{dx} \right] \cdot dx = \left[2\gamma^2 \rho_n \cdot a \cdot Ja^2 \cdot c_{ж} \cdot \vartheta + \gamma^2 \cdot \left(\frac{3200}{6} \right) \cdot \frac{\rho_{ж} \cdot a^3 \cdot Ja^4}{R_0 \cdot r_0} \right] \times \frac{4\varphi}{\pi \cdot d_0^2} \cdot dx, \quad (1)$$

где γ — коэффициент, зависящий от краевого угла смачивания.

Дифференциальное уравнение теплопроводности, предложенное в работе [2], имеет вид:

$$\lambda \cdot \frac{d}{dx} \left[2L \cdot f_2(x) \cdot \frac{d\vartheta}{dx} \right] \cdot dx = 2\alpha_* \cdot \vartheta \cdot L \cdot dx \quad (2)$$

Приравняв правые части уравнений (1) и (2), получим:

$$2\alpha_* \cdot \vartheta \cdot L \cdot dx = \left[2\gamma^2 \rho_n \cdot a \cdot Ja^2 \cdot c_{ж} \cdot \vartheta + \gamma^2 \cdot \left(\frac{3200}{6} \right) \cdot \frac{\rho_{ж} \cdot a^3 \cdot Ja^4}{R_0 \cdot r_0} \right] \cdot \frac{4\varphi}{\pi d_0^2} \cdot dx \quad (3)$$

После преобразований получим коэффициент теплоотдачи при кипении на обобщенном продольном ребре в виде:

$$\alpha_* = \frac{4\varphi}{\pi d^2} \left[\frac{\gamma^2 \rho_n \cdot a \cdot Ja^2 \cdot c_{ж}}{L} + \gamma^2 \cdot \left(\frac{3200}{6} \right) \cdot \frac{\pi \rho_{ж} a^3 \cdot Ja^4}{L^2 \cdot \vartheta \cdot R_0} \right] \quad (4)$$

где φ — коэффициент объемного паросодержания, равный 0,3 и более при развитом пузырьковом кипении жидкостей; ρ_v , ρ_l — плотность паровой и жидкой фаз, соответственно, при температуре насыщения; a — коэффициент температуропроводности жидкости; $c_{ж}$ — удельная массовая теплоемкость жидкости; ϑ — температурный напор на ребре; R_0 — отрывной радиус парового пузыря; L — длина ребра; Ja — число Якоба; $d_0 = \left[\frac{3200 \rho_{ж} \cdot a^2}{g \cdot (\rho_{ж} - \rho_n)} \right]^{1/3} \cdot Ja^{2/3}$ — отрывной диаметр парового пузыря [8].

Радиальные (поперечные) ребра. Обобщенное дифференциальное уравнение радиального ребра при кипении на нем жидкости согласно данным работы [1], имеет вид:

$$\lambda \cdot \frac{d}{dr} \left[(2\pi r) \cdot 2f_2(r) \cdot \frac{d\vartheta}{dr} \right] dr = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2} \cdot \left[2\gamma^2 \rho_n \cdot a \cdot Ja^2 \cdot c_n \cdot \vartheta + \gamma^2 \cdot \left(\frac{3200}{6} \right) \cdot \frac{\rho_{ж} a^3 Ja^4}{R_0 \cdot r_0} \right] \cdot dr \quad (5)$$

Дифференциальное уравнение теплопроводности, предложенное в работе [2], такое:

$$\lambda \cdot \frac{d}{dr} \left[(2\pi r) \cdot 2f_2(r) \cdot \frac{d\vartheta}{dr} \right] \cdot dr = 4\pi r \cdot \alpha_* \cdot \vartheta \cdot dr \quad (6)$$

Приравняв правые части уравнений (5) и (6), получим:

$$4\pi r \cdot \alpha_* \cdot \vartheta \cdot dr = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2} \cdot \left[2\gamma^2 \rho_n a \cdot Ja^2 c_n \cdot \vartheta + \gamma^2 \cdot \left(\frac{3200}{6} \right) \cdot \frac{\rho_{ж} a^3 Ja^4}{R_0 \cdot r_0} \right] \cdot dr \quad (7)$$

После преобразований получим коэффициент теплоотдачи обобщенного радиального ребра в виде:

$$\alpha_* = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2} \cdot \left[\frac{\gamma^2 \rho_n \cdot a \cdot Ja^2 \cdot c_{ж}}{2\pi r} + \gamma^2 \cdot \left(\frac{3200}{6} \right) \cdot \frac{\rho_{ж} a^3 \cdot Ja^4}{r \cdot \vartheta \cdot R_0 \pi r_0} \right], \quad (8)$$

где r — текущий радиус ребра; r_0 — радиус несущей поверхности.

Уравнения (4) и (8) могут быть использованы для расчета интенсивности теплоотдачи при кипении на продольных и радиальных ребрах любого профиля, т. к. они не содержат функцию профиля ребра.

Умножив правую и левую части уравнений (4) и (8) на $\frac{l_*}{\lambda_{ж}}$, получим:

$$\alpha_* \cdot \frac{l_*}{\lambda_{ж}} = \frac{4\varphi \cdot l_*}{\pi d_0^2 \cdot \lambda_{ж}} \times \left[\frac{\gamma^2 \rho_n \cdot a \cdot Ja^2 \cdot c_{ж}}{L} + \gamma^2 \cdot \left(\frac{3200}{6} \right) \cdot \frac{\pi \rho_{ж} \cdot a^3 \cdot Ja^4}{L^2 \cdot \vartheta \cdot R_0} \right] \quad (9)$$

где $\lambda_{ж}$ — коэффициент теплопроводности жидкости при температуре насыщения; l_* — капиллярная постоянная.

После преобразований коэффициент теплоотдачи продольного обобщенного ребра в безразмерном виде может быть получен из уравнения:

$$Nu_* = Z \cdot Ja^2 \cdot \gamma^2 \cdot \left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}} \right) \cdot \left(\frac{l_*}{L} \right) \cdot [1 + \Pi_{прод}], \quad (10)$$

где $Z = \frac{4\varphi \cdot [g \cdot (\rho - \rho_n)]^{1/3}}{\pi \cdot (Ja)^{4/3} \cdot [3200 \rho \cdot a^2]^{1/3}}$ — число отрывающихся

от поверхности нагрева паровых пузырей.

Здесь

$$\Pi_{прод} = \left(\frac{3200}{6} \right) \cdot \frac{\pi \rho_{ж}^2 \cdot a^3 \cdot Ja^2}{\vartheta \cdot R_0 \cdot \lambda_{ж} \rho_n \cdot L} \quad (11)$$

Для радиальных ребер из уравнения (8) получим:

$$\alpha_* \cdot \frac{l_*}{\lambda_{ж}} = \frac{4\varphi \cdot l_*}{\pi d_0^2 \cdot 2\pi r} \times \left[\frac{\gamma^2 \rho_n \cdot a \cdot Ja^2 \cdot c_{ж}}{\lambda_{ж}} + \gamma^2 \cdot \left(\frac{3200}{6} \right) \cdot \frac{\rho_{ж} \cdot a^3 \cdot Ja^4}{\lambda_{ж} \cdot \vartheta \cdot d_0 \cdot r_0} \right] \quad (12)$$

После преобразований уравнение (12) примет вид:

$$Nu_* = Z \cdot Ja^2 \cdot \gamma^2 \cdot \left(\frac{l_*}{2\pi r} \right) \cdot \left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}} \right) \cdot [1 + \Pi_{рад}], \quad (13)$$

Здесь

$$\Pi_{рад} = \left(\frac{80}{3} \right) \cdot \frac{\rho_{ж}^2 \cdot a^3 \cdot Ja^2}{\lambda_{ж} \cdot \vartheta \cdot R_0 \cdot \rho_n \cdot r} \quad (14)$$

III. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как показывает анализ уравнений (10) и (13) число Нуссельта, а, следовательно, и коэффициент теплоотдачи продольных и радиальных ребер, не зависит от профиля ребра, а определяется внутренними характеристиками процесса кипения, теплофизическими свойствами жидкости, режимными параметрами (давлением насыщения и тепловой нагрузкой) и геометрическими параметрами ребра. Уравнения (10) и (13) являются общими для продольных и радиальных ребер различного профиля, т.к. они не содержат функцию профиля ребра и эти уравнения могут служить в качестве расчетных при определении числа Нуссельта при кипении жидкостей на ребрах.

Анализ уравнений (10) и (13) показывает, что инерционные составляющие в этих уравнениях $\Pi_{\text{прод}}$ и $\Pi_{\text{рад}}$ при развитом пузырьковом кипении гораздо меньше единицы, поэтому определение коэффициентов теплоотдачи на ребрах можно вести по уравнениям:

для продольных ребер:

$$Nu = Z \cdot Ja^2 \cdot \gamma^2 \cdot \left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}}\right) \cdot \left(\frac{l_*}{L}\right) \quad \text{при } \Pi_{\text{прод}} \ll 1 \quad (15)$$

для радиальных ребер:

$$Nu = Z \cdot Ja^2 \cdot \gamma^2 \cdot \left(\frac{l_*}{2\pi r}\right) \cdot \left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}}\right) \quad \text{при } \Pi_{\text{рад}} \ll 1 \quad (16)$$

Было проведено сравнение значений α , рассчитанных по формулам (4) и (8), с экспериментальными значениями коэффициентов теплоотдачи для продольного и поперечного типов оребрения при различных профилях ребер. Результаты сравнения представлены на рис. 1 и 2.

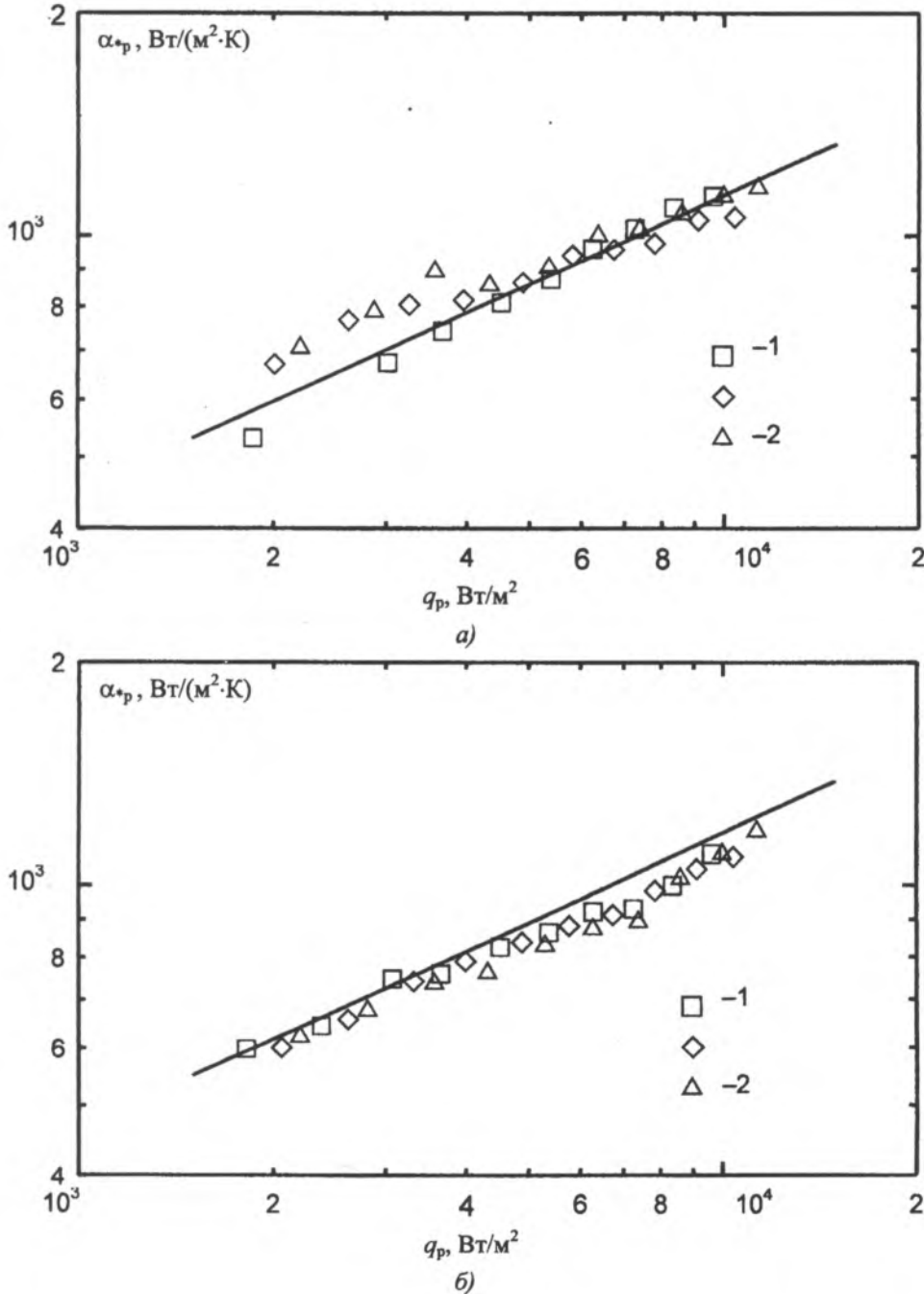
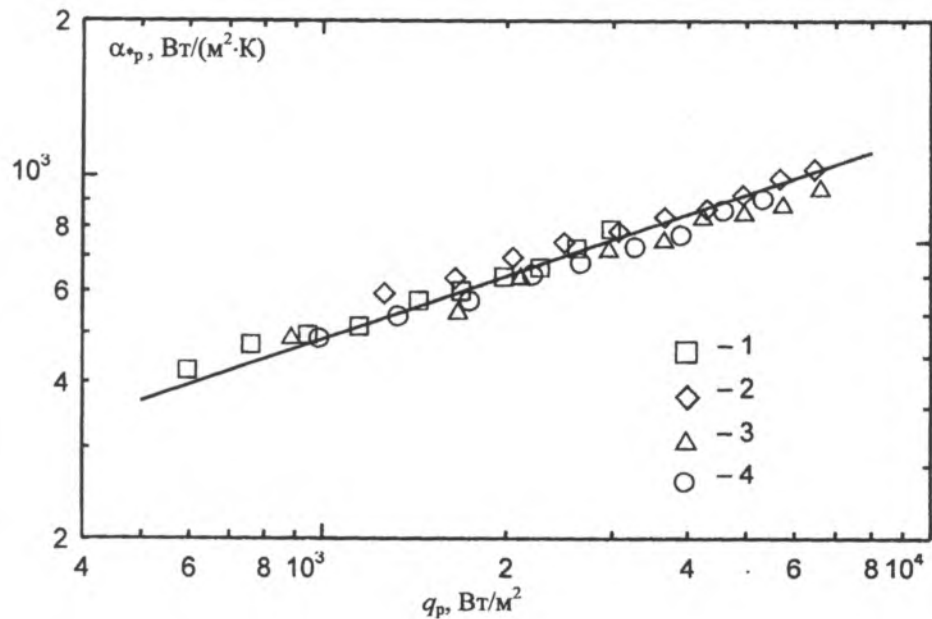
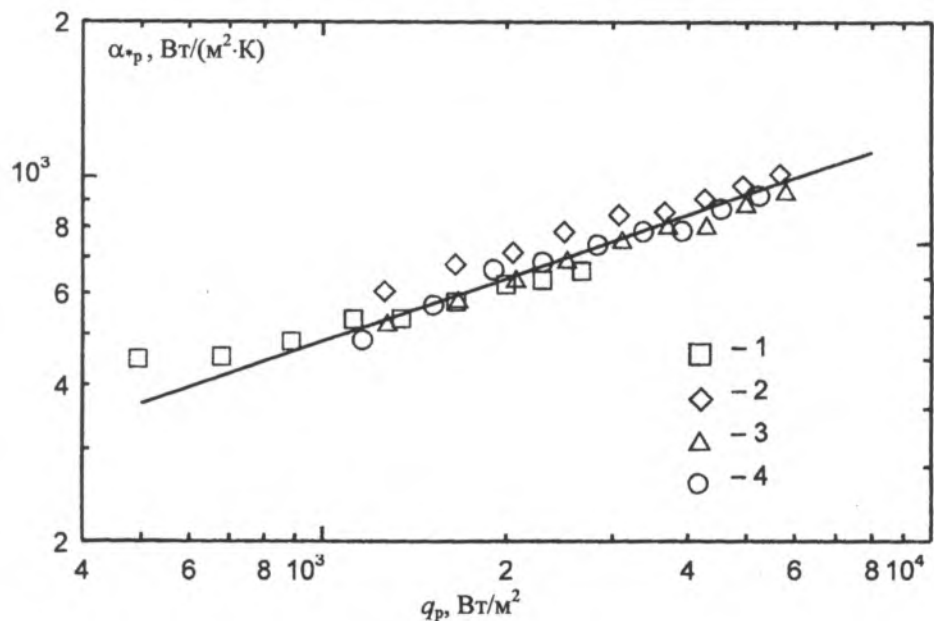


Рис. 1. Зависимость $\alpha_p = f(q_p)$ для продольного оребрения:

а) — этиловый спирт; б) — ацетон; сплошная линия — расчет по уравнению (4); символы — экспериментальные значения; 1 — прямоугольный профиль; 2 — трапецевидный; 3 — треугольный



а)



б)

Рис. 2. Зависимость $\alpha_p = f(q_p)$ для поперечного ребрения: а) — этиловый спирт; б) — ацетон; сплошная линия — расчет по уравнению (8); символы — экспериментальные значения; 1 — прямоугольный профиль; 2 — трапецевидный; 3 — треугольный; 4 — параболический.

Рабочие жидкости — ацетон и этиловый спирт. Давление насыщения — 0,1 МПа. Коэффициент $\gamma = 0,042$ для продольных ребер и 0,08 — для радиальных ребер.

Из рис. 1 и 2 видно, что средние расчетные значения коэффициентов теплоотдачи на ребрах удовлетворительно согласуются с экспериментальными значениями. Погрешность определения коэффициентов теплоотдачи составляет $\pm 20\%$.

IV. ВЫВОДЫ

Предложенная обобщающая зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи ребра при кипении, как в размерном, так и в безразмерном виде удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными, что говорит о возможности применения полученных зависимостей для расчета интенсивности теплоотдачи при кипении на ребрах без привлечения эмпирических зависимостей и проведения экспериментальных исследований.

Экспериментально и теоретически установлено, что при развитом пузырьковом кипении интенсивность теплоотдачи не зависит от профиля неизотермической (оребренной) поверхности, а определяется только режимными параметрами, теплофизическими свойствами жидкости, геометрическими размерами оребренной поверхности и внутренними характеристиками процесса кипения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овсянник А. В. Модель процессов теплообмена при кипении на неизотермической (поперечно-оребренной) поверхности // Холодильная техника и технология. — 2004. — № 2 (88). — С. 72 – 76.
2. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена. Пер. с англ. — М.: Энергия, 1977. — 464 с.
3. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении. — Киев: Наукова думка, 1980. — 316 с.
4. Zuber N. The dynamics of vapour bubbles in nonuniform temperature fields. // Int. J. Heat and Mass Transfer. — 1961. — V. 2, № 1. — P. 83 – 102.
5. Лабунцов Д. А. Современные представления о механизме пузырькового кипения жидкостей. — В кн.: Теплообмен и физическая динамика. — М.: Наука, 1974. — С. 95 – 115.
6. Ягов В. В. Исследование кипения жидкостей в области низких давлений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: 1971. — 34 с.
7. Кутепов А. М., Стерман Л. С., Стюшин Н. Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. — М.: Высшая школа, 1986. — 352 с.
8. Волошко А. А., Вургафт А. В. Динамика роста парового пузыря при кипении в условиях свободного движения // ИФЖ. — 1970. — Т. 19, № 1. — С. 15 – 20.
9. Овсянник А. В. Теплообмен при кипении на развитых поверхностях. — Гомель, 2004. — 372 с.

Получена в редакции 08.06.2004 г., принята к печати 15.08.2004 г.

СПИСОК

действительных членов (академиков) Международной академии холода (Украинский филиал). Начало на стр. 29 и 39. Окончание.

85. Султангулов Д.М.	Россия	92. Черевко А.И.	Украина
86. Терзиев Г.С.	Украина	93. Чумак И.Г.	Украина
87. Ханкаджи К.А.М.	Иордания	94. Шевченко П.И.	Украина
88. Хоменко В.М.	Украина	95. Шишкина Н.С.	Россия
89. Хуан Бин Жуин	Тайвань	96. Шубин А.А.	Украина
90. Чагаровский А.П.	Украина	97. Имс Я.В.	Англия
91. Челурненко В.П.	Украина		