

ПЕРВОПРОХОДЕЦ

Вадим Леонидович Иванов

ПАМЯТИ ВЛАДИМИРА ВАСИЛЬЕВИЧА УВАРОВА



Авиационные, судовые, энергетические, и другие газотурбинные двигатели и установки давно и прочно вошли в нашу жизнь. Но этому предшествовал самоотверженный труд и жизненный подвиг пионеров-первопроходцев. Одним из них был Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, д.т.н., профессор МВТУ - МГТУ им. Н.Э. Баумана

Владимир Васильевич Уваров, вся созидательная энергия которого до конца жизни была отдана газовой турбине.

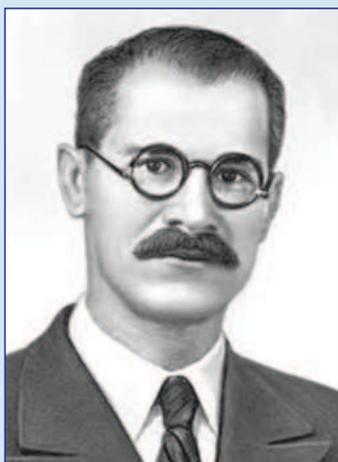
Начальной искрой послужил доклад профессора Л.К. Рамзина о газовой турбине Г. Хольцварта, с которым он 100 лет назад выступил в МВТУ. А пламя зажег профессор Н.Р. Брилинг, который в 1925 г. вручил молодому преподавателю МВТУ В.В. Уварову книгу Маковского "Опыт исследования турбин внутреннего сгорания", предложил (по совместительству) работать с ним по газовым турбинам.

В период 1925-1930 гг. небольшой лабораторией "Газовая группа" под научным руководством Н.Р. Брилинга был выполнен комплекс расчетно-аналитических и экспериментальных исследований с оптимистическими результатами, суть которых сводилась к следующему:

- * несмотря на относительно успешный результат внедрения турбины периодического сгорания цикла $V = \text{Const}$ более перспективной является газовая турбина цикла $P = \text{Const}$;

- * из-за низких КПД турбины и компрессора (тех лет) температура перед турбиной должна быть не менее 1500К, а лопатки турбины должны охлаждаться.

В силу обстоятельств в 1930 г. Н.Р. Брилинг от работы отошел, и дальнейшее судьбы газовой турбины постоянного давления сгорания передается В.В. Уварову. Будучи реалистом последний понимает, что для продолжения работ необходим заинтересованный заказчик и поддержка промышленности. И эту поддержку следует искать в авиации, которой требуется мощный, с малой удельной массой высотный двигатель. В результате встречи с начальником Главного управления авиационной промышленности С.О. Макаровским, оценившим большое будущее газотурбинного двигателя работы по двигателю получили поддержку.



В связи с началом реального проектирования с 1930 г. дальнейшие работы из МВТУ

переносятся во Всесоюзный теплотехнический институт (ВТИ), где под руководством В.В. Уварова и по его проекту начинается разработка авиационного двигателя ГТУ-3 мощностью 1100 кВт с температурой газа перед турбиной 1473К. Фактически работа начиналась "с нуля": отечественный опыт отсутствовал, а иностранный показывал как не нужно делать.

Все знают: "это" сделать невозможно. Но вот приходит упрямец, который не верит в такие запреты. Он-то и делает открытие.

Альберт Эйнштейн

Главный конструктор В.В. Уваров предложил целый ряд оригинальных решений, главные из которых:

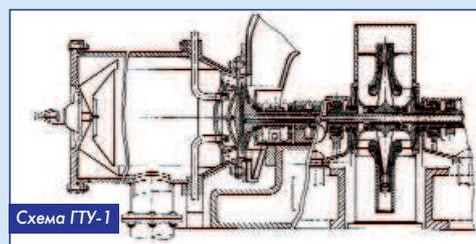


Схема ГТУ-1

- * для повышения эффективности процесса сжатия превратить центробежный компрессор в турбинный: самый неэффективный элемент компрессора - лопаточный диффузор превратить в рабочие лопатки радиальной турбины с передачей её работы на вал пропеллера;

- * камеру сгорания сделать противоточной с воздушным охлаждением стенок жаровой трубы;

- * применить пароводяное охлаждение рабочих лопаток турбины. Каналы в лопатках глухие с самоциркуляцией некипящей воды в канале (открытый термосифон в поле ускорения, превышающее земное в 30 000...50 000 раз), образованием "зеркала" не кипящей воды на радиусе чуть ниже радиуса входа в канал и её последующее испарение - парообразование с зеркала. Для поддержания стабильным радиуса зеркала на всех тепловых режимах требовалось согласовать баланс "подача воды - отвод пара". Была использована саморегулируемая система. Кольцевая полость под зеркалом воды регулирующим диском разделялась на полость подачи воды и полость отвода пара. Вода подавалась помпой в левую часть кольцевой паровой полости, а пар из правой кольцевой полости удалялся самотеком под давлением пара в кольцевой полости. При расчётном радиусе диска во всей кольцевой полости поддерживается расчётное давление пара. При внезапном увеличении тепловой нагрузки на лопатки жидкое кольцо интенсивно испаряется, радиальный зазор возрастает, противодействие в тракте подачи воды уменьшается, и помпа автоматически переходит на режим увеличенной подачи воды. При уменьшении тепловой нагрузки кольцевой зазор увеличивается, противодействие уменьшается, помпа автоматически переходит на режим увеличенного расхода. Поначалу сопловые аппараты охлаждались также водой, а в дальнейшем были разработаны лопатки с внутренним воздушным охлаждением.

Отдельно следует отметить, что частота вращения воздушной радиальной турбины была примерно в три раза меньше частоты

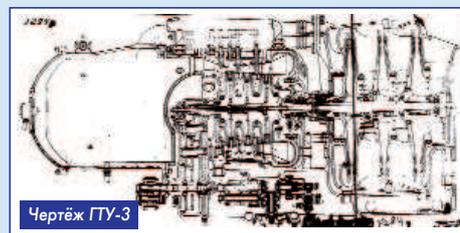


Чертёж ГТУ-3

вращения ротора компрессора (явление пневматической редукции), что позволяло упростить редуктор передачи мощности на вал пропеллера.

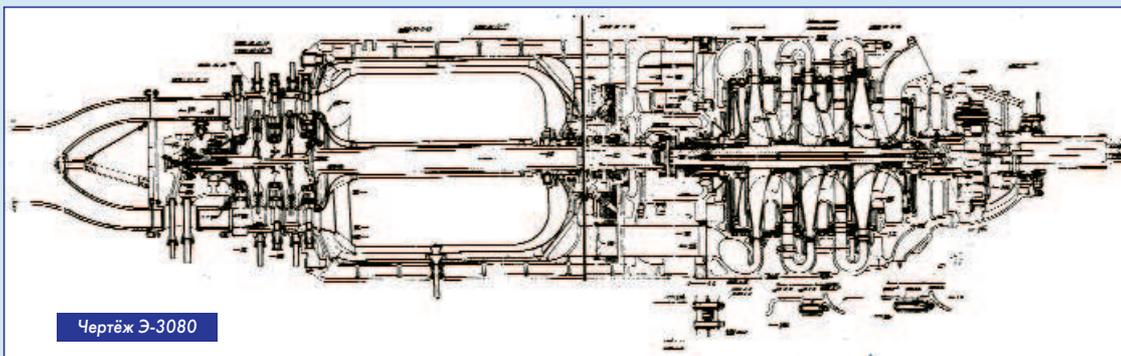
В 1938 г. двигатель был изготовлен на Коломенском паровозостроительном заводе, где далее прошли его успешные испытания.

Двигателю в металле предшествовала огромная работа. С 1932 г. в МВТУ и ВВИА им. Жуковского для небольшой группы студентов и слушателей академии В.В. Уваров начинает преподавать разработанный им курс "Газовые турбины". При этом студенты и слушатели академии вовлекаются в работы по двигателю: участвуют в расчетно-теоретических и экспериментальных работах (испытаниях полноразмерных моделей одноступенчатой ГТУ-1, двухступенчатой ГТУ-2). Их индивидуальная работа одновременно является учебным заданием и плановой работой лаборатории. К примеру, учебным заданием студента В.Х. Абианца является исследование влияния радиального зазора на эффективность газовой турбины, а темой дипломного проекта - "Газовая турбина для самолета Максим Горький".

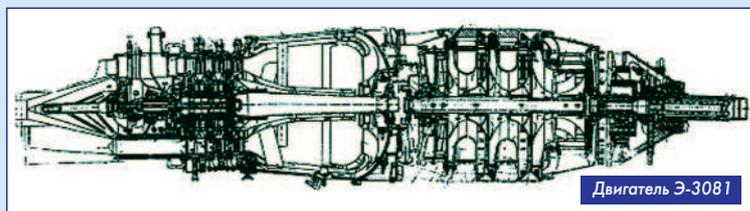
После защиты дипломных проектов выпускники пополняют творческий коллектив лаборатории, становясь на многие годы коллегами и сподвижниками своего учителя. В 1935 г. публикуется монография В.В. Уварова "Газовые турбины", основанная на стенограмме его лекций в ВВИА им. Н.Е. Жуковского и МВТУ им. Баумана, опыте создания газотурбинного двигателя, ставшая на многие годы первым в стране учебником по газовым турбинам.

С 1940 г. работы по двигателю переносятся в ЦИАМ, где под руководством В.В. Уварова создается Лаборатория высокотемпературных авиационных двигателей, государственное задание которой: турбовинтовой двигатель мощностью 740 кВт с температурой газа перед турбиной 1473К; конструктивное исполнение - в летном варианте. После вынужденного перерыва военных лет (1941-1944 гг.) в ЦИАМ были изготовлены опытные двигатели Э-3080. Их испытания подтвердили надежность работы и эффективность всех узлов двигателя и системы охлаждения высокотемпературной турбины.

Следующей разработкой В.В. Уварова, тогда Главного конструктора московского авиационного завода № 41, стал турбовинтовой двигатель Э-3081, успешные длительные испытания которого состоялись в 1948 г. Это был первый в мире работающий высокотемпературный ТВД мощностью 2200 кВт с температурой газа перед турбиной 1473К.

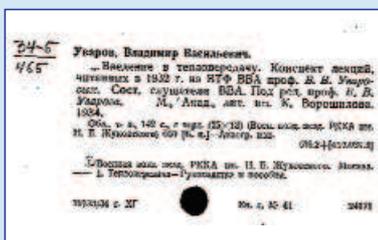


Чертеж Э-3080



Двигатель Э-3081

В 1949 г. решением МАП дальнейшие работы по двигателю были прекращены. Стране требовались околосвуковые, сверхзвуковые самолеты с ТРД. Время ТВД наступит позже, когда потребуются мощные ТВД для военно-транспортной и гражданской авиации.



Для Владимира Васильевича 1930-1949 гг. были успешными, но далеко не простыми. В 1934 г. его работы по газовой турбине с винтом (тогда термина ТВД ещё не существовало) получили одобрение и поддерж-

ку НТС ЦИАМ. Но та же работа на заседании Совета труда и обороны, с участием военных и конструкторов авиационных поршневых двигателей, получила двоякую оценку: военные - На Ура! - это высотная и скоростная авиации, а именитые конструкторы - с явным неодобрением. Их мнение выразил А.Д. Чаромский, назвавший В.В. Уварова фантастом, а газовую турбину малопригодной для авиации. Так было...

А так распорядилось время:

* Под руководством В.В. Уварова в ЦИАМ была создан Отдел № 8 высокотемпературных авиационных двигателей, ядро научного коллектива которой составили ученики В.В. Уварова, имена которых войдут в историю развития отечественного газотурбостроения и реактивной авиации: М.И. Востриков, Я.Т. Ильичев, Б.А. Уваров, В.Х. Абианц, А.А. Лакштовский, О.И. Голубева, А.Г. Романов, В.Е. Михальцев, А.Ф. Пронкин, С.М. Шляхтенко, Г.Ю. Степанов. На многие годы ЦИАМ станет лидером отечественного высокотемпературного газотурбостроения.

* В годы работы в ЦИАМ В.В. Уваровым были решены многие проблемы газотурбинных двигателей: разработаны высотные характеристики авиационного ТВД; обосновано оптимальное распределение тяги ТВД между винтом и реактивным соплом; дополнены теоретические основы гидродинамики лопаточных аппаратов газовых турбин, положены начала аналитического расчета температурного поля турбинной лопатки с внутренним охлаждением и многие др., опубликованные в Трудях ЦИАМ. Его работа "Профилирование длинных лопаток паровых и газовых турбин" (Труды ЦИАМ, 1945 г., № 129) получила признание в стране и мире.

С 1949 г. В.В. Уваров возглавил кафедру № 341 (Воздушно-реактивные двигатели) созданного в 1948 г. факультета № 34 (Реактивная техника). Поддерживая тесные контакты с авиационным газотурбостроением, он сосредоточился на совершенствовании стационарных и транспортных газотурбинных установок и двигателей, их широком внедрении в разные отрасли народного хозяйства страны. В этот же период им были подготовлены несколько тысяч инженеров, ученых высшей квалификации, руководителей КБ и НИИ, а также инженеров и ученых для ряда стран мира.

* Следует отметить научную добросовестность В.В. Уварова, его бескомпромиссность в решении не только научных, учебных, но и жизненных проблем:

* Широко известна его позиция при осуждении директора ВТИ профессора Л.К. Рамзина, когда весь коллектив ВТИ голосованием "ЗА" поддержал обвинение при одном воздержавшимся. Это был В.В. Уваров, попросивший объяснить суть обвинения и не получивший удовлетворительного ответа. Лично для него это могло закончиться плачевно.

* В 1938 г. В.В. Уваров, не обращая внимание на отрицательные заключения больших ученых и авторитетных организаций поддержал и отстаивал проект тогда еще мало кому понятного турбореактивного двигателя (ТРД). В результате в 1940 г. автор проекта А.М. Лялька приступил к созданию первого в стране ТРД (отметим - проект ТРД был конкурирующим проекту В.В. Уварова). А.М. Лялька всегда считал В.В. Уварова крестным отцом своих двигателей.

* В 1951 г. при выполнении поручения И.В. Сталина по созда-

нию мощного ТВД НК-12 для дальнего бомбардировщика А.Н. Туполева на предприятии Н.Д. Кузнецова была создана газовая турбина с чрезвычайно высоким (по тому времени) КПД. Одна из ведущих Научных организаций авиационной промышленности расчетами показала неправдоподобность такого результата, фактически обвинив кузнецовцев в фальсификации результатов. Для разрешения конфликта МАП направил в Куйбышев авторитетную комиссию во главе с В.В. Уваровым; в комиссию вошли и представители упомянутой выше организации.

Инженер, профессор В.В. Уваров всегда очень бережно относился к цифре - главному "продукту" инженерного труда. На протяжении недели были перепроверены все протоколы экспериментов, корректность постановки эксперимента и его обработки, точность измерительной аппаратуры. Вывод высокой комиссии: НИКАКОГО КРИМИНАЛА НЕТ.

...Ошибка обнаружилась в расчетах научной организации.

Многолетний опыт работы Владимира Васильевича в авиационной промышленности отразился на стиле работы кафедры, кредо которой стало: "инженеров-газотурбинистов должны готовить преподаватели, знающие газовые турбины не по учебникам, а по металлу, имеющие опыт создания и испытания элементов двигателя". Поначалу лекторами основных дисциплин кафедры им были приглашены (по совместительству) специалисты из НИИ и КБ. Например, теория ВРД - М.М. Бондарюк (НИИ 1), газовые турбины - В.Х. Абинач (ЦИАМ), авиационные ГТД - П.К. Казанджан (ВВИА им. Н.Е. Жуковского).

При кафедре создаются инженерно-исследовательская группа и лаборатория, устанавливаются связи с промышленностью. По результатам НИР защищают кандидатские диссертации первые штатные преподаватели В.С. Бекнев, Н.Д. Грязнов, Ю.М. Пчелкин, А.П. Чернобровкин. В 1954 г. в Центральном лектории Всесоюзного общества по распространению политических и научных знаний В.В. Уваров выступает с лекцией "Газовые турбины", которая привлекла внимание не только специалистов из разных городов страны, но и студенческую молодежь. Изданная огромным тиражом стенограмма лекции мгновенно становится библиографической редкостью. В лекции был представлен анализ активного развития ГТД для авиации, а также прогноз развития (задержавшихся в развитии) энергетических, транспортных, газотурбинных установок замкнутого цикла на ближнюю и дальнюю перспективу. Жизнь показала, что профессор не ошибался.

В 1955 г. совместно с Коломенским тепловозостроительным заводом в МВТУ началась разработка проекта первого отечественного газотурбовоза на жидком топливе мощностью 2600 кВт в одновальном исполнении (это принципиально важно для ж.д.). Главным конструктором газотурбовоза был знаменитый конструктор отечественных паровозов Л.С. Лебединский, а Главным конструктором ГТД В.В. Уваров. Выбор МВТУ, как соисполнителя проекта был не случайным. В начале 1950-х кафедра приняла участие в разработке концептуального проекта газотурбовоза на пылеугольном топливе: были разработаны и прошли стендовые испытания вихревая пылеугольная камера сгорания с системой топливоподдачи, турбоциклонный агрегат очистки продуктов сгорания от эрозионно опасной пылезольной взвеси, оптимизировано входное устройство компрессора, охлаждаемый диффузор выходного тракта и др.

В работе над проектом коломенского газотурбовоза участвовал не только весь персонал кафедры и конструкторы-паровозники, но и студенты старших курсов. В ходе совместной работы и специальных лекций происходила переквалификация паровозников в газотурбинисты. Одновременно в рамках НИР кафедры шли разработки более экономичных высокой мощности газотурбовозов. Три созданных в 1959 г. газотурбовоза более 15 лет успешно эксплуатировались на южной железной дороге (на них также проходила эксплуатационная практика студентов кафедры).

Малая удельная масса ГТД, как и в авиации играет важную роль для железной дороги - нагрузка "на ось" подвижного состава не должна превышать 20 т на ось. При максимальном числе

осей единицы подвижного состава (две трехосные тележки) масса газотурбовоза в одновальном исполнении не должна превысить 120 т. В.В. Уваров доказывал, что можно создать газотурбовоз мощностью 8...10 МВт. Ему опять не верили - называли фантастом. А ныне на Свердловской железной дороге газотурбовоз ГТВ-002 на сжиженном природном газе водит стоговонные грузовые составы. (Впервые идея создания газотурбовоза была им озвучена на Заседании секции теплотехников МВТУ в 1925 г.).

В 1957 г. приказом МВ и ССО СССР под руководством профессора В.В. Уварова в МВТУ создается одна из первых в стране Проблемная лаборатория "Турбостроение", основные направления работы которой :

- * энергетические ГТУ большой мощности, транспортные ГТД, комбинированные ГТУ-ПТУ, ГТУ замкнутого цикла с ядерным реактором, ЗГТУ космических летательных аппаратов, МГД-установки разного назначения;

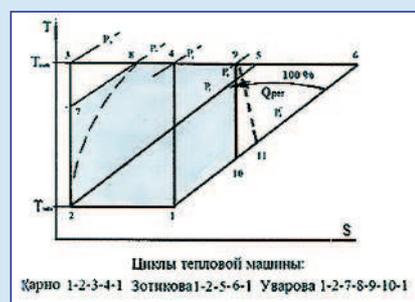
- * развитие и совершенствование систем охлаждения газовых турбин и тепловой защиты других энергообъектов.

Главной, в шлейф которой вошли все другие работы - это энергетические ГТУ большой мощности. Было очевидно, что ГТУ мощностью 25...40 МВт не конкурентоспособна в большой теплоэнергетике; требовались энергоустановки мощностью свыше 200 МВт при КПД не ниже 35...36 %. Регенеративный цикл Г.И. Зотикова не давал ключа: пропустить большой объем высокотемпературного газа атмосферного давления через регенератор не представляется возможным.

В.В. Уваров доказал возможность создания ГТУ мощностью 200 МВт и выше с КПД уровня 40 % при температуре газа перед турбиной, даже не требующей охлаждения лопаток. Опираясь на анализ цикла Карно, регенеративного цикла Г.И. Зотикова, опыт эксплуатации энергетических ГТУ регенеративного цикла он предложил безрегенеративный изотермно-адиабатный цикл, дающий максимальное приближение к КПД цикла Карно.

В его обоснование положен простой пример. При отношении температур цикла (T_{MAX} / T_{MIN}) = 1200/300 уже при давлении Р (7-8) температура конца адиабатного процесса сжатия в реальном компрессоре достигает максимальной температуры цикла;

продолжать процесс сжатия до давления Р (3-5) бессмысленно! Теоретический изотермно-адиабатный цикл Уварова (1-2-7-8-9-10-1) лишен этих недостатков. Последовательность (1-2) - изотермный процесс сжатия с отводом теплоты; (2-7) - адиабатный процесс сжатия; (7-8) - изобарный процесс с подводом теплоты; (8-9) - изотермный процесс расширения с подводом теплоты; (9-10) - адиабатный процесс расширения до атмосферного давления; (10-1) - изобарный процесс охлаждения в атмосферной среде (цикл разомкнутый).



Пунктиром показаны процессы адиабатного сжатия (2-7) и адиабатного процесса расширения (9-11) в реальных компрессоре и турбине.

Теоретические циклы Карно 1-2-3-4-1, Зотикова (при стопроцентной регенерации) 1-2-5-6-1, Уварова 1-2-7-8-9-10-1 имеют равные КПД и удельную работу цикла. Но мощность ГТУ цикла Зотикова ограничена пропускной способностью регенератора (объем высокотемпературного газа атмосферного давления). Теоретический цикл Уварова (изотермный отвод тепла при сжатии и затем адиабатном сжатии, изотермном процессе расширения с подводом тепла и заключительным адиабатном расширении) позволяет создать безрегенеративную ГТУ большой мощности (процесс охлаждения 10-1 происходит в окружающей атмосфере, а не в регенераторе (цикл разомкнутый)).

Впервые свойства изотермно-адиабатного цикла им были озвучены на одной из конференций ОН АН СССР - но понимания не получили. В одном из докладов на последующих конференциях по газовым турбинам он говорил: "Удивительно, почему на такой своеобразный цикл Карно никто раньше не обратил внимания".

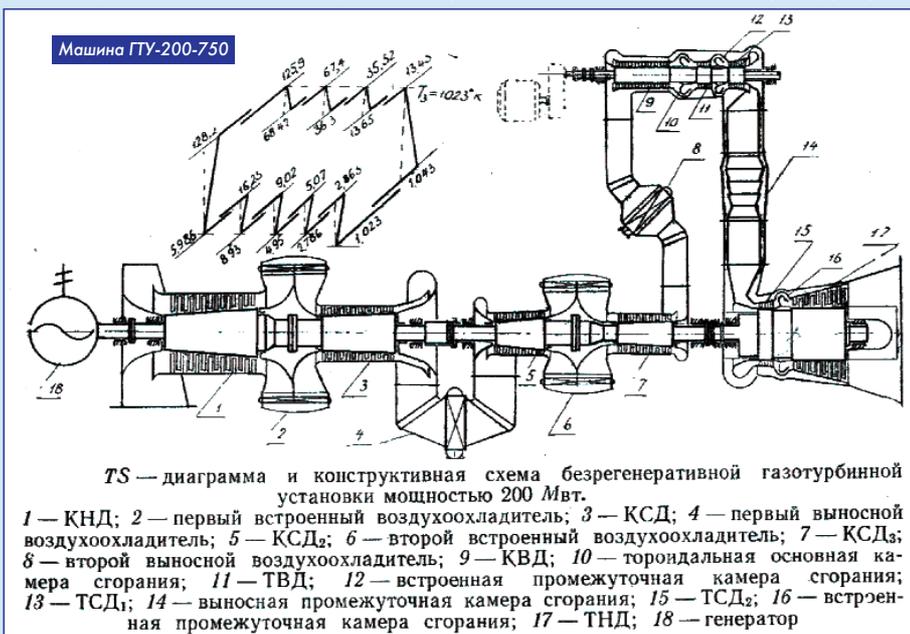
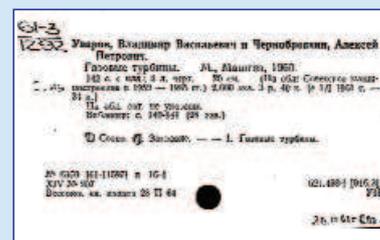
Реалист В.В. Уваров понимает, что для преодоления непонимания и отторжения ГТУ большой мощности нужно "бить во все колокола". 06.01.1959 г. в газете "Правда" коллектив кафедры опубликовал статью "Газовые турбины - в народное хозяйство", а также статью в журнале "Теплоэнергетика" (№10, 1959 г.). Публикации вызвали отклик и в иностранных журналах.

В результате Правительство поручает Харьковскому турбогенераторному заводу им. С.М. Кирова разработать проект ГТУ-200-750 по схеме MBTU.

Результатом совместной работы двух коллективов (1965-

Прошло пятьдесят лет, и на мировом рынке представлены энергетические ГТУ мощностью 593 МВт с КПД 42,8 %, расходом воздуха через компрессор 1051 кг/с, удельной массой 0,838 кг/кВт [SGT5 9000HL, 2017]. По облегченной схеме изотермно-адиабатного цикла (двухступенчатое сжатие с промежуточным охлаждением, двухступенчатое расширение с одной промежуточной камерой сгорания) работают ГТУ-100-750 АО ЛМЗ и японская AGTJ-100A.

В.В. Уваров высоко поднял факел газовых турбин, искры которого разлетелись по всему миру: сработал его крылатый лозунг: **"Больше дерзаний, меньше проторенных дорог !"**



1966 г.) был создан технический проект энергетической ГТУ большой мощности. Проектные расчеты показали, что при $T = 770^\circ\text{C}$ и расходе воздуха через компрессор низкого давления 453 кг/с достигается КПД на клеммах электрогенератора 39,9 % и мощность 194 000 кВт, удельная металлоемкость 3,7 кг/кВт. Расчетами института Теплоэлектропроект показали, что газотурбинная электростанция мощностью 1200 МВт, укомплектованная шестью ГТУ-200-750 по сравнению с паротурбинной на базе шести паротурбинных установок К-200-130 дешевле на 20...25 млн руб., при стоимости последней 85 млн руб.

Хотя и не реализованный в металле проект ГТУ-200-750 доказал всему миру состоятельность ГТУ для большой энергетики.

Владимир Васильевич также положил начала работ кафедры по космосу, ЗГТУ с ядерным реактором, МГД-генератором. В лаборатории кафедры были введена первая в стране экспериментально-исследовательская ЗГТУ космического назначения небольшой мощности (путные работы по анодной защите газопроводов), работы с ОКБ им. Африкантова по ГТУ замкнутого цикла для высокотемпературного газоохлаждаемого ядерного реактора на гелии, работы по совершенствованию систем охлаждения высокотемпературных газовых турбин и др.

После себя Владимир Васильевич оставил богатое наследство, бисером рассыпанное по его статьям и докладам. Писать монографии у него не хватало времени.

В 1970 г. он опубликовал вторую в своей жизни книгу "Газовые турбины и газотурбинные установки", в предисловии к которой написал: "... книгу можно рассматривать как совместный труд автора с огромным числом его учеников, которые получили свои дипломы за более чем сорокалетний период его работы в МВТУ. ... В зависимости от вопросов, которые возникали в процессе практической и учебной работы, приходилось дополнять те или иные разделы теории газовых турбин...". Эта книга Владимира Васильевича - кладезь мудрости, которую можно рекомендовать читать не только молодому поколению студентов и инженеров, но убеленных сединами специалистам.

Таким был Владимир Васильевич Уваров: пионер-первопроходец, инженер, ученый, педагог, изобретатель и экспериментатор, видящий за горизонтом то, что было недоступно глазу других, Большой Человек, УЧИТЕЛЬ.

Характеризуя титанический труд В.В. Уварова академик Б.С. Стечкин сказал так: "Владимира Васильевича не увенчали государственными премиями и академическими званиями, но все мы ценим его труды, его необыкновенную эрудицию, энтузиазм и бескомпромиссность. Только такие люди достигают новых результатов в науке и технике".

При подготовке статьи использовано:

1. Владимир Васильевич Уваров, конструктор, ученый, педагог, патриот. Сборник к юбилейному заседанию Всесоюзного научно-технического семинара имени профессора Вл. В. Уварова, посвященного 50-летию создания первого высокотемпературного авиационного двигателя и 90-летию со дня рождения его конструктора. Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1989 г.

2. Научные статьи В.В. Уварова, Беседы - воспоминания о В.В. Уварове с П.К. Казанджаном, Г.Ю. Степановым, Б.А. Уваровым, А.Г. Романовым. И.Н. Липатовым, Б.Ф. Шором.

3. Материалы архива автора статьи.

