

Осенью прошлого года кафедра холодильной техники и технологий КНИТУ отметила свой 40 летний юбилей и памятную дату – 80 лет со дня рождения основателя и бессменного на протяжении более 30 лет заведующего кафедрой профессора А. А. Мифтахова (07.11.1932 – 07.10.2008). Воодушевленные этими событиями, авторы посчитали своим долгом вернуть к жизни почти утраченный экспериментальный материал и тем самым внести свою маленькую толику в дело возрождения и дальнейшего развития научной школы по исследованию аэродинамики концевых ступеней центробежных компрессоров – дело, которому Альберт Абдрахманович посвятил всю свою научно-педагогическую деятельность [1]. Сегодня наиболее перспективным, а зачастую и единственно доступным, а потому и единственно возможным путем развития и совершенствования методов расчета, проектирования и оптимизации компрессорной техники оказалось математическое моделирование. Дорогостоящий во всех отношениях эксперимент теперь явление редкое и к нему прибегают только в исключительных случаях. Очевидно, что в сложившихся условиях экспериментальное наследие прошлого поколения исследователей в ряде случаев вполне могло бы сократить разрыв между "теорией" и "практикой". Однако здесь есть свои проблемы и подводные камни! Как ни парадоксально, но основным препятствием для использования этой информации является чаще всего ее недоступность – номинально она (информация) есть, но попытки воспользоваться ей и извлечь из обширных развалов "руды" – протоколов экспериментальных данных, "алмазы" полезного и столь необходимого знания чаще всего терпят фиаско. В КНИТУ-КХТИ на кафедре холодильной техники и технологии в советский период ее становления и наиболее бурного развития (в 70-е ... 80-е годы прошлого столетия) был получен обширный экспериментальный материал по многочисленным аэродинамическим испытаниям как концевых ступеней центробежных компрессоров в целом, так и их отдельных элементов. Значительная часть результатов этих исследований в той или иной мере нашла отражение в научных публикациях профессора А. А. Мифтахова и его учеников [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Однако и до настоящего времени огромный пласт информации в виде первичных протоколов испытаний все еще ждет своего часа – их системной обработкой по разным причинам долгие годы никто практически не занимался. В том "бумажном" виде, да и к тому же в весьма раздерганном и растрепанном состоянии, в котором эта ценная еще на наш взгляд информация находится сегодня, она рано или поздно будет полностью утрачена по причине того, что никто уже не сможет расшифровать тайну "сухой цифири" этих протоколов. В конце 80-х годов прошлого столетия в отечественной практике предпринималась попытка создания автоматизированного банка данных (АБНД) по ступеням центробежных компрессоров. Разработка АБНД в общих чертах предполагала создание баз данных (БД) и комплекса программных средств,

обеспечивающих его функционирование. Согласно Постановлению СМ СССР "Важнейшие направления развития научно-исследовательских работ в вузах в XII пятилетке в области компрессорных, вакуумных машин и пневмоагрегатов с предприятиями Минхиммаша" в рамках проблемы "Создание системы автоматизированного проектирования (САПР) компрессорного оборудования" к разработке и формированию БД и АБНД помимо ведущих в отрасли на тот момент институтов: ВНИИКомпрессормаш, ВНИИХолодмаш, НИИТурбокомпрессор, ЦКТИ, НИКТИ (НЗЛ); были привлечены и вузы: ЛПИ, Смоленский филиал МЭИ и КХТИ. В основу принятой концепции АБНД, были положены реляционная модель данных [12, 13] и СУБД РЕЛБАЗ [14]. Последняя представляла оригинальную отечественную разработку и на то момент не имела иных, доступных для широкой инженерной практики, прототипов и аналогов. Все выше названные и другие организации, обладающие соответствующей информацией, должны были обеспечить информационное наполнение единого (отраслевого) банка данных и тем самым способствовать дальнейшему повышению уровня автоматизации научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ и внедрению в отечественную компрессоростроительную практику систем автоматизированного проектирования (САПР). Увы, но столь оптимистическим планам и проектам, в силу последовавшей вскоре череде "радикальных" социальных и экономических преобразований в стране и неизбежных при этом катаклизмов, не суждено было воплотиться в жизнь – развал, разобщенность, дезинтеграция, смена приоритетов и ... за без малого четверть века на отраслевом уровне в части информационного наполнения, не сделано практически ничего! Только отдельные частные успехи... при колоссальных издержках и потерях научных направлений, экспериментальной базы, традиций и, в конечном итоге, элементарных навыков и желания что-либо проверять на практике. Но, как говорится, нет худа без добра! За те же годы компьютерная техника (в отличии от компрессорной) и компьютерные технологии имели столь впечатляющий прогресс в своем развитии и глобальной экспансии во все сферы человеческой деятельности, что ситуация в корне изменилась! Причем исключительно в позитивную сторону [15]. Благодаря резко возросшей всеобщей компьютерной грамотности и, главным образом, развитию информационных технологий (IT) разработке и распространению соответствующего программного обеспечения, реализовать идею систематизации, архивации и перевода в доступную для дальнейшего широкого использования электронную форму экспериментальных данных аэродинамических испытаний сегодня стало возможным и без каких-либо особых интеллектуальных усилий и специфических знаний в IT области. Требуются только воля и желание! Более того, "на новом витке спирали" стала возможной автономная, поэтапная и, что особо ценно, не обремененная сложностью формальных согласований с "большим братом", а также проблемами аппаратной

несовместимости и прочими техническими премудростями, работа над проектом не столько IT специалистов, сколько людей непосредственно причастных к содержательной стороне дела инженеров, конструкторов и исследователей компрессорной техники. Microsoft SQL Server - система управления реляционными базами данных (РСУБД), разработанная корпорацией Microsoft и широко используемая сегодня для работы с БД размером от персональных до крупных БД масштаба предприятия; персональные компьютеры, многократно превосходящие сегодня по вычислительной мощности и прочим возможностям "железо" прошлого века; глобальная и локальные сети, ставшие столь же привычными и обыденными, как электрические сети и водопровод (даже горячей! воды) - вот тот "инструментарий" на базе которого нынешнее поколение молодых ученых исследователей может и должно реализовать "то, что отцы не достроили"! Возможности использования для построения БД привычных и естественных обычному человеку способов представления данных, основанных на применении различных табличных даталогических моделей данных, появились в конце 60-х годов прошлого века во многом благодаря работе известного специалиста в области СУБД сотрудника фирмы IBM д-ра Эдгара Кодда (Edgar F. Codd). Будучи математиком по образованию, он предложил использовать для обработки данных: · формальный аппарат теории множеств (объединение, пересечение, разность, декартово произведение); и два базовых механизма манипулирования данными: § реляционную алгебру (основанную на теории множеств алгебру отношений); § реляционное исчисление (исчисление, основанное на математической логике). Э. Кодд показал, что любое представление данных в реляционной модели характеризуются простотой структуры данных и сводится к совокупности двумерных таблиц особого вида, известного в математике как отношение - relation (от лат. relatio - отношение, связь) [16]. Отношение - фундаментальное понятие реляционной модели данных (по этой причине модель и называется реляционной) и формально представляет собой "подмножество декартова произведения доменов". Отношение имеет простую графическую интерпретацию в виде двумерной таблицы - принцип построения такой таблицы показан на рис.1. Каждая реляционная таблица (отношение) представляет собой двумерный массив и обладает следующими свойствами: · каждый элемент таблицы представляет собой один элемент данных; · наименьшая единица данных реляционной модели - это отдельное атомарное (неразложимое) для данной модели значение данных; · таблица имеет столбцы, соответствующие атрибутам отношения; · все ячейки в столбце таблицы однородные, то есть все элементы в столбце имеют одинаковый тип (числовой: целочисленный, вещественный или символьный); · каждый столбец таблицы (и, соответственно, атрибут в отношении) имеет уникальное имя; · строки таблицы (отношения) называются кортежами; · одинаковые строки (кортежи) в таблице (отношении)

отсутствуют; · порядок следования строк и столбцов может быть произвольным. Домен-множество атомарных значений одного и того же типа, которые может принимать тот или иной объект по некоторому свойству. Так, например, на рис. 1 домен кодов ступени D1 – множество целых четырехзначных чисел, домен D3 – множество численных значений диаметров рабочих колес (РК) в миллиметрах, а домен обозначений ступени D32 – множество символьных записей, соответствующих принятому в организации условному обозначению ступеней (с максимальной длиной до 10 символов). Домен целых чисел Домен вещественных чисел Домен символьных записей (кодов ступеней) (диаметров рабочих колес) (обозначений ступеней) A_i – атрибуты, V_i – значения атрибутов

Рис. 1 – Отношение с математической точки зрения Отношение (R) на доменах D1, D2, ... Dn состоит из заголовка и тела. Заголовок – на рис. 1 это "СТУПЕНИ", состоит из фиксированного множества атрибутов A1, A2, ... An. При этом существует взаимно однозначное соответствие между этими атрибутами A_i и определяющими их доменами D_i ($i=1, 2, \dots n$). Тело отношения образуется из множества кортежей, где каждый кортеж в свою очередь состоит из множества пар атрибут-значение ($A_i:V_i$), ($i=1, 2, \dots n$). Для любой заданной пары атрибут-значение – ($A_i:V_i$) значение V_i может быть только значением из единственного домена D_i , который связан с атрибутом A_i . Очевидно, что строгое изложение предполагает использование строгих математических терминов: отношение, домен, атрибут, кортеж (которые стали к тому же базовыми понятиями реляционных СУБД), и формулировок типа "...атрибуты отношения соответствуют вхождению доменов в отношение, а кортежи – наборам из значений, взятых из исходных доменов" [13]. Но, к счастью, рядовые и не искушенные в тонкостях сухой и строгой теории пользователи реляционных СУБД (к коим относят себя и авторы) с успехом могут использовать более привычные для себя и понятные, но не строгие, неформальные эквиваленты этих терминов: · отношение – таблица, файл; · атрибут – столбец, колонка, поле; · кортеж – строка, запись. В данном контексте будут уже уместны и допустимы следующие толкования. Атрибут– поле, содержащее информацию об объекте; поле – наименьшая поименованная единица данных (элемент данных); запись – поименованная совокупность полей. Таким образом, атрибут представляет собой элементарное данное - число, символьную строку и т. п. Запись состоит из значений нескольких атрибутов. При этом только следует помнить, что "запись" означает "экземпляр записи", а "поле" – "имя и тип поля". Домен представляет собой совокупность полей (элементов данных) одного и того же типа в отношении. Декартово произведение позволяет получить все возможные комбинации элементов исходных множеств – элементов рассматриваемых доменов. Отношение в реляционной модели данных можно представить как таблицу, где каждая строка есть кортеж, а каждый столбец соответствует одному и тому же компоненту декартова произведения, т.е. в нем могут

появляться только элементы из соответствующего домена. Столбцы таблицы (отношения) очень часто называют атрибутами или аспектами, понимая под доменом пул значений, из которого извлекаются значения для данного столбца. Таким образом каждый атрибут (аспект) определен на некотором домене. Несколько атрибутов одного отношения могут быть определены на одном и том же домене. Атрибуты разных отношений также могут быть определены на одном и том же домене. В таком представлении работа с привычной со школьной скамьи формой двумерных таблиц в чисто техническом плане обычно не вызывает никаких затруднений у пользователей. Гораздо сложнее и важнее выполнить грамотное и правильное построение инфологической модели данных, для чего все же потребуются и специфические знания и определенный опыт (желательно!). Цель инфологического моделирования – обеспечение наиболее естественных для человека способов сбора и представления той информации, которую предполагается хранить в БД. Основными конструктивными элементами инфологической модели являются сущности, связи между ними и их свойства. Сущность – любой объект, который можно отличить от другого и информацию о котором необходимо хранить в БД. Сущностями являются: компрессоры, секции, ступени, рабочие колеса, диффузоры, выходные устройства, характеристики, контрольные сечения, протоколы и т.д. Опять же необходимо различать такие понятия, как "тип сущности" и "экземпляр сущности". Понятие тип сущности относится к набору однородных предметов; экземпляр сущности относится к конкретной вещи в наборе. Например, если "типом сущности" является "ПРОТОКОЛ", то "экземпляром" будет конкретный протокол измерений параметров потока в одном из контрольных сечений выходного устройства, к тому же, и на определенном режиме работы той или иной концевой ступени. Понятно, что концевых ступеней, выходных устройств, контрольных сечений (все они к тому же являются "сущностями!") и режимов работы в общем случае может быть много. Множества "экземпляров" ступеней, выходных устройств, сечений, режимов и пр. содержат от нескольких единиц до десятков единиц элементов (элементов множества); "экземпляров" протоколов, хранимых в БД, – сотни и тысячи! Атрибут (аспект) – поименованная характеристика (свойство) сущности. Его наименование должно быть уникальным для конкретного типа сущности, но может быть одинаковым для различного типа сущностей (например, КОД ОТВЕТСТВЕННОГО ЛИЦА, КОД ИСТОЧНИКА ИНФОРМАЦИИ и ДАТА ЗАПИСИ КОРТЕЖА определены в БД для всех сущностей: СТУПЕНЬ, РАБОЧЕЕ КОЛЕСО, ДИФFUЗОР, ВЫХОДНОЕ УСТРОЙСТВО, ХАРАКТЕРИСТИКА, КОНТРОЛЬНОЕ СЕЧЕНИЕ, ПРОТОКОЛ и т. д.). Атрибуты используются для определения того, какая информация должна быть собрана о сущности. Примерами атрибутов для сущности ПРОТОКОЛ являются: ДАТА ИСПЫТАНИЯ, БАРОМЕТРИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ, СТУПЕНЬ, ЭЛЕМЕНТ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ, РЕЖИМ, КОНТРОЛЬНОЕ СЕЧЕНИЕ и т.д. Здесь также существует различие

между "типом" и "экземпляр". Тип атрибута ЭЛЕМЕНТ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ имеет несколько экземпляров или значений: входное устройство, рабочее колесо, диффузор, выходное устройство, спиральный канал и др., однако каждому экземпляру сущности присваивается только одно значение атрибута. Как видно из приведенных примеров, абсолютное различие между типами сущностей и атрибутами отсутствует. Атрибут является таковым только в связи с типом сущности. В другом контексте атрибут может выступать как самостоятельная сущность. Например, для сущности ПРОТОКОЛ (и в соответствующих таблицах отношений ПРОТОКОЛ!) СТУПЕНЬ – это только атрибут, а для БД в целом СТУПЕНЬ – тип сущности, имеющий собственную форму таблицы отношения СТУПЕНЬ и многочисленные её "экземпляры". Ключ – минимальный набор атрибутов, по значениям которых можно однозначно найти требуемый экземпляр сущности. Минимальность означает, что исключение из набора любого атрибута не позволяет идентифицировать сущность по оставшимся. Связь – ассоциирование двух или более сущностей. Если бы назначением базы данных было только хранение отдельных, не связанных между собой данных, то ее структура могла бы быть очень простой. Однако одно из основных требований к организации БД – это обеспечение возможности отыскания одних сущностей по значениям других, для чего необходимо установить между ними определенные связи. Наличие в общем случае множества связей определяет сложность инфологических моделей. Отметим также, что в реляционной модели данных (в отличие от сетевой и иерархической моделей, которые используют графовую форму представления данных) связи рассматриваются как объекты и находят отображение в соответствующих записях. Таким образом вся информация о самих объектах и взаимосвязях между ними в реляционной БД представляется одинаковым образом – в виде отношений. В целом процесс проектирования информационной системы является весьма сложным и начинается он с анализа целей этой системы и выявления требования к ней отдельных пользователей [17, 18], изучения и идентификации сущностей и процессов, использующих эти сущности. Сущности группируют по сходству – частоте их использования для выполнения тех или иных действий, и по количеству ассоциативных связей между ними. Сущности или группы сущностей, обладающие наибольшим сходством и (или) с наибольшей частотой ассоциативных связей объединяют в предметные БД. Поэтапное выполнение всех дальнейших шагов процедуры проектирования даталогической модели подробно рассмотрено в [13] и здесь мы на этом останавливаться не будем. Отметим лишь, что поскольку решаемая нами задача значительно проще и уже – не проектирование информационной системы, а формирование лишь относительно небольших по размерам и функционалу предметных БД, то выбор сущностей и их объединение был выполнен без использования формальных методик – исходя исключительно из соображений

"здорового смысла". Более того, инфологической модели был сохранен по возможности тот первоначальный вид, который она имела в упомянутые выше времена (с целью преемственности и совместимости). К ранее имевшимся двум базам: А – содержащей геометрические параметры отдельных элементов проточной части, и В – данные по газодинамическим характеристикам ступеней и отдельных элементов проточной части центробежного компрессора, а также информацию по общему конструктивному исполнению ступеней и их отдельных элементов, были добавлены ещё две: С – база данных по контрольным сечениям проточной части и методике измерений, и D – данные протоколов аэродинамических испытаний. Рассматриваемый АБНД по информационному наполнению не является чисто конструкторским, а носит скорее исследовательский характер, поскольку большую часть и по объему и с точки зрения научной новизны и научной ценности представляют данные аэродинамических испытаний, характеристики ступеней и элементов их проточной части. Поэтому в его основу было положено поэлементное структурирование центробежного компрессора, широко используемое в научной и учебной литературе по аэродинамике центробежных компрессоров [19]. "Сущностьобразующими" при этом являются как отдельные элементы проточной части центробежного компрессора – ВхУ, РК, ЛД и пр., так и их сочетания, образующие ступени и секции – рис.2. Очевидно, что "препарированный" по конструктивному или производственно-технологическому принципу центробежный компрессор имел бы несколько отличную от представленной на рис.2 структуру. Реальный объект предметной области – компрессор, отображаемый в АБНД, представлен на пяти уровнях детализации: 1. Центробежный компрессор (ЦК) в целом; 2. Секции или группы неохлаждаемых ступеней; 3. Отдельные ступени; 4. Отдельные элементы ступеней (входное и выходное устройства, входной регулирующий и обратный направляющий аппараты, рабочие колеса, лопаточный и безлопаточный диффузоры); 5. Детали (диски, лопатки и пр.). Первые четыре уровня, схематично представленные на рис. 3 в виде четырех горизонтальных строк прямоугольных элементов, характеризуются совокупностью отношений, описывающих конструктивную компоновку и геометрию проточной части, газодинамические характеристики и оптимальные параметры ступеней, секций и компрессора в целом, а также результаты испытаний. Отношения, соответствующие пятому уровню детализации (на рис.3 пятый уровень преднамеренно не показан), в первой версии АБНД содержали дополнительные данные только по геометрическим параметрам отдельных деталей конструкции (данные необходимые для описания только тех поверхностей, которые образуют собственно проточную часть компрессора). Отсутствие в те далекие годы иных доступных технических возможностей для "оцифровки" поверхностей проточной части компрессора вынуждало прибегать к примитивному, в прямом и переносном смысле этого

слова, способу описания произвольных поверхностей и линий посредством совокупности простых геометрических объектов ("примитивов") – точка, отрезок, окружность, дуга окружности и т. д. Подготовка и внесение в БД таблиц с координатами точек, отрезков, дуг и пр., принадлежащих тем или иным отдельным участкам поверхностей проточной части, представляли достаточно трудоемкие операции. К тому же описание носило фрагментарный характер (не вся проточная часть представала в явном виде в таком описании), страдало неточностью (мелкие детали для простоты описания зачастую игнорировались!), не было наглядным (результат нельзя было увидеть на мониторе и скорректировать) и в силу этого возрастала вероятность ошибки. Сегодня задача "оцифровки" геометрии проточной части, легко решается средствами любого оказавшегося под рукой пакета компьютерной векторной графики – КОМПАС, AutoCAD и пр. По сути ничего не изменилось – те же "примитивы", но технология получения полноценного изображения и его качество (к тому же при желании и необходимости и в 3D) благодаря возможностям программных средств и развитому и дружелюбному их интерфейсу стала для рядового пользователя несоизмеримо проще, понятней и наглядней. В связи с изложенным понятно почему пятый уровень детализации, в том виде, как это было в прошлом, сегодня уже не актуален. Более того, часть информации по геометрии проточной части из отношений четвертого уровня также целесообразно представить в БД непосредственно в виде графических объектов. База данных по контрольным сечениям проточной части и методике измерений (База С) содержит подробную информацию о форме, размерах и расположении контрольных сечений в проточной части, расположении линий и точек измерений в контрольных сечениях, номенклатуре и размерности содержащихся в протоколах величин. В подавляющем большинстве это – избыточные давления или разности давлений, измеренные жидкостными U-образными дифференциальными манометрами, заполненными водой или ртутью. В качестве справочного дополнения приводятся рабочие формулы для пересчета измеряемых величин в абсолютные значения параметров (давления и температуры), а также используемые формулы осреднения. Рис. 2 – Поэлементное структурирование центробежного компрессора Все обозначения элементов в соответствии с рис.2 Рис. 3 – Уровни детализации центробежного компрессора Контрольные сечения обычно выбирают таким образом, чтобы они по возможности совпадали с условными границами, разделяющими проточную часть ЦК на отдельные элементы. В силу особенностей конструкции ЦК и осевой симметрии большинства его элементов, контрольные сечения чаще всего представляют собой либо цилиндрические поверхности либо поверхности круга или кольца. На рис.4 показано типичное расположение контрольных сечений в проточной части экспериментальной концевой ступени (КС), аэродинамические испытания различных вариантов компоновки которой были выполнены в

лаборатории турбомашин на кафедре холодильной техники и технологии КНИТУ-КХТИ. Множество вариантов КС (более 100) образовано на базе 5 вариантов РК, 2 типоразмеров БЛД и ЛД (при этом ширина диффузоров изменялась в диапазоне $b_3/b_2=0,8...1,6$) и 20 вариантов ВУ. При каждом испытании снимались характеристики КС (напорная и эффективности по адиабатному КПД), для чего производились измерения параметров потока (давление и температура) во входном (Н-Н) и выходном (К-К) контрольных сечениях ступени. Для определения характеристик РК, БЛД (ЛД) и ВУ дополнительно измерялись давления в контрольных сечениях на входе и выходе соответствующих элементов (сечениях 0-0, 2-2 и 4-4). Ряд испытаний сопровождался подробным зондированием потока (пятиканальными шаровыми и трехканальными цилиндрическими зондами) в 5...8 меридиональных сечениях спирального ("улитки") или кольцевого (кольцевые сборные камеры) канала ВУ и на входе в ВУ (на выходе из диффузора). В каждом меридиональном сечении ВУ измерения шаровыми зондами производились по двум взаимно перпендикулярным линиям измерений (в радиальном и осевом направлениях); от 5 до 15 точек измерения на каждой линии. Измерения в диффузоре выполнялись цилиндрическими зондами в 5...8 точках по 8...12 линиям измерений, равномерно расположенным по окружности на цилиндрической поверхности контрольного сечения 4-4.

Концевая ступень Контрольные сечения: Н-Н- вход в ступень; 0-0- вход в рабочее колесо; К-К - выход из ВУ (выход из ступени); 2-2 - выход из рабочего колеса (вход в диффузор); 4-4 - выход из диффузора (вход в ВУ); 0°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°- меридиональные сечения ВУ

Рис. 4 - Концевая ступень и контрольные сечения проточной части

Протоколы с результатами зондирования потока в ВУ и диффузоре составляют наибольшую по объему и наиболее уязвимую (с точки зрения безвозвратной утраты) часть "бумажной" информации, архивацию и сохранение которой авторы считают первостепенной задачей. Как показала практика, прохождение полного "технологического цикла" по информационному наполнению всех БД хотя и достаточно простой, но в то же время и достаточно трудоемкий процесс и может существенно затянуться (печальный опыт, к сожалению, уже есть!). Поэтому для ускорения дела на первом этапе при формировании таблиц-отношений целесообразно использовать стандартный Microsoft Office Excel. Наличие Excel-таблиц уже в принципе решает проблему сохранности данных и существенно помогает организовать "первичный контроль" переносимых из протоколов в БД данных на наличие грубых ошибок. На момент написания настоящей статьи "предварительной оцифровке" подверглись протоколы аэродинамических испытаний лишь 2 вариантов концевой ступени центробежного компрессора с ВУ типа "улитка". Работа продолжается.