

УДК 532.5.01

# Решение задачи оптимизации криогенного трубопровода с помощью метода поиска Парето-оптимального решения

Канд. техн. наук А. В. ЗАЙЦЕВ<sup>1</sup>, Е. В. ЛОГВИНЕНКО

<sup>1</sup>zai\_@inbox.ru

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*В статье рассмотрена задача оптимизации криогенного трубопровода, в которой в роли критериев качества выбраны мощности гидравлических и тепловых потерь. Течение криогенной жидкости по трубопроводу, в данном случае, описывается системой дифференциальных уравнений: уравнениями движения и неразрывности; уравнением, учитывающим тепловое состояние жидкости (уравнение энергии); комплексом уравнений для вычисления теплофизических свойств криогенной жидкости, затем с целью дальнейшего численного решения производится переход от дифференциалов к конечным разностям. В оптимизационной задаче использован метод исследования пространства параметров. Он позволяет достаточно гибко реагировать на промежуточные результаты расчетов, переводить параметры из одной группы в другую, достигая тем самым минимальных затрат на поиск решения. Сформулирован алгоритм численного исследования пространства параметров системы, приведена блок-схема. Приведен пример оптимизации криогенного трубопровода, предназначенного для транспортирования жидкого азота длиной 100 м. Диаметр внутренней трубы 36×2 мм, диаметр кожуха 100×2 мм. Получены оптимальные решения данной задачи. Выбрана наилучшая пробная точка (набор параметров), величина суммарных потерь в которой не превышает 1,3 кВт.*

**Ключевые слова:** криогенный трубопровод, оптимизация, Парето-оптимальное решение, криогенная жидкость, транспортирование.

## Optimization of cryogenic piping using Pareto optimal solution method

Ph. D. A. V. ZAITSEV<sup>1</sup>, E. V. LOGVINENKO

<sup>1</sup>zai\_@inbox.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

*The article deals with optimization of cryogenic piping, performance criterion being hydraulic and heat pressure loss power. Cryogenic liquid flow is described by differential equations system (equation of motion and continuity, equation for thermal condition of liquid (energy equation); system of equations for thermophysical properties of cryogenic liquid). Then we use finite differences instead of differentials to get numerical solution. Parameter space method is used for optimization. It allows quick response to intermediate calculation results and parameters upgrading, so, finding solutions becoming optimal. Numerical analysis algorithm for system space parameters and flow-scheme are given. The theory is exemplified by optimization of app. 100 m. length cryogenic piping for liquid nitrogen. Inner tube diameter is 36×2 mm, pipe casing diameter is 100×2 mm. Optimal solutions are given. The best sampling point (parameter set) is chosen. The total loss is within 1.3 kW there.*

**Keywords:** cryogenic piping, optimization, Pareto optimal solution, cryogenic liquid, handling.

В общем случае задача оптимизации криогенного трубопровода, как и любая задача проектирования современного высокоэффективного оборудования, является многокритериальной, многопараметрической математической задачей, требующей применения соответствующего математического аппарата и методов получения решения.

Возникновению методов оптимального проектирования различных систем и устройств, учитывающих несколько критериев качества, предшествовало развитие вычислительной математики и вычислительной техники. Более того, все чаще инженеры, математики и конструкторы, занимающиеся оптимизацией, вследствие

необъективности отказываются от постановки задачи с единственной целевой функцией.

Свойствам и методам отыскания Парето-оптимальных решений посвящена обширная литература, среди которой, по-нашему мнению, следует выделить монографию В. В. Подиновского и В. В. Ногина [1]. Вопросы Парето-оптимальных решений затрагиваются и в теории игр, математической экономии, теории статистических решений, исследований операций, теории оптимального управления и др.

Эффективное решение не является единственным, однако, выявление множества эффективных решений

сильно сужает область поиска и является первой задачей интерактивных (человеко-машинных) процедур многокритериальной оптимизации. На суженной области можно вводить дополнительные упрощения и ограничения или даже пользоваться методом вариантных расчетов.

Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями основан на методике изучения и решения задач, в которых необходимо наилучшим образом выбрать значения нескольких параметров оптимизации с учетом получаемых значений нескольких критериев качества [2]. Поэтому, для наиболее подходящего метода оптимального проектирования при разработке технических объектов, в данной работе выбран интерактивный «эвристический» итерационный процесс поиска, так называемого, Парето-оптимального решения [1], заключающийся в систематическом просмотре многомерной области критериев качества с помощью последовательностей равномерно распределенных пробных точек, каждая из которых представляет собой набор параметров оптимизации, совокупность которых является необходимой и достаточной для вычисления критериев качества.

Используемый метод (Parameter Space Investigation method — PSI method, метод исследования пространства параметров — МПП) позволяет достаточно гибко реагировать на промежуточные результаты расчетов, переводить параметры из одной группы в другую, достигая тем самым минимальных затрат на поиск решения.

Первый шаг для решения данной задачи — это создание математической модели, описывающей процессы в криогенном трубопроводе при транспортировании криогенной жидкости на заданное расстояние.

Таким образом, задается математическая модель исследуемой системы, трубопровода для транспортирования криогенных жидкостей, которая зависит от  $n$ -го количества параметров  $\alpha_1, \dots, \alpha_n$  (например, температура жидкости на входе в трубопровод, давление жидкости, изменение ее теплофизических свойств, потери давления в процессе транспортирования и др.). В данном случае модель представлена в виде системы уравнений, отвечающих требованиям корректной постановки задачи [3–7]:

— уравнения движения и неразрывности:

$$\frac{\partial(f\rho w)}{\partial\tau} + w \frac{\partial(f\rho w)}{\partial z} + (1 + \delta) \frac{f \partial p}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(f\rho)}{\partial\tau} + \frac{\partial(f\rho w)}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

где  $f$  — площадь поперечного сечения трубы, м<sup>2</sup>;  $\rho$  — плотность криогенной жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $w$  — скорость потока, м/с;  $\tau$  — время, с;  $z$  — продольная (осевая) координата, м;  $p$  — давление, Па;  $\delta \frac{\partial p}{\partial z}$  — потери давления в потоке, обусловленные трением и деформированием профиля скоростей;

— уравнение, учитывающие тепловое состояние жидкости (уравнение энергии):

$$\frac{\partial i}{\partial\tau} + w \frac{\partial i}{\partial z} = Q. \quad (3)$$

где  $i$  — энтальпия криогенной жидкости;

— комплекс уравнений для вычисления теплофизических свойств криогенной жидкости [12]:

$$\rho = \rho(p, T); c_p = c_p(p, T); T_s = T(p). \quad (4)$$

где  $c_p$  — теплоемкость криогенной жидкости, кДж/(кг·К);  $T_s$  — температура насыщения криогенной жидкости, К.

Затем в этих уравнениях с целью дальнейшего численного решения производится переход от дифференциалов к конечным разностям [8–11]. Весь трубопровод разбивается на  $n$  участков вдоль оси  $z$  и бесконечно малая величина  $dz$  заменяется конечной разностью  $\Delta z = z_{i+1} - z_i$  ( $i = 1 \dots n$ ). Дифференциал времени  $dt$  заменяется конечным временным шагом  $\Delta t$ .

Существует понятие пространство параметров, которое будет применяться далее. Пространство параметров — это  $m$ -мерное пространство, состоящее из точек с координатами  $(\alpha_1, \dots, \alpha_m)$ . Соответственно каждой такой точке  $\alpha_k$  ( $k = 1 \dots m$ ) будет соответствовать определенный набор параметров.

В соответствии с заданием проектирования или по иным причинам могут быть указаны разумные пределы изменения каждого из этих параметров, т. е. могут быть заданы параметрические ограничения. Вывод о параметрических ограничениях может быть сделан после первой серии опытов.

Данные ограничения выделяют в пространстве некоторую область, и в дальнейшем мы будем исследовать только точки, принадлежащие этой области.

Кроме параметрических ограничений в условии задачи также включают функциональные ограничения. В данной работе в качестве функциональных ограничений выбраны:

$$p_{\text{out}} = p_{\text{in}} - \sum_i \Delta p_i > p_e; \quad (5)$$

$$T_{\text{out}} = T_{\text{in}} + \sum_i \Delta T_i < T_s, \quad (6)$$

где  $p_{\text{in}}, T_{\text{in}}$  — давление и температура на входе в криогенный трубопровод;  $p_{\text{out}}, T_{\text{out}}$  — соответствующие параметры на выходе из трубопровода;  $\sum_i \Delta p_i$  и  $\sum_i \Delta T_i$  — суммарные потери давления и изменение температуры по длине трубопровода;  $p_e$  — атмосферное давление.

Задание такого рода ограничений исключает варианты решения при падении давления в магистрали ниже давления на выходе  $p_e$ , так как в этом случае процесс транспортирования становится невозможным, и при увеличении температуры до уровня температуры насыщения  $T_s$ , поскольку при повышении температуры до температуры насыщения начинается процесс кипения криогенной жидкости, поток становится двухфазным, что резко увеличивает потери при транспортировании жидкости по трубопроводу, и условие однофазности потока при оптимизации становится заведомо необходимым.

Введем понятие критерий качества или целевая функция. Критерий качества — это некоторая характеристика данной системы, которая связана с ее качеством монотонной зависимостью. То есть при прочих равных условиях система должна быть лучше при увеличении либо при уменьшении данного критерия. Зачастую критерии качества противоречат друг другу, что суще-

ственно усложняет формулировку задачи. Например, уменьшая вес устройства (что является несомненным плюсом), в то же время уменьшается его прочность (что является нежелательным). Таким образом, необходимо удачно выбрать критерий, который будет соединять в себе несколько показателей, но создание единого критерия качества проблема сложная и не всегда решаемая. Это может привести к огрублению задачи. Избежать этого может помочь выбор критериальных ограничений. Критериальное ограничение определяется как значение критерия, ниже (хуже) которого значения считаются неприемлемыми при решении данной задачи.

В качестве критериев оптимальности (целевых функций) в рассматриваемой задаче выбраны [8, 13, 14]: мощность гидравлических потерь (Вт)

$$\Delta E_1 = \frac{\Delta p G}{\rho}, \quad (7)$$

где  $G$  — расход жидкости, кг/с,

и мощность тепловых потерь — энергозатрат на переохлаждение (Вт)

$$\Delta E_2 = c_p \Delta T G, \quad (8)$$

Таблица 1

**Параметры исходной модели**

Параметр	Значение
Давление на входе в трубопровод $p_{in}$ , МПа	0,2 ... 3
Температура на входе в трубопровод $T_{in}$ , К	80 ... 120
Диаметр трубопровода $d$ , мм	25 ... 56
Расход через трубопровод $G$ , кг/ч	200 ... 500
Длина трубопровода $L$ , м	100
Число участков $n$	1000
Теплоприток через изоляцию $q$ , Вт/м <sup>2</sup>	20

Сформулируем алгоритм предлагаемого численного исследования пространства параметров системы. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 1. Далее будем пользоваться предложенным алгоритмом для решения задачи оптимизации криогенного трубопровода.

У данного алгоритма есть некоторые особенности. Например, важное достоинство данного метода — это возможность использования псевдокритериев, т. е. вместо функциональных ограничений, задание которых непростая задача, можно ввести в рассмотрение псевдокритерий, задать границы которого можно обоснованно. Этот псевдокритерий не будет критерием, т. к. нет монотонной зависимости от качества конструкции.

Приведем пример оптимизации криогенного трубопровода.

Рассмотрим прямолинейный участок трубопровода для транспортирования жидкого азота длиной 100 м. Диаметр внутренней трубы 36×2 мм, диаметр кожуха 100×2 мм [3]. Математическая модель задана как система уравнений (1–4).

Зададим исходные данные.

1. Границы изменения параметров. Численные значения всех параметров оптимизации приведены в табл. 1.

2. Функциональные ограничения. Описываются формулами (5) и (6) — давление на выходе из трубопровода должно быть больше атмосферного, температура криогенной жидкости не должна достигать температуры насыщения.

Критерии качества — мощность гидравлических потерь и мощность тепловых потерь — энергозатраты на переохлаждение, рассчитываются по формулам (7) и (8).

Далее проведем первую серию опытов и составим таблицу испытаний. На компьютере, с применением программы, составленной на алгоритмическом языке Фортран, было просчитано 1000 пробных точек; некоторые из них не удовлетворяли условию функциональных огра-

Таблица 2

**Фрагмент таблицы испытаний**

№ пробной точки	$d$ , м	$p_{in}$ , МПа	$T_{in}$ , К	$G$ , кг/ч	$\Delta E_1$ , Вт	$\Delta E_2$ , Вт	$\Delta E$ , Вт
5	0,021	2,079	80,308	315,025	0,849	132,813	133,662
9	0,029	0,935	81,899	420,825	0,489	183,513	184,002
10	0,030	1,971	110,256	497,311	1,081	190,971	192,051
14	0,024	0,866	90,996	307,779	0,499	152,039	152,537
16	0,029	2,733	100,181	354,888	0,389	181,681	182,070
17	0,022	2,963	99,759	279,843	0,657	137,368	138,025
18	0,031	2,854	82,95	350,212	0,219	194,290	194,508
23	0,028	2,998	115,543	269,958	0,255	179,151	179,406
26	0,025	1,704	98,717	286,164	0,418	154,303	154,721
30	0,023	0,647	88,51	414,413	1,453	145,460	146,913
-----							
980	0,023	1,897	103,215	290,322	0,579	147,433	148,012
982	0,030	2,610	92,042	394,354	0,411	187,583	187,994
985	0,027	2,562	110,008	344,569	0,615	167,702	168,317
986	0,023	2,381	118,293	379,249	1,989	147,811	149,800
990	0,030	1,312	99,411	493,634	0,836	191,756	192,592
996	0,030	0,709	84,149	254,769	0,094	190,939	191,033
1000	0,022	2,323	90,957	430,495	1,954	140,418	142,372

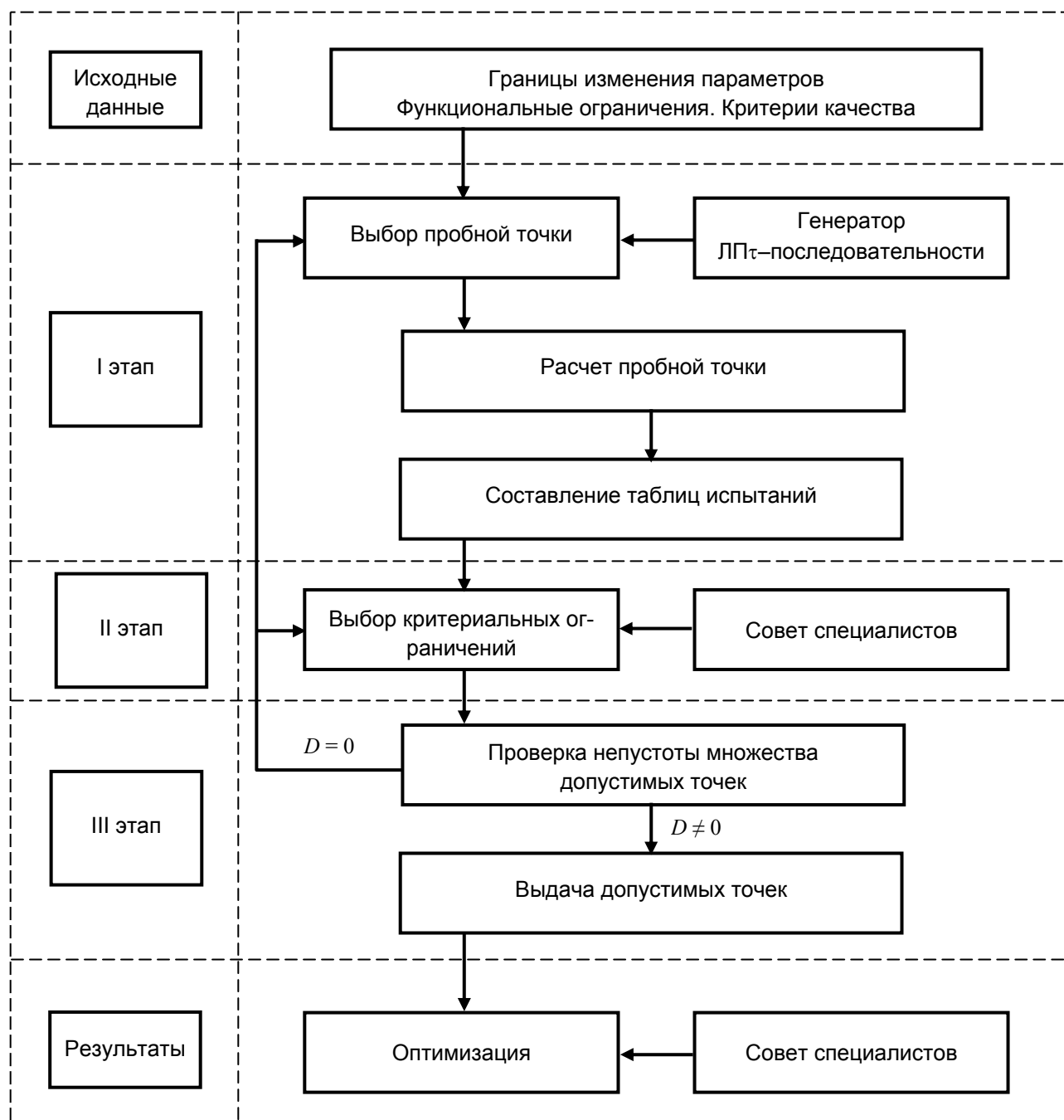


Рис. 1. Блок-схема алгоритма исследования пространства параметров

нений и из дальнейшего рассмотрения были выброшены (табл. 2).

Проанализировав данные, полученные в ходе опыта можно отметить, что

— температура криогенной жидкости на входе в трубопровод и диаметр трубопровода меняются в заданных границах;

— минимальное давление на входе трубопровод — 0,237 МПа. Таким образом, транспортировать жидкий азот на заданное расстояние можно и при минимальном избыточном давлении на входе. Температура в данном случае должна быть примерно 80–85 К. А суммарные потери мощности колеблются в заданных пределах, а именно 150–200 Вт;

— величина суммарных потерь в результате расчетов получена в пределах от 120 до 200 Вт.

Следующий шаг — выбор наилучшей пробной точки. В общем случае это задача сложная, но в данном случае она решается сравнительно просто. Существует несколько точек, имеющих значение суммарных энергетических потерь, близкое к минимальному значению с заданной точностью. Параметры этих точек приведены в табл. 3.

Так как критерием качества в данной задаче является величина суммарных энергопотерь, то наилучшей является точка 63.

Если ввести дополнение в эту задачу, а именно выбрать такое решение, чтоб давление было минимально

Таблица 3

Точки, имеющие наименьшее значение суммарных потерь

№ пробной точки	$d$ , м	$p_{in}$ , МПа	$T_{in}$ , К	$G$ , кг/ч	$\Delta E_1$ , Вт	$\Delta E_2$ , Вт	$\Delta E$ , Вт
63	0,019	1,965	104,654	200,178	0,496	119,806	120,302
355	0,019	2,127	116,837	249,729	1,337	120,808	122,145
380	0,019	1,430	106,345	297,674	1,699	120,575	122,274
714	0,019	1,088	83,654	310,525	1,282	121,574	122,856
360	0,019	2,051	88,157	251,104	0,672	122,852	123,524
169	0,020	1,264	103,441	250,194	0,798	124,912	125,710
362	0,020	2,899	89,820	207,158	0,347	125,406	125,753
700	0,020	0,848	80,079	241,965	0,492	125,793	126,285
723	0,019	1,866	99,429	426,227	4,190	122,590	126,780
500	0,020	1,808	94,744	263,010	0,743	126,563	127,306
944	0,020	2,040	94,015	389,832	2,597	125,106	127,703
739	0,020	2,967	110,591	333,463	2,081	125,902	127,983
200	0,020	2,356	86,832	371,733	1,914	126,455	128,370
303	0,020	2,962	112,492	324,074	1,953	126,559	128,512
765	0,019	1,438	92,088	478,366	5,243	123,483	128,727
55	0,020	2,442	108,261	422,515	4,338	125,291	129,629

(чтобы исключить затраты на дополнительное сжатие жидкости), а температура максимальной (чтобы исключить затраты на ее переохлаждение), то точка с минимальным давлением на входе в трубопровод — это точка 700. А точка с максимальной температурой на входе — это точка 303. Таким образом, два данных параметра являются взаимозависимым, и при увеличении температуры (что выгодно) растет и давление (что невыгодно), в данном случае придется прибегнуть к помощи специалистов и предоставить им право произвести выбор решения, которое из этого набора наиболее применимо на практике.

Стоит отметить, что точка 169 обладает средними по величине давлением и температурой, что еще раз подтверждает ее оптимальность, и ее показатели эффективности лишь на 5 Вт превышают показатели выбранной ранее 63 точки. Поэтому, возможно следует расширить диапазон просматриваемых величин при определении оптимальности, то есть использовать преимущества многокритериального поиска Парето-оптимального решения.

Список литературы

1. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. — М.: Наука, 1982. 256 с.
2. Соболев И. М., Статников Р. Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. — М.: Наука, 1981. 111 с.
3. Зайцев А. В. О корректной постановке задачи течения жидкости в трубе. // Вестник Международной академии холода. 2012. № 4. С. 18–20.
4. Баранов А. Ю., Беликов П. А., Приходько С. В., Баранов В. А. Снабжение аэрокриотерапевтической комплексов жидким азотом // Известия СПбГУНиПТ. 2003. № 2. С. 82.
5. Мальшева Т. А., Сидорова А. Ю., Баранов А. Ю. Моделирование нестационарного переноса теплоты при управля-

емом криотерапевтическом воздействии // Известия СПбГУНиПТ. 2009. № 1. С. 121–123.

6. Зайцев А. В. Разработка алгоритма решения уравнений Навье-Стокса для течения криогенной жидкости в трубе // Вестник Международной академии холода. 2011. № 3. С. 37–42.
7. Зайцев А. В., Пеленко Ф. В. Моделирование течения вязкой жидкости в трубе // Процессы и аппараты пищевых производств. 2012. № 1. С. 163–168.
8. Логвиненко Е. В. Анализ энергоэффективности трубопровода для транспортирования криогенных жидкостей // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. — Санкт-Петербург, 2013. Вып. 1. С. 162–163.
9. Криогенные системы. Том 2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем. / А. М. Архаров, И. А. Архаров, В. П. Беляков и др.; под общ. ред. А. М. Архарова и А. И. Смородина. — М.: Машиностроение, 1999. 720 с.
10. Беляков В. П. Криогенная техника и технология. — М.: Энергоиздат, 1982. 271 с.
11. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. — М.: Наука, 1969. 742 с.
12. Акулов Л. А., Борзенко Е. И., Зайцев А. В. Теплофизические свойства и фазовое равновесие криопродуктов. Справочник. — СПб.: СПбГУНиПТ, 2009. 567 с.
13. Баранов А. Ю., Мальшева Т., Баранов В. А. Энергетические основы эффективности криотерапевтической аппаратуры. // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. 2005. № 2. С. 29–31.
14. Зайцев А. В., Логвиненко Е. В. Оптимизация криогенного трубопровода // Омский научный Вестник. Серия «Приборы, машины и технологии» 2014. № 3 (133). С. 164–169.

References

1. Podinovskii V. V., Nogin V. D. Pareto-optimal solutions of multicriteria tasks. Moscow, 1982. 256 p. (in Russian)
2. Sobol I. M., Statnikov R. B. Choice of optimum parameters in tasks with many criteria. Moscow, 1981. 111 p. (in Russian)

3. Zaitsev A. V. About an incorrect problem definition of a current of liquid in a pipe. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2012. No 4. p. 18–20. (in Russian)
4. Baranov A. Yu., Belikov P. A., Prikhod'ko S. V., Baranov V. A. Supply aero cryotherapeutic complexes liquid nitrogen. *Izvestiya SPbGUNIPT*. 2003. No 2. p. 82. (in Russian)
5. Malysheva T. A., Sidorova A. Yu., Baranov A. Yu. Simulation of nonstationary transfer of warmth in case of controlled cryotherapeutic influence. *Izvestiya SPbGUNIPT*. 2009. No 1. p. 121–123. (in Russian)
6. Zaitsev A. V. Development of algorithm of the solution of the equations of Navier-Stokes for a current of cryogenic liquid in a pipe. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2011. № 3. P. 37–42. (in Russian)
7. Zaitsev A. V., Pelenko F. V. Simulation of a current of viscous liquid in a pipe. *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv*. 2012. No 1. p. 163–168. (in Russian)
8. Logvinenko E. V. The analysis of energy efficiency of the pipeline for transportation of cryogenic liquids. Collection of theses of reports of the congress of young scientists. — St. Petersburg. 2013. Vol. 1. p. 162–163. (in Russian)
9. Arkharov A. M., Arkharov I. A., Belyakov V. P. Cryogenic systems. Vol. 2. Bases of design of devices, installations and systems. — Moscow, 1999. 720 p. (in Russian)
10. Belyakov V. P. Cryogenic technique and technology. — Moscow, 1982. 271 p. (in Russian)
11. Loitsyanskii L. G. Mechanics of liquid and gas. — Moscow, 1969. 742 p. (in Russian)
12. Akulov L. A., Borzenko E. I., Zaitsev A. V. Heatphysical properties and phase equilibrium of cryoproducts. Reference manual. — St. Petersburg. 2009. 567 p. (in Russian)
13. Baranov A. Yu., Malysheva T., Baranov V. A. Energetic bases of efficiency of cryotherapeutic equipment. *Fizioterapiya, bal'neologiya i reabilitatsiya*. — 2005. No 2. p. 29–31. (in Russian)
14. Zaitsev A. V., Logvinenko E. V. Optimization of the cryogenic pipeline. *Omskii nauchnyi vestnik. Seriya «Pribory, mashiny i tekhnologii»* 2014. No 3 (133). p. 164–169. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 12.02.2015



## 14-я международная специализированная выставка КРИОГЕН-ЭКСПО Промышленные Газы

**27 - 29 октября 2015** | Москва, ЦВК "Экспоцентр", пав. 5



**Организатор**  
*Мир-Экспо*  
Выставочная компания

**Проводится при содействии**

- Международного института холода
- Международной академии холода
- Украинской ассоциации производителей технических газов «УА-СИГМА»






**ТЕМАТИКА ВЫСТАВКИ:**

<ul style="list-style-type: none"> <li> Криогенное оборудование</li> <li> Воздухоразделительные установки</li> <li> Вакуумное оборудование</li> <li> Насосное, компрессорное и теплообменное оборудование</li> <li> Метрология и средства измерения при низких температурах</li> <li> Оборудование для хранения, транспортировки, распределения и потребления промышленных газов и СПГ</li> <li> Промышленные и редкие газы, СУГ, попутный нефтяной газ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li> СПГ-технологии</li> <li> Водородные технологии</li> <li> Гелиевые технологии</li> <li> Производство CO<sub>2</sub></li> <li> Технологии генерации и использования озона</li> <li> Газовые смеси</li> <li> Микрокриогенная техника</li> </ul>
--	--

**ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА 27 - 28 октября 2015** (Москва, ЦВК "Экспоцентр" павильон 5, зал 2):

12-я международная конференция «Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития»

Международная конференция «Промышленные Газы»

Международная конференция «Сжиженный Природный Газ»

**Информационная поддержка:**




















Русский: [youtube.com/user/cryoexpo](https://www.youtube.com/user/cryoexpo)  
English: [youtube.com/user/cryoexporus](https://www.youtube.com/user/cryoexporus)

**Дирекция выставки:**  
Москва, Хлебозаводский пр., д. 7, стр. 10, оф. 507  
Тел/факс: 8 495 988-1620  
E-mail: [info@cryogen-expo.ru](mailto:info@cryogen-expo.ru)  
Сайт: [www.cryogen-expo.ru](http://www.cryogen-expo.ru)

[www.cryogen-expo.ru](http://www.cryogen-expo.ru)

[@cryoexpo\\_ru](https://twitter.com/cryoexpo)

[@cryoexpo](https://twitter.com/cryoexpo)