

Опыт разработки струйного аппарата для холодильной установки

Струйный аппарат – уникальное техническое устройство, именно с его помощью удалось значительно повысить эффективность функционирования обычной холодильной установки.

О холодильной установке и ее термодинамическом цикле

Охлаждение тел до температур ниже температуры окружающей среды осуществляется посредством специальной теплосиловой машины, получившей название холодильная установка, холодильная машина или холодильный агрегат.

Холодильные установки предназначены для получения температур в диапазоне от +10°C до -153°C, получение же более низких и сверх низких температур осуществляется посредством криогенной техники.

Подобно теплосиловой машине, холодильная установка имеет в своем составе устройство (насос или компрессор), в котором рабочее тело сжимается, а также теплообменный аппарат (или испаритель), где происходит расширение рабочего тела. Здесь следует напомнить, что словосочетание «рабочее тело» это термин понятийного аппарата науки термодинамики. Рабочее тело, используемое в холодильных установках, носит название холодильный агент или сокращенно хладагент. Расширение рабочего тела (хладагента) в холодильной установке может происходить как с совершением полезной работы (в поршневой машине или турбомашине), так и без получения таковой, например, при дросселировании. В гидродинамической сети холодильной установки хладагент одновременно является и рабочей средой. Это словосочетание принято для использования в науке гидродинамике.

Холодильные установки по виду используемых хладагентов разделяются на две основные группы: газовые и паровые. Газовым хладагентам является, например, воздух, а

паровыми — влажный водяной пар или пары низкокипящих веществ.

Паровые холодильные установки, в свою очередь, бывают парокомпрессионные, пароэжекторные и абсорбционные. К отдельной группе относятся холодильные установки, в которых хладагент не используется, поскольку в основу их функционирования положены иные, не термодинамические физические явления, например, эффект Пельтье или термомагнитный эффект Эттингсхаузена.

Сегодня холодильные установки нашли довольно широкое применение в быту, в сфере обслуживания, в пищевой и другой промышленности, а также на рыболовном флоте.

В основе функционирования холодильных установок, использующих хладагент, лежит термодинамический цикл «пар – конденсат хладагента». Термодинамический цикл «пар – конденсат» является замкнутым и включает в себя ряд обязательных последовательно происходящих термодинамических процессов, в которых конечные параметры (давление, температура, энтальпия и т.д.) предыдущего процесса являются начальными параметрами для протекания последующего. В термодинамике каждый процесс термодинамического цикла принято нумеровать и, таким образом, графически отображать весь замкнутый термодинамический цикл, например, $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow \dots \rightarrow 1$. Межцикловые переходы отображаются в термодинамике, как линии, соединяющие конечные точки (параметры) одного термодинамического процесса и начальные точки (параметры) другого, следующего за ним процесса, и обозначаются как $1 - 2$; $2 - 3$; $3 - \dots$; $\dots - 1$.

Первый (1-й) термодинамический процесс термодинамического цикла холодильной машины — это процесс адиабатного (при полной изоляции термодинамической системы от окружающей среды и отсутствии теплообмена между системой и окружающей средой) сжатия рабочего тела. Второй (2-й) термодинамический процесс — процесс изотермического (при постоянной температуре ($T=\text{const}$) протекания процесса) отвода тепла от хладагента. Третий (3-й) и четвертый (4-й) термодинамические процессы — процессы адиабатного и изотермического расширения рабочего тела. При отводе тепла (2-3) от хладагента его удельный вес уменьшается, и рабочее тело/холодильный агент возвращается в исходное (первоначальное) агрегатное состояние, замыкая, таким образом, термодинамический цикл. Далее цикл вновь возобновляется, продолжается, заканчивается и так далее по замкнутому кругу ($1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1 \rightarrow \dots$).

Конструктивная реализация отдельных процессов и термодинамического цикла холодильной установки в целом осуществляется в специальных устройствах и механизмах, таких как компрессор, испаритель, конденсатор, ресивер и др., объединенных в единое функциональное целое и связанных между собой, например, трубопроводами и автоматизированной системой управления (АСУ).

Как работает холодильная установка

Охлаждение в холодильной установке происходит за счет физического явления поглощения тепла из окружающей среды при кипении/испарении жидкости. Температура кипения жидкости определяется ее физической природой и параметрами (давлением и температурой) окружающей среды. Чем выше давление, тем выше температура кипения жидкости и, наоборот, чем давление ниже, тем жидкость закипает и испаряется при более низкой температуре. Следует напомнить, что при прочих равных условиях разные жидкости обладают различными температурами кипения/испарения. Так, например, при нор-

мальном атмосферном давлении вода закипает при температуре $+100^\circ\text{C}$, этиловый спирт при $+78^\circ\text{C}$, фреон R22 при $-40,8^\circ\text{C}$, фреон R502 при $-45,6^\circ\text{C}$, фреон R407 при $-43,56^\circ\text{C}$, а жидкий азот при -174°C .

Жидкий фреон является в настоящее время основным хладагентом холодильных установок и, находясь в открытом сосуде при нормальном атмосферном давлении, мгновенно вскипает и испаряется. При этом происходит интенсивное поглощение тепла из окружающей среды, сосуд покрывается инеем из-за конденсации и замораживания паров воды из окружающего воздуха. Кипение/испарение жидкого фреона продолжается до тех пор, пока весь хладагент не испарится, то есть не перейдет из жидкого в газообразное состояние, либо когда давление газов над поверхностью жидкого фреона не повысится до значения, при котором процесс испарения жидкой фазы фреона прекращается.

Аналогичное физическое явление наблюдается и в холодильной установке, с той лишь разницей, что кипение холодильного агента происходит не в открытом сосуде, а в специальном, герметично закрытом теплообменном аппарате или теплообменнике - испарителе. Во внутренней полости трубок испарителя кипящий хладагент активно забирает тепло от материала трубок, которые, в свою очередь, омываются жидкостью или воздухом, интенсивно отдавая свое тепло и охлаждаясь при этом.

Для непрерывного протекания процесса кипения хладагента в испарителе из его внутренней полости необходимо постоянно удалять газообразный хладагент и «подавать» новую порцию жидкого хладагента.

Разделение двухфазного жидко-парового хладагента на газ и жидкость происходит в циркуляционном ресивере, одной из основных функций которого как раз и является отделение газа от жидкости.

Удаление паров хладагента из ресивера и создание необходимого для конденсации давления газов осуществляется с помощью компрессора.

Конденсация паров или фазовый переход хладагента от газообразного состояния в жидкое сопровождается интенсивным выделением в окружающую среду большого количества тепла. В холодильной установке конденсация паров хладагента происходит в специальном, герметичном теплообменнике — конденсаторе. Скорость конденсации паров жидкости, как известно, зависит от температуры и давления окружающей среды. При высоком давлении температура конденсации повышена. Например, пары фреона R22 с давлением 23 кг/см² переходят в жидкую фазу (конденсируются) уже при температуре +55°C.

В составе холодильной установки находится также регулятор потока хладагента, так называемая дросселирующая капиллярная трубка, АСУ, контрольно-измерительные приборы (КИП) и другие элементы.

Все составляющие холодильную машину элементы соединяются трубопроводом в последовательную цепь, образуя, таким образом, единую замкнутую герметичную термодинамическую систему и гидродинамическую сеть, хорошо изолируемую от окружающей среды.

Эффективность функционирования холодильных установок

Эффективность функционирования холодильных установок, как известно, характеризуется эффективностью протекания термодинамического цикла охлаждения, которая оценивается коэффициентом полезного действия или коэффициентом термической (термодинамической) эффективности — к.т.э. Коэффициент термической эффективности, называемый еще холодильным коэффициентом (х.к.), представляет собой отношение перепада энтальпии хладагента в испарителе и перепада энтальпии в процессе сжатия хладагента. Фактически же к.т.э./х.к. холодильной установки это ни, что иное, как отношение холодильной мощности или холодопроизводительности (т.е. количество тепла отведенного от охлаждаемого тела в единицу вре-

мени) к затратам электрической мощности, необходимым для ее получения, например, потребляемой компрессором электроэнергией. Причем рассматриваемый коэффициент не является показателем производительности холодильной установки, а представляет собой сравнительный безразмерный параметр для количественной оценки эффективности процесса передачи энергии. Так, если коэффициент термической эффективности или холодильный коэффициент какой-либо холодильной установки равен N , это означает, что на получение N -го количества кВт производимого холодильной установкой холода требуется затратить 1 кВт электроэнергии и наоборот, затрачивая 1 кВт электроэнергии, можно получить в данной холодильной установке N -е количество кВт холода.

На практике одним из показателей эффективности функционирования холодильного агрегата, который легко определить и проверить, является время заморозки.

Резервы повышения эффективности работы холодильных машин

Холодильная установка, как и многие другие современные теплосиловые машины, имеет определенные резервы для повышения эффективности своего функционирования по прямому назначению. К таким резервам, по мнению авторов, следует отнести избыток давления рабочих сред, различную плотность и агрегатное состояние используемых рабочих тел, завышенное потребление электрической энергии, несовершенство теплоизоляции, относительно высокие потери на нагрев элементов установки в период ее работы и другие. Так, избыток давления рабочей среды наблюдается практически во всех теплосиловых установках и это «лишнее» давление вполне может быть разумно и рационально использовано, например, для работы дополнительных технических устройств, в частности, струйного аппарата, вставленного в гидродинамическую сеть теплосиловой установки. Кроме того, хорошо известно, что с повышением плотности рабочих сред уве-

Министерство образования и науки Российской Федерации
Объединенный научный совет РАН по комплексной проблеме «Теплофизика и теплоэнергетика»
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики»
Институт холода и биотехнологий
Международная академия холода
Рабочая группа НС РАН «Свойства хладагентов и теплоносителей»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
**«ТРИ КЛИМАТИЧЕСКИХ КИТА ИНДУСТРИИ ХОЛОДА.
ДОМИНАНТЫ УСТОЙЧИВОСТИ И
СИНДРОМЫ НЕТРАДИЦИОННОГО РАЗВИТИЯ»**

1 февраля 2017 г.

Институт холода и биотехнологий (ИХиБТ)
Университета ИТМО
Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Заявки на участие в конференции просьба подавать до 15 января 2017 г.
на имя Лаптева Ю.А. (кафедра «Теоретические основы тепло- и хладотехники»)

E-mail: max_iar@gunipt.spb.ru; max_iar@irbt-itmo.ru; laptev_yua@mail.ru

Телефоны: (812) 571 6912, (812) 571 5689

Факс: (812) 571 6912 (с пометкой «Хладагенты»)

ФОРМА ЗАЯВКИ

Ф.И.О. _____

Адрес _____

Телефон/факс _____

E-mail _____

Организация, должность _____

Название доклада или сообщения (если планируется) _____

Организационный взнос не взимается

личивается и количество энергии, в том числе и электрической, которую необходимо затратить, например, для их перемещения по трубопроводам или подъема на заданную высоту. Очевидно, что снижение плотности рабочих тел до разумных пределов или использование рабочих сред с меньшей плотностью позволяет реально экономить энергию. В тоже время переход с более вязкой жидкой рабочей среды на менее вязкую, в частности, газообразную, среду, например, в холодильных установках, машинах и агрегатах, способен значительно повысить коэффициент термической эффективности за счет сокращения потребления электроэнергии (при той же холодильной мощности) или увеличения холодопроизводительности при сохранении того же энергопотребления.

Очевидно, что имеемые резервы для повышения эффективности функционирования холодильных машин должны быть использованы, тем более что сегодня это вполне реально.

Предложение авторам

В 2000-м году, будучи на международной выставке, представители одной из Санкт-Петербургских фирм, специализирующейся на пуско-наладочных работах и сервисном обслуживании холодильного оборудования, увидели холодильный агрегат, снабженный струйным аппаратом. Наличие струйного аппарата в составе холодильной установки, как было указано на сопровождающем ее ин-



Плиточный скороморозильный агрегат горизонтального типа.

формационном стенде, значительно улучшало эксплуатационные показатели, и, как следствие, повышало эффективность функционирования холодильного агрегата. Руководство фирмы загорелось желанием использовать в своей работе этот положительный иностранный опыт, и стало искать специалистов, способных рассчитать и изготовить струйные аппараты, способные функционировать в составе произведенных в Дании и предназначенных для быстрой заморозки рыбы на рыболовных промысловых судах плиточных скороморозильных агрегатов горизонтального типа НК-8/12 (Dybvad Star Industri).

Первоначально работа по расчету и изготовлению струйных аппаратов для агрегатов НК-8/12 была предложена специалистам профильных кафедр нескольких технических ВУЗов города Санкт-Петербурга, однако данное предложение ими было отклонено, тогда руководство фирмы обратилось к авторам с предложением выполнить эту работу. Данное предложение фирмы авторами было принято с условием того, что ее сотрудники предоставят все, необходимые для проведения расчетов данные по морозильному агрегату, его технологическим (термодинамической и гидравлической) схемам, а также по термодинамическим свойствам используемого хладагента. Необходимые для проведения расчетов данные авторам были предоставлены.

Разработка струйного аппарата и результаты его натуральных испытаний

В соответствии с техническим заданием основной целью разработки струйного аппарата в гидродинамической сети плиточного морозильного агрегата горизонтального типа НК-8/12 с холодильным агентом — фреоном R22 — являлся расчет геометрических размеров его проточной части.

Согласно приложенной к техническому заданию схемы холодоснабжения (гидродинамической сети) агрегата НК-8/12 входной патрубков струйного аппарата соединялся трубопроводом с внутренней полостью устройства мгновенного испарения – экономайзером,

ОБЪЯВЛЯЕТ КОНКУРСНЫЙ ПРИЕМ

26 апреля 2017 года

*состоится 24-е общее годовое собрание Международной академии холода,
по адресу: Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

Согласно Уставу право выдвижения кандидатов на участие в конкурсе предоставляется: Президиумам национальных и региональных отделений МАХ, Представительствам МАХ, международным организациям, высшим учебным заведениям, ученым и специалистам.

Кандидаты представляют следующие документы:

для индивидуальных членов:

- заявление на имя Президента МАХ академика А.В. Бараненко об участии в конкурсе с указанием: искомого академического звания, секции МАХ, места работы, занимаемой должности, гражданства, даты рождения (число, месяц, год), ученого звания и ученой степени, служебного и домашнего адресов, телефонов, факсов (с индексом страны и города), e-mail и сайта организации;
- ходатайство о приеме от члена МАХ или других Академий (форма произвольная);
- три фотографии размером 3 x 4 см (черно-белые или цветные);
- краткая информация о научно-производственной деятельности кандидата, перечень основных научных трудов, предполагаемое направление личного участия в деятельности МАХ;

для юридических лиц (коллективных членов):

- заявление руководителя организации на имя Президента МАХ академика А.В. Бараненко с просьбой о вступлении;
- краткая характеристика основных направлений деятельности организации;
- почтовый адрес, телефоны, факсы, e-mail и сайт организации.

Документы отправляются по почте или доставляются непосредственно по адресу: 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, д. 9, офис 1119, Международная академия холода, главному ученому секретарю Ю.А. Лаптеву (с пометкой «На конкурс»).

Для справок: телефон/факс: (812) 571-69-12, e-mail: max_iar@gunipt.spb.ru, max_iar@irbt-itmo.ru, laptev_yua@mail.ru

Документы принимаются до 31 март 2017 года.

Вакансии на прием в члены МАХ в 2017 г.

Секция	Академик	Член-корреспондент	Академический советник
1. Холодильные машины и системы низкопотенциальной энергетики	2	1	2
2. Холодильные установки, холодильный транспорт	2	2	2
3. Криогенная техника и сжиженные природные газы	2	1	2
4. Машины, аппараты и системы кондиционирования	1	1	2
5. Теоретические основы холодильной и криогенной техники	2	2	2
6. Холодильное машиностроение	2	1	1
7. Технологии пищевых продуктов и холодильных производств	2	1	2
8. Процессы и агрегаты пищевых производств	2	1	2
9. Прикладная биотехнология	2	1	2
10. Криомедицина	2	1	2
11. Экология и мониторинг окружающей среды	2	1	2
12. Экономика	2	1	1
13. Материаловедение, механика и прочность при низких температурах	2	1	2
14. Альтернативные способы охлаждения	2	1	2
15. Полярные системы и мерзлотоведение	2	1	2
16. Промышленная безопасность	1	1	1

откуда газообразный хладагент с давлением не более 15,54 бар (~15 кг/см²) и температурой -9°C подавался в рабочую камеру аппарата. Всасывающий патрубок струйного аппарата сообщался трубопроводом с нижней частью внутреннего объема циркуляционного ресивера (отделителя жидкой фазы), а выходной парубок – с внутренней полостью испарителя морозильного агрегата. При этом средний расход жидкого хладагента, подаваемого из экономайзера на струйный аппарат, должен был составлять не менее 872 кг/час.

В качестве струйного аппарата в заданной технической задачей гидравлической сети холодильного агрегата НК-8/12, авторам-разработчикам был выбран инжектор, рабочим телом или рабочей средой которого являлся фреон R22. Следует напомнить, что инжектор (дословно – «нагнетатель») – техническое устройство, предназначенное для сжатия и нагнетания жидкости. Отличие этого типа струйного аппарата в том, что разряжение в подводящем пассивную среду (всасывающем) трубопроводе характерное для эжектора, в инжекторе отсутствует и заменено нагнетанием. Другими словами, инжектор – это тип струйного аппарата, у которого рабочая среда в напорной, всасывающей и выходной линиях всегда находится под давлением.

В точном соответствии с технической задачей авторами были определены геометрические размеры проточной части инжектора, кроме того, были проведены расчеты его работы в условиях возникновения кавитации двухфазной среды в проточной части аппарата. По окончании расчетов на основании полученных расчетных данных было изготовлено два опытных образца струйного аппарата, один из которых позднее в соответствии с технологической схемой смонтировали в гидродинамическую сеть холодильного агрегата. После гидравлических испытаний на рабочее давление не менее 20 кг/см², а также изоляции струйного аппарата, его соединительных трубопроводов и узлов при авторском надзоре разработчиков были проведены натурные испытания инжектора в цикле

«пар-конденсат фреона R22» холодильного агрегата НК-8/12.

Натурные испытания проводились с целью:

1. Проверки работоспособности инжектора в соответствии со своим назначением.
2. Проверки соответствия расчетных характеристик эксплуатационным параметрам работы инжектора в схеме холодильного агрегата.
3. Проверки соответствия параметров работы струйного аппарата данным, представленным в техническом задании.
4. Определения параметров начала кавитационного режима работы.

Практически одновременно с натурными испытаниями инжектора авторами-разработчиками совместно со специалистами фирмы выполнялись пуско-наладочные работы оборудованного струйным аппаратом холодильного агрегата.

Результаты проведения натурных испытаний показали, что:

1. Инжектор надежно функционирует в гидродинамической сети холодильного агрегата в соответствии со своим функциональным назначением при этом: параметры рабочей среды (фреона R22) на входе инжектора составили давление $P_1 = 14$ бар (~14,27 кг/см²), температура $T_1 = -9^\circ\text{C}$, расход $Q_1 = 872$ кг/час; параметры всасываемой (пассивной) среды (фреона R22) составили $P_2 = 1,053$ бар (~1,056 кг/см²), $T_2 = -40^\circ\text{C}$, $Q_2 = 1200$ кг/час; параметры получаемой на выходе хладагентной смеси (фреон R22-фреон R22) составили $P_3 = 1,55$ бар (~1,58 кг/см²), $T_3 = -37 \div -38^\circ\text{C}$, $Q_3 = Q_1 + Q_2 = 2000 \div 2100$ кг/час, высота подъема готовой смеси $h_1 = 2,0$ метра.
2. Развитая кавитация в проточной части струйного аппарата и «запирание» потока при работе инжектора – не наблюдались.
3. В целом параметры работы инжектора соответствуют требованиям технического задания, однако высота подъема приготавливаемой хладагентной смеси вместо заданных 0,8 метра составила 2,0 метра, а гидродинамическое сопротивление холодильного аппарата соответствовало 1,0 кг/см², вместо 0,5 кг/см².

4. Отказов и неисправностей в процессе работы холодильного агрегата по причине отказов и неисправностей инжектора не выявлено.

Работа струйного аппарата в составе холодильного агрегата НК-8/12

На работу струйного аппарата, функционирующего в составе холодильного аппарата НК-8/12, подавалось не менее 872 кг/час (Q_1) жидкого хладагента, при этом между его входным и выходным патрубками создавался перепад давления хладагента равный $\Delta P = P_1 - P_2 = 14$ бар ($\sim 14,27$ кг/см²) - 1,55 бар ($\sim 1,58$ кг/см²) = 12,45 бар ($\sim 12,69$ кг/см²). На срезе сопла в рабочей камере струйного аппарата хладагент дросселировался (уменьшал давление), получая при этом давление $P_2 = 1,053$ бар ($\sim 1,056$ кг/см²), достаточное для отбора 1200 кг/час (Q_2) жидкого холодильного агента из нижней части внутреннего объема циркуляционного ресивера (отделителя жидкой фазы) и организации его движения по всасывающему трубопроводу в рабочую камеру инжектора, где рабочая и поступающая среды смешивались и образовывали жидкую хладагентную смесь, которая далее через выходной патрубок струйного аппарата подавалась непосредственно в испаритель плиточного морозильного агрегата.



Закладка рыбы в холодильный агрегат.

При работе инжектора в гидродинамической сети холодильного агрегата НК-8/12 в испаритель скороморозильного агрегата вместо проектных 872 кг/час (Q_1) стало поступать 2072 кг/час ($Q_3 = Q_1 + Q_2$) жидкого хладагента, что снизило время заморозки в морозильной камере агрегата с 45 минут (без аппарата) до 15 минут (с аппаратом). Кроме того, отбор 1200 кг/час (Q_2) жидкого фреона R22 из ресивера значительно разгрузил компрессор холодильной установки по причине того, что он стал откачивать и сжимать менее вязкую, газообразную фазу холодильного агента, что, в конечном итоге, уменьшило электропотребление на работу компрессора и холодильного агрегата в целом.

Установка струйного аппарата в гидродинамическую схему агрегата НК-8/12 позволила организовать дополнительный контур, названный авторами «малый контур циркуляции жидкого хладагента», функционирующий автономно без затрат дополнительной энергии, исключительно за счет имеемого в системе «лишнего» давления рабочей среды (жидкого холодильного агента).

Объективные трудности расчета

Объективные трудности гидравлического расчета работающего на фреоне инжектора вызваны крайней нестабильностью термодинамических свойств и переменными значениями гидродинамических характеристик этого рабочего тела. Фреоны, как известно, это техническое название группы насыщенных алифатических фторсодержащих углеводородов, применяемых в современных холодильных установках, машинах и агрегатах в качестве хладагентов. Дело в том, что термодинамические свойства фреона R22, как и всех других фреонов, далеки от аналогичных свойств классических ньютоновских жидкостей, например, воды. В каждой отдельной точке гидродинамической сети термодинамические свойства и агрегатное состояние фреонов разные, и сильно зависят от температуры и давления. Пары фреонов, также крайне не стабильны и имеют очень узкий

диапазон постоянных значений показателей термодинамических характеристик, которые так же определяются давлением и температурой и различны в разных точках гидродинамической сети.

Расчеты геометрических размеров проточной части инжектора, выполненные по общепринятым методикам, так и не получились. Их многочисленные результаты были отрицательными, поскольку показывали, что при использовании в качестве рабочего тела фреона R22 в пассивной (подводящей) и выходной линиях струйного аппарата всегда возникает развитая кавитация — физическое явление активного парообразования с последующим схлопыванием пузырьков пара в потоке жидкости. В реальных условиях работы струйного аппарата, в том числе и инжектора, наличие развитой кавитации в его рабочих линиях всегда сопровождается «запиранием» подводящего и/или выходного трубопроводов рабочей среды, что во всех случаях приводит к потере струйным аппаратом своей работоспособности.

Для расчета инжектора авторы использовали собственную, оригинальную, методику, включающую, в том числе, и его проверку на безкавитационную работу. Использование оригинальной методики позволило авторам рассчитать геометрические размеры проточной части инжектора, при которых на всех расчетных режимах работы струйного аппарата пограничная кавитация не переходила в развитую кавитацию.

Определение геометрических размеров фреонового инжектора по разработанной авторами методике стало возможным только потому, что ранее эта методика успешно прошла апробацию при выполнении множества расчетов различных струйных аппаратов, рабочими телами которых являлись нефть, мазут, дизельное топливо, бензины и другие неньютоновские жидкости, а также разные газы, газо-жидкостные смеси, морская и пресная вода.

Вместо заключения

Для проверки правильности гидродинамических расчетов, экспертной оценки качества выполненных авторами-разработчиками работ и приема изготовленного по результатам расчета струйного аппарата фирмой-заказчиком в качестве экспертов были привлечены ранее отказавшиеся от данной работы специалисты профильных кафедр технических ВУЗов. Заключение привлеченных экспертов было однозначным: расчеты проведены корректно, геометрические размеры проточной части обеспечивают реализацию всех требований технического задания, а инжекторы изготовлены качественно и технологически правильно.

Несмотря на высокую оценку выполненной работы экспертами и руководством фирмы-заказчика, авторы сделали свой вывод, а именно, гидродинамический расчет струйных аппаратов, работающих на фреонах и аналогичных им крайне нестабильных рабочих средах, довольно сложная, трудоемкая и многофакторная задача, при выполнении которой существует достаточно высокая вероятность отрицательного результата. Именно поэтому в дальнейшем расчеты подобного рода авторами больше не производились. Возможно, вышеупомянутым представителям ВУЗов Санкт-Петербурга, которых фирма-заказчик намеривалась первоначально привлечь к работам, все эти объективные трудности и существующие высокие риски расчета фреоновых струйных аппаратов были заранее хорошо известны, поэтому данное предложение ими и не было принято. Между тем, не смотря на все объективные трудности и возможные риски, работа была выполнена качественно и в срок, а авторы приобрели уникальный опыт разработки фреонового струйного аппарата, позволившего, в конечном итоге, значительно повысить эффективность функционирования холодильной установки.

К.т.н. Е. Дубровин, к.т.н. И. Дубровин