

РАСЧЕТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ТП УСТАНОВОК ХОЛОДИЛЬНО-ОСУШИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ НИЦ ЦИАМ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ИХ УЗЛОВ

Ю.С. Марков, А.В. Гребенников,

Е.Г. Лепестихина, В.Н. Скирда, М.И. Меркулов (ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»)

Эффективность работы холодильных установок, входящих в состав холодильно-осушительной станции, определяется временем выхода на режим и способностью обеспечить стабильные параметры охлаждаемого воздуха, что зависит от целого ряда факторов, главными из которых являются качество управления ТП и техническое состояние оборудования.

В связи с этим на холодильных установках разработана и внедрена новая АСУТП, широкие возможности которой позволяют в том числе проводить различные расчетно-технологические и экспериментальные исследования на холодильных установках. При проведении исследований были определены эксплуатационные характеристики наиболее проблемного холодильного оборудования, даны заключения по техническому состоянию, рекомендации по формированию графика ревизий и предложения по оптимальным схемам работы установок.

Ключевые слова: холодильно-осушительная станция, техническое состояние оборудования, качество управления ТП, холодильные установки, захолаживание хладоносителей, авиадвигателестроение, экспериментальные исследования, климатические испытания.

Важной составляющей частью высотного комплекса НИЦ ЦИАМ является холодильно-осушительная станция (ХОС), необходимая при проведении климатических испытаний авиационных двигателей и их узлов в качестве источника искусственного холода.

В результате развития авиадвигателестроения требования к испытаниям двигателей постоянно расширяются и усложняются, в результате этого повышаются требования и к экспериментальной базе, обеспечивающей проведение этих испытаний, в том числе и к ХОС. В долгосрочной перспективе будет создана принципиально новая ХОС, отвечающая всем современным требованиям. В настоящее же время на первый план выходит задача обеспечения надежной и эффективной работы существующего оборудования. Решение этой задачи определяется в первую очередь техническим состоянием оборудования и качеством управления ТП [1].

В результате многолетней эксплуатации оборудование получило определенный физический износ, что привело к изменению его характеристик. С целью снижения темпов износа оборудования и обеспечения его эффективной работы необходимо своевременно проводить различные мероприятия (ревизии, регламентные работы и др.), для планирования и организации которых требуется знание реальных рабочих характеристик оборудования. Кроме того, знание реальных рабочих характеристик дает возможность правильного выбора набора установок для проведения экспериментов, формирования алгоритма после-

довательности их пуска и продолжительности работы каждой из них с целью обеспечения требуемых параметров конкретных испытаний.

В свою очередь качество управления ТП определяется техническими и программными средствами системы управления, методами управления и квалификацией персонала. Таким образом, необходимым условием для выполнения задач, стоящих перед ХОС, является наличие достоверной и полной информации о ТП и технических характеристиках оборудования, полученной в результате проведения экспериментальных и расчетно-технологических исследований.

ХОС состоит из трех секций. В состав каждой секции входят две холодильные установки, имеющие собственные замкнутые контуры хладагента и общие контуры хладоносителей. Все установки одинаковы по характеристикам и составу оборудования. Воздух для охлаждения и осушки подается от агрегатов высотного компрессорной станции (ВКС) в высокотемпературные воздухоохладители-ожижители, в которых происходит снижение его температуры до порядка 0 °С и удаление влаги в виде воды, сливающейся из аппаратов, затем поступает в низкотемпературные воздухоохладители-вымораживатели для удаления оставшейся влаги в виде инея, оседающего на трубках аппаратов, и снижения температуры до заданных значений. Из низкотемпературных воздухоохладителей подготовленный воздух вновь поступает к агрегатам ВКС.

Холодильные установки работают по схеме с промежуточным охлаждением, то есть с применением

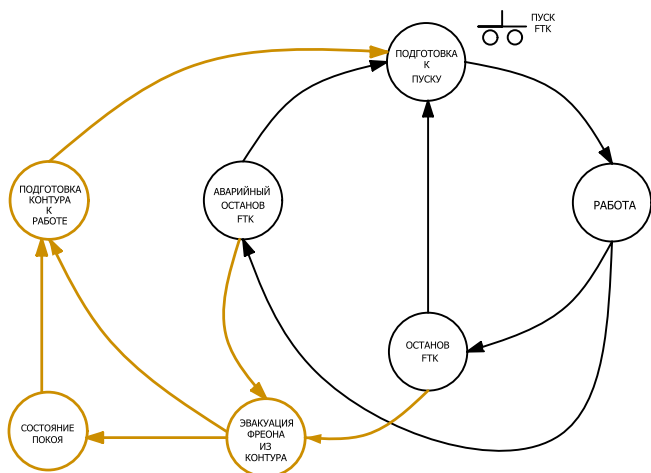


Рис. 1. Схема состояний и переходов холодильной установки

Таблица. Системы регулирования холодильной установки

Обозначение системы	Назначение системы регулирования
PC0103	Регулирование постоянного давления на всасывании 1-й ступени компрессора
PC0116	Регулирование постоянного давления на всасывании 2-й ступени компрессора
NC0901	Ограничение потребляемой мощности
UC0111	Регулирование объемного расхода через 1-ю ступень компрессора
UC0149	Регулирование объемного расхода через 2-ю ступень компрессора
LC0130	Регулирование уровня жидкого фреона в промсосуде
TdC0133	Регулирование перегрева паров фреона на всасывании 1-й ступени
TdC0144	Регулирование перегрева паров фреона на всасывании 2-й ступени
PC0154	Регулирование постоянного давления паров фреона в конденсаторе
TC211	Регулирование температуры масла за маслохолодильником

хладоносителя, переносящего холод от установки к потребителю, что требует до начала работы на потребителя предварительной подготовки хладоносителя. Поэтому работа установки состоит из двух этапов:

1) выход на режим — захолаживание хладоносителя за счет теплообмена между хладоносителем и холодильным агентом до температуры, позволяющей получить на выходе из низкотемпературных воздухоохладителей воздух требуемых параметров;

2) работа под нагрузкой — в воздухоохладители подается воздух и происходит съем холода с хладоносителя. Отопленный хладоноситель возвращается в испарители для подхолаживания. Основная задача холодильной установки на этом этапе — обеспечить стабильные параметры воздуха на выходе из низкотемпературных воздухоохладителей при расчетном расходе воздуха.

Холодильная установка включает фреоновый двухступенчатый турбокомпрессор с системой маслофреонного разделения, теплообменные аппараты, промежуточный сосуд, ресивер жидкого фреона, электронасосы для циркуляции хладоносителя, регулирующие органы, необходимые для управления ТП и защиты компрессора, запорную арматуру. Это оборудование вместе со свя-

зывающими его трубопроводами образует отдельные рабочие контуры: фреоновый, два контура хладоносителя (высокотемпературный и низкотемпературный) и водяной контур.

Стоит отметить, что каждая холодильная установка, входящая в состав ХОС, имеет ряд особенностей, которые отличают ее от типовых холодильных установок, а именно:

- кратковременная продолжительность работы на потребителя ($\leq 6...8$ ч);
- непостоянная нагрузка при работе с потребителем (ниже/выше расчетной);
- работа в режиме ожидания нагрузки, когда потребитель по каким-то причинам не может подключиться к вышедшей на рабочий режим установке;
- выключение установки и перевод ее в состояние покоя после завершения каждого цикла работы с потребителем.

Очевидно, что при наличии таких особенностей типовые методы управления и регулирования в данном случае неприменимы.

АСУТП установок ХОС имеет три уровня управления — ручной, автоматический и комплексный. В ручном режиме процессом управляет оператор, используя пульт управления и мнемосхемы, в автоматическом работают программы управления, оператор при этом наблюдает за ходом процесса. Комплексный уровень — это когда часть систем регулирования работает в автоматическом режиме, а часть — в ручном.

Программы должны работать в соответствии с алгоритмами управления, разработанными на основании состояний холодильной установки. Технологический процесс охлаждения формализован в виде четырех алгоритмов: «Подготовка к пуску»; «Пуск — нагрузка» («работа»); алгоритм «Останов»; «Аварийный останов». Возможные переходы между алгоритмами показаны на рис. 1.

На стадии подготовки к пуску необходимо обеспечить готовность технологических контуров к пуску турбокомпрессора. Готовность контуров определяется заданным положением запорной арматуры, регулирующих органов и состоянием технологических параметров блокировки пуска. Разрешение на пуск компрессора может быть получено только при выполнении всех предусмотренных в программе алгоритма условий.

После получения разрешения пуска компрессора начинается основная стадия работы холодильной установки — захолаживание хладоносителей, выход на расчетные параметры, обеспечение стабильных параметров воздуха на выходе из воздухоохладителей.

После завершения работы на стенд холодильную установку требуется остановить в безопасном режиме, который предусматривает определенное положение запорной и регуливающей арматуры и разгрузку компрессора.

Если в процессе работы возникает аварийная ситуация, управление передается программе аварийного останова.

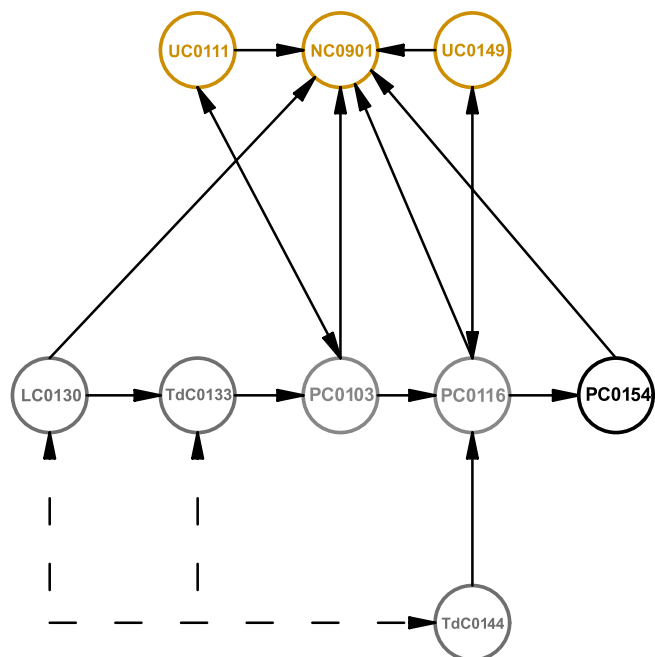


Рис. 2. Схема взаимовлияний систем регулирования холодильной установки

Из всех алгоритмов наиболее сложным, важным и единственным, влияющим на эффективность и надежность работы установки является алгоритм «пуск-нагрузка», поскольку на этой стадии управление процессом осуществляется посредством управления системами регулирования, каждая из которых имеет свою программу работы.

Каждая из систем регулирования управляет одним из исполнительных органов, но между ними существует прямое и косвенное взаимовлияние. Степень взаимного влияния отдельных систем друг на друга различна, но это обстоятельство необходимо учитывать, так как при неправильной работе систем регулирования не только снижается эффективность работы холодильной установки, но и возрастает вероятность аварийной ситуации [2]. В таблице приведены все основные системы регулирования.

По назначению все системы регулирования можно разделить на три группы:

- системы, создающие условия для нормальной работы турбокомпрессора (154, 211);
- системы защиты турбокомпрессора от неустойчивой работы и от перегрузки (111, 149, 901);
- системы, обеспечивающие оптимальное заполнение теплообменных аппаратов жидким фреоном в процессе выхода на режим (130, 133, 144).

Системы 103 и 116 в равной мере могут быть отнесены к любой из трех групп. Это деление достаточно условно, так как, хотя каждая из систем работает на регулирование определенного параметра, их взаимовлияние может привести к существенному воздействию результатов работы одной системы на состояние параметров другой. Чаще всего подобное воздействие носит неявный характер, и необхо-

димо проанализировать целую цепочку параметров, чтобы выяснить причину отклонений в ходе ТП. На рис. 2 приведена схема основных взаимосвязей систем регулирования холодильной установки.

Старая АСУТП, созданная в 80-х годах XX века, имела ряд недостатков. Самым главным недостатком является то, что программы управления не были окончательно доработаны: системы регулирования на этапе «пуск-нагрузка» управлялись в ручном режиме и ряд параметров, участвующих в работе систем, был подобран неудачно.

В настоящее время на холодильных установках разработана и внедрена новая АСУТП, построенная на современной элементной и программной базе. По сравнению со старой системой, она имеет ряд достоинств.

Алгоритмы управления составлялись с использованием методов нечеткой логики [3]. Одним из важных плюсов стала возможность изменять программы управления и корректировать алгоритмы работы.

При разработке новой системы была расширена система измерений, так как отдельные участки контуров были ею не охвачены, и информация о состоянии процесса на этих участках у оператора отсутствовала. В общей сложности установлено около 120 новых датчиков.

Программы, реализующие алгоритмы управления подготовки к пуску и аварийного останова в новой системе, были реализованы по старым алгоритмам, так как они достаточно хорошо и надежно работали, и не имело смысла вносить в них какие-то изменения. Потребовали существенной доработки управляющие программы для этапа «пуск — нагрузка». Прежде всего, пришлось отказаться от пошаговой структуры алгоритма, так как она предусматривала поочередное открытие запорной арматуры низкотемпературной и высокотемпературной ступеней охлаждения и поочередное включение в работу регулирующих систем, в результате чего возникал целый ряд нежелательных и аварийно-опасных ситуаций.

При работе по старой системе все эти проблемы должен был решать оператор, переводя часть систем регулирования в ручной режим управления и координируя свои действия с системами, работающими в режиме автомата. Результаты полностью зависели от внимания и уровня грамотности оператора, а также от согласованности работы оператора-технолога и оператора, следящего за ходом программы, так как требовалось своевременно выполнять обход отдельных шагов, предусмотренных программой, во избежание ее зависания.

Системы регулирования были расклассифицированы на три группы:

- системы, которые надежно и постоянно работали в автоматическом режиме (шесть систем). Для них были сохранены прежние алгоритмы и условия работы;
- системы, которые постоянно работали в автоматическом режиме, но не всегда их работа была удовлетворительной. Это система регулирования давления на всасывании 1-й ступени компрессора.

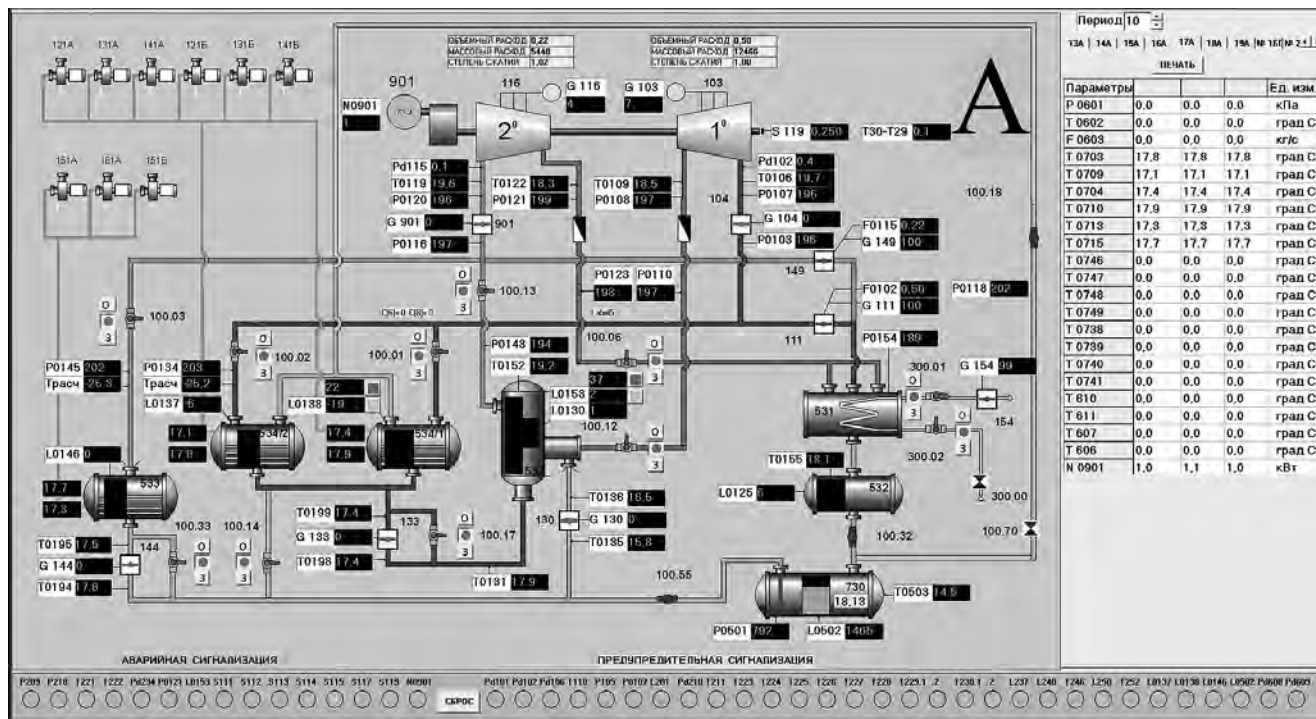


Рис. 3. Главная мнемосхема холодильной установки

Она имела единственный недостаток, который был успешно устранен;

— системы, которые работали только в ручном режиме, — наиболее проблемная группа систем. В эту группу вошли три аналогичные по назначению системы, две из которых ответственны за уровень жидкого фреона в теплообменных аппаратах, третья — за уровень жидкого фреона в промежуточном сосуде. Все попытки использовать эти системы в автоматическом режиме по старым алгоритмам приводили к аварийным ситуациям.

Для новой АСУТП был реализован пульт ручного управления. Он имеет компактный вид и продублирован экраным пультом, который предоставляет оператору широкие возможности для наблюдения за ходом процесса и его корректировки, что особенно важно при работе на нерасчетных режимах. Кроме того, разработан ряд экранных форм, которые представляют собой мнемосхемы контуров, таблицы измеряемых параметров, таблицы параметров аварийной и предупредительной сигнализации. Все экранные формы очень информативны, на них отображаются значения параметров, положение регулирующих органов, состояние насосов, скорость охлаждения хладоносителей, заданные уставки регулирования и сигнализации и др. (рис. 3). Возможности по созданию новых форм и по изменению или дополнению уже существующих с учетом индивидуальных пожеланий операторов практически не ограничены.

Отметим, что при создании новой АСУТП был разработан программный модуль, позволяющий осуществлять непрерывную запись всех показаний во время работы установки в виде графиков и таблиц в базе данных.

Таким образом, главной задачей при проведении

модернизации системы управления является совершенствование алгоритмов управления системами регулирования [3]. Это наиболее сложные и важные системы холодильной установки [2]. Их функция заключается в том, чтобы обеспечить непрерывную подачу жидкого фреона в испарители и промежуточный сосуд в процессе работы. Кроме того, на их работу оказывают влияние и другие системы регулирования.

Для решения этой задачи, начиная с 2012 г., на ХОС проводились различные экспериментальные пуски холодильных установок всех секций по разным схемам: совместная работа и различные варианты раздельной работы установок. Во время пусков велась непрерывная запись значений всех параметров. Затем полученные данные обрабатывались и на их основе проводились расчетно-технологические исследования, по результатам которых корректировалось программно-алгоритмическое обеспечение.

Для выполнения всех технологических условий и учета всех взаимосвязей при разработке систем регулирования важно было правильно выбрать входные параметры регуляторов.

В старом варианте в качестве входных данных использовались значения перегрева паров на всасывании и уровень фреона в промсосуде, но этот выбор был неудачен в связи с монтажными погрешностями контура и неправильным расположением мест отбора параметров. После ряда безрезультатных экспериментов с другими входными параметрами было решено отказаться от классических методов и использовать многоходовый регулятор на базе нечеткой логики [3]. Поскольку это была совершенно новая задача, поступили следующим образом: для каждой из систем на основании опыта эксплуатации было сформировано

но по несколько групп параметров, затем из этих групп составлено несколько комбинаций и проведено их экспериментальное опробование. Два варианта дали положительный результат, системы отработали в автоматическом режиме без вмешательства оператора.

После решения проблемы с работой систем регулирования в автоматическом режиме было проведено несколько экспериментов с разными точками старта систем регулирования. Например, в одном варианте системы открывались принудительно до достижения заданных условий, после чего начинали работать по своим алгоритмам, во втором случае они сразу работали по алгоритму. Все эксперименты прошли удачно.

Таким образом, в результате проведенной работы были устранены все недостатки старой АСУТП и обеспечена возможность автоматического управления ТП на этапе захлаживания хладоносителей. В режимах ожидания воздуха и работы с воздухом по-прежнему возможно только ручное управление. Задача автоматизации этих режимов будет следующим этапом в перспективе развития АСУТП.

Кроме систем регулирования, особое внимание уделялось изучению рабочих характеристик теплообменного оборудования и агрегатов, входящих в состав установок. При анализе результатов эксперимента в первую очередь рассматривались характеристики низкотемпературных испарителей, как наиболее проблемного оборудования ХОС, поскольку они работают с высокоррозионным раствором хлористого кальция (рассол). По экспериментальным данным для каждого из испарителей построены графики изменения температуры рассола в процессе работы, рассчитаны скорости охлаждения рассола в режиме захлаживания и скорости отепления рассола в режиме работы под нагрузкой.

Затем была проведена сравнительная оценка результатов и установлено следующее: в режиме захлаживания пары установок каждой секции работают примерно одинаково, существенной разницы между скоростью охлаждения нет, но в режиме работы под нагрузкой скорость отепления на разных секциях различна, что свидетельствует о разной пропускной способности испарителей. Такая же работа была проделана для высокотемпературных испарителей, полученные результаты аналогичны.

Анализ данных по воздухоохладителям и сравнительный анализ кривых изменения температур воздуха и рассола дал следующие результаты:

— по всем секциям температура воздуха ниже температуры рассола не менее чем на 7 °С, что необходимо принимать во внимание при захлаживании контура;

— на всех секциях при работе на расходах воздуха, близких к номинальному, происходит отепление воздуха;

— скорость отепления возрастает с увеличением расхода воздуха;

— скорость отепления воздуха возрастает при повышении влажности воздуха.

Хорошие результаты получены при анализе данных по конденсаторам и промежуточным сосудам. Также были проанализированы данные, характеризующие работу турбокомпрессоров. Они показали, что работа всех турбокомпрессоров вполне удовлетворительная, компрессоры обеспечивают расчетные параметры по давлению и температуре на всасывании к моменту выхода на режим.

Для установок двух секций проведены предварительные исследования работы дроссельных клапанов, установленных на линии двойного дросселирования низкотемпературной части фреонового контура.

Таким образом, в результате проведенных работ получена возможность управления ТП холодильных установок в автоматическом режиме на стадии захлаживания хладоносителей.

Благодаря расширенным возможностям новой АСУТП удалось провести ряд дополнительных экспериментальных исследований. Последующая обработка экспериментальных данных позволила получить точные характеристики оборудования всех холодильных установок.

Сравнительный анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

— в составе каждой из холодильных установок имеется проблемное оборудование, характеристики которого затрудняют обеспечение расчетных расходов воздуха;

— полученной информации достаточно для формирования графика обслуживания оборудования, а также для организации работы каждой из установок с учетом состояния входящего в нее оборудования;

— экспериментальные данные о работе и состоянии оборудования позволят оптимизировать программы управления и повысить уровень работы оператора, что приведет к улучшению качества управления ТП в целом.

Список литературы

1. Фримштейн Ю.И. Промышленные холодильные установки. М. Высшая школа. 1974. 284 с.
2. Канторович В.И., Подлипенцева З.В. Основы автоматизации холодильных установок. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВО «Агропромиздат». 1987. 287с.: ил.
3. Нестеров А.Л. Проектирование АСУТП: Методическое пособие. Книга 2. СПб.: Изд. ДЕАН. 2012. 944 с.

Марков Юрий Степанович — канд. техн. наук, начальник отделения,

Гребенников Александр Васильевич — зам. начальника отделения,

Лепестихина Екатерина Геннадьевна — начальник сектора,

Скирда Владимир Николаевич — инженер, Меркулов Михаил Игоревич — инженер,

НИЦ ЦИАМ — филиал ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

Контактный телефон 8-(929)-648-72-97.

E-mail: merkulov.mihail.ciam@ro.ru