

УДК 621.59

А.В. Троценко*, М.В. Поддубная**

Одесская государственная академия холода, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 65082

*e-mail: trotalex@rambler.ru

e-mail: marina.sak@mail.ru

ВЛИЯНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХПОТОЧНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Методом последовательного исключения технических потерь исследовано их влияние на средний температурный напор, тепловую нагрузку и эксергетический КПД криогенных двухпоточных теплообменников. Предложен и реализован алгоритм тестирования метода исключения потерь. Показана устойчивость этого метода относительно порядка и количества одновременно исключаемых потерь применительно к теплообменникам криогенной установки.

Ключевые слова: *Эксергетические потери. Двухпоточный криогенный теплообменник. Рефрижераторный режим. Ожижительный режим. Водород. Азот. Компрессор. Детандер. Метод последовательного исключения.*

A.V. Trotsenko, M.V. Poddubnaya

THE INFLUENCE OF THE EXERGIC LOSSES COMPONENTS ON THE TWO-FLOWS HEAT EXCHANGERS CHARACTERISTICS

Using the subsequent elimination of the technical losses method the influence of these losses on the average temperature drop, heat load, exergic coefficient of efficiency for two-flow cryogenic heat exchangers was investigated. The algorithm of testing the losses elimination method was proposed and implemented. The permanence of this method relative to the order and amount of simultaneously eliminated losses applied to cryogenic heat exchangers was shown.

Keywords: *Exergic losses. Two-flows cryogenic heat exchanger. Refrigerator mode. Liquefier mode. Hydrogen. Nitrogen. Compressor. Expander. Subsequent elimination method.*

1. ВВЕДЕНИЕ

Теплообменные аппараты являются самыми распространёнными элементами низкотемпературных установок. Поэтому естественен тот интерес, который проявляется к различным аспектам их проектирования и эксплуатации [1]. Одним из развиваемых направлений их исследования является анализ термодинамической эффективности этих аппаратов. Несмотря на то, что теплообменники относятся к достаточно совершенным элементам криогенных установок (их температурный КПД превышает 90 % [2]), вопросы повышения их эффективности по-прежнему актуальны. Во-первых, это обусловлено их большим числом в криогенных системах. Во-вторых, по мере повышения эксергетического КПД данных аппаратов возникает проблема, связанная с возможностью их практической реализации из-за ограничений, обусловленных Вторым началом термодинамики.

Предложенный метод последовательного исключения эксергетических потерь [3,4,6] даёт возможность на термодинамическом уровне вычислить значения составляющих потерь от необратимости про-

цессов в теплообменнике. Цель данной работы состоит в исследовании влияния составляющих эксергетических потерь на ряд характеристик двухпоточных криогенных теплообменников. В литературе не было найдено источников, в которых бы рассматривалось решение подобных задач.

2. МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ИСКЛЮЧЕНИЯ ПОТЕРЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХПОТОЧНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Из-за сложности алгоритма, реализующего метод последовательного исключения, не представляется возможным найти решение поставленной задачи аналитически. Поэтому все исследования проводились численными методами для ряда известных циклов криогенной техники. Анализ любого двухпоточного теплообменника Т сводился к расчётной схеме, представленной на рис. 1. В ней использованы следующие условные обозначения: M_m , M_n — расходы рабочего тела по прямому и обратному потокам, соответственно; Q_3 — теплопритоки из окружающей среды.

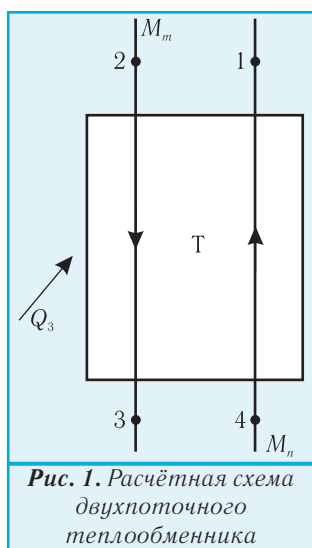


Рис. 1. Расчётная схема двухпоточного теплообменника

Исследуемыми характеристиками теплообменного аппарата, которые могут быть проанализированы методом исключения потерь, являются: суммарная тепловая нагрузка Q_c , эксергетический КПД η_e , средний логарифмический температурный напор ΔT_{cp} . Для переохладителей флегмы газоразделительной установки дополнительно может быть вычислено увеличение доли жидкости после процесса дросселирования.

Величина Q_c , представляющая собой количество тепла, воспринимаемого обратным потоком, рассчитывается из равенства:

$$Q_c = M_n(h_1 - h_4), \quad (1)$$

где h — энтальпия. Нижний цифровой индекс при термодинамической величине здесь и далее обозначает номер узловой точки.

Значение η_e определяется, исходя из эксергетического баланса аппарата, по формуле:

$$\eta_e = \frac{E_1 + E_3}{E_2 + E_4}, \quad (2)$$

где E_i — полная эксергия рабочего тела в соответствующей узловой точке, $i=1,2,3,4$.

Средний логарифмический температурный напор

$$\Delta T_{cp} = \frac{\Delta T_{1-2} - \Delta T_{3-4}}{\ln \frac{\Delta T_{1-2}}{\Delta T_{3-4}}}, \quad (3)$$

где ΔT_{i-j} — разность температур между i -ой и j -ой узловыми точками; $i, j=1,2,3,4$.

Для того чтобы исследовать влияние температурного уровня включения теплообменника, под которым подразумевается температура прямого потока на входе в аппарат, на его характеристики, выбран водородный дроссельный цикл с внешней и детандерной ступенями промежуточного охлаждения, изображённый на рис. 2. Этот выбор обусловлен, в первую очередь, большим числом теплообменных аппаратов в схеме и

широким диапазоном изменения температур потоков в них. Исследование характеристик производилось для рефрижераторного и ожигительного режимов работы установки. В результате термодинамического расчёта цикла определено, что данные температурные уровни составляют: 293; 81,9; 65 и 30 К.

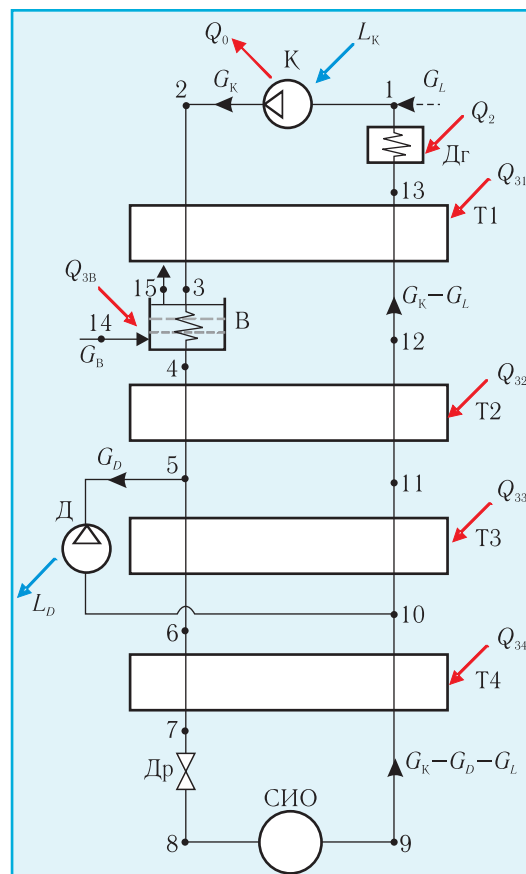


Рис. 2. Схема водородного дроссельного цикла с внешней и детандерной ступенями промежуточного охлаждения: К — компрессор; Д — детандер; Т1, Т2, Т3, Т4 — теплообменники; Др — дроссель; В — ванна с жидким азотом; Дг — догреватель; СИО — ступень использования охлаждения

На рис. 2 использованы следующие условные обозначения:

- расходы материальных потоков: G_L — расход жидкого продукта; G_K — расход рабочего тела через компрессор; G_D — расход рабочего тела через детандер; G_B — расход жидкого азота, подаваемого в ванну;
- энергетические потоки: $Q_{31}, Q_{32}, Q_{33}, Q_{34}, Q_{3B}, Q_2$ — теплопритоки из окружающей среды к теплообменникам Т1, Т2, Т3, Т4, ванне, догревателю, соответственно; Q_0 — тепло, отдаваемое в окружающую среду; L_K — работа, затраченная компрессором; L_D — работа, произведённая детандером. Имена и стрелки, относящиеся к энергетическим потокам, учитываемым в эксергетических балансах, выделены синим цветом, а рассматриваемые как потери — красным.

Элемент СИО представляет собой ступень использования охлаждения, которая при работе в рефрижераторном режиме рассматривается как испари-

тель, в ожижительном — как сборник жидкости. Догреватель физически представляет собой участок трубопровода от места выхода обратного потока из наиболее высокотемпературного теплообменника до входа в компрессор, в котором осуществляется подогрев обратного потока до температуры окружающей среды из-за имеющей место недорекуперации в теплообменнике Т1.

Термодинамический расчёт цикла производился при следующих исходных данных:

- Производительности: 100 Вт — рефрижераторный режим; 0,11 моль/с — ожижительный режим на температурном уровне 21 К.
- Температуры: $T_5=65$ К; $T_1=T_2=293$ К.
- Давления в узловых точках: $P_1=0,1$ МПа; $P_2=10$ МПа; $P_{14}=P_{15}=0,12$ МПа.
- Коэффициенты полезного действия: изотермический КПД компрессора $\eta_k=0,65$; изоэнтропный КПД детандера $\eta_s=0,7$.
- Значения недорекупераций: $\Delta T_{1-13}=8$ К; $\Delta T_{2-16}=8$ К; $\Delta T_{4-14}=3$ К; $\Delta T_{6-10}=2,5$ К; $\Delta T_{4-12}=3$ К.

• Суммарные гидравлические сопротивления в прямом потоке $\Delta P_f=0,5$ МПа; суммарные гидравлические потери по обратному потоку ΔP_r определялись из условия, что давление рабочего тела на всасывании в компрессор равнялось атмосферному. Гидравлические сопротивления потоков распределялись между теплообменниками в соответствии с принципом равенности потерь [7].

• Для рефрижераторного режима работы установки величина расхода G_L считалась равной нулю.

Составляющими суммарных эксергетических потерь теплообменника D_s являются теплопритоки из окружающей среды D_3 , гидравлические сопротивления, соответственно, в прямом D_f и обратном D_r потоках, а также собственные потери в теплообменнике D_T . В соответствии с принципом аддитивности потерь [5] имеет место равенство:

$$D_s = D_{Q_3} + D_f + D_r + D_T. \quad (4)$$

В соответствии с использованным методом последовательно, полагая равным нулю значения одной из переменных Q_3 , ΔP_f , ΔP_r , из рассмотрения исключалась одна из составляющих потерь.

Блок-схема, реализующая метод последовательного исключения перечисленных выше составляющих потерь в двухпоточном теплообменнике, приведена на рис. 3. Блок «Ввод исходных данных» предполагает задание следующих величин: имён рабочих тел, температур и давлений в узловых точках, расходов рабочих тел в прямом и обратном потоках, теплопритоков из окружающей среды.

На рис. 3 блоками «РТ», «РН» обозначены подпрограммы расчёта термодинамических функций рабочих тел, соответственно, при независимых переменных: давление, температура; давление, энтальпия.

Значение целочисленной переменной i определяет порядок исключения составляющих эксергетических потерь и условие окончания расчёта. При $i=1$

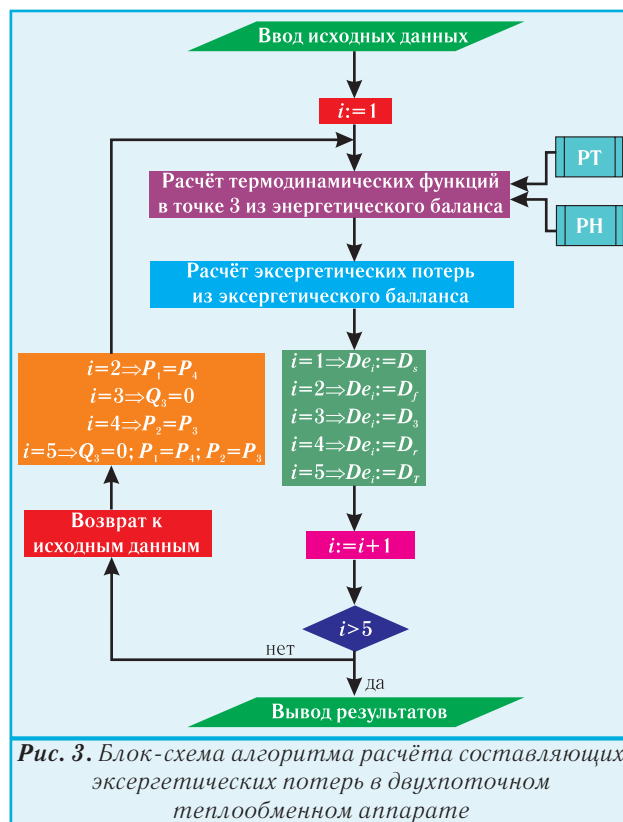


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчёта составляющих эксергетических потерь в двухпоточном теплообменном аппарате

вычисляются суммарные потери в теплообменнике.

Результаты термодинамических расчётов цикла, выполненные с использованием кубического уравнения состояния Редлиха-Квонга-Вильсона [8], отражены в табл. 1. В ней колонка i имеет смысл варианта расчёта в соответствии с представленной блок-схемой. Рассчитанные характеристики теплообменника имеют следующие размерности: D_s , Q_c — Вт; ΔT_{cp} — К. Значения η_e выражены в процентах.

Из данных табл. 1 можно сделать следующие выводы:

- Величина Q_c практически не зависит от вида исключаемой технической потери. Таким образом, значение Q_c в первую очередь определяется термодинамическими свойствами рабочих тел и параметрами узловых точек.

- Эксергетический КПД увеличивается при исключении любой составляющей потери. При этом наибольшее влияние на его значение оказывают теплопритоки из окружающей среды.

- Средний температурный напор уменьшается при исключении любой составляющей потерь.

Данные выводы носят качественный характер и не зависят ни от режима работы установки, ни от вида исключаемой потери. Вряд ли имеет смысл для приведенного и других примеров анализировать, какой из параметров, регулирующий потерю, следует изменять. Это обусловлено рядом обстоятельств: во-первых, никакую из потерь реально нельзя полностью исключить; во-вторых, численные значения этих параметров в определённой мере произвольны, хотя и соответствуют принимаемым на практике величинам. По этой причине вполне возможно задать другой набор исходных значений регулирующих параметров,

Таблица 1. Результаты анализа теплообменников дроссельного цикла с внешней и детандерной ступенями промежуточного охлаждения

Исключаемые потери	Характеристики	Режим работы							
		Рефрижераторный				Ожижительный			
		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
–	D_s	446,1	130,3	230,6	47,9	1052,7	298,2	370,7	24,6
	Q_c	1443,3	137,5	156,8	20,5	2164,4	261,4	179,9	7,9
	η_e	89,5	97,8	95,5	99,0	86,1	97,2	94,6	99,4
	ΔT_{cp}	17,9	5,9	5,5	3,0	29,6	7,9	7,5	4,4
ΔP_f	D_f	11,6	6,7	2,6	1,3	22,4	11,9	3,0	1,5
	Q_c	1443,3	137,5	156,8	20,5	2164,4	261,4	179,9	7,9
	η_e	89,7	97,9	95,6	99,1	86,4	97,4	94,6	99,5
	ΔT_{cp}	17,9	5,9	5,4	3,0	29,6	8,0	7,4	4,4
Q_3	D_3	122,9	24,7	71,6	11,5	105,4	45,9	82,2	3,92
	Q_c	1443,3	137,5	156,8	20,5	2164,4	261,4	179,9	7,9
	η_e	92,4	98,2	96,9	99,3	87,5	97,7	95,8	99,5
	ΔT_{cp}	14,5	5,6	3,0	2,9	27,5	7,7	4,4	4,4
ΔP_r	D_r	66,4	45,7	28,3	7,3	99,6	67,6	42,6	3,0
	Q_c	1443,4	137,5	156,7	20,4	2164,3	261,6	179,9	7,9
	η_e	91,0	98,6	96,1	99,2	87,4	97,9	95,2	99,5
	ΔT_{cp}	17,9	5,9	3,5	3,0	29,6	7,9	7,5	4,4
$\Delta P_f, Q_3, \Delta P_r$	D_{cob}	245,4	54,1	128,9	27,9	825,6	171,8	244,5	16,16
	Q_c	1443,3	137,4	156,6	20,4	2164,4	261,2	179,7	7,9
	η_e	94,2	99,1	97,5	99,4	89,1	98,4	96,4	99,6
	ΔT_{cp}	14,5	5,6	3,0	2,9	27,5	7,8	4,5	4,4

которые перераспределяют доли составляющих технических потерь.

Для увеличения термодинамической эффективности данной системы важно определить, какие из её параметров и в каких пределах следует изменять, чтобы уменьшить суммарные потери в ней. Решение такой минимизационной задачи в большей мере определяется заданными ограничениями типа равенств и неравенств. Но любые качественные результаты дают возможность обосновать решение оптимизационной задачи.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ИСКЛЮЧЕНИЯ ПОТЕРЬ НА РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УРОВНЯХ ВКЛЮЧЕНИЯ ТЕПЛОБМЕННИКОВ

Широкий диапазон изменения температур включения теплообменников в разных режимах работы установки даёт возможность протестировать надёжность и обоснованность самого метода исключения потерь. Эта проверка заключается в сравнении величин собственных потерь D_T , рассчитанных различными способами. Эти способы отличаются количеством и видом одновременно исключаемых потерь.

Первый способ заключается в последовательном определении вклада каждой из потерь. Тогда значение

$$D_1 = D_s - D_3 - D_f - D_r \quad (5)$$

Второй способ состоит в нахождении

суммарного вклада от гидравлических сопротивлений обоих потоков D_H ($\Delta P_f = \Delta P_r = 0$), а затем составляющей от теплопритоков D_3 ($Q_3 = 0$). Тогда величина

$$D_T = D_s - D_H - D_3 \quad (6)$$

Третьим способом первоначально находятся общие потери от гидравлических сопротивлений по прямому потоку и теплопритоков $D_{f,3}$ ($\Delta P_f = Q_3 = 0$), а потом потери обусловленные ΔP_r ($\Delta P_r = 0$). По данному способу значение

$$D_T = D_s - D_{f,3} - D_r \quad (7)$$

По четвёртому способу вначале находятся общие потери от гидравлических сопротивлений по обратному потоку и теплопритоков $D_{r,3}$ ($\Delta P_r = Q_3 = 0$), потом потери, обусловленные ΔP_f . Формула для расчёта значения D_T в этом случае имеет

вид:

$$D_T = D_s - D_{r,3} - D_f \quad (8)$$

Согласно пятому способу одновременно исключаются все технические потери ($\Delta P_f = \Delta P_r = Q_3 = 0$). Тогда

$$D_T = D_s \quad (9)$$

В табл. 2 представлены результаты расчётов в соответствии с предложенными способами.

Сравнив полученные значения собственных потерь от неравновесного теплообмена, можно сделать вывод, что они практически равны, так как отклонения составляют не более 2 %. Этот факт свидетельствует об определённой «автономности» потерь, т.е. независимости результатов вычисления величины D_T от порядка и количества одновременно исключаемых потерь. В свою очередь данный вывод является аргументом в пользу применения метода последовательного исключения потерь для термодинамического

Таблица 2. Результаты расчётов различными способами собственных потерь от неравновесного теплообмена

Способ	Рефрижераторный режим				Ожижительный режим			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
I	245,2	53,0	128,9	27,9	825,4	172,7	244,5	16,2
II	245,2	53,5	128,9	27,9	825,4	172,7	244,3	16,2
III	245,4	53,6	128,1	27,7	825,6	172,8	243,0	16,2
IV	245,2	53,6	128,3	27,9	825,4	172,4	244,5	16,4
V	245,4	54,1	128,9	27,7	825,6	171,7	244,5	16,2

анализа двухпоточных теплообменников [4].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы данной работы сводятся к следующему:

1. Качественно характер изменения исследованных показателей теплообменников в зависимости от температурного уровня включения не зависит от режима работы установки.

2. Величина собственных неустраняемых потерь теплообменника существенно зависит от режима работы установки. Как правило, их величина в рефрижераторном режиме значительно меньше, чем в ожижительном. Однако возможны исключения, как например, для теплообменника Т4, входящего в состав представленной в работе схемы.

3. Тестирование использованного метода определения составляющих D_s показало, что для всех исследованных теплообменников результаты вычисления величины D_T не зависят ни от количества, ни от порядка одновременно исключаемых технических потерь.

Данные выводы подтверждаются аналогичными результатами, полученными при термодинамических расчётах дроссельного цикла с внешней ступенью промежуточного охлаждения [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев В.А., Крохин Ю.И. Тепло- и массообменные аппараты криогенной техники: Учебное пособие для вузов. — М.: Энергоиздат, 1982. — 312 с.
2. Криогенные системы. Т.2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем/ А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.П. Беяков и др.: Под общ. ред. А.М. Архарова и А.И. Смородина. — М.: Машиностроение, 1999. — 720 с.
3. Троценко А.В. Определение эксергетических потерь методом исключения// Холодильная техника и технология. — 2008. — № 1 (111). — С. 40-45.
4. Троценко А.В. Определение и анализ составляющих эксергетических потерь теплообменных аппаратов// Технические газы. — 2007. — № 1. — С. 56-62.
5. Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин Е.И. Криогенные системы. Т.1. Основы теории и расчета. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1996. — 576 с.
6. Троценко А.В., Поддубная М.В. Термодинамический анализ циклов криогенных систем методом исключения потерь// Технические газы. — 2009. — № 4. — С. 60-64.
7. Бродянский В.М., Семёнов А.М. Термодинамические основы криогенной техники. — М.: Энергия, 1980. — 448 с.
8. Wilson G.M. Vapour-liquid equilibria correlation by means of a modified Redlich-Kwong equation of state// Adv. Cryog. Eng. — 1964. — V.9. — No 5. — P. 198-207.



11th Cryogenics 2010

IIR International Conference



April 26 – 29, 2010
Bratislava, Slovakia

We would like to invite you to Bratislava, capital of Slovakia, to take part in the 11th Cryogenics 2010, IIR International Conference and Exhibition.

Topics:

- Helium cryogenics
- Superconductivity and cryogenic physics
- Liquefaction and separation of industrial gases and natural gas
- Application of technical gases in industry, medicine and biology

PARTICIPANT REGISTRATION IN PROCESS

Conference site:
Conference centre SUZA
Drotarska cesta, 46, Bratislava, Slovakia
www.suza.sk

Conference organization services; exhibition; accommodation:
ICARIS Conference Management
Male namesti 1, 11000, Praha-1, Ceska republika

Contacts: Romana@icarlis.cz; icarlis@icarlis.cz;
www.icarlis.cz

More detailed information:
www.icarlis.cz/conf/Cryogenics2010

We look forward to meet you!

Уважаемые коллеги! Приглашаем на 11-ую Международную конференцию и выставку «Cryogenics 2010»/«Криогеника 2010» в столице Словакии, Братиславе

Темы:

- Гелиевая криогеника
- Сверхпроводимость и криофизика
- Ожижение и разделение технических газов и природного газа
- Использование технических газов в промышленности, медицине и биологии

ПРИНИМАЮТСЯ ЗАЯВКИ НА УЧАСТИЕ

Место проведения конференции:
Конференц-центр SUZA
Drotarska cesta, 46, Bratislava, Slovakia
www.suza.sk

Организационные службы конференции, выставки и гостиницы:
ICARIS Conference Management
Male namesti 1, 11000, Praha-1, Ceska republika

Контакты: Romana@icarlis.cz; icarlis@icarlis.cz;
www.icarlis.cz

Больше информации можно найти на сайте:
www.icarlis.cz/conf/Cryogenics2010

С радостью ждём встречи с Вами!